

INDICATEURS DE LA METEO SOLAIRE

INTERPRETATION DES PRINCIPAUX PARAMETRES SOLAIRES

Sources : NOAA, Observatoire de Paris, CNRS, SolarHam, ARRL, Cq Mag, Space Weather, HamQsl, W7RI, W4RQ, Peter Meadows, Kyoto university...
Par Eric Cordier, F4FAP - V30a (août 2023)

LE SOLEIL : Situé à ≈ 150 millions de km de la terre (soit 1 unité astronomique - UA) • Depuis 4,7 milliards d'années et brillera encore 5 milliards d'années • 333.000 fois la masse de la terre • 1.303.000 fois plus lumineux que la terre • Composé principalement de 3/4 d'hydrogène et 1/4 d'hélium • Chaque sec, fusion nucléaire de 620 millions de tonnes d'hydrogène en hélium • 5500°C en surface, 15 millions°C au cœur • Envoie sa lumière vers la terre en ≈ 8 min, ses particules issues d'éruptions en moins de 9 min, ses particules issues de CME en 2 à 4 jours • Produit 400 millions de trillions (milliards x milliards) de joules chaque seconde • Champ magnétique interplanétaire généré par le soleil 5000 fois supérieur à celui de la terre, influant jusqu'à 100-160 UA (tout le système solaire et au delà) • Rotation différentielle (vers l'Est solaire) : ≈ 24,5 jours à l'équateur, ≈ 37 jours aux pôles • Représente à lui seul 99,85 % de la masse du système solaire • Vitesse de libération gravitationnelle solaire : 617 km/sec • Cycle moyen : 11 ans (cycle 25 en cours : ≈ 2020 → ≈ 2031).

LA TERRE : 1/109ème du diamètre solaire (≈ 12700 km) • Tourne autour du soleil à ≈ 30 km/sec • Vitesse de libération gravitationnelle terrestre : 11 km/sec.

A, K -ou- Ap, Kp -ou- A Index, K Index -ou- Planetary -ou- Plntry ► INDICATEURS GEOMAGNETIQUES PLANÉTAIRES

Effet des particules du vent solaire sur le Champ Magnétique Terrestre (CMT) • Kp - composante horizontale planétaire du CMT mesurée sur 3h (Maj 8 fois/j) • Ap - niveau d'instabilité planétaire du CMT mesuré sur 24h (Maj 1 fois/j) • Corrélation avec Bz • Un indicateur Kp élevé associé à un indicateur Ap bas = perturbation brutale dans le CMT.

Kp	Ap	1	3	Calmes Instable, dégradation	G0		
		2	7				
		5	48			Perturbation magnétique mineure • Aurores latitudes élevées > 65° • Impacts mineurs satellites	G1
		6	80			Perturbation magnétique modérée • Aurores latitudes ≥ 55° • Actions correctives satellites nécessaires	G2
		7	140			Perturbation magnétique forte • Propagation HF fluctuante • Aurores latitudes ≥ 50° • Possibles dégradations satellites	G3
		8	240			Perturbation magnétique sévère • Absorption* HF possible • Aurores latitudes ≥ 45° • Probables dégradations satellites et réseaux terrestres	G4
		9	400			Perturbation magnétique extrême • Absorption* HF probable • Aurores latitudes ≥ 40° • Fortes dégradations et/ou pannes sat et réseaux terrestres	G5

Geomagnetic storm ► PERTURBATION DU CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE

*Black-out • Statistique (en jours) durant un cycle solaire moyen (11 ans) : G1 = 900, G2 = 360, G3 = 130, G4 = 60, G5 = 4.

SN [Sunspot Number] -ou- SSN [Smoothed Sunspot Number] ► TACHES SOLAIRES MOYENNÉES

Agissent sur l'ionisation des couches ionosphériques F • Corrélation > 97% avec SFU/SFI • Maj quotidienne.

