

Ciel et Terre

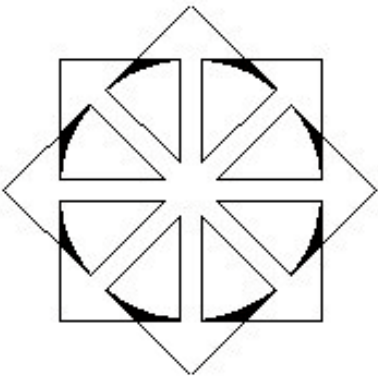
Bulletin de la Société Royale belge d'Astronomie,
de Météorologie et de Physique du Globe

ISSN 0009-6709

Volume 139, n°6 Novembre - Décembre 2023



Cette prise de vue ont été réalisées par Pierre Ponsard au beau milieu d'un champ juste à côté du village hesbignon de Fexhe-le-Haut-Clocher (province de Liège), en utilisant un appareil photo numérique Canon 60D sur un pied fixe avec les réglages suivants : objectif de 10 mm réglé à F/D 4.5, 5 secondes de pose à 1600 ISO, traitement par photoshop puis par Topaz de Noise. Ce cliché a été réalisé à 18.36 hrs (heure belge).



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

Sommaire

- 162 Impact du réchauffement climatique sur les calottes polaires
Xavier Fettweis
- 167 Miscellanées climatiques 2023 : Une manne démocrate pour le captage et le stockage de CO₂ aux USA - Le coût du photovoltaïque doit encore baisser - L'hydrogène vert bientôt rentable - L'ingénierie solaire est-elle une bonne stratégie ?
Guy Stevins
- 180 Découverte de la couronne solaire avec la sonde Parker Solar Probe
Guy Stevins
- 187 Bilan climatologique d'octobre 2023
A.H. / R.D.
- 189 Un premier bilan climatologique de l'automne 2023
A.H. / R.D.
- 190 C'était dans *Ciel et Terre* il y a 95 ans...
Anne Haubrechts

IMPACT DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE SUR LES CALOTTES POLAIRES

Xavier Fettweis
ULiège

En cette année 2023, les records de températures se multiplient un peu partout dans le monde. Le réchauffement climatique n'épargne pas non plus les régions polaires où on observe actuellement le minimum absolu d'étendue de glace de mer en Antarctique alors que le Groenland a vécu un de ses mois de juillet les plus chauds. Ce n'est plus un secret pour personne que le réchauffement climatique, résultant des activités humaines, va faire fondre les calottes polaires mais quels sont les composantes et processus les plus impactés ? Quelles sont les incertitudes associées ? Qu'est-ce qu'est un point de non-retour ? C'est ce que nous allons discuter ci-dessous sans toutefois rentrer dans les détails.

Les glaciers comme les deux grandes calottes polaires (Groenland et Antarctique) gagnent de la masse en hiver grâce à l'accumulation des chutes de neige qui vont fondre en partie en été. La zone où le Bilan de Masse en Surface (BMS) est positif (c'est-à-dire où le gain de masse en hiver est supérieur à la perte estivale en surface) est appelée la zone d'accumulation. La zone où on a plus de fonte en surface que de chutes de neige est appelée la zone d'ablation. Entre ces deux zones, on retrouvera ce qu'on appelle la ligne d'équilibre (BMS=0) dont l'altitude augmente si on a un été chaud et/ou un hiver sec et diminue s'il fait froid en été et/ou plus humide en hiver. Grâce à la gravité terrestre, l'excédent de masse accumulée dans la zone d'accumulation va alors s'écouler vers le bas pour remplacer chaque année la masse

perdue dans la zone d'ablation. Cet écoulement de glace, appelé dynamique glaciaire, permettra alors au glacier de garder une morphologie constante si le glacier est à l'équilibre.

Au Groenland (Pôle Nord, 3 fois la superficie de la France, 7 m en équivalent niveau des mers), la masse accumulée en hiver était deux fois supérieure à la masse perdue par la fonte en été jusqu'à fin des années 90. Cela a permis à la calotte de s'étendre jusqu'à l'Océan Atlantique. Au contact de ces eaux relativement chaudes, la calotte déverse des icebergs comme celui qui a coulé le Titanic en 1912. Ces immenses blocs de glace ne sont pas à confondre avec la glace de mer (appelée aussi banquise) qui est beaucoup plus fine et qui se reforme chaque hiver par regel de l'eau de mer sans impacter le niveau de la mer. Lorsque la calotte était à l'équilibre (période 1960-1990), c'est-à-dire lorsque son Bilan de Masse Total (BMT) était nulle, pour 100 % de masse gagnée en hiver avec les chutes de neiges, 50 % était perdu par la fonte en été et 50 % par la décharge d'icebergs. Ce n'est malheureusement plus le cas depuis les années 2000 où aussi bien la fonte que la décharge d'icebergs ont augmenté... (Shepherd et al., 2019).

En Antarctique (Pôle Sud, 20 fois la superficie de la France, 58 m en équivalent niveau des mers), la température est encore jusque maintenant largement négative en été. La fonte en surface reste

marginale et on n'a donc pas de zone d'ablation comme au Groenland ou les glaciers alpins. Les seules pertes de masses en surface se font via la sublimation du manteau neigeux et l'érosion de la neige par le vent qui va arracher un peu de neige accumulée en surface pour la transporter jusqu'à l'océan. Toutefois ces pertes restent négligeables par rapport à la neige qui s'accumule chaque année sur la calotte et donc le BMS de l'Antarctique est largement positif (~7 fois celui de la calotte du Groenland). Cela a permis à la calotte de recouvrir tout le continent antarctique et même de s'étendre au-dessus de l'Océan Antarctique pour former de gigantesques plateformes flottantes de glace (de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur). Certaines plateformes (appelées *ice shelf* en anglais), comme celle de Ross ou de Wedel, recouvrent des étendues de l'ordre de la superficie de la France. A la terminaison de ces plateformes, la dynamique glaciaire va alors déverser des icebergs comme au Groenland. Alors que la fonte en surface reste marginale en Antarctique, la calotte en s'étendant sur l'océan est en contact avec des eaux plus chaudes qui vont alors faire fondre la glace par en-dessous. C'est ce qu'on appelle la fonte basale. A l'équilibre, la masse perdue en Antarctique i) par les icebergs déversés à l'exutoire des plateformes et ii) par la fonte basale est compensée par l'accumulation des chutes de neiges.

Une première conséquence d'une

hausse des températures sur les deux calottes polaires seront des chutes de neige plus abondantes. Plus il fait chaud, plus l'atmosphère peut contenir de la vapeur d'eau (+7 % pour une hausse de +1 °C), plus il neigera (en hiver) sur les calottes. Au Groenland, ce petit gain de masse (~+5 % pour une hausse de +1 °C) reste toutefois négligeable par rapport à l'emballement de la fonte en surface (~ +25 % pour une hausse de +1 °C) à cause d'une série de boucles de rétroactions positives accélérant l'augmentation de la fonte en surface. Parmi ces processus (déjà actuellement observés) emballant l'augmentation de la fonte, citons :

La rétroaction positive fonte – albédo.

L'albédo d'une surface est son pouvoir réfléchissant des rayonnements du soleil. La neige fraîche va réfléchir 90 % des radiations solaires alors que si cette neige est en train de fondre, son albédo ne sera plus que de 60-70 %. Dans la zone d'ablation où la neige fait place à de la glace vive en été, l'albédo n'est plus que de 30-50 % ce qui veut dire que

cette zone absorbe 2 à 3 fois plus d'énergie du soleil que la zone d'accumulation dont l'albédo moyen est de ~ 70-80 %. Dans un climat plus chaud, la ligne d'équilibre va remonter en altitude en transformant progressivement des zones d'accumulation en zones d'ablation. Comme l'albédo de la zone d'ablation ou de la neige qui fond est plus faible que celui de la zone d'accumulation, la calotte va alors absorber plus d'énergie du soleil ce qui va à son tour augmenter la fonte en surface et transformer d'autant plus de zones d'accumulation en zones d'ablation (Fettweis et al., 2013a).

Diminution de la capacité du manteau neigeux à contenir l'eau de fonte.

Plus de 50 % de la superficie actuelle de la calotte est considérée comme une zone (d'accumulation) de neige sèche ce qui veut dire que même si on observe ces derniers étés quelques événements de fonte atteignant le sommet de la calotte, l'eau de fonte est entièrement absorbée par le manteau de neige et regèle en hiver sans contribuer à une hausse du niveau des mers. Malheureusement, la

multiplication de ces événements depuis les années 2010 est en train de réchauffer et densifier le manteau neigeux en profondeur qui est en train progressivement de perdre sa capacité à retenir les eaux de fontes, accélérant ainsi la perte de masse de la calotte du Groenland (MacFerrin et al., 2019). On observe aussi de plus en plus la formation de lentilles de glace (formées à la fin de l'été avec le regel de l'eau de fonte en surface) rendant complètement imperméable le manteau neigeux où toute formation d'eau de fonte supplémentaire en surface s'écoulera directement vers les océans. Enfin, il est bon de rappeler que, dans la zone d'ablation couverte de glace en été, l'eau de fonte s'écoule directement via un véritable réseau hydrologique en formant des rivières (appelés bédrières) et des lacs d'eau de fonte à la surface de la calotte.

Multiplication des épisodes de pluie.

Depuis quelques années, on observe de plus en plus d'importants événements de pluie jusqu'au sommet de la calotte ce qui contribue à diminuer l'albédo de la neige ou favorise la for-

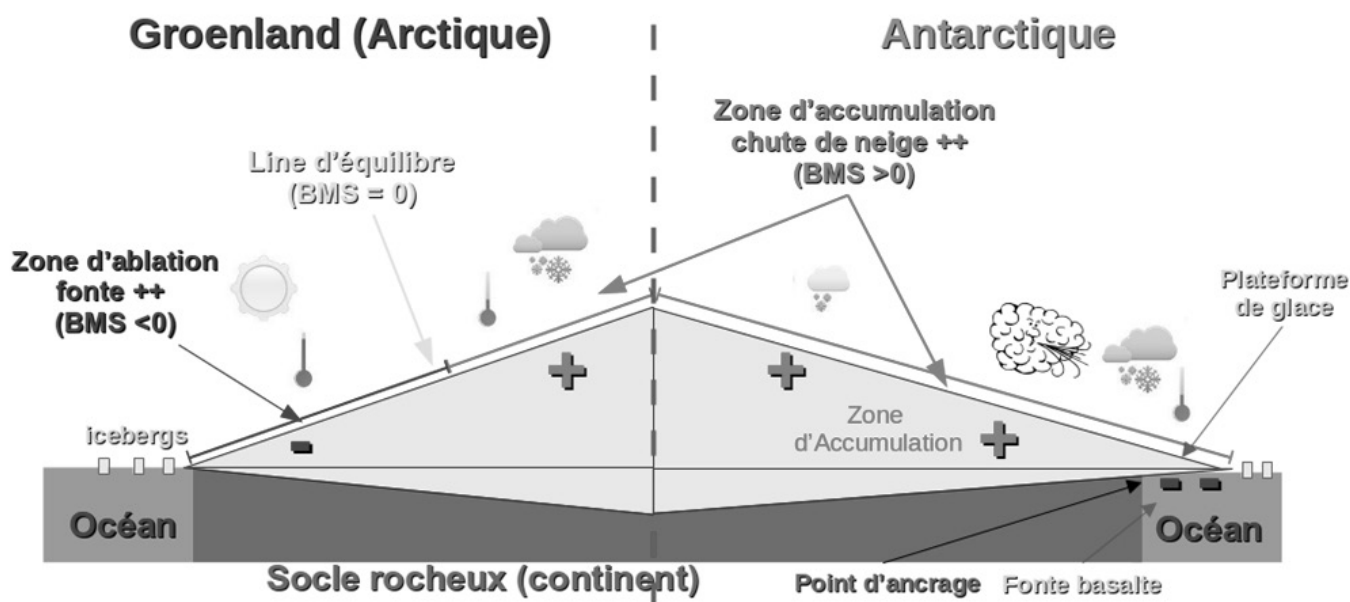


Figure 1 : Coupe transversale schématique illustrant les principaux processus et/ou composants intervenants dans le bilan de masse total actuel des calottes du Groenland (gauche) et de l'Antarctique (droite). (Figure en couleur en page 2 de couverture)

mation de lentilles de glace (Box et al., 2023). De plus, cette progressive transformation des précipitations solides en précipitations liquides impacte aussi le type de nuages au-dessus de la calotte qui deviennent de plus en plus gris (albédo plus faible) et au pouvoir isolant grandissant (effet de serre) par rapport aux nuages constitués de neige ou glace seule. Ces 2 effets combinés (pluie + nuages d'eau liquide) emballent la fonte dans la zone d'accumulation actuelle (Hofer et al., 2017).

La rétroaction positive fonte – élévation.

Si la fonte s'accélère à cause de la hausse des températures, la masse gagnée dans la zone d'accumulation se rétrécissant ne sera plus suffisante pour compenser la perte de masse dans la zone d'ablation. La calotte va alors d'abord se retirer des côtes pour ne plus vèler d'iceberg. Un nouvel état d'équilibre, sans vèlage d'iceberg, pourrait alors être obtenu mais si le réchauffement se poursuit, la calotte va alors progressivement s'amincir. Or pour 100 m de perdu en altitude, la température à la surface de la calotte gagnera $\sim +1$ °C indépendamment de la hausse des températures ce qui emballera la fonte (Le clec'h et al., 2019). La calotte fait actuellement plus de 3 km d'épaisseur. Si elle s'amincit de trop, elle ne pourrait plus se régénérer car son altitude (actuellement de ~ 3000 m) pourrait devenir trop basse même si on revient vers un climat préindustriel. Un point de non-retour serait alors atteint. Cette rétroaction pourrait affecter à long terme la durabilité de la calotte du Groenland si une hausse de température de $+2,5 - 3$ °C se maintient pendant plusieurs siècles.

Changements dans la circulation atmosphérique.

Normalement en été, la calotte

du Groenland est sous l'influence de la Dépression d'Islande qui favorise des vents du nord froids et humides sur la calotte. Mais depuis les années 2000, en plus de la hausse des températures liée au réchauffement global, on observe de plus en plus fréquemment des anticyclones sur la calotte en été (Fettweis et al., 2013b). Ces conditions anticycloniques plus fréquentes qu'avant favorisent un vent chaud du Sud le long de la côte ouest du Groenland et des conditions ensoleillées emballant la fonte dans la zone d'ablation. Si de tels changements de circulation se prolongent dans le futur (ce qui n'est actuellement pas prévu par les modèles du climat), il faudrait multiplier les projections futures d'augmentation de la fonte par un facteur deux (Delhase et al., 2018) !

On pourrait résumer cette section sur le Groenland en retenant qu'avec la hausse des températures globales, l'augmentation significative de la fonte en surface par rapport aux chutes de neige ne permettra plus à la calotte d'atteindre l'océan. Si la hausse de température se poursuit pendant plusieurs siècles, la calotte pourrait alors suffisamment s'amincir pour atteindre un point de non-retour même si on revient vers un climat préindustriel.

En Antarctique, les processus impactant la stabilité future de la calotte sont différents. Même avec une hausse significative de la température, la fonte en surface restera marginale et commencera à devenir non négligeable pour des hausses de températures excédents $+8$ °C en Antarctique (Kittel et al., 2021). D'ici là, la calotte va continuer à amasser de la masse en surface à cause de chutes de neiges qui vont devenir plus abondantes, ce qui va accélérer la dynamique glaciaire à cause de l'excès de masse accumulée.

Le réel danger pour l'Antarctique sont les plateformes glaciaires qui jouent le rôle d'arc boutant pour une cathédrale ou encore de bouchon d'une bouteille de champagne. Si elles venaient à se rompre, toute la masse accumulée en amont de ces plateformes pourrait alors subitement s'écouler vers l'océan et certains pans entiers de la calotte pourraient même s'effondrer dans l'océan comme si une cathédrale venait à perdre ses arcs boutants. Depuis quelques années, on observe déjà l'effondrement de petites plateformes glaciaires, principalement par hydrofracture : les quelques événements de fonte déjà observés génèrent de l'eau de fonte qui va s'accumuler dans les crevasses, qui en regelant en hiver favorise l'éclatement de celles-ci, disloquant en plusieurs morceaux les plateformes glaciaires déjà fragilisés à leur base par un océan de plus en plus chaud. Avec la hausse des températures, ce phénomène pourrait toucher de plus grandes plateformes comme celles des glaciers Thwaites et Pin Island en Antarctique de l'Ouest qui, s'elles venaient à se disloquer, pourrait générer une hausse abrupte du niveau des mers de plusieurs mètres. A ce risque potentiel d'hydrofractures des plateformes, il faut rajouter un recul probable de la ligne d'ancrage (point d'attache au continent) de la calotte sachant que le contient antarctique est par endroit sous le niveau de la mer à cause du poids de la calotte (qui fait 3-4 km d'épaisseur). Comme la calotte est en train de fondre par en-dessous, certains points d'attache pourraient fondre au contact d'un océan de plus en plus chaud permettant l'infiltration d'eau de mers en-dessous de la calotte. Ceci amplifierait ainsi l'instabilité de la calotte générée par une dislocation de ses arc-boutants : les plateformes flottantes (Pattyn, 2018).

