

IMAOC 2024

SOLEIL ET GEOMAGNETISME

ZERBO Jean –Louis
Université Nazi Boni
Bobo-Dioulasso, Burkina Faso
Email: jeanlouis.zerbo@gmail.com

Conakry, du 14-25 /10/2024

INTRODUCTION

I. GENERALITES

II. LES DONNEES

III. VENT SOLAIRE ET GEOMAGNETISME

CONCLUSION

INTRODUCTION

Différentes variabilités dans le soleil et leurs impacts sur le milieu interplanétaire exposés par de nombreux auteurs:

- Schwabe (1843) Cycle de taches /solaire(11 ans)
- Mairan (1733) découverte du flot de particules solaires
- Hale(1908,1919) Cycle poloïdal(22 ans)
- Parker (1958) Appellation « du vent solaire »
- Chapman (1931) Découverte de l'electrojet équatorial
- Chapman et Bartels (1940) Mécanismes de l'EJE

INTRODUCTION

- Mayaud (1971, 1972) **Indice géomagnétique aa**
- Svalgaard(1977) **Corrélation indice aa / vent solaire**
- Legrand and Simon (1989) **1^{ère} Classification**
- Richardson et al.(2000,2002), Classification
- Ouattara and Amory Mazaudier(2009) Classification
- Zerbo et al.(2011) Classification
- Zerbo et al.(2012) **Nouvelle Classification**

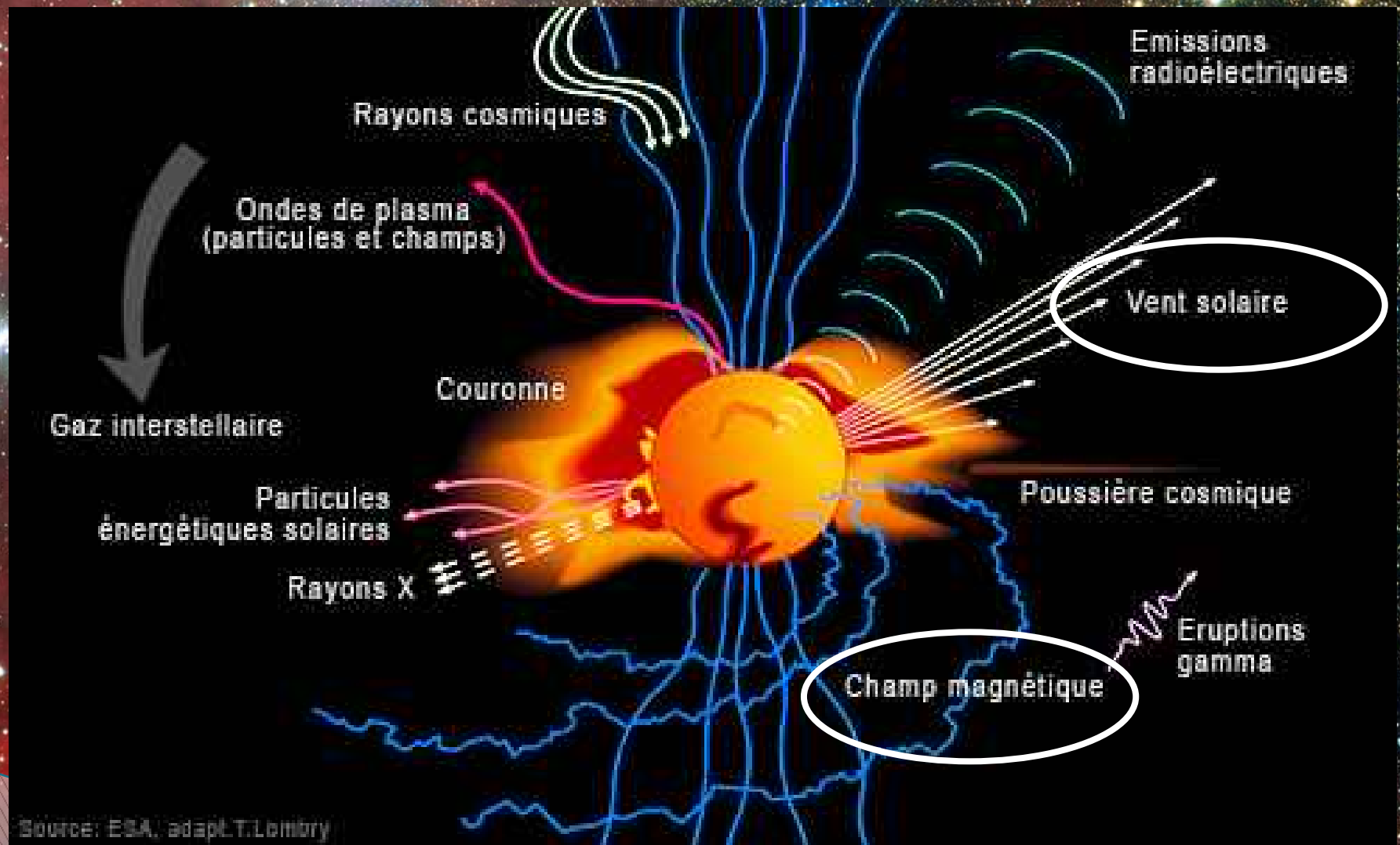
INTRODUCTION

Le Soleil interagit avec la Terre suivant différents canaux:

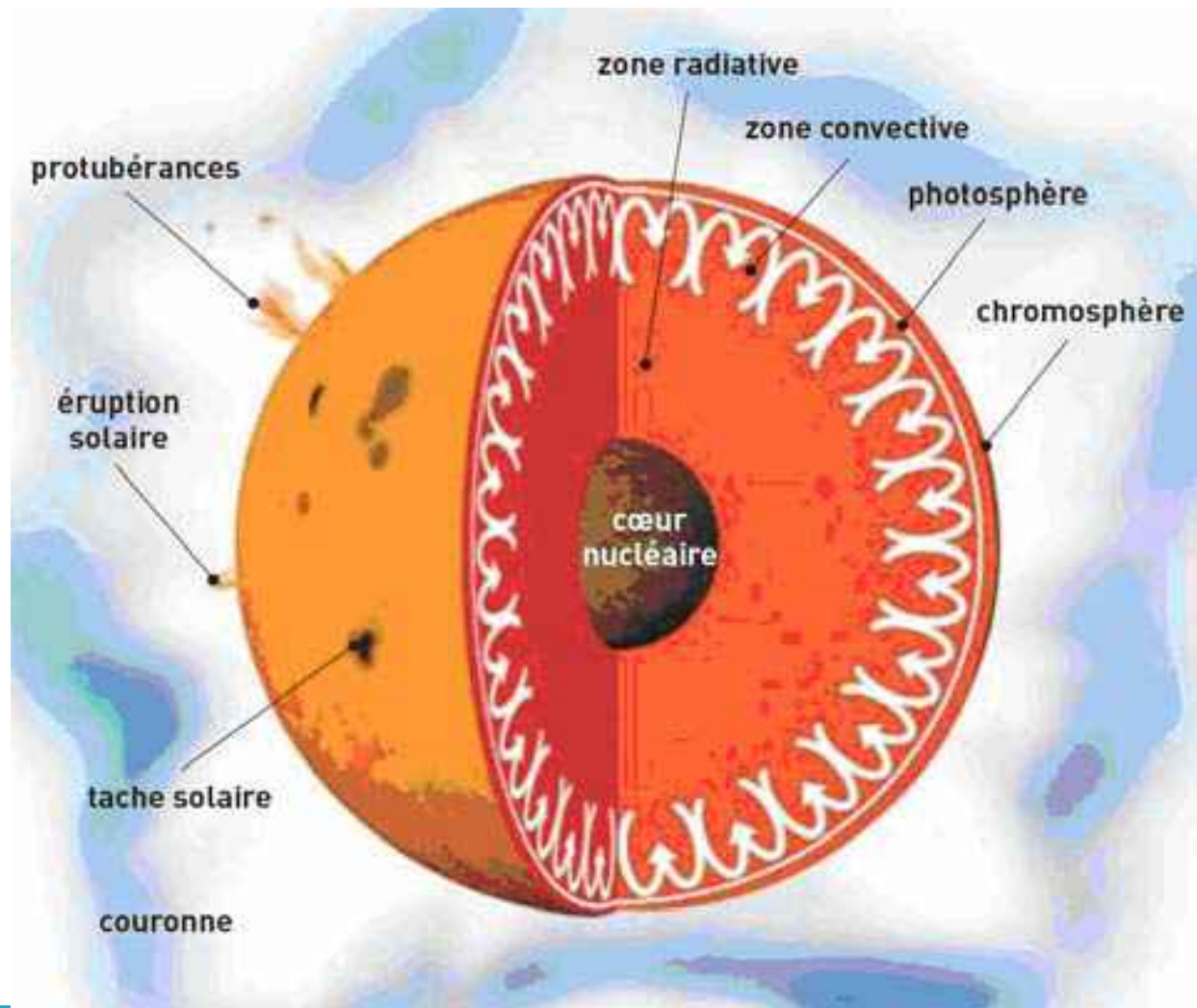
- 1) les rayonnements électromagnétiques solaires
- 2) le vent solaire, flux de particules

Cette partie donne une synthèse du background pour comprendre les mécanismes majeurs régissant les relations Soleil-Terre et Météorologie de l'Espace.

I. Généralités

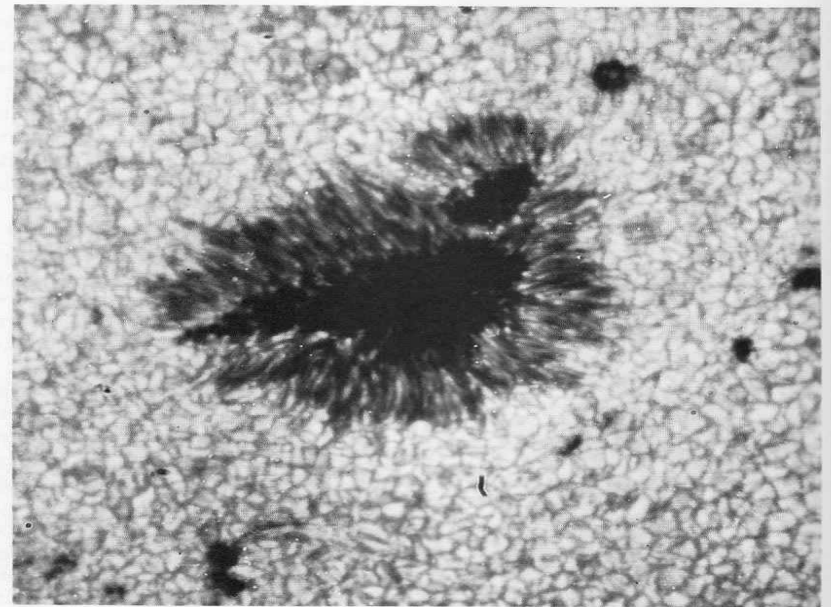


Le Soleil



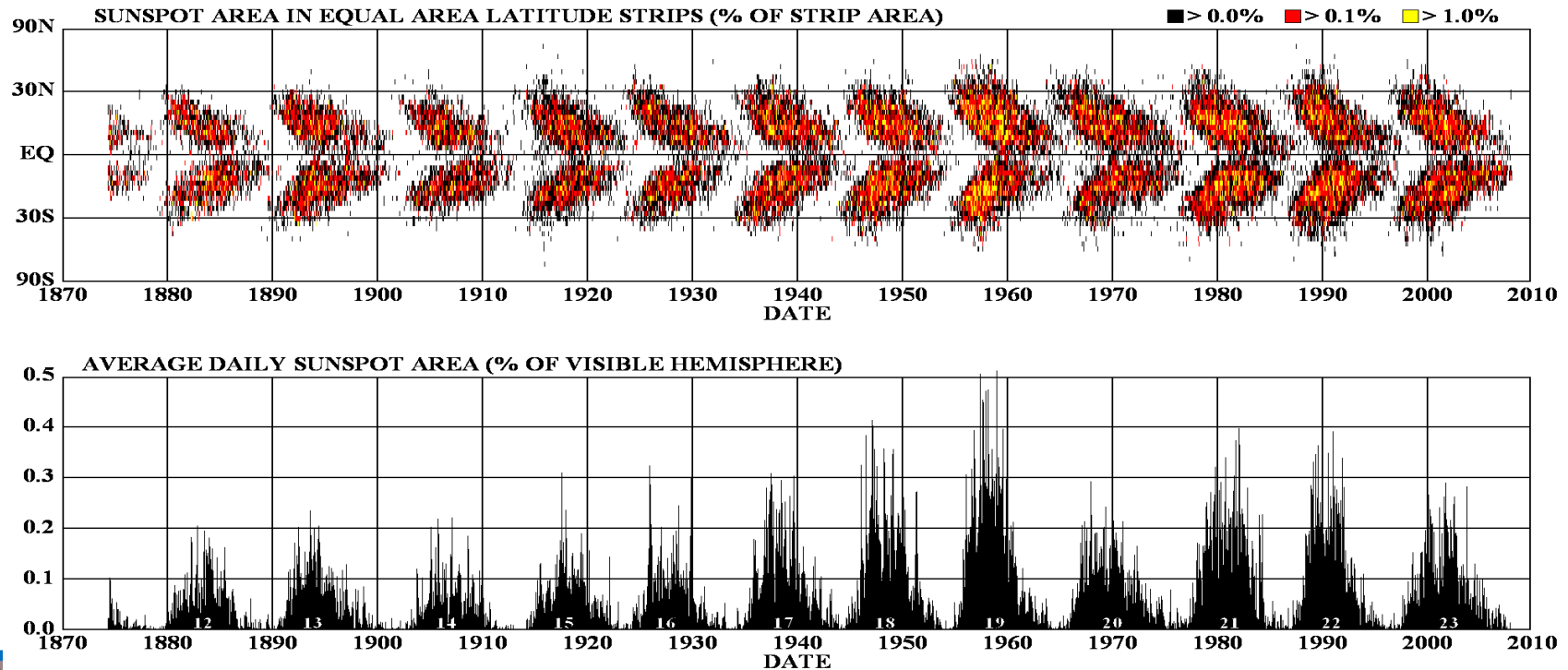
Cycle de taches: cycle solaire

Taches solaires Zones sombres se manifestant par intermittence sur la surface apparente du Soleil, identifiées par Christophe Scheiner (1611)



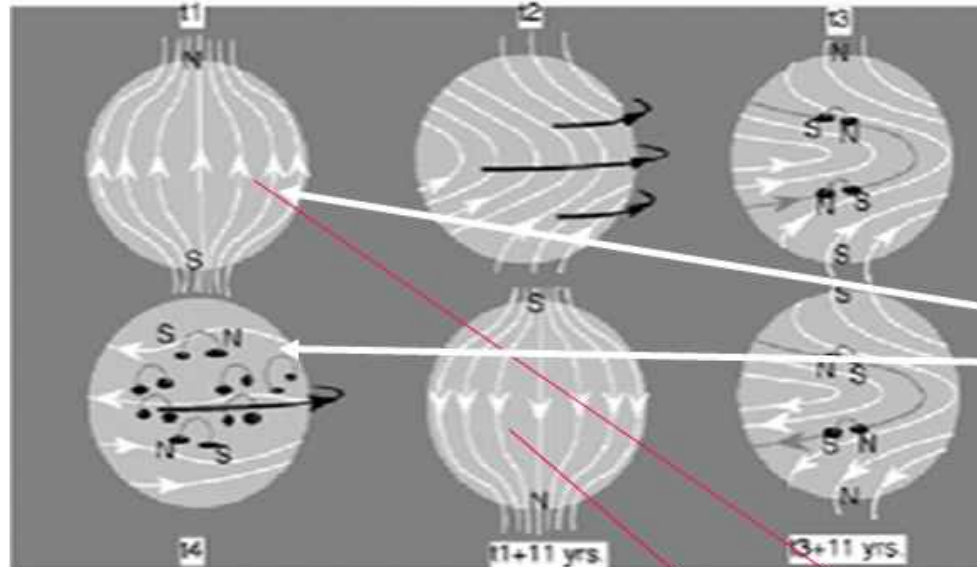
L'intensité et le déplacement(diagramme papillon) de ces taches présente un cycle de onze ans (Schwabe,1843)

DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS



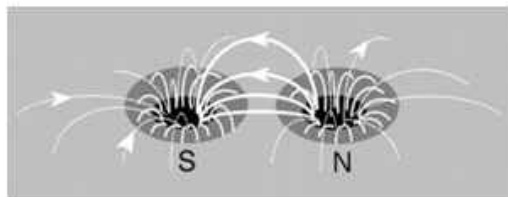
I. Généralités

A sketch of the formation of sunspots and the 22-years sunspot cycle due to the differential rotation of plasma in the photosphere

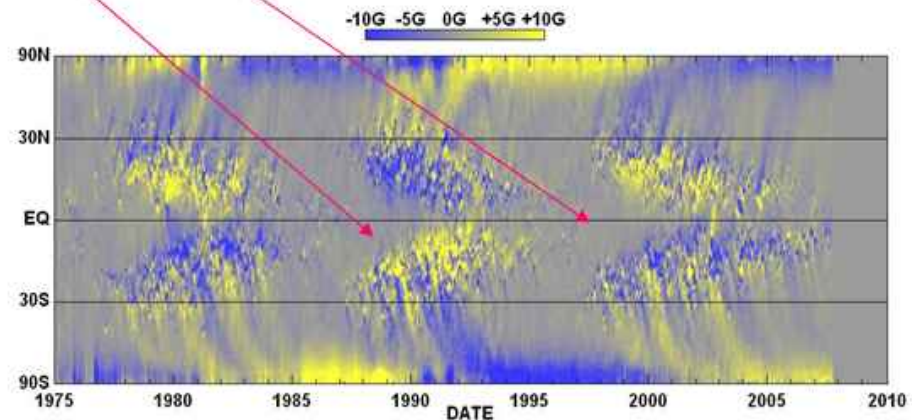


DYNAMO SOLAIRE

Rotation différentielle
 -> 2 composantes du Champs
 magnétique solaire
 Dipolaire ~ 10 G
 Toroïdale ~ 3 à 5 kG



