

INDICATEURS DE LA METEO SOLAIRE

INTERPRETATION DES PRINCIPAUX PARAMETRES SOLAIRES

Sources principales : NOAA, Observatoire de Paris, CNRS, SolarHam, ARRL, Cq Mag, Space Weather, HamQsl, NONBH, W7RI, W4RQ, Peter Meadows...
Par Eric Cordier, F4FAP - v28 (avril 2021) • Document disponible sur le site du radio-club de Rennes [F4KIO], sous l'onglet « HF » : ara35.fr • Available in english

LE SOLEIL : depuis 4,7 milliards d'années, brillera encore 5 milliards d'années • 333.000 fois la masse de la terre • 1.303.000 fois plus volumineux que la terre • Composé principalement de 3/4 d'hydrogène et 1/4 d'hélium • Brûle 620 millions de tonnes d'hydrogène chaque sec • Envoie sa lumière vers la terre en ≈ 8 min, ses particules en 2 à 4 jours • Produit 400 millions de trillions* 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 moyenne (vers l'Est solaire) : ≈ 24,5 j à l'équateur, ≈ 37 j aux pôles • 5500°C en surface, 15 millions°C au cœur • Représente à lui seul 99,85 % de la masse du système solaire • Cycle solaire moyen : 11 ans - actuellement cycle 25 : 2020→2031.

*Milliards x milliards.

LA TERRE : 1/109ème du diamètre solaire (≈ 12700 km) • Située à ≈ 150 millions de km du soleil (soit 1 unité astronomique - UA) • Tourne autour du soleil à ≈ 30 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	Calme	G0
		2	7	Instable, dégradation	
		5	48	Perturbation magnétique mineure • Auroras aux latitudes élevées (>65°)	
		6	80	Perturbation magnétique modérée • Auroras aux lat ≥55°	
		7	140	Perturbation magnétique forte • Propagation HF fluctuante • Auroras aux lat ≥50°	
		8	240	Perturbation magnétique sévère • Black-out HF possible • Auroras aux lat ≥45°	
		9	400	Perturbation magnétique extrême • Black-out HF probable • Auroras aux lat ≥40°	

Geomagnetic storm ► PERTURBATION DU CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE

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 F • Corrélation > 97% avec SFI • Maj quotidienne • Accessibilité théorique aux bandes radio selon les niveaux SN et SFU (SFI) - d'après NONBH.

0	Propagation HF mineure ☉ SN 10→35, SFU 70→90 : moyen jusque ≈ 20 m ☉ SN 0→10, SFU 64→70 : moyen jusque ≈ 40 m	1 SFU (Solar Flux Unit) = 10000 Jy (Jansky) 10 ⁻²⁶ W/m ² /Hz	60 SFU (SFI) ↓ 300 SFU (SFI)
100	Propagation HF modérée ☉ SN 70→105, SFU 120→150 : jusque ≈ 10 m ☉ SN 35→70, SFU 90→120 : jusque ≈ 15 m		
> 100	Propagation HF élevée (risque de Black-out radio R3 à R5 selon les conditions) ☉ SN 160→250, SFU 200→300 : jusque ≈ 6 m ☉ SN 105→160, SFU 150→200 : jusque ≈ 10 m, ouvertures 6 m		

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

X-Ray -ou- XRY ► FLUX X

Influence principalement la couche D • Conséquence d'éjections de masse coronale (CME) • 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 en 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 à 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	Absorption HF (black-out) mineure à modérée côté jour	R1 à R2
X1 → ∞	≥10 ⁻⁴ <10 ⁻³ Watt/m ²	Absorption HF (black-out) forte à extrême côté jour	R3 à R5
Super X	≥10 ⁻³ Watt/m ²	Possible corrélation avec SN -et/ou- SFI élevés	

Radio blackout ► BLACK-OUT RADIO

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

Ptn Flx -ou- PI ► RADIATIONS

Influence principalement la couche E • Rayonnement (Gamma) des protons 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). 1 PFU (Proton Flux Unit) = 10 MeV. *Dès S2, risque pour la santé à altitudes et latitudes élevées (source NOAA).	>10 PFU	Rayonnement solaire mineur
S2*		>10 ² PFU	Rayonnement solaire modéré
S3*		>10 ³ PFU	Rayonnement solaire fort • Propagation HF régions polaires dégradée
S4*		>10 ⁴ PFU	Rayonnement solaire sévère • Black-out HF régions polaires possible
S5*		>10 ⁵ PFU	Rayonnement solaire extrême • Black-out HF régions polaires probable

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 - nanomètre) • 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 toutes les 15 min.