Groenland (Arctique)

Antarctique

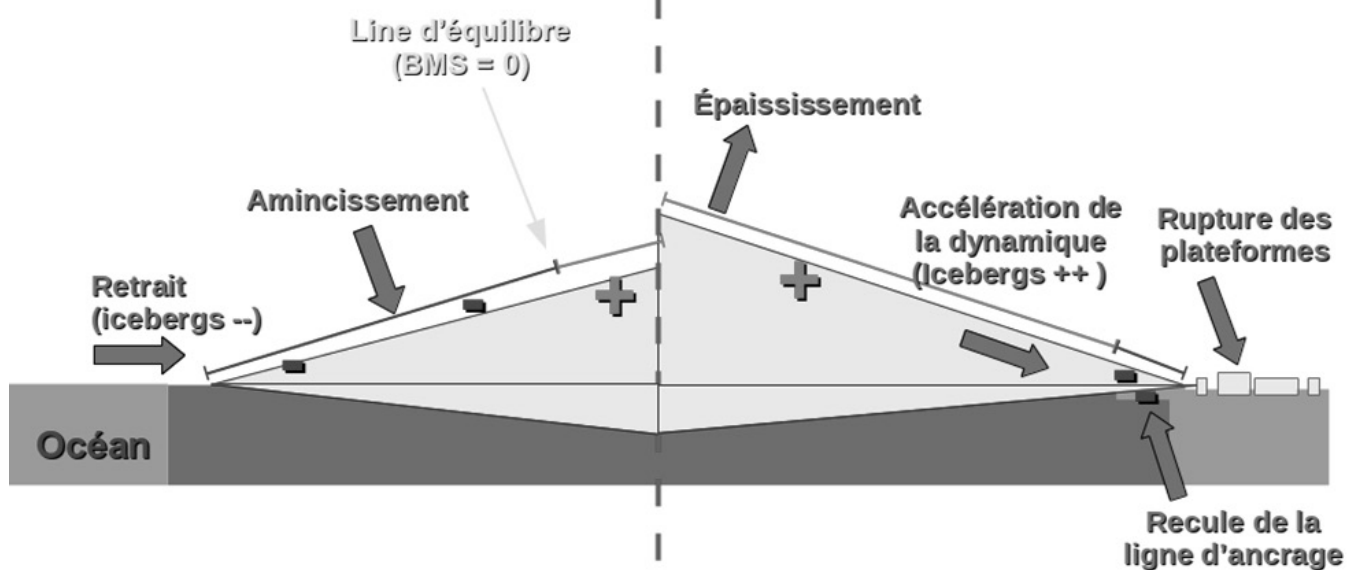


Figure 2 : Coupe transversale schématique illustrant les principaux processus et/ou composants impactant l'évolution future des deux calottes.

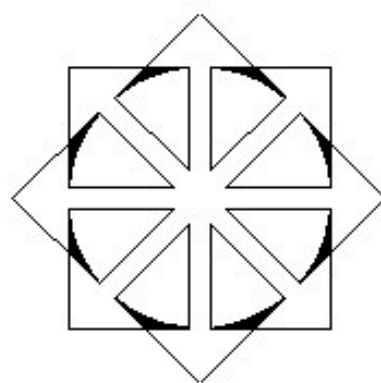
(Figure en couleur en page 2 de couverture)

Avec le scénario actuellement le plus probable, la contribution de la calotte du Groenland (qui fond par «au-dessus») à la hausse du niveau des mers en 2100 serait de $\sim +20$ cm. Pour l'Antarctique (qui fond par «en-dessous»), les estimations vont de $\sim +20$ cm (accélération de la dynamique glaciaire) à $\sim +1$ m si une partie de l'Antarctique de l'Ouest venait à s'effondrer (Edwards et al., 2021). Par ailleurs, pour une question d'équilibre de la gravité terrestre, il est important de savoir que les eaux de fonte du Groenland vont dans l'hémisphère Sud alors que les côtes européennes sont plutôt sensibles à ce qui se passe en Antarctique de l'Ouest. C'est pourquoi certains glaciers, comme ceux dits de l'apocalypse (Thwaites et Pin Island), sont maintenant en permanence monitorés en profondeur et en surface pour y déceler tout effondrement possible. Aussi bien au Groenland qu'en Antarctique, les modèles suggèrent qu'une hausse de température limitée à $+1.5$ °C permettrait de maintenir la stabilité des deux calottes polaires (Pattyn et al.,

2018). Au-delà de ce seuil, une fonte irréversible de la calotte du Groenland et/ou une déstabilisation de l'Antarctique de l'Ouest pourraient devenir malheureusement probable même si toutes ces estimations restent incertaines car :

- pour le Groenland, elles sont très dépendantes de la durée du réchauffement et des éventuels changements de circulation en été auxquels la calotte devrait faire face ;
- pour l'Antarctique, elles reposent sur la probabilité d'occurrence d'événements chaotiques d'effondrement suggérés par certains modèles mais non encore observés.

Pour conclure, une hausse de la température globale limitée à $+1.5$ °C permettrait de maintenir nos deux calottes polaires. Au-delà, une fonte irréversible devient probable même si de nombreuses incertitudes restent...



Références

- Box, J. E., Nielsen, K. P., Yang, X., Niwano, M., Wehrlé, A., van As, D., Fettweis, X., Køltzow, M. A. Ø., Palmason, B., Fausto, R. S., van den Broeke, M. R., Huai, B., Ahlstrøm, A. P., Langley, K., Dachauer, A., & Noël, 2023 : . Greenland ice sheet rainfall climatology, extremes and atmospheric river rapids. *Meteorological Applications*, 30 (4). doi:10.1002/met.2134.
- Delhasse, A., Fettweis, X., Kittel, C., Amory, C., & Agosta, C., 2018 : Brief communication: Impact of the recent atmospheric circulation change in summer on the future surface mass balance of the Greenland Ice Sheet. *The Cryosphere*. doi:10.5194/tc-12-3409-2018.
- Edwards, T., Nowicki, S., Marzeion, B., Hock, R., Goelzer, H., Seroussi, Jourdain, N., ISMIP6 team, Fettweis, X., & ISMIP6 team, 2021 : Projected land ice contributions to twenty-first-century sea level rise. *Nature*, 593, 74–82. doi:10.1038/s41586-021-03302-y.
- Fettweis, X., Franco, B., Tedesco, M., van Angelen, J., Lenaerts, J., van den Broeke, M., & Gallée, H., 2013a : Estimating the Greenland ice sheet surface mass balance contribution to future sea level rise using the regional atmospheric climate model MAR. *The Cryosphere*, 7, 469-489. doi:10.5194/tc-7-469-2013.
- Fettweis, X., Hanna, E., Lang, C., Belleflamme, A., Erpicum, M., & Gallée, H., 2013b : Important role of the mid-tropospheric atmospheric circulation in the recent surface melt increase over the Greenland ice sheet. *The Cryosphere*, 7, 241–248. doi:10.5194/tc-7-241-2013.
- Hofer, S., Tedstone, A., Fettweis, X., & Bamber, J., 2017 : Decreasing cloud cover drives the recent mass loss on the Greenland Ice Sheet. *Science Advances*, 3 (6). doi:10.1126/sciadv.1700584.
- Kittel, C., Amory, C., Agosta, C., Jourdain, N. C., Hofer, S., Delhasse, A., Doutreloup, S., Huot, P.-V., Lang, C., Fichet, T., & Fettweis, X., 2021 : Diverging future surface mass balance between the Antarctic ice shelves and grounded ice sheet. *The Cryosphere*, 15 (3), 1215-1236. doi:10.5194/tc-15-1215-2021.
- Le cec'h, S., Charbit, S., Quiquet, A., Fettweis, X., Dumas, C., Kageyama, Wyard, C., & Ritz, C., 2019. Assessment of the Greenland ice sheet–atmosphere feedbacks for the next century with a regional atmospheric model coupled to an ice sheet model. *The Cryosphere*, 13, 373-395. doi:10.5194/tc-13-373-2019.
- MacFerrin, M., Machguth, H., van As, D., Charalampidis, C., Stevens, C., Heilig, A., Vandecrux, B., Langen, P., Mottram, R., Fettweis, X., van den Broeke, M., Pfeffer, W., Moussavi, M., & Abdalati, W., 2019 : Rapid expansion of Greenland's low-permeability ice slabs. *Nature*, 573. doi:10.1038/s41586-019-1550-3.
- Pattyn, F., 2018: The paradigm shift in Antarctic ice sheet modelling. *Nat Commun* 9, 2728. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05003-z>.
- Pattyn, F., Ritz, C., Hanna, E., Asay-Davis, X., DeConto, R., Durand, G., Favier, L., Fettweis, X., Goelzer, H., Golledge, N., Kuipers Munneke, P., Lenaerts, J., Nowicki, S., Payne, A., Robinson, A., Seroussi, H., Trusel, L., & van den Broeke, M., 2018 : The Greenland and Antarctic ice sheets under 1.5 °C global warming. *Nature Climate Change*, 1758-6798. doi:10.1038/s41558-018-0305-8.
- Shepherd, A., Ivins, E., Rignot, E., the IMBIE team, Fettweis, X., & the IMBIE team, 2019 : Mass balance of the Greenland Ice Sheet from 1992 to 2018. *Nature*, doi:10.1038/s41586-019-1855-2.

MISCELLANÉES CLIMATIQUES 2023

Guy Stevens, Ir

Une manne démocrate pour le captage et le stockage de CO₂ aux USA – Le coût du photovoltaïque doit encore baisser – L'hydrogène vert bientôt rentable – L'ingénierie solaire est-elle une bonne stratégie ?

(Traduction assistée par www.DeepL.com/translator)

UNE MANNE DÉMOCRATE POUR LE CAPTAGE ET LE STOCKAGE DE CO₂ AUX USA

Comment les milliards de dollars de nouveaux financements pour les démonstrations à l'échelle commerciale seront-ils dépensés judicieusement ?

Introduction

En novembre 2022, l'Administration démocrate a dégagé plus de 10 milliards de dollars sur cinq ans pour des projets de R&D au profit de programmes visant le captage, l'utilisation, la transport et le stockage du CO₂ (CCUS). Le département de l'énergie (DoE) n'avait initialement demandé que 530 millions de dollars pour l'année fiscale en cours et se trouve confronté à un défi de taille. Un tiers des crédits vont au captage direct de CO₂ dans l'air (CDA), un autre tiers à des technologies de capture du CO₂ issu de centrales électriques à combustibles fossiles et d'installations industrielles et le dernier tiers aux démonstrations de stockage du CO₂, sans en oublier le transport.

Le DoE aura fort à faire. Il devra réaliser six démonstrations commerciales de captage du carbone : deux dans des centrales au charbon, deux dans des centrales au gaz naturel et deux pour de grands émetteurs industriels tels que les cimenteries, la sidérurgie ou l'industrie chimique.

Les programmes CCUS et CDA, ainsi que des démonstrations de production d'énergie géothermique et d'hydrogène vert,

devraient permettre de réduire cumulativement les émissions de CO₂ de 1,4 à 2,5 gigatonnes au cours des dix-sept prochaines années. En 2019, les États-Unis ont émis 5,0 gigatonnes de CO₂, selon l'Administration américaine d'information sur l'énergie.

Fin janvier 2023, le DoE a reçu des principaux acteurs impliqués leurs suggestions sur ce gigantesque programme. *ExxonMobil* et d'autres entreprises de la région de Houston ont manifesté leur intérêt pour la création d'un centre de capture des émissions des raffineries et d'autres sources industrielles le long du

Houston Ship Channel. Le CO₂ serait transporté vers le golfe du Mexique, où plusieurs sites géologiques pourraient stocker 500 gigatonnes. *Denbury Inc* et *Gulf Coast Midstream Partners* ont récemment annoncé leur intention de développer des opérations de stockage et d'injection de carbone géologique près de Houston, dans une propriété qui pourrait contenir 400 millions de tonnes de CO₂. L'entreprise pourrait commencer à injecter du CO₂ sur le site de Houston en 2025, à raison de 1,5 million de tonnes par an dans un premier temps.

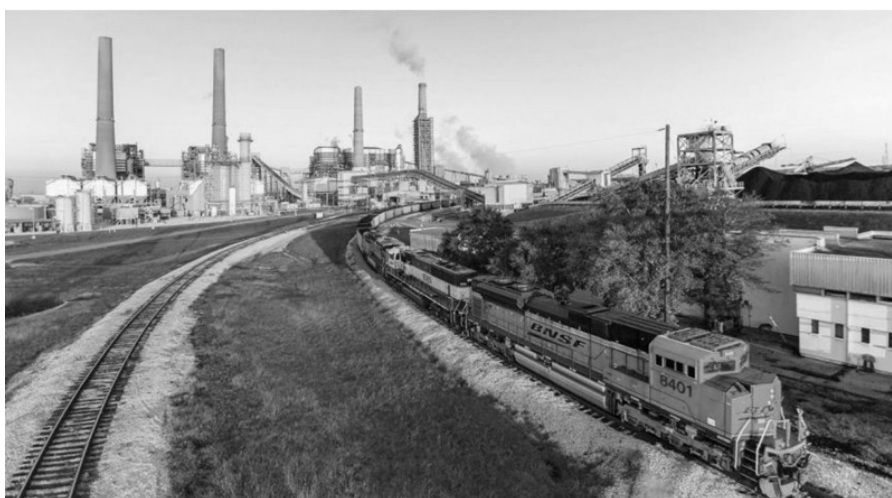


Figure 1 : Centrale au Texas avec capture du CO₂. L'installation Petra Nova au Texas est la seule centrale électrique commerciale à combustible fossile des États-Unis capable de capturer ses émissions de dioxyde de carbone. (Crédits : NRG Energy Inc.)

La quasi-totalité de la faible quantité de CO₂ capturée aux États-Unis aujourd'hui est injectée dans des gisements de pétrole épuisés pour en extraire du pétrole supplémentaire, un processus connu sous le nom de *Récupération assistée du pétrole*.

Augmentation d'échelle

Les crédits prévus spécialement pour le CDA sont destinés à la création de quatre « pôles ou centre régionaux ». Chaque centre est défini comme un réseau regroupant des projets de CDA, des entreprises ayant conclu des accords d'enlèvement de CO₂, des infrastructures de transport de CO₂, des ressources de stockage souterrain et d'autres infrastructures de séquestration du carbone.

Chaque centre devrait avoir une capacité d'extraction minimale de 1 million de tonnes de CO₂ par an. Ceci constitue deux ordres de grandeur de plus que la capacité annuelle de 4 000 tonnes de la première usine commerciale de CDA au monde, construite par la société suisse *Climeworks*, qui a commencé à fonctionner en Islande fin 2021. Un consortium composé de *Carbon Engineering*, basé au Canada, et d'*Occidental*, une société basée aux États-Unis, a annoncé des plans pour une installation d'un million de tonnes dans le bassin permien, à l'ouest du Texas. La moitié de cette capacité totale devrait être opérationnelle en 2024.

L'accès à l'électricité propre est un autre facteur à prendre en compte pour l'emplacement du centre, car le fonctionnement du CDA à partir d'énergie fossile entraînerait probablement une augmentation nette des émissions de CO₂. En effet, si on construisait un grand champ solaire pour alimenter une centrale CDA, on

pourrait se demander pourquoi ne pas plutôt utiliser cette énergie solaire pour fermer une centrale à gaz ou à charbon ! Tant que la plupart des centrales à combustibles fossiles n'auront pas été fermées ou que leurs émissions n'auront pas été capturées le CDA devrait être considéré comme une activité de recherche et de développement et être gardé en réserve.

Ces centres sont principalement destinés à soutenir les technologies d'extraction chimique du CO₂, telles que celles de *Carbon Engineering*, *Climeworks* et *Global Thermostat*, basées à New York. Les méthodes moins prestigieuses et plus naturelles de capture d'air, telles que la minéralisation du carbone, le reboisement et la bioénergie avec capture et stockage du carbone, ne sont apparemment pas éligibles (voir l'article de l'auteur dans *Ciel et Terre* **138**, 04 p.92, 2022).

Un rapport publié en novembre par le forum *Innovation for Cool Earth*, basé au Japon, indique qu'avec un soutien politique fort et durable de la part des gouver-

nements du monde entier, les processus de minéralisation du carbone pourraient éliminer 1 gigatonne de CO₂ par an de l'atmosphère d'ici 2035 et 10 gigatonnes par an d'ici 2050. Depuis 2014, le forum organise une conférence annuelle sur les innovations technologiques visant à atténuer le changement climatique.

Le rapport le plus récent note que, contrairement à la CDA, les réactions chimiques qui se produisent lors de la minéralisation ne nécessitent aucun apport d'énergie et que les ressources du type de roche nécessaire sont largement répandues dans le monde.

En novembre dernier, la secrétaire d'État à l'énergie, Jennifer Granholm, a annoncé un « *plan carbone négatif* » dont l'objectif est de retirer des gigatonnes de CO₂ de l'atmosphère et de les stocker de manière permanente pour moins de 100 dollars la tonne, alors que le coût actuel se situe entre 200 et 600 dollars par tonne.



Figure 2 : Centrale géothermique en Islande avec capture du CO₂. En Islande, *Climeworks* est la première usine commerciale au monde qui capture le dioxyde de carbone directement dans l'air. C'est une entreprise suisse qui fonctionne à l'énergie géothermique. Elle a une capacité de captage de 4 000 tonnes de CO₂ par an. Le gaz purifié est injecté en profondeur, où il se minéralise avec la roche souterraine. (Crédits : *Climeworks*)

Il n'est pas certain qu'un seul des trois douzaines de projets américains de captage et de stockage du carbone annoncés, qui sont en cours de planification ou de construction, puisse prétendre à devenir un démonstrateur. Nombre d'entre eux ont déjà reçu des subventions du DoE pour des travaux d'ingénierie et de conception préliminaires. L'un d'entre eux, *NET Power*, a annoncé en novembre qu'il fournissait au réseau électrique sans émission de CO₂ à partir du gaz naturel, grâce à une centrale pilote utilisant le cycle *Allam-Fetvedt*, qui brûle le gaz naturel avec de l'oxygène pur, au lieu de l'air, et utilise du CO₂ supercritique au lieu de la vapeur comme fluide de travail pour actionner une turbine.

Un bilan pas très positif jusque'ici

Le bilan du DoE en matière de démonstrations de CCUS est loin d'être brillant. Sur les neuf projets soutenus par l'Agence pour un montant total de 1,1 milliard de dollars entre 2010 et 2017, seuls trois ont été menés à bien. La centrale électrique au charbon *Petra Nova*, au Texas, est la seule centrale à énergie fossile équipée

d'un CCUS en état de marche aux États-Unis ; elle a bénéficié d'un financement de 195 millions de dollars. Elle a cessé ses opérations de capture en 2020 en raison de la baisse de la demande de CO₂ dans le cadre de la récupération assistée du pétrole.

Sont toujours en activité une usine de production d'hydrogène située au Texas et gérée par *Air Products and Chemicals*, qui a bénéficié d'une aide fédérale de 284 millions de dollars, et une usine d'éthanol située dans l'Illinois et gérée par *Archer Daniels Midland*, qui a reçu au moins 140 millions de dollars. Cette usine injecte le CO₂ dans un stockage géologique spécifique situé à proximité. Le CO₂ d'*Air Products* est utilisé pour la récupération assistée du pétrole. *FutureGen*, un démonstrateur de captage et de stockage géologique datant de 2003, a été abandonné en 2008, puis reconverti en usine de combustion d'oxygène et rebaptisé *FutureGen 2.0* en 2010. Après avoir dépensé 200 millions de dollars de fonds publics, le projet a été suspendu en 2015, lorsque le DoE a constaté qu'il ne pourrait pas être achevé avant l'expiration des délais légaux. L'Agence avait prévu de contribuer à hauteur d'un mil-

liard de dollars au total.