Jaune - Extérieur / +
 Blue - intérieur / -



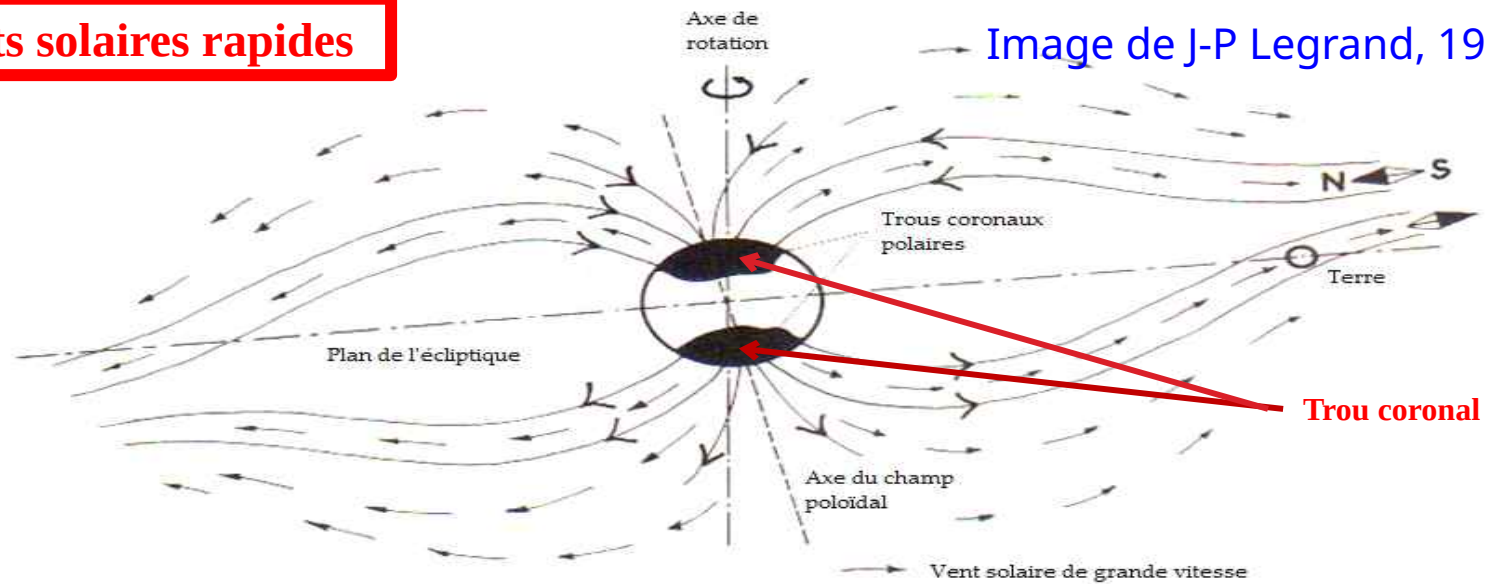
NASA/MSFC/NSSTC/Hathaway 2007/10

Vent solaire

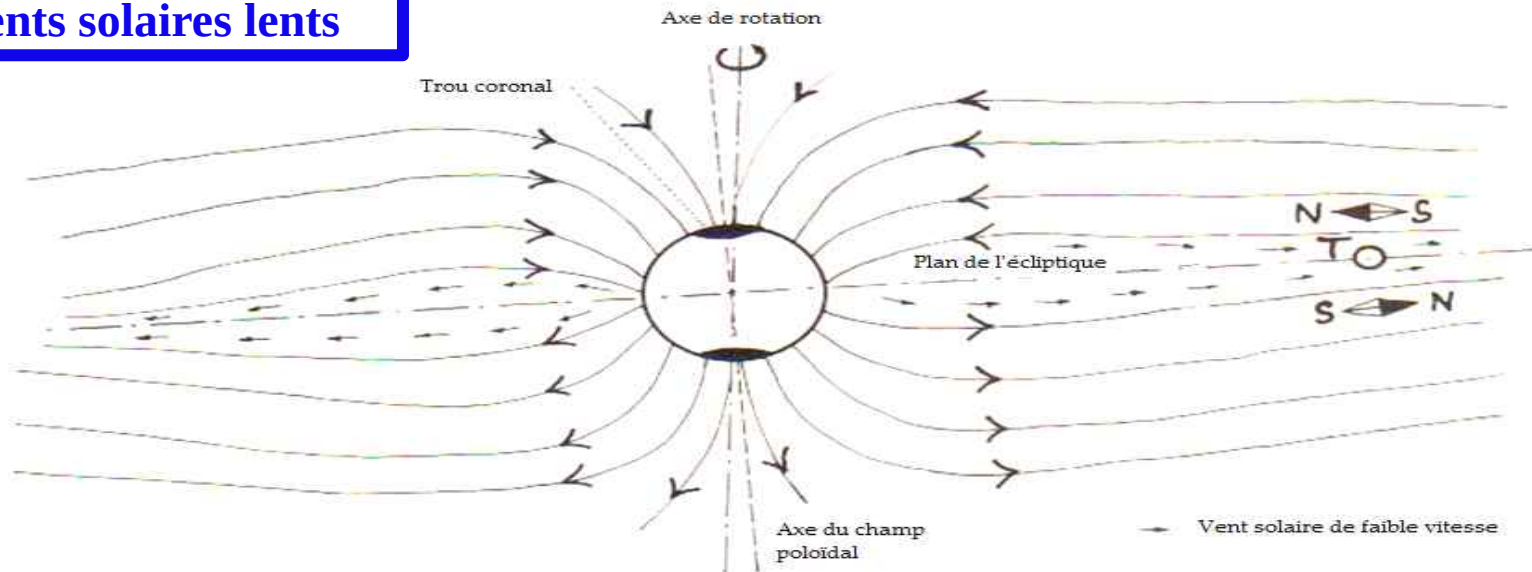
Flot de particules constitué essentiellement de protons et d'électrons émis de façon continue du soleil à des vitesses de 300 à 1000 km/s et qui atteignent la terre en plusieurs jours en compressant la cavité du champ magnétique terrestre à l'avant et l'étirent à l'arrière.

Vents solaires rapides

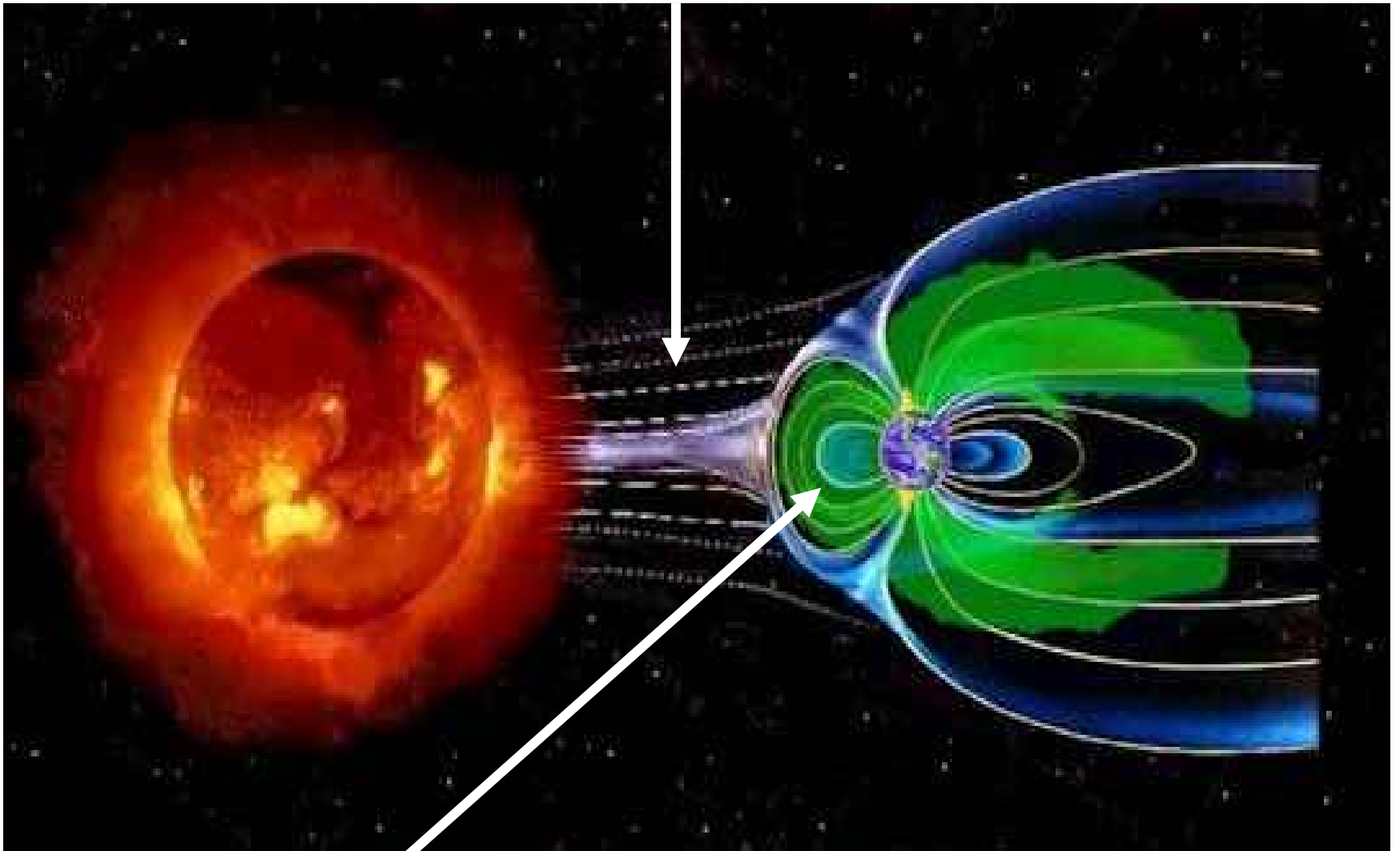
Image de J-P Legrand, 1984



Vents solaires lents



Interaction vent solaire-magnetosphère/ Tempête magnétique



La magnétosphère nous protège des particules énergétiques (vent solaire)

Problématique



**Freinage des
satellites**



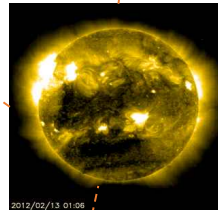
Irradiation des passagers



**Pluie
nuage**



**Sécurité des
astronautes**



Soleil



**Régule
l'écosystème**



**Vieillissement
de la peau**

Relations « soleil – terre » : relations entre les environnements ionisés du Soleil et de la Terre

- Particules solaires énergétiques (qq centaines de MeV)
- Rayonnement électromagnétique: visible, UV, X, ...
- Vent solaire, éjections de masse coronale (CME), ...

II. Données et indices d'activité géomagnétique

L'indice aa (Mayaud, 1973), fluctuation du magnétisme de la Terre est l'une des meilleures signature de l'activité solaire (Legrand and Simon, 1989;1990). Grâce aux nombreuses mesures et indices solaire (Rz, F10.7) et géomagnétique (aa, B) disponibles la vie du soleil et ses impacts peuvent être étudiées à petites et grande échelles.

Indice aa mesure planétaire d'activité magnétique basée sur deux observatoires antipodaux. Il renseigne sur l'amplitude globale de l'activité géomagnétique sur un intervalle tri-horaire.

<http://isgi.unistra.fr/>

aa (since 1868)

AE (since 1957)

am (since 1959)

SSC (since 1868)

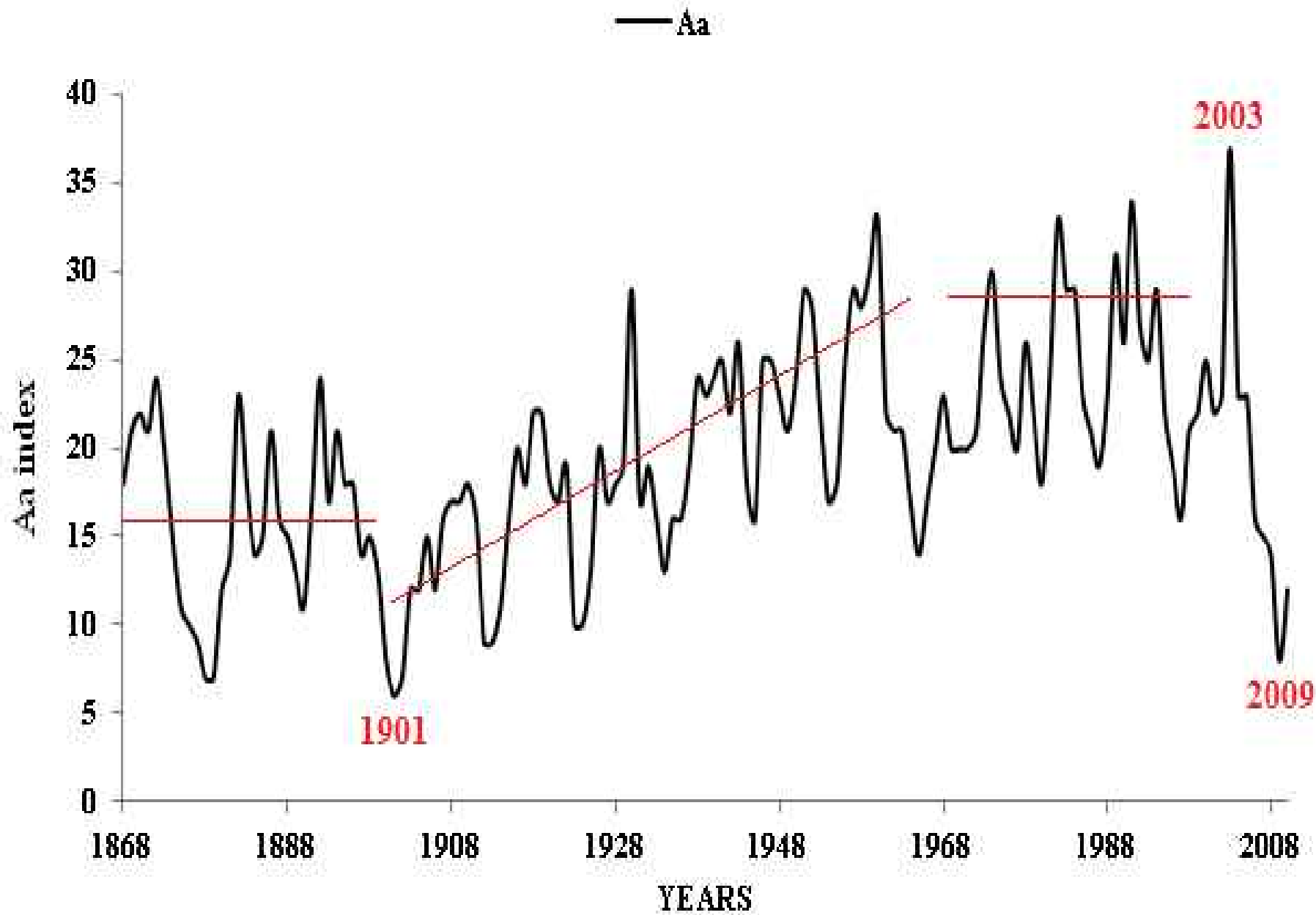
Kp (since 1932)

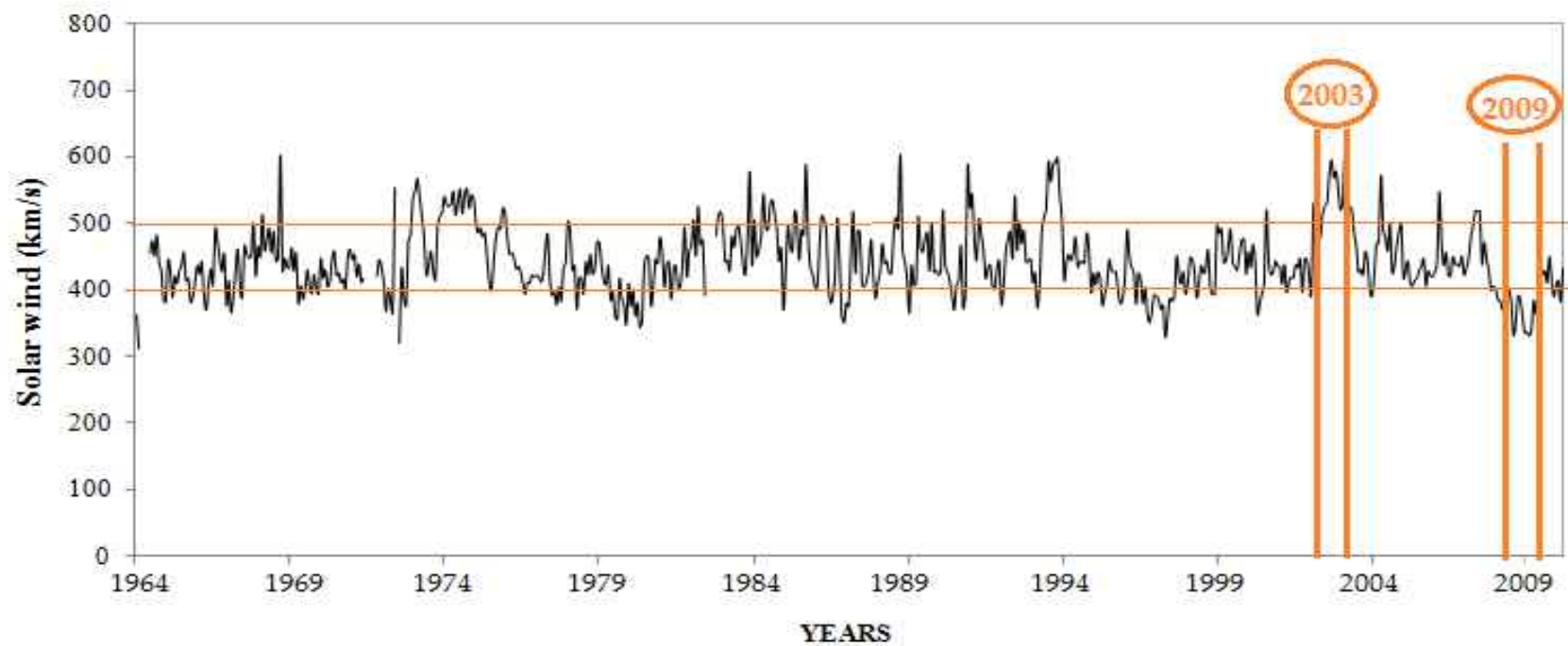
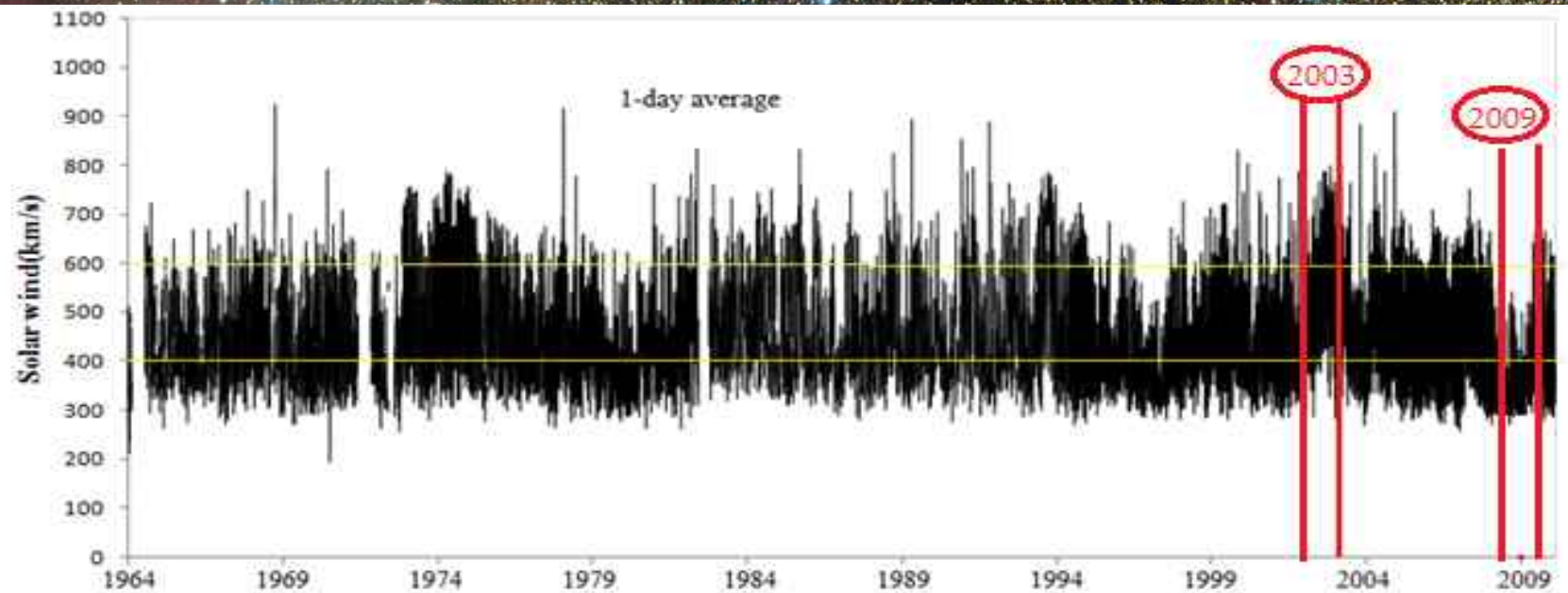
Dst (since 1957)

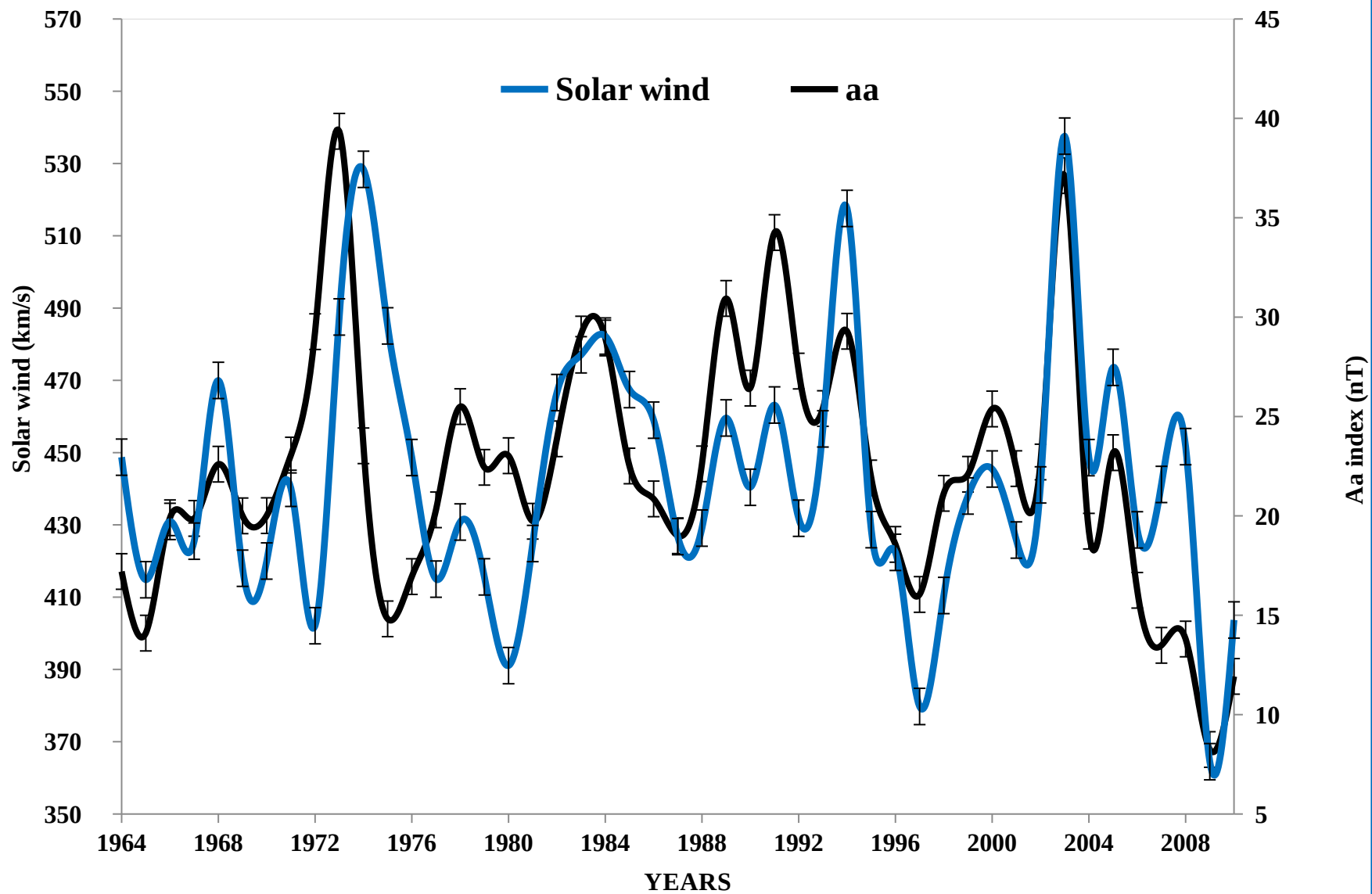
PC (since 1975)