0	Propagation HF mineure	60 ↓ 300	Accessibilité théorique aux bandes radio d'après NONBH hamqsl.com : SN 0→10, SFU/SFI 64→70 : propagation moyenne jusque ≈ 40 m SN 10→35, SFU/SFI 70→90 : propagation moyenne jusque ≈ 20 m SN 35→70, SFU/SFI 90→120 : propagation jusque ≈ 15 m SN 70→105, SFU/SFI 120→150 : propagation jusque ≈ 10 m SN 105→160, SFU/SFI 150→200 : propagation jusque ≈ 10 m, ouvertures 6 m SN 160→250, SFU/SFI 200→300 : propagation jusque ≈ 6 m
100	Propagation HF modérée		
> 100	Propagation HF élevée Risque d'absorption (black-out) radio R3 à R5 selon les conditions		

SFU [Solar Flux Unit] -ou- SFI [Solar Flux Index] -ou- SF -ou- F10.7 index ► FLUX RADIO SOLAIRE CORRIGÉ SUR 10,7cm/2800 MHz

Bonne indication de l'ionisation de la couche ionosphérique F2 : plus le SFU/SFI est élevé, plus l'ionisation et la MUF (Max Usable Frequency) sont élevées
Corrélation avec Flux X, 304A (≤ 110 SFU/SFI) et SN (> 97%) • Peut dépasser 300 SFU/SFI (record de 55000 en juin 1991) • Maj 3 fois/j

X-Ray -ou- XRY ► FLUX X

Influence principalement la couche ionosphérique D • Conséquence des éjections de masse coronale (CME) et/ou des éruptions (Flares) mais pas toujours • Maj toutes les 10 min • Mesuré par satellite GOES dans les portions 0,05 à 0,4 nm (indice « GOES-16 short ») et 0,1 à 0,8 nm (indice « GOES-16 long »). nm = nanomètre (millardième de m) • Statistique (nombre d'occurrences) durant un cycle solaire moyen (11 ans) : M1 = 2000, M5 = 350, X1 = 175, X10 = 8, X20 = 1.

A1 → A9	<10 ⁻⁷ Watt/m ²	Incidence nulle/faible côté jour	---		
B1 → B9	≥10 ⁻⁷ <10 ⁻⁶ Watt/m ²				
C1 → C9	≥10 ⁻⁶ <10 ⁻⁵ Watt/m ²				
M1 → M9	≥10 ⁻⁵ <10 ⁻⁴ Watt/m ²			HF : absorption* mineure/modérée côté jour • NAVIGATION : brève dégradation signaux basses fréquences	R1 à R2
X1 → ∞	≥10 ⁻⁴ <10 ⁻³ Watt/m ²			HF : absorption (black-out) forte/extrême côté jour NAVIGATION : dégradation/disparition signaux basses fréquences, dégradation/disparition signaux GPS Corrélation partielle avec SN et/ou SFI/SFU élevés	R3 à R5
Super X	≥10 ⁻³ Watt/m ²				

Radio blackout ► BLACK-OUT RADIO

Provoqué par le flux X • Statistique en nombre de jours d'absorption* durant un cycle solaire moyen (11 ans) : R1 = 950, R2 = 300, R3 = 140, R4 = 8, R5 < 1.

Ptn Flx -ou- Pl ► RADIATIONS

Influence principalement la couche ionosphérique E • Rayonnement (Gamma) des protons haute énergie chargés présents dans le vent solaire • Moyenné sur 5 min • Mesuré par sat GOES • Statistique en nombre d'occurrences durant un cycle solaire moyen (11 ans) : S1 = 50, S2* = 25, S3* = 10, S4* = 3, S5* < 1.

S1	Mesure physique : Méga-électron-Volt (MeV).	>10 PFU	Rayonnement mineur	
S2*		>10 ² PFU*		Rayonnement modéré • Faible risque dégradation satellites • Risque radiations*
S3*	1 PFU (Proton Flux Unit) : 10 MeV.	>10 ³ PFU*		Rayonnement fort • Propagation HF régions polaires dégradée • Risque dégradation satellites • Risque radiations*
S4*	eV : énergie cinétique acquise par un électron accéléré depuis le repos par une tension d'un volt.	>10 ⁴ PFU*		Rayonnement sévère • Absorption (black-out) HF régions polaires possible • Risque pannes satellites • Dose radiations élevée*
S5*		>10 ⁵ PFU*		Rayonnement extrême • Absorption (black-out) HF régions polaires probable • Pannes sat probables • Dose radiations très élevée*

*Dès S2, risque pour la santé à altitudes et latitudes élevées (source NOAA).