La pire débâcle a peut-être eu lieu dans le Mississippi, avec le projet *Kemper coal CCUS* de *Southern Company*, auquel le DoE a contribué à hauteur d'au moins 270 millions de dollars. Estimée à l'origine à 2,4 milliards de dollars, sa construction a atteint 7,5 milliards de dollars avant d'être abandonnée en 2017 et d'être convertie au gaz naturel sans capture du carbone.

David Hart, chercheur principal à la Fondation pour les technologies de l'information et l'innovation, reconnaît qu'il existe un risque d'échec supplémentaire si les projets ne sont pas gérés correctement. Certains projets antérieurs ont tenté de démontrer trop de nouvelles technologies à la fois ou de les développer trop rapidement, explique-t-il. « *Avec tout l'argent qui afflue, il est important de réaliser des études préliminaires et d'avancer pas à pas, plutôt que de vouloir décrocher la lune d'un seul coup.* »

D'après un article de Physics Today, 75(1), 22, 2022, signé par David Kramer.

LE COÛT DU PHOTOVOLTAÏQUE DOIT ENCORE BAISSER

Aux Etats-Unis, le Département de l'Énergie a revu à la baisse ses objectifs de prix de l'énergie photovoltaïque et de l'énergie solaire thermique.

Introduction

L'utilisation de l'énergie solaire a connu une croissance spectaculaire au cours de la dernière décennie, mais une croissance bien plus importante sera nécessaire pour réaliser l'ambitieux projet de décarboner le réseau électrique américain d'ici à 2035. En 2020, l'énergie solaire ne représentait que 2,3 % de la production d'électricité aux États-Unis et les installations photovoltaïques

avaient une capacité de 19,2 GW en courant continu (GW/DC), une augmentation de 43 % en un an.

L'énergie solaire s'est classée au premier rang des nouvelles sources de production d'électricité au cours des deux dernières années. Elle représentait 40 % de l'ensemble des nouvelles capacités de production en 2020 et devrait quadrupler au cours de la prochaine décennie, pour at-

teindre plus de 400 GW/DC.

En mars, le Département de l'énergie (DoE) a annoncé un nouvel objectif visant à réduire de 60 % le coût de l'énergie photovoltaïque pour les entreprises d'ici à 2030. Le nouveau coût moyen de l'énergie solaire (LCOE) mise en réseau est 2 ¢/kWh (centime de dollar US par kilowattheure) alors que la moyenne actuelle est de 4,6 ¢/kWh. Le LCOE est une estimation des coûts de construc-

tion et d'exploitation sur une période donnée. L'Agence a avancé à 2025 l'objectif de 3 ¢/kWh qu'elle s'était fixé pour 2030.

Les réductions de coûts proposées pour les systèmes photovoltaïques s'inscrivent dans le prolongement des réductions réalisées au cours de la dernière décennie. Aujourd'hui, les systèmes photovoltaïques sont la source d'électricité la moins chère dans certaines régions de la Ceinture ensoleillée, lorsque le Soleil brille. On prévoit que le coût de construction d'une centrale photovoltaïque de 10 MW chutera de plus de 50 % d'ici 2030, pour atteindre 400 millions de dollars, contre 840 millions de dollars aujourd'hui.

Cependant, à mesure que les systèmes photovoltaïques commencent à répondre à une fraction plus importante de la demande totale, leur intermittence devient un obstacle sérieux à la poursuite du déploiement, a dé-

claré un fonctionnaire du DoE. Cette variabilité doit être traitée par des batteries et d'autres types de stockage qui en augmentent considérablement le coût total. Les nouveaux objectifs du DoE reflètent la nécessité de compenser les coûts de stockage pour permettre à l'énergie solaire de rivaliser avec d'autres sources non intermittentes, telles que le gaz naturel qui est la source d'énergie permanente la plus importante et la moins chère.

Objectif de réduction des coûts

En 2012, au début de l'initiative *SunShot*, l'effort de réduction des coûts de l'administration Obama, les objectifs de LCOE pour le photovoltaïque à l'échelle des services publics en 2020 ont été fixés à 6 ¢/kWh. Cet objectif a été atteint quatre ans plus tôt, et l'objectif de 3 cents a été institué pour 2030. La valeur de référence du LCOE est calculée pour un site disposant de ressources solaires modérées, tel que Kansas

City et représente une valeur moyenne nationale.

Becca Jones-Albertus, directrice du bureau des technologies solaires du DoE, explique que le plan zéro carbone nécessitera des centaines de gigawatts de nouvelles capacités solaires jusqu'en 2035. « *Nous devons multiplier par deux ou même par cinq les déploiements annuels. Et le moyen le plus efficace pour y arriver est de faire baisser les coûts.* » Or, les coûts des systèmes à grande échelle ont déjà chuté de 80 % au cours des dix dernières années, grâce à une myriade de développements technologiques.

La taille des gaufres de silicium cristallin, ces tranches à partir desquelles sont fabriquées les cellules solaires, est passée de 156 mm² à 210 mm², ce qui signifie moins de connexions et une réduction des pertes dues à l'espacement et aux contacts. Elles sont également devenues plus fines, réduisant leurs coûts de fabrication. La technologie des cellules photovoltaïques monocristallines, plus efficace, a dépassé les cellules multicristallines en termes de parts de marché au cours des cinq dernières années.

En conséquence, l'efficacité des panneaux solaires, qui contiennent des dizaines de cellules, a plus que doublé, alors qu'elle était d'environ 10 % au début des années 2000. Les panneaux installés dans le nord du Massachusetts il y a cinq ans ont une puissance de 360 watts, et il est possible aujourd'hui d'en trouver de 400 ou 450 watts, voire plus.

Les objectifs de LCOE pour les installations résidentielles et commerciales sont fixés à 5 ¢/kWh et 4 ¢/kWh, respectivement. Leurs valeurs actuelles sont respectivement de 12,8 ¢/



Figure 1 : Une installation solaire de 2,8 MW (située à Wareham dans le Massachusetts). Dans un scénario sans carbone, l'énergie solaire devrait représenter 30 à 50% de la production d'électricité aux États-Unis d'ici 2050. (Crédits : Stephen Coffrin)

SOLAR ENERGY COST-REDUCTION PROGRESS AND GOALS
Photovoltaïques (PVs) and concentrated solar-thermal power (CSP)

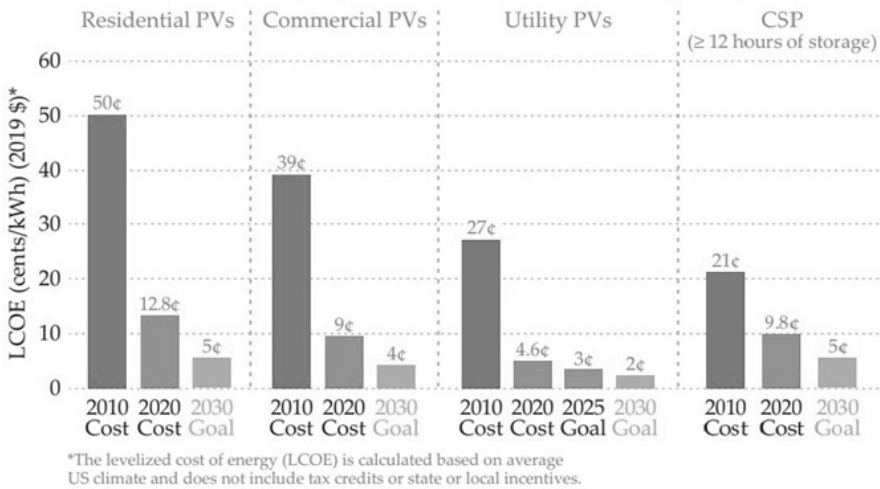


Figure 2 : Coûts directs du photovoltaïque.
Les coûts de l'énergie photovoltaïque ont fortement baissé au cours de la dernière décennie. Les réductions futures seront probablement moins spectaculaires. (Crédits : DoE.)

kWh et 9 ¢/kWh. Selon un fonctionnaire du département, il sera difficile d'atteindre ces objectifs d'ici à 2030. La plupart des surcoûts sont imputables aux *coûts indirects* (dont les frais d'autorisation, de vente et de marketing, d'interconnexion, les inspections et les autres frais généraux et administratifs). Collectivement, ces coûts représentent une fraction importante du coût total, mais ils sont beaucoup plus élevés pour les systèmes résidentiels et commerciaux.

Améliorer les matériaux

Pour réduire encore les coûts de l'énergie solaire, il faudra notamment améliorer l'efficacité des deux technologies commerciales actuelles, le silicium cristallin et le tellure de cadmium (CdTe), pour les rapprocher de leurs limites théoriques. L'adoption par l'industrie de cellules multifonctionnelles, composées de deux ou plusieurs couches de semi-conducteurs empilées avec des bandes interdites différentes, améliorera les rendements en utilisant une plus grande partie du spectre solaire. Les modules

bifaciaux, qui captent les photons réfléchis par le sol sur la face arrière des panneaux, pourraient augmenter les rendements de 5 à 10 %.

Le silicium cristallin représente actuellement 80 % du marché photovoltaïque américain, et cette technologie continuera à dominer le paysage photovoltaïque au cours de la prochaine décennie, selon les analystes du marché. Les 20 % restants sont constitués par le CdTe, qui est le domaine exclusif d'une entreprise américaine, *First Solar*. En mars, le DoE a réservé 20 millions de dollars pour la création d'un consortium visant à augmenter la production nationale de matériaux et de panneaux photovoltaïques au CdTe, en vue d'en réduire le coût en visant des rendements cellulaires supérieurs à 26 %.

Selon M. Jäger-Waldau, les obstacles à l'entrée sur le marché du CdTe sont importants. La technologie de *First Solar* est brevetée et, contrairement au silicium, il n'existe pas d'équipement de fabrication prêt à l'emploi. De plus, le cadmium est toxique, son

utilisation est limitée par la directive de l'Union européenne sur la restriction des substances dangereuses. Mais comme le point de fusion du CdTe est trois fois plus élevé que celui du cadmium, sa grande stabilité et son insolubilité dans l'eau limitent sa dispersion en cas d'accident. D'autre part, le tellure, qui est un sous-produit de l'extraction du cuivre, est à peu près aussi rare et cher que le platine.

Énergie solaire thermique concentrée (CSP)

La technologie des héliostats est l'exemple le plus connu d'énergie solaire thermique concentrée. Ce sont des milliers de miroirs qui réfléchissent la lumière du Soleil vers un concentrateur central utilisant le sel fondu comme accumulateur thermique. Les coûts des héliostats ont été divisés par deux au cours de la dernière décennie pour atteindre 100 \$/m², ils pourraient à nouveau être divisés par deux.

Le DoE soutient la recherche sur les CSP. Il existe plusieurs moyens d'en améliorer l'efficacité. On peut par exemple réduire l'épaisseur du verre qui recouvre la couche d'argent ou remplacer le verre par un substrat polymère. L'augmentation de réflectivité ainsi obtenue pourrait passer de 93 % à 97 %, permettant de réduire le nombre de miroirs. Le sel fondu pourrait également être remplacé par des particules de silice comme moyen de transfert de chaleur. Ces particules bon marché peuvent être chauffées à environ 800 °C, contre 565 °C au maximum pour le sel. Cette température plus élevée pourrait permettre de remplacer la vapeur par du CO₂ supercritique pour actionner les turbines. L'amélioration de l'efficacité thermodynamique de ce cycle pourrait réduire la taille des cen-

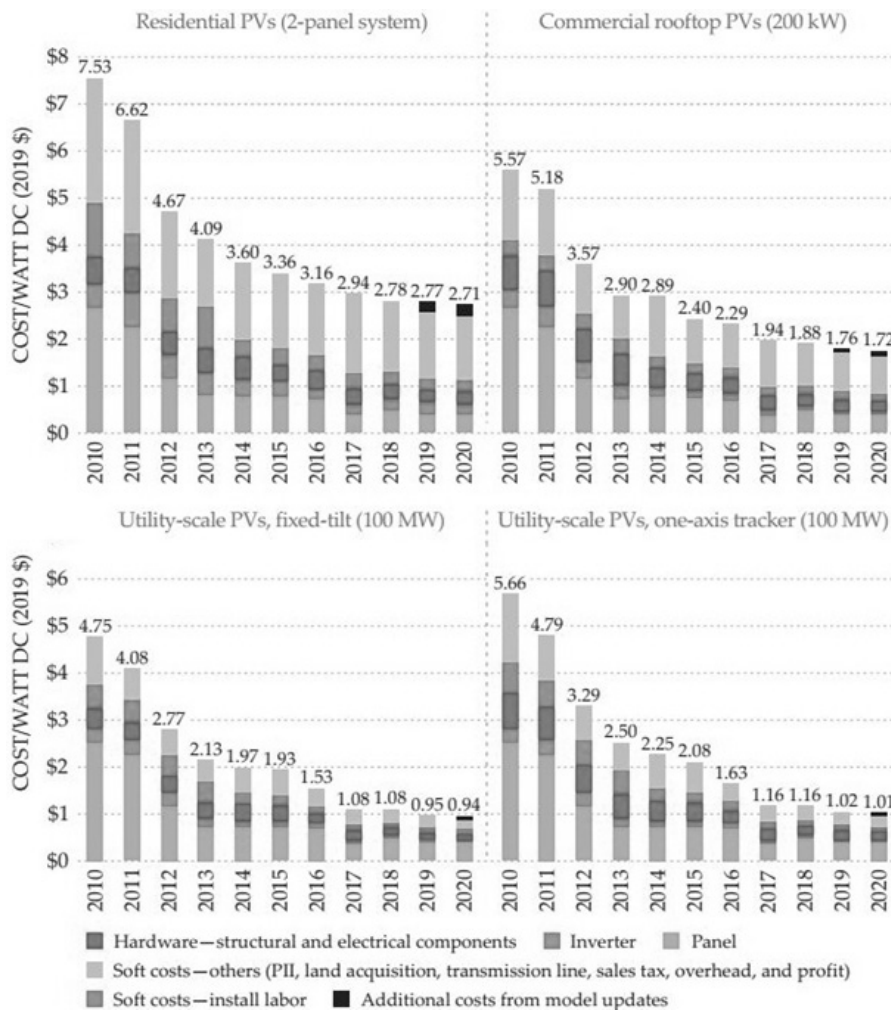


Figure 3 : Coûts indirects du photovoltaïque. Les coûts indirects ont diminué de manière significative pour tous les types de systèmes d'énergie solaire, mais ils restent proportionnellement plus élevés pour les installations à l'échelle résidentielle et commerciale. Le coût des panneaux solaires a fortement baissé depuis 2010. Les panneaux à grande échelle peuvent être fixes (en bas à gauche) ou suivre le Soleil tout au long de la journée (en bas à droite). (Crédits : National Renewable Energy Laboratory)

L'HYDROGÈNE VERT BIENTÔT RENTABLE

Les États-Unis se préparent à accueillir des centres de production, de distribution et d'utilisation d'hydrogène propre.

Introduction

L'administration démocrate a annoncé un prêt de 504 millions de dollars pour financer la construction d'une installation innovante de production et de stockage d'hydrogène sans émission de carbone dans l'Utah. Le département de l'énergie (DoE) a présenté des plans visant à engager 8 milliards de dollars pour créer jusqu'à 10 centres régionaux de fabrication et de stockage de

l'hydrogène. Le projet *Advanced Clean Energy Storage (ACES)* à Delta, dans l'Utah, financera la plus grande installation au monde lorsqu'elle sera achevée en 2025. L'hydrogène vert est produit sans émission de dioxyde de carbone (CO₂) par électrolyse de l'eau alimentée par de l'électricité renouvelable. La capacité de stockage de ce projet s'élève à 5 500 tonnes et équivaut à la capacité de stockage des batteries à l'échelle du réseau national prévue pour

trales à un dixième de celle d'une centrale à charbon moderne.

Le stockage d'énergie de longue durée (six heures ou plus) à l'échelle des services publics gagne en importance à mesure que la production d'énergie éolienne et solaire augmente. Le stockage est très important lorsque le Soleil ne brille pas ou lorsque le vent tombe. L'objectif en matière de coûts pour le CSP est d'atteindre 5 ¢/kWh d'ici 2030, soit la moitié de son coût actuel. Diverses analyses ont montré que si l'objectif de 5 cents est atteint, le CSP avec stockage thermique de longue durée sera moins coûteux que l'utilisation massive de batteries, car cette technologie présente une grande souplesse d'utilisation. Pour atteindre l'objectif de 2035, il faudra viser un stockage de longue durée.

D'après un article de *Physics Today*, 74(6), 27, 2021, signé par David Kramer.

2030, explique Jigar Shah, directeur de l'Office des programmes de prêts du ministère de l'énergie.

L'hydrogène sera stocké à une pression de 69 bars ou plus dans des cavernes creusées dans des formations salines souterraines. Il sera brûlé en combinaison avec du gaz naturel pendant les périodes de pointe de la demande d'électricité dans une nouvelle centrale au gaz naturel qui sera construite par la compagnie

d'électricité *Intermountain Power Agency*. Cette centrale produira de l'électricité grâce à des turbines alimentées à la fois par la combustion des gaz et par la vapeur produite à partir de la chaleur des gaz d'échappement. Alimentée au départ par un mélange 30-70 d'hydrogène et de gaz naturel, la centrale sera convertie pour fonctionner entièrement à l'hydrogène d'ici à 2045.

Michael Ducker, directeur général d'*ACES Delta* et vice-président de Mitsubishi Power, l'un des partenaires du projet, explique que les 220 MW d'électrolyseurs de l'usine de l'Utah doubleront presque la capacité totale installée dans le monde, qui est de 250 MW. Les électrolyseurs seront fournis par la société norvégienne *HydrogenPro*.

Aujourd'hui, la plus grande installation de production d'hydrogène vert au monde, située à Fukushima, au Japon, produit 2,4 tonnes par jour grâce à des électrolyseurs de 10 MW alimentés par des panneaux solaires installés sur place. Elle a ouvert ses portes en 2020. En juin, BP et ses partenaires ont annoncé leur intention de construire une installation de production d'hydrogène vert dans une région reculée de l'Australie occidentale.

Connu sous le nom d'*Asian Renewable Energy Hub*, le projet sera alimenté par 26 GW d'énergie éolienne et solaire, soit suffisamment pour produire un tiers de toute l'électricité produite en Australie. Une fois achevé en 2027, il aura une capacité annuelle de 1,6 million de tonnes d'hydrogène ou de 9 millions de tonnes d'ammoniac vert. Une grande partie de sa production est destinée à être expédiée vers les marchés asiatiques.