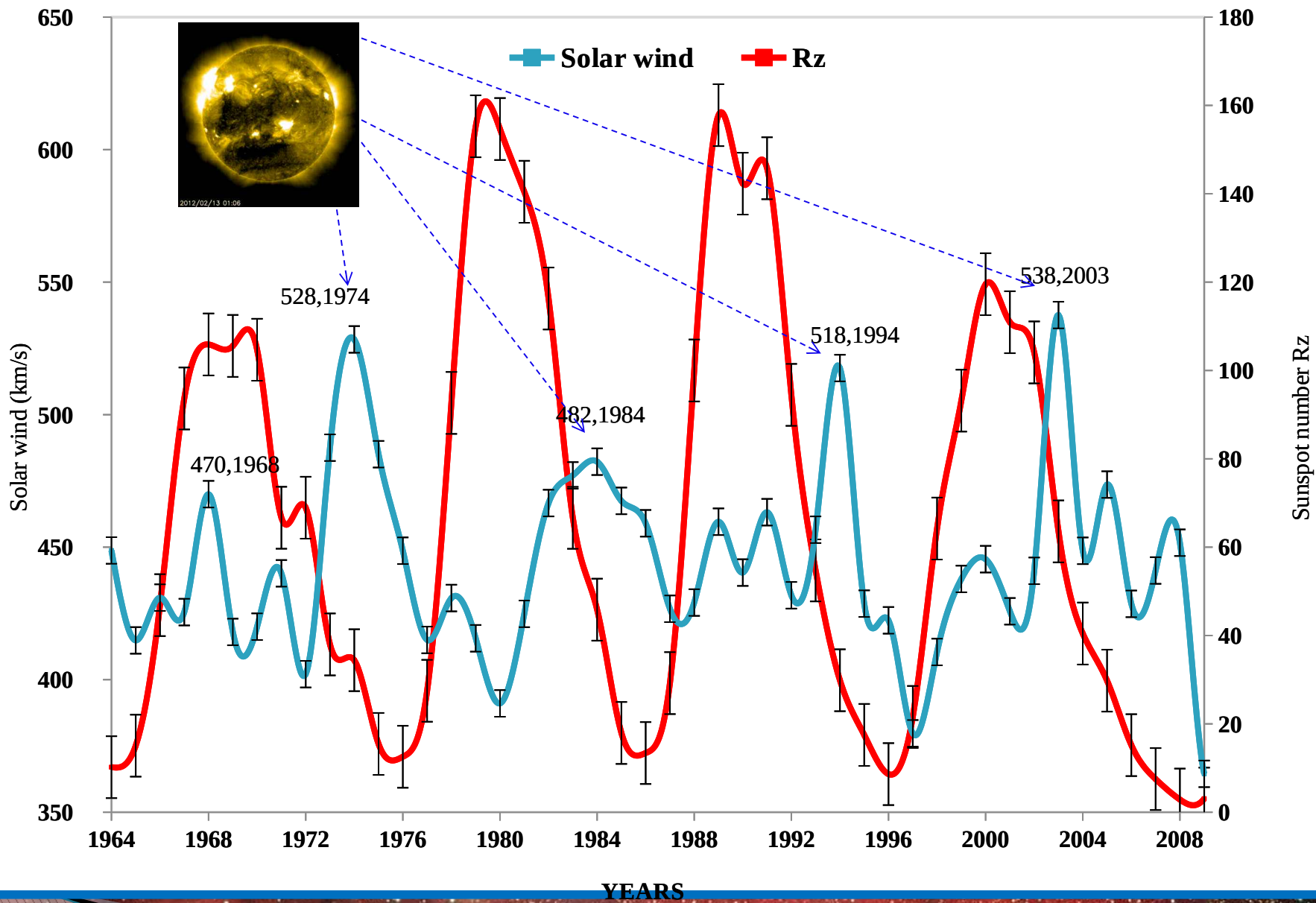
<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>

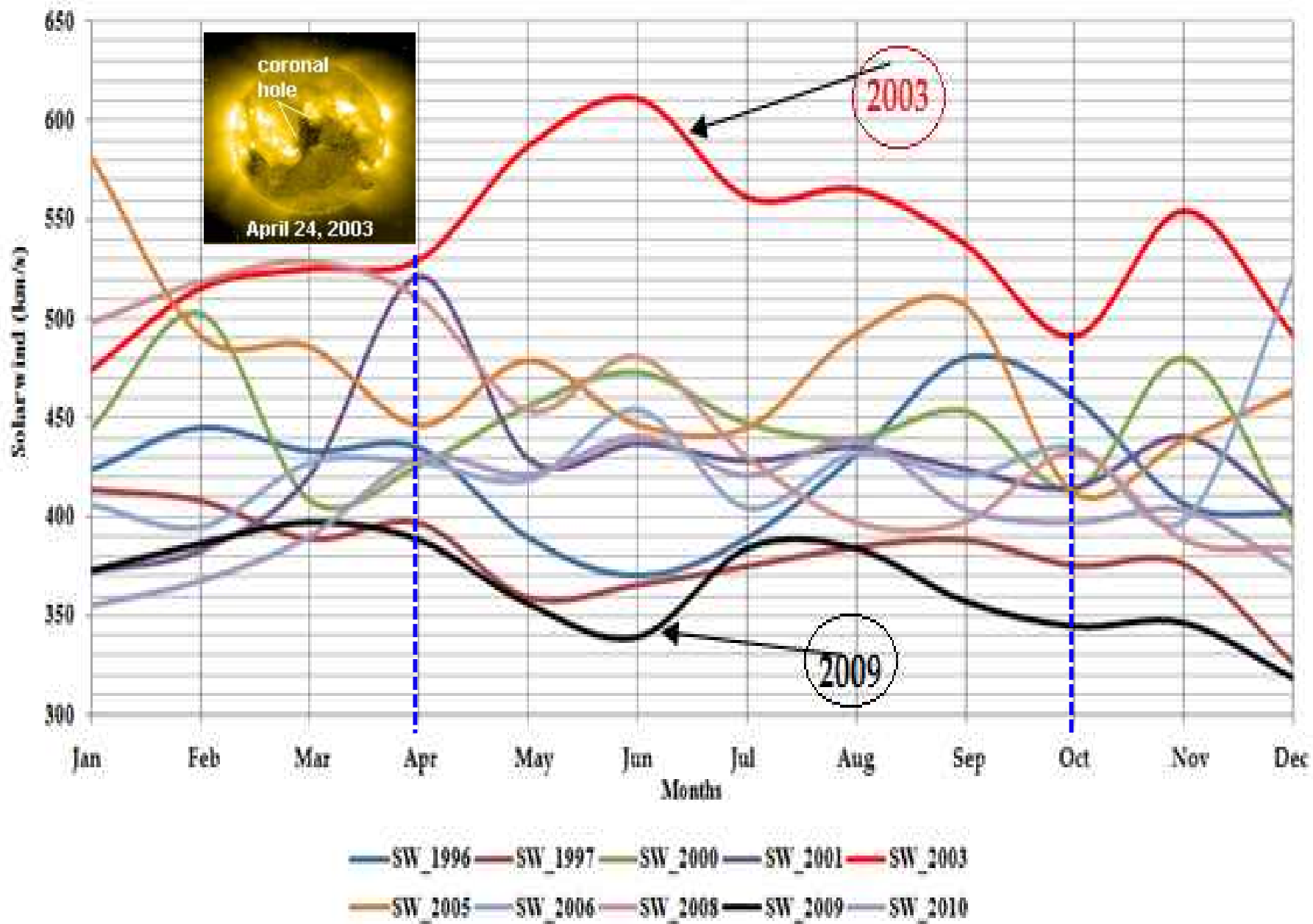
Les paramètres du plasma (vitesses, nombre de taches,...)











III. Vent solaire et Géomagnétisme

- Avant les années 1989 , deux (02) classes: une classe calme et une autre perturbée;
- Legrand and Simon(1989); quatre classes: calme, récurrente, choc et fluctuante
- Richardson and Cane(2000; 2002) ; Ouattara et Amory-Mazaudier (2009), Zerbo et al.(2011): validation de la classification Legrand et Simon

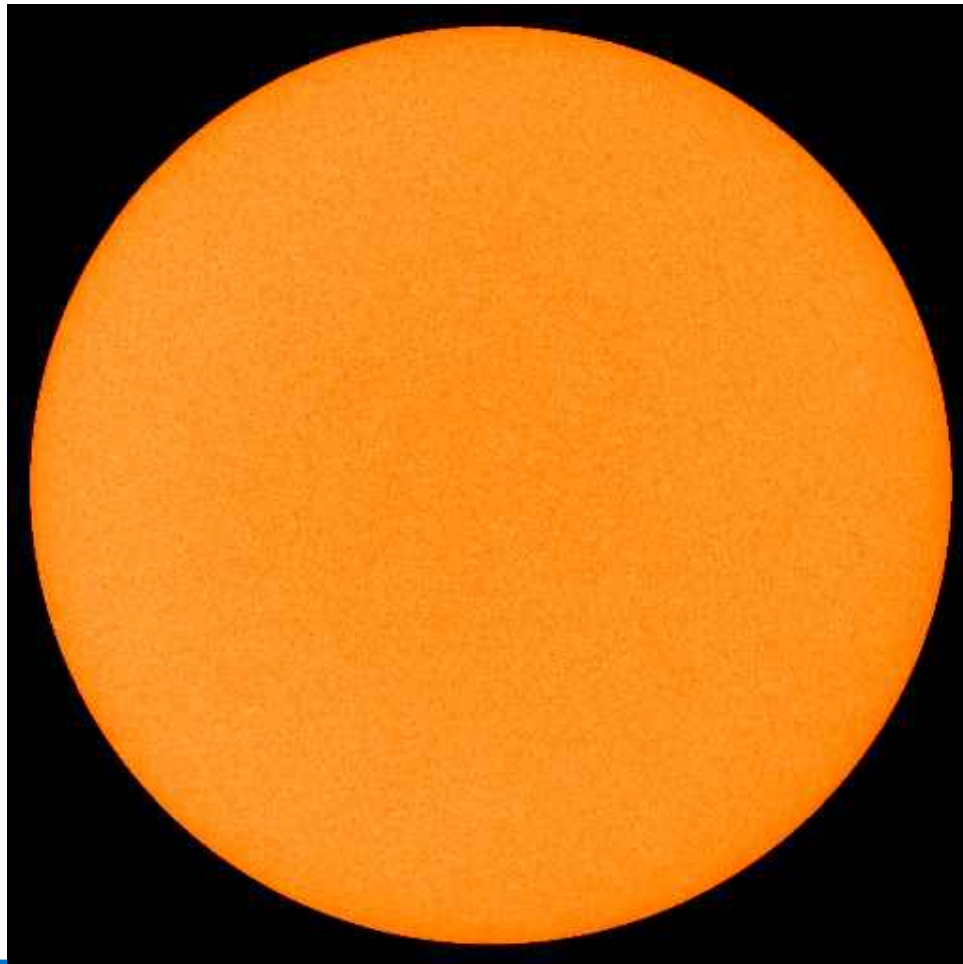
III. Vent solaire et Géomagnétisme

Legrand et Simon (1989) ont utilisé

- (a) Indice d'activité géomagnétique aa (Mayaud)
 - (b) Date de SSC
 - (c) Corrélation vent solaire-indice géomagnétique aa
- Svalgaard (1977) pour identifier les sources solaires de l'activité géomagnétique à travers des recherches de coïncidences et analyses de longues séries de données.

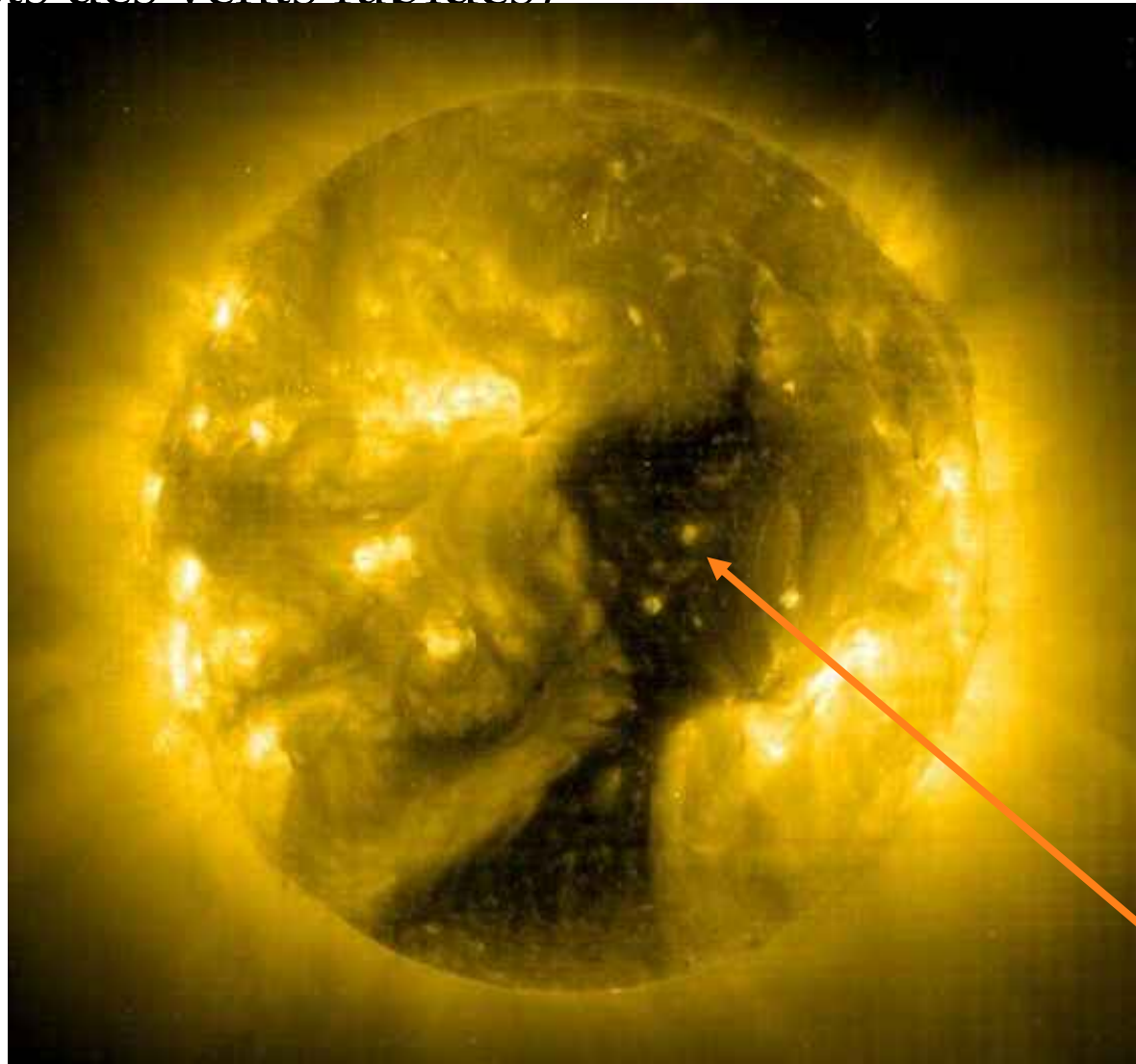
III. Vent solaire et Géomagnétisme

(2) Activité calme: jour avec $A_a < 20\text{nT}$



SOHO/NASA

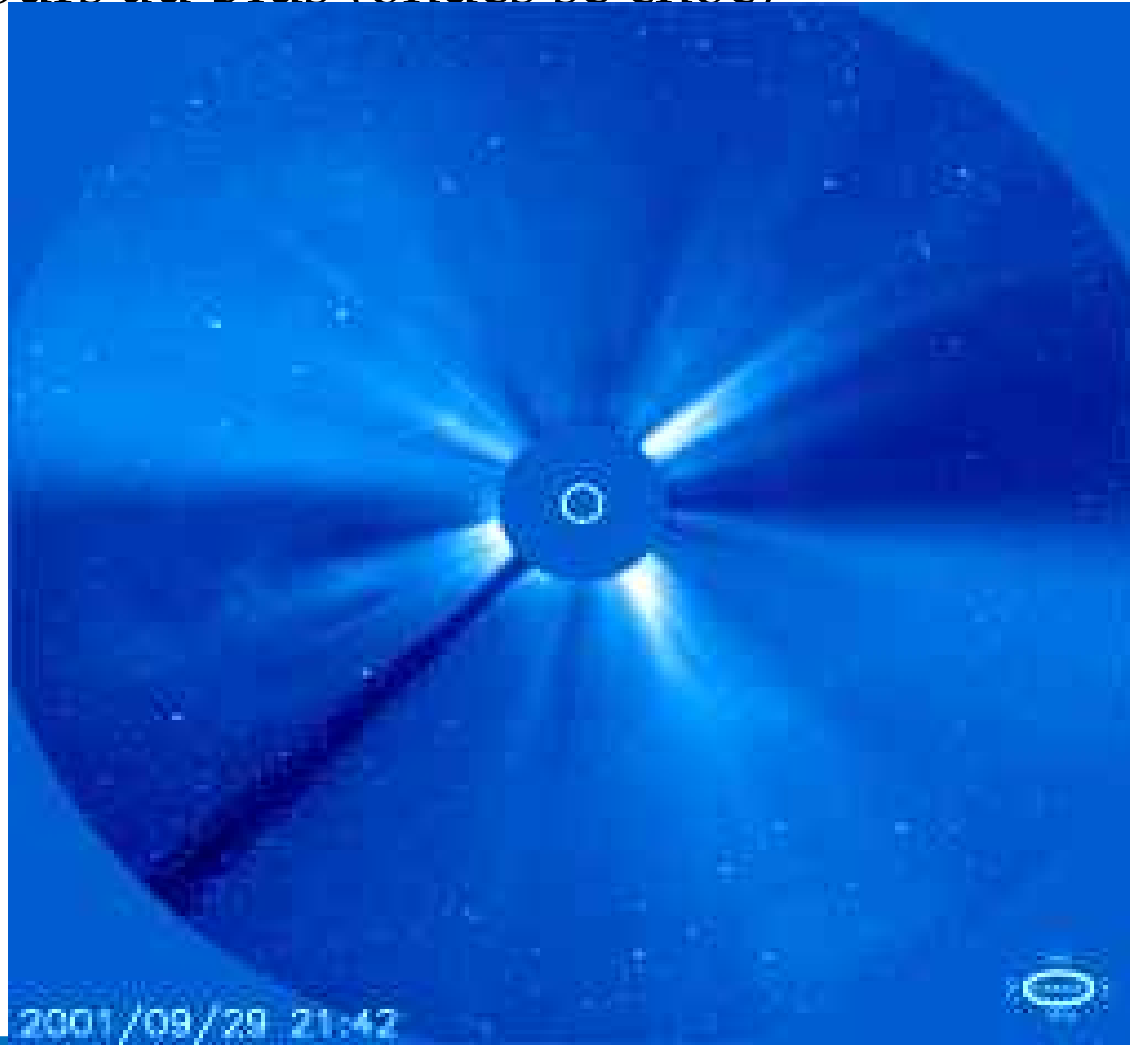
(2) Activité récurrente: $Aa \geq 40$ nT sur au moins une rotation solaire (effets des vents rapides)



