

## LES THEMES DE SCIENCE-CLIMAT-ENERGIE

SCE a vu le jour en juin 2018 sous l'impulsion de plusieurs professeurs d'universités européennes. Plus de 250 articles ont été publiés après examen par un Comité Editorial. Les articles sont repris dans une liste des auteurs ([ici](#)) et permettent un dialogue entre lecteurs et auteurs ou lecteurs entre eux, à travers une rubrique 'commentaires' dont les règles ont été fixées ([ici](#)).

Au terme de ces 5 ans, nous avons décidé de regrouper les articles sous forme de .pdf reprenant chaque fois un thème précis. Cela permet de disposer pour tout lecteur d'un document complet sur un sujet précis, plutôt que de devoir aller chercher les articles un à un sur une période de près de 5 ans. Une sélection des articles les plus représentatifs a été opérée afin de couvrir au mieux chaque thème.

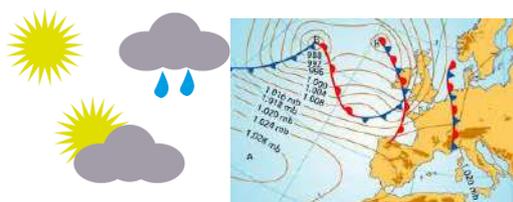
Nous publierons au fur et à mesure ces documents reprenant les articles spécifiques.

Le présent document intitulé **LA METEOROLOGIE** reprend des articles sélectionnés couvrant la période août 2020 à juin 2023.

Nous espérons que ces documents seront utiles et diffusés à grande échelle.

## LA METEOROLOGIE

1. Le 20<sup>ème</sup> siècle a été anormalement chaud mais le 21<sup>ème</sup> siècle revient à la normale (1/2), J. Van Vliet, p.2-10
2. Le 20<sup>ème</sup> siècle a été anormalement chaud mais le 21<sup>ème</sup> siècle revient à la normale (2/2), J. Van Vliet, p.10-17
3. Déluge et changement climatique (1/2), B. Van Vliet, p.17-32
4. Déluge et changement climatique (2/2), B. Van Vliet B. Van Vliet-Lanoë, p.32-46
5. La fin du réchauffement .... Pas de changement climatique, B. Van Vliet-Lanoë,, p.46-50
6. Changements météorologiques et changement climatique : un refroidissement en marche sur l'Atlantique Nord (1/2), B. Van Vliet-Lanoë et J. Van Vliet, p.50-62
7. Les Anticyclones Mobiles ou AMP, mécanismes logiques de forçage de la météo (2/2), B. Van Vliet-Lanoë et J. Van Vliet, p.62-77
8. Le vortex saisonnier stratosphérique polaire et son impact sur la météo, B. Van Vliet-Lanoë, p.77-93



## 1. Le 20<sup>ème</sup> siècle a été anormalement chaud mais le 21<sup>ème</sup> siècle revient à la normale (1/2)

Mis en ligne SCE : 14.08.2020

### 1.1 Introduction

Suite à la prise de conscience à la fin du 20<sup>ème</sup> siècle d'une hausse inhabituelle des températures terrestres, des chercheurs américains ont développé une théorie du réchauffement global basé sur l'effet de serre dû au CO<sub>2</sub> [1], en soulignant la responsabilité possible de l'homme dans le réchauffement observé: la poursuite des émissions de CO<sub>2</sub> conduirait à une éventuelle catastrophe planétaire. Ces chercheurs ont présenté leur théorie au Congrès américain [2] et aux médias. Le monde politique international a réagi rapidement à cet alarmisme [3] en permettant à l'Assemblée Générale de l'ONU de décembre 1988 d'approuver la mise en place du GIEC [4].

Depuis plus de trente ans et malgré le manque persistant de preuve formelle, la peur du réchauffement global anthropique causé par le CO<sub>2</sub> est propagée sans relâche par l'ONU et ses satellites PNUE, GIEC et OMM relayés par les ONG environnementales et les médias, suivis plus récemment par une fraction du monde académique occidental. Une puissante industrie des énergies renouvelables a été créée via des subsides et des certificats verts quitte à doubler ou tripler le prix de l'électricité. Cette industrie est prête à exploiter les nouvelles aubaines financières annoncées par l'Accord de Paris et le Green Deal de l'UE. Dans un tel contexte, le but avoué est que l'humanité change radicalement son comportement, fût-ce au prix d'une dictature environnementale: l'alarmisme médiatique est maximal, et même les enfants sont embrigadés dans le débat pour soi-disant « sauver la planète ».

Cette tentative rampante de prise du pouvoir a cependant buté contre un obstacle imprévu depuis le début de 2020, à savoir la pandémie du Coronavirus: le lockdown sanitaire a montré que la société pouvait changer son comportement de manière spectaculaire, mais au prix de conséquences économiques et sociales majeures. A la première attaque de la pandémie succède aujourd'hui une deuxième vague et il semble impossible de prévoir quand nous serons délivrés du virus.

Les ressources des Etats n'étant pas infinies, la question brûlante se pose aujourd'hui de l'affectation des moyens humains et financiers disponibles en fonction nos priorités: devons-nous avoir davantage peur d'une pandémie et de ses conséquences sociales et économiques incontestables ou devons-nous supputer une explosion incontrôlable de la crise climatique amorcée au 20<sup>ème</sup> siècle et modifiant de manière drastique et irréversible notre environnement ?

Le but du présent article est d'apporter des éléments de réponse à cette question en examinant, dans une perspective scientifique large et basée sur les observations plutôt que sur les modèles, la « crise climatique » démarrée durant la seconde moitié du 20<sup>ème</sup> siècle en essayant de tirer des conclusions applicables au 21<sup>ème</sup> siècle.

## 1.2. La crise 'climatique du 20<sup>ème</sup> siècle

Il existe de nombreuses sources fournissant des historiques de température, mais il existe peu de séries chronologiques comparables à celle de l'Observatoire d'Armagh en Irlande du Nord pour la période 1796-2002 [5]; cette série est disponible sur le site web du Met Office britannique pour la période allant de 2002 à aujourd'hui [6]. Situé à une cinquantaine de kilomètres au sud-ouest de Belfast, le site d'Armagh présente des caractéristiques favorables: des écarts modestes de températures diurnes et annuelles, une exposition à l'Atlantique représentative d'une surface importante, l'absence d'effet d'îlot urbain et des instruments de mesure qui n'ont pas bougé depuis plus de deux siècles. Il s'agit donc d'une série particulièrement soignée d'une véritable température locale, avec un minimum de corrections.

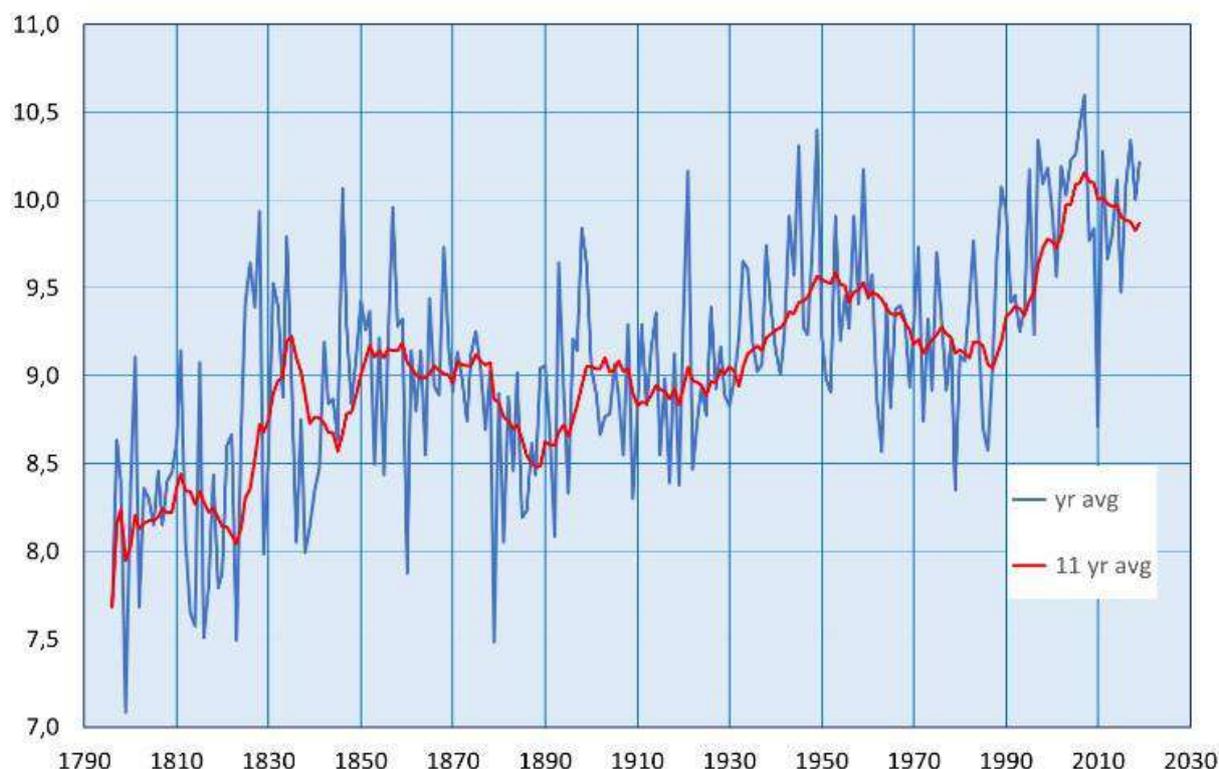


Figure 1 : Evolution des températures moyennes annuelles de 1796 à 2019 (courbe bleue) ainsi qu'une courbe lissée correspondant à la moyenne glissante rétrospective sur une période de 11 ans (courbe rouge).

**Cette évolution (Fig. 1) peut être décrite de manière sommaire comme suit:** à la fin du Minimum de Dalton, à partir de 1823, les températures augmentent rapidement de 2,4°C en 5 ans (ou de 1,2°C en 12 ans selon les valeurs lissées) et se stabilisent autour de 9°C jusqu'en 1930, à l'exception d'une baisse de température vers 1890; la première moitié du 20<sup>ème</sup> siècle est caractérisée par une montée de 0,5°C selon les valeurs lissées; elle est suivie d'une baisse de température allant de 1950 à 1979; la deuxième moitié du siècle connaît à partir de 1979 une augmentation de 2,2°C jusqu'en 2007 (ou de 1,1°C à partir de 1987 sur base des valeurs lissées): c'est cette période qui a motivé la mise en place du GIEC. La période suivante 2007-2019 est marquée par une légère diminution des températures lissées de l'ordre de 0,2 °C: cette période est évoquée dans la littérature climatique actuelle sous le vocable de « pause ou hiatus de température » [7].

L'évolution de la température lissée confirme le caractère marqué de la montée de température amorcée en 1823. La vitesse d'augmentation observée à partir de 1823 lui est cependant sensiblement supérieure avec pour les courbes lissées 0,10°C par an à partir de 1823 contre 0,06°C

par an à partir de 1987. Ces montées de température restent cependant modestes en regard de celles observées lors des cycles de Dansgaard-Oeschger [39] et qui sont typiquement de 8°C en 40 ans ou 0,20°C par an.

**En conclusion, l'augmentation de température de la seconde moitié du 20<sup>ème</sup> siècle n'a rien de réellement exceptionnel. Le terme de « crise climatique » paraît donc exagéré.**

Pour tenter de comprendre cette évolution de température, il est utile d'examiner l'influence de 3 facteurs différents, à savoir les températures océaniques, l'effet de serre et l'activité solaire.

### 1.3 Les températures océaniques

Les climats tempérés de l'Europe occidentale et du Nord-Ouest de l'Amérique sont influencés par les températures de surface des océans adjacents: ces températures de surface sont caractérisées sur le long terme [8] par des fluctuations de type oscillatoire aussi bien pour l'Atlantique (AMO ou Atlantic Multidecadal Oscillation) que pour le Pacifique (PDO ou Pacific Decadal Oscillation). Nous nous limiterons ici à l'oscillation AMO [9] représentative de l'Atlantique Nord et quantifiée par l'indice AMO.

Cet indice AMO est calculé comme suit: au départ de la base de donnée Kaplan des températures de surface (SST) de NOAA [10], une température moyenne de surface est calculée entre 0° et 70° de latitude nord; la tendance temporelle ou « trend » de la série de température est éliminée, le plus souvent en supposant une variation linéaire en fonction du temps. En lissant la série « détrendée », on obtient le graphique de la Figure 2 pour la période 1856-2019:

L'oscillation AMO a une période comprise entre 60 et 70 ans. Le graphique montre que le dernier minimum de l'indice AMO a été atteint vers 1975 [11] et que depuis cette date, les températures moyennes de l'Atlantique Nord n'ont fait que monter pour atteindre un maximum entre 2005 et 2015: la période 1975-2010 correspond précisément à la dernière montée de température observée sur le site d'Armagh (voir Figure 1). **Quant au mécanisme physique à la base de la période de 60-70 ans de l'AMO, il n'a pas été identifié à ce jour, même s'il a été établi [12] que sa périodicité n'est pas corrélée à celle du cycle solaire de 88 ans de Gleissberg.**

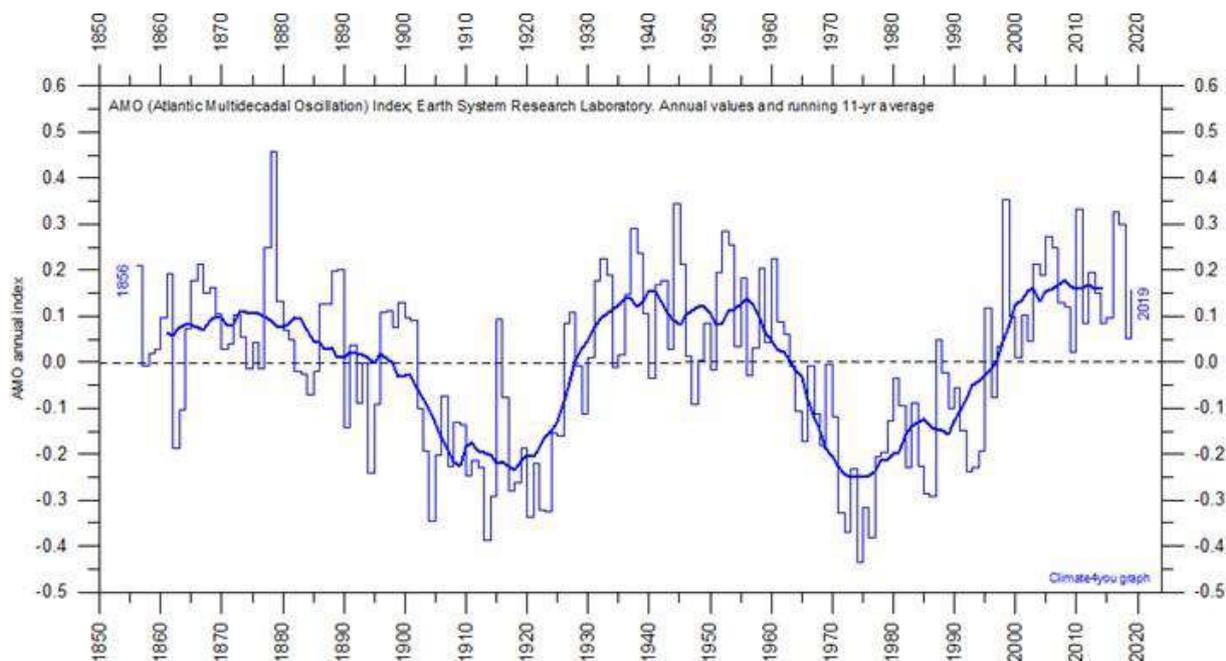


Figure 2 : Indice AMO pour la période 1856-2019 d'après [www.climate4you.com](http://www.climate4you.com) [13]

Les températures annuelles moyennes (c'est-à-dire non « détrendées ») calculées pour la surface de l'Atlantique Nord sont données à la Figure 3 (courbe bleue): elles montrent une augmentation de 0,5 à 0,6°C entre 1975 et 2010. Ces températures sont comparées à une courbe bipériodique (courbe rouge) de la forme:

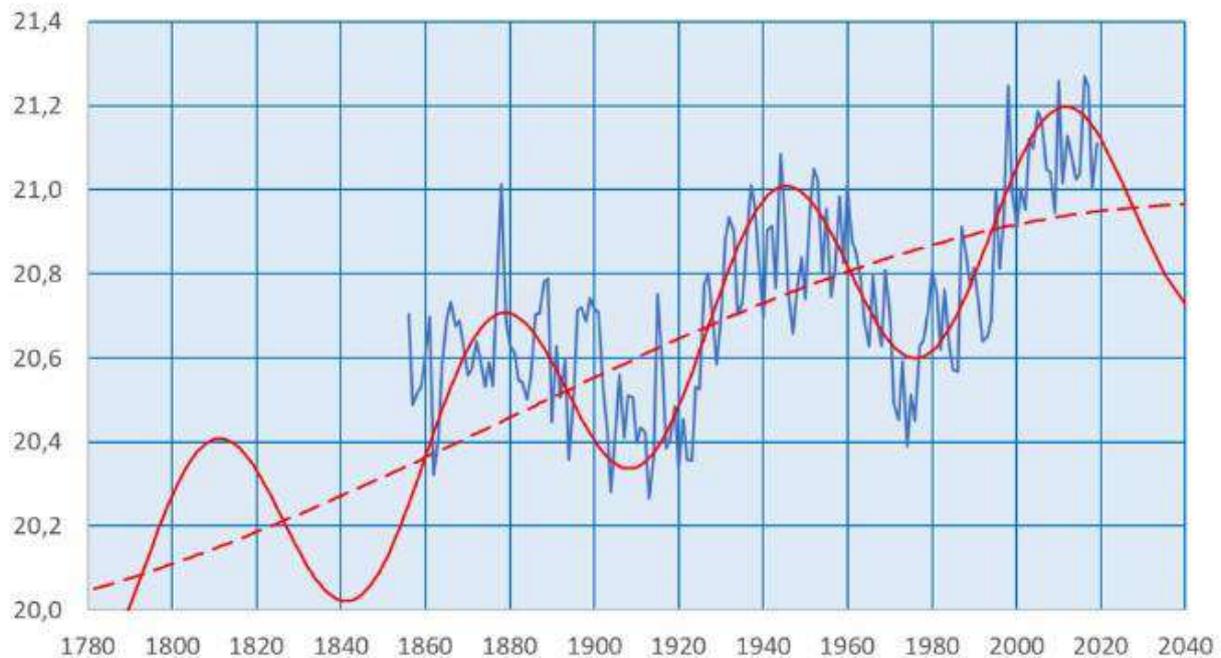
$$T = T_0 + \Delta_{AMO} \cos 2\pi \frac{y - y_{AMO}}{P_{AMO}} + \Delta_{trend} \cos 2\pi \frac{y - y_{trend}}{P_{trend}}$$

où 'y' est l'année du calendrier moderne, avec pour les différents paramètres d'ajustement les valeurs suivantes:

paramètre	valeur
$T_0$	20,46 °C
$\Delta_{AMO}$	0,26 °C
$P_{AMO}$	67 ans
$y_{AMO}$	2011
$\Delta_{trend}$	0,51°C
$P_{trend}$	670 ans
$y_{trend}$	2047

La courbe bipériodique se justifie parce qu'elle permet de mettre en évidence la périodicité et l'amplitude des variations de températures en distinguant l'AMO multidécadale de la tendance

**multiséculaire (courbe rouge en pointillé sur la Fig. 3).** La période AMO de 67 ans est relativement précise: on note que cette période est pratiquement le triple de celle du cycle solaire de Hale de 22 ans. Par contre, la période de la tendance est beaucoup plus longue et moins précise [14]: son ordre de grandeur de 670 ans est intéressant puisqu'il conduirait à un maximum de la tendance en 2047, le dernier minimum de la tendance étant prédit pour l'année  $2047-335=1712$ , date qui est proche de celle du Minimum de Maunder. Il faut signaler que ce dernier Minimum a été également caractérisé par des températures océaniques basses dans l'Atlantique Nord avec un déplacement méridional de la banquise [15] qui a conduit à l'extinction des colonies Viking du Groenland dans les années 1400



Pour ce qui concerne les variations quantitatives des températures, on retiendra des valeurs des paramètres que l'écart entre le maximum et le minimum de l'AMO est de l'ordre de 0,5 °C. Cette valeur est inférieure à l'augmentation de 1,1°C observée à Armagh entre 1980 et 2007 (voir Fig. 1).

Si les variations des températures océaniques permettent d'expliquer une augmentation de 0,5°C sur cette période, elles n'expliquent que moins de la moitié de l'augmentation observée. Pour expliquer cette dernière, une autre contribution doit être identifiée.

#### 1.4 La contribution de l'effet de serre

A côté de l'effet de serre classique lié à l'existence d'une enceinte, les théoriciens du réchauffement climatique du GIEC ont introduit ce qu'on peut appeler l'effet de serre atmosphérique présent dans un milieu non cloisonné et ouvert comme l'atmosphère terrestre. Il peut être défini comme suit:

*L'effet de serre est un phénomène radiatif causé par des gaz tels la vapeur d'eau ou le CO<sub>2</sub> qui absorbent une fraction du rayonnement infrarouge émis par la Terre et le réémettent ensuite dans toutes les directions et notamment vers la surface terrestre dont la température serait, de ce fait, plus élevée qu'en l'absence de gaz absorbant l'infrarouge. Ces gaz sont dès lors qualifiés de gaz « à effet de serre ».*

Cette définition est tirée du rapport WG1-AR4 de 2007 [16] préparé par le GIEC. Le raisonnement est que l'effet de serre se renforcerait suite à l'augmentation de la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère terrestre ce qui expliquerait l'augmentation des températures terrestres observées à partir de 1980. Mais l'effet de serre est physiquement complexe et le diable se cache dans les détails.

Suivant les idées développées par G. Geuskens [17], il est important d'examiner les bases de l'effet de serre aussi bien sous l'angle de la physique atomique et moléculaire que sous l'angle de la physique statistique. L'absorption de rayonnement infrarouge par les gaz à effet de serre (GES) conduit à l'excitation des mouvements de vibration des molécules de ces gaz; dans la troposphère, soit entre 0 et 10 à 18 km d'altitude, ces molécules de GES sont par ailleurs soumises à un nombre très élevé de collisions.

