Newsletter n° 6.2 du Club Copernic
Mars 2026

Voie Lactée & Système Solaire

Variabilité solaire • Rayons cosmiques • Mission Gaia

— Partie I —

La variabilité solaire et le cycle de 11 ans

Le Soleil n'est pas une source d'énergie constante et immuable. Son activité fluctue selon plusieurs échelles de temps, avec des conséquences observables sur notre environnement spatial et, plus indirectement, sur le climat terrestre.

Le cycle solaire de 11 ans

L'activité solaire est rythmée par un cycle d'environ 11 ans, appelé cycle de Schwabe du nom de l'astronome Heinrich Schwabe qui le mit en évidence en 1843. Ce cycle se manifeste par la variation périodique du nombre de taches solaires visibles à la surface du Soleil.

Les taches solaires : marqueurs de l'activité magnétique

Les taches solaires sont des régions de la photosphère où le champ magnétique local est particulièrement intense — de l'ordre de 2 000 à 4 000 gauss, contre environ 1 gauss pour le champ magnétique moyen à la surface. Cette concentration de flux magnétique inhibe la convection thermique, provoquant un refroidissement local : les taches apparaissent sombres car leur température (environ 3 500–4 500 K) est inférieure à celle de la photosphère environnante (~5 778 K).

Au minimum solaire, la surface est quasi exempte de taches. Au maximum, des dizaines voire une centaine de taches peuvent être observées simultanément, souvent regroupées en régions actives complexes.

> *Le nombre de Wolf (ou nombre de Zürich) est l'indicateur historique de l'activité solaire par comptage des taches. Les séries de données remontent au XVIIe siècle, permettant une étude sur plusieurs siècles.*

La dynamique magnétique : le cycle de Hale

Derrière le cycle de 11 ans se cache un cycle magnétique plus profond de 22 ans, dit cycle de Hale. À chaque cycle de 11 ans, la polarité magnétique globale du Soleil s'inverse : les pôles magnétiques s'échangent au moment du maximum solaire. Il faut donc deux cycles de 11 ans pour retrouver la même configuration magnétique de départ, soit 22 ans en tout.

Ce renversement est la conséquence du mécanisme dynamo qui opère dans la zone de convection solaire. Le mouvement différentiel de rotation — le Soleil tourne plus vite à l'équateur (≈ 25 jours)

qu'aux pôles (≈ 35 jours) — étire et enroule progressivement les lignes de champ magnétique, jusqu'à ce que leur énergie accumulée se libère violemment lors d'éruptions et d'éjections de masse coronale (CME).

Les manifestations de l'activité solaire

Éruptions solaires et éjections de masse coronale (CME)

Les éruptions solaires (flares) sont des libérations brutales d'énergie magnétique dans la couronne solaire. Elles produisent un rayonnement intense sur tout le spectre électromagnétique — particulièrement en UV et en rayons X — qui atteint la Terre en environ 8 minutes. Ces éruptions perturbent l'ionosphère terrestre et peuvent provoquer des coupures radio sur la face éclairée de la Terre.

Les CME sont des éjections de milliards de tonnes de plasma coronal à des vitesses pouvant dépasser 2 000 km/s. Lorsqu'une CME percute la magnétosphère terrestre, elle peut déclencher de puissantes tempêtes géomagnétiques, susceptibles de perturber les réseaux électriques, les satellites et les systèmes GPS. La tempête de 1989 avait ainsi plongé la province canadienne du Québec dans le noir pendant 9 heures.

> *La météorologie spatiale est aujourd'hui un enjeu majeur pour nos sociétés connectées. Des agences comme ESA (mission Vigil) et NOAA assurent une surveillance permanente du Soleil pour anticiper ces événements.*

Le vent solaire et l'héliosphère

Le Soleil émet en permanence un flux de particules chargées — principalement des protons et des électrons — appelé vent solaire. Ce vent, dont la vitesse typique est de 400 à 800 km/s, sculpte l'héliosphère : une immense bulle magnétique qui enveloppe tout le système solaire jusqu'à l'héliopause, à environ 120 UA du Soleil.

L'intensité du vent solaire varie avec le cycle : au maximum, le champ magnétique interplanétaire est plus complexe et dense, modifiant la trajectoire des rayons cosmiques galactiques qui tentent de pénétrer dans le système solaire. Ce phénomène, appelé modulation solaire des rayons cosmiques, constitue le pont direct avec la partie suivante.