SOHO/NASA

Trou coronal

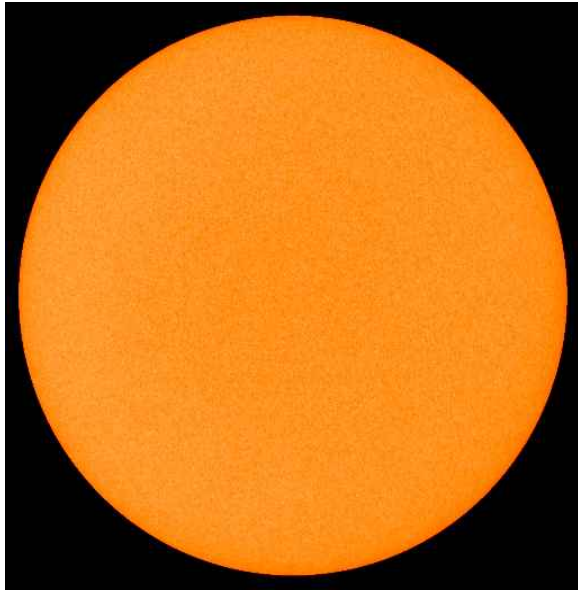
(3) Activité de chocs: date de ssc avec $Aa \geq 40$ nT sur une durée de 3 jours au plus (ondes se choc)



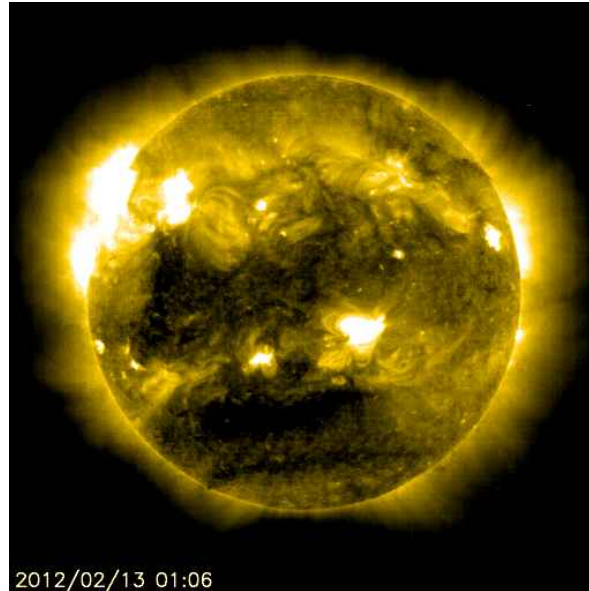
SOHO/LASCO

En plus des trois classes présentées

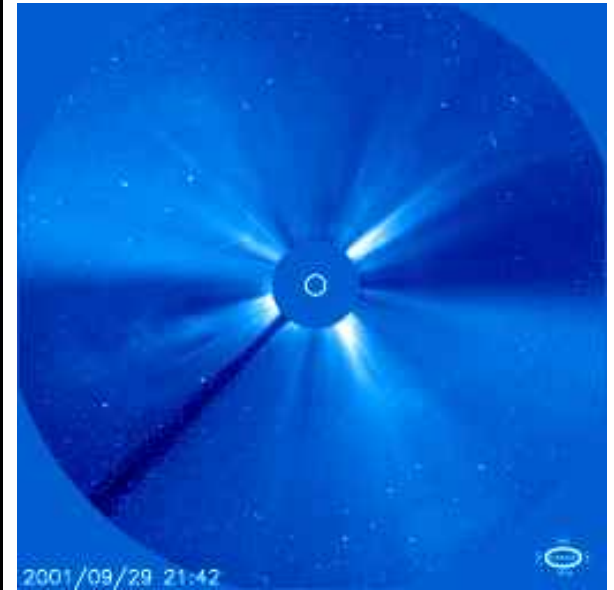
(1)



(2)



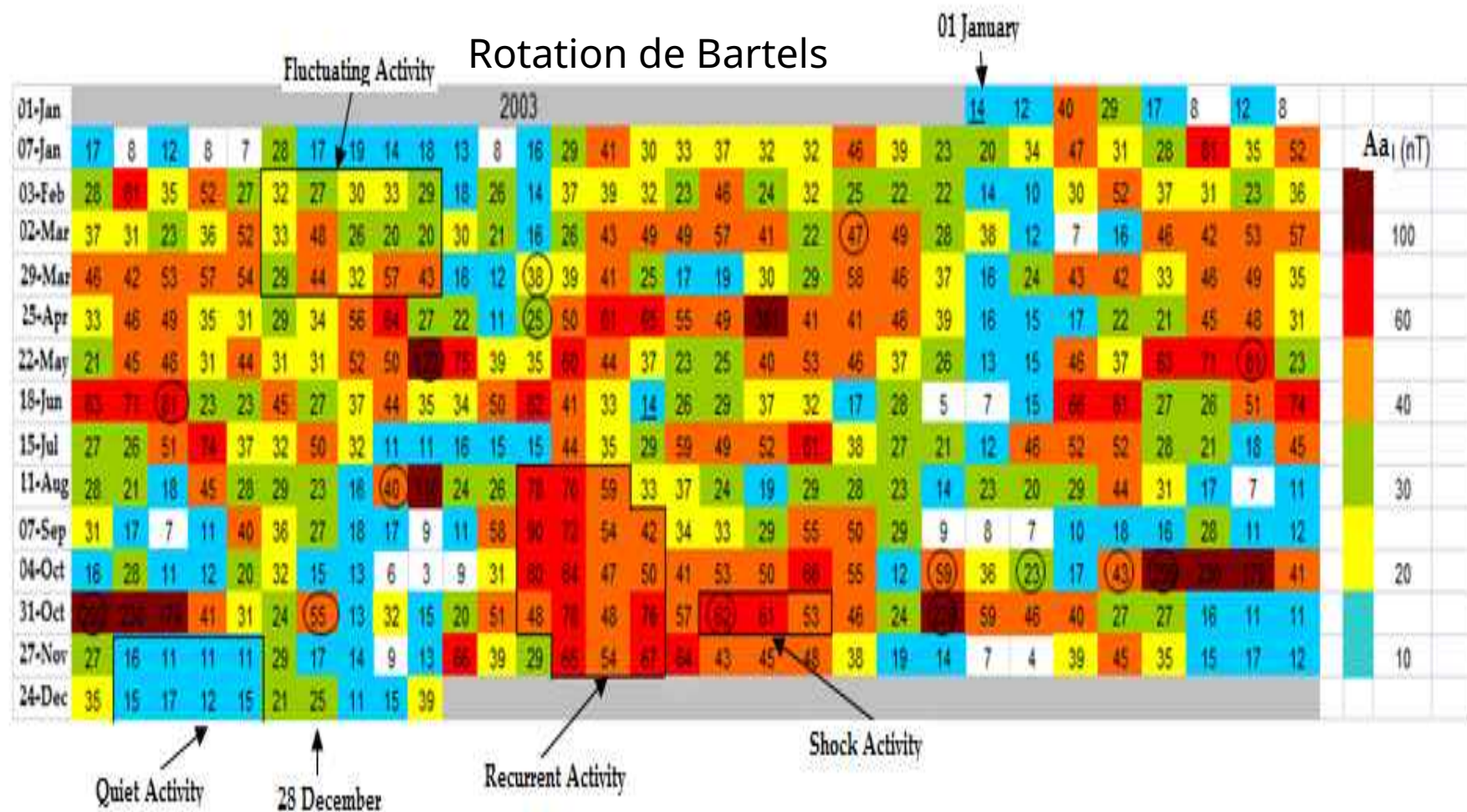
(3)



La quatrième classe c'est tout ce qui reste.

(4) Activité fluctuante: $Aa \geq 20$ nT (fluctuations de la plaque neutre équatoriale)

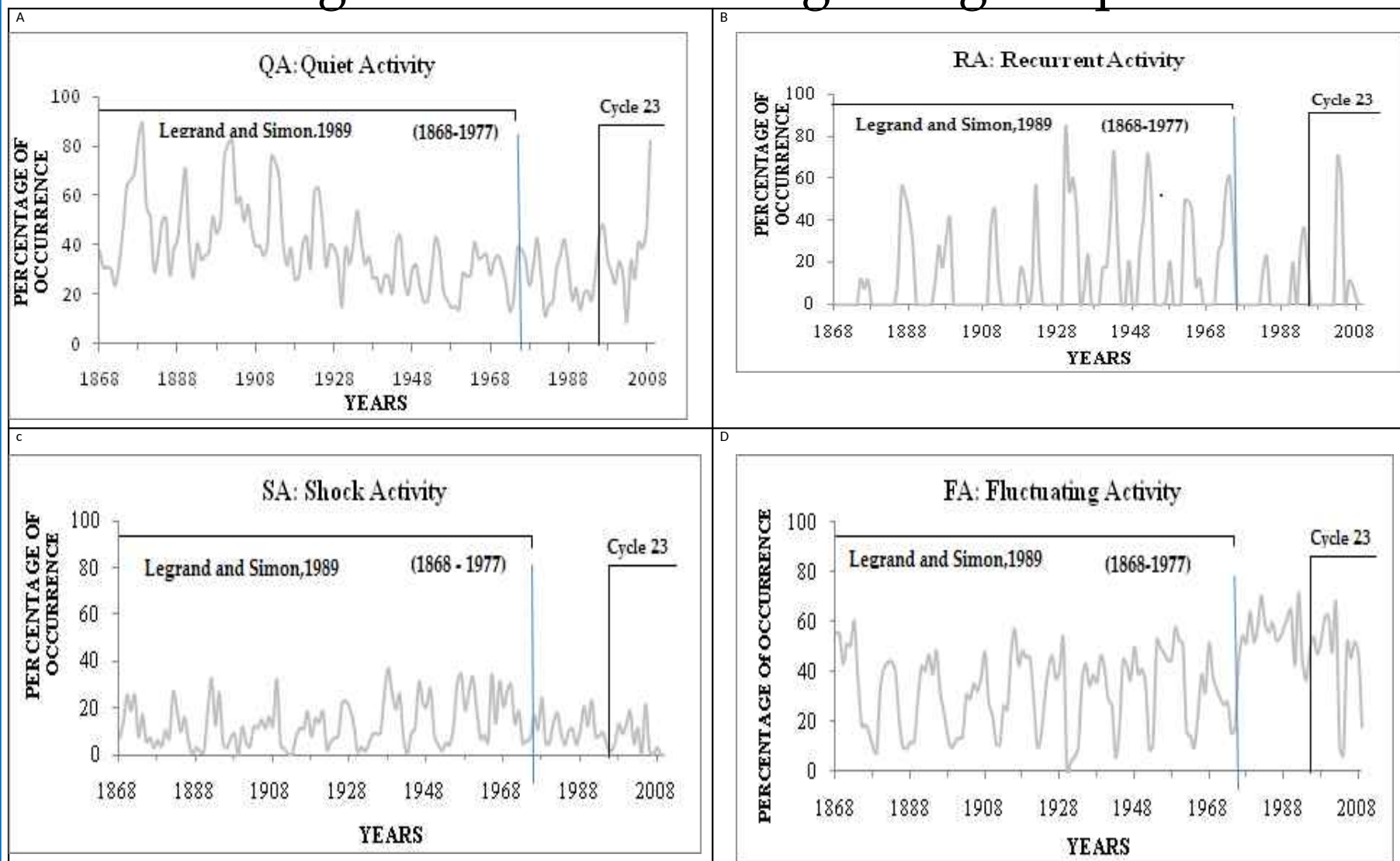
Diagramme pixel montrant les 4 classes d'activité géomagnétique pour l'année 2003



Année 2009: une des années magnétiquement les plus calmes depuis ces 100 dernières années.

01-Jan	2009																									16	10	21					
02-Jan	28	16	10	21	10	11	7	5	7	13	11	3	2	11	13	13	9	6	6	19	9	9	5	5	4	8	29	9	5	7	9		aa (nT)
29-Jan	9	5	7	9	14	5	3	9	28	12	3	5	3	5	5	6	8	5	36	25	8	3	7	4	11	7	9	13	12	6	6		
25-Feb	13	12	6	6	22	10	6	4	17	14	5	4	2	15	3	8	8	15	32	19	14	11	6	4	10	7	21	9	3	16	17		100
24-Mar	9	3	16	17	10	11	5	5	8	5	6	3	4	4	7	5	5	13	28	17	21	12	7	4	8	9	10	15	9	6	6		
20-Apr	15	9	6	6	7	3	11	8	5	6	4	7	4	5	7	4	6	4	13	15	21	12	6	8	3	4	14	4	8	3	4		60
17-May	4	8	3	4	6	10	7	10	8	5	2	5	2	11	9	6	5	3	3	8	9	8	5	9	4	4	6	4	2	6	9		
13-Jun	4	2	6	9	6	6	4	5	3	8	13	4	7	32	14	5	9	22	15	8	4	4	6	5	8	5	8	7	10	14	6		40
10-Jul	7	10	14	6	5	18	13	7	3	2	3	2	11	7	39	13	9	7	5	7	6	4	8	9	7	5	11	7	11	22	13		
06-Aug	7	11	22	13	5	12	6	5	6	6	4	3	3	4	4	16	22	16	9	8	3	5	6	12	4	2	37	9	6	5	10		30
02-Sep	9	6	5	10	14	4	7	3	3	4	5	8	4	10	10	10	11	10	5	2	9	13	5	2	3	3	7	13	19	2	11		
29-Sep	13	19	2	11	3	3	3	11	4	3	2	4	5	4	18	3	7	3	14	5	2	4	5	2	3	28	18	20	11	7	6		20
26-Oct	20	11	7	6	6	11	16	5	8	8	3	3	2	3	3	18	6	3	2	3	4	13	12	4	3	5	5	5	18	9	2		
22-Nov	5	18	9	2	18	13	14	4	7	3	3	2	3	2	2	9	6	7	2	2	3	2	8	7	12	3	10	7	7	4	5		10
19-Dec	7	7	4	5	10	11	12	8	12	10	8	6	5	4	6																		

Variation long terme de l'activité géomagnétique

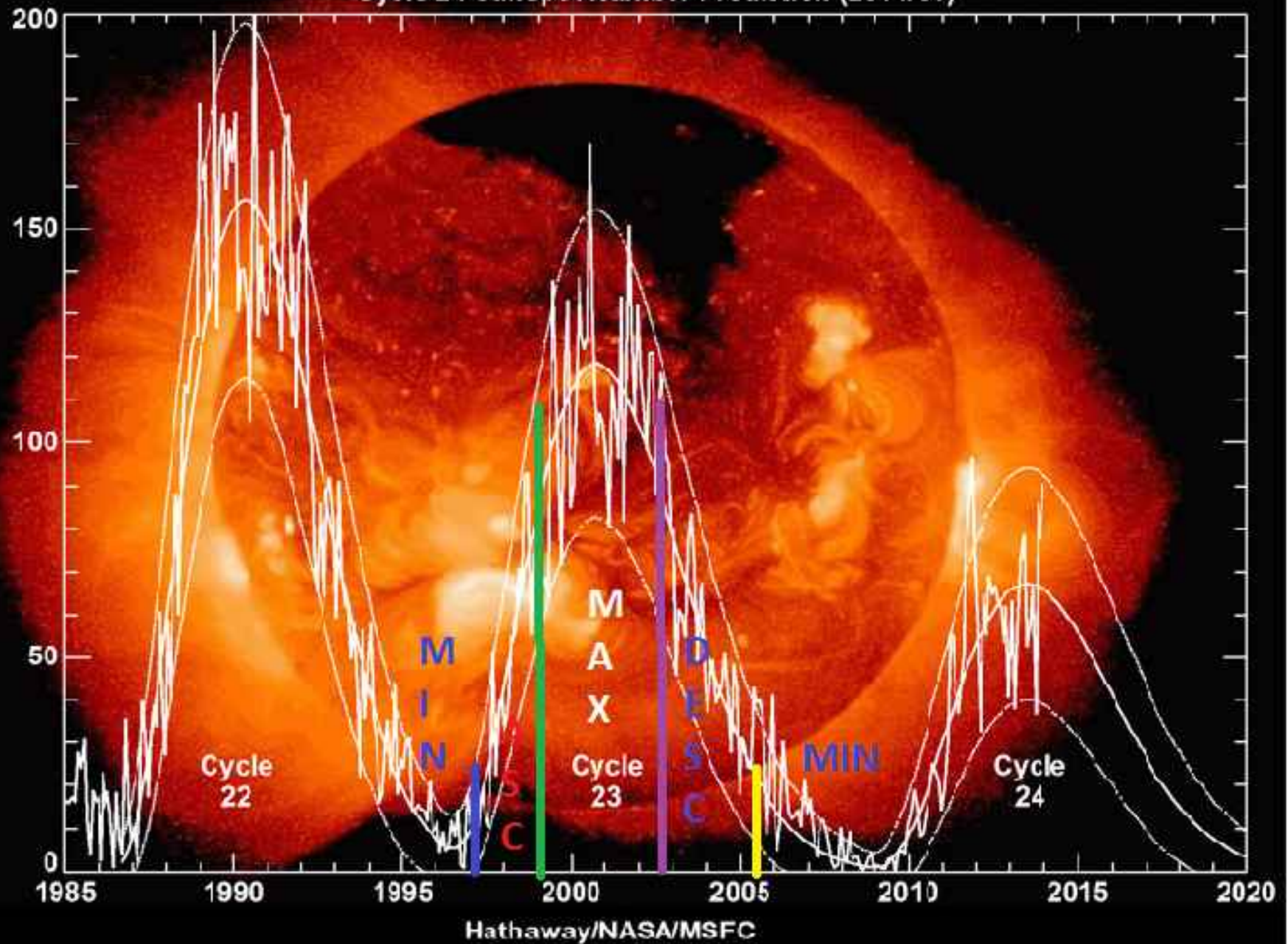


III. Vent solaire et Géomagnétisme

Le cycle solaire est subdivisé en quatre phases suivant les valeurs du nombre de taches:

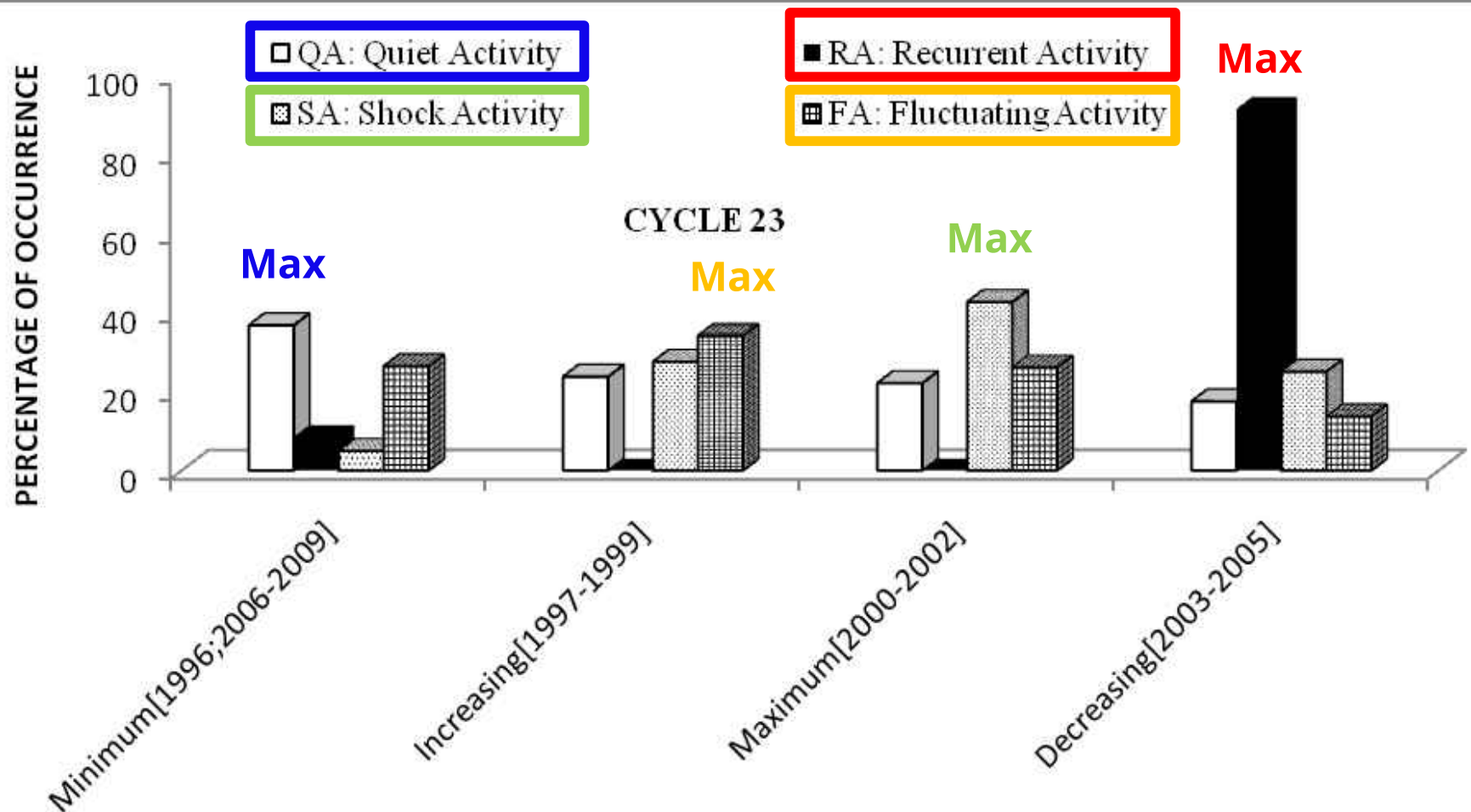
- Minimum de phase: $R_z < 20$
- Phase ascendante: $20 < R_z < 100$
- Maximum de phase: $R_z > 100$
- Phase descendante: $100 > R_z > 20$

Cycle 24 Sunspot Number Prediction (2014/01)



III. Vent solaire et Géomagnétisme

Phases du cycle de taches



Extension des limites des conditions de la classification de Legrand et Simon, 1989: Raffinement.