Alors que les énergies des niveaux de vibration sont quantifiées [18], les énergies cinétiques de translation ne le sont pas. Pour avoir un effet de serre, il faut que la molécule de GES puisse se désexciter et revenir sur son niveau fondamental par l'émission d'un photon: on parle de fluorescence. Mais il suffira d'une collision inélastique (sans conservation de l'énergie de translation) pour rendre cette transition impossible.

**Pour être effectif, l'effet de serre requiert donc que le temps séparant deux collisions inélastiques soit plus long que le temps nécessaire à l'émission du photon par la molécule de GES. C'est une condition extrêmement forte.**

A la surface de la Terre, la fréquence des collisions dans le gaz atmosphérique peut être estimée [19] de l'ordre de  $2 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}$ . Pour une fraction de collisions inélastiques de 0,001% [17], la fréquence  $f$  des collisions correspondante se réduit à  $2 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$ . Les temps d'émission de photons de longueurs d'onde de 13,9 à 15  $\mu\text{m}$  par la molécule de CO<sub>2</sub> sont fournis par Smirnov [20] et sont dans la fourchette 0,32 – 0,83 s. Le produit  $f$  est donc voisin de 10.000 à la surface de la Terre en restant supérieur à plusieurs dizaines au niveau de la tropopause. Pour que ce produit devienne nettement inférieur à l'unité et que l'effet de serre du CO<sub>2</sub> devienne significatif, il est nécessaire de monter dans l'atmosphère nettement plus haut que la troposphère.

Cette conclusion est confirmée par la température très basse d'émission infrarouge descendante (« downwelling infrared radiance ») observée au sol par ciel clair [21], à savoir 160 K ou -110 °C pour la fenêtre d'émission du CO<sub>2</sub> (longueurs d'onde comprises entre 8 et 15  $\mu\text{m}$  ou 700 – 1200  $\text{cm}^{-1}$ ): cette température très basse est représentative d'une altitude située dans la mésosphère (de l'ordre de 100 km).

**Dans ces conditions, force est de constater que l'effet de serre dû au CO<sub>2</sub> n'existe pas dans la basse atmosphère terrestre, alors qu'il existe à très haute altitude où il contribue à refroidir l'atmosphère.**

### 1.5 L'impact de l'activité solaire sur les températures

Pour des raisons encore inexpliquées, le Soleil est le siège de phénomènes cycliques récurrents, avec des périodes variant de 9 à 14 ans pour une moyenne de 11 ans: ces phénomènes traduisent ce qu'on appelle globalement l'activité solaire. Cette activité revêt des aspects multiples, le plus connu étant l'apparition temporaire de taches à la surface du Soleil, observées par les astronomes chinois de la dynastie Shang il y a plus de 2.000 ans et étudiées de manière systématique par Galilée et Scheiner en 1610. Une autre manifestation spectaculaire de l'activité solaire réside dans les aurores

polaires observées et reprises depuis des temps immémoriaux par les légendes des populations des hautes latitudes. Les tempêtes solaires et géomagnétiques sont connues depuis l'ère du télégraphe, avec la célèbre éruption solaire observée par Richard Carrington en 1859. Le magnétisme des taches solaires a été découvert par Georges Hale en 1908. Les variations de luminance et de vent solaire nécessitent des sondes spatiales et n'ont donc pu être observées que depuis l'ère des satellites. Les années 2019 et 2020 sont marquées par l'arrivée des premières sondes dans le voisinage immédiat du Soleil, à savoir la sonde américaine (Parker Solar Probe, NASA) et la sonde européenne (Solar Orbiter, ESA). L'activité solaire est donc un domaine de recherche scientifique intense et où beaucoup reste à découvrir.

**Deux théories sont développées aujourd'hui pour expliquer l'activité solaire: elle serait provoquée soit par des phénomènes magnétiques et l'effet dynamo [22] au sein du Soleil, soit par des forces gravitationnelles résultant de la dynamique du cortège planétaire [23].** Les effets magnétiques ou gravitationnels engendrent, s'ils sont suffisamment intenses, l'apparition des taches solaires. Ces mêmes effets sont d'autre part à la base des nano-éruptions ou « nanoflares » imaginées par Eugen Parker [24] et dont l'existence vient d'être confirmée par la sonde ESA Solar Orbiter [25]: ces nanoflares pourraient être responsables du chauffage de la couronne solaire et de l'émission du vent solaire et du flux de protons qui l'accompagne.

**Parmi les multiples phénomènes qui accompagnent les cycles solaires, seuls deux transportent de l'énergie vers la Terre et sont donc susceptibles d'avoir un impact sur les températures terrestres: le flux radiatif appelé luminance solaire et le flux corpusculaire appelé vent solaire.**

Au voisinage de l'orbite de la Terre autour du Soleil, la luminance totale en provenance du Soleil est voisine de  $1365 \text{ W/m}^2$  : le spectre du rayonnement est voisin de celui d'un corps noir à  $5800 \text{ K}$ , avec un maximum de luminance pour la longueur d'onde de  $0,5 \mu\text{m}$ . Au cours d'un cycle solaire, cette luminance augmente légèrement avec le nombre de taches solaires, puis diminue. Cette variation se concentre dans la partie dure du spectre (principalement dans le domaine ultraviolet): la variation de luminance totale ne dépasse par  $0,2\%$  soit moins de  $3 \text{ W/m}^2$ . Dans ces conditions, la luminance totale ne semble pas à même d'expliquer l'amplitude des fluctuations de température observées [26].

**En excluant les variations des paramètres orbitaux de la Terre qui affectent à long terme la luminance et dont l'influence est démontrée à travers les paléoclimats [27], nous arrivons par élimination à la conclusion que le flux corpusculaire est le seul processus solaire susceptible d'influencer les températures terrestres à une échelle de temps de l'ordre de 10 ans.** Ce point de vue a été présenté en 2019 par l'auteur [28] pour expliquer les fortes vagues de chaleur observées aux hautes latitudes en 2018 et 2019 dans le courant du cycle solaire 24.

Le mécanisme physique proposé est basé sur la capacité du flux quasi-statique de protons (c'est-à-dire la composante du vent solaire variant suffisamment lentement dans le temps) de pénétrer le champ magnétique terrestre et de déposer l'énergie cinétique des protons par Bremstrahlung dans la haute atmosphère terrestre.

Le flux de protons croissant puis décroissant au cours d'un cycle solaire, la déposition d'énergie dans l'atmosphère terrestre varie de la même façon. On peut concevoir que, durant la dernière partie toujours calme d'un cycle solaire suffisamment long, le flux de protons devienne faible au point de ne plus influencer les températures: ceci reviendrait à avoir une corrélation entre la longueur du cycle solaire et la température terrestre correspondante. Or, une telle corrélation a été mise en évidence par Friis-Christensen et Lassen [29] en 1991 et confirmée en 1996 par Butler et Johnston [30], ces derniers arrivant au résultat très simple:

$$T_{\text{Armagh}} = 14,45 - 0,5 L_{\text{SC}}$$

$T_{\text{Armagh}}$  désignant la température moyenne annuelle du site d'observation en °C et désignant la longueur du cycle solaire en années. Avec cette corrélation, un cycle long de 14 ans aurait une température moyenne inférieure de 2,5°C à celle d'un cycle court de 9 ans: un tel écart est très important.

Pour illustrer l'effet des cycles solaires sur les températures, la Figure 4 présente en bleu l'historique de température de la Figure 1, mais en visualisant en rouge les températures moyennes observées pour les cycles solaires 5 à 24: on observe une relation étroite entre augmentation ou diminution de la température et passage d'un cycle solaire au cycle suivant.

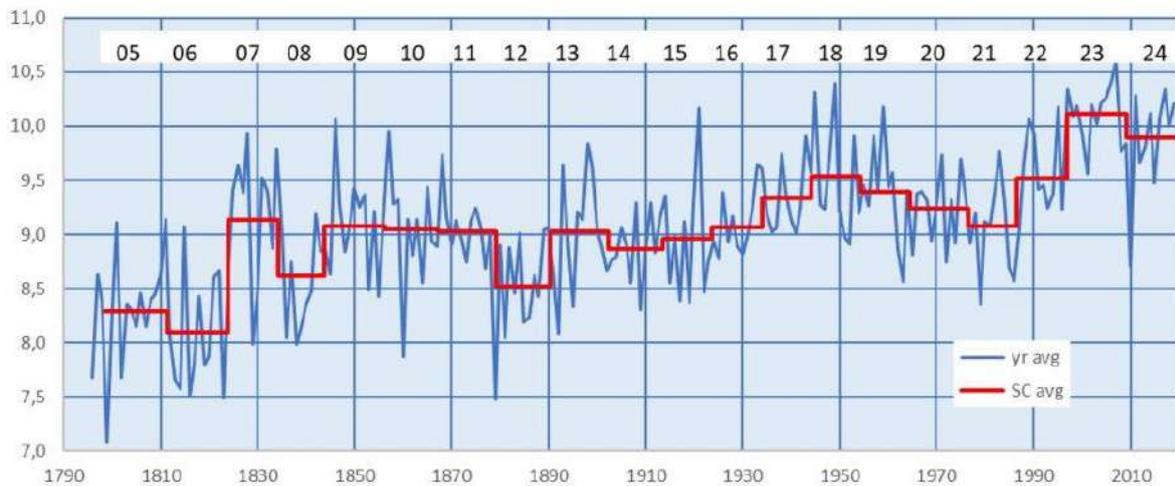


Figure 4 : Observatoire d'Armagh – Evolution des températures (°C) de 1796 à 2019.

On peut donc conclure à l'influence de la longueur des cycles solaires sur les températures terrestres.

Note : Dans le présent article d'opinion, l'auteur donne librement ses idées, de manière complètement indépendante et sans aucun conflit d'intérêts sur des questions d'intérêt universel, avec comme seul but l'avancement de l'humanité et de la science.

Il remercie le Comité Editorial de Science, Climat & Energie pour les conseils et commentaires utiles. Pour contacter l'auteur, merci d'envoyer votre message à [info@science-climat-energie.be](mailto:info@science-climat-energie.be)

#### Liste des références

- [1] Hansen et al., Climate Impact of Increasing Atmospheric Carbon Dioxide, Science, 231 (1981), pp 957-966, <https://science.sciencemag.org/content/213/4511/957.abstract>
- [2] audition J. Hansen, [https://pulitzercenter.org/sites/default/files/june\\_23\\_1988\\_senate\\_hearing\\_1.pdf](https://pulitzercenter.org/sites/default/files/june_23_1988_senate_hearing_1.pdf)
- [3] Il faut rappeler que cette période était celle de plusieurs grands changements: fin de la guerre froide, disparition de l'URSS, réunification de l'Allemagne, fermeture des mines de charbon britanniques; les USA étaient la seule superpuissance et les pays BRIC n'avaient pas leur influence actuelle.
- [4] Résolution 43/53 de l'Assemblée Générale de l'ONU du 6 décembre 1988
- [5] C.J. Butler et al., Air temperatures at Armagh Observatory, Northern Ireland, from 1796 to 2002, Int. J. Climatology 2005, <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.1148>

- [6] <https://www.metoffice.gov.uk/pub/data/weather/uk/climate/stationdata/armaghdata.txt>
- [7] [https://en.wikipedia.org/wiki/Global\\_warming\\_hiatus](https://en.wikipedia.org/wiki/Global_warming_hiatus)
- [8] sur le plus court terme, il faut mentionner la NAO ou Northern Atlantic Oscillation
- [9] [https://en.wikipedia.org/wiki/Atlantic\\_multidecadal\\_oscillation](https://en.wikipedia.org/wiki/Atlantic_multidecadal_oscillation)
- [10] <https://psl.noaa.gov/data/timeseries/AMO/>
- [11] pour rappel, la banquise a été observée sur la côte belge durant l'hiver 1962-1963.
- [12] M.F. Knudsen et al., Tracking the Atlantic Multidecadal Oscillation through the last 8,000 years, *Nature Communications* (2011), DOI: 10.1038/ncomms1186
- [13] d'après [www.climate4you.com](http://www.climate4you.com)
- [14] il ne saurait en être autrement puisque l'intervalle entre 2019 et 1856 n'est que de 163 ans
- [15] N.-A. Mörrner et al., Changes in Barents Sea Ice Edge Positions in the Last 440 years: A Review of Possible Driving Forces, *Int. J. Astr.* (2020) 10, pp 97-164
- [16] Le Treut, H., R. Somerville, U. Cubasch, Y. Ding, C. Mauritzen, A. Mokssit, T. Peterson and M. Prather, 2007: Historical Overview of Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [17] G. Geuskens, <http://www.science-climat-energie.be/2018/08/06/le-co2-et-le-climat-avec-et-sans-effet-de-serre/>
- [18] les niveaux d'énergie quantifiés ou discrets correspondent à des raies d'absorption ou d'émission
- [19] voir calculateur: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Kinetic/frecol.html>
- [20] B.M. Smirnov, Collision and radiative processes in emission of atmospheric carbon dioxide, *J. Phys. D: Appl. Phys.* (2018) 51214004
- [21] [https://www2.meteo.uni-bonn.de/projekte/SPPMeteo/wiki/lib/exe/fetch.php?id=cops\\_2a&cache=cache&media=cops\\_summer\\_school.turner\\_hsr\\_infrared.notes.pdf](https://www2.meteo.uni-bonn.de/projekte/SPPMeteo/wiki/lib/exe/fetch.php?id=cops_2a&cache=cache&media=cops_summer_school.turner_hsr_infrared.notes.pdf)
- [22] P. Charbonneau, Dynamo models of the solar cycle. *Living Rev Sol Phys* **17**, 4 (2020), <https://doi.org/10.1007/s41116-020-00025-6>
- [23] R. G. Wilson, B. D. Carter, and I. A. Waite, Does a Spin-Orbit Coupling Between the Sun and the Jovian Planets Govern the Solar Cycle? *Publ. Astr. Soc. Australia*, 2008, 25, pp 85-93
- [24] E. Parker, Nanoflares and the Solar X-Ray Corona, *ApJ* (1988) 330, p.474
- [25] Solar Orbiter's first images reveal 'campfires' on the Sun, 16/07/2020 [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Solar\\_Orbiter/Solar\\_Orbiter\\_s\\_first\\_images\\_reveal\\_campfires\\_on\\_the\\_Sun](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Solar_Orbiter/Solar_Orbiter_s_first_images_reveal_campfires_on_the_Sun)
- [26] IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp., Chapter 5, p 393.
- [27] André Berger, *Le Climat de la Terre*, Editions De Boeck Université, Bruxelles, 1992, p 97 et seq
- [28] J. van Vliet, <https://www.science-climat-energie.be/2019/09/05/recent-global-heat-waves-are-correlated-to-an-exceptional-solar-cycle-24/>
- [29] E. Friis-Christensen, K. Lassen, Length of the Solar Cycle: an Indicator of Solar Activity Closely Associated with Climate, *Science, News Series*, 254 (1991) pp. 698-700
- [30] C.J. Butler, D.J. Johnston, A provisionnal mean air temperature series for Armagh Observatory, *Journal of Atm. and Terr. Phys.*, 58 (1996) pp 1657-1672
- [31] W. Soon, *The Maunder Minimum and the Variable Sun-Earth Connection*, 2003, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd
- [32] <http://www.arri.org/news/noaa-nasa-panel-concurs-that-solar-cycle-25-will-peak-in-july-2025>
- [33] F. Clette et al., The revised Brussels-Locarno Sunspot Number (1981-2015), <https://arxiv.org/abs/1507.07803>
- [34] IAU1508, Press Release, 7.8.2015, Corrected Sunspot History Suggests Climate Change since the Industrial Revolution not due to Natural Solar Trends, <https://www.iau.org/news/pressreleases/detail/iau1508/> [35] Arlt, R., Vaquero, J.M., Historical sunspot records. *Living Rev Sol Phys* **17**, 1 (2020) <https://doi.org/10.1007/s41116-020-0023-y>
- [36] pour rappel, une fonction analytique peut être développée en série de Taylor
- [37] cela n'a rien d'étonnant puisque la longueur moyenne des cycles solaires est voisine de 11 ans
- [38] <https://notalotofpeopleknowthat.wordpress.com/2020/06/03/sunny-may-but-only-the-48th-warmest/>
- [39] Schmidt, M. W. & Hertzberg, J. E. (2011) Abrupt Climate Change During the Last Ice Age. *Nature Education Knowledge* 3(10):11 <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/abrupt-climate-change-during-the-last-ice-24288097/>

## [2. Le 20<sup>ème</sup> siècle a été anormalement chaud mais le 21<sup>ème</sup> siècle revient à la normale \(2/2\)](#)

Mis en ligne SCE : 22.08.2020

### 2.1. La longueur des cycles solaires

Le passage d'un cycle solaire au cycle suivant est défini en principe par le changement de signe du champ magnétique autour des taches solaires. Le moment de ce passage est difficile à déterminer dans le cas des cycles longs, parce qu'on peut avoir pendant plusieurs années cohabitation, dans le même hémisphère solaire, de taches solaires d'orientations magnétiques différentes. Ainsi, à l'heure

d'écriture de cet article (juillet 2020), la fin du cycle solaire 24 se rapproche, mais les premières taches avec l'orientation magnétique du cycle 25 ont fait leur apparition dès 2019; si le cycle 24 n'était pas terminé avant la fin de cette année, la transition du cycle 24 au cycle 25 serait étalée sur 3 années.

De manière à tirer profit de la richesse des données disponibles sur le site ([ici](#)) la longueur des cycles solaires est déterminée comme suit: pour les cycles allant de 1700 à 1755, seules les moyennes annuelles du nombre de taches solaires sont disponibles et le début de cycle correspond à l'année suivant le minimum de cette moyenne. Pour les cycles allant de 1755 à nos jours, la longueur est déterminée en utilisant les moyennes mensuelles: le début de cycle correspond au mois à partir duquel s'amorce la montée du nombre de taches. Cette méthode diffère de celle utilisée par Friis-Christensen et Lassen [29] et Butler et Johnston [30] qui ont travaillé par interpolation au départ des valeurs mensuelles lissées sur 13 mois.

Comme nous allons le voir, la longueur des cycles solaires varie de 9 ans minimum (cycles 2, 3 et 8) à 14 ans (cycle 4 marquant le début du Minimum de Dalton et la Révolution française). La Figure 5 fournit les longueurs des 29 cycles solaires observés depuis le début du 18<sup>ème</sup> siècle, chaque valeur étant positionnée au milieu du cycle correspondant. La figure suggère que la dispersion des cycles solaires va diminuant du 18<sup>ème</sup> au 20<sup>ème</sup> siècle: de manière à préciser cette impression, on calcule dans le tableau suivant, pour chacun des siècles considérés, les longueurs moyennes des cycles solaires (en années) et leurs déviations standard.

siècle	longueur moyenne	déviati on standard
18 <sup>ème</sup>	10,84	1,70
19 <sup>ème</sup>	11,53	1,17
20 <sup>ème</sup>	10,50	0,66
21 <sup>ème</sup>	12,08	0,47

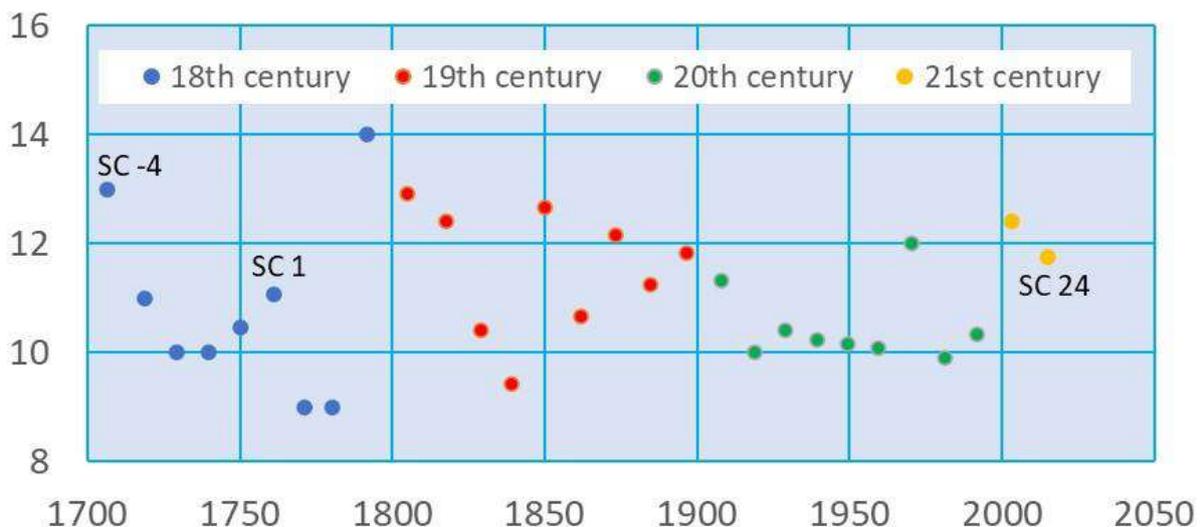


Figure 5 : Longueur des 29 cycles solaires observés du 18<sup>ème</sup> au 21<sup>ème</sup> siècle.

Le résultat le plus frappant de ce tableau est que les cycles solaires du 20<sup>ème</sup> siècle sont en moyenne un an plus courts que ceux du 19<sup>ème</sup> siècle, la tendance s'inversant avec les 2 premiers cycles du 21<sup>ème</sup> siècle. En appliquant la corrélation de Butler et Johnston [24], ceci rendrait le 20<sup>ème</sup> siècle plus chaud de 0,5°C en moyenne que le 19<sup>ème</sup> siècle. NB La figure (et les suivantes) poursuit la numérotation des figures de la partie ½.

Mais il est aussi remarquable de noter que les cycles du 20<sup>ème</sup> siècle sont nettement moins dispersés que ceux du 19<sup>ème</sup>, eux-mêmes moins dispersés que ceux du 18<sup>ème</sup> siècle: on peut en déduire que la température plus élevée du 20<sup>ème</sup> siècle a également été la plus régulière. On imagine par contre sans peine combien le climat et donc la vie ont dû être perturbés par l'activité solaire du 18<sup>ème</sup> siècle, avec notamment les famines qui ont précédé la Révolution française durant le cycle solaire n°4. Ce sont ces variations de longueur de cycles qui ont conduit le grand astronome anglais William Herschel a corréliser en 1801 déjà les taches solaires aux rendements agricoles, malgré la risée de la Royal Society [31]. Par comparaison avec les siècles précédents, la Figure 5 établit que le 20<sup>ème</sup> siècle fut un siècle idéal de chaleur et de régularité climatique.