A l'heure actuelle, la quasi-totalité de l'hydrogène produit dans

le monde est appelé hydrogène gris car l'électricité est produite à partir de gaz naturel sans captage ni stockage de CO₂. L'électrolyse doit être alimentée par des énergies renouvelables pour obtenir un label vert. Parallèlement à la croissance des énergies renouvelables dans l'ouest des États-Unis, en particulier en Californie, la quantité d'énergie solaire et éolienne excédentaire qui ne peut être utilisée pendant les périodes de production de pointe augmente. C'est particulièrement le cas à la fin de l'hiver et au début du printemps, lorsque la demande d'électricité est faible par rapport à d'autres périodes de l'année (voir Figure 3). Le surplus d'électricité renouvelable sera acheminé vers l'Utah par les lignes de transport spécialisées d'*Intermountain Power*.

Prévisions de « Centres d'hydrogène »

Entre-temps, les États, les villes

et les entités régionales des États-Unis font la queue pour obtenir une part des 8 milliards de dollars que le DoE distribuera pour un nombre de centres d'hydrogène qui reste à déterminer. Les législateurs les ont conçus comme des centres de production, de stockage, de distribution et de consommation d'hydrogène propre.

Le DoE a déclaré qu'il prévoyait d'en attribuer 6 à 7 milliards de dollars à 6 à 10 centres. Chaque subvention sera comprise entre 1/2 et 1 milliard de dollars. L'ensemble du processus, de la planification à l'achèvement de la construction des centres, devrait durer de 8 à 12 ans. Ils devront être en mesure de produire un minimum de 50 à 100 tonnes d'hydrogène propre par jour. Le DoE accordera une préférence et un financement plus important aux soumissionnaires qui peuvent produire des quantités plus importantes.

Le Congrès a fixé de nom-

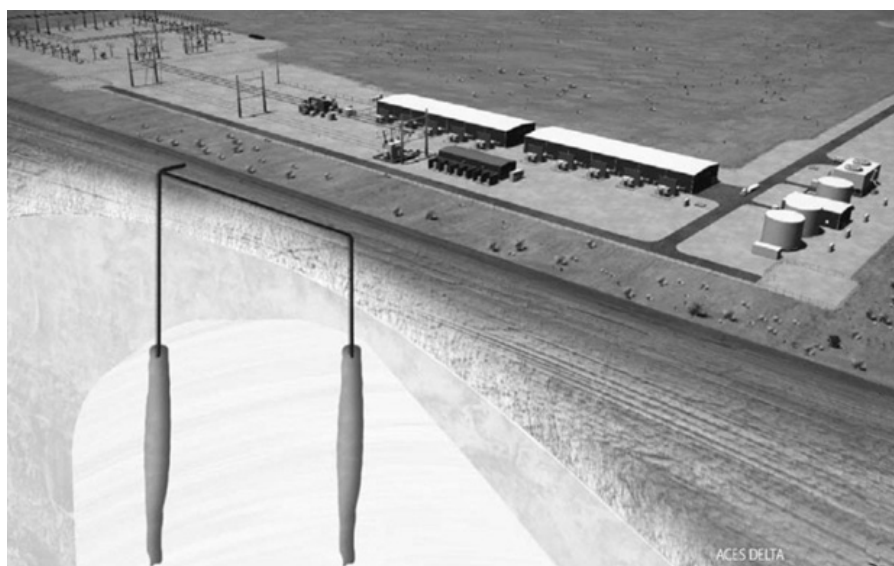


Figure 1 : Stockage d'hydrogène en sous-sol. Cette usine produira de l'hydrogène par électrolyse à partir des surplus d'énergie électrique renouvelable. L'hydrogène sera stocké dans des carrières souterraines de sel et brûlé en combinaison avec du gaz naturel pour alimenter une centrale électrique adjacente à construire d'ici 2025. Dans cette image les grandes zones grises et blanches représentent des formations salines ; les cavernes de sel se trouvent à l'extrémité des tuyaux d'injection. (Crédit : Aces Delta).

breuses exigences pour le choix des centres. L'un d'entre eux au moins doit produire de l'hydrogène bleu (à partir de méthane CH_4), c'est-à-dire que les émissions de CO_2 sont capturées et stockées de manière permanente dans des formations géologiques. L'énergie nucléaire et les énergies renouvelables doivent alimenter au moins un centre chacune.

Les législateurs ont également stipulé qu'au moins un centre devait démontrer l'utilisation d'hydrogène propre pour la production d'électricité, un pour les opérations industrielles lourdes, un pour le chauffage résidentiel et commercial, et un autre pour les transports. Le Congrès a également demandé au DoE de veiller à ce que les centres soient géographiquement dispersés et utilisent des ressources énergétiques abondantes dans leur région.

L'intérêt s'éveille

La côte du Golfe du Mexique est susceptible d'accueillir au moins un de ces centres. La majeure partie du réseau national d'oléoducs et de gazoducs est située au Texas et en Louisiane. La ville de Houston abrite à elle seule un tiers de la production américaine d'hydrogène.

Une vaste coalition d'entreprises, d'universités et d'organisations non gouvernementales a été organisée : grâce à ses abondantes ressources en gaz naturel et en énergie éolienne, Houston et le Texas en général, pourraient devenir un centre de production d'hydrogène bleu et vert. D'autres partenariats régionaux se sont constitués en prévision de la compétition. Une collaboration de l'État de New York avec le Massachusetts, le Connecticut et le New Jersey, qui comprend également des dizaines d'entreprises et d'universités a été annoncée.

De même, la Louisiane, l'Arkansas et l'Oklahoma ont accepté de collaborer, tout comme le Colorado, l'Utah, le Nouveau-Mexique et le Wyoming. D'autres États, comme l'Arizona, la Californie, l'Illinois, le Kentucky, le Nebraska, la Pennsylvanie et la Virginie-Occidentale, préparent des offres en solo ou sont en train de légiférer en ce sens. Certains États ont formulé plusieurs propositions. L'université de Toledo est à l'origine d'une proposition de plateforme centrée sur l'Ohio. Le centre alimentera l'électrolyse avec de l'énergie nucléaire et solaire. La collaboration doit inclure la centrale nucléaire de Davis-Besse, près de Toledo, qui exploite déjà un électrolyseur de 2 MW dans le cadre d'une démonstration de production d'hydrogène que le ministère de l'énergie soutient par une subvention de 9,2 millions de dollars. Le nord de l'Ohio abrite de nombreuses industries lourdes, notamment la plus grande usine d'acier laminé à plat du pays et la fabrication de verre. Parmi les partenaires industriels qui ont adhéré à la collaboration de Toledo, citons *General Electric Aviation*, qui a annoncé en février une collaboration avec *Airbus* pour développer des moteurs d'avion alimentés à l'hydrogène. Parmi les autres par-

tenaires figurent le verrier *Owens Illinois*, le fabricant de panneaux solaires *First Solar* et le producteur de carburant aéronautique durable *Lanza Tech*.

Au vu des ressources en gaz naturel dans la région, l'*Ohio Clean Hydrogen Hub Alliance*, basée à Columbus, se concentrera sur l'hydrogène bleu. Ce processus est en place dans une poignée d'usines à travers le monde qui consomment l'hydrogène pour leurs propres besoins industriels, tels que la production d'engrais et de carburants synthétiques. Aux États-Unis, une installation de production d'hydrogène bleu financée par le DoE et exploitée par le producteur de gaz industriels *Air Products* est en service depuis 2013. Sa production est utilisée pour le raffinage du pétrole, tandis que le CO_2 est acheminé vers les champs pétrolifères de l'État pour la récupération assistée du pétrole. *Air Products* a déclaré en octobre 2021 qu'il allait construire en Louisiane une usine d'hydrogène bleu d'une valeur de 4,5 milliards de dollars, qui devrait être achevée en 2026.



Figure 2 : Le Centre de recherche de l'hydrogène énergétique à Fukushima. C'est la plus grande usine d'hydrogène vert au monde, qui a ouvert ses portes en 2020 et produit 2,4 tonnes par jour. Elle est alimentée par des panneaux solaires installés sur place. (Crédit : Fukushima Hydrogen Energy Research Field)

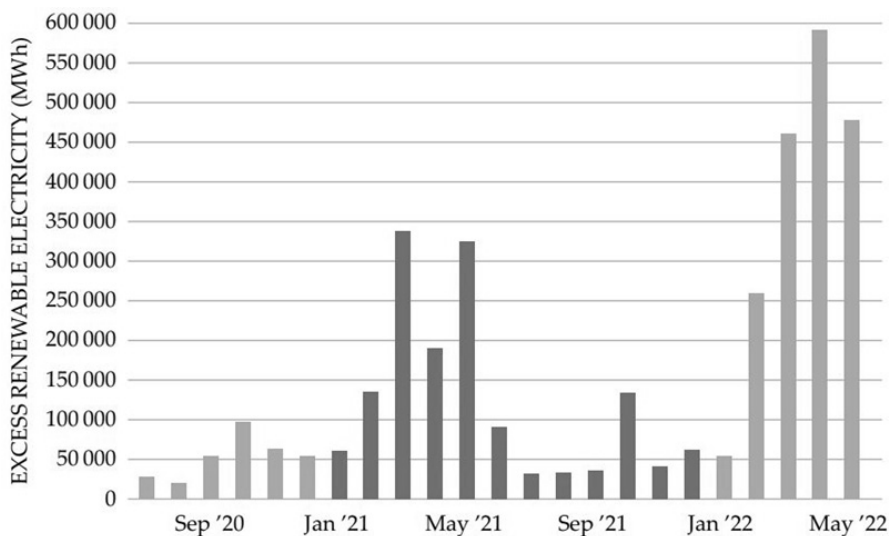


Figure 3 : Stockage des surplus d'énergie verte en Californie. L'énergie excédentaire peut être utilisée pour produire de l'hydrogène afin d'alimenter la production d'électricité pendant les périodes de pointe. (Crédit : California Independent System Operator).

Un modèle européen

Hy Deal LA, organisé dans le sud de la Californie (Los Angeles) par la *Green Hydrogen Coalition*, prévoit un coût de l'hydrogène vert inférieur à 2 \$/kg. Pour atteindre cet objectif, il faudra des pipelines pour transporter l'hydrogène jusqu'au stockage en dôme de sel. L'organisation à but non lucratif a identifié une demande de 1 à 3 millions de tonnes de gaz léger pour les transports lourds, l'industrie et la production d'électricité dans le bassin de Los Angeles. Le plus grand consommateur potentiel de *Hy Deal LA* est le Département Eaux et Puissance de *Los Angeles*, qui exploite quatre centrales élec-

triques au gaz naturel dans la région, d'une capacité combinée de 1 600 MW. Los Angeles a également d'importantes activités de raffinage du ciment et du pétrole, et elle abrite plus de stations de ravitaillement en hydrogène que n'importe où ailleurs aux États-Unis.

Hy Deal LA s'inspire de l'ambition européenne *Hy Deal*, une coalition de producteurs et de consommateurs qui se sont engagés à produire et à utiliser 3,6 millions de tonnes d'hydrogène vert par an au prix de 1,50 €/kg d'ici à 2030, soit l'équivalent du prix du gaz naturel livré en Europe. La coalition a été formée après que la Commission

européenne a annoncé en juillet 2020 un objectif de 10 millions de tonnes d'hydrogène vert par an d'ici 2030. La première composante de *Hy Deal Ambition*, *Hy Deal España*, acheminera de l'hydrogène vert produit dans des installations d'énergie renouvelable dans le nord de l'Espagne vers un complexe industriel de la région à partir de 2025. Ce projet vise une capacité d'électrolyse de 7,4 GW d'ici 2030. Parmi les partenaires de ce projet figure le sidérurgiste *Arcelor Mittal*, qui a annoncé l'année dernière qu'il dépenserait un milliard de dollars pour réduire de moitié les émissions de CO₂ de ses activités espagnoles dans les cinq ans à venir grâce à l'utilisation d'hydrogène vert.

Le partage des coûts nécessitera probablement un financement de l'État. Bien qu'il y ait une «énorme demande» d'hydrogène dans les applications industrielles, beaucoup dépendra du prix. Le programme *Hydrogen Shot* du DoE, lancé il y a un an, a fixé un objectif de coût pour l'hydrogène vert de 1 \$/kg dans 10 ans. Cela représente une réduction de 80 % par rapport au coût actuel d'environ 5 \$/kg.

D'après un article de Physics Today, 75(8), 22, 2022, signé par David Kramer.

L'INGÉNIERIE SOLAIRE EST-ELLE UNE BONNE STRATÉGIE ?

Pour aller de l'avant dans la maîtrise du climat, il faut de la recherche mais aussi de l'action internationale et intergénérationnelle.

Introduction

Dans un rapport publié en mars 2021, l'Académie nationale des sciences, d'ingénierie et de médecine des États-Unis (NASSEM) estime que la recherche en géo-ingénierie solaire devrait être accélérée avec prudence. Les outils permettant de refroidir la pla-

nète ne pourront pas annuler le réchauffement climatique, mais seulement éviter certaines de ses conséquences les plus graves.

Selon l'Organisation météorologique mondiale, la température moyenne de la planète est aujourd'hui, supérieure de 1,2 °C aux niveaux préindustriels,

et 2020 a été l'une des trois années les plus chaudes jamais enregistrées. L'objectif à long terme de l'accord de Paris de 2015 est de maintenir la hausse bien en-dessous de 2 °C et d'essayer de la limiter à 1,5 °C. Mais les modèles prévoient que sans mesures extraordinaires prises à court terme, l'augmentation pourrait

atteindre, voire dépasser 4 °C d'ici la fin du siècle. « *Nous vivons une période critique pour la lutte contre le changement climatique.* » déclare Chris Field, spécialiste de l'environnement à l'université de Stanford, qui a présidé le comité NASEM, *nous savons qu'il est difficile d'apporter des changements sociétaux pour parvenir à zéro émission de gaz à effet de serre. Cette difficulté constitue une motivation impérieuse pour comprendre l'ensemble des options possibles.* » La géo-ingénierie solaire pourrait être un complément utile aux options existantes de réduction des émissions, d'élimination du carbone de l'atmosphère et d'adaptation au réchauffement. (Voir, par exemple, l'article de l'auteur « *Comment faire disparaître le CO₂ en excès ?* » paru dans Ciel et Terre : Stevens [2022]).

Le rapport « *Réfléchir la lumière du Soleil : recommandations pour la recherche en géo-ingénierie solaire et la gouvernance de la recherche* » préconise que la recherche soit poursuivie dans les domaines étroitement liés de la science, de la faisabilité technique, des incidences, des risques et des avantages. L'éthique, les perceptions du public et la gouvernance des interventions climatiques doivent également être prises en compte. Le monde entier devrait être impliqué dans les décisions qui ont un impact universel.

S'il soutient la recherche, ce rapport souligne également que ni la NASEM ni les auteurs ne préconisent ces moyens. La recherche sur la géo-ingénierie solaire « *est une étude de réduction des menaces,* » déclare Paul Wennberg, chimiste de l'atmosphère à Caltech et membre du comité NASEM. *Il est choquant que nous envisagions de faire ce genre de choses. Cela montre que nous sommes globalement dans le pétrin.*»

Trois interventions étudiées

Injection d'aérosols stratosphériques

Le rapport NASEM examine trois approches de l'intervention sur le climat. Différents termes sont utilisés pour désigner la modification du climat, notamment la géo-ingénierie solaire, la gestion du rayonnement solaire et la modification de ce rayonnement.

L'approche la mieux comprise est l'injection d'aérosols stratosphériques : des particules ou des précurseurs gazeux tels que le dioxyde de soufre sont amenés dans la stratosphère à des altitudes d'environ 20 km, ce qui entraîne une augmentation de la réflectivité des nuages. Cet effet a été observé lors d'éruptions volcaniques. Par exemple, l'éruption du mont Pinatubo en 1991 a rejeté 15 mégatonnes de SO₂ dans la stratosphère, refroidissant la planète d'environ 0,4 °C. La stratosphère étant stable, ces effets persistent pendant quelques années.

Douglas MacMartin, chercheur

en climatologie à l'université de Cornell, explique : « *en réfléchissant environ 1 % de la lumière du Soleil vers l'espace, on maintiendrait les températures à un niveau inférieur à 1,5 °C.* » Selon lui, il suffirait d'injecter chaque année environ 10 mégatonnes de SO₂ dans la stratosphère. À titre de comparaison, il note que la pollution industrielle produit environ 100 mégatonnes de SO₂ par an.

L'injection d'aérosols stratosphériques permettrait sans aucun doute de refroidir la planète. Mais de nombreuses questions restent en suspens : quels types d'aérosols faut-il utiliser ? À quelles latitudes faut-il les injecter ? A quelle période de l'année ? Quels seraient les effets régionaux ? Quels sont les risques ? Quelles sont les inconnues ? Helene Muri est professeur de recherche en physique à l'université norvégienne des sciences et technologies de Trondheim. « *À ce jour, dit-elle, nous n'avons rien vu qui indique que nous devrions retirer l'intervention climatique de la boîte à outils. Mais, ajoute-t-elle, les risques ne sont pas encore clairs.* » Nous

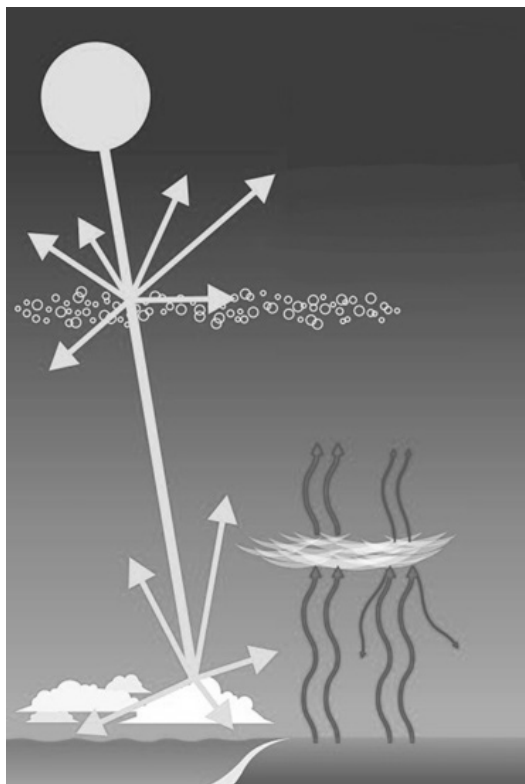


Figure 1 : Interventions dans les nuages.