Vers une Nouvelle classification de l'activité géomagnétique.

Magnetic Cloud Un nuage magnétique est une zone d'intense champs magnétique ayant un mouvement de rotation (Burlaga et al, 1981; Wu et al, 2006) qui provoque des orages magnétique à 90% (Wu and Lepping, 2002)

Raffinement de la condition sur l'activité fluctuante de 1989

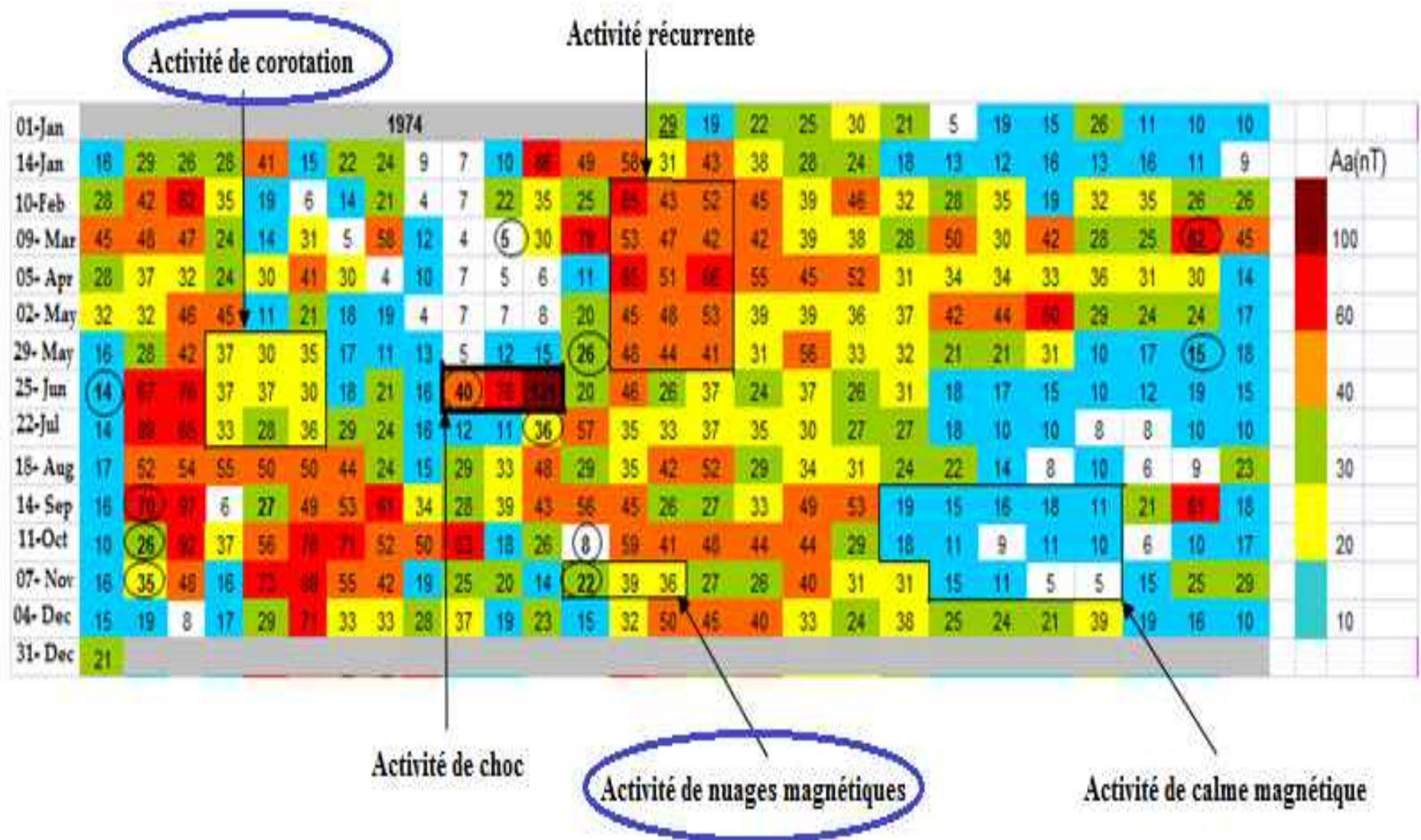
→ Extraction de deux classes organisées

. Activité de nuages magnétiques: les évènements de choc engendrant une modification modérée

. Activité de corotation : manifestation des vents solaires, stables en co-rotation et ayant des effets magnétiques modérés.

-> Vers de nouvelles limites pour les évènements récurrents et chocs magnétiques

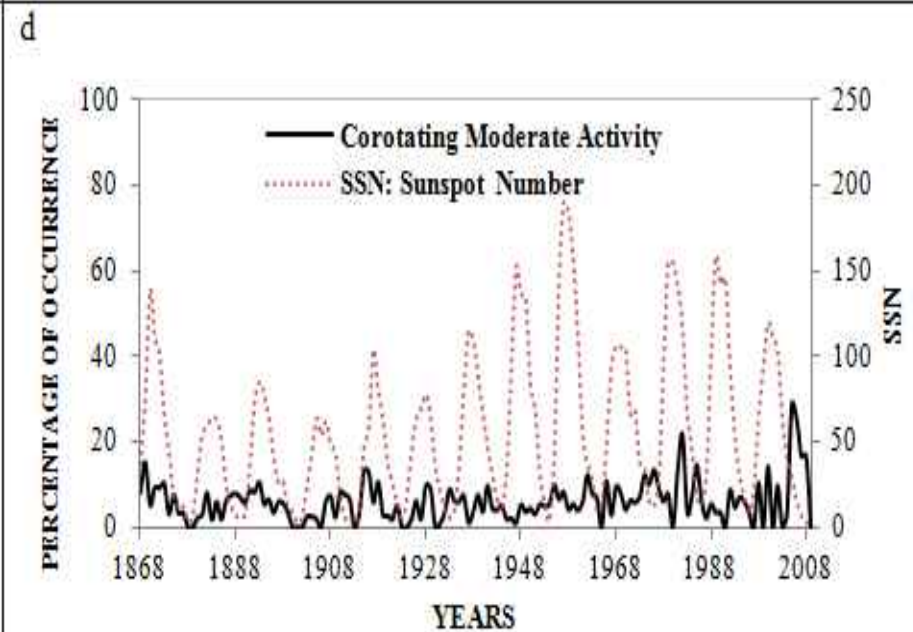
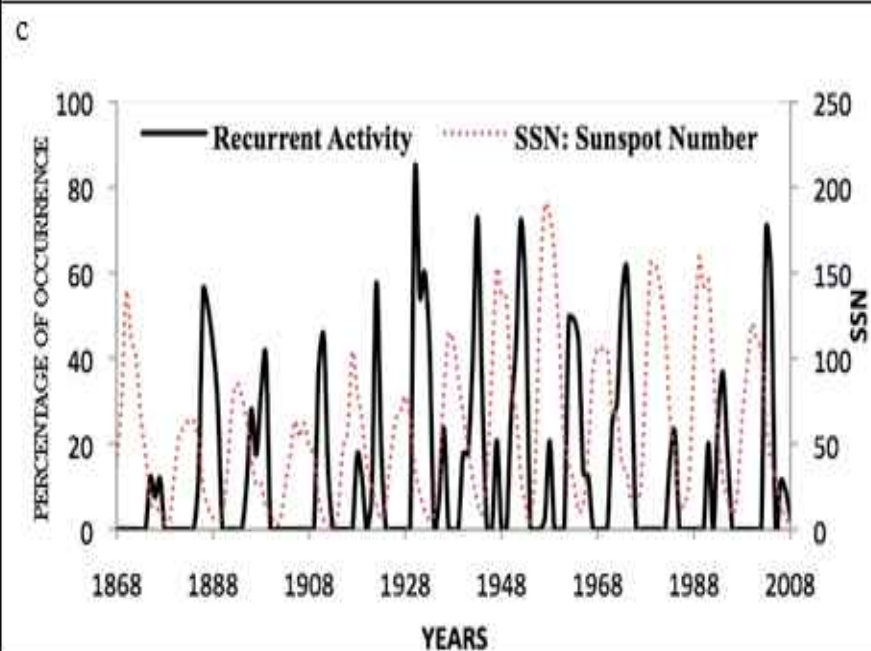
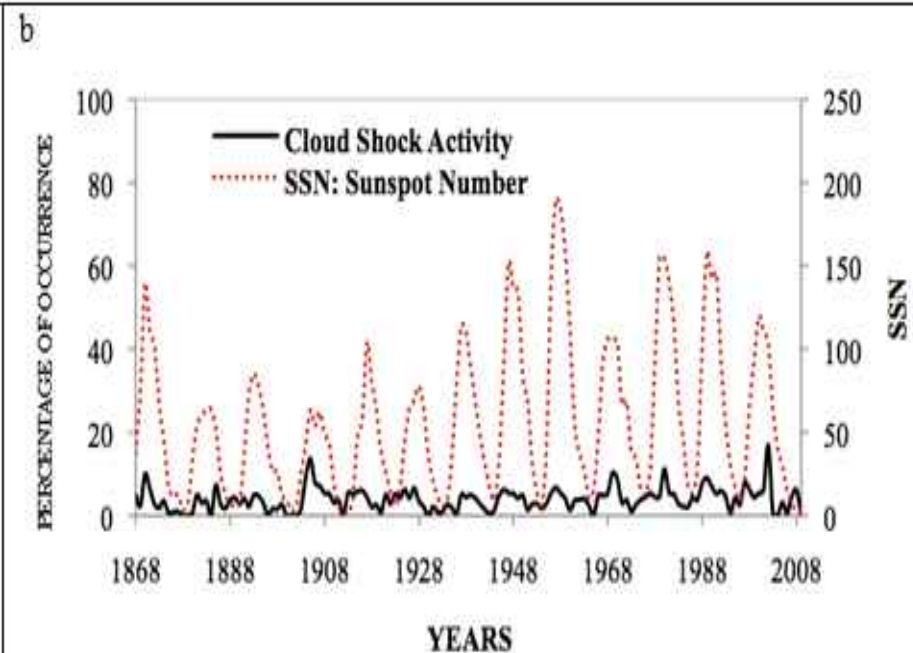
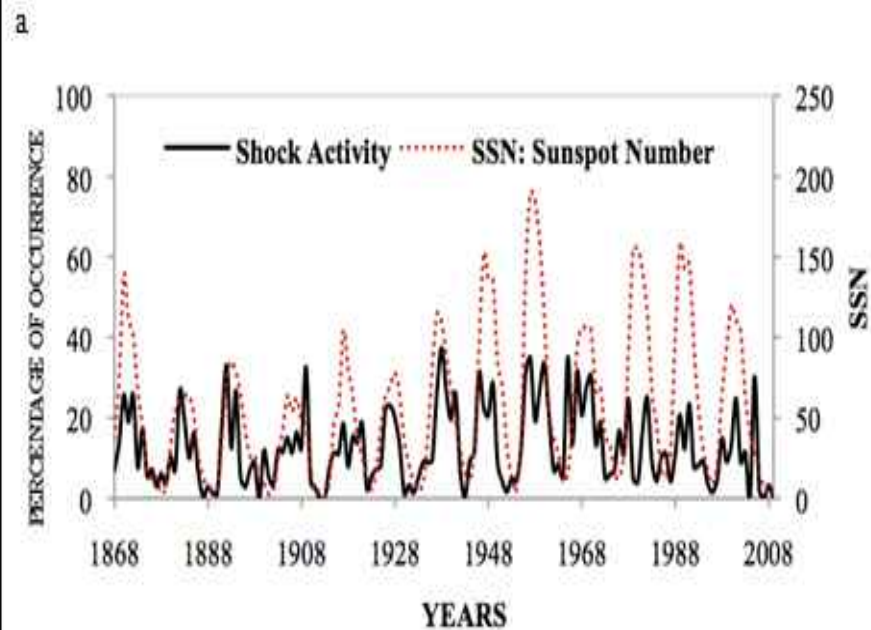
Classification Zerbo et al.(2012)



Un nuage magnétique est un événement transitoire observé dans le vent solaire (Burlaga et al. 1981)

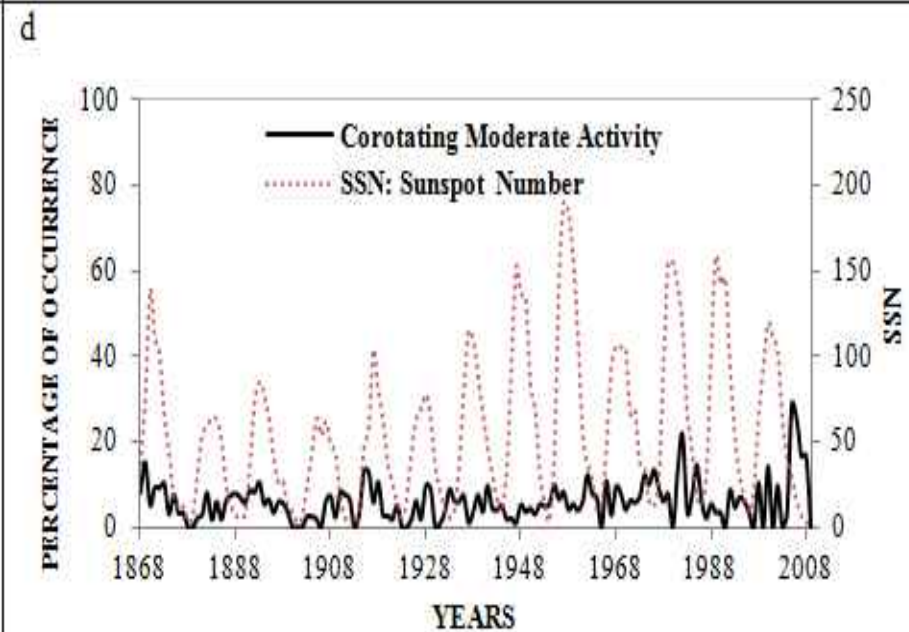
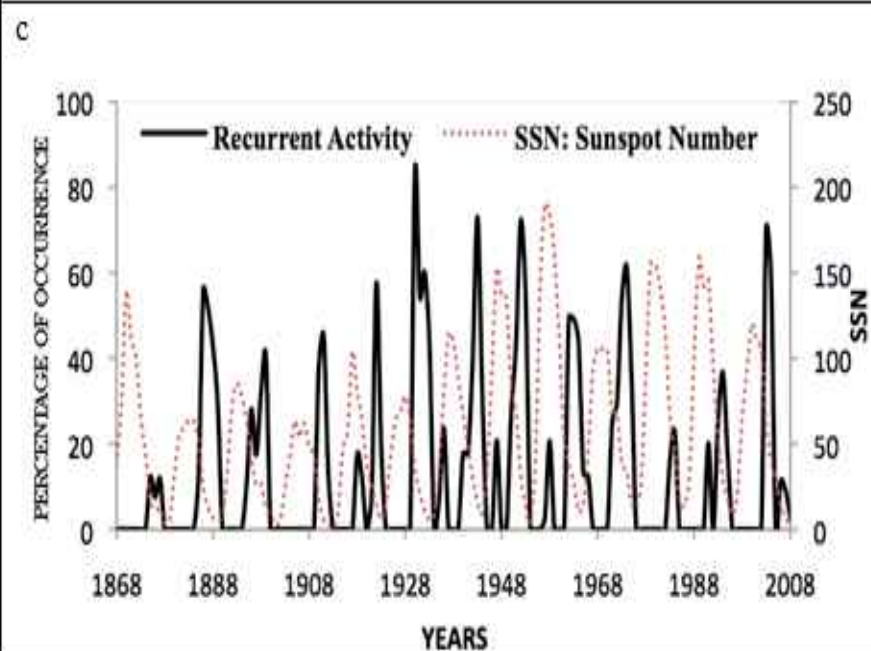
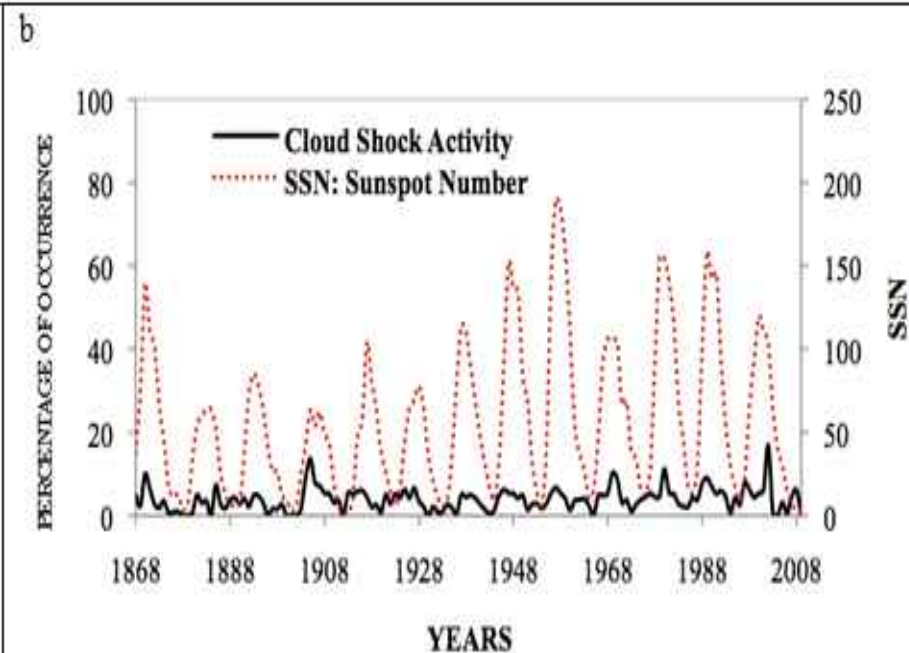
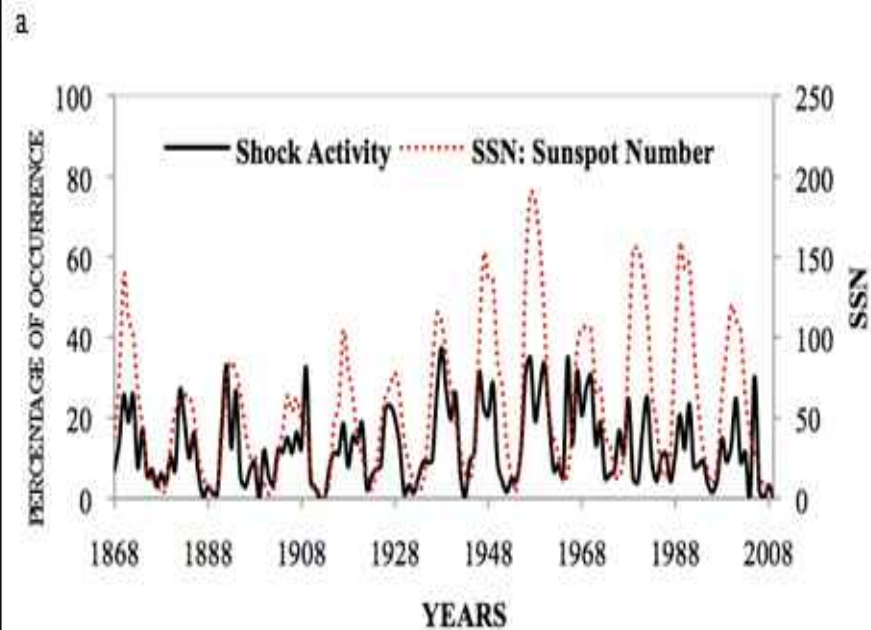
A l'exception des orages à débuts brusques et de quelques orages très intenses liés à des ondes de choc survenant au hasard, l'activité géomagnétique s'organise en plages de récurrence bien individualisées que nous pouvons classer en trois catégories :

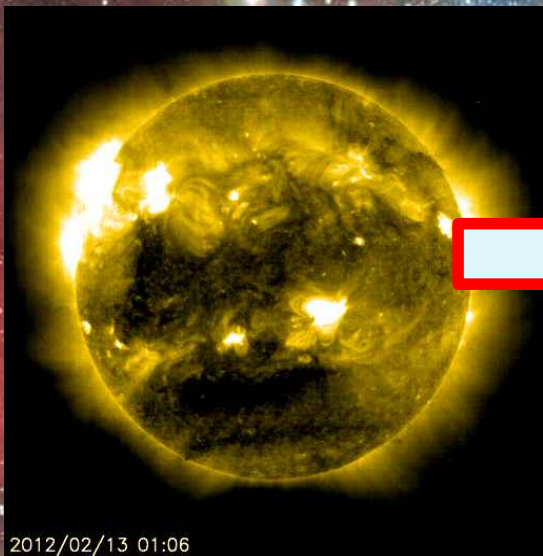
- les périodes de faible niveau d'agitation magnétique (activité calme
- les périodes où le niveau de l'activité évoluant lentement et de façon homogène au cours du temps : ces récurrences traduisent la permanence de sources de vent rapide sur plusieurs rotations solaires (activité récurrente).
- les périodes où le niveau de l'activité fluctue, qui forment des zones de couleurs inhomogènes et correspondent à des jets de vents solaires de vitesses fluctuantes provenant des régions balayées lors de la fluctuation de la lame neutre (activité fluctuante).