Variabilité solaire à plus longue période

Au-delà du cycle de 11 ans, le Soleil présente des variations d'activité sur des échelles de temps plus longues, identifiables dans les archives géologiques et historiques :

Minimum de Maunder (1645–1715) : quasi-disparition des taches solaires pendant 70 ans, corrélé au Petit Âge Glaciaire en Europe

Minimum de Dalton (1790–1820) : réduction marquée de l'activité, décennies particulièrement froides

Maximum Moderne (XXe siècle) : activité solaire élevée et soutenue de ~1950 à 2000, depuis en déclin

Cycles de Gleissberg (~87 ans) : modulation de l'amplitude des cycles de 11 ans, détectée dans les archives de radiocarbone ^{14}C

Cycles de Hallstatt (~2 400 ans) : grand cycle détecté dans les isotopes cosmogéniques (^{10}Be, ^{14}C) dans les carottes glaciaires

> *ATTENTION : le lien causal entre variabilité solaire et climat terrestre est réel mais modeste et non dominant par rapport aux gaz à effet de serre anthropiques sur les changements climatiques actuels. C'est un domaine scientifiquement actif mais parfois instrumentalisé dans les débats publics.*

— Partie II —

Bras spiraux galactiques et flux de rayons cosmiques

Une hypothèse fascinante, mais encore scientifiquement controversée, suggère que les passages de notre système solaire à travers les bras spiraux de la Voie Lactée auraient pu influencer le flux de rayons cosmiques reçu par la Terre, et par cascade, le climat terrestre sur des échelles de temps géologiques.

Les rayons cosmiques galactiques : nature et origine

Les rayons cosmiques galactiques (GCR, pour Galactic Cosmic Rays) sont des particules subatomiques — principalement des protons (90 %), des noyaux d'hélium (9 %) et une fraction d'électrons et de noyaux plus lourds — accélérées à des énergies relativistes par des objets astrophysiques violents, essentiellement des rémanents de supernovæ.

Ces particules voyagent à travers le milieu interstellaire, diffusant sur les irrégularités du champ magnétique galactique. En pénétrant dans l'héliosphère, une partie est déviée ou ralentie par le vent solaire (modulation solaire, cf. Partie I). Celles qui atteignent la haute atmosphère terrestre créent des gerbes de particules secondaires, notamment des muons et des neutrons.

L'hypothèse de Svensmark : rayons cosmiques et nucléation des nuages

En 1997, le physicien danois Henrik Svensmark proposa un mécanisme par lequel les rayons cosmiques pourraient influencer le climat terrestre : en ionisant l'atmosphère basse, ils favoriseraient la nucléation de gouttelettes d'eau, augmentant la couverture nuageuse basse et refroidissant la surface terrestre.

Cette hypothèse a donné lieu à l'expérience CLOUD au CERN, qui a effectivement démontré que les rayons cosmiques peuvent contribuer à la nucléation de particules d'aérosols dans des conditions contrôlées. Cependant, le lien quantitatif entre ce mécanisme et une variation significative de la couverture nuageuse globale reste très débattu et non établi comme dominant.

> *Statut scientifique actuel : l'hypothèse Svensmark est plausible comme mécanisme mineur, mais insuffisamment étayée pour en faire un moteur climatique majeur. Les données satellitaires sur la couverture nuageuse et les rayons cosmiques montrent des corrélations faibles et non robustes sur le long terme.*

Le bras d'Orion et notre position galactique

Notre Soleil réside actuellement dans une région relativement calme entre deux bras spiraux majeurs : le bras de Persée (plus interne) et le bras du Centaure (plus externe). Le bras d'Orion où nous nous trouvons est un éperon secondaire, moins dense en étoiles massives et en supernovæ que les bras principaux.

Cette position pourrait ne pas être anodine. Les bras spiraux sont des zones de formation stellaire intense, peuplées d'étoiles massives à courte durée de vie qui terminent leur existence en supernovæ — les principales sources de rayons cosmiques galactiques. Se trouver dans un bras principal exposerait le système solaire à un flux de GCR plus élevé et à des événements de supernovæ plus fréquents à proximité.

La traversée des bras spiraux sur l'échelle géologique

Notre système solaire met environ 225 millions d'années pour effectuer un tour complet de la Voie Lactée. À cette vitesse, il traverse périodiquement les bras spiraux. Certains chercheurs, notamment Nir Shaviv et Jan Veizer (2003),(**climatosceptiques notoires**) ont proposé une corrélation entre ces traversées (toutes les 140 millions d'années environ) et les grandes glaciations de l'histoire terrestre, en utilisant les isotopes cosmogéniques comme proxy du flux de GCR.