Les longueurs variables des cycles solaires restent inexplicées par les différentes théories développées autour de l'activité solaire. Par ailleurs, le panel américain de la NOAA et de la NASA [32] chargé de la prédiction des cycles futurs ne semble pas s'y intéresser. Une prédiction de la longueur des cycles solaires futurs doit donc être basée sur une méthode empirique. Une telle méthode est développée ci-dessous.

### 2.2 Les jours sans taches solaires ('spotless days')

Le site web [www.spaceweather.com](http://www.spaceweather.com) enregistre depuis 2006 le nombre de jours sans taches solaires dans chaque année. L'idée est d'utiliser ce nombre pour mesurer la période calme des cycles solaires qui influence les températures terrestres. Ce nombre, et son historique, peut être déduit du relevé journalier des taches solaires disponible sur le site <http://www.sidc.be/silso/> et remontant jusqu'en 1818, tel que corrigé en 2015 par Clette et al. [33] (version 2.0). Ces données sont incomplètes sur la période 1818 – 1848, et elles doivent être corrigées de manière proportionnelle pour que la somme des jours avec et sans taches soit de 365 jours par an.

La Figure 6 donne le nombre de jours sans taches de 1818 à 2020, le cycle 24 étant complété pour l'année 2020 avec 60% ou 219 jours sans taches solaires, à comparer à la réalité de 70% fin juillet.

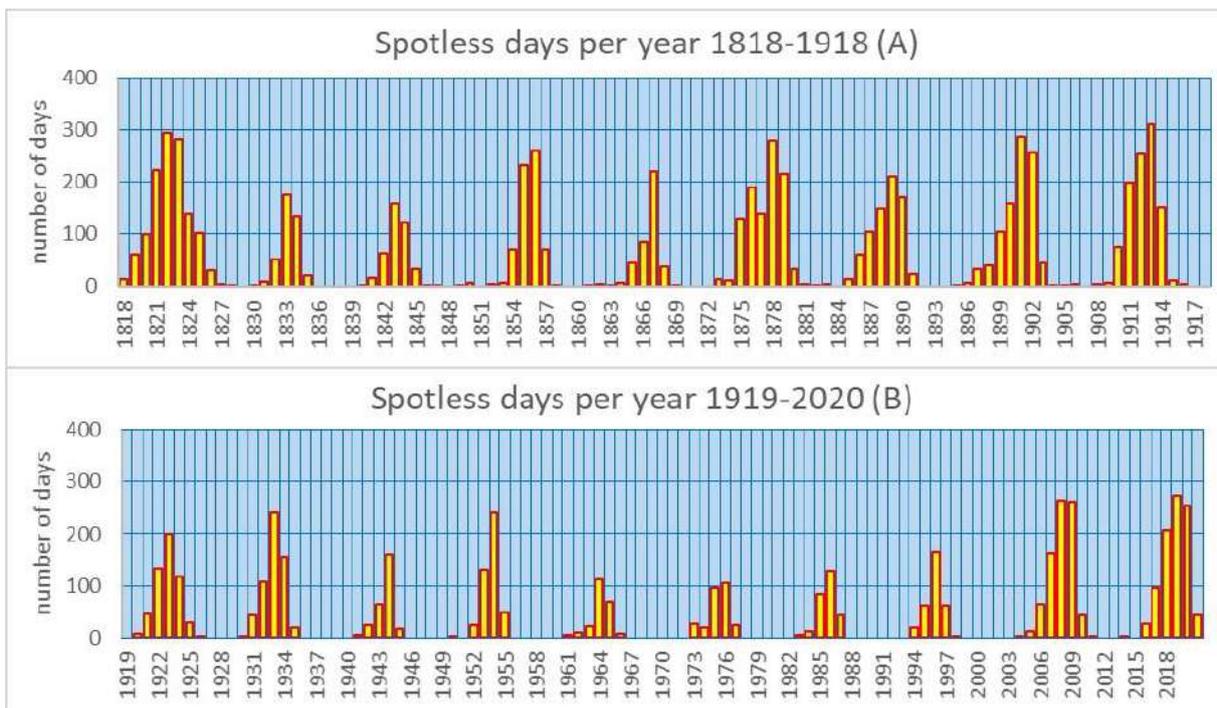


Figure 6 : Nombre de jours sans taches pour les périodes 1818-1918 (A) et 1919-2020 (B).

Tout comme dans la Figure 5, on observe une différence marquée entre le 19<sup>ème</sup> et le 20<sup>ème</sup> siècle: le nombre de jours sans taches est nettement plus élevé pour la période 1818-1918 que pour la période 1919-2020: pour la première période on a 9 cycles dont 7 dépassent 200 jours par an, tandis que pour la deuxième période on a 10 cycles dont seulement 4 dépassent les 200 jours par an. La période allant de 1920 à 2000 est remarquable par le nombre réduit de jours sans taches: ce nombre réduit est le signe d'une activité solaire plus forte. L'analyse des données SIDC-Silso version 2.0 conduit donc à la conclusion que la période 1920-2000 correspond à un maximum d'activité solaire.

Il est intéressant de noter que l'Union Astronomique Internationale [34] est arrivée sur la base des mêmes données à la conclusion exactement inverse en déclarant que « la nouvelle correction du nombre de taches solaires conduite par F. Clette et al. réduit à zéro la revendication qu'il y a eu un Grand Maximum Moderne. » En fait, comme indiqué plus haut, le nombre de taches solaires n'est pas corrélé au climat; par contre la longueur des cycles solaires est bien corrélée aux températures terrestres, comme discuté à la section 4. En niant qu'il y a eu un Grand Maximum Moderne sur base du seul nombre de taches solaires, la conclusion de l'Union Astronomique Internationale est pour le moins prématurée.

### 2.3 Le maximum d'activité solaire de 1960

L'analyse du nombre de jours sans taches solaires a permis de mettre en évidence un maximum d'activité solaire durant la période 1920-2000. Le diagramme « papillon » développé par E. Maunder permet de mieux cerner ce maximum: ce diagramme reprend pour chaque tache solaire observée sa latitude héliographique et sa durée d'existence.

La Figure 7 fournit le diagramme « papillon » établi par Arlt et Vaquero [35] pour la période 1880-2020: ce diagramme est complété par deux lignes rouges fournissant pour chaque hémisphère la latitude maximum des taches solaires observées lors des différents cycles. Ce diagramme montre que cette latitude maximum passe de 30° à 40° de 1880 à 1960, lors du cycle solaire 19 qui est aussi le cycle de la série historique avec le plus grand nombre de taches solaires. Après ce cycle 19, la latitude maximum des taches solaires décroît de manière approximativement symétrique par rapport à l'année 1960.

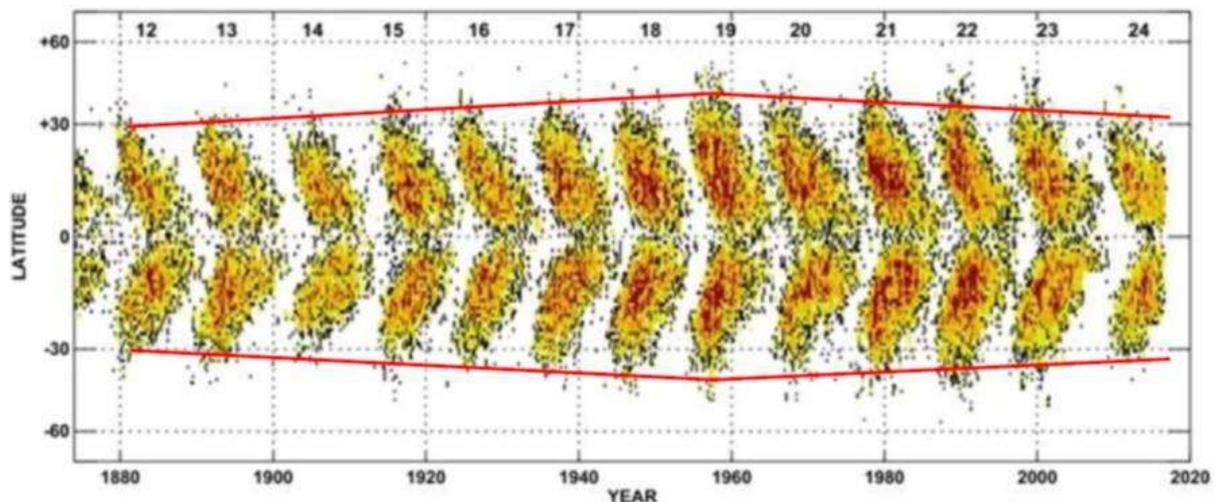


Figure 7 : Diagramme « papillon » d'après Arlt et Vaquero [35] et latitudes max observées pour la période 1880-2020.

Le maximum d'activité solaire de 1960 est ainsi mis en évidence de manière empirique par deux méthodes complètement indépendantes.

Lorsqu'une courbe analytique [36] passe par un maximum, elle est symétrique par rapport à ce dernier aussi longtemps que l'écart au maximum reste suffisamment petit. La question de la symétrie du maximum d'activité solaire peut donc être analysée en examinant si les jours sans taches solaires sont distribués ou non de manière symétrique par rapport à la date du 1<sup>er</sup> janvier 1960 qui est d'après la figure 7 la position éventuelle du centre de symétrie.

La Figure 8 compare les nombres annuels de jours sans taches solaires pour la période 1894-1960 (valeurs historiques) avec les nombres pour la période 1960-2020 en positionnant ces derniers points par symétrie par rapport au 1<sup>er</sup> janvier 1960 (valeurs « miroir »): ainsi la valeur de 256 jours extrapolée pour 2020 est déplacée comme « reflet » en 1899. Cette figure reprend d'une part les jours sans taches de la fin des cycles 13 à 18 (en bleu) et d'autre part les mêmes données pour la fin des cycles 19 à 24 (en jaune/rouge), présentées comme « reflet ».

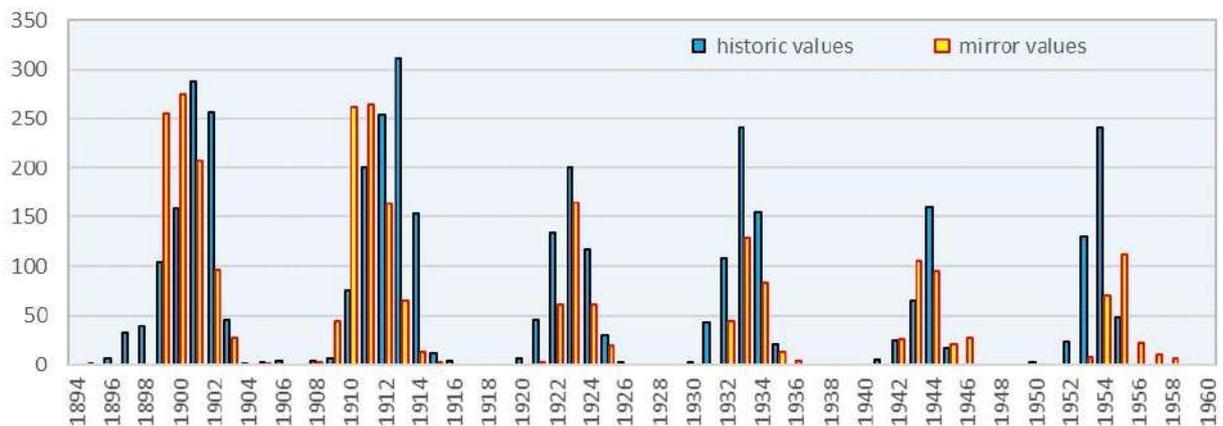


Figure 8: Comparaison par symétrie des nombres de jours sans taches pour les périodes 1894-1960 et 1960-2020.

L'accord entre le profil des valeurs historique et celui des valeurs « miroir » est jugé satisfaisant pour l'abscisse [37] (année de position) mais surtout pour l'ordonnée (le nombre de jours sans taches): ces profils semblent d'autant mieux superposables que l'on s'éloigne – dans le passé ou dans le futur – de la date du 1<sup>er</sup> janvier 1960. La symétrie des nombres de jours sans taches est ainsi établie empiriquement pour les 6 cycles solaires précédant et suivant 1960.

Pour conclure sur la symétrie de l'activité solaire et par voie de conséquence du climat, une observation remarquable doit être signalée: la Belgique a connu cette année un printemps 2020 météorologique exceptionnel avec une météo anticyclonique continue pendant les trois mois de mars, avril et mai: il est frappant de constater que ce type de temps exceptionnel a été également observé en Angleterre en mars, avril et mai 1893 [38], date proche du « reflet » 1899 de l'année 2020. Cette observation renforce l'idée que le climat semble plus reproductible qu'on pourrait le penser.

## 2.4 Quelques perspectives pour le 21<sup>ème</sup> siècle et les siècles suivants

La symétrie par rapport à la date de 1960 fournit la méthode empirique recherchée pour approcher le climat des siècles futurs, sans tenir compte des températures océaniques: comme nous l'avons vu à la section 2, ces dernières varient typiquement de 0,5°C entre le maximum et le minimum de

l'AMO. Les prédictions qualitatives présentées ici ne sont au stade actuel qu'une traduction de la symétrie observée.

D'après cette approche, l'activité solaire du 21<sup>ème</sup> siècle serait le « reflet » de l'activité historique sur la période 1820-1920. La température du 21<sup>ème</sup> siècle devrait connaître une baisse légère de température suite à l'allongement des cycles solaires par rapport au 20<sup>ème</sup> siècle: cette baisse est déjà amorcée. La fin du 21<sup>ème</sup> siècle devrait voir une baisse plus sensible des températures avec l'arrivée du « reflet » du Minimum de Dalton au cycle solaire 31, vers 2090.

Quant au 22<sup>ème</sup> siècle, il devrait ressembler au 18<sup>ème</sup> siècle, avec des cycles solaires de longueurs fort changeantes qui conduiront à des variations sensibles de température. Il faudra attendre le 23<sup>ème</sup> siècle pour entrer vraisemblablement à nouveau dans une période de Grand Minimum: en prenant 1660 comme date centrale pour le Minimum de Maunder, ce nouveau Petit Age Glaciaire devrait être atteint vers 2260. A titre de comparaison, la courbe de tendance multiséculaire de l'AMO (courbe en pointillé de la figure 3) atteindrait son minimum vers 2380.

Les années qui viennent, avec la fin du cycle 24 et le démarrage du cycle 25, permettront de vérifier si la symétrie observée par rapport à 1960 est un outil fiable de prédiction de l'activité solaire et du climat futur.

## 2.5 Résumé

Les considérations développées ci-dessus peuvent être résumées comme suit.

1. Le réchauffement observé à partir de 1980 peut être expliqué par la combinaison de la phase montante de l'Oscillation Multidécadale Atlantique, couplée à une période de forte activité solaire s'étalant de 1920 à 2000, avec le maximum d'activité en 1960. Ce réchauffement n'est pas exceptionnel, puisque les températures relevées à Armagh en Irlande du Nord montrent que le réchauffement observé de 1820 à 1840 a été encore plus important, voir figure 1.
- L'effet de serre associé au CO<sub>2</sub> et retenu par les théoriciens du GIEC pour expliquer le réchauffement observé dans les basses couches de l'atmosphère depuis 1980 est en contradiction avec les lois de la physique moléculaire et de la mécanique statistique; cet effet existe bien, mais il n'est observé qu'à des altitudes très élevées (de l'ordre de 100 km).
  - L'activité solaire influence les températures terrestres, non par le nombre de taches solaires, mais par la longueur des cycles solaires, les cycles longs conduisant à des températures plus faibles et les cycles courts à des températures plus élevées. L'examen des cycles du passé révèle un 18<sup>ème</sup> siècle perturbé par des cycles très variables qui ont eu très probablement un impact historique, un 19<sup>ème</sup> siècle rendu froid par des cycles solaires longs, et un 20<sup>ème</sup> siècle avec beaucoup de cycles courts, faisant de ce siècle un modèle de chaleur et de régularité.
  - Vu le niveau très primitif des théories, la prédiction de la longueur des cycles solaires au 21<sup>ème</sup> siècle et suivants ne peut se baser que sur une approche empirique. Une telle approche basée sur la distribution des jours sans taches solaires a été présentée: cette distribution est symétrique par rapport au cycle 19 centré en 1960: ainsi la transition actuelle du cycle 24 vers le cycle 25 serait semblable à la transition du cycle 13 vers le cycle 14 qui a eu lieu de 1899 à 1902, voir figures 6 et 8.

- Sur base de cette approche empirique, le climat du 21<sup>ème</sup> siècle devrait être très semblable à celui du 19<sup>ème</sup> siècle, donc avec des températures en baisse, mais sans qu'il soit déjà question d'un nouveau Grand Minimum comme celui de Maunder au 17<sup>ème</sup> siècle. En supposant que l'approche basée sur la symétrie par rapport à 1960 reste valable, ce Grand Minimum n'aurait pas lieu avant l'année symétrique de 1660 par rapport à 1960, soit pas avant 2260.

## 2.6 En guise de conclusion

Pour revenir à la question des priorités posée dans l'introduction, la réponse est évidente: il n'y a aucune urgence climatique, l'effet de serre dû au CO<sub>2</sub> dans la basse atmosphère est une chimère et les observations des deux dernières décennies conduisent pour le 21<sup>ème</sup> siècle à la prédiction rassurante d'un refroidissement déjà amorcé.

Les marchands bien connus de la peur climatique n'ont donc aucune raison légitime de poursuivre l'endoctrinement médiatique et le harcèlement psychologique de la population et des responsables politiques.

La frénésie de vouloir décarboner à tout prix pour soi-disant « sauver la planète » n'a aucun fondement et va conduire à la destruction du modèle social et économique que le monde nous envie: l'enfer est plus que jamais pavé de bonnes intentions. Même s'il est aussi inscrit à l'agenda des partisans de la décroissance.

### Liste des références (communes aux parties 1/2 et 2/2)

- [1] Hansen et al., Climate Impact of Increasing Atmospheric Carbon Dioxide, *Science*, 231 (1981), pp 957-966, <https://science.sciencemag.org/content/213/4511/957.abstract>
- [2] audition J. Hansen, [https://pulitzercenter.org/sites/default/files/june\\_23\\_1988\\_senate\\_hearing\\_1.pdf](https://pulitzercenter.org/sites/default/files/june_23_1988_senate_hearing_1.pdf)
- [3] Il faut rappeler que cette période était celle de plusieurs grands changements: fin de la guerre froide, disparition de l'URSS, réunification de l'Allemagne, fermeture des mines de charbon britanniques; les USA étaient la seule superpuissance et les pays BRIC n'avaient pas leur influence actuelle.
- [4] Résolution 43/53 de l'Assemblée Générale de l'ONU du 6 décembre 1988
- [5] C.J. Butler et al., Air temperatures at Armagh Observatory, Northern Ireland, from 1796 to 2002, *Int. J. Climatology* 2005, <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.1148>
- [6] <https://www.metoffice.gov.uk/pub/data/weather/uk/climate/stationdata/armaghdata.txt>
- [7] [https://en.wikipedia.org/wiki/Global\\_warming\\_hiatus](https://en.wikipedia.org/wiki/Global_warming_hiatus)
- [8] sur le plus court terme, il faut mentionner la NAO ou Northern Atlantic Oscillation
- [9] [https://en.wikipedia.org/wiki/Atlantic\\_multidecadal\\_oscillation](https://en.wikipedia.org/wiki/Atlantic_multidecadal_oscillation)
- [10] <https://psl.noaa.gov/data/timeseries/AMO/>
- [11] pour rappel, la banquise a été observée sur la côte belge durant l'hiver 1962-1963.
- [12] M.F. Knudsen et al., Tracking the Atlantic Multidecadal Oscillation through the last 8,000 years, *Nature Communications* (2011), DOI: 10.1038/ncomms1186
- [13] d'après [www.climate4you.com](http://www.climate4you.com)
- [14] il ne saurait en être autrement puisque l'intervalle entre 2019 et 1856 n'est que de 163 ans
- [15] N.-A. Mörner et al., Changes in Barents Sea Ice Edge Positions in the Last 440 years: A Review of Possible Driving Forces, *Int. J. Astr.* (2020) 10, pp 97-164
- [16] Le Treut, H., R. Somerville, U. Cubasch, Y. Ding, C. Mauritzen, A. Mokssit, T. Peterson and M. Prather, 2007: Historical Overview of Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [17] G. Geuskens, <http://www.science-climat-energie.be/2018/08/06/le-co2-et-le-climat-avec-et-sans-effet-de-serre/>
- [18] les niveaux d'énergie quantifiés ou discrets correspondent à des raies d'absorption ou d'émission
- [19] voir calculateur: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Kinetic/frecol.html>
- [20] B.M. Smirnov, Collision and radiative processes in emission of atmospheric carbon dioxide, *J. Phys. D: Appl. Phys.* (2018) 51214004
- [21] [https://www2.meteo.uni-bonn.de/projekte/SPPMeteo/wiki/lib/exe/fetch.php?id=cops\\_2a&cache=cache&media=cops\\_summer\\_school.turner\\_hsr\\_infrared.notes.pdf](https://www2.meteo.uni-bonn.de/projekte/SPPMeteo/wiki/lib/exe/fetch.php?id=cops_2a&cache=cache&media=cops_summer_school.turner_hsr_infrared.notes.pdf)
- [22] P. Charbonneau, Dynamo models of the solar cycle. *Living Rev Sol Phys* 17, 4 (2020), <https://doi.org/10.1007/s41116-020-00025-6>
- [23] R. G. Wilson, B. D. Carter, and I. A. Waite, Does a Spin–Orbit Coupling Between the Sun and the Jovian Planets Govern the Solar Cycle? *Publ. Astr. Soc. Australia*, 2008, 25, pp 85–93
- [24] E. Parker, Nanoflares and the Solar X-Ray Corona, *ApJ* (1988) 330, p.474

- [25] Solar Orbiter's first images reveal 'campfires' on the Sun, 16/07/2020 [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Solar\\_Orbiter/Solar\\_Orbiter\\_s\\_first\\_images\\_reveal\\_campfires\\_on\\_the\\_Sun](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Solar_Orbiter/Solar_Orbiter_s_first_images_reveal_campfires_on_the_Sun)
- [26] IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp., Chapter 5, p 393.
- [27] André Berger, *Le Climat de la Terre*, Editions De Boeck Université, Bruxelles, 1992, p 97 et seq
- [28] J. van Vliet, <https://www.science-climat-energie.be/2019/09/05/recent-global-heat-waves-are-correlated-to-an-exceptional-solar-cycle-24/>
- [29] E. Friis-Christensen, K. Lassen, Length of the Solar Cycle: an Indicator of Solar Activity Closely Associated with Climate, *Science, News Series*, 254 (1991) pp. 698-700
- [30] C.J. Butler, D.J. Johnston, A provisionnal mean air temperature series for Armagh Observatory, *Journal of Atm. and Terr. Phys.*, 58 (1996) pp 1657-1672
- [31] W. Soon, *The Maunder Minimum and the Variable Sun-Earth Connection*, 2003, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd
- [32] <http://www.arri.org/news/noaa-nasa-panel-concurs-that-solar-cycle-25-will-peak-in-july-2025>
- [33] F. Clette et al., The revised Brussels-Locarno Sunspot Number (1981-2015), <https://arxiv.org/abs/1507.07803>
- [34] IAU1508, Press Release, 7.8.2015, Corrected Sunspot History Suggests Climate Change since the Industrial Revolution not due to Natural Solar Trends, <https://www.iau.org/news/pressreleases/detail/iau1508/> [35] Arlt, R., Vaquero, J.M., Historical sunspot records. *Living Rev Sol Phys* 17, 1 (2020) <https://doi.org/10.1007/s41116-020-0023-y>
- [36] pour rappel, une fonction analytique peut être développée en série de Taylor
- [37] cela n'a rien d'étonnant puisque la longueur moyenne des cycles solaires est voisine de 11 ans
- [38] <https://notalotofpeopleknowthat.wordpress.com/2020/06/03/sunny-may-but-only-the-48th-warmest/>
- [39] Schmidt, M. W. & Hertzberg, J. E. (2011) Abrupt Climate Change During the Last Ice Age. *Nature Education Knowledge* 3(10):11 <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/abrupt-climate-change-during-the-last-ice-24288097/>

Note : Dans le présent article d'opinion, l'auteur donne librement ses idées, de manière complètement indépendante et sans aucun conflit d'intérêts sur des questions d'intérêt universel, avec comme seul but l'avancement de l'humanité et de la science.