AIA -et- HMI ► MOUVEMENTS ET OSCILLATIONS DE LA PHOTOSPHERE

Images du satellite SolarDynamicObservatory • AIA (Atmospheric Imaging Assembly) : mouvements internes et externes entre la photosphère et la couronne en extrême UV (de 9,4 à 471 nm - nanomètres) • HMI (Helioseismic and Magnetic Imager) : oscillations et champ magnétique de la photosphère.

AREA -ou- SUNSPOT AREA ► CUMUL DE SURFACE COUVERTE PAR LES TACHES SOLAIRES (SUNSPOTS) En millièmes de l'hémisphère solaire visible • Les valeurs les plus élevées apparaissent généralement 1 à 2 ans avant le haut du cycle en cours • De 0 à xxxx (record de 6100 en 1947). Mesuré quotidiennement.

Aur Lat [Aurora Latitude] ► LATITUDE AURORALE Latitude d'apparition la plus basse calculée par le modèle Ovation • Valeur en degré de latitude (°) : de 67,5 à < 45 • Maj horaire • Voir aussi à GW.

Aurora -ou- Aur [Aurora] ► AURORES Probabilité d'apparition d'aurores (N/n = x) • « N » est quantifié de 0 à 10 (< 2 = probabilité faible) • Plus « N » et « x » sont élevés (« n » faible), plus la probabilité d'apparition augmente (pouvant aller jusqu'aux latitudes basses) • Indique l'état d'ionisation des couches F dans les régions polaires • Maj/15 min • Voir à GW.

Les aurores sont souvent vertes dans leurs parties basses (oxygène, ≈ 100/150 km d'altitude), rouge dans les parties hautes (oxygène et azote, ≈ 250 km d'altitude). Du bleu-violet peut également apparaître au sommet (hydrogène, azote et hélium), voire, lors d'une puissante éjection, du rose, jaune et blanc à moyenne altitude.

Bt ► CHAMP MAGNETIQUE INTERPLANETAIRE GLOBAL Valeur calculée symbolisant la **force totale de l'IMF*** (Bx, By et Bz) • Plus la valeur nT (nanotesla) de Bt est élevée (positive), meilleures sont les conditions géomagnétiques : < 10 nT = perturbé, ≥ 20 nT = calme, > 30 nT = très calme. *Interplanetary Magnetic Field (Champ Magnétique Interplanétaire).

Bz -ou- MAG ► CHAMP MAGNETIQUE INTERPLANETAIRE Orientation du champ magnétique interplanétaire (IMF) • De 50 nT à -50 nT (nanotesla) • Valeur positive : même direction que la magnétosphère terrestre (tendance nord) • Valeur négative : dès -10 nT, faiblesse magnétosphère terrestre (tendance sud). S'amplifie selon la puissance du vent solaire.

☞ L'IMF, généré par le soleil, comporte trois composantes : Bx, By et Bz (champ tridimensionnel GSM). Bz, qui représente la direction nord-sud de l'IMF (perpendiculaire au plan de l'écliptique), est l'un des paramètres les plus importants pour l'activité aurorale terrestre, activité mesurée par le satellite ACE. Bz négatif indique que l'IMF est en « phase » avec celui de la terre (car leurs polarités sont opposées), facilitant ainsi la pénétration des particules du vent solaire dans l'atmosphère terrestre. Ces particules sont alors transportées sur les lignes du champ magnétique terrestre où elles entrent en collision avec, notamment, des atomes d'oxygène et d'azote, rayonnent et émettent de la lumière, généralement dans les zones polaires.

CARRINGTON ROTATION ► ROTATION DE CARRINGTON Numérotation de la rotation en cours du soleil (depuis 1853). 2266 début janvier 2023.