Cette corrélation, constituerait un lien direct entre la dynamique galactique et l'histoire climatique de la Terre. Cependant, les études ultérieures ont montré que les incertitudes sur les périodes de traversée des bras et sur la datation des glaciations rendent ces corrélations fragiles et non conclusives.

Période de traversée d'un bras spiral : ~10 à 30 millions d'années selon sa largeur et la vitesse relative

Intervalle entre deux traversées : ~140 millions d'années en moyenne

Taux de supernovæ dans un bras principal : 2 à 5 fois plus élevé que dans le bras d'Orion

Portée létale d'une supernova proche : ~ 25–50 années-lumière pour un impact significatif sur la biosphère

> *Le Soleil est actuellement dans une position protégée par la Bulle Locale, une cavité de gaz chaud et raréfié d'environ 300 années-lumière de diamètre, creusée par des supernovæ anciennes. Cette bulle filtre partiellement le flux de rayons cosmiques interstellaires.*

Un lien galactique-climatique : hypothèse ou réalité ?

Le consensus scientifique actuel est nuancé. Si l'environnement galactique influence réellement le flux de rayons cosmiques reçu par la Terre sur des échelles de temps de plusieurs dizaines de millions d'années, l'impact climatique quantitatif reste difficile à distinguer d'autres éléments (variations orbitales, tectonique des plaques, volcanisme, composition atmosphérique). La recherche dans ce domaine est active, et la mission Gaia apporte des données précieuses pour contraindre les modèles de traversée des bras spiraux.

Ces structures spirales résultent d'ondes de densité qui traversent le disque galactique et y concentrent des vagues de gaz froid, où s'allument ensuite des bouffées d'étoiles. Ces bras semblent transitoires, se dispersant et se recréant en quelques centaines de millions d'années. *"Le bras de Persée, le plus proche du Soleil, serait ainsi en train de se dissiper, tandis que le bras externe semble croître"*

"Les bras spiraux n'ont cependant pas la même vitesse de rotation autour de la Galaxie que les étoiles ou le gaz qui la composent, observe-t-elle*. Contrairement aux étoiles, les ondes de densité se déplacent dans le disque galactique avec une vitesse relativement constante."* Étoiles et gaz traversent ainsi les bras spiraux, entrant et sortant comme les molécules d'eau d'un lac parcouru par une onde, sans partager sa vitesse de propagation. En cinq milliards d'années d'existence, le Système solaire est ainsi passé une dizaine de fois au travers des bras spiraux et nous devrions à terme entrer à nouveau dans un bras.**(Francoise Combes science et avenir 2024)**

En résumé, notre système solaire est engagé dans un mouvement complexe dans la galaxie de la Voie lactée. Il orbite le centre galactique, se déplace à travers ses bras en spirale, oscille verticalement et interagit avec ses voisins stellaires. Ce grand mouvement est régi par les forces gravitationnelles de la galaxie et de ses composants.

— Partie III —

La mission Gaia et la cinématique galactique

Lancée en décembre 2013 par l'Agence Spatiale Européenne (ESA), la mission Gaia représente une révolution dans notre connaissance de la Voie Lactée. En mesurant avec une précision microsarcseconde les positions, distances et mouvements propres de plus d'un milliard d'étoiles, Gaia dresse la carte tridimensionnelle la plus détaillée jamais réalisée de notre galaxie.

Principe et instrument

Gaia opère au point de Lagrange L2 du système Terre-Soleil, à 1,5 million de kilomètres de la Terre, dans un environnement thermiquement stable. Son principe est celui de l'astrométrie de précision : en mesurant avec une très grande précision la position angulaire de chaque étoile à des intervalles réguliers, Gaia détecte les micro-déplacements apparents dus à la parallaxe — le léger changement de direction apparent d'une étoile lorsque la Terre (et donc Gaia) se déplace autour du Soleil.

Nombre d'étoiles cataloguées : 1,5 milliard (données DR3, 2022)
Précision en parallaxe : < 20 microsecondes d'arc pour les étoiles brillantes
Précision en mouvement propre : quelques dizaines de µas/an
Vitesses radiales mesurées : ~33 millions d'étoiles avec spectroscopie Doppler (DR3)
Données photométriques : magnitudes en bandes G, BP, RP pour toutes les sources
Dernière publication majeure : Data Release 3 (DR3) : juin 2022 — DR4 attendu vers 2025–2026

Ce que Gaia a révélé sur la Voie Lactée

La structure en 6D de notre galaxie

Pour la première fois, Gaia fournit pour des centaines de millions d'étoiles non seulement leur position en 3D (grâce aux parallaxes) mais aussi leur vecteur vitesse complet en 3D (grâce aux mouvements propres et aux vitesses radiales). Cette description à 6 dimensions de l'espace des phases — position + vitesse — est le Saint Graal de la dynamique galactique, car elle permet de remonter à l'histoire orbitale de chaque étoile.