☁ Les aurores sont souvent vertes dans leurs parties basses (oxygène), rouges dans les parties hautes (oxygène et azote). Du bleu-violet peut également apparaître au sommet des aurores (hydrogène, azote et hélium), voire, lors d'une puissante éjection solaire, 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.

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 (vers le nord) • Valeur négative : dès -10 nT, faiblesse de la magnétosphère terrestre (tendance sud). S'aggrave cf la puissance du vent solaire.

☒ L'IMF, généré par le soleil, comporte trois composantes : Bx, By et Bz (champ tridimensionnel). 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 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). 2242 début avril 2021.

☒ La vitesse de rotation du soleil est variable, 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, 27,28 jours terrestres moyens ont été retenus.

CME [Coronal Mass Ejection] ► EJECTION DE MASSE CORONALE Donne une prévision de date et heure UTC de l'impact terrestre d'une éruption solaire • Couleur graduelle selon la sévérité : vert→jaune→rouge • Mâj par NOAA/SWPC lorsqu'une CME est détectée.

☒ Les CME sont des bulles de plasma produites dans la couronne solaire (dont l'atmosphère est 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. 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 la magnétosphère 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 mais 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** de la magnétosphère 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.

☒ Mesure le contexte géomagnétique terrestre lié à la météo solaire permettant ainsi d'évaluer la sévérité des perturbations. L'indice DST mesure la déviation négative du champ magnétique terrestre due au courant annulaire** : plus cette valeur est négative plus la magnétosphère terrestre est compressée (action de la pression du vent solaire selon sa puissance). **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.

Ef -ou- Efc Flx [Electron Flux] ► FLUX D'ELECTRONS Densité d'électrons chargés présents dans le vent solaire • De 0 à ∞. Plus le paramètre est élevé (donné en 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'aurore(s) • Mâj 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 et d'IMF (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) • Mâj ttes les 5 min.

MUF [Maximum Usable Frequency] ► FREQUENCE 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 Angle θ (Phi) du champ magnétique interplanétaire (IMF) provoqué par le vent solaire • L'angle θ varie sur un plan XY où l'axe X pointe de la terre vers le soleil et l'axe Y pointe vers la gauche de la terre lorsque qu'on regarde le soleil • Mesuré de 0 à 360°. 0° à 180° : pas/peu d'influence sur le champ géomagnétique terrestre (θ pointe vers le soleil). ≥180° : influence sur le champ géomagnétique terrestre (θ pointe vers la terre) • Corrélation avec Bt et Bz.

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 • Corrélé à Ptn flux (-ou- Pf) et SW • Mesure faite par satellite.

☒ Les protons sont également d'origine galactique (extra-solaire), et comptent pour environ 90 % du flux total de particules. Ces protons 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 • Indique la valeur 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 » • Mâj toutes les 30 min.

SunSpots ► TACHES SOLAIRES 8 classes de tâches solaires selon leur durée de vie, évolution, complexité, structure et polarité • Classe, description et influence des 4 principaux types de tâches :

- 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

☒ Les tâches sont sombres car plus froides que la surface du soleil, générées par de puissants et profonds champs magnétiques internes et sont souvent plus grosses que la terre. Le nombre de tâches solaires est compté quotidiennement, générant le « Nombre Relatif International de Wolf » qui permet d'évaluer l'activité du soleil en complément des mesures.

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/seconde. Vitesse moyenne ≈450 km/sec • Mesuré par satellite.

☒ Flux hypersonique de plasma brûlant peu dense, constitué essentiellement d'ions, protons*, électrons* et de noyaux d'hélium (*représentent près de 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). NOTE : il existe deux types de vent solaire : le vent « lent » (≈ 300 km/sec) qui varie peu en fonction du cycle solaire, ne dépend pas de l'activité du soleil et se situe plutôt dans le plan équatorial, et le vent « rapide » (≈ 500 à 800 km/sec) qui dépend fortement du cycle solaire et de l'activité du soleil, provenant des latitudes élevées.

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

☒ Issu des trous coronaux et/ou des CME. Peut atteindre plusieurs dizaines de milliers de K. °C = K - 273,15.

304A ► ULTRA VIOLET Intensité relative des UV dans la chromosphère et la zone de transition solaires sur la longueur d'onde de 304 angströms, soit 30,4 nm (nanomètres) ou 30,4 milliardièmes de m • 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 (≤110 SFU) • « @SEM » = mesure du sat SOHO • « @EVE » = mesure du sat SDO.

☒ Environ 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 (rayonnement UV extrême), 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.

☒ Quelques sites où obtenir ces paramètres : solarham.net • meteo-spatiale.com • fg6gi.com • dk0wcy.de • sunspotwatch.com