☞ La vitesse de rotation du soleil varie de 24,5 jours terrestres à l'équateur à 36 jours terrestres aux latitudes élevées, et sa rotation sidérale (par rapport aux étoiles) est de 25,38 jours. A cause de la variabilité relative de la vitesse de la terre sur son orbite autour du soleil, 27,27 jours terrestres moyens ont été retenus. La rotation de Bartels, très similaire, retient 27,00 jours.

CME [Coronal Mass Ejection] ► EJECTION CORONALE DE MASSE Selon les sites, possible prévision de date et heure UTC de l'impact terrestre d'une CME avec couleur graduelle selon la sévérité : vert → jaune → rouge • Màj par NOAA/SWPC lorsqu'une CME est détectée.

☞ Les CME sont des bulles de plasma produites dans la couronne solaire (atmosphère bien plus chaude que la surface), accélérées vers l'espace par un relâchement soudain d'énergie lié à l'instabilité du champ magnétique solaire. Souvent liées (mais pas toujours) à une éruption solaire (Solar flare). Ces énormes nuages (jusqu'à plusieurs dizaines de rayons solaires), constitués de centaines de millions de tonnes d'électrons et de protons, se superposent au vent solaire, voyagent à travers l'espace (100 à 2500 km/sec) et, s'ils croisent la terre, perturbent l'environnement magnétique terrestre. Outre l'apparition dans le ciel d'aurores boréales ou australes, ces phénomènes peuvent occasionner des pannes du réseau électrique, dégrader ou interrompre les transmissions radio, endommager ou détruire des satellites, provoquer des pannes à bord des avions et/ou soumettre les personnes à bord à un excès de radiations, etc.

CME TRACKING ► TRAJECTOIRE DES CME Modélisation de la trajectoire suivie par les éjections de masse coronale.

☞ La trajectoire des CME est influencée par une nappe de courant héliosphérique de forme tridimensionnelle résultant de l'influence du champ magnétique interplanétaire tournant (généré par le soleil), celle-ci ayant la forme d'une spirale à rotation droite dite de Parker.

CORONAL HOLES ► TROUS CORONAUX Zones sombres apparaissant en extrême UV et X.

☞ Ces zones plus froides et moins denses sont des régions où les lignes de champ magnétique sont ouvertes vers le milieu interplanétaire laissant s'échapper un fort vent solaire. Peuvent se développer n'importe où, bien que les plus habituels et stables sont situés dans les régions polaires même s'ils peuvent s'étendre vers des latitudes plus basses. Sources durables de vent solaire à haute vitesse (en général, 2 x la vitesse moyenne), formant ensuite une zone de compression combinée avec le vent solaire plus faible issu d'autres régions, menant à une interaction tant en densité de particules qu'en influence sur le champ magnétique interplanétaire (IMF). Génèrent habituellement des perturbations géomagnétiques de G1 à G2 (quelques rares cas de dépassement, toutefois moins sévères que les CME). Corrélation avec le cycle solaire : tendance à la rétraction vers les régions polaires durant la montée du cycle.

DST -ou- Kyoto DST ► INDICE DE PERTURBATION ANNULAIRE Disturbance Storm Time • Réseau d'observatoires quasi-équatoriaux mesurant l'activité du courant annulaire du champ magnétique terrestre • Mesuré en nT (nanotesla) : mineur -30 nT à -50 nT, modéré -50 nT à -100 nT, majeur -100 nT à -200 nT, sévère -200 nT à -350 nT, extrême < -350 nT.

☞ Flux électrique équatorial circulant vers l'ouest dans la magnétosphère terrestre, influencé par le vent solaire et produisant un champ magnétique directement opposé à celui de la terre. L'indice DST mesure le contexte géomagnétique terrestre lié à la météo solaire permettant ainsi d'évaluer la sévérité des perturbations. Mesure également la déviation négative du champ magnétique terrestre due au courant annulaire : plus cette valeur est négative plus celui-ci est comprimé (action de la pression du vent solaire selon sa puissance).

Ef -ou- EIC Flux [Electron Flux] ► FLUX D'ELECTRONS Densité d'électrons chargés présents dans le vent solaire • De 0 à ∞. Plus le paramètre est élevé (nombre de particules / cm².s.sr), plus l'ionosphère est influencée • Agit principalement sur la couche E et la magnétosphère • Mesuré par satellite GOES • Moyenné sur 5 min.