Les interventions climatiques possibles visant à refroidir la planète comprennent l'injection d'aérosols stratosphériques à des altitudes d'environ 20 km, l'amincissement des cirrus, à des altitudes de 6 à 13 km et l'éclaircissement des nuages marins à des altitudes d'environ 3 km. L'éclaircissement des cirrus réduirait la chaleur piégée. Les deux autres approches réduiraient les températures de surface en réfléchissant la lumière du Soleil. (Crédits : National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine)

savons certaines choses sur les réponses climatiques naturelles au renforcement des aérosols stratosphériques, comme les températures et les précipitations, mais lorsqu'il s'agit d'impacts liés à la santé, de changements dans la qualité de l'air, de maladies contagieuses, il y a encore de nombreuses inconnues.

Jusqu'à présent, la recherche sur l'injection d'aérosols stratosphériques repose sur la modélisation, les mesures effectuées à ce jour provenant d'éruptions volcaniques et de panaches de fusées. Un groupe de l'université de Harvard planifie l'expérience de perturbation contrôlée de la stratosphère SCoPEX (*Stratospheric Controlled Perturbation Experiment*). Il s'agit d'envoyer un ballon dans la stratosphère, de libérer de petites quantités d'aérosols, puis d'utiliser des instruments à bord du ballon pour surveiller l'évolution du panache, les turbulences à petite échelle, la chimie atmosphérique, la diffusion de la lumière et d'autres paramètres. « *L'une des questions qui me tient éveillé la nuit concerne l'utilisation d'aérosols sulfatés, explique Frank Keutsch, chef du projet SCoPEX. Les sulfates ne détruisent pas seulement la couche d'ozone stratosphérique, ils réchauffent également la stratosphère. Ce réchauffement modifie la dynamique et la circulation atmosphériques.* »

La première étape de l'expérience consiste à tester la navigation, la communication et les instruments du ballon dans l'environnement froid et à basse pression de la stratosphère. Le lancement d'un ballon à Kiruna, dans le nord de la Suède en 2021 a été annulé en raison de l'opposition des indigènes Sami et d'autres groupes locaux. Ce vol d'essai, ainsi qu'un autre vol ultérieur au cours duquel 2 kg de carbonate

de calcium devaient être libérés, sont désormais suspendus.

Interventions sur les nuages bas

Une autre approche de l'intervention climatique est l'éclaircissement des nuages marins, qui consiste à ajouter des particules aux nuages pour les rendre optiquement plus épais et plus réfléchissants. L'effet dure un jour ou deux. C'est un phénomène connu lié à la pollution rejetée par les navires et connus sous forme de « traces de navires » (voir Figure 2). Le maximum d'éclaircissement des nuages ne dépasse généralement pas 3 km d'altitude et est trouvé au large des côtes ouest d'Amérique du Sud, d'Afrique du Sud et de Californie.

Lynn Russell, chimiste atmosphérique à la *Scripps Institution of Oceanography* et membre du comité NASEM, note que l'effet diminue lorsque la densité des particules devient trop élevée. « *La plupart des processus impliqués dans l'éclaircissement des nuages marins ne sont connus que théoriquement.* »



Figure 2 : Les traces de navires. Ces traces sont des nuages qui se forment à partir des gaz d'échappement des navires. L'éclaircissement volontaire des nuages marins serait réalisé avec l'intention de réfléchir la lumière du Soleil pour aider au refroidissement de la planète.

Le projet de l'université de Washington réalise des simulations en faisant varier, par exemple, la taille et la concentration des particules. L'équipe du projet espère recueillir des données complémentaires en pulvérisant des sels dans l'air à partir d'un navire et en mesurant les nuages et les changements de réflexion qui en résultent. Selon Sarah Doherty, chef de projet, de telles expériences seraient à petite échelle. « *Tout au plus, cela pourrait modifier la distribution de la bruine provenant des nuages dans un rayon d'environ 10 km en aval, mais n'aurait aucun impact mesurable sur le climat ou les écosystèmes.* »

L'éclaircissement de nuages marins pourrait également être utilisé au niveau régional. En Australie, les scientifiques utilisent cette technique pour tenter de refroidir la zone proche de la Grande Barrière de Corail afin de protéger ses coraux.

Intervention sur les cirrus

Une autre méthode d'intervention sur le climat citée par le rapport NASEM est l'amincissement

des cirrus. Contrairement aux deux méthodes décrites ci-dessus, qui refroidiraient la Terre en réfléchissant la lumière du Soleil vers l'espace, l'éclaircissement des cirrus fonctionnerait en éliminant de l'atmosphère les nuages qui absorbent les infrarouges réfléchis par le sol, en réduisant ainsi l'effet de serre qu'ils entraînent. « Si l'on se débarrassait de tous les cirrus, on pourrait annuler le réchauffement dû au doublement du CO₂ », explique Ulrike Lohmann, spécialiste de l'environnement à l'ETH Zürich, en Suisse.

Mais la manière de débarrasser l'atmosphère des cirrus est « une question délicate » et n'a été étudiée jusqu'à présent qu'à l'aide de modèles théoriques, explique-t-il. Aux latitudes moyennes, les cirrus apparaissent naturellement à des altitudes de 6 à 13 km. L'ensemencement de l'atmosphère avec des poussières minérales, provenant par exemple du désert du Sahara, pourrait les faire apparaître à des températures plus élevées et à des altitudes plus basses.

Par conséquent, ils contiendraient moins de cristaux de glace, plus grands, qui sédimenteraient plus rapidement, ce qui réduirait leur durée de vie et aussi le réchauffement. L'amincissement des cirrus est la seule intervention climatique ciblant le rayonnement infrarouge. Selon U. Lohmann, elle modifierait moins les régimes de précipitations que les méthodes précédentes. Le danger « serait de placer le matériau au mauvais endroit, de former des cirrus là où on ne veut pas en avoir, ce qui pourrait avoir l'effet inverse à celui recherché. Mais les nuages ne sont là que pour quelques heures ou quelques jours, et il est donc facile d'interrompre le processus, » ajoute-t-elle. Les gaz à effet de serre, en revanche, restent en place pendant des décennies.

Pourtant, comme les autres approches d'intervention sur le climat, l'éclaircissement des cirrus est un pansement, pas une solution. « Tout ce que nous faisons, à l'exception de l'élimination du CO₂ de l'atmosphère, ne fait que traiter les symptômes. C'est faisable pendant une période limitée, mais si les gaz à effet de serre continuent d'augmenter et que nous devons compenser de plus en plus, ce sera problématique, explique U. Lohmann, je pense que l'intervention climatique n'aura qu'un effet limité dans le temps, jusqu'à ce que nous éliminions le CO₂ de l'atmosphère et que nous arrêtions d'émettre des gaz à effet de serre. »

Les scientifiques qui effectuent ce genre de recherche le font le plus souvent de manière marginale au sein d'études climatiques plus vastes. « Comprendre la rétroaction des nuages est important pour les modèles de changement climatique, explique Mme Russell, il n'y a pas eu assez d'observations pour contraindre les modèles, et les effets des nuages sur le climat constituent encore une grande lacune. » « Pour répondre aux nombreuses questions scientifiques et techniques concernant l'intervention sur le climat, il faut combiner la modélisation, les expériences en laboratoire et les essais sur le terrain, fait remarquer M. Wennberg, du Caltech, nous ne préconisons pas les expériences en plein air à moins que les tests en laboratoire ne soient pas possibles. »

« Pour limiter l'augmentation de la température mondiale, le plus important est de s'attaquer à ses causes, déclare Keutsch de SCoPEX, j'espère que l'ingénierie stratosphérique ne sera jamais utilisée. En même temps, je crains que l'humanité ne réduise ses émissions et ne réagisse trop lentement pour éviter de graves répercussions sur le climat. Si les effets sont graves, la modification de l'albédo est une mesure que l'on peut prendre rapi-

dement. L'intervention sur le climat pourrait devenir intéressante pour les décideurs, ajoute-t-il. Ils n'auront peut-être pas le choix, pour sauver des vies et la planète. J'espère que nous n'en arriverons jamais là. Mais si c'est le cas, nous devons faire des recherches dès maintenant afin d'être prêts. »

Sensibiliser tous les publics dans le monde entier

Les pays du Sud

DECIMALS est une initiative britannique (Solar Radiation Management Governance Initiative) qui a soutenu en 2018 huit groupes de recherche dans des pays à revenu faible et intermédiaire avec un total de 450 000 \$ pour modéliser la façon dont la gestion du rayonnement solaire pourrait affecter leurs régions respectives. Les groupes sont associés à des chercheurs de pays à revenu plus élevé et échangent des informations entre eux. Ils accèdent aux données des principaux modèles climatiques pour se concentrer sur les problèmes locaux. L'objectif à long terme est que ces chercheurs deviennent des experts de confiance capables de conseiller les décideurs politiques de leur pays.

Izidine Pinto fait partie d'une équipe qui étudie le climat en Afrique du Sud et en particuliers, comment l'injection d'aérosols stratosphériques affecterait les températures moyennes et extrêmes et les précipitations dans toute l'Afrique. « Jusqu'à présent, dit-il, les modèles montrent une réduction des températures, mais c'est bien moins clairs pour les précipitations. Il y a des gagnants et aussi des perdants en ce qui concerne les précipitations. » Selon lui, il faudrait à l'avenir comparer les effets du changement climatique et de la géo-ingénierie solaire sur l'agri-

culture et les espèces animales.

DECIMALS finance également des recherches sur les tempêtes de poussières et leurs trajectoires au Moyen-Orient et en Afrique du Nord. Ces recherches sont menées par un scientifique spécialiste de l'atmosphère, Khalil Karami, qui partage son temps entre l'université de Leipzig, en Allemagne, et l'Institut des études avancées en sciences fondamentales, en Iran.

Les tempêtes de poussières résultent des interactions entre les précipitations, l'humidité, le vent, la température et l'humidité du sol. Les trajectoires des tempêtes, le long desquelles elles sont poussées par les vents, transfèrent l'humidité et la chaleur sur de grandes distances. « *Ces deux phénomènes ont des répercussions sur le climat et la santé humaine, explique M. Karami, il est donc essentiel d'évaluer l'impact de l'ingénierie solaire stratosphérique sur ces phénomènes.* »

En Argentine, Inés Camilloni, spécialiste de l'atmosphère, dirige un groupe qui étudie les effets possibles de l'injection d'aérosols stratosphériques sur la disponibilité de l'eau dans le bassin de La Plata, l'une des régions les plus peuplées d'Amérique du Sud. « *Nous étudions ce à quoi nous pouvons nous attendre en termes de débit des rivières et d'impact sur la production d'énergie hydroélectrique, les inondations et les*

sécheresses, explique-t-elle, nous avons constaté que le débit moyen augmenterait de 15 à 30 %. Plus d'eau, c'est bien, mais le débit maximal augmenterait également, de sorte qu'une conséquence négative pourrait être de plus nombreuses inondations. »

Adolescents et jeunes adultes

L'année 2019 a permis de découvrir quelques jeunes gens très concernés par les questions climatiques. Qui ne connaît la jeune suédoise Greta Thunberg ou la belge Amélie Charlier qui ont conduit de nombreuses manifestations de sensibilisation aux défis climatiques que leur génération va devoir affronter dans quelques décennies.

Aux Etats-Unis aussi, les jeunes sont impliqués. Déjà en 2016, à l'âge de 13 ans, Gideon Futerman entendait parler pour la première fois de renvoyer la lumière du Soleil pour refroidir la planète. « *Je ne dis pas que je suis en faveur de ces méthodes proactives, mais nous devons être bien informés pour prendre cette décision. Si nous atteignons une augmentation de 3 ou 4°C, la gestion du rayonnement solaire pourrait s'avérer intéressante.* » Terminant sa dernière année d'études secondaires près de Londres, il fait remarquer que « *c'est sa génération et les suivantes qui seront confrontés aux conséquences du changement climatique. C'est une question de justice intergénérationnelle que les*

jeunes soient consultés dans le processus de prise de décision. »

Masahiro Sugiyama, de l'Université de Tokyo, a mené des enquêtes dans six pays d'Asie-Pacifique sur l'attitude des jeunes face à l'intervention climatique. Il a constaté que les habitants des pays à revenus faibles et moyens étaient plus disposés à envisager cette idée que ceux des pays à plus hauts revenus. « *Ils sont également plus préoccupés par les effets du changement climatique, note-t-il, car ils constatent que leurs pays sont généralement plus vulnérables sur le plan climatique.* » « *Il est essentiel, lorsque l'on réfléchit à ces technologies, de comprendre la perception du public, déclare Peter Frumhoff, membre du comité NASEM, la faisabilité sociale est aussi importante que la faisabilité technique. L'utilisation des technologies ne peut être décidée par Bill Gates, l'université de Harvard ou les États-Unis* », ajoute-t-il.

Objections et controverses

Une des principales objections aux interventions sur le rayonnement solaire concerne les risques méconnus. Elles pourraient, par exemple, perturber les précipitations sur l'ensemble de la planète. Le rapport NASEM recommande de prévoir des portes de sortie, c'est-à-dire des critères clairs pour mettre fin aux programmes de recherche, si une telle activité « *présentait des risques physiques, sociaux, géopolitiques ou environnementaux inacceptables.* » L'inquiétude la plus répandue est peut-être l'idée que si le public (et aussi les utilisateurs de combustibles fossiles) sentaient pouvoir s'en sortir en injectant, par exemple, des aérosols dans la stratosphère pour refroidir la planète, ils risqueraient de ne plus s'attaquer aux vraies causes du changement planétaire. D'autre part, cette approche ne s'attaque ni à



Figure 3 : Manifestation pour le climat à Londres en 2019. (Crédits : Gideon Futerman (à droite) et Benjamin Goldstein).

l'acidification des océans, ni à la production de gaz à effet de serre atmosphériques, ni aux causes autres sous-jacentes du changement climatique.

Les interventions sur le climat nécessiteraient probablement un engagement à long terme : « Une fois entamées, elles devraient se poursuivre jusqu'à ce que le forçage des gaz à effet de serre qu'elles pallient ait diminué, explique M. Wennberg, du Caltech, une interruption prématurée et brutale entraînerait un réchauffement rapide, explique-t-il, ce qui pourrait exposer le monde à des risques encore plus élevés que si l'on n'avait jamais déployé de programmes de modification du rayonnement solaire. »

La sécurité nationale est un autre sujet de préoccupation : envisageons un scénario dans lequel un pays ou un acteur malhonnête mettrait en œuvre une intervention climatique de son propre chef. « Imaginons qu'un autre pays subisse alors un événement météorologique catastrophique et accuse l'intervention climatique exécutée par son voisin, cela pourrait conduire à des conflits politiques ou, dans le pire des cas, à une guerre, fait remarquer M. MacMartin, de Cornell, c'est pourquoi tout le monde doit être présent à la table de négociation. »

Préparer le terrain pour que les décisions relatives à l'intervention sur le climat puissent être véritablement prises à l'échelle mondiale peut s'avérer au moins

aussi difficile que de déterminer s'il s'agit d'une solution sûre et intelligente. Le sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), disponible depuis mi-2023, contient de nouvelles informations sur la modification du rayonnement solaire. Il est urgent que le sujet soit abordé par la prochaine Assemblée générale des Nations unies, car il faudra sans doute une dizaine d'années pour commencer à développer un cadre de gouvernance pour la modification du rayonnement solaire.

D'après un reportage de *Physics Today*, 74(6), 22, 2021, signé par Toni Feder.

La Rédaction a lu pour vous ...

DÉCOUVERTE DE LA COURONNE SOLAIRE AVEC LA SONDE PARKER SOLAR PROBE

Guy Stevins, Ir

D'après l'article "A journey to touch the Sun" de Physics Today, 75, 11 p.28, 2022, signé par N. Raouafi, du Laboratoire de physique appliquée de Johns Hopkins à Laurel, Maryland, membre du projet de satellite Parker Solar Probe de la NASA.

La sonde Parker Solar Probe fait face à des conditions extrêmes pour explorer la mystérieuse couronne solaire, une région qui présente certains phénomènes astrophysiques les plus difficiles à comprendre.

(Traduction assistée par www.DeepL.com/translator)

Une trajectoire exigeante

La sonde *Parker Solar Probe* explore l'atmosphère du Soleil, l'une des dernières régions extrêmes et non visitées de notre Système solaire (Fox N.J. & al., *Space Sci. Rev.* **204**, 7, 2016). Lancée le 12 août 2018, elle avait, à la fin 2022, effectué 13 des 24 orbites solaires prévues dans le cadre de sa mission de sept ans. En octobre 2021, la sonde survolait Vénus pour la cinquième fois et un mois plus tard, elle s'appro-

chait au plus près, à 13 rayons solaires du centre du Soleil. Elle utilisera Vénus pour deux autres assistances gravitationnelles afin d'atteindre son périhélie ultime à près de 10 rayons solaires en décembre 2024, à environ 5 % de la distance Soleil-Terre (à 7 millions de km).

L'un des phénomènes étudiés par la sonde *Parker* est la couronne solaire, la région la plus difficile de l'héliosphère en raison de ses conditions extrêmes. À partir

de la couronne, le vent solaire s'écoule pour remplir toute l'héliosphère, qui s'étend jusqu'à environ 100 unités astronomiques (UA) du Soleil. La surface solaire - la photosphère - est un million de fois plus brillante que la couronne, mais cette dernière est plus de 300 fois plus chaude. L'objectif scientifique principal de la mission est de déterminer la structure et la dynamique du champ magnétique coronal du Soleil, de comprendre comment la couronne et le vent solaires

sont chauffés et accélérés, et de découvrir les processus qui accélèrent les particules énergétiques.

En 1958, les arguments scientifiques en faveur d'une sonde solaire étaient déjà mûrs. Cependant, la mise en œuvre d'une telle mission s'est avérée très difficile. La sonde solaire a été la priorité absolue de plusieurs études décennales sur la physique solaire et spatiale (héliophysique) menées par les Académies des sciences, de l'ingénierie et de la médecine des États-Unis. Pourtant, ces études n'ont pas abouti car elles prévoyaient toutes l'utilisation de la propulsion nucléaire.

En 2007, la NASA a approuvé un nouveau profil de mission qui utilise sept fois l'assistance gravitationnelle de Vénus afin que le vaisseau spatial puisse plonger progressivement plus près du Soleil. Bien que la nouvelle orbite ne permette à la sonde de voler qu'à 10 rayons solaires du centre du Soleil, elle permet une mission beaucoup plus longue, sept ans, pour mesurer l'état du vent solaire pendant les principales parties du cycle solaire, c'est-à-

dire d'un minimum au maximum suivant.