Il remercie le Comité Editorial de Science, Climat & Energie pour les conseils et commentaires utiles.

Pour contacter l'auteur, merci d'envoyer votre message à [info@science-climat-energie.be](mailto:info@science-climat-energie.be)

### [3. Déluge et changement climatique \(1/2\)](#)

Mis en ligne SCE : 20.11.2020

#### **La part continentale**

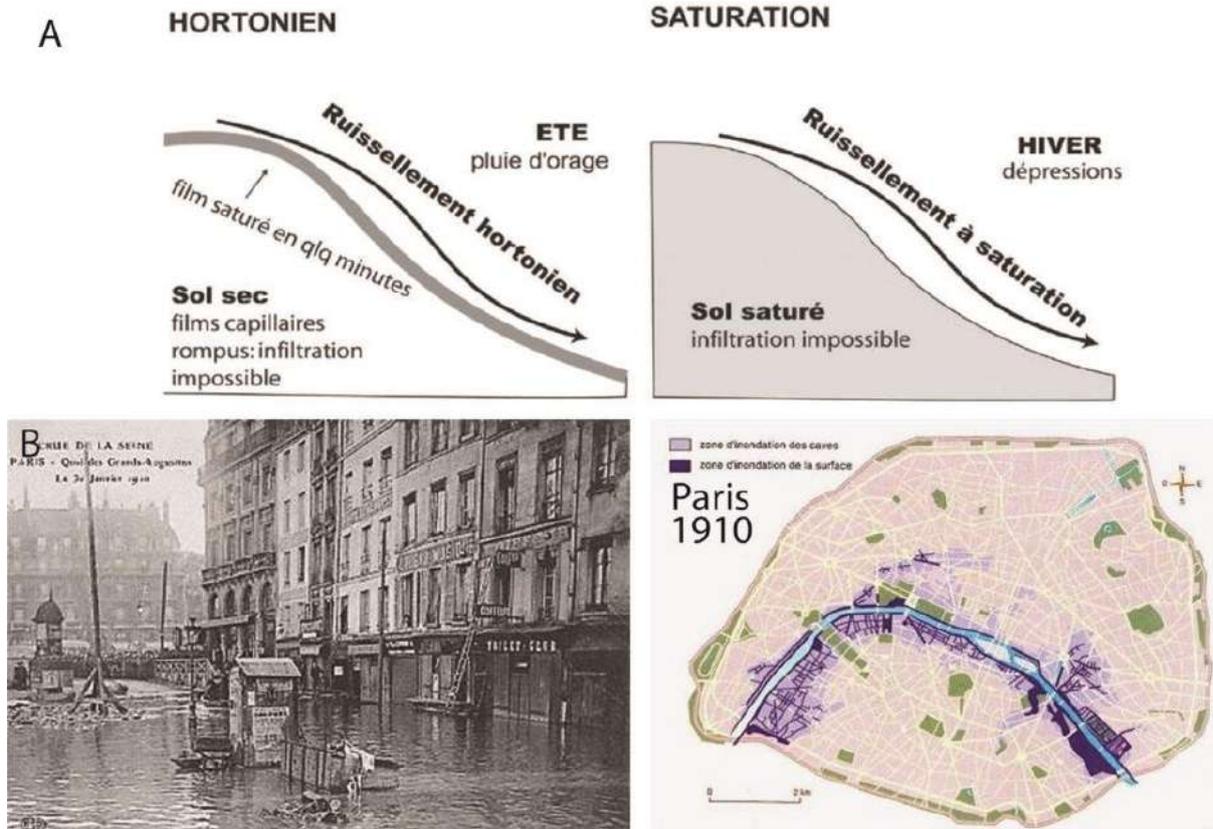
Ces dernières années, de nombreuses crues ont affecté le Sud de l'Europe mais également le Nord de la France, l'Ouest et nos voisins britanniques. C'est à l'échelle mondiale un des désastres naturels les plus fréquents (<https://www.emdat.be/>). Leur fréquence s'accroît depuis 1970 et bien entendu, le changement climatique dont l'homme devrait être le responsable est mis en accusation. Nous ne traiterons pas ici des inondations associées à la proximité de l'océan ( voir Déluge et Changement Climatique 2/2, sur SCE).

#### **A) MECANISMES.**

**Il est important de prendre en compte les conditions physiographiques de ces évènements avant d'impliquer le climat.** Beaucoup de facteurs favorisants sont imputables à l'homme. La formation d'une crue est essentiellement liée à l'intensité du ruissellement.

#### **Le ruissellement**

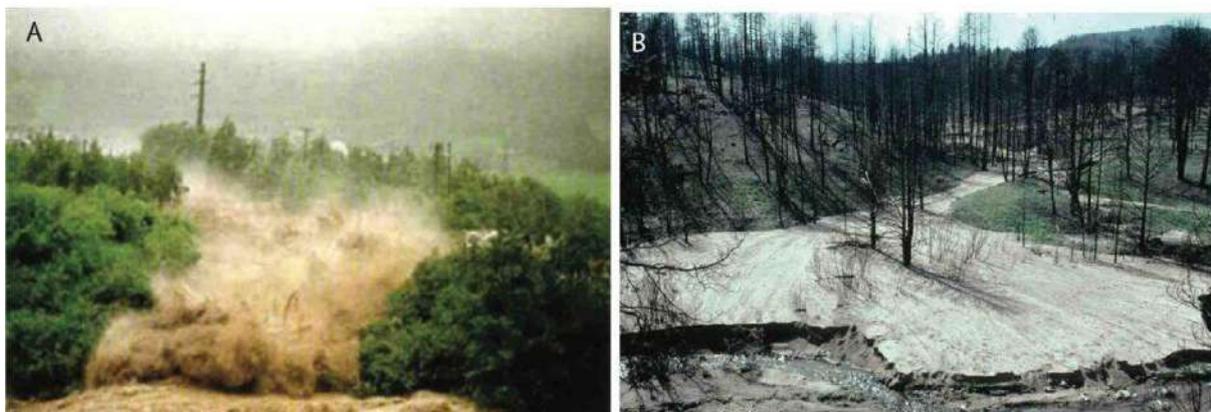
**Il existe deux grands types de crues dans nos régions générées par les modalités du ruissellement.**



**Figure 1 : A)** Différentes modalités de ruissellement (van Vliet-Lanoë, enseignement)  
**B)** inondation de la Seine à Paris en 1910 et reconstitution de la zone inondée (Chadych & Leborgne, 1999 ; Atlas de Paris, Pangramme).

Elles sont souvent liées à un engorgement en eau des sols, plus ou moins superficiel, favorisant un **ruissellement dit à saturation** (Fig.1A) . Cette situation est commune chez nous en Janvier ou Février lorsque les nappes phréatiques sont à leur plus haut niveau et éventuellement débordent. La montée en crue des rivières prend, dans ce cas, généralement plusieurs jours. Exceptionnellement cette situation peut se produire après un épisode pluvieux intense, lorsque les fronts dépressionnaires se suivent pendant plusieurs jours ou être accentuée par une fonte de neige intempesive, comme ce fut le cas lors de la crue séculaire de la Seine en 1910 (Fig.1B) lors d'une période froide associée à un modeste minimum d'activité solaire. En Asie du SE, elle est imputable à l'intensité et la durée de la mousson d'été et son blocage par des reliefs-barrières.

Un autre type de ruissellement se produit sur des sols devenu hydrophobes pour des raisons variées. Le cas le plus simple est la dessiccation superficielle des sols qui casse le film d'eau capillaire entre les grains du sol, ce qui empêche une réhumectation profonde lors de la pluie. C'est ce que nous appelons un **ruissellement hortonien** (Fig.1A).



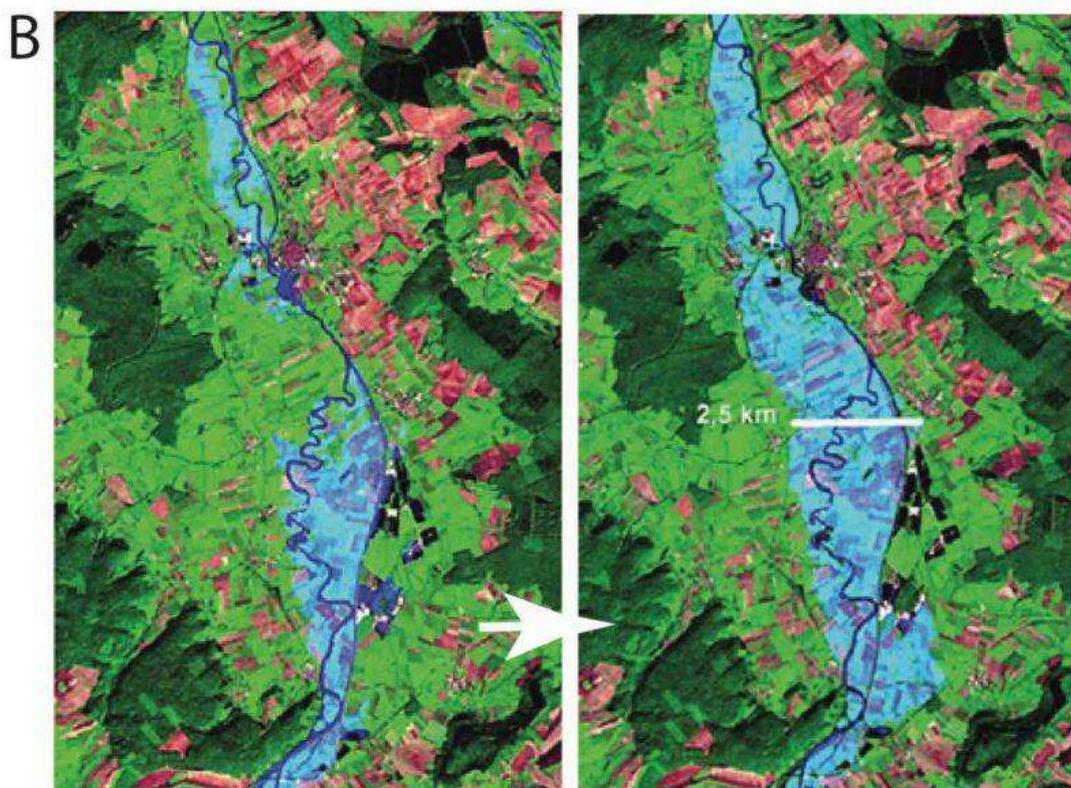
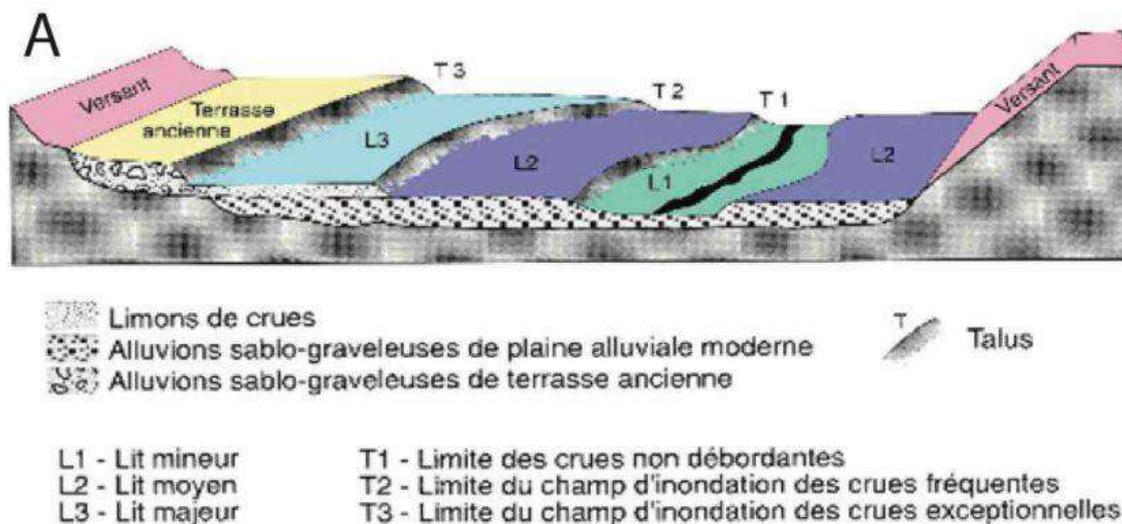
**Figure 2 : A)** Arrivée d'un front de **crue-éclair** dans un bassin versant déjà inondé (Autriche, 1999) **B)** érosion des sols et sédimentation liée à un orage post-feu (Californie ; Earth Observatory)

C'est typiquement le cas du Midi de la France ou du Maghreb en fin d'été : les sols deviennent hydrophobes, toute l'eau ruisselle et s'écoule vers les points bas. Ce schéma est responsable de l'apparition de **crues-éclair** ou « **flash floods** » lors d'orage ou d'évènements cévennoles, lorsque le relief bloque la migration des masses nuageuses. Gaume et al. (2016) indiquent que les crues-éclair observées en Europe sont généralement associées à des cumuls pluviométriques d'au moins 100 mm en quelques heures. Ce type de ruissellement peut être accentué par le passage de feux de landes ou de forêts qui accentuent, avec la cendre, le caractère hydrophobe des sols et favorisent la formation de masses orangeuses responsables de pluies intense mais très localisées. Les sols gelés, bétonnés ou asphaltés ont le même comportement, excepté pour le revêtement auto-drainant de nos chaussées. **Les zones imperméabilisées par l'urbanisation (toitures, parking, trottoirs) se comportent par conséquent de la même manière.**

#### **Le bassin versant et les différents lits de la rivière.**

Le ruissellement va affecter un relief avec ses drains naturels, les rivières qui coalescent et concentrent plus ou moins vite les précipitations. C'est ce qu'on appelle un **bassin-versant**. Sa surface peut être petite et en pente forte comme en montagne ou très grande et peu pentue en plaine. La concentration des eaux dans la rivière va amener une crue d'autant plus vite que le **drainage** du bassin est rapide. Quelques heures en montagnes, plusieurs jours en plaine. Lorsque la rivière est longue comme c'est le cas du Rhin, il se forme une onde de crue qui se propage vers l'aval suivi par une décrue relativement lente (semaine). **Le problème est que beaucoup de grandes villes ont été construites sur ses berges, souvent en position de confluence et de concentration de la crue.**

Dans la partie « alimentation » (amont) du bassin versant, le drainage est rapide et transitoire. Dans la partie avale, généralement en pente douce, la crue s'installe dans toute la vallée, inondant ce que nous appelons le **lit majeur** ou zone inondable (crues hivernales à décennales, Fig.3A). La rivière normale constitue le **lit mineur** (Fig.3A).



**Figure 3 :** A) Différents zones inondables (Plan de prévention des risques, DIREN, Languedoc-Roussillon). B) Meuse à Stenay (2001) : rôle des infrastructures routières de ferroviaire sur l'évolution de la montée en crue.

Tout obstacle dans le lit majeur va bloquer l'évacuation de la crue (route, voie de chemin de fer, zone industrielle ou commerciale, ville ; Fig.4B), accentuer le niveau d'eau atteint puis freiner la décrue. **Il faut donc en tout bon sens éviter de construire dans ces zones, plus particulièrement de l'habitat. Cependant, ces terrains sont très prisés par les élus vu leur horizontalité et leur caractère bon marché, en dépit de la législation existante.**

Le réseau hydrographique est donc le système principal de concentration rapide des eaux pluviales ou **drainage**. En milieu agricole, le curage de fossés peut régionalement accentuer la vitesse de transfert des eaux vers les points bas. Le réseau urbain d'égouts est également un outil de

concentration rapide des écoulements dans un système déjà très imperméabilisé. Cette concentration des eaux superficielles est complétée en plaine par l'arrivée plus lente des eaux infiltrées, qui, elles, contrôlent le niveau de la nappe phréatique (Fig.4). Les crues de nappe, indépendantes des cours d'eau, sont souvent hivernales et très longues (mois) à disparaître, en association avec une succession de crues superficielles sur sols saturés. En milieu karstique comme dans le midi ou sur la craie comme en pays de Caux, la réponse de la nappe peut être, par contre très rapide (heure).



**Figure. 4 :** Crues de nappes et de ruissellement peuvent être simultanées (vallée de la Slack, Pas de Calais, 1999 sur substrat fracturé calcaire). Crue de nappe karstique à Abbeville (vallée de la Somme, 1999)

Un dernier facteur accentuateur de la hauteur d'eau atteinte par la crue est l'**effet Venturi**. **Toute réduction en largeur (et profondeur) du chenal d'écoulement par des travaux, digues ou construction, comme le développement d'une ville, va, de facto, réduire la largeur du chenal d'écoulement, accélérer la vitesse d'écoulement des eaux et faire monter artificiellement le niveau atteint par l'eau dans l'agglomération.** A tel point que les rivières rectifiées et endiguées, comme le Rhône ou le Rhin voient leur capacité de débordement devenir énorme et la fréquence des crues être surtout contrôlées par l'entretien des digues et le curage des cours d'eaux (embâcle de troncs et autres débris, au niveau des ponts).

Pour lutter contre l'inondation des zones urbanisées, **des zones d'extension des crues** sont mises en place en amont des cités afin de ralentir la montée en crue, en aménageant des dérivations et des zones inondables. La caricature de ce système est actuellement en place dans la vallée du Fleuve Jaune, avec le barrage des 7 Gorges qui permet un stockage temporaire l'eau pour d'écarter la hauteur atteinte par les crues. Le lit mineur endigué du fleuve, est, en basses eaux, environ 10 m au-dessus du lit majeur, avec des digues fragiles en limon. Les Chinois préfèrent inonder les centaines de villages de plaine pour ne pas inonder des agglomérations millionnaires en habitants situées à l'aval.

## **B) L'IMPACT DE L'HOMME.**

**Depuis la Néolithisation l'occupation des sols a fait évoluer positivement la capacité de ruissellement. Un couvert forestier possède une capacité de ruissellement quasi-nulle, dominé par une infiltration racinaire. Le défrichement a amené l'augmentation progressive du ruissellement selon l'évolution d'un parcellaire initialement petit et cloisonné vers la situation actuelle, des grandes parcelles sans cloisonnement propices au ruissellement.**

**Les modalités techniques de travail de la terre ont également influencé ce système, via l'évolution d'un labour superficiel (5cm) vers un labour profond (40 cm, années 1980).** Les modalités d'amendement ont également accentué les choses en relevant le pH du sol vers 6.7 pour des raisons agronomiques, les sols étant généralement acides et peu fertiles en fin d'interglaciaire. Ceci a abouti en réduisant les apports organiques (fumure organique) au profit des engrais chimiques (1970), à une instabilité croissante de la structure du sol. L'utilisation d'un labour profond et de pesticides ont aussi fortement réduit l'activité biologique des sols et donc réduit la capacité d'infiltration et de stockage des eaux en profondeur. Elle permet également la formation d'une **croûte de battance** (Fig.5A) imperméable en surface et d'une **semelle de labour** imperméable sous la zone labourée. Cette évolution depuis le Néolithique a amené une érosion des sols d'environ 1m en Europe tempérée allant à plusieurs mètres en régions méditerranéennes.