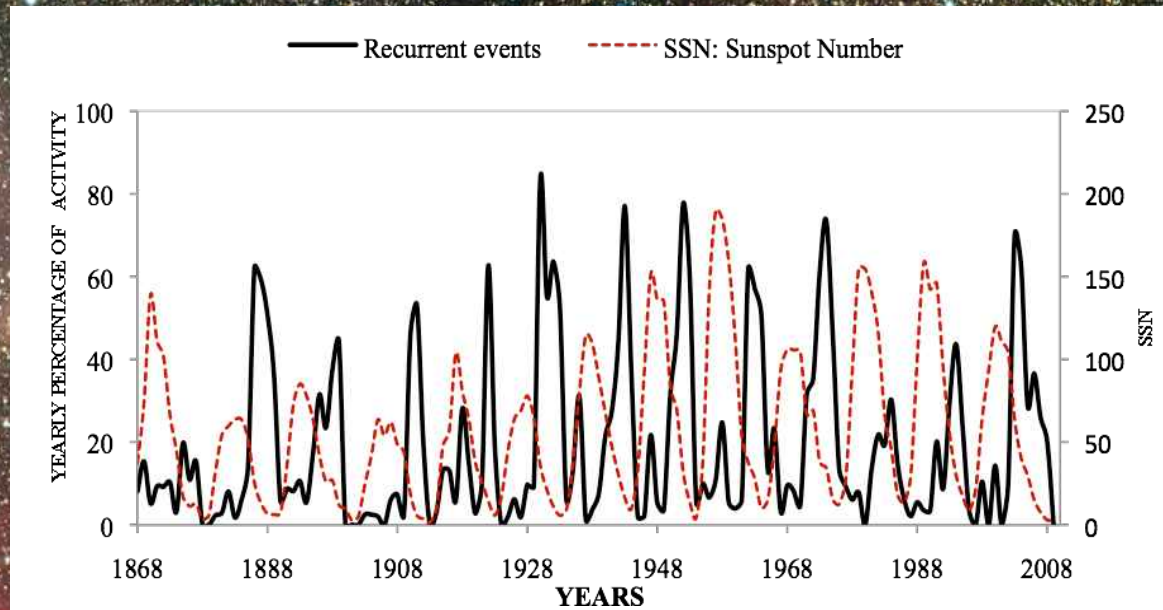
Sources solaires CMA et CSA

Cycle solaire	Coefficient de corrélation (SA, CSA)/ Valeurs annuelles	Coefficient de corrélation (RA, CMA)/ Valeurs annuelles
11	0,93	0,86
12	0,82	0,85
13	0,83	0,74
14	0,81	0,94
15	0,80	0,82
16	0,87	0,78
17	0,89	0,70
18	0,82	0,76
19	0,89	0,77
20	0,84	0,75
21	0,80	0,89
22	0,79	0,93
23	0,79	0,72

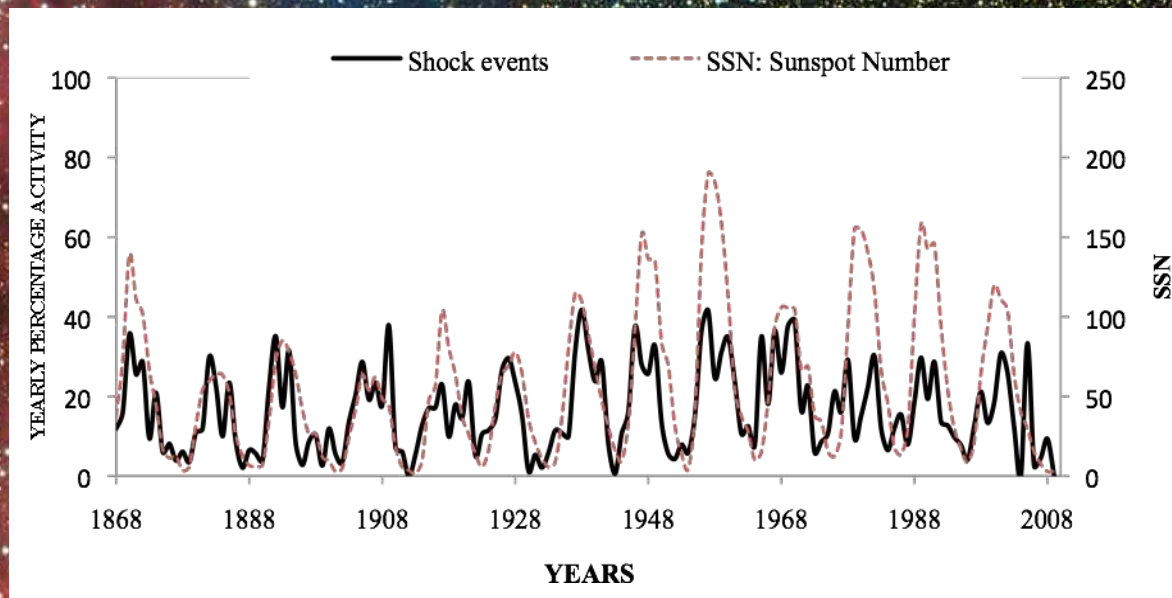




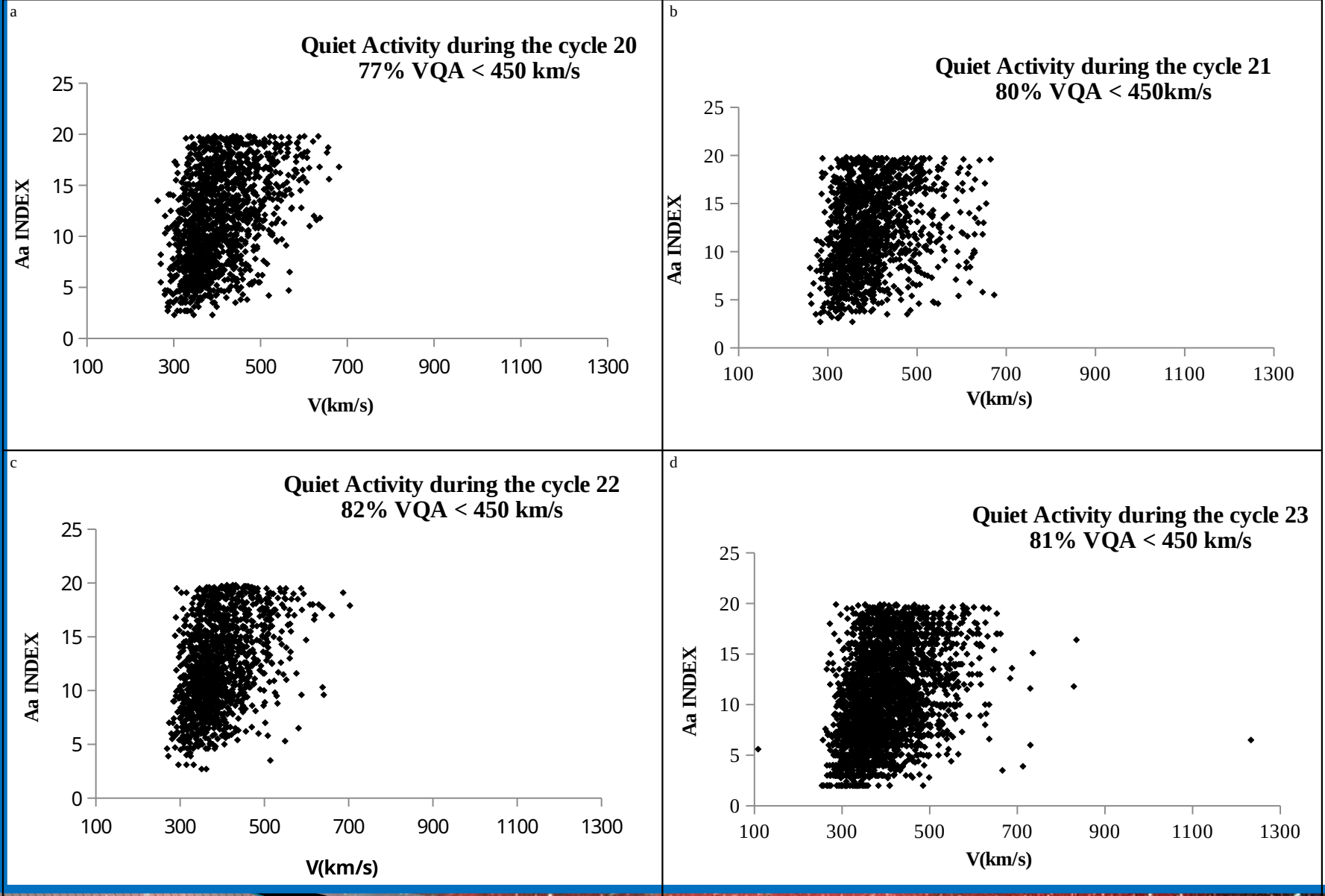
2012/02/13 01:06



2001/09/29 21:42



Connexion vent-géomagnétisme(Zerbo et al.2013)



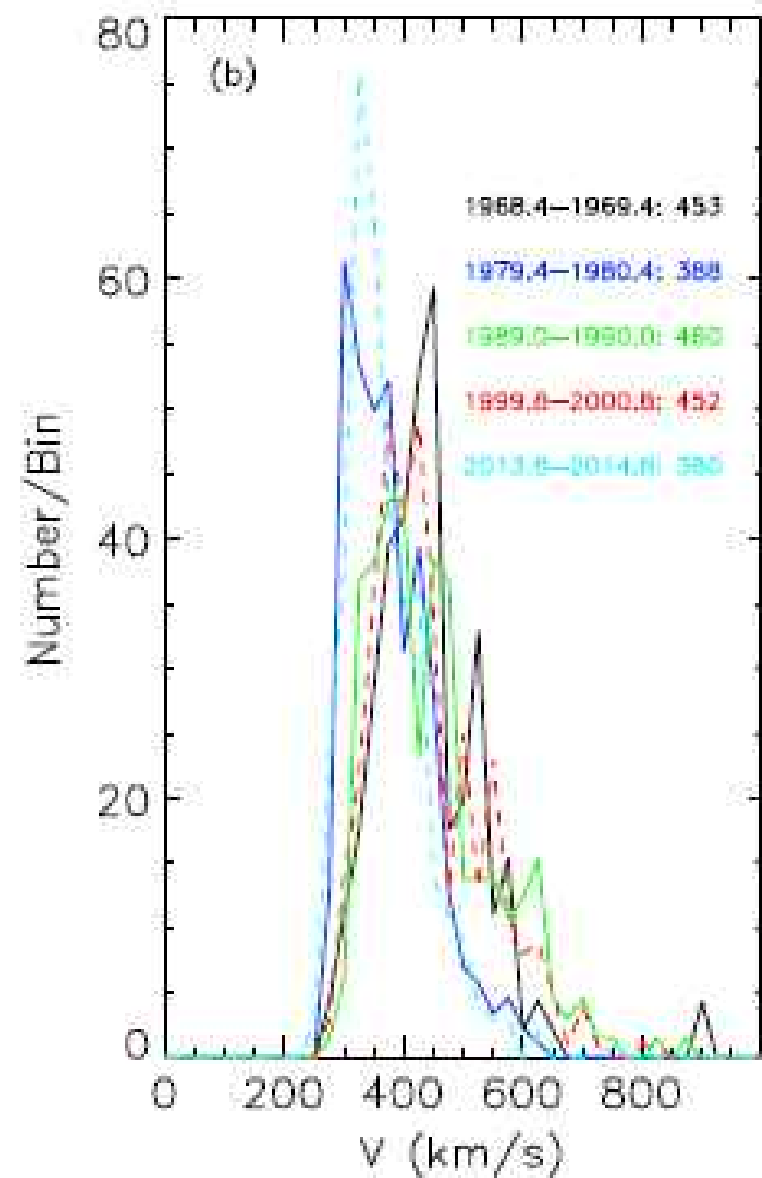
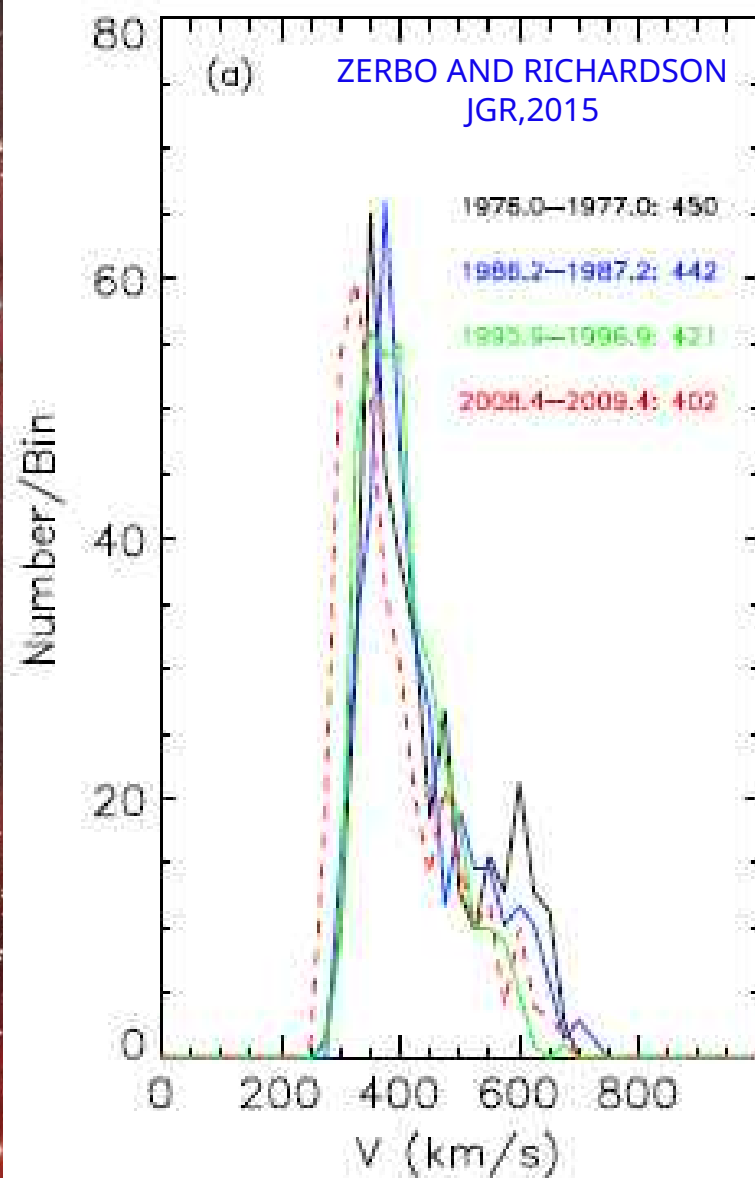
Connexion vent-géomagnétisme(Zerbo et al.2013)

	Conditions sur le vent solaire
Activité des jours calmes (QA)	330 km/s à 468 km/s
Activité récurrente (RA)	472 km/s à 682 km/s
Activité de chocs (SA)	381 km/s à 582 km/s
Activité fluctuante (UA)	395 km/s à 565 km/s

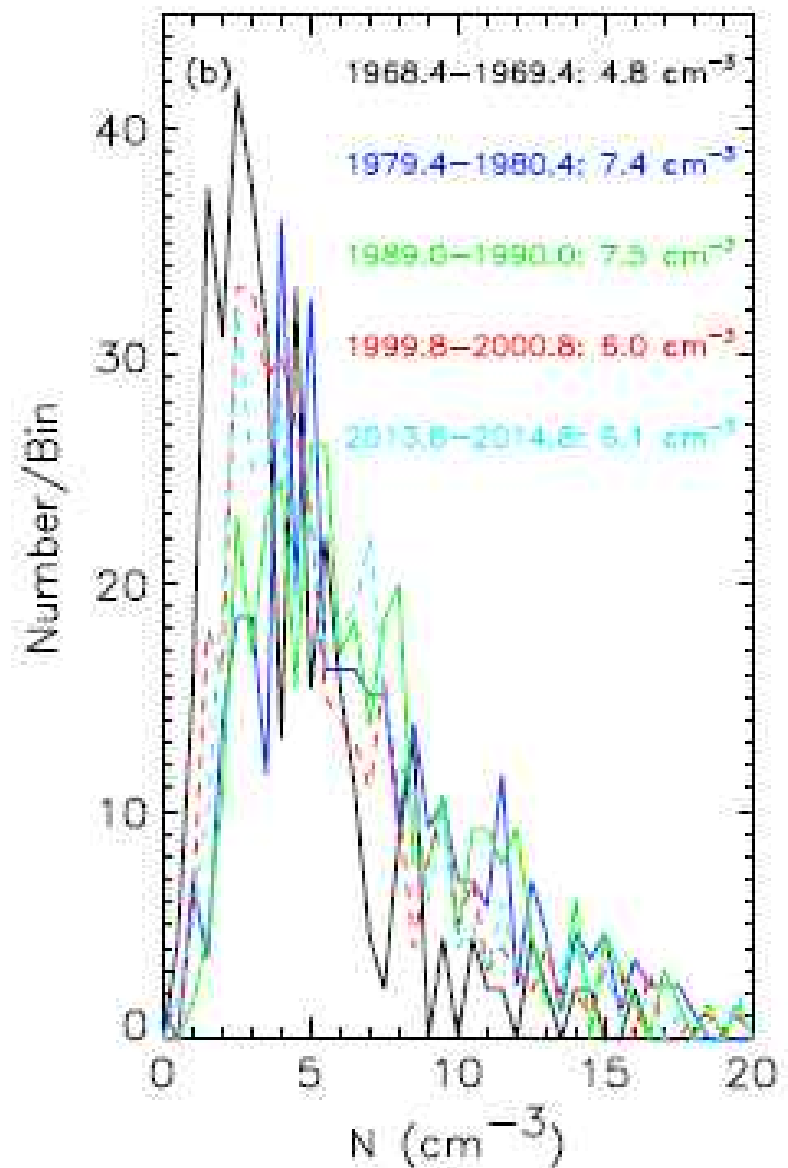
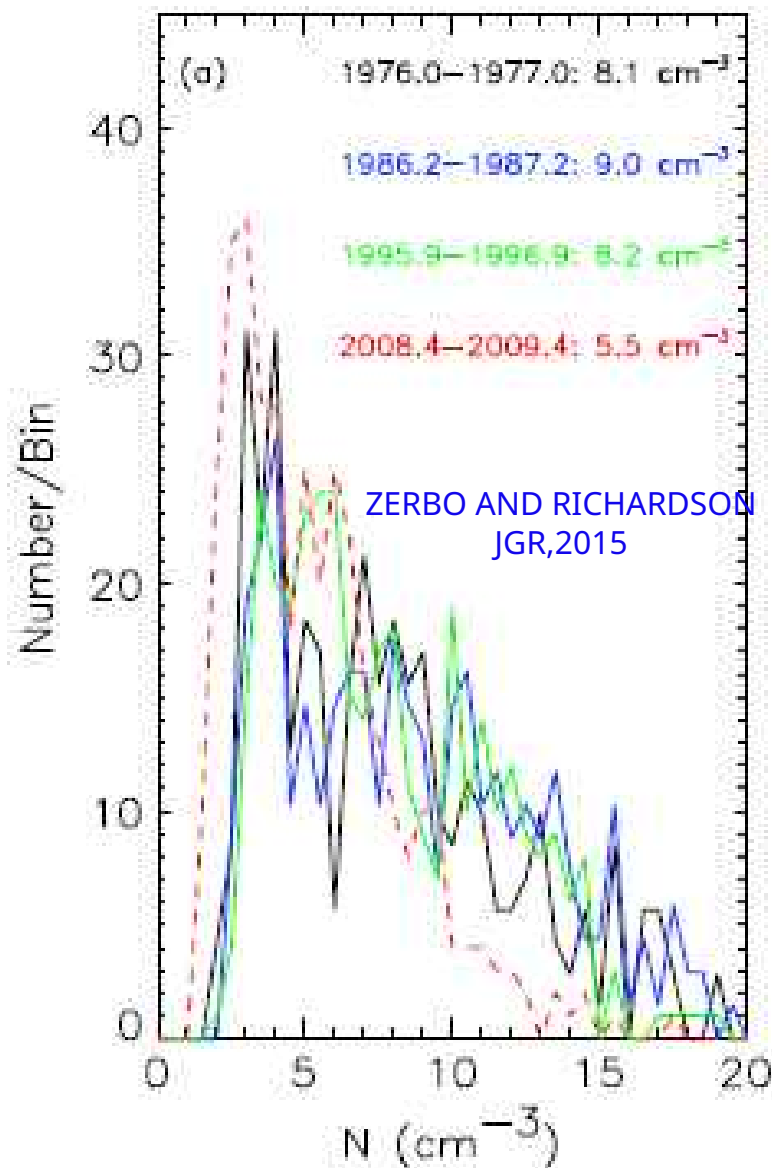
01-Jan	2009																									456	424	513					
02-Jan	485	456	424	513	459	420	369	323	315	366	378	343	309	303	334	343	378	350	355	434	433	409	341	311	301	294	350	368	359	397	373		V (Km/s)
29-Jan	368	359	397	373	444	394	360	329	357	359	317	316	313	311	294	310	332	310	459	558	475	406	333	311	331	373	431	444	434	418	402		
25-Feb	444	434	418	402	567	555	437	359	350	362	363	362	336	402	377	325	335	359	503	547	500	423	379	343	307	335	402	419	390	422	478		650
24-Mar	419	390	422	478	454	419	401	420	414	384	384	350	325	293	286	362	391	357	340	453	506	525	496	413	346	318	348	421	493	467	445		
20-Apr	421	493	467	445	428	392	361	387	408	384	361	336	331	321	310	312	343	363	341	385	451	490	480	412	392	343	313	350	352	363	337		600
17-May	350	352	363	337	307	290	301	340	367	368	356	331	312	290	379	382	355	323	316	302	305	314	312	311	338	348	310	346	329	292	288		
13-Jun	346	329	292	288	316	308	311	301	303	314	319	330	299	269	339	473	427	399	386	517	487	417	375	357	344	346	342	339	321	325	416		550
10-Jul	339	321	325	416	433	383	390	520	457	383	338	300	288	311	319	411	495	548	486	415	400	398	379	352	379	408	362	375	349	374	459		
06-Aug	375	349	374	459	470	426	368	345	354	338	316	293	272	290	330	358	482	503	505	469	382	335	359	369	364	336	398	431	388	345	357		500
02-Sep	431	388	345	357	459	418	384	351	321	303	303	300	301	307	384	425	454	442	405	346	331	418	409	339	301	289	306	333	326	318	344		
29-Sep	333	326	318	344	342	336	324	360	378	337	288	279	289	265	381	379	350	333	373	395	329	307	307	292	283	345	384	387	416	390	370		450
26-Oct	387	416	390	370	357	363	361	333	348	331	321	288	298	285	266	352	386	351	308	286	285	323	348	332	320	305	335	384	497	506	409		
22-Nov	384	497	506	409	392	434	396	348	343	328	294	266	274	256	254	282	387	341	311	297	280	266	280	268	273	285	313	362	411	406	372		350
19-Dec	362	411	406	372	350	341	346	389	326	391	371	339	311	279	279	Diagramme pixel avec vitesses du vent solaire													0				