La fusion galactique avec Gaïa-Encelade

L'une des découvertes les plus spectaculaires issues des données Gaia est la mise en évidence d'une ancienne fusion galactique majeure, survenue il y a environ 8 à 11 milliards d'années. Une galaxie naine, baptisée Gaïa-Encelade (ou Gaïa Sausage), aurait fusionné avec la proto-Voie Lactée, déposant une large population d'étoiles au sein du halo interne avec des orbites très elliptiques et rétrogrades caractéristiques.

Cette découverte a profondément remanié notre compréhension de la formation et de l'histoire de notre galaxie. Elle explique notamment l'existence de deux populations distinctes dans le halo stellaire : un halo interne dominé par les débris d'Encelade, et un halo externe composé d'étoiles capturées ultérieurement.

> *La structure en « saucisse » (elongated in velocity space) qui a donné le surnom « Gaia Sausage » est clairement visible dans les diagrammes vitesse radiale vs vitesse azimutale des étoiles du halo issues des données Gaia DR2.*

Les courants stellaires et la dynamique des bras spiraux

Gaia a révélé l'existence de nombreux courants stellaires — des groupes d'étoiles partageant une histoire orbitale commune — invisibles à l'œil nu et non détectables avant l'ère Gaia. Ces courants sont les vestiges d'amas globulaires ou de galaxies naines partiellement dissous par les forces de marée galactiques. Leur cartographie permet de contraindre le potentiel gravitationnel de la Voie Lactée et donc la distribution de matière noire.

La mission a également mis en évidence des perturbations dans le disque galactique — ondes de densité, oscillations verticales — probablement causées par le passage proche de la galaxie naine du Sagittaire il y a plusieurs centaines de millions d'années. Le disque de la Voie Lactée n'est donc pas plat mais légèrement ondulé, comme la surface d'un étang après qu'une pierre y a été jetée.

Implications pour la position du Soleil

Gaia a affiné la distance du Soleil au centre galactique : 8 178 ± 26 parsecs (environ 26 670 années-lumière), soit une valeur légèrement inférieure aux estimations antérieures. La vitesse circulaire du Soleil autour du centre galactique a été réévaluée à environ 233 km/s.

Ces mesures précises permettent de mieux modéliser la trajectoire passée et future du Soleil dans la galaxie, et notamment ses traversées des bras spiraux

Les publications de données Gaia

Les données Gaia sont publiées par séries (Data Releases) au fur et à mesure de l'avancement de la mission et du traitement des données :

DR1 (sept. 2016) : 1,1 milliard de sources, parallaxes pour 2 millions d'étoiles (mission HIPPARCOS)

DR2 (avril 2018) : 1,3 milliard de sources avec parallaxes et mouvements propres — première révolution

EDR3 (déc. 2020) : précision améliorée en astrométrie et photométrie, corrections systématiques

DR3 (juin 2022) : catalogue complet avec spectroscopie, paramètres astrophysiques, variables, exoplanètes

DR4 (attendu ~2025–2026) : données de toute la mission, précision maximale — la version définitive

> *Toutes les données Gaia sont en accès libre sur le portail ESA Gaia Archive (gea.esac.esa.int). La communauté scientifique mondiale a produit des milliers d'articles exploitant ces données depuis 2016.*

Sources :

https://actugeologique.fr/2020/05/les-eres-glaciaires-ne-sont-pas-provoquees-par-le-voyage-de-la-terre-a-travers-notre-galaxie/

https://science.nasa.gov/heliophysics/focus-areas/solar-science/

https://science.gsfc.nasa.gov/heliophysics/solar

https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/index.html

https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/bulletin-archive#

https://www.sciencesetavenir.fr/espace/voie-lactee/il-y-a-10-milliards-d-annees-notre-galaxie-fusionnait-avec-gaia-encelade_160659

https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/climatologie-rechauffement-role-uv-nuages-rayons-cosmiques-1253/page/4/

https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/augmentation-temperature-minimum-activite-solaire-ere-glaciaire-deux-phenomenes-bien-differents-59011/

dernières minutes : Age de notre Univers

https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/astronomie-probleme-age-univers-nouveau-rebondissement-enigme-tension-hubble-132619/

https://sciencepost.fr/oubliez-les-136-milliards-dannees-la-naissance-de-lunivers-est-probablement-beaucoup-plus-ancienne/