Les mystères de la couronne solaire

La raie verte du fer ionisé (Fe^{13+})

Lors de l'éclipse solaire totale de 1869, William Harkness et Charles Young avaient observé une nouvelle raie spectrale de la lumière solaire à une longueur d'onde de 5 305 Å, qu'ils appelèrent *raie verte*, mais qui n'appartenait à aucun des éléments connus et qui fut attribuée à un nouvel élément chimique appelé *coronium*. À la fin des années 1930, on découvrit que la raie spectrale n'appartenait pas à un nouvel élément chimique, comme proposé cinq décennies auparavant, mais bien au Fe^{13+} hautement ionisé, un atome de fer dépourvu de 13 de ses 26 électrons (Edlén B., *Ark. Mat. Astron. Fys.* **28B**, 1, 1941).

Le chauffage coronal

Les scientifiques ont alors été confrontés à un phénomène beau-

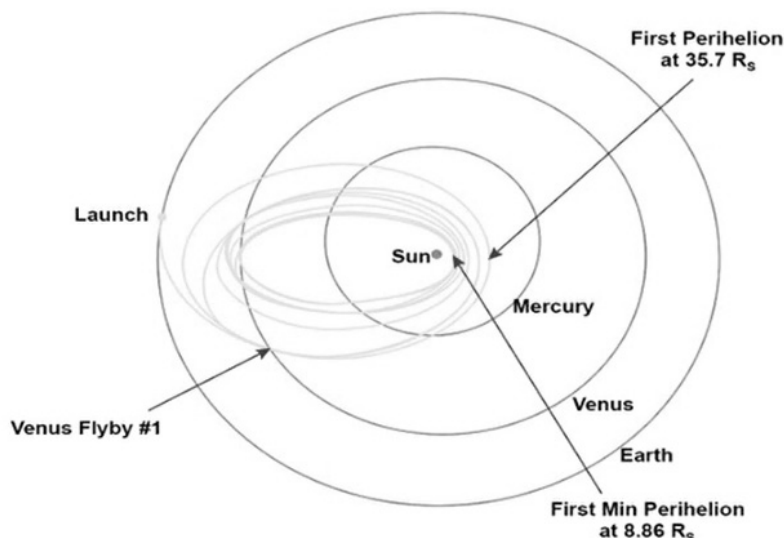
coup plus complexe. Le fait que le Fe^{13+} ne puisse exister que dans des plasmas extrêmement chauds à plusieurs millions de degrés explique pourquoi la couronne solaire est beaucoup plus chaude que la photosphère. Cette découverte est connue sous le nom de problème du *chauffage coronal*. Plus de huit décennies plus tard, ce problème reste énigmatique et controversé. Pour interpréter le chauffage coronal, diverses théories ont été proposées, notamment la reconnexion des champs magnétiques, les ondes d'Alfvén et la turbulence, mais aucune n'est entièrement satisfaisante pour expliquer complètement le phénomène.

Le vent solaire supersonique

Un autre mystère solaire a été identifié au début des années 1950 lorsqu'on observa que les queues de comètes s'éloignaient du Soleil à une vitesse d'environ 400 km/s. Un article controversé montra que l'atmosphère du Soleil était très dynamique et qu'un flux pouvait se dégager de ce qu'il est convenu d'appeler *vent solaire* (Parker E.N., *Astrophys. J.* **128**, 664, 1958). Quelques années plus tard, la mission Mariner 2 confirmait l'existence du vent solaire supersonique, magnétisé, chaud, rapide et complexe (Neugebauer M., Snyder C.W., *Science* **138**, 1095, 1962). Depuis lors, les astrophysiciens tentent de comprendre comment le vent solaire s'est accéléré, passant d'un état quasi statique à la base de la couronne à plusieurs centaines de kilomètres par seconde sur une très courte distance.

Les tempêtes magnétiques

Un dernier mystère crucial que les astronomes espèrent voir résolu par la sonde Parker est celui de l'énergisation des particules par le Soleil. En 1859, Richard Carrington a observé la première éruption solaire de



Trajectoire complexe de la sonde Parker Solar Probe. Plusieurs réactions de gravitation à proximité de Vénus sont nécessaires pour amener la sonde Parker Solar Probe à moins de 10 millions de km du Soleil. (Crédits : NASA)

lumière blanche (Carrington R.C., *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **20**, 13, 1859), suivie de l'orage géomagnétique le plus intense de l'histoire. Les communications télégraphiques avaient alors été interrompues dans le monde entier. Bien que certains scientifiques aient suggéré un lien entre l'événement solaire et la tempête géomagnétique, le lien entre les courants induits par le sol et l'activité solaire explosive était alors inconnu.

La véritable nature de l'activité solaire et du cycle solaire a dû attendre que George Hale observe des champs magnétiques puissants dans les taches solaires (Hale G.E., *Astrophys. J.* **28**, 315, 1908). Par la suite, on découvrit la relation entre l'activité solaire et les tempêtes géomagnétiques. Le lien entre le Soleil et la Terre, principalement alimenté par le magnétisme solaire, est devenu plus évident avec l'avènement de l'ère spatiale. Tout ce qui se passe dans la couronne solaire peut affecter l'environnement terrestre, les systèmes planétaires et l'exploration spatiale.

Pourquoi faut-il tant s'approcher du soleil ?

La commission de physique des champs et des particules dans l'espace de l'Académie des Sciences a reconnu la nécessité de faire voler une sonde solaire à l'intérieur de l'orbite de Mercure afin d'échantillonner les conditions du vent solaire et de comprendre les phénomènes coronaux fondamentaux. Dès le début des années 1960, les mesures du vent solaire à hauteur de l'orbite terrestre (1 UA) avaient révélé qu'il était impossible de retracer les processus physiques qui créent et accélèrent le plasma du vent solaire. Au cours de son voyage vers la Terre et au-delà, le vent solaire est fortement affecté par des ondes, des instabilités, des turbulences et d'autres phénomènes physiques. La seule façon de comprendre comment le plasma chaud naît et s'écoule est de l'échantillonner à sa source, c'est-à-dire dans la couronne solaire.

La région où le plasma du vent solaire acquiert la majeure partie de sa chaleur et de son accélération se situe sous la surface critique d'Alfvén, là où la vitesse du

vent solaire est égale à la vitesse d'Alfvén. La surface critique d'Alfvén définit la surface au-delà de laquelle le plasma cesse d'accompagner la rotation du Soleil, c'est-à-dire que le champ magnétique perd sa rigidité par rapport au plasma. Il est essentiel de connaître les conditions physiques en dessous de cette limite pour déterminer la perte de moment angulaire du vent solaire, la structure globale de l'héliosphère et d'autres propriétés à grande échelle. La physique du vent solaire change également parce que la propagation des ondes de plasma vers le Soleil et à partir du Soleil affecte la dynamique locale, y compris l'évolution turbulente, le chauffage et l'accélération du plasma. En outre, des gradients de vitesse se développent entre les courants rapides et lents et établissent les conditions initiales pour la formation de régions d'interaction de co-rotation, qui sont une source majeure de tempêtes géomagnétiques récurrentes (Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Clúa de Gonzalez A.L., *Space Sci. Rev.* **88**, 529, 1999).

Pour effectuer les mesures nécessaires, la sonde *Parker* dispose de quatre séries d'instruments. La suite FIELDS mesure les champs électriques et magnétiques, les ondes, le flux de Poynting, les densités, la température et les émissions radio (Bale S.D. & al., *Space Sci. Rev.* **204**, 49, 2016). L'instrument SWEAP (Solar Wind Electrons Alphas and Protons) mesure les vitesses, les densités et les températures des électrons, des protons et des particules alpha du vent solaire thermique (Kasper J.C. & al., *Space Sci. Rev.* **204**, 131, 2016). La suite IS⁺IS (*Integrated Science Investigation of the Sun*) mesure les électrons énergétiques, les protons et les ions lourds dans la gamme d'énergie comprise entre 10 keV et 100 MeV (McComas



La sonde solaire Parker.
A l'approche du Soleil, dessin d'artiste. (Crédit : NASA)

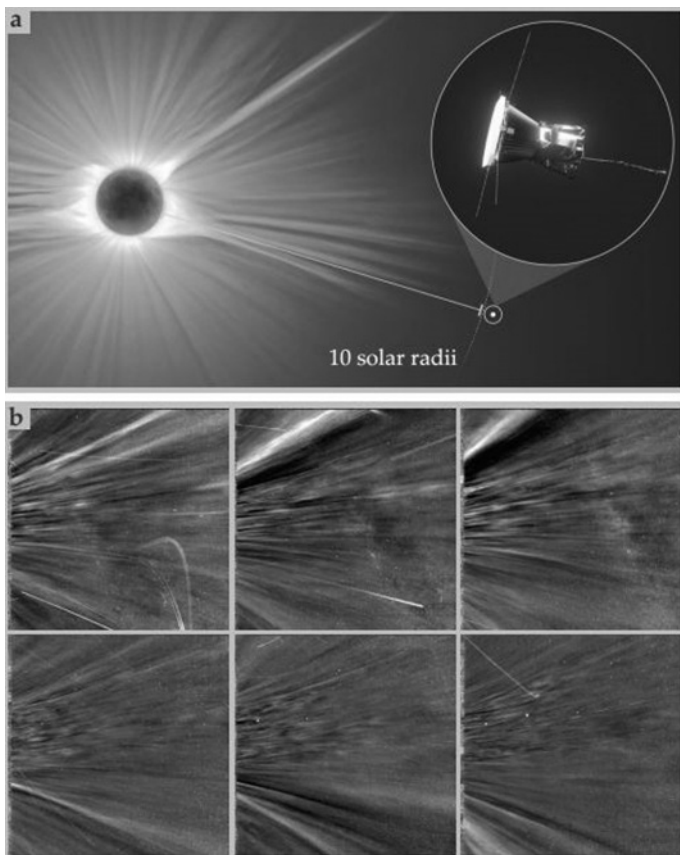


Figure 1 : Dans la couronne solaire. (a) La sonde Parker traverse des structures coronales telles que celles visibles lors des éclipses totales. (b) Les images de l'instrument WISPR montrent que la sonde glisse au-dessus et au-dessous des structures de la couronne solaire. Les mouvements ascendants et descendants des éléments coronaux ne sont toutefois qu'apparents. (Crédits : NASA/Johns Hopkins APL/Naval Research Laboratory)

D.J. & al., *Space Sci. Rev.* **204**, 187, 2016). L'imageur à grand champ WISPR prend des photos du vent solaire, des éjections de masse coronale, des chocs et d'autres structures lorsqu'elles s'approchent de la sonde et la dépassent (Vourlidas A. & al., *Space Sci. Rev.* **204**, 83, 2016).

La Figure 1 montre une série d'images de WISPR prises au voisinage du neuvième passage au périhélie, lorsque la sonde a traversé la couronne solaire. WISPR capture des structures coronales se déplaçant vers le haut dans le champ de vision supérieur et vers le bas dans la partie inférieure. Les images montrent également diverses petites structures qui n'étaient pas visibles à 1 UA.

Ces caractéristiques reflètent la nature hautement dynamique du jeune vent solaire. Les données sur le plasma fournies par les instruments FIELDS et SWEAP ont confirmé que la sonde avait

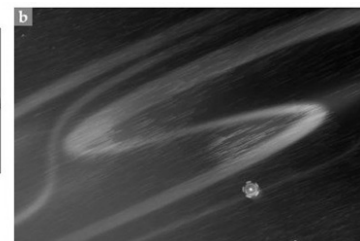
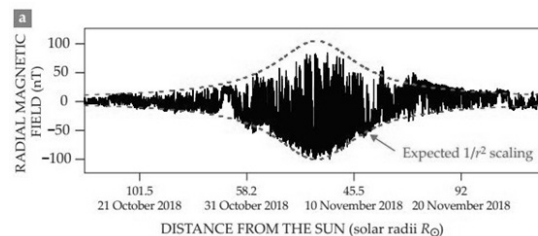


Figure 2 : Le vent solaire. (a) Composante radiale du champ magnétique du vent solaire mesurée par la suite FIELDS lors du premier passage au périhélie. Des fluctuations de grande amplitude sont observées, au cours desquelles le champ tourne de 180° vers le Soleil, puis s'inverse. (b) Les fluctuations apparaissent sous forme de S le long des lignes de champ magnétique et sont séparées par des périodes plus calmes. (D'après Bale S.D. & al., *Nature* **576**, 237, 2019)

bien franchi la surface critique d'Alfvén, ce qui constitue une étape importante pour la mission (Kasper J.C. & al., *Phys. Rev. Lett.* **127**, 255101, 2021).

Inversions du champ magnétique

Depuis la première rencontre avec le Soleil, la sonde Parker a fourni une image rapprochée spectaculaire du vent solaire avec des caractéristiques qui n'avaient jamais été observées précédemment. Bien que l'amplitude du champ magnétique varie en $1/r^2$ attendu pour la conservation du flux, le champ est très structuré plus près du Soleil et présente des fluctuations prononcées et omniprésentes de grande amplitude. La Figure 2a délimite la composante radiale mesurée du vecteur de champ magnétique, qui comprend des inversions de polarité rapides et de grande amplitude, associées à des jets de plasma. Les inversions du champ magnétique sont des rotations du vecteur de champ (Bale S.D. & al., *Nature* **576**, 237, 2019; Kasper J. C. & al., *Nature* **576**, 228, 2019). Plutôt que des changements de polarité du champ magnétique, les lignes de champ se replient pour former un S (voir Figure 2b), comme le montrent les mesures d'électrons supra-thermiques, le flux différentiel de

particules alpha, les mesures de faisceaux de protons et la directionnalité des ondes d'Alfvén. Les inversions de champ sont de nature Alfvénique, et la vitesse du vent solaire est donc fortement corrélée au champ magnétique. Bien que les inversions aient été observées sporadiquement dans le vent solaire lors des missions *Ulysse*, *Helios 1* et *Helios 2*, leur importance n'a été mise en évidence qu'après les récentes observations de la sonde *Parker*.

Le taux d'occurrence, la morphologie et l'amplitude des inversions magnétiques, ainsi que le fait qu'elles soient observées de façon omniprésente dans le vent solaire lent, principalement Alfvénique, en ont fait l'un des aspects les plus intrigants des premiers passages au périhélie. Les renversements magnétiques sont regroupés en périodes de temps séparées par des périodes calmes pendant lesquelles le champ magnétique et les paramètres du plasma (vitesse, densité, température, etc.) sont dépourvus de fluctuations importantes. Les inversions sont également porteuses d'un excès d'énergie, et leur présence diminue considérablement plus loin, comme l'avaient déjà observé les précédentes missions solaires. Quelque part dans le vent solaire, les inversions doivent donc dissiper et libérer cette énergie dans le plasma, probablement sous forme de chaleur et de vitesse.

La contribution des inversions magnétiques au chauffage et à l'accélération du vent solaire n'est pas encore totalement comprise. Toutefois, les données laissent entendre qu'après un certain temps, les inversions deviennent instables et se déchiquent par le biais de mécanismes turbulents. Si c'est effectivement le cas, seraient-elles alors l'explication irréfutable du chauffage coronal et de l'accélération du vent solaire

recherchée depuis des décennies ? Il faudrait d'abord comprendre et quantifier leur contribution à la thermodynamique du plasma du vent solaire.

Un autre aspect controversé de ces inversions de champ est leur origine. Existe-t-il plusieurs types d'inversions, comme celles qui se forment plus bas dans l'atmosphère solaire et qui sont transportées par le vent solaire jusqu'aux altitudes où évolue la sonde et au-delà ? Et pourraient-elles se développer localement dans le vent solaire ?

Les modèles susceptibles d'expliquer la formation des inversions peuvent être classés en deux catégories. La première privilégie la reconnexion du champ magnétique à la base de la couronne solaire tandis que la seconde voit leur formation dans le vent solaire. En d'autres termes, la compréhension des processus physiques de formation des inversions magnétiques pourrait aider les chercheurs à faire la distinction entre les deux théories les plus répandues dans le vent solaire pour expliquer le chauffage et l'accélération du plasma : la reconnexion du champ magnétique et la turbulence.

Les observations les plus récentes semblent indiquer un lien potentiel entre les inversions et les structures du champ magnétique à la surface du Soleil, sous la forme de concentrations et de puits de champ magnétique à la base de la couronne. Ces observations sont prometteuses en tant que moyen de mieux contraindre notre compréhension du vent solaire.

Un flot de particules et de poussières

Particules énergétiques

L'environnement des particules énergétiques plus proche du Soleil, en dessous de 0,3 UA (5 millions de km), n'était pas accessible par le passé. Des études antérieures, réalisées pour la plupart à une distance de 1 UA, montrent que les particules énergétiques provenaient soit d'éruptions solaires, soit de chocs provoqués par les éjections de masse coronale, ou encore de zones d'interaction en co-rotation ou de régions d'interaction des courants (qui sont toutes deux des interfaces entre les courants lents et rapides du vent solaire), ou enfin de jets coronaires ou d'événements plus rares et plus réduits. Les particules énergétiques présentent une grande diversité de composition (électrons, protons, particules alpha et ions plus lourds) et de propriétés. Parmi les phénomènes fascinants découverts par la suite *IS \odot IS* au plus près du Soleil, on trouve des tempêtes de rayonnement résultant de petites explosions à la base de la couronne solaire (McComas D.J. & al., *Nature* **576**, 223, 2019).

La Figure 3 montre six de ces événements répartis sur plusieurs jours. Leur origine et leur composition sont variées mais présentent plusieurs caractéristiques communes avec des événements plus importants. Le triplet d'événements numérotés 3, 4 et 5 dans la Figure 3b est particulièrement intéressant. Ces événements se sont produits à 24 heures d'intervalle et semblent provenir de la même région active du Soleil. Les événements 3 et 5 montrent une nette augmentation du flux de protons et d'électrons, ce qui n'est pas le cas de l'événement 4 qui présente également une aug-

mentation de l'hélium 3 par rapport aux deux autres. La cause de ces différences n'est pas claire. L'événement 4 pourrait provenir d'une région active différente de celle des événements 3 et 5, qui a ensuite produit l'événement 6. La composition de l'événement 6 est cependant similaire à celle de l'événement 1.

L'activité solaire s'accélère à mesure que le cycle actuel progresse vers son maximum, de sorte que la sonde *Parker* aura l'occasion d'observer des événements d'intensités et de distances différentes par rapport au Soleil. Les nouvelles observations aideront à résoudre des questions fondamentales sur l'origine, l'accélération et le transport de ces particules énergétiques dans l'héliosphère.