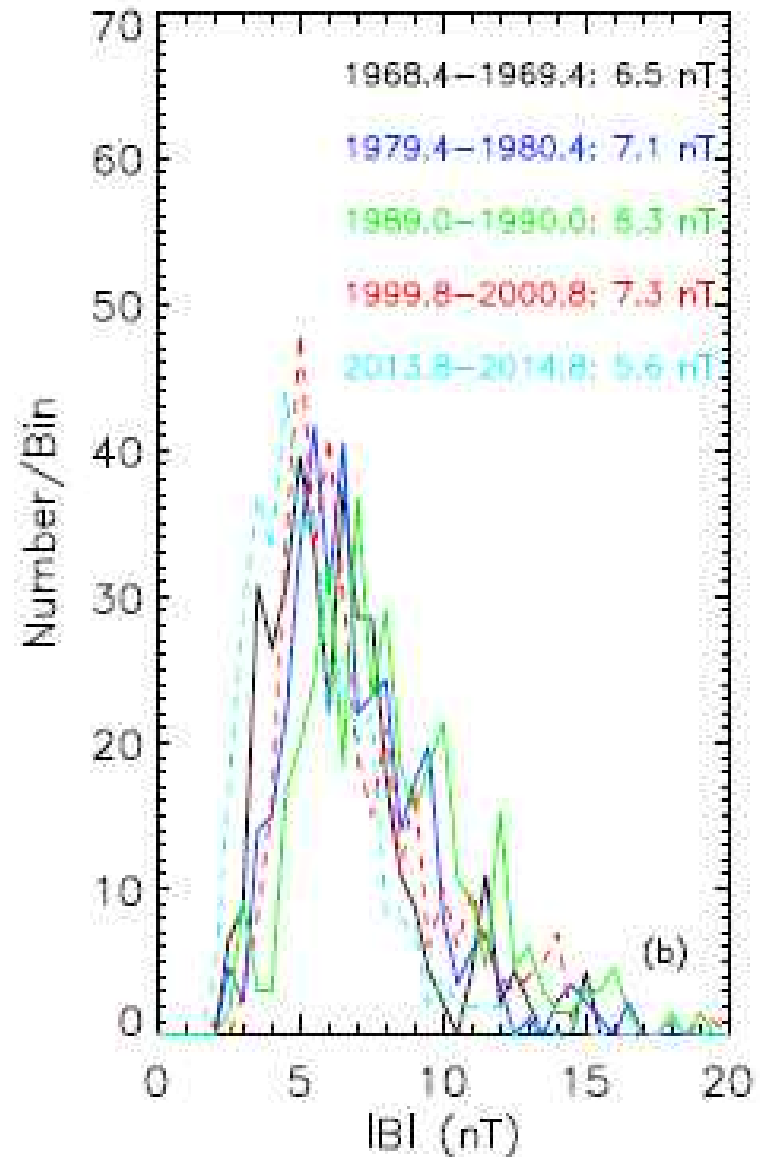
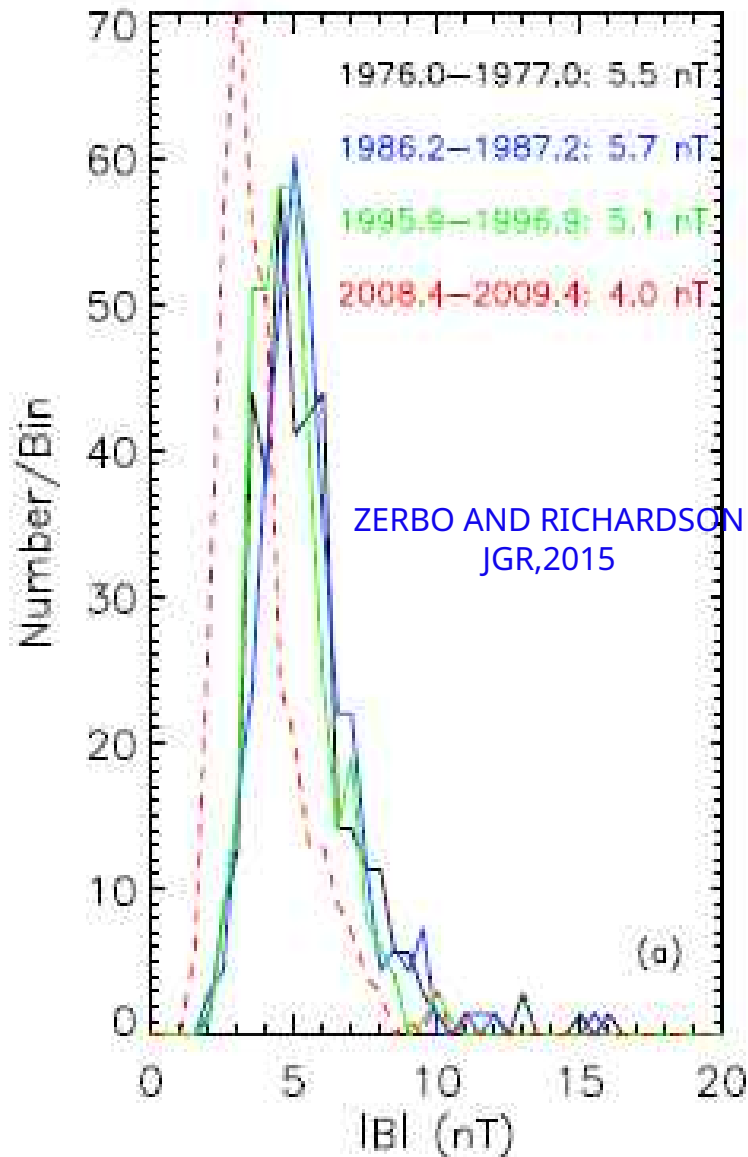
STRUCTURE DU VENT SOLAIRE AU COURS DES CINQ (05) DERNIERS CYCLES SOLAIRES



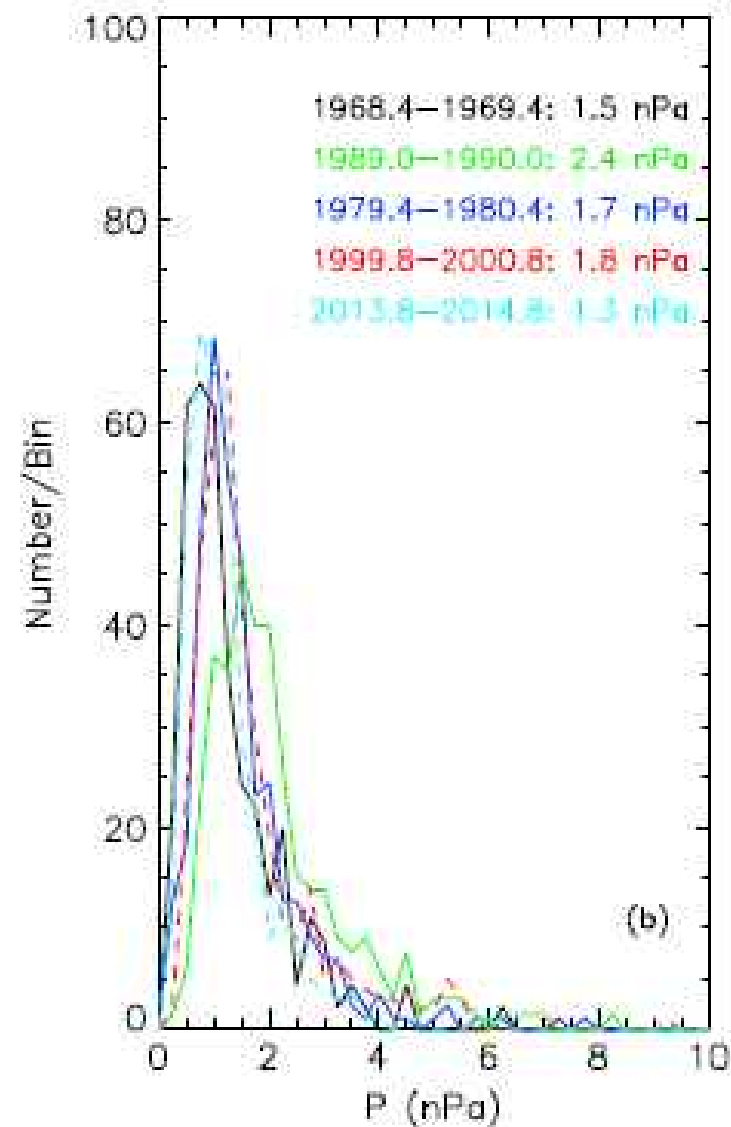
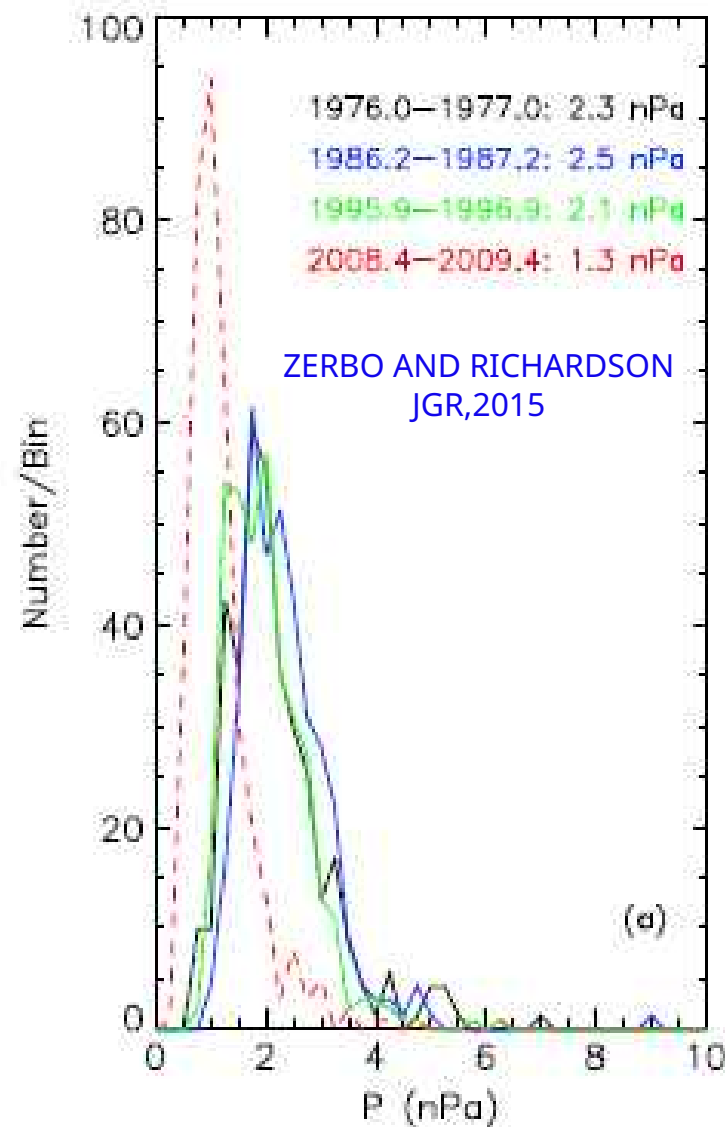
Vitesses du vent solaire (V) sont historiquement bas au cours du Cycle 24 , cependant le schéma de distribution du vent dans ce cycle reste similaire à celle des cycles précédents. Toutefois le processus physique qui produit le vent solaire varie au cours d'un cycle.



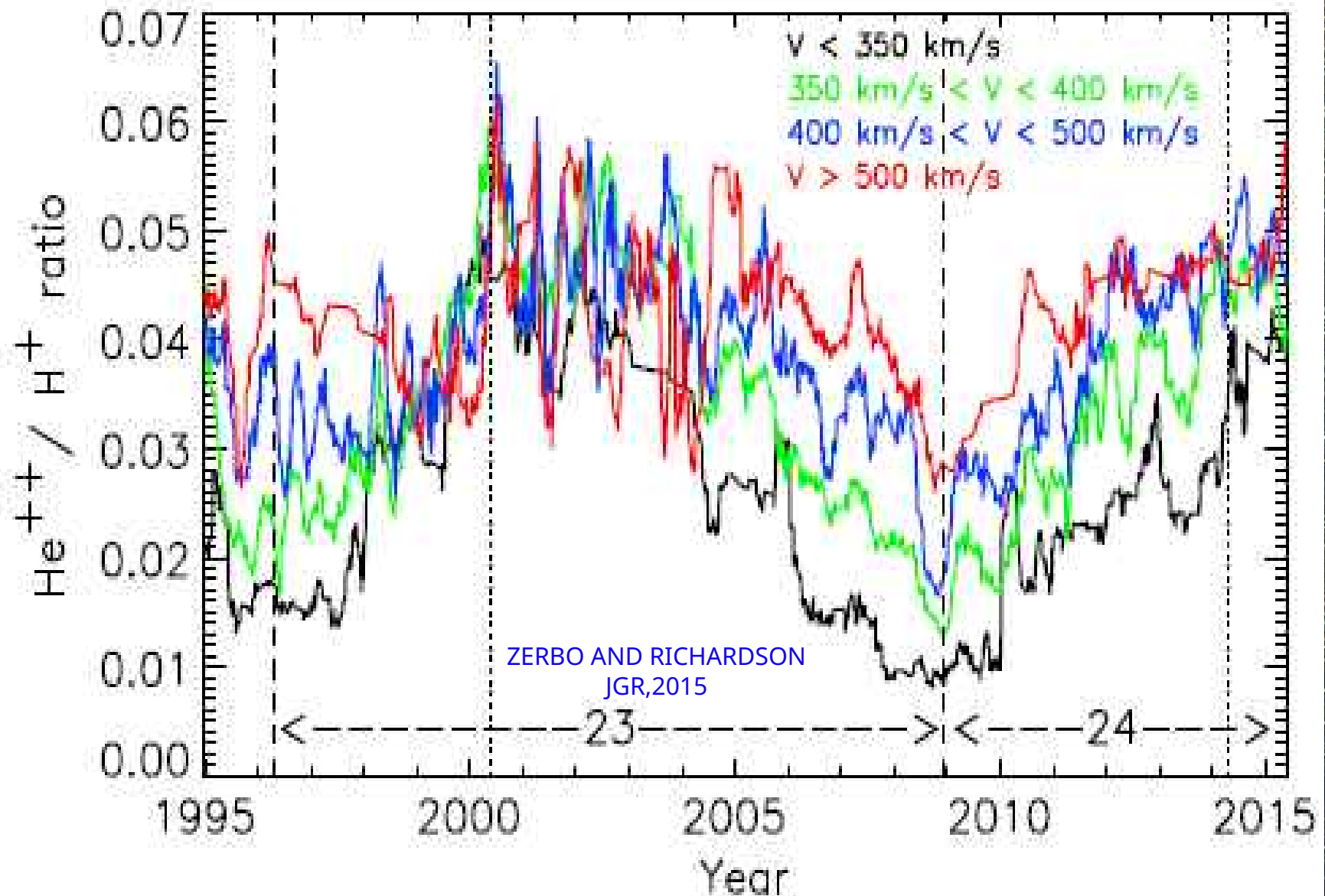
Les densités d'électrons (N) dans le plasma solaire sont historiquement bas au cours du Cycle 24, cependant leur schéma de distribution dans ce cycle reste similaire à celui des cycles précédents



L'intensité du champ magnétique solaire (B) est historiquement bas au cours du Cycle 24, cependant son schéma de distribution dans ce cycle reste similaire à celle des cycles précédents



Les paramètres du vent solaire (B, N, V, P) sont historiquement bas au cours du Cycle 24 , cependant le schéma de distribution du vent dans ce cycle reste similaire à celui des cycles précédents



$\text{He}^{++}/\text{H}^{+}$ est historiquement bas au cours du cycle 24 mais fonction de la vitesse du vent solaire. The $\text{He}^{++}/\text{H}^{+}$ ratio is at the acceleration region. The lower value, at a given speed, suggests an acceleration mechanism that for weaker wind produces a lower proportion of escaping He^{++}

[illegible]