*Figure. 5 : A) Croûte de battance sur sols limoneux en Picardie, 1999 ; B) Ruissellement agressif en Autriche en automne 1999*

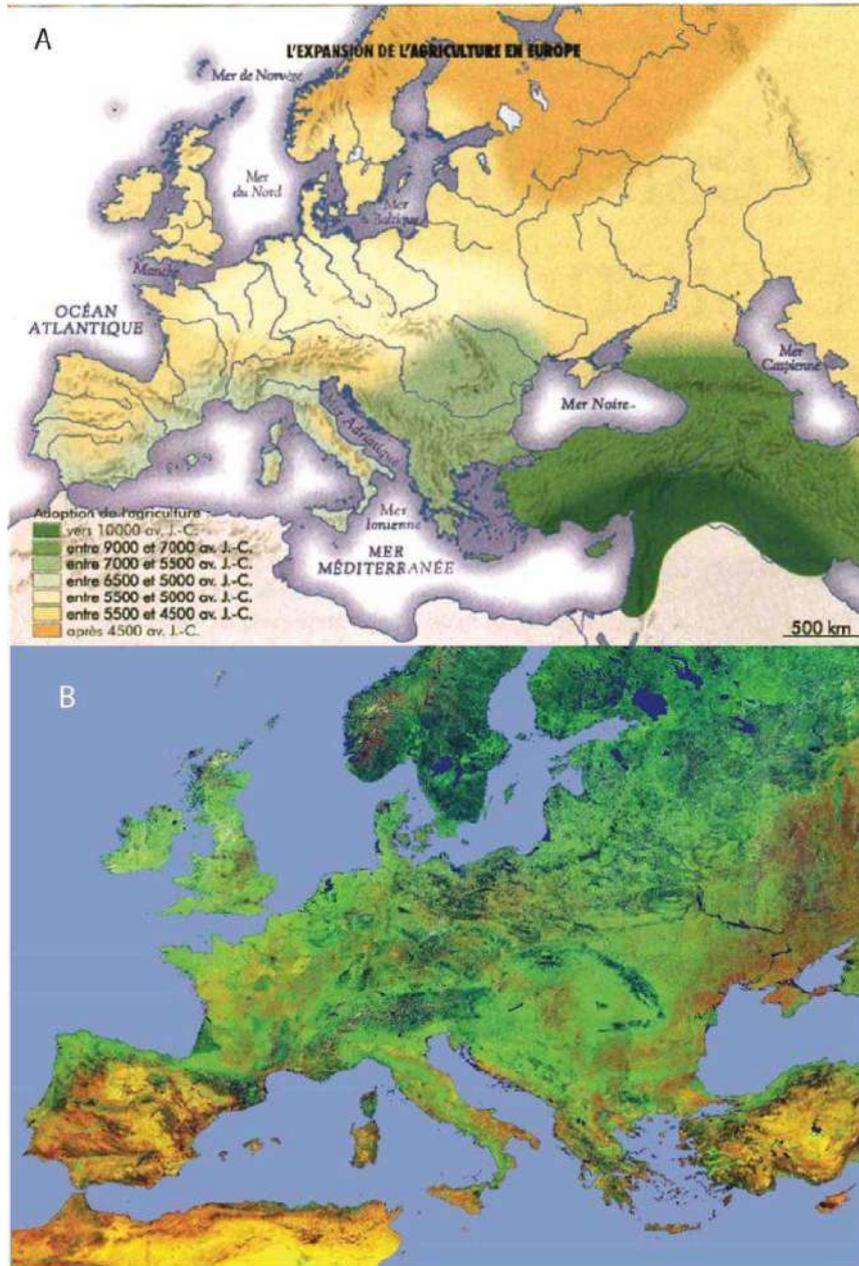
L'agressivité des précipitations sur les zones cultivées a très tôt (Âge du Bronze) généré des pratiques de cloisonnement des espaces cultivés par des murs en pierre, en terre (haie) ou des aménagements en terrasses pour limiter le ruissellement et donc l'érosion des terres cultivées. Malheureusement, nombre de ces aménagements n'ont pas été entretenus, voire ont été détruits lors de la révolution verte des années 1970, par les remembrements ou tout simplement abandonnés suite à une déprise agricole pour cause de guerre ou de rentabilité, comme dans les pays méditerranéens.

C'est pour cela que des **plans de prévention des risques** ont été réalisés, depuis une dizaine d'années, à l'échelle nationale, régionale et à celle des bassins-versants en France et dans les autres pays d'Europe, pour inciter les particuliers et les élus à gérer correctement leur territoire. **Malheureusement les lois et les précautions à prendre sont très souvent contournées, en accusant pour raisons politiques, l'impact du Changement Climatique actuel, d'un doublement du nombre des catastrophes enregistrées depuis le début du XXIème siècle.** La majorité des événements catastrophiques sont générés par du ruissellement hortonien, succédant aux périodes sèches caniculaires. En France, les crues fluviales dont le coût excède le milliard d'euros sont assez récentes : 3,5 milliards (crue de l'Aude, novembre 1999), 1,6 milliard (crue de la Seine, janvier 1910), 1,4 milliard (crue des Gardons, septembre 2002), 1,4 milliard (crue des Gardons, septembre-octobre 1958), 1,1 milliard (crue du Rhône, décembre 2003), 1 milliard (crue de l'Argens et la Nartuby, Juin 2010), 1 milliard (crue en Bretagne, hiver 2000-2001) (M.Lang ; le Point 6/10/2020). Ces coûts sont liés à une urbanisation croissante et une sophistication des infrastructures affectées, donc coûteuses.

C) CRUES FLUVIALES ET CLIMAT EN EUROPE

Période Quaternaire

Les crues et l'érosion des sols existent depuis toujours dans l'histoire de notre planète. Ces phénomènes sont à la source des sédiments analysés sur le terrain ou dans les carottages marins.



**Figure 6 :** A) Carte de l'expansion de l'agriculture lors de la Néolithisation. B) Etat de l'aridification et de l'érosion des sols européens en 2006. Les terrains en jaune brunâtre sont dénudés, vert clair: champs cultivés, vert foncé : forêt. En jaune les zones devenues arides (désert) Image satellitaire Earth Observatory. Le défrichement de la couverture forestière holocène (depuis 8 ka) accentue une aridification indirecte des terres, normalement uniquement régie en cours d'interglaciaire par la diminution de l'insolation globale. Cette situation favorise une concentration hortonienne du ruissellement et donc les crues. Le défrichement induit une déstabilisation et une érosion des sols, une rehexistiasie anormale, forcée par l'Homme.

Ces sédiments enregistrent de facto la succession d'évènements climatiques qui président à leur mise en place : ce sont les archives sédimentaires. Elles ont permis de mettre en évidence des fluctuations climatiques majeures associées à la qualité de l'insolation sous contrôle du forçage orbital (voir [Arctique Géologie 2/2](#) sur SCE), les périodes glaciaires d'une durée moyenne de 100 000 ans (100 ka) séparées par de brefs interglaciaires (10 ka).

**Les archives nous apprennent également que les grosses phases d'érosion enregistrées à l'échelle du millénaire dans nos régions sont associées :**

- **soit à des épisodes de refroidissement du climat**, des périodes longues, arides et froides de rhexistase ou érosion mécanique dominante, les périodes chaudes étant, elles, caractérisées par une couverture végétale continue et protectrice, une stabilité du milieu végétalisé ou biostasie sous contrôle de précipitations élevées (environ X 2) et de PCO<sub>2</sub> plus élevées (Erhart, 1951; Van Vliet-Lanoë *et al.*, 1992; Van Vliet-Lanoë et Guillocheau, 1995). En fin de période chaude de rang interglaciaire telle que la période dans laquelle nous vivons, la rhexistase est à l'échelle du millénaire sous influence des variations de l'orbite terrestre autour du soleil (Van Vliet-Lanoë et Guillocheau, 1995). Ce réchauffement transmis par l'océan est bien visible dans le cas de l'interglaciaire précédant, l'Eémien en Islande, amenant une montée accélérée du niveau marin vers 116 ka après un « petit Age glaciaire » compris entre 120 et 116,5 ka. (voir Van Vliet-Lanoë, 2018).
- **soit en fin d'épisodes de réchauffements brefs (ca 1,5 ka ou moins)** appelés évènements de Bond (Bond *et al.*, 2011) ou Dansgaard-Oeschger en période glaciaire (Rasmussen *et al.*, 2016). Nous sommes actuellement dans un de ces évènements, en plus des conditions précédentes de fin d'interglaciaire. Après l'Optimum thermique du Moyen Âge (1299-1350 AD) a été suivie par une transition marquée par la crue millénaire du Rhin en 1342 AD et ses milliers de morts, succédant à une grande sécheresse (crue brutale). Cet optimum climatique a été suivi par le Petit Age Glaciaire (1350-1830 AD), une période froide et neigeuse, accompagnées de très fortes et longues successions de tempêtes (Lamb & Frydendahl, 2005) forcées par plusieurs minima d'activité solaire, dont le fameux « Maunder » (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2016). Nous sommes maintenant au sortir d'une période d'activité majeure du soleil dans les années 1950 à 1980.

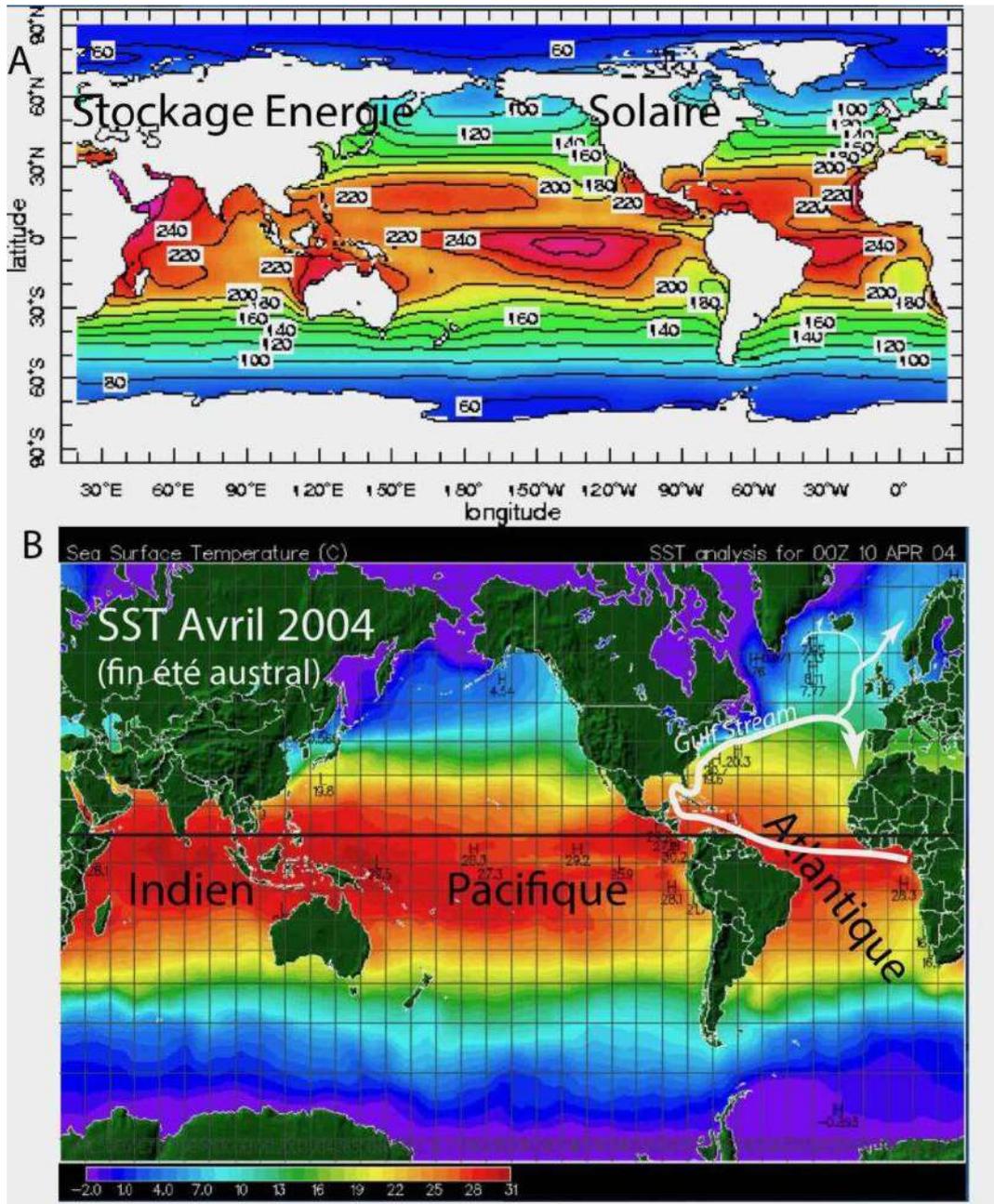
### **Les mécanismes générant de fortes précipitations**

L'océan austral, le plus vaste de notre planète et vu sa localisation en position intertropicale, absorbe l'énergie incidente solaire supplémentaire fournie en période de forte activité de l'astre (cycle à ±11 ans). L'augmentation de l'irradiance solaire totale (TSI) en Watt/m<sup>2</sup>, très faible (0,1%) pendant ce cycle mais, avec +5% du rayonnement UV (Damé, 2013), le seul capable de pénétrer dans la tranche supérieure (<700 m) des eaux océaniques et de les réchauffer. Le rôle du soleil est donc de chauffer l'océan et de favoriser l'évaporation et l'extension de la couverture nuageuse, le couvercle de la casserole maintenue au chaud ! Une ionisation accrue liée au flux de particules solaires (vent solaire) favorise en effet la croissance des aérosols dans les noyaux de condensation des nuages (Svensmark *et al.*, 2009 ; Dunne *et al.*, 2016 ; Svensmark, 2019) et donc la nucléation de d'hydrométéores en tous genres.

**Le changement de budget énergétique associé à la couverture nuageuse associé au cycle à 11 ans a été estimé à 1.1±0.3 W/m<sup>2</sup>, un ordre de grandeur 10 fois supérieur à celle de la TSI (Svensmark, 2019) et est également sous contrôle « chauffant » du vent solaire, indépendant des fameuses taches (voir Van Vliet, 2019 sur SCE).** Ce type de changement apparaît pendant les deux différents

types de réchauffement (Interglaciaire et DO ; voir Rasmussen et al., 2016 ; Van Vliet-Lanoë, 2018). Enfin, l'inertie thermique de la masse océanique est, rappelons-le, grande en relation avec la chaleur spécifique de l'eau.

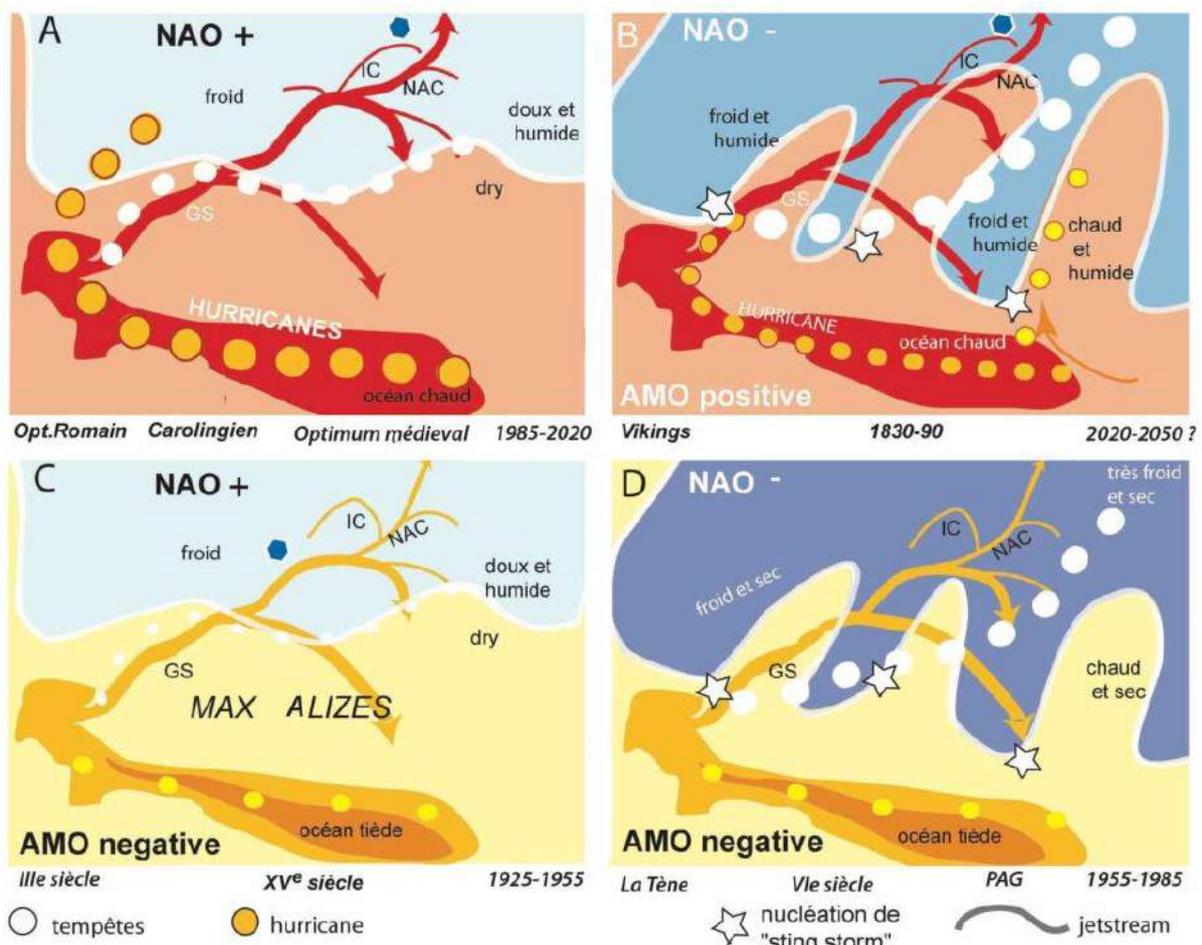
**Les périodes de canicule estivales sont très bien corrélées avec les DO et des évènements plus brefs** (cf étés « brûlants » australiens), amenant 1) une dessiccation des sols, donc un contexte favorable au ruissellement hortonien, y compris aux latitudes moyennes (40-50°N) et donc 2) des crues-éclair en fin de canicule comme celles de Bab el Oued (Alger) en 2001 et 2004, en contexte sec et très urbanisé, ou encore celles de l'Ouvèze en 1992 ou celle très récente sur les reliefs varois.



**Figure 7 : A) Stockage de l'énergie incidente solaire dans la couche superficielle de l'océan (<700 m). B) Températures de surface de l'océan (SST) en fin d'été austral avec le trajets des eaux qui alimentent le Gulf Stream (en blanc), équateur en noir, en relation avec les vents de surface (images Earth Observatory, NASA)**

L'océan austral réchauffé induit une évaporation importante générant des moussons d'été exceptionnelles, associées à des cyclones puissants sur l'Asie notamment en Inde, en Chine et au Japon ou des hurricanes aux SE des US en 1996-1997-1998, 2017-2018-2019 et surtout 2020. En Europe, la chaleur et l'humidité sont transmises à nos latitudes principalement via le Gulf Stream et les dépressions cycloniques qui se forment à son passage ou plus au Sud, au niveau de la zone de convergence intertropicale des vents (ICTZ), localisée à l'aplomb des masses océaniques les plus chaudes. L'ICTZ remonte vers le Nord lorsque l'Arctique se réchauffe. Les dépressions cycloniques ont leur trajectoire sous contrôle du Jet Stream (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2014), amenant des pluies ou des chutes de neige exceptionnelles sur l'Europe Occidentale (1999-2000, 2004-2005, 2013-2014, 2018-2021).

Pour l'Europe du Sud, de la Grèce à l'Espagne et pour le Nord du Maghreb, l'impact du forçage par le vent solaire induit en plus un réchauffement spécifique de la Méditerranée et donc une évaporation soutenue, qui se superpose au passage des dépressions cycloniques océaniques comme pour les périodes 2003-2004 ou 2018-2019-2020. L'ondulation N-S du Jet Stream en période d'Oscillation Nord Atlantique (NAO) négative favorise la remontée d'air chaud saharien et le blocage des masses nuageuses sur les premiers reliefs au Nord ou au Sud de la Méditerranée, y amenant des « déluges » cévenols... comme pour la crue-éclair de Bab El Oued en 2004.



## Tempétuosité et déluge

Cela fait 30 ans (1/2 oscillation AMO positive) que la NAO est globalement positive (Fig.8A). La fréquence des grosses tempêtes s'est élevée en Bretagne depuis 1970 (Fig. 9; Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2014). **Ces oscillations sont comme l'œuf et la poule : elles sont considérées généralement comme le moteur de notre météo et non la conséquence d'un autre forçage, par exemple, dérivé de l'activité du soleil. Ces variations de NAO sont incluses dans une cyclicité proche de 60 ans, l'Oscillation Multidécadale Atlantique ou AMO.**

**Nous sommes actuellement en AMO positive, un peu après le maximum, l'océan Austral est exceptionnellement chaud et l'activité solaire particulièrement importante (Fig.8a).** Les tempêtes tropicales sont puissantes, donnant des ouragans ou hurricanes qui touchent surtout la côte américaine, des typhons dans le SE Asiatique.

Lorsque dans ce contexte, la NAO devient négative, ces ouragans traversent l'Atlantique ou peuvent directement remonter sur l'Europe, sur le rail des puissantes ondulations du jetstream, comme cela a été le cas pour Xynthia en 2010 ou l'ouragan de 1987, tous deux précédés d'air tropical (Fig.8B).

En AMO négative, l'océan Austral est tiède sous contrôle de l'activité solaire (minima solaires de 1905-25 et de 1950-1970). En AMO négative, le contraste thermique sur l'Atlantique est réduit alors que l'Arctique est peu refroidi (vent /activité solaire temporairement élevée). C'est une période calme comme celle qui a présidé à la conquête de l'Amérique au 15-16ième siècle (Fig.8C).

Le contraste thermique est plus important, lorsque l'AMO et la NAO sont négative, pendant les Minima solaires : des grosses tempêtes cycloniques traversent l'Atlantique de Terre Neuve à l'Europe comme pendant le Petit Âge glaciaire ; les tempêtes tropicales sont faibles (Fig.8D).

Pendant ces périodes de 30 ou 60 ans, la NAO peut s'inverser, notamment sous l'impact du vent solaire comme ces trois dernières années qui réchauffe d'abord l'Arctique (Van Vliet, 2020).