FARSIDE WATCH -ou- BACKSIDE ► DISQUE SOLAIRE NON VISIBLE Hémisphère solaire ouest partiellement observé par le satellite STEREO AHEAD. Met en moyenne 13,5 jours pour apparaître face à la terre (Rotation moyenne du soleil vers l'Est solaire : 26 jours à l'équateur, 37 jours aux pôles).

GeoMag Field [Geomagnetic Field] ► CHAMP GEOMAGNETIQUE Indication simplifiée basée sur l'indice « Kp » qui indique l'état du champ magnétique terrestre : inactive (inactif), very quiet (très calme), quiet (calme), unsettled (instable), active (actif), minor storm (perturbation mineure), major storm (perturbation majeure), severe storm (perturbation sévère) ou extreme storm (perturbation extrême) • Les indications les plus élevées peuvent être la cause d'un black-out HF et/ou d'aurores(s) • Màj toutes les 3 heures.

GW -ou- GigaWatt ► PUISSANCE HEMISPHERIQUE Quantité d'énergie électrique transférée par les particules solaires générant des aurores • Probabilité calculée en GW (gigawatt) par le modèle Ovation intégrant des mesures de vent solaire, de HPI et d'IMF (Interplanetary Magnetic Field, Champ Magnétique Interplanétaire) pour les 30 à 60 prochaines min • Probabilité d'apparition : < 20 GW (très faible), 20 à 50 GW (faible), > 50 GW (moyenne), > 100 GW (très forte) • Màj toutes les 5 min.

HPI [Hemispheric Power Index] ► INDEX DE PUISSANCE HEMISPHERIQUE Puissance électrique en GW présente dans la haute atmosphère. Corrélation avec l'ovale auroral. Voir à GW.

MUF [Maximum Usable Frequency] ► FREQUENCE HF MAXIMUM UTILISABLE Valeur de 0 à 100 MHz • Donne la MUF depuis l'un des 11 sites de mesure dans le monde (le site d'où provient la mesure est généralement indiqué) • NoRpt signifie « No report ».

☞ N'assure pas une garantie de succès en HF. Une règle empirique consiste à n'utiliser que 80 à 90% de la MUF, voire moins. Non représentative pour l'ensemble du globe.

Phi GSM [Geocentric Solar Magnetospheric] ► ANGLE MAGNETOSPHERIQUE SOLAIRE GEOCENTRE Orientation de l'angle θ (Phi) du champ magnétique interplanétaire (IMF) propulsé par le vent solaire, agissant sur la magnétosphère terrestre • 0 ↔ 180° : positif (faible influence - calme). 180 ↔ 360° : négatif (forte influence - instable/très instable).

☞ θ est l'angle XY (champ tridimensionnel GSM) où X pointe de la terre vers le soleil et Y pointe vers la gauche de la terre lorsque l'on regarde le soleil. Pas d'axe Z pris en compte. Direction de X : 0° ↔ 180°, vers le soleil, faible connexion magnétosphérique terrestre (pôles identiques), 180° ↔ 360°, vers la terre, forte connexion magnétosphérique terrestre (pôles opposés).

Proton density -ou- Density p/cm3 ► DENSITE DE PROTONS DU VENT SOLAIRE Mesuré en nombre de protons par centimètre³ (p/cm³) : < 10 = faible, 10 à 20 = peu dense, > 20 = dense à très dense • Mesure différente de Ptn flux • Corrélation avec Ptn flux (-ou- Pf) et SV.

☞ Les protons sont également d'origine galactique (extra-solaire), comptent pour environ 90 % du flux total de particules, et ont une énergie souvent plus élevée et une intensité beaucoup plus uniforme et stable que ceux provenant du Soleil (généralement associés aux CME).

SI [Sudden impulse] ► REACTION GEOMAGNETIQUE SOUDAINE Terme générique relatif à la réaction de la magnétosphère terrestre à l'impact d'une CME. Mesuré en nT (nano Tesla). Voir aussi à Phi GSM, Bt, Bz.