Zone sans poussière

Le nuage de poussières zodiacales est constitué de particules en orbite autour du Soleil et remplit l'espace interplanétaire interne du Système solaire. L'épais nuage de matière circumsolaire est principalement créé par les collisions d'astéroïdes et l'activité cométaire dans le Système solaire interne. Un excès de particules de petite taille est observé dans l'héliosphère interne en raison du broyage des grains de poussière.

Les petites particules de poussière perdent leur moment angulaire et spiralent progressivement vers le Soleil en raison de la pression du rayonnement solaire ou, plus précisément, de l'effet Poynting-Robertson. Le phénomène affecte principalement les particules de poussière d'une taille inférieure à 1 mm, qui résultent de collisions

catastrophiques, de la sublimation partielle de particules plus grosses, de l'érosion par pulvérisation des particules du vent solaire et de l'éclatement rotationnel des grains.

Plus près du Soleil, il pourrait y avoir une zone sans poussière. En 1929, Henry Norris Russell avait d'ailleurs prédit l'existence d'une telle région autour de toutes les étoiles. Les petits grains de poussière à proximité du Soleil sont chauffés au point de se sublimer. Le produit gazeux qui en résulte est ensuite emporté par la pression de radiation solaire et le vent solaire, créant ainsi une zone d'appauvrissement caractérisée par sa limite intérieure. Des études ultérieures ont abouti à la même conclusion, à savoir l'existence d'une telle zone autour du Soleil et en ont fixé la limite à environ 4 à 5 rayons solaires.

Mais pendant des décennies, les observations n'avaient pas fourni de preuves cohérentes. Effectuées vers 1 UA, elles avaient montré que la luminosité de la couronne F continuait d'augmenter linéairement sur une échelle logarithmique jusqu'au Soleil, et n'indiquaient pas de zone sans poussière. À la surprise générale, des preuves suffisantes sont apparues au cours de la première orbite de la sonde. Les données actuelles, prises plus près du Soleil, montrent une diminution significative de la luminosité à courte distance du Soleil (Howard R.A. & al., *Nature* 576, 232, 2019). Cela ne peut résulter que de l'appauvrissement de la densité des poussières plus près du Soleil. Les orbites plus récentes avec périhélies encore plus bas ont confirmé l'importance de la diminution de la luminosité.

Poussières dans l'héliosphère interne

En plus de résoudre l'énigme des

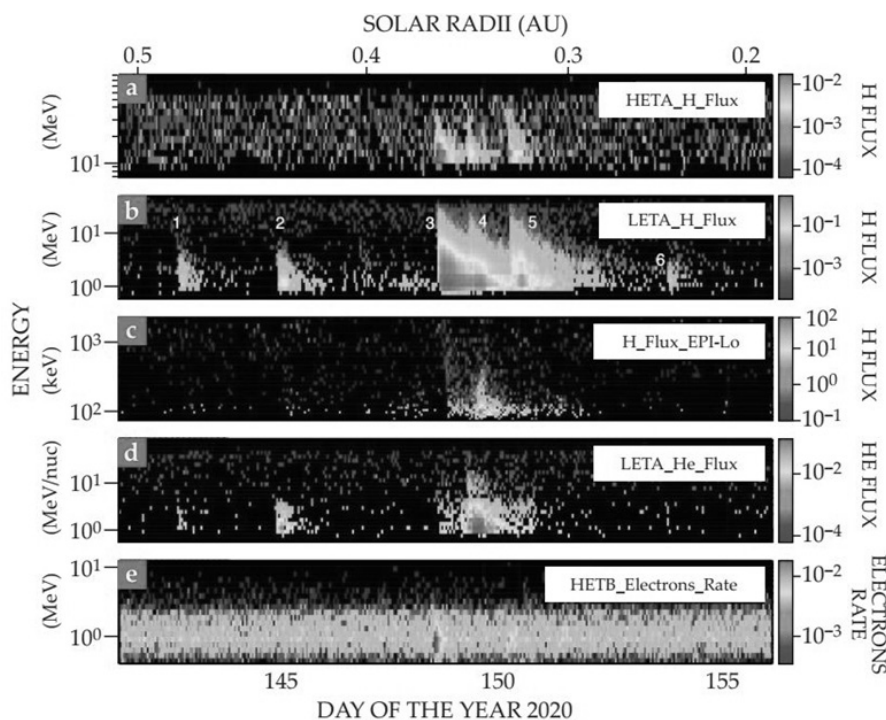


Figure 3 : Intensité des particules énergétiques. Les particules énergétiques près du Soleil ont été observées par la suite *IS[⊙]IS*. Les spectrogrammes indiquent l'intensité des protons (panneaux a, b et c), l'intensité de l'hélium (panneau d) et le taux de comptage des électrons (panneau e). Les télescopes à basse et à haute énergie *LET-A* et *HET-A/B* ainsi que l'instrument de mesure des particules énergétiques à basse altitude (*EPI-Lo*) sont des capteurs de la suite *IS[⊙]IS*. (D'après Cohen C. M. S & al., *Astron. Astrophys.* 650, A23, 2021) (En couleurs en page 2 de couverture)

zones sans poussière, vieille de neuf décennies, la sonde *Parker* révèle des phénomènes inconnus jusqu'à présent liés à la dynamique des poussières dans la région la plus interne de l'héliosphère. Les missions spatiales précédentes avaient indiqué l'existence de plusieurs populations de poussières zodiacales. Les plus importantes sont des particules en orbite elliptique autour du Soleil, appelées *météoroïdes* α , ainsi que des grains en orbite hyperbolique appelées *météoroïdes* β et qui sont probablement le produit de collisions entre *météoroïdes* α . La figure 4 donne également des indications sur d'autres populations de poussières.

La composition des poussières dans la région la plus interne de l'héliosphère est cependant inconnue. Afin d'évaluer les risques pour la mission, des efforts considérables ont été consacrés à la modélisation de cet environnement poussiéreux, à proximité du Soleil. Bien que la sonde ne dispose pas de capteurs spécifiques de poussières, l'ensemble de l'engin spatial peut être utilisé comme un gigantesque détecteur

d'impacts. En effet, les impacts créent autour de la sonde un nuage de plasma dont le potentiel électrique peut être mesuré par les antennes électriques FIELDS. Ces taux d'impact fournissent des informations essentielles sur l'environnement collisionnel du Système solaire interne.

La Figure 4 illustre les taux d'impact des poussières au cours des trois premières orbites de la sonde. Il présente un pic unique survenant légèrement avant le périhélie, suivi d'une chute progressive après le périhélie (figure 4 a). Les orbites suivantes présentent deux pics : l'un avant et l'autre après le périhélie. La modélisation indique que les pics avant le périhélie sont cohérents avec les populations de *météoroïdes* α et β .

Les données d'impact des poussières montrent également que les collisions produisant des *météoroïdes* β se produisent dans une région située de 10 à 20 rayons solaires. Les pics post-périhélie n'ont pu être reproduits par les modèles que si une troisième population, connue sous le nom

de *courant* β est prise en compte (voir Figure 4b). Si un courant β est observé, il s'agirait de la première observation directe de traînées de débris astéroïdaux et cométaires s'érodant par collision lors de leur passage dans le nuage zodiacal (Szalay J. R. & al., *Planet. Sci. J.* **2**, 185, 2021).

Au fur et à mesure que la mission progresse, elle pourrait révéler d'autres flux de *météoroïdes* difficiles à détecter par d'autres moyens. Le flux β potentiel est probablement lié au flux de météores des Géminides, associé au mystérieux astéroïde 3200 *Phaethon*. Il brille près du Soleil comme les comètes qui ont une queue de poussière de 250 000 km de long. On ne sait toujours pas comment un astéroïde rocheux peut laisser derrière lui une traînée de débris entraînant la pluie de météores des Géminides.

L'anneau de poussières circumsolaire de Vénus

La sonde *Parker* a recueilli des données scientifiques au cours d'une campagne prolongée de dix jours du 12 au 23 janvier 2020, avant la quatrième rencontre au périhélie. La sonde est passée de 0,5 à 0,25 UA et a effectué un mouvement de roulis de 180° pour communiquer avec la Terre et gérer son propre élan. Ces manœuvres ne sont pas effectuées au périhélie solaire, car à ce moment, l'imageur WISPR ne regarde que dans la direction du mouvement. Au cours de la campagne prolongée, l'imageur WISPR a également enregistré des images dans la direction opposée. La Figure 5 montre une composition d'images WISPR projetées sur la surface d'une sphère.

Les nouvelles données montrent une faible émission qui s'étend sur tout le champ de vision de

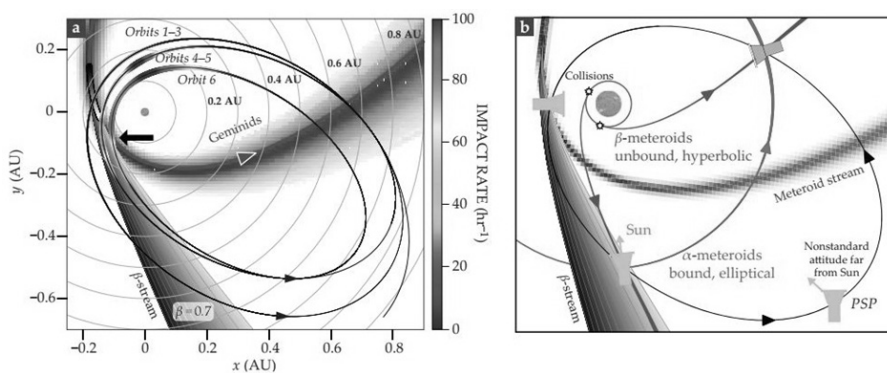


Figure 4 : Poussière dans l'héliosphère interne. (a) Taux d'impact des poussières mesurés par les antennes électriques FIELDS, superposés ici à la trajectoire de la sonde pour les orbites 1 à 6. (b) Plusieurs populations de poussières (non représentées à l'échelle) ont été identifiées : des *météoroïdes* α elliptiques, des *météoroïdes* β hyperboliques et un flux de poussières potentiel, connu sous le nom de flux β . La caractéristique grise en forme d'éventail vers le bas est un nouveau courant de poussière produit par les interactions entre la traînée de météorites des Géminides et le nuage de poussières zodiacales. (D'après Szalay J.R. & al., *Planet. Sci. J.* **2**, 185, 2021) (En couleurs en page 2 de couverture)

l'instrument avec un excès de luminosité d'environ 1 % par rapport à la lumière zodiacale de fond. Cette émission n'est manifestement pas un artefact et ne peut être d'origine coronale, car les structures coronales ne s'étendent pas aussi loin du Soleil.

L'émission coïncide précisément avec l'orbite de Vénus (voir Figure 5). La sonde a imagé pour la première fois l'intégralité de l'anneau de poussière circumso- laire au cours de sa 18^e orbite. Les données antérieures et ultérieures analysées avec la nouvelle technique de traitement ont

confirmé l'existence de l'anneau. La question est maintenant de savoir comment un tel anneau de poussière peut se former. Deux théories de piégeage gravitationnel s'affrontent : l'une par une résonance avec la planète et l'autre par des astéroïdes co-orbitaux sur l'orbite vénusienne. Chacune de ces théories pourrait être correcte, mais une autre interprétation n'est pas exclue pour mieux expliquer cet anneau de poussière.

La mission principale de la sonde *Parker* dure depuis cinq ans. Jusqu'à présent, il a découvert de nombreux phénomènes au voisinage du minimum solaire. Mais le maximum solaire est prévu pour 2025 et les chercheurs sont impatients de voir la sonde traverser les éruptions solaires les plus violentes, dont les données pourraient révéler comment les particules sont accélérées jusqu'à atteindre des niveaux extrêmes.

La sonde *Parker* est en train de réécrire les manuels sur notre compréhension du Soleil, du vent solaire et, plus généralement, des étoiles et de leurs vents.

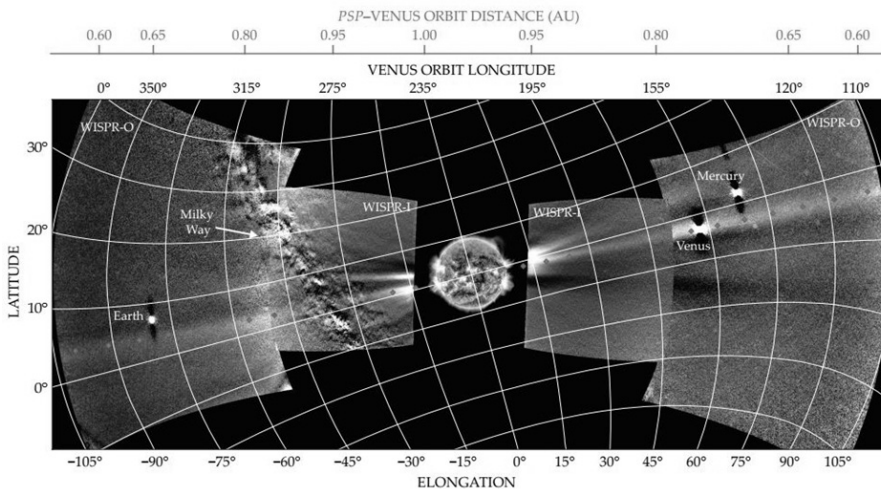


Figure 5 : Anneau de poussière.

Un anneau de poussière circumso- laire, identifié par une faible émission le long de l'orbite de Vénus (ligne oblique pointillée), a été observé pour la première fois. Le capteur WISPR a recueilli les images au cours de la campagne prolongée qui a précédé la quatrième rencontre au périhélie. Le Soleil (masqué par le bouclier thermique) est au centre. Les images à droite et à gauche sont respectivement dans la direction du mouvement et dans la direction opposée. (D'après Stenborg G. & al., *Astrophys. J.* 910, 157, 2021)

INSTITUT ROYAL MÉTÉOROLOGIQUE :

BILAN CLIMATOLOGIQUE D'OCTOBRE 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.

Un mois chaud et humide

Une première décade du mois la plus chaude

Le mois d'octobre a commencé comme le mois de septembre s'est terminé : avec des températures élevées pour cette période de l'année. Il en a été ainsi jusqu'au 13 du mois. Ensuite, les températures ont oscillé autour de la normale. Au final, la température moyenne d'octobre 2023 a été de

13,6 °C (norm. : 11,3 °C), ce qui la place juste en dehors des cinq mois d'octobre les plus chauds pour la période de référence actuelle.

La température moyenne de la première décade (1-10 octobre) a été la plus élevée pour la période de référence actuelle : 16,6 °C (norm. : 12,5 °C). Le précédent record remontait à 1995 (16,0 °C). Les températures maximales ont été particulièrement frappantes. La

température maximale moyenne pour ces 10 jours était de 21,9 °C (norm. : 16,3 °C). Le précédent record datait également de 1995 (20,3 °C). Il est intéressant de souligner que le record absolu pour ce paramètre (mesures depuis 1892) se situe en 1921 avec une température maximale moyenne de pas moins de 24,5 °C.

À Uccle, il a été encore enregistré en octobre 9 jours de printemps [max >= 20 °C], dont 7 au cours de la première décennie, et 1 jour d'été [max >= 25 °C]. Ces deux paramètres ont une place dans le top 3 pour la période de référence actuelle :

- Jours de printemps : deuxième place, avec 2005 et 2022. Le record reste à 11 jours en 2018.
- Jours d'été : troisième place, avec 2017 et 2022. Le record reste celui de 2011 avec 3 jours. En 2018, il y en avait eu 2.

Le record absolu pour ces deux paramètres (mesures depuis 1892) reste celui de 1921 avec pas moins de 15 jours de printemps et 5 jours d'été.

Les températures ont varié entre 3,2 °C (16 octobre) et 26,5 °C (2 octobre) à Uccle. Cette dernière valeur est la deuxième plus élevée pour la période de référence actuelle, après 2011 (26,9 °C). Si on considère l'ensemble des mesures depuis 1892, octobre 2023 est repoussé à la troisième place par l'année 1985 (26,6 °C).

Sur l'ensemble du territoire, la température minimale la plus basse a été enregistrée le 16 octobre à Elsenborn (Bütgenbach) avec -3,4 °C et la température maximale la plus élevée le 2 octobre à Kapelle-op-den-Bos avec 27,5 °C.

Des précipitations finalement plus importantes que la moyenne

La première décennie (1-10 octobre) a non seulement été très chaude, mais aussi très sèche. Pendant ces 10 premiers jours, il n'a été enregistré que 0,1 mm de précipitations à Uccle (norm. : 27,7 mm). Il s'agit donc de la première décennie d'octobre la plus sèche pour la période de référence actuelle. Le précédent record remontait à 1991 (1,9 mm). Si on considère l'ensemble de la période de référence (mesures depuis 1892), on constate que seule la première décennie de 1969 n'avait connu aucune précipitation.

Les deux décennies suivantes ont été à chaque fois plus humides que la moyenne et le nombre de jours de précipitations a également continué à augmenter. Au cours de la deuxième décennie (11-20 octobre), il y a encore eu quelques jours secs à Uccle, alors qu'il a, au minimum, plu brièvement tous les jours au cours de la troisième décennie (21-31 octobre).

Finalement à Uccle, il a été enregistré un cumul de précipitations supérieur à la norm. : 87,2 mm (norm. : 67,8 mm), ce qui reste très loin du record de 1998 (128,7 mm).

À Uccle cette quantité est tombée en 18 jours (norm. : 16,1 jours).

Le total journalier le plus grand a été de 13,2 mm et a été enregistré le 25 du mois.

Sur l'ensemble du territoire, les précipitations les plus faibles sont tombées dans le Condroz (environ 115 % de la normale) et les plus importantes en Campine (environ 185 % de la normale).

Au sein du réseau de surveillance

climatique de l'IRM, le total journalier le plus grand a été mesuré le 20 octobre à Witry (Léglise) (43,5 mm).

Le mois dernier, il n'a été enregistré dans le pays que 4 jours d'orage (norm. : 6,3 jours), soit autant qu'en 2007 et 2021. Ce n'est qu'en 2015 (0 jour), 2017 (2 jours) et 2007, 2021 (3 jours) qu'il y eut un nombre de jours d'orage plus faible.

Première chute de neige dans notre pays

La première neige est tombée dans les Hautes Fagnes le 15 octobre. Cependant, rien n'est resté sur le sol.