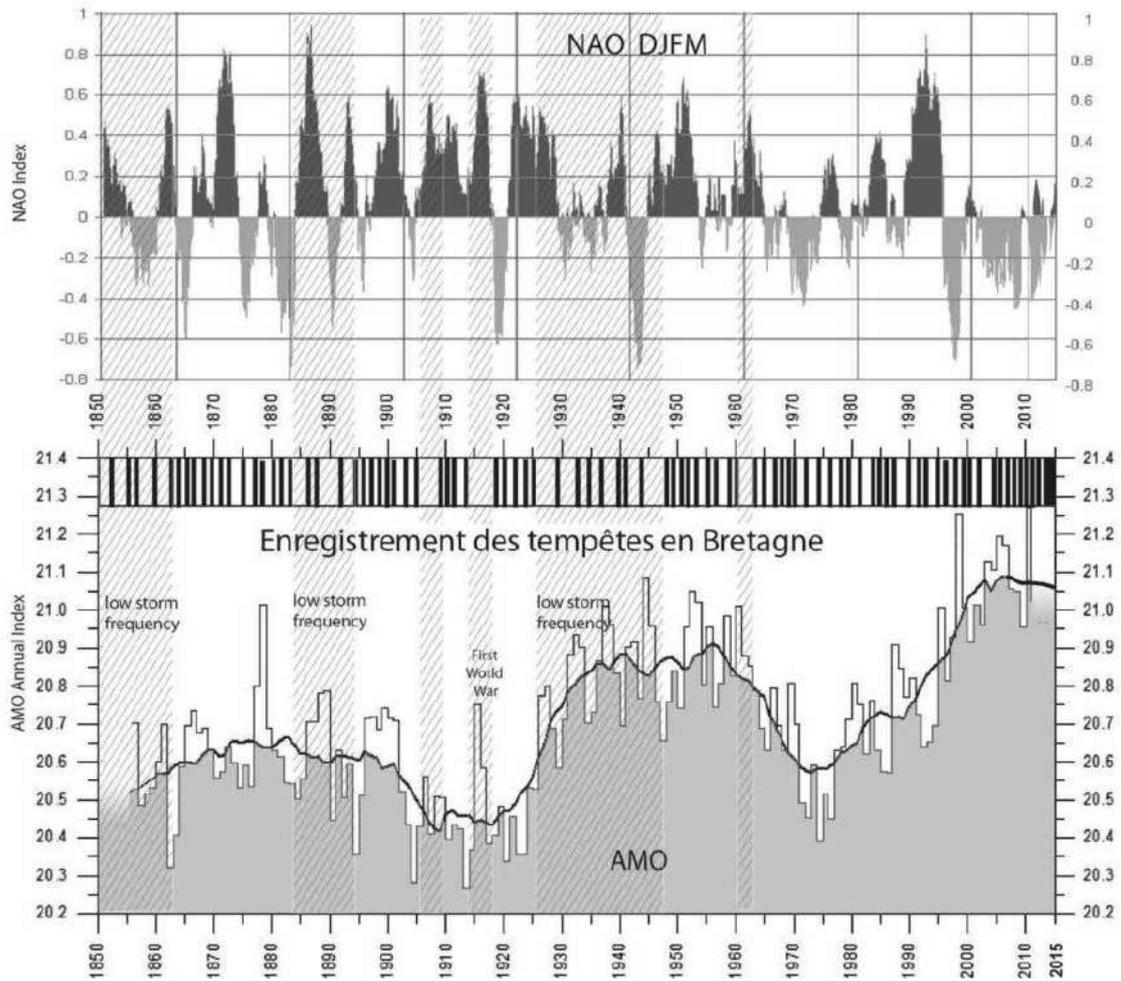
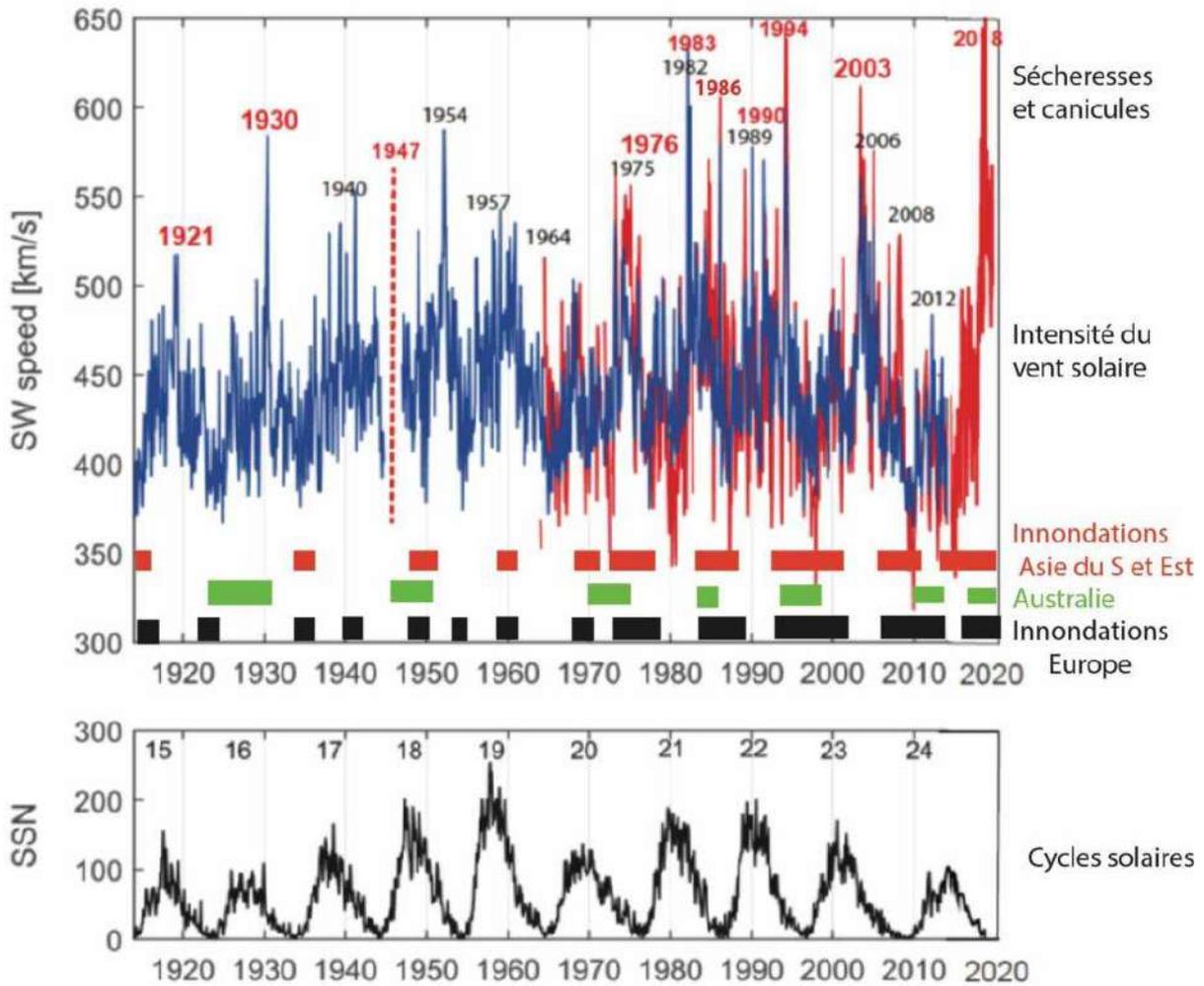


Figure 9 : Comparaison de la tempéuosité enregistrée dans les archives en Bretagne , l'index NAO hivernal et l'AMO (sources CRU East Anglia, UK) (mis à jour de Van Vliet-Lanoë et al., 2014). L'AMO n'a pratiquement pas baissé en 2020.

Après les pics d'activité solaire des années 1950-1965 (18 et 19) et deux plus faibles, de 1980 à 1995 (21 à 23; Fig.10), le stockage thermique dans l'océan Austral est puissant, toujours transmis vers l'Arctique dans les eaux de surface de l'océan (recul estival de la banquise) et en contraste marqué avec un refroidissement en cours de l'Arctique pour raison de déficit en insolation (cycle solaire 24 et transition 24/25). Ce contraste thermique est générateur de dépressions pluvieuses évoluant en tempêtes selon les caractéristiques de la NAO, issues du comportement d'un jet stream polaire très instable. Le nombre des dépressions augmente actuellement pour atteindre une fréquence quasi-dienne (2013-2015, 2019-2020) comme pendant le Petit Age glaciaire, générant par un vent soutenu une houle puissante qui accentue les échanges thermiques directs et de vaporisation entre l'océan et l'atmosphère, aggravant leur intensité et les précipitations associées.



**Figure 10 :** Comparaison entre d'intensité des vents solaires, les cycles solaires et les sécheresses (en noir et rouge pour les plus puissantes). Image BVVL 2020. Les dates des sécheresses et canicules, comme celles des inondations ont été réalisées sur compilations internet. Vents solaires (voir [ici](#)).

On est en droit de se demander quel est le rôle de l'activité solaire dans les autres zones sensibles aux rives de l'océan Austral. Une comparaison (Fig.10) des grandes crues publiées en Asie (Inde, Chine, Japon pour les séries les plus longues) démontrent le parallélisme attendu entre les forçages solaires directs (cyclicité à 11 ans et vents solaires), pour les événements générés dans l'hémisphère Nord – en Europe et – ceux indirects, générés par la mousson d'été (Océans Indien et Pacifique). Le tout est en association avec une migration de l'ICTZ et des jetstreams vers le Nord et une AMO positive depuis 1975. L'Australie, en rive sud de l'océan Indien/Austral, répond moins bien, mais néanmoins un parallélisme semble ressortir. Les crues avant 1975 semblent corrélées avec la fin des cycles à 11 ans du soleil (Fig.10).

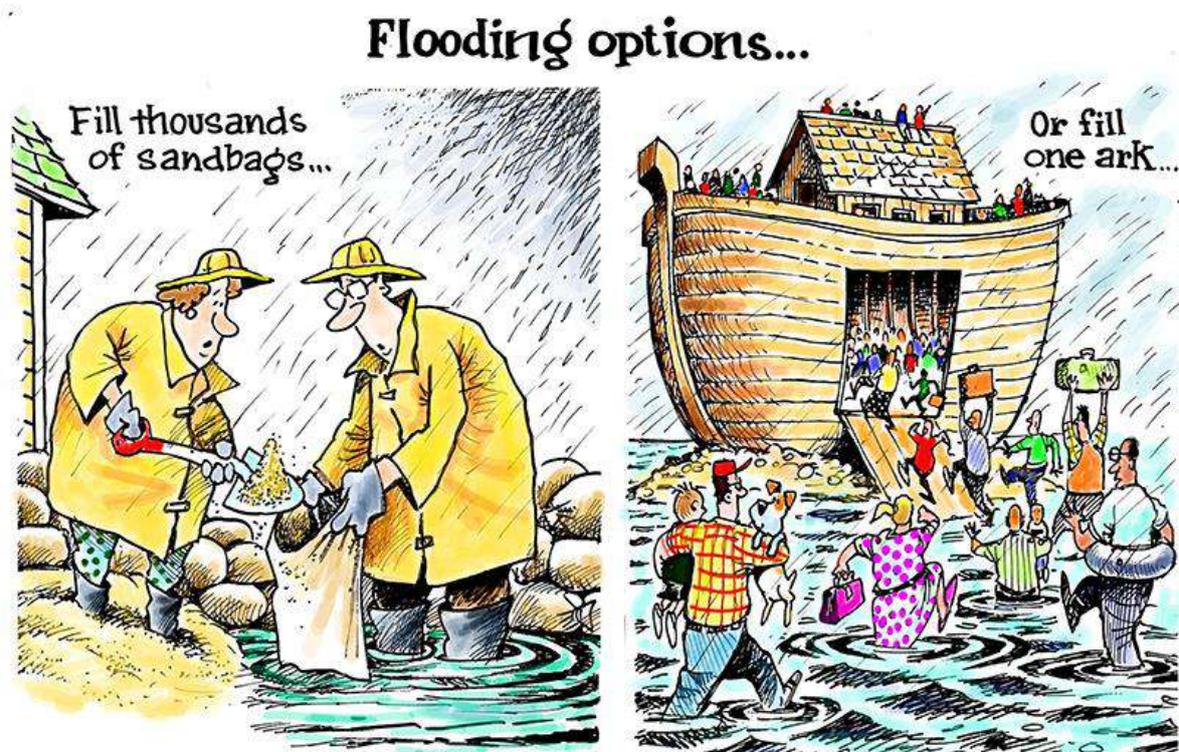
**Par conséquent, l'enchaînement de tous ces processus issus de l'activité solaire amène, via les vents géostrophiques, sur l'hémisphère le plus peuplé de notre planète de fortes précipitations suivies de crues exceptionnelles exacerbées par la transformation de nos sols par l'Homme. Les gaz à effet de serre ne sont en rien responsables.** L'impact des changements climatiques actuels sur les événements extrêmes de précipitations ne peut pas être évalué à partir des simulations numériques de scénarios de changement climatique (Planton et al., 2005).

## CONCLUSIONS

Les crues ont toujours existé. L'impact d'un réchauffement climatique sur les précipitations, et donc sur l'apparition de crues exceptionnelles, est évident et n'est pas un phénomène neuf.

Néanmoins la menace d'un déluge sous contrôle des précipitations est bien réelle depuis 1975 et surtout 1997, en conséquence du réchauffement actuel lié à l'activité essentielle du soleil. Cette situation risque de s'accroître en raison de l'inertie thermique de l'océan d'une part et, d'autre part, du refroidissement des zones polaires généré par des cycles solaires calculés comme très faibles (24-25-26 ; Yousef *et al.* 2009). Cette accentuation devrait donc durer plusieurs décennies en fonction de l'évolution de l'activité solaire réelle (Van Vliet, 2020). Certains parlent de perturbations jusqu'en 2050 (Zharkova *et al.*, 2015 ; Van Vliet, 2020).

Depuis la Néolithisation, les pratiques agricoles sont responsables pour beaucoup de la brutalité et de l'intensité de la montée en crue en réduisant le couvert forestier. L'urbanisation galopante imperméabilise les surfaces, concentrant le ruissellement et contraignant également dans l'espace une majorité des cours d'eau. Ces aménagements obligent les eaux à envahir des zones aujourd'hui urbanisées qui jadis servaient de zones d'expansion pour les crues, ce malgré une connaissance des mécanismes en jeu et les outils législatifs existants. Le changement climatique naturel, sous contrôle de la qualité de l'insolation a certainement sa part de responsabilité (crues millénaires), mais la gestion anthropique de l'aménagement des bassins-versants est la responsable principale des catastrophes hydrologiques récentes (crues centennales et décennales). A l'Homme de se prendre en main.



DAVE GRANLUND © [www.davegranlund.com](http://www.davegranlund.com)

Sur la suggestion amicale de Dave Granlund

Bibliographie

## LA METEOROLOGIE

Bond, G. et al. ,2001. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science* 294, 2130–2136.

Damé, L. (2013). The Space Weather and Ultraviolet Solar Variability (SWUSV) Microsatellite Mission. *J. Advan. Res.* 4, 235–251.

Dunne, E. M.; Gordon, H.; Kurten, A.; Almeida, J.; Duplissy, J.; Williamson, C.; Ortega, I. K et al. 2016. « Global atmospheric particle formation from CERN CLOUD measurements ». *Science*. 354 (6316): 1119–1124.

Erhart, H.1951. La genèse des sols en tant que phénomène géologique. Esquisse d'une théorie géologique et géochimique. Biostasie et rhéxistasie. Masson, Paris 90 p, autres éditions en 1956, 1967 (177 p.)

Gaume, E., Borga, M., Llassat, M.C., Maouche, S., Lang, M., Diakakis, M., 2016, Mediterranean extreme floods and flash floods (Sub-chapter 1.3.4). In Allenvi (Ed.) *The Mediterranean Region under Climate Change. A Scientific Update*, Coll. Synthèses, IRD Editions, pp. 133-144

Lamb, H.H .and Frydendahl , K. 2005 . *Historic Storms of the North Sea, British Isles and Northwest Europe*. Cambridge University Press, (UK), 228 pp.

Lang M.; le Point 6/10/2020 [https://www.lepoint.fr/environnement/plongee-dans-deux-siecles-d-inondations-en-france-06-10-2020-2395220\\_1927.php](https://www.lepoint.fr/environnement/plongee-dans-deux-siecles-d-inondations-en-france-06-10-2020-2395220_1927.php)

Planton S, Déqué D., Douville H., Spagnoli B.S. 2005. Impact du réchauffement climatique sur le cycle hydrologique *Comptes Rendus Geoscience* [337, 1–2](https://doi.org/10.1016/j.crge.2005.08.001), 193-202.

Putnam A.E and Broecker, WA 2017 Human-induced changes in the distribution of rainfall. *Science Advances* 2017;3:e1600871 <https://advances.sciencemag.org/content/advances/3/5/e1600871.full.pdf>

Rasmussen, T.L., Thomsen, E., Moros, M. 2016. North Atlantic warming during Dansgaard-Oeschger events synchronous with Antarctic warming and out-of-phase with Greenland climate. *Nature Sci. Rep.*, 6:20535, doi: 10.1038/srep20535 .

Svensmark H; Bondo T.; Svensmark J. 2009. Cosmic Ray Decreases Affect Atmospheric Aerosols and Clouds. *Geophysical Research Letters*. 36 (15): L15101.. doi:10.1029/2009GL038429 *cience* ®), [Google Scholar]

Svensmark, H., 2019: Force Majeure The Sun's Role In Climate Change , 25 p. ISBN978-0-9931190-9-5©Copyright 2019 The Global Warming Policy Foundation <https://www.thegwof.org/content/uploads/2019/03/SvensmarkSolar2019-1.pdf>

Van Vliet Jean 2019. Les-vagues-de-chaleur-mondiales-récentes-sont-correlées-a-un-cycle-solaire-exceptionnel *Science-Climat-Energie* <http://www.science-climat-energie.be/les-vagues-de-chaleur-mondiales-recentes-sont-correlees-a-un-cycle-solaire-exceptionnel-24/>

Van Vliet Jean, 2020. Le-20<sup>ème</sup>-siècle-a-été-anormalement-chaud-mais-le-21<sup>ème</sup>-siècle-revient-à-la-normale-1-2/ *Science-Climat-Energie* <https://www.science-climat-energie.be/2020/08/14/le-20eme-siecle-a-ete-anormalement-chaud-mais-le-21eme-siecle-revient-a-la-normale-1-2/> xxxx <http://www.science-climat-energie.be/2020/08/22/le-20eme-siecle-a-ete-anormalement-chaud-mais-le-21emesiecle-revient-a-la-normale-2-2/>

Van Vliet-Lanoë,B. 2020. Au feu la planète . Mythes, Mancies & Mathématiques <https://mythesmanciesetmathematiques.wordpress.com/2020/02/03/au-feu-la-planete/>

Van Vliet-Lanoë, B. 2018. Le réchauffement climatique actuel: une évolution thermique naturelle au forçage oublié. *Mythes, Mancies & Math.*, WordPress, 3/03/2018. <https://mythesmanciesetmathematiques.wordpress.com/2018/03/05/le-rechauffement-climatique-actuel-une-evolution-thermique-naturelle-au-forçage-oublie/>

Van Vliet-Lanoë B. & Guillocheau F,1995. Evolution de l'enregistrement pédosédimentaire depuis 150 ka en France du NO et en Belgique: biorhéxistasie et bilans sédimentaires. *C.R.Acad.Sc.* 320,IIa, 419-426

Van Vliet-Lanoë B., Penaud A., Henaff A. *et al.* 2014. Middle to late Holocene storminess in Brittany (NW France). Part II: The Chronology of Events and Climate Forcing. *The Holocene* 24: 434-453.

Van Vliet-Lanoë B., Goslin J., Hénaff A., *et al.*. 2016. The Holocene formation and evolution of coastal dune ridges, Brittany (France). CR Géosciences.348, 462-470.

Van Vliet-Lanoë B., Helluin M., Péllerin J. & Valadas B, 1992. Soil erosion in Western Europe: from the Last Interglacial to the Present. IN « *Past and Present Erosion* », M.Bates & J.Boardman ed., Oxbow. Publ. 101-114.

Yousef S. SM. Amin, W. Abdel-Sattar 2009. The Shrinking of the Heliosphere Due to Reduced Solar Wind. International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA) 2nd Symposium: Solar Wind – Space Environment Interaction December 4th–8th, 2009, Cairo, Egypt. DOI: 10.1012/S120027852019 <https://www.researchgate.net/publication/322551815> *The Shrinking of the Heliosphere Due to Reduced Solar Wind* Zharkova VV, Shepherd SJ, Popova E, et al. Heartbeat of the sun from principal component analysis and prediction of solar activity on a millennium timescale. Sci Rep. 2015;5:15689. <https://www.ni>

## 4. Déluge et changement climatique (2/2)

Mis en ligne SCE : 11.01.2021

### La façade océanique

Les inondations en zones côtières sont souvent très meurtrières parce que moins récurrentes que les inondations fluviales ou de nappes. Ces dernières se combinent très souvent avec les aléas submersifs côtiers. Ils sont actuellement attribués à tort au relèvement du niveau marin sous contrôle du changement climatique.

Nous ne traiterons pas de la génération des conditions climatiques favorables aux tempêtes et précipitations, ce qui a été présenté dans la [partie 1/2](#) (voir SCE), la part continentale. Nous regarderons les différents phénomènes susceptibles d'accentuer les inondations par débordement / submersion et leur contrôle par la géologie et l'évolution du climat. L'évolution du trait de côte, de son aménagement et de son urbanisation sont également des facteurs très importants.

### 4.1 Les mécanismes

#### 4.1.1 Le rôle des marées

Le rôle de la marée ne change pas à notre échelle, il est contrôlé par l'attraction entre la masse de la Terre et surtout celle du tandem Lune-Soleil, ce qui amène cycliquement des marées d'équinoxes plus puissantes que de coutume. Cette variation cyclique de 18 ans 11 jours et 8 heures est appelée le cycle de Saros. Lors des marées d'équinoxe, le coefficient de marée (ce coefficient résulte d'un calcul qui prend notamment en compte la hauteur de la pleine mer et le niveau moyen de la mer) atteint généralement la valeur de 105 tous les 4 ans (Fig.1 A). **Des submersions sont souvent associées aux très grandes marées à coefficient 119**: exemples de 2011, 2015, 2019, 2055 ... C'est ce qui s'est passé le 21/03/2015, heureusement, par temps très calme. Un coefficient de 120 est même attendu pour le 25 mars 2073. A noter également que les pics de précipitations sont décalés d'un demi-cycle de marée semi-diurne par rapport à la haute mer. Il pleut moins souvent à marée basse en Bretagne ou en Irlande ! **Ces variations d'amplitudes sont modulées par la cyclicité à 60 ans de l'AMO** (oscillation multidécadale atlantique) (Fig.1B).

L'augmentation de la fréquence des événements climatiques avec tempêtes depuis 1975 (voir [partie 1/2](#) SCE, Figs.5, 9) correspond à une augmentation des hauteurs d'eau enregistrées au marégraphe de Brest (fig.1B ; marnage et surcote de tempête, voir §1.3 ).

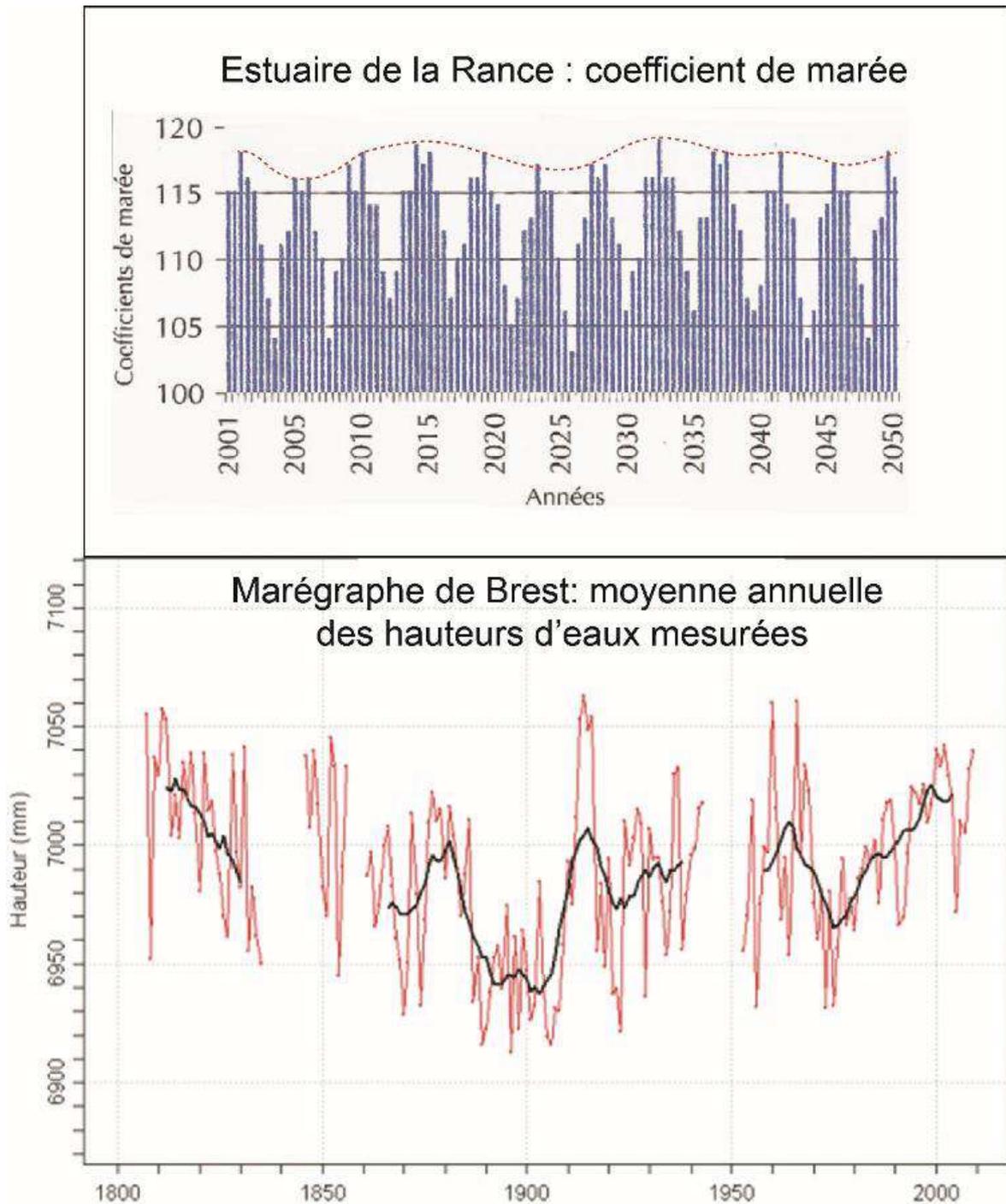


Fig. 1 A) Evolution du coefficient de marée dans l'estuaire de la Rance avec une cyclicité lunaire de 4 ans et 155 jours sur laquelle se superpose le cycle Saros (18 ans , 11 jours, lune+soleil). B) Variations cyclique des moyennes annuelle de hauteur d'eau à Brest, avec une quasi-cyclicité à 60 ans (AMP+ Saros). Sources : SHOM.

#### 4.1.2 La subsidence

En contexte littoral, les inondations sont souvent générées en période de fortes tempêtes, dans des secteurs subsidents, comme les grands deltas (Pays-Bas ou Bangladesh), ou certaines îles du Pacifique.

Cette subsidence est également entretenue par la charge des sédiments apportés par les fleuves, ce qui infléchit la lithosphère. Ceci explique pourquoi certains deltas régressent actuellement, inondant

des secteurs agricoles, les apports sédimentaires restant bloqués en amont dans des barrages hydroélectriques, comme c'est le cas du Nil ou du Mississippi.

Cette subsidence peut être également entretenue par la compaction des dépôts sédimentaires par les pompages d'eau par l'homme, comme c'est le cas aux Pays Bas, où les substrats communs sont les tourbes et les vases, très riches en eau. L'affaissement est actuellement de l'ordre de 10 m aux Pays Bas depuis le Moyen Âge, mais s'est accéléré avec l'urbanisation et l'industrialisation des années post-1945. C'est également le cas pour la zone de Hong-Kong (delta de la Rivière des Perles) complété par la surcharge des buildings.

Une dernière cause de subsidence est le pompage pétrolier ou gazier qui entraîne automatiquement un affaissement progressif du sol, comme c'est le cas du Mississippi à la Nouvelle Orléans (Fig.2 C). Ce secteur est en fait cumulatif de la subsidence naturelle, de la perte de sédiments par les barrages sur le Mississippi, des pompages d'eau pour alimenter l'agglomération et surtout des pompages pétroliers.

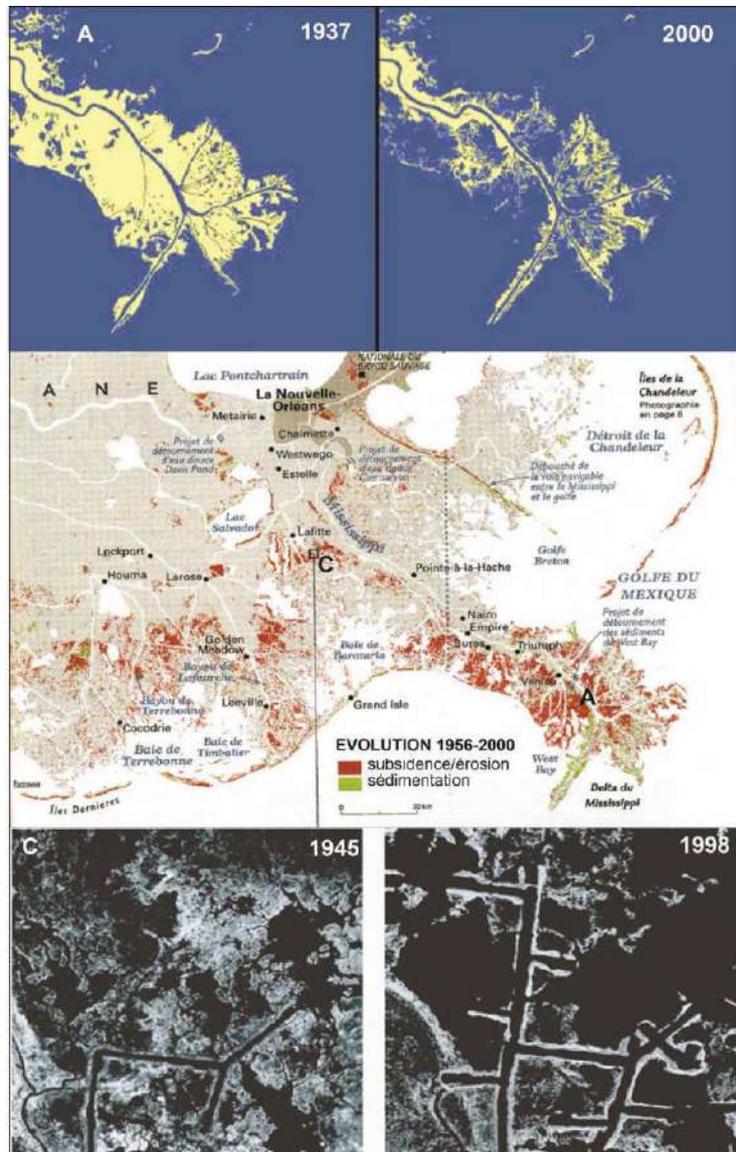


Fig. 2 Subsidence du delta du Mississippi (Coastal Protection and Restoration Authority) : naturelle (tassement), diminution de l'apport sédimentaire (A : Kemp et al., 2014), pompages des aquifères et exploitation des gisements pétroliers (C). Cette subsidence à long terme a créé le lac Pontchartrain et les marais surbaissés qui ont permis à l'onde de tempête de se propager jusqu'à la Nouvelle Orléans.

### 4.1.3. La houle et la surcote de tempête

A la côte, en plus des inondations liées à la remontée de la nappe, très aisée en milieu littoral et aux inondations fluviales (voir [partie 1/2](#) SCE), le facteur dominant pour l'inondation et l'érosion est la houle. Elle est générée par le vent créé par la différence de pression entre 2 points, en parallèle avec les isobares atmosphériques. Plus le gradient barométrique est puissant, plus le vent est fort. Plus le vent souffle longtemps dans une direction sur une grande distance, le fetch, plus la surface de l'eau acquiert un mouvement oscillatoire puissant, la houle. La houle est caractérisée par une **longueur d'onde** proportionnelle au carré de la période, de 1 m à plus d'1 km et par une **amplitude**, la hauteur des vagues. Les houles atlantiques, pacifiques et périantarctiques sont puissantes et leur longueur d'onde entre deux vagues est au moins hectométrique. Lors de l'hiver 2013-2014 (35 tempêtes), la houle au large de la Bretagne avait une amplitude plus de 15 m et atteignait pendant plusieurs semaines 10 m à la côte avec une **périodicité** pouvant atteindre 25 secondes environ. Plus cette période est longue, plus l'efficacité de la houle en tant qu'agent de transport sédimentaire est efficace. D'autre part, avec l'amplitude, l'action mécanique à la côte est beaucoup plus puissante générant un impact et un déferlement des eaux mettant le sédiment en suspension et une projection des eaux chargées en sédiment, le **swach**, susceptible de dépasser la crête, des cordons littoraux ou **run up**, et de se déverser ou déborder en arrière au dos des cordons, le **washover**. Ce mécanisme est souvent facilité par une brèche, un estuaire ou... un chemin d'accès à la plage.

Ce mécanisme de débordement est un des principaux vecteurs d'inondations piégées en arrière-zone littorale, très souvent complété par la remontée de la nappe phréatique en hiver. C'est ce qui s'est passé à la Faute sur Mer, à côté de la Rochelle, lors de l'Ouragan tropical Xynthia, les 27 au 28 février 2010, aboutissant à une inondation persistant plusieurs jours.



Fig.3 La Faute sur Mer, le 28 février 2010 (images Archives Ouest France/Philippe Chérel).

Un autre facteur lié au passage de dépression tempétueuse est la **surcote ou onde de tempête**, généralement appelé « **raz de marée** ». En effet, plus la dépression est creuse, plus la pression est basse, plus elle induit un soulèvement de la masse d'eau.

Ce soulèvement se superpose très souvent avec les très hautes mers de fort coefficient (Saros). Une **surcote ou raz de marée** de > 6 m s'est formé lors de l'inondation des Pays Bas, de l'Angleterre et de l'Allemagne de l'Ouest du 31 janvier au 1<sup>er</sup> février 1953 avec un bilan très lourd aux Pays Bas : 1835 morts, 47 000 têtes de bétail perdues, 200 000 ha inondés, 3 000 maisons et 300 fermes détruites. La Belgique a aussi été atteinte avec 28 morts et de gros dégâts dont l'inondation **d'une partie d'Ostende** (2 mètres d'eau sur la Grand Place de la ville). La surcote a atteint 4 m pour l'ouragan Katrina, inondant le 29 août 2005 la ville de la Nouvelle Orléans (1836 morts, 108 milliards de dollars de dégâts) dans un secteur notoirement subsident (Fig.2), mal protégée (digues), très peuplée, et de surcroît en couplage avec une inondation fluviale du Mississippi. Elle n'atteindra que 1,50 m sur les côtes vendéennes lors du passage de l'ouragan Xynthia à marée haute, alors que celle de l'ouragan tropical du 17 octobre 1987 atteignait 1,60 m, mais à marée basse, détruisant seulement les parcs à huîtres et les ports de plaisance du Massif armoricain.

Cette onde tempête se propage à marée haute vers la côte moins rapidement qu'un tsunami, mais avec un impact dynamique assez similaire en terme d'inondation et de destructions.

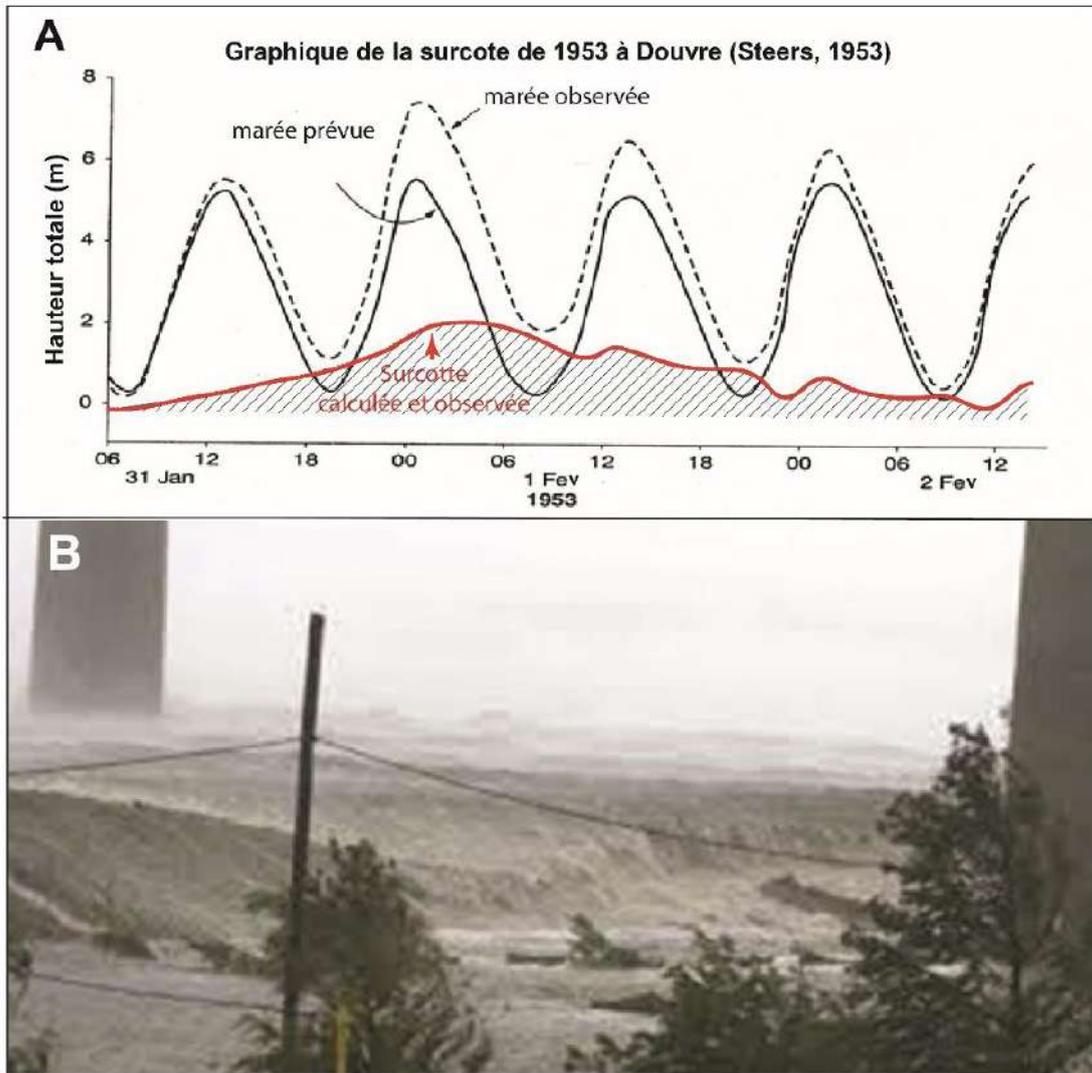


Fig.4 . A) Evolution de la marée lors de la grande tempête de 1953 (inondation aux Pays Bas) avec une surcote atteignant 2 m à Douvres et >6 m aux Pays Bas. B) Arrivée de la vague de surcote à la Nouvelle Orléans en 2005.

Enfin la houle implique une rugosité de la surface de l’océan, ce qui favorise en terme l’éjection d’embruns une accélération de l’échange thermique entre la surface de l’océan et l’atmosphère, accentuant le creusement de la dépression au large et sa transformation en ouragan, tout comme la hauteur de la surcote. Ce phénomène est particulièrement marqué si la surface de la mer est chaude (Pacifique central, Caraïbes, Gulf Stream), comme c’est le cas de l’océan austral après une période de forte activité solaire avec stockage thermique dans l’océan, exprimé par l’AMO (voir partie 1/2 SCE et Fig.5), et comme dans le cas des inondations fluviales.

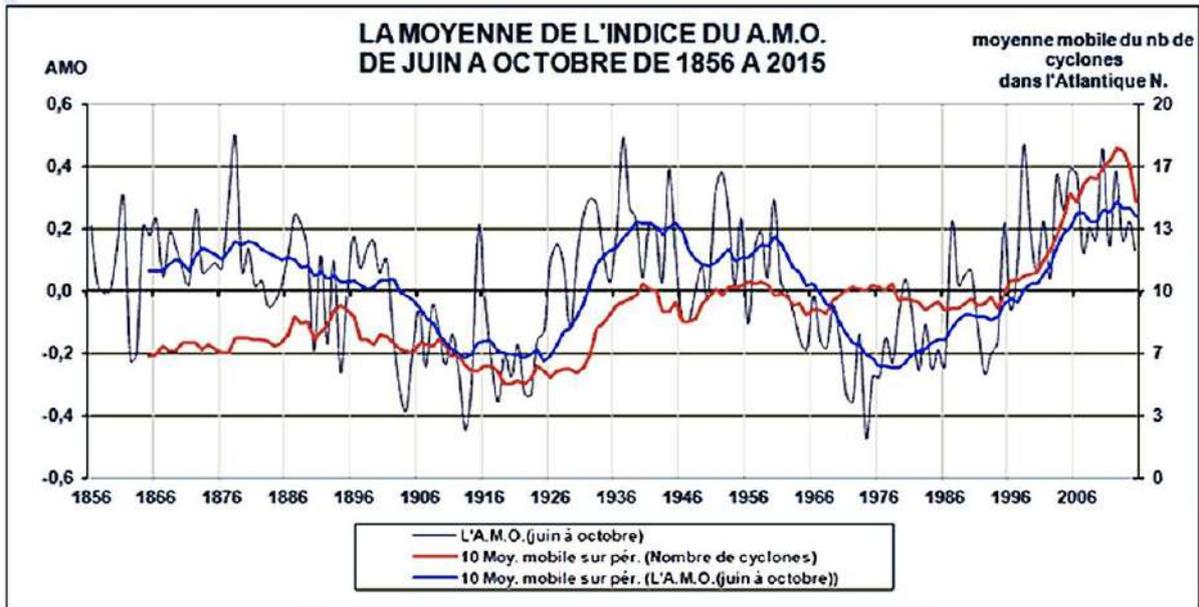


Fig. 5 Evolution de l’AMO et du nombre de cyclones dans l’Atlantique Nord (AMO [NOAA data](#), hurricanes : UNISYS WEATHER).

## 4.2 L’évolution du trait de côte, le niveau marin et l’évolution du climat

### 4.2.1 La transgression holocène et le relèvement actuel du niveau marin

Le trait de côte que nous observons actuellement est un héritage de la transgression Holocène liée à la fonte des grandes calottes glaciaires, fonte qui s’est achevée vers 6000 ans BP par la disparition de la calotte glaciaire de l’Ungava au NE du Canada, ce qui explique la présence de tourbières voire de forêts enfouies sur les bas estrans. A cette époque, le niveau marin moyen était situé vers – 5 m.

**Depuis le niveau marin a continué de monter naturellement, sans régression, à raison de 0,3 mm/an** suite à la surrection des secteurs de la croûte terrestre jadis englacés, surrection qui continue pour encore quelques millénaires. C’est ce qui est appelé **l’ajustement glacio-isostatique ou GIA**. Nous avons gagné un mètre de niveau marin depuis l’Age du Fer (1000 ans BC). Le niveau marin et le trait de côte actuels résultent donc d’une évolution relativement récente, surtout depuis l’Optimum Climatique du Moyen Âge (1000 à 1350 AD).

Depuis cette période, Jevrejeva et al. (2008) concluent à une **remontée régulière du niveau marin depuis 1700 AD**, sur la base de l’enregistrement de différents marégraphes (Amsterdam, depuis 1700, Liverpool depuis 1768 et, Stockholm depuis 1774), remontée **modulée par les périodes de minima solaires et le cycle à 60 ans**, mais **progressive et indépendamment du climat**. Ceci suggère un facteur autre que le climat et le GIA : ceci pourrait résulter d’une activité tectonique modifiant le volume disponible pour la masse d’eau actuelle de l’Océan Mondial ou une modification de la forme

du géoïde en relation avec le forçage tidal du système solaire. C'est ce que semble suggérer une activité volcanique limitée (Jevrejeva et al., 2006; Church and White, 2006), bien que ces données soient en partie biaisées par l'accroissement de la population mondiale, les voies maritimes de navigation découvertes du XVI<sup>e</sup>s et la plus grande circulation des informations.

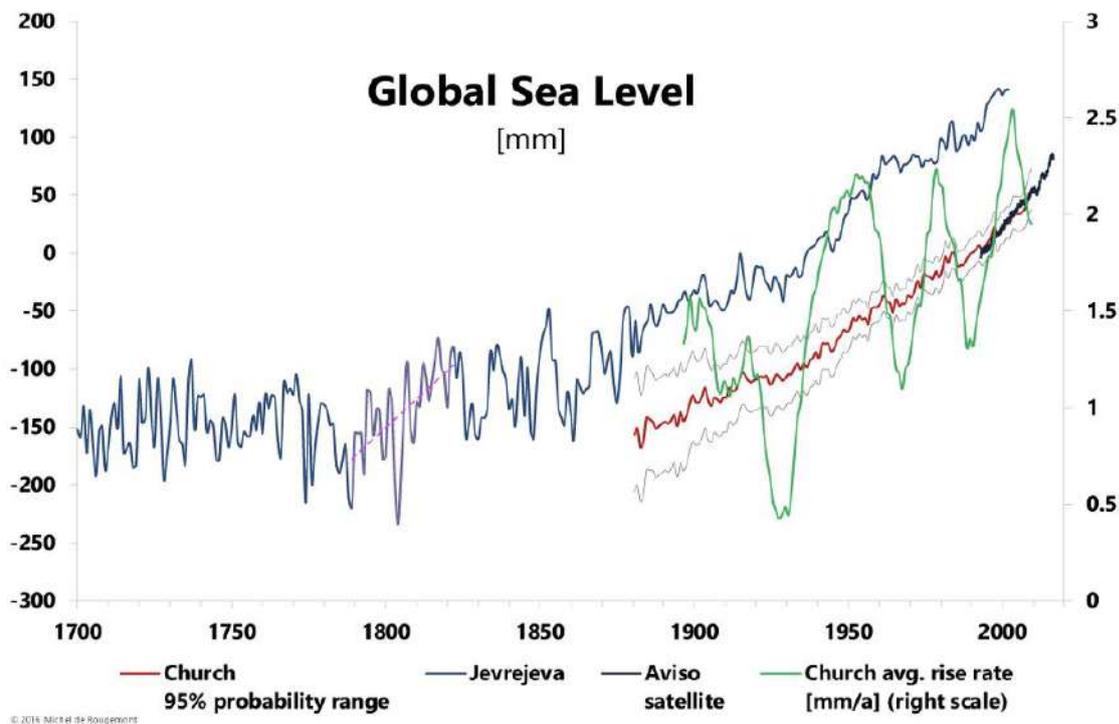


Fig.6 Evolution du niveau marin depuis 1700 (Jevrejeva et al., 2014). Barres vertes (autour de 1800) : périodes de relèvements plus rapides que l'actuel.

**La remontée la plus rapide du niveau marin au XX<sup>e</sup> siècle a été observée entre 1920 et 1950, et non à partir de 1960 comme le propose le GIEC.** L'augmentation de l'activité volcanique depuis quelques années par exemple le long de la ceinture du feu du Pacifique pourrait signer un ralentissement. Enfin **les données altitudinales satellitaires sont difficilement significatives à l'état moyenné** étant donné l'hétérogénéité de la dilatation thermique à la surface du globe (Fig. 7C) et ... l'importance de la marge d'erreurs, plus grande que la mesure à effectuer.

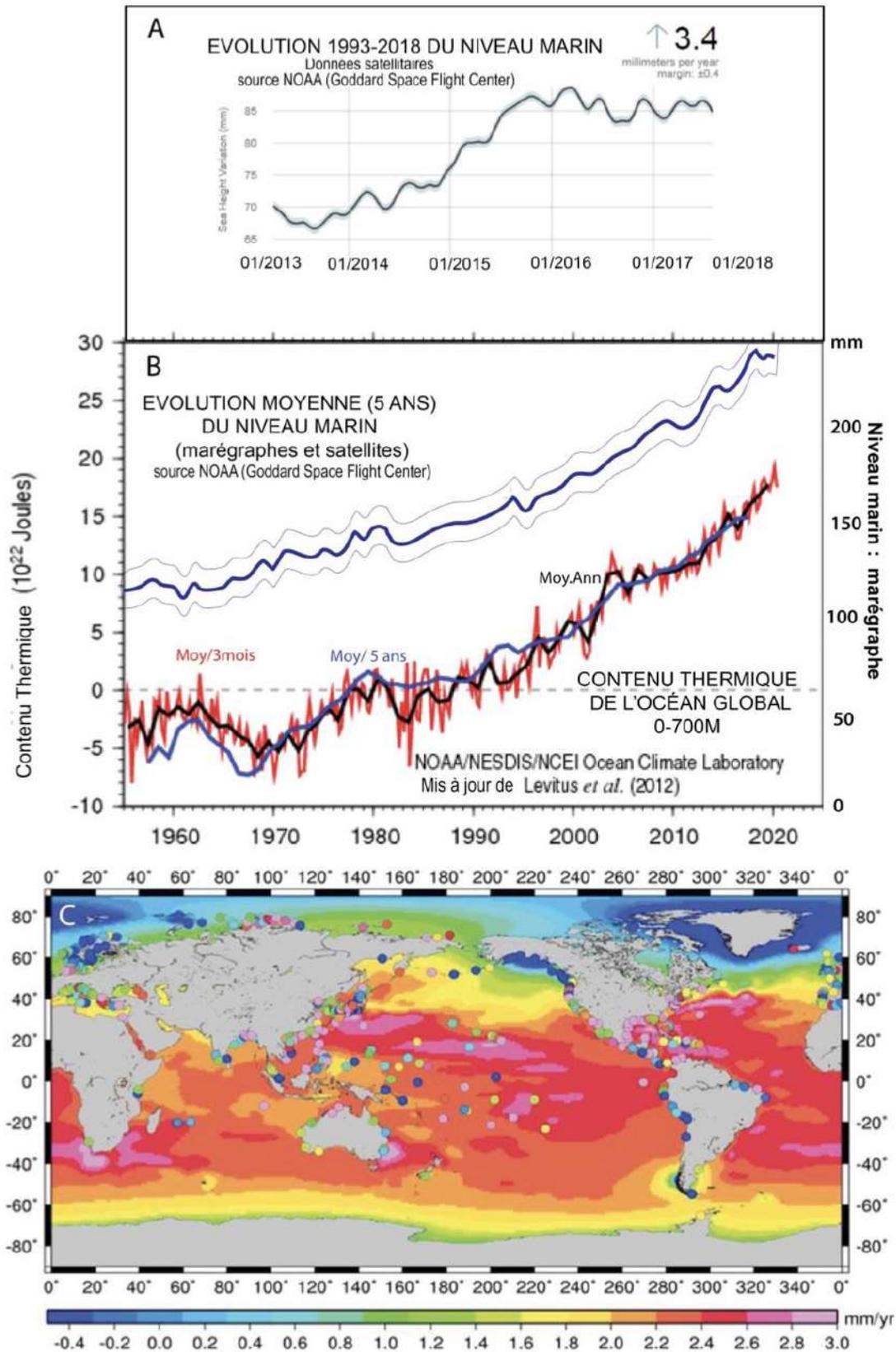


Fig.7 A-B) Evolution récente du niveau de la mer mondiale (A) avec un zoom sur la période 2013-2018 (A), montrant un plateau dans le relèvement du niveau marin après le début de la baisse de l'activité solaire (2010) et un parallélisme étonnant entre le relèvement et le stockage thermique dans l'océan, C) Expansion thermique de l'océan austral modélisée à partir des données régionales disponibles 1900-2007 (dilatation thermique, marégraphes; satellites et GIA . Niveau moyen estimé pour la période:  $2,2 \pm 0,57$  mm/an. Source: Shum & Kuo (2009).

La majorité des îles du Pacifique en danger de submersion sont en fait des atolls coralliens, donc des constructions biologiques sur des édifices volcaniques néogènes (Ere Cénozoïque), subsidents sous le poids des basaltes et éventuellement le refroidissement des magmas profonds. D'autre part, ces atolls ont été colonisés entre 4000 et 200 BC, c'est-à-dire lorsque le niveau marin était entre 1 et 4 m plus bas que l'actuel. Si ces îles émergeaient, c'est qu'elles étaient constituées de constructions coralliennes au moins du Dernier Interglaciaire (120 000 ans), en équilibre avec un niveau marin 4 à 6 m plus haut que l'actuel. Leur localisation au sein de l'Océan Austral les soumet actuellement à une élévation accentuée du niveau marin en raison de la dilatation thermique (+4°C) de cet océan en période d'activité solaire importante et notamment d'évènements Niño majeurs. Pour ces régions, le relèvement modélisé multiparamètres (Cazenave et al., 2010) atteint 2,7 m entre 1900 et 2007. **Ce relèvement est bien de nature climatique mais il est 100% naturel.** Le relèvement récent du niveau marin n'a qu'un faible impact par rapport à l'intensité de la houle, à l'augmentation de la température de l'océan austral et de l'anthropisation du trait de côte : il atteint en Europe environ 50 cm depuis 1840 en relation essentielle avec la dilatation thermique de l'océan (50 % de la hausse observée), la fonte des glaciers n'intervenant que pour moins de 25% (Cazenave et Berthier, 2010).

Le relèvement récent du niveau marin n'a qu'un faible impact par rapport à l'intensité de la houle, à l'augmentation de la température de l'océan austral et de l'anthropisation du trait de côte : il atteint en Europe environ 50 cm depuis 1840 en relation essentielle avec la dilatation thermique de l'océan (50 % de la hausse observée), la fonte des glaciers n'intervenant que pour moins de 25% (Cazenave et Berthier, 2010).

#### 4.2.2 Evolution temporelle du trait de côte et le budget sédimentaire

Lors que le niveau marin monte, même lentement, il repousse vers la terre **les cordons transgressifs de galets et de sables, généralement au détriment des terres, récemment cultivées** (pour l'essentiel en 3000 ans, soit un quart de la durée de l'Holocène).

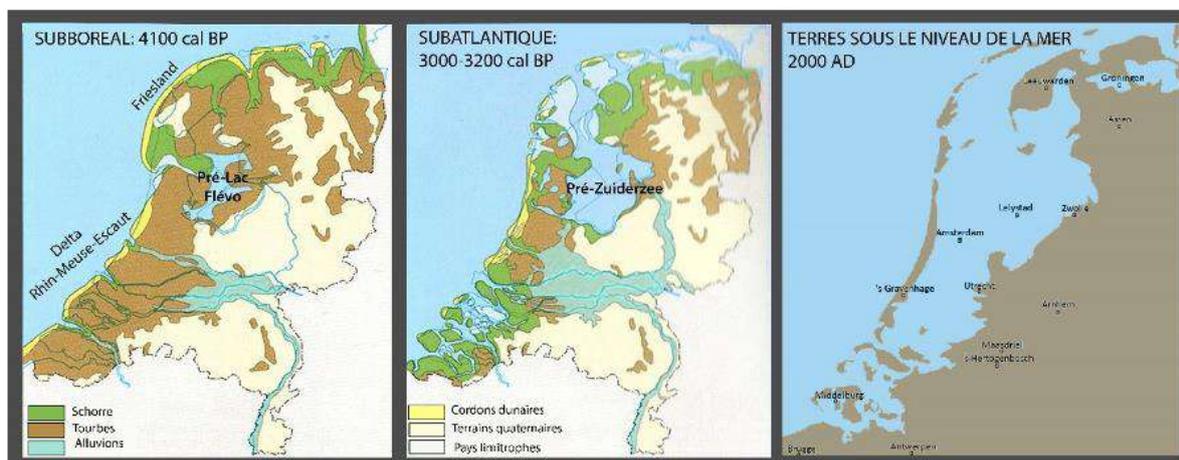


Fig.9 Evolution du trait de côte aux Pays Bas et subsidence

Les constructions sédimentaires littorales sont favorisées par l'apport des fleuves et donc par l'érosion en milieu continental (rhexistasie anthropique, voir [partie 1/2](#) SCE). Le défrichement, la mise en culture depuis surtout l'Âge du Bronze, ont fourni plus de sédiments à la côte que lors des interglaciaires précédents, permettant la construction de grands cordons littoraux comme ceux de la Frise-Côte belge, de la Picardie, de la baie d'Audierne ou de l'Aquitaine, du Sud de la Baltique, ou le long du littoral méditerranéen. Les zones d'engraissement et d'érosion évoluent avec les vents

dominants et les courants littoraux, variables au cours des siècles. Une houle oblique à la côte favorise un transit latéral du sable comme c'est le cas à la côte belge ou en Aquitaine. Ce transit pourra être bloqué localement par des constructions anthropiques (digues, brise-lame etc..) favorisant des engraissements ou démaigrissements locaux fragilisant la côte vis-à-vis des tempêtes.

Néanmoins, le monde moderne a besoin de granulats et de sables, notamment pour la construction urbaine. **L'exploitation anthropique des sables en avant-côte et dans le lit aval des fleuves réduit considérablement le budget sédimentaire**, resté positif jusqu'au XVIIIe siècle. L'exploitation de carrières de sables dans les cordons dunaires affaiblit également nos défenses côtières naturelles. Cette exploitation a perduré en Europe de l'Ouest jusque dans les années 1980, puis a été interdite. Par contre dans les pays en voie de développement, cette exploitation est toujours très active, comme au Maroc, sur **les atolls à ressource sableuse réduite** ou dans les **grands deltas situés à proximité des mégapoles**.

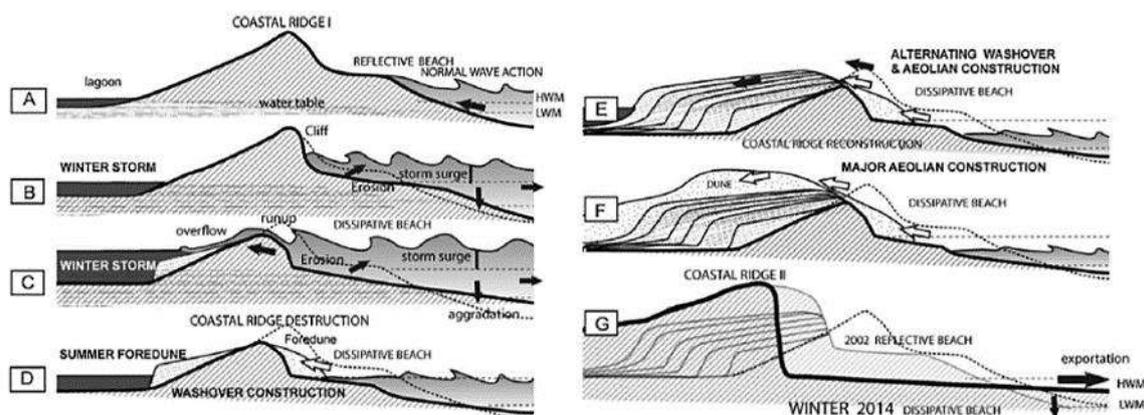


Fig.10 Formation et structure des grands cordons littoraux en Bretagne depuis l'époque romaine (Van Vliet-Lanoë et al, 2016a.)

Une **grande majorité des cordons littoraux protecteurs se sont construits depuis le Subboréal (5500-4000 cal BP)**, plus particulièrement **lors de l'Optimum Romain (200 BC-200 AD) et l'Optimum du Moyen Âge (1100-1300 AD)**, comme le montrent les datations radiocarbone et par thermoluminescence (Meurisse-Fort, 2019 ; Goslin et al., 2018 ; Van Vliet-Lanoë et al, 2014, 2016a et 2016b). C'est également le cas des cordons littoraux de l'Océan Arctique comme celui de Shishmarev en Alaska, daté de 1000 AD, dont le recul est attribué à la fonte du pergélisol et au réchauffement climatique, alors qu'il résulte de l'augmentation de la fréquence des tempêtes sur la glace de mer. **Les tempêtes et les inondations ont toujours existé. Les soi-disantes régressions du niveau marin aux « Dunkerquiens » (début Holocène) et du Subboréal (4000 BC) sont en fait la trace de chenaux tidaux creusés lors des périodes de tempêtes majeures, tempêtes connectées aux cycles de Bond associés à des minima d'activité solaire** comme c'est actuellement le cas depuis **2010** (voir partie 1/2 SCE et Van Vliet-Lanoë et al., 2014 et 2015).

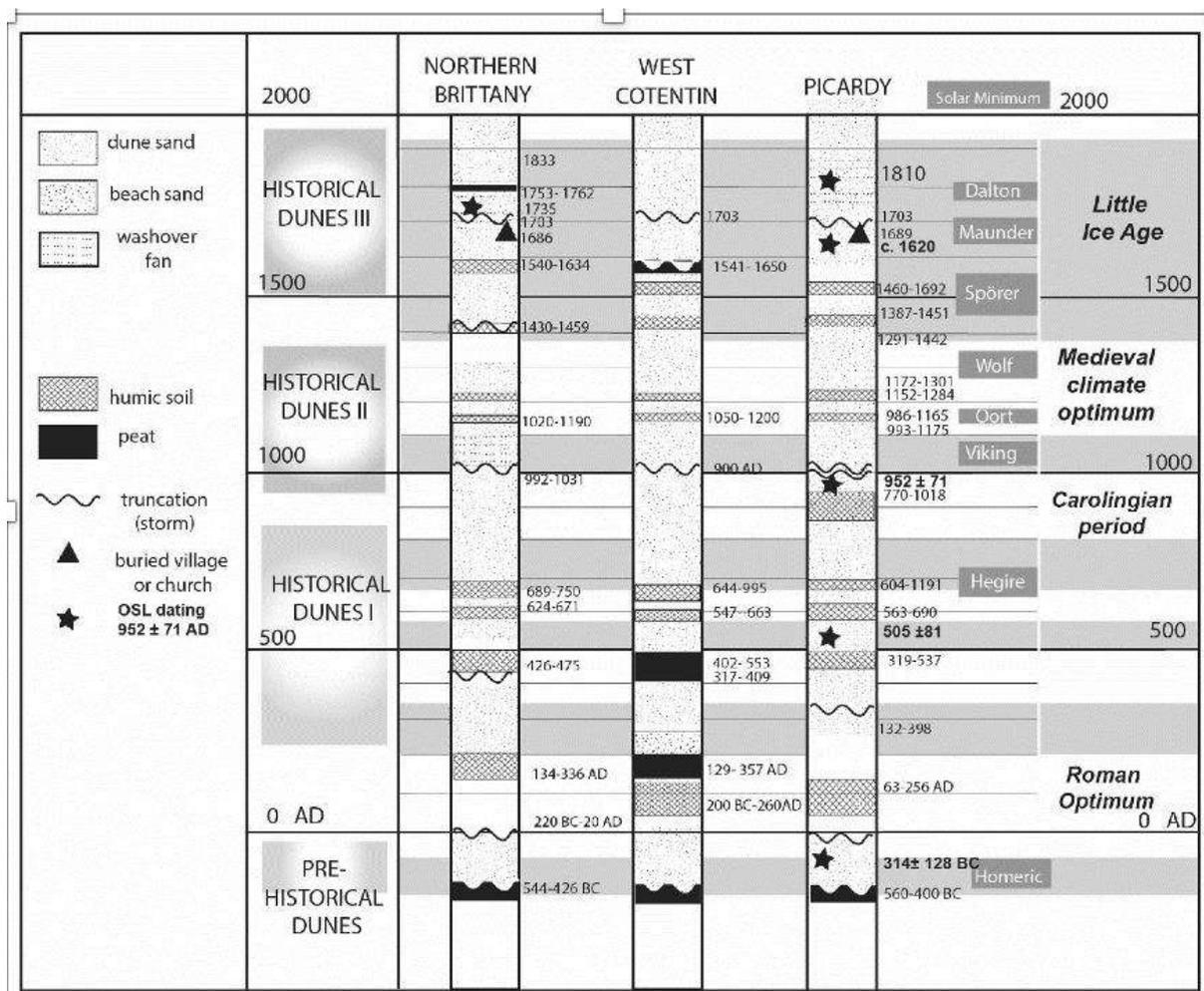


Fig.11: Enregistrement stratigraphique des dunes de la façade orientale de la Manche. Les dépôts de sables correspondent assez bien avec les minima d'activité solaire (en gris foncé). Les sols se forment pendant les périodes de stabilité/amélioration du climat. OSL : datation physique par luminescence du sable. Les autres datations ont été effectuées par le carbone 14 (Van Vliet-Lanoë et al., 2016b).

Avec une augmentation de l'instabilité du climat (NAO négative, Van Vliet-Lanoë et al., 2014), la fréquence des tempêtes augmente, y compris en Arctique, et évacue les sédiments côtiers vers l'avant-côte, la houle puissante générant des courants de retour vers le large, particulièrement si la plage est à pente faible (dissipation de l'énergie de la houle). Le budget sédimentaire devient négatif et la côte s'érode comme aujourd'hui.

Les **terpens** sont des tertres-refuges, atteignant jusqu'à 15 m de haut de la côte Frisonne et construits pour échapper aux submersions des prés salés largement utilisés pour l'élevage à l'époque. Ils apparaissent vers 500 BC puis vers 200 – 50 BC. Au milieu du IIIe siècle, les zones de prés salés furent abandonnées pendant quasiment un siècle. La troisième phase de construction débute vers 700 AD pour se terminer vers 1200 AD, englobant plusieurs épisodes de très grandes tempêtes et de premières constructions de digues en terre protectrices, encadrant les premiers polders. Cette technique fut exportée tout le long de la Mer du Nord et de la Manche.



Fig.12 « Hallig terp » pendant une marée de tempête suivant une illustration dramatique de 1906 de Alexander Eckener (1870-1944) et vue de la « Christmas storm » le 24 et 25 décembre 1717 (gravure Philomon Adelsheim, 1718).

Cette situation très érosive a existé avec les tempêtes monstrueuses du Petit Âge glaciaire (1350-1880 AD, Fig.13) ou des invasions Vikings (X<sup>e</sup> et XII<sup>e</sup> siècles) qui ont également favorisé le départ du sable vers l'intérieur des terres, transporté par le vent lors de tempêtes « sèches ». Ils ont formés les **grands cordons dunaires** qui ourlent actuellement nos côtes. Ce fut le cas à la côte belge au Petit Age Glaciaire avec l'ensablement du Zwin et plus récemment dans les années 1960-1970. C'est de nouveau le cas en 2020 à Dunkerke et au Kokke-sur-Mer. Cette situation érosive a amené de grandes inondations côtières comme par exemple la formation récurrente du Zuiderzee à la place du lac Flevo. La dernière formation de ce lac est apparue à l'époque romaine aux Pays-Bas (nappe phréatique haute) et son ouverture à la mer s'est produite suite à la rupture du cordon côtier comme par exemple lors de l'ouragan de la Sainte-Lucie le 13 décembre 1287. Cet ouragan provoqua 50 000 à 80 000 morts aux Pays Bas, en Allemagne et dans les Iles Britanniques (Lamb & Friendenal, 2005). Ces très fortes tempêtes sont très souvent associées à des inondations continentales favorisant