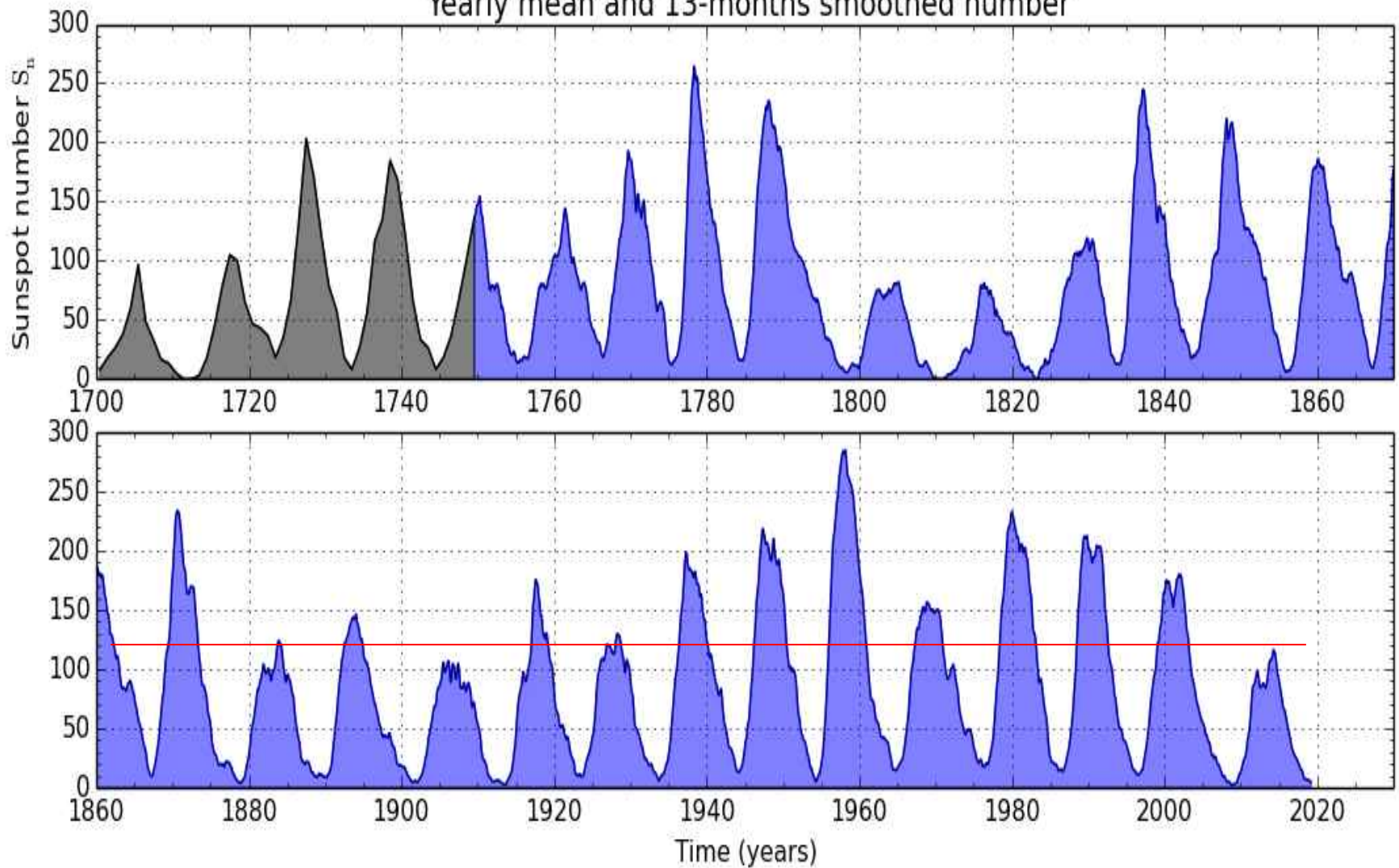
01-January	2009																										16		aa (nT)
02-January	10	21	10	11	7	5	7	13	11	3	2	11	13	13	9	6	6	19	9	9	5	5	4	8	29	9	5		
29-January	7	9	14	5	3	9	28	12	3	5	3	5	5	6	8	5	36	25	8	3	7	4	11	7	9	13	12		100
25-February	6	6	22	10	6	4	17	14	5	4	2	15	3	8	8	15	32	19	14	11	6	4	10	7	21	9	3		
24-March	16	17	10	11	5	5	8	5	6	3	4	4	7	5	5	13	28	17	21	12	7	4	8	9	10	15	9		60
20-April	6	6	7	3	11	8	5	6	4	7	4	5	7	4	6	4	13	15	21	12	6	8	3	4	14	4	8		
17-May	3	4	6	10	7	10	8	5	2	5	2	11	9	6	5	3	3	8	9	8	5	9	4	4	6	4	2		40
13-June	6	9	6	6	4	5	3	8	13	4	7	32	14	5	9	22	15	8	4	4	6	5	8	5	8	7	10		
10-July	14	6	5	18	13	7	3	2	3	2	11	7	39	13	9	7	5	7	6	4	8	9	7	5	11	7	11		30
06-August	22	13	5	12	6	5	6	6	4	3	3	4	4	16	22	16	9	8	3	5	6	12	4	2	37	9	6		
02-September	5	10	14	4	7	3	3	4	5	8	4	10	10	10	11	10	5	2	9	13	5	2	3	3	7	13	19		20
29-September	2	11	3	3	3	11	4	3	2	4	5	4	18	3	7	3	14	5	2	4	5	2	3	28	18	20	11		
26-October	7	6	6	11	16	5	8	8	3	3	2	3	3	18	6	3	2	3	4	13	12	4	3	5	5	5	18		10
22-November	9	2	18	13	14	4	7	3	3	2	3	2	2	9	6	7	2	2	3	2	8	7	12	3	10	7	7		
19-December	4	5	10	11	12	8	12	10	8	6	5	4	6																

[illegible]

01-Januar	2009																											461		V (km/s)
02-Januar	422	512	461	420	370	325	314	365	378	345	310	316	332	341	380	350	351	433	435	409	354	311	302	289	350	367	358			
29-Januar	397	373	450	431	361	329	357	360	318	317	313	312	294	309	332	311	451	559	477	409	335	310	329	370	431	445	433		650	
25-Februa	419	398	560	560	439	361	348	362	363	361	339	398	379	325	334	358	497	548	503	425	381	345	309	329	404	418	392			
24-March	417	479	456	419	400	420	415	385	350	328	295	285	358	392	357	340	448	503	524	500	417	348	320	343	417	491	469		600	
20-April	445	430	393	362	386	409	385	360	340	329	323	312	310	343	362	342	380	450	488	482	412	395	346	312	346	356	362			
17-May	341	307	292	298	339	364	369	356	333	312	291	373	384	356	324	317	303	304	314	310	313	334	351	310	345	331	293		550	
13-June	287	316	308	311	301	302	315	316	332	301	270	328	474	429	398	386	514	489	420	375	358	344	346	341	339	324	322			
10-July	414	434	385	384	519	459	386	339	301	289	305	320	404	492	549	489	416	381	398	381	352	376	408	363	374	349	374		500	
06-August	455	471	472	428	369	345	354	339	318	294	273	288	329	354	488	513	504	473	384	335	359	368	358	338	412	433	387			
02-Septem	361	353	459	420	385	352	322	304	304	300	301	305	381	422	455	441	408	347	330	416	405	342	302	290	304	333	325		450	
29-Septem	319	343	342	336	325	355	381	339	290	277	291	265	374	382	351	336	366	399	330	308	308	293	282	341	383	386	416			
26-October	391	369	360	362	361	334	347	331	323	288	299	287	266	344	388	353	312	285	285	320	347	333	321	303	335	379	493		350	
22-Novem	509	413	388	434	399	350	342	331	296	266	274	256	256	274	387	343	312	292	275	268	278	270	271	286	310	359	411			
19-Decem	407	369	332	342	345	388	326	391	372	340	313	279	279																	

[illegible][illegible]

International sunspot number S_{ii} :
Yearly mean and 13-months smoothed number



SILSO graphics (<http://sidc.be/silso>) Royal Observatory of Belgium 2019 October 2

Données et méthodologies

Indice Kp : <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/>

Critères de classification des orages de Gosling (1991)

- Une tempête majeur a $8 \leq Kp \text{ max} \leq 9$
- Une grosse tempête a $7 \leq Kp \text{ max} \leq 7+$
- Une tempête modérée a $6- \leq Kp \text{ max} \leq 6+$
- Une petite tempête a $5- \leq Kp \text{ max} \leq 5+$.

Tailles des tempêtes NOAA “G” : http://www.swpc.noaa.gov/NOAA_scales/

G5 (extrême) : $Kp = 9$; G4 (sévère) : $Kp = 8$; G3 (forte) : atteint $Kp = 7$; G2 (modérée) a $Kp = 6$; et G1 (mineure) : $Kp = 5$.

Facteurs des orages géomagnétiques au cours des cycles solaires 23 et 24

Sur la période de 1996 à 2019, 878 orages géomagnétiques mineurs à extrêmes ont été recensés : 583 orages mineurs ; 191 orages modérés ; 76 fortes tempêtes ; 31 tempêtes violentes et 3 tempêtes extrêmes.

Identification des sources solaires :

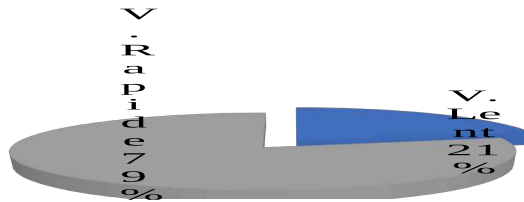
Caractéristiques des CME extraits du site :

https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/

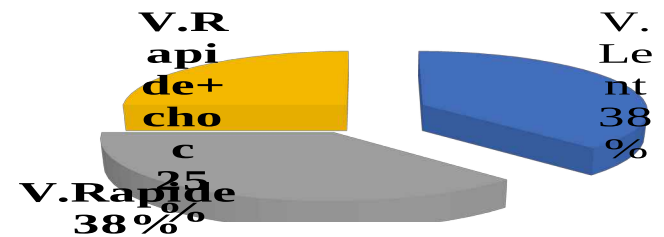
Classification des vents solaires : vent lent ($v \leq 450$ km/s) et vent rapide ($v > 450$ km/s) et nuages magnétiques.

Phase minimale du cycle solaire 23

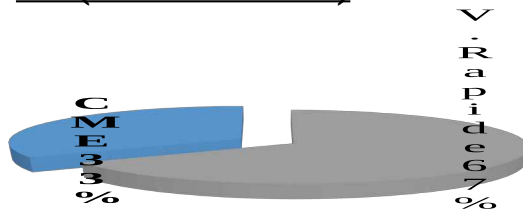
G1 (72 TEMPÊTES)



G2 (8 TEMPÊTES)



G3 (3 TEMPÊTES)

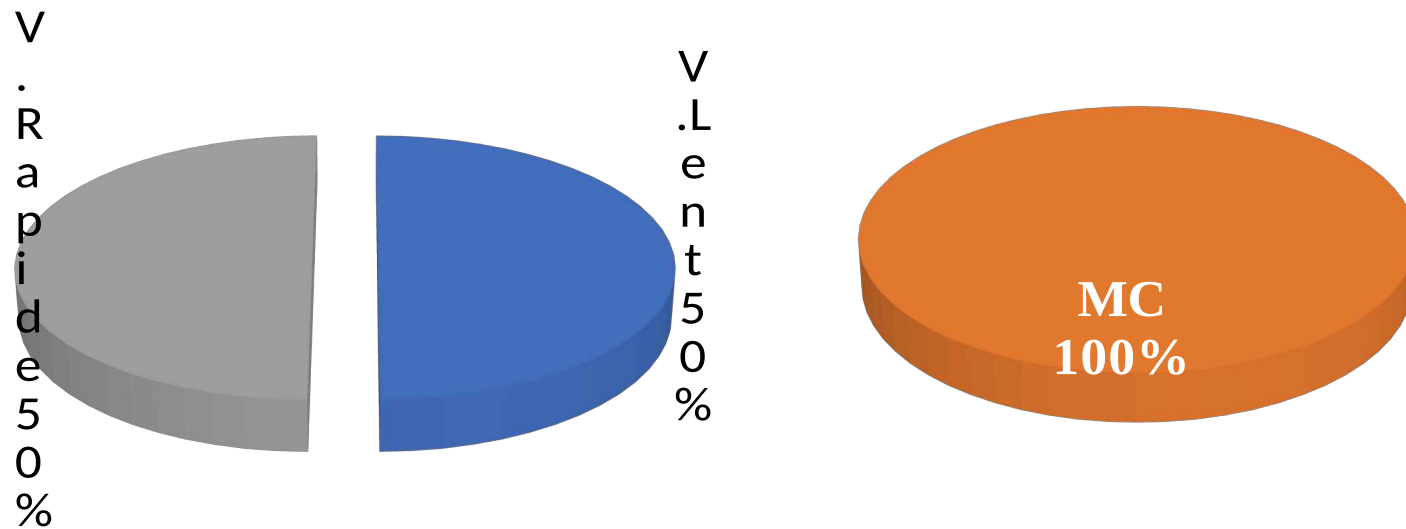


G4 (1 TEMPÊTE)



Résultats

Phase minimale du cycle solaire 24



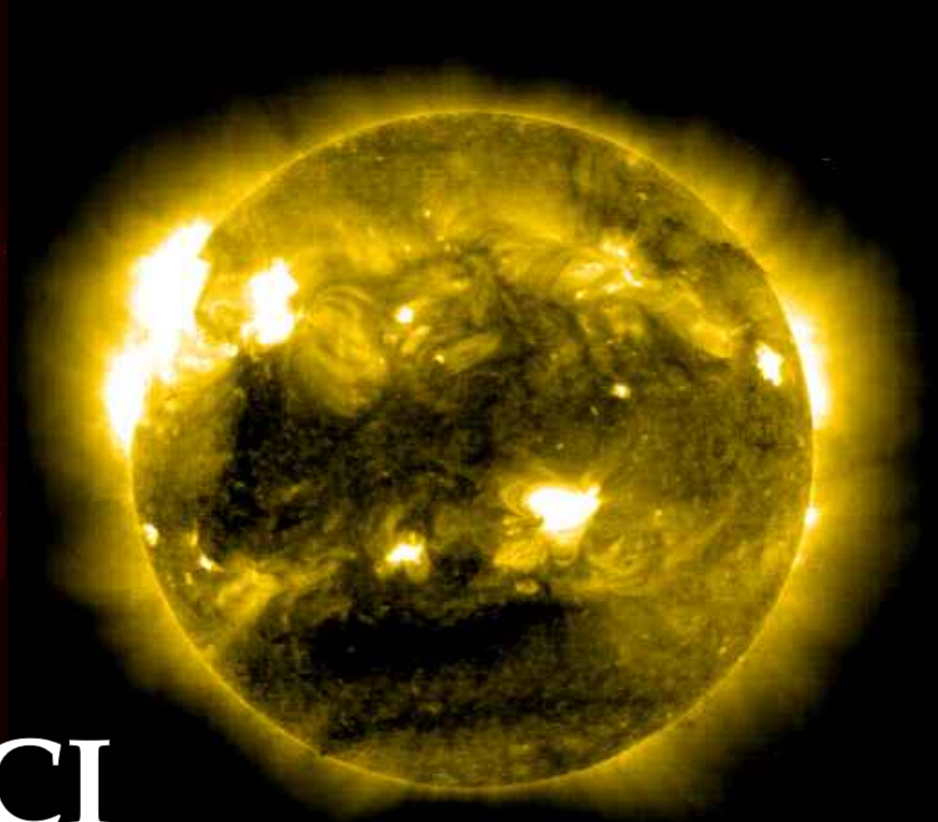
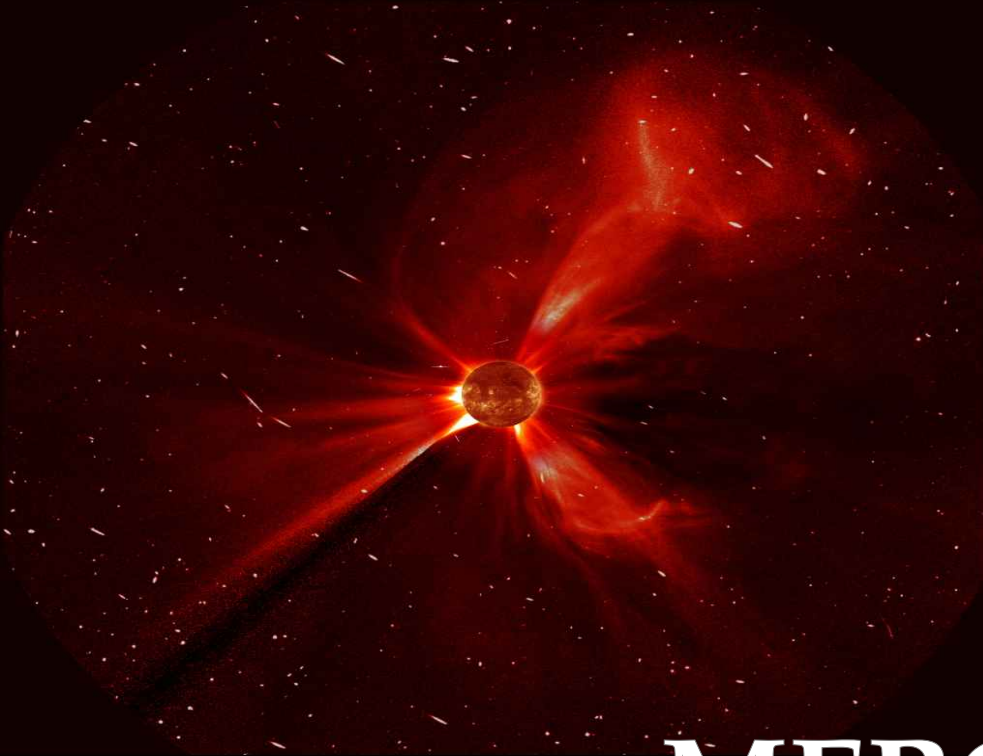
CONCLUSION

Le mécanisme d'accélération des particules du vent solaire, aussi varié soit-il se traduit par une pression dynamique qui ne change quasiment pas d'un cycle solaire à un autre. Le ratio $\text{He}^{++}/\text{H}^{+}$ (particule alpha) demeure une fonction du vent solaire. Le cycle 24 reste un cycle de faible activité solaire.

- QA $aa < 20 \text{ nT}$: calme magnétique
- RA $aa > 20 \text{ nT}$: évènements récurrents
- SA $aa > 20 \text{ nT}$: évènements de chocs
- UA $aa > 20 \text{ nT}$: fluctuations

Classification à 80%
Par Zerbo et al,
2012

- ❖ Une baisse significative de l'intensité des paramètres du vent solaire au cours de la dernière décennie et faisant penser à un ralentissement des processus de la dynamo solaire.
- ❖ Un comportement cyclique des phénomènes solaires et des longs minimas solaires : période d'environ 100 ans pour l'occurrence des longs minimas.
- ❖ Une compression de la magnétosphère pendant les périodes d'intense activité solaire et une dilatation pendant les périodes d'activité calme.



MERCI



Bibliographie

1. Mayaud PN(1971). Une mesure planétaire d'activité magnétique basée sur deux observatoires antipodaux. *Ann. Geophys.*, 27, p.71.
2. Mayaud PN (1972). The aa indices: a 100-year series characterizing the magnetic activity. *J. Geophys. Res.*,77, 6870–6874..
3. Mayaud P N (1973). A hundred series of geomagnetic data, 1868-1967. *IAGA Bull.*33, Zurich, p.251.
4. Svalgaard L (1977). Geomagnetic activity: dependence on solar wind parameters: Coronal holes and high speed wind streams. Edited by: Zirker, J. B., *Colorado Ass. Univ. Press*, Boulder, pp. 371–432.
5. Legrand JP and Simon PA (1989). Solar cycle and geomagnetic activity: A review for geophysicists. Part I. The contributions to geomagnetic activity of shock waves and of the solar wind. *Ann. Geophys.*, 7, (6), 565-578.
6. Richardson IG, Cliver EW and Cane HV (2000).. Sources of geomagnetic activity over the solar cycle: Relative importance of coronal mass ejections, high-speed streams, and slow solar wind. *J. Geophys. Res.*, vol. 105, NO. A8, pp. 200-213

Bibliographie

7. Wu, C.C., Lepping, R.P. and Gopalswamy, N (2006). Relationships Among Magnetic Clouds, CMES, and Geomagnetic Storms. Solar Physics 239: 449. <https://doi.org/10.1007/s11207-006-0037-1>
8. Ouattara, F. and Amory-Mazaudier, C (2009). Solar-geomagnetic activity and Aa indices toward a Standard classification. J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 71, 1736–1748.
9. Zerbo, J.L., Ouattara, F., Amory Mazaudier, C., Legrand, J-P., Richardson, J.D (2013). Solar activity, solar wind, and geomagnetic signatures. Atmospheric and Climate Sciences, vol.3, No 4, pp. 610-617
10. Zerbo, J.-L., Amory-Mazaudier, C., Ouattara, F (2013). Geomagnetism during solar cycle 23: Characteristics Journal of Advanced Research, vol 4, Issue 3, pp 265-274 doi:10.1016/j.jare.2013.08.010
11. Zerbo J-L., C. Amory-Mazaudier, F. Ouattara, J.D. Richardson (2012). Solar wind and geomagnetism, toward a standard classification 1868-2009. Annales Geophysicae. 30, pp.421-426, 2012.
12. Zerbo, J-L., and J.D. Richardson (2015). The Solar wind during current and past solar minima and maxima" Journal of Geophysical Research-Space Physics