Une durée d'ensoleillement normale avec une très grande variabilité intra-mensuelle

Pour ce paramètre également, il y a eu une grande différence entre le début et la fin du mois. La première décennie (1-10 octobre) a été la deuxième plus ensoleillée pour la période de référence actuelle. Pendant ces 10 jours, le soleil a brillé 61 h 35 m à Uccle (norm. : 35 h 49 m). Le record reste celui de 2018 (80 h 07 m). En revanche, la troisième décennie (21-31 octobre) a été la plus sombre avec seulement 12 h 01 m de soleil (norm. : 33 h 42 m). Le précédent record datait de 1998 (12 h 20 m).

La durée totale d'ensoleillement pour ce mois d'octobre a finalement été très proche de la normale, atteignant un total de 106 h 29 m à Uccle (norm. : 112 h 38 m).

A.H. / R.D.
D'après un communiqué de l'
Institut Royal Météorologique
www.meteo.be

UN PREMIER BILAN CLIMATOLOGIQUE DE L'AUTOMNE 2023

Un automne très chaud avec une seconde moitié très pluvieuse

Une grande différence de précipitations entre la première et la seconde moitié de l'automne

À Uccle, il a été constaté une grande différence entre les précipitations de la première et de la seconde moitié de l'automne :

1er septembre - 15 octobre : au total, il a été enregistré 81,0 mm de cumul de précipitations sur 12 jours (norm. : 101,6 mm sur 21,9 jours). Ce faible nombre de jours de précipitations est un nouveau record (précédent record : 14 jours en 2018).

16 octobre - 30 novembre : au total, il a été enregistré 202,6 mm de cumul de précipitations sur 40 jours (norm. : 107,9 mm en 26,6 jours). Il s'agit de deux nouveaux records (précédents : 194,3 mm en 1991 et 36 jours en 2000).

Dans l'ensemble, les précipitations de l'automne dernier ont été supérieures à la moyenne : 283,7 mm (norm. : 209,3 mm), soit la quatrième valeur la plus élevée pour la période de référence actuelle. Cette quantité est tombée sur 52 jours (norm. : 48,5 jours), dont 26 jours en novembre (égalant le record de la période de référence actuelle pour cette saison).

Le total journalier le plus élevé a été de 26,0 mm et a été enregistré dès le 1er septembre.

Le mois de novembre a été mar-

qué par de très fortes précipitations dans le sud de la province de Flandre occidentale. À la station de Beerst (Diksmuide), pas moins de 274,8 mm de précipitations sont tombés (norm. : 97,4 mm).

Sur l'ensemble de notre territoire, les précipitations régionales moyennes ont été partout supérieures aux valeurs normales et ont varié d'environ 125 % dans le Borinage jusqu'à environ 160 % en Flandre par rapport aux normales.

Cet automne, des précipitations journalières d'au moins 40 mm sont tombées localement les 1, 12 et 16 septembre, le 20 octobre et le 2 novembre. La plus grande quantité tombée a été enregistrée à Dilbeek avec 54,2 mm le 1^{er} septembre.

Cet automne encore, il a été enregistré 20 jours d'orage dans notre pays (norm. : 17,8 jours).

Premières neiges dans notre pays

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

En novembre, des précipitations composées partiellement ou en totalité de neige sont tombées sur notre pays durant 7 jours. Localement, cela a créé une couverture neigeuse du 24 novembre à la fin du mois. L'épaisseur maximale a été mesurée au Mont-Rigi (Waimes) et était de 15 cm le 30 novembre.

Une première vague de chaleur durant l'automne

L'automne a commencé par un nouveau record absolu. À Uccle, septembre 2023 a été le mois de septembre le plus chaud depuis le début des observations en 1833. Pour la première fois depuis le début des observations en 1892, Uccle a également connu une vague de chaleur au cours d'un mois de septembre (du 4 au 11 septembre). *IRM - Première vague de chaleur jamais enregistrée au cours d'un mois de septembre (meteo.be).*

Pour les deux mois d'automne suivants, la température moyenne mensuelle a également été supérieure à leur normale respective. L'automne, dans son ensemble, a donc été plus chaud que la moyenne : 13,4 °C (valeur normale 11,2 °C). Il s'agit du deuxième automne le plus chaud depuis le début des observations en 1833. Le record reste à 13,9 °C en 2006.

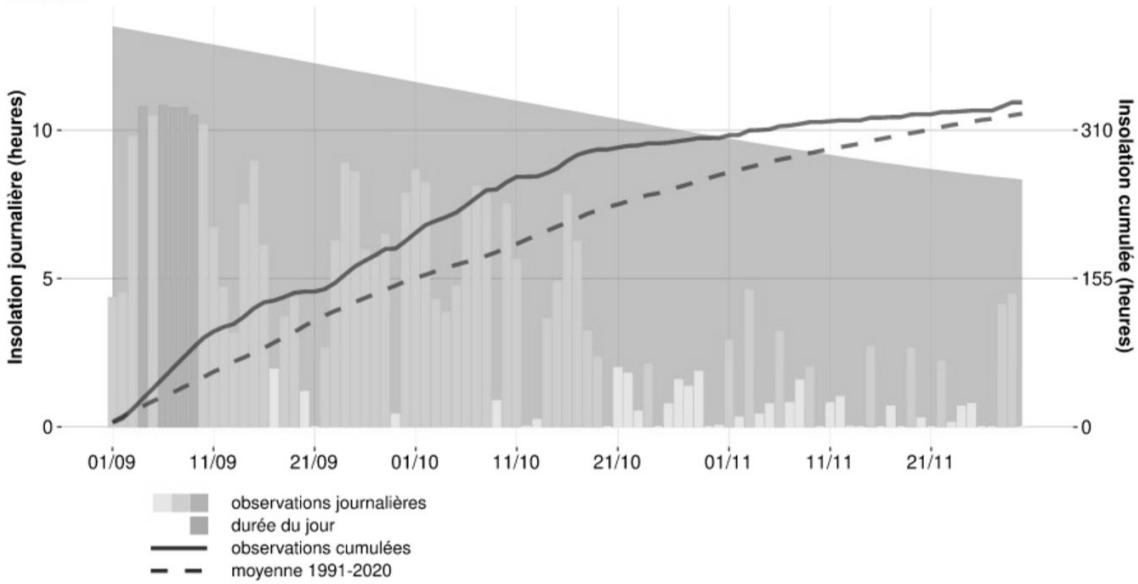
Trois autres faits marquants :

- 32 jours de printemps [max \geq 20 °C] (norm. : 15,1 jours). Ce chiffre est égal au record absolu de 1921, 1959 et 2006 (mesures effectuées à partir de 1892).
- 10 jours d'été [max \geq 25 °C] (norm. : 2,5 jours). Il s'agit d'un nouveau record pour la période de référence actuelle (record précédent : 9 jours en 2006 et 2011). Sur l'ensemble des mesures depuis 1892, il y a eu seulement un automne avec plus de jours d'été : 11 en 1911.



Durée d'insolation, Uccle, automne 2023

total de la saison: 339.1 h = 35 % (normale: 332.9 h = 34 %)



• 6 jours de chaleur [max ≥ 30 °C] (norm. : 0,1 jour), un triplement du nombre de jours du record précédent (2 jours en 1906, 1911, 1919, 1949 et 2020).

À Uccle, les températures ont varié entre -0,3 °C (30 novembre) et 31,9 °C (10 septembre). Cette dernière valeur est la troisième plus élevée pour cette saison depuis le début des observations en 1892. Le record se situe en 2020 (34,3 °C) et il avait été enregistré une journée d'automne plus chaude en 1929 (32,8 °C).

Sur l'ensemble du territoire de la Belgique, la température la plus basse a été enregistrée le 29

novembre : -7,8 °C à Saint-Vith. La température la plus élevée a été enregistrée le 9 septembre : 33,8 °C à Zulzeke (Kluisbergen).

Une grande différence entre la durée d'ensoleillement de la première et de la seconde moitié de l'automne

Outre les précipitations, il a pu également être constaté une grande différence entre la durée d'ensoleillement de la première et de la seconde moitié de l'automne à Uccle (voir diagramme ci-dessus) :

• 1er septembre - 15 octobre : au total, il a été enregistré 270 h 08 m d'ensoleillement (norm. : 208 h 38 m). Il n'y a

qu'en 2018 que cette période avait été beaucoup plus ensoleillée : 316 h 16 m.

• 16 octobre - 30 novembre : au total, il n'a été enregistré que 68 h 56 m d'ensoleillement (norm. : 118 h 02 m). Il s'agit d'un nouveau record de déficit d'ensoleillement (précédent record : 75 h 29 m en 2010).

Dans l'ensemble, l'automne 2023 a été légèrement plus ensoleillé que la moyenne : 339 h 4 m (norm. : 332 h 52 m).

A.H. / R.D.

D'après un communiqué de l'Institut Royal Météorologique
www.meteo.be



Rubrique

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

Anne Haubrechts

La vie de la Société est évoquée en entrée de ce nouveau numéro de *Ciel et Terre* dont c'est la fin de la 33ème année de publication. Ce Bulletin s'ouvre sur le rapport

très bref de l'Assemblée Générale du 30 juin 1928. Vient ensuite le rapport de la séance mensuelle du 27 août consacrée à la réception faite par la Société à M. Van

Biesbroeck, le savant astronome, notre collègue belge, aujourd'hui professeur et membre de l'Observatoire de Yerkes (USA) de retour en Europe pour quelques mois et qui

honore sa promesse de présenter une conférence avec projections sur la vie scientifique de l'Observatoire de Yerkes, sa vie intellectuelle à laquelle, comme chacun sait, il prend la part la plus active. Enfin, on lit le rapport de la séance mensuelle du samedi 27 octobre suivi du texte de l'allocution du Président destinée à ouvrir la session scientifique 1928-1929. M. Lagrange a exposé qu'après des avatars pénibles amenés dans ces dernières années par la situation financière et la perte que la Société d'astronomie a faite en la personne de M. Fernand Jacobs, [nous avons] le grand espoir, grâce au secours d'amis et de la Fondation Universitaire de voir cette situation s'améliorer dans un avenir prochain. Cet exposé a été chaudement applaudi par l'Assemblée qui a constaté que si la situation financière n'est pas brillante, les travaux que le Bulletin a insérés en 1928, prouvent son active vitalité scientifique.

E.-M. Antoniadi signe ensuite la première partie d'un travail sur l'astronomie grecque. L'auteur affirme d'emblée que *Le génie créateur dont les Hellènes ont fait preuve dans l'étude de l'univers est pleinement digne de leurs incomparables chefs-d'œuvre dans toutes les autres branches des connaissances humaines. Mais leur science astronomique a été systématiquement représentée sous un faux jour depuis quatre cents ans et amoindrie au point d'être souvent ignorée en Europe. Quelques compilateurs et savants modernes des XVI^e et XVII^e siècles ont largement puisé dans les écrits des anciens, mais en oubliant la source de leur inspiration et en se gardant bien de les mentionner, ce qui leur a permis de passer pour des créateurs originaux pendant des centaines d'années.* L'objectif est donc de démontrer par quelques exemples la *véracité de la thèse*. Le texte est illustré d'une photo d'Aristote et des dessins de six instruments antiques (Diopre

ou aliade pour viser, Astrolabe, Instrument parallactique goniométrique de Ptolémée, Plinthe ou quart de cercle placé dans le plan du méridien et donnant la distance zénithale du Soleil à midi vrai, Armilles solsticiales, Armilles équinoxiales).

L'article *La vitesse de la lumière* est une nouvelle suite (la quatrième) du texte de M.-E.-J. Gheury de Bray.

A. Piérot, professeur, présente ensuite sous le titre *Choses de la Lune* son appréciation sur une étude et une carte lunaire publiée dans la revue *L'Illustration* du 19 mai 1928 par M. Lucien Rudaux qui devrait, selon lui, avoir retenu l'attention de maints sélénographes. *C'est la première fois, selon lui qu'un chercheur du problème lunaire songe à invoquer la différence de coloration des diverses régions du sol comme appui à son hypothèse. L'hypothèse de M. Rudaux évoque celle de Puiseux et celle de M. Delmotte, du côté de la tissuration primitive du globe lunaire ; elle côtoie de plus près la seconde, en adoptant le mécanisme de l'exsudation plutôt que celui des intumescences et des affaissements ; elle se caractérise surtout en ce qu'elle envisage la fragmentation répartie suivant les diverses colorations qu'elle attribue à la présence primitive d'une surface hétérogène dans sa constitution.*

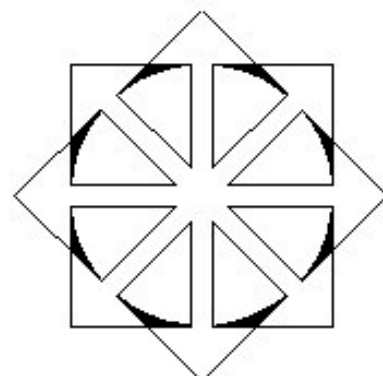
Sous le titre *Jupiter*, ce même auteur présente ensuite un croquis qu'il a réalisé le 7 septembre 1928 à 1 heure du matin, de la planète géante de notre système [qui] a fait sa réapparition dans notre ciel d'Orient, et offre, à nouveau, l'étude de ses mystérieux aspects à nos investigations télescopiques.

La Rédaction présente une traduction d'une note de F.-J.-M. Stratton, Secrétaire général de l'U.A.I concernant *L'éclipse de*

Soleil du 9 mai 1929 [qui] aura une durée maximum de totalité, c'est-à-dire plus de cinq minutes ; de ce fait elle sera l'éclipse la plus favorable des années qui vont suivre. En outre, le Soleil sera au moment du phénomène dans un champ d'étoiles très convenable pour servir de vérification à la théorie d'Einstein.

Le numéro se termine par les rubriques habituelles : *Le temps en novembre 1928* signé Em. V.D.L., *Janvier astronomique* [1929] signé Gaston Coutrez, *Notes* (au nombre de cinq : (1) *G. Grablovitz et la sismologie italienne* signée E.L. ; (2) *Au sujet de la vie des mondes* signée Fid D. ; (3) *Météore* signée Fid. D. ; (4) *Le volcanisme non signée* et (5) *La chute de poussières en Pologne du 26 au 28 avril 1928* non signée).

Les rubriques *Bibliographie* (six recensements) et *Personalialia* (la Rédaction se réjouit de diverses nominations à des postes remarquables de membres de notre Société de M. le baron Adrien de Gerlache, M. Remy, M. Ernest Van Biesbroeck, M. Jean Mascart et M. E. Delporte) terminent le numéro.



Communications du secrétariat

* * *

A tous les membres de la SRBA : Quo vadis ???

L'observation du ciel : vers la photographie pour les nuls ?

Le monde évolue très vite à tous les points de vue. Avant tout pour ce qui est du perfectionnement des instruments d'observation et de mesure. Qui dit progrès des outils dit observations de plus en plus précises, lointaines et ... confortables. Elle est loin la première lunette, il est loin le premier télescope. On peut aujourd'hui accéder au ciel profond comme « amateur », voire en ville, grâce à des petites merveilles de technologie compactes, performantes, transportables ainsi que très rapidement et très facilement mises en station (début de commercialisation de véritables petites stations d'observation à des prix très abordables, permettant un accès au ciel profond quel que soit pratiquement le temps, sans connaissance théorique ou expérimentale requise au départ). Les travaux d'astronomes qualifiés d'« amateurs » évoluent dans la foulée. Les plus jeunes malheureusement très peu instruits par un enseignement qui ne dispense plus de cours d'astronomie via notamment des notions d'optique incluses dans un cours de physique (voire de géographie physique en général) peuvent se faire plaisir en réalisant de très belles photos qu'ils peuvent partager sur leurs réseaux. Mais comment les connaissances sont et seront-elles transmises et intégrées ? Tout change pour le mieux et pour le pire. Les attentes face à une Société comme la nôtre vont aussi évoluer ...

Le Bulletin « Ciel et Terre »

Comme notre Société, le Bulletin va peu à peu s'adapter à notre époque moderne ... Dans l'immédiat, la rubrique « Ephémérides » va libérer quelques pages. En effet, il est désormais extrêmement facile de trouver ces informations sur divers sites (tels ceux de l'Observatoire Royal de Belgique ou encore et surtout ceux de l'USNO (Observatoire naval américain du NAO (*Nautical Almanach Office*)), de l'Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides (IMCCE) du Bureau des Longitudes et de l'Observatoire de Paris, ou encore du Bureau NAO britannique (*United Kingdom Hydrographie Office*), ou encore du *Jet Propulsion Laboratory (JPL, Caltech, USA)*), voire de simuler la représentation du ciel pour un lieu quelconque à une date précise pour un moment précis (voir par exemple le logiciel libre *Stellarium GNU (General Public License)*). Nos membres en règle de cotisation ont pu recevoir l'annuaire astronomique 2024 de l'Observatoire Royal de Belgique sur simple demande à notre Secrétariat. L'Open Access (Accès Libre) devenant obligatoire au 1^{er} janvier 2025, vous trouverez dans l'encart des tables des auteurs et des matières du présent numéro la règle que la Société, comme tous les éditeurs du monde, se doit de respecter.

Les Fonds associés de la SRBA : Fonds LDK (Fonds Lucie Dekeyzer) et Fonds FDS (Fonds de Diffusion Scientifique)

Depuis vingt ans, la Société Royale Belge d'Astronomie, de Météorologie et de Physique du Globe est l'organisatrice du Grand Prix annuel Lucie Dekeyzer qui offre un bel instrument d'observation aux plus jeunes (de 15 ans à 24 ans). Le Conseil d'administration a, de plus, très récemment, décerné le premier Grand Prix Quadriennal Lucie Dekeyzer au projet Grogard de l'observatoire privé de La Fosse (*CT vol 139, n°5, p 160*). Enfin, une extension en direction des étudiants (de licence/master ou équivalent) dans une institution relevant de la compétence de la Communauté Française de Belgique (quel que soit le nom de celle-ci) est actuellement à l'étude. Elle devrait être lancée dès la rentrée académique 2024-2025 avec pour but de fournir un appoint financier à un étudiant de master ou doctorat dans le cadre d'un projet d'étude, de mémoire, de stage, ...

Nous reviendrons vers ces différents points dans les futurs numéros ainsi que dans le rapport du Secrétaire Général lors de la prochaine assemblée générale qui devrait se dérouler, en principe, à la fin du mois d'avril 2024.

D'ores et déjà le secrétariat vous souhaite une année 2024 astronomiquement intéressante et aussi riche en observations que possible.

Du 1^{er} septembre 2023 au 31 janvier 2024

VINGT-ET-UNIÈME GRAND PRIX LUCIE DEKEYZER

*Pour jeunes astronomes amateurs (15-24 ans) sur le thème **Si j'avais un télescope, j'observerais***

...