Sig Noise Lvl [Signal Noise Level] ► NIVEAU DE BRUIT Valeur calculée en unités de « S mètre » du niveau de bruit généré par l'interaction du vent solaire avec l'activité géomagnétique terrestre • NoRpt signifie « No report » • Màj toutes les 30 min.

SunSpots ► TACHES SOLAIRES 8 classes magnétiques (durée de vie, évolution, complexité, structure, polarité) • Les 4 principaux types de tâches (classe, description, influence) :

α - Alpha • Champ magnétique unipolaire inorganisé • Menace faible.

β - Beta • Champ magnétique bipolaire avec division simple de la polarité • Flux X de classe C, possiblement M.

γ - Gamma • Région complexe dans laquelle les polarités négatives et positives sont irrégulièrement distribuées de manière à ne pouvoir être classées bipolaires • ---.

δ - Delta • Fort champ bipolaire entre tâches • Peuvent être très actives. Produisent les éruptions solaires les plus intenses. Fort potentiel pour des flux X de classe M à X.

☞ Ces tâches sont sombres car plus froides que la surface du soleil, générées par de puissants et profonds champs magnétiques internes, tâches souvent plus grosses que la terre. Un cycle de 22 ans du mouvement des tâches est corrélé avec le cycle solaire moyen de 11 ans, où il est observé un glissement du positionnement moyen des tâches des hautes vers les basses latitudes (« effet papillon ») - tous les 11 ans, le champ magnétique s'inverse par l'action action de la cellule convective propre à chaque hémisphère.

SW [Solar Wind] ► VENT SOLAIRE Varie en vitesse et en température selon l'activité solaire • Influence l'ionosphère proportionnellement à sa vitesse • Mesuré en km/sec.

☞ Flux hypersonique de plasma brûlant peu dense, constitué essentiellement d'ions, protons*, électrons* et de noyaux d'hélium (*représentent ≈95 % de ce flux). Le soleil émet perpétuellement près de 1 million de tonnes de matière par seconde dans le milieu interplanétaire. Ces particules chargées sont éjectées de la haute atmosphère du soleil (cf Coronal holes) ou des éruptions (cf CME). Le vent solaire est bimodal : le « vent lent » (≈ 300 km/sec), varie peu lors du cycle solaire, ne dépend pas de l'activité du soleil et se situe plutôt dans le plan équatorial (± 30° latitude) – le « vent rapide » (≈ 500 à 800 km/sec) provient des latitudes élevées (> 40° latitude), dépend fortement du cycle solaire et de l'activité du soleil.

Temperature ► TEMPERATURE DU VENT SOLAIRE Mesuré en kelvin (K).

☞ Peut atteindre plusieurs dizaines de milliers de K. Conversions : °C = K -273,15. °F = K -459,67.

304A ► ULTRA VIOLET Intensité relative des UV dans la chromosphère et la zone de transition solaire sur la longueur d'onde de 304 angströms, soit 30,4 nm (nanomètres - milliardièmes de m) • Image du soleil colorisée rouge/orange • Quantifié de 0 à ∞. Mini solaire moyen ≈ 134. Maxi solaire moyen ≥ 200 • Responsable pour ≈ la moitié de l'ionisation de la couche F2 (l'autre moitié provient des protons et électrons du vent solaire, ainsi que du flux X) • Corrélation partielle avec SFI/SFU (≤ 110) • « @SEM » = sat SOHO • « @EVE » = sat SDO.

☞ ≈ 5% de l'énergie électromagnétique solaire est émise sous forme de rayonnements UV, classés selon leur longueur d'onde : UV-A (400-315 nm), UV-B (315-280 nm) et UV-C (280-100 nm). La mesure 304A est classée XUV (rayonnements UV extrêmes, transition électromagnétique vers les rayons X). NOTE : l'instrument EVE à bord de SDO est plus récent (2010) et plus sensible aux changements d'intensité que l'instrument SEM de SOHO (1995). Par ailleurs, chacun de ces satellites n'a pas la même position par rapport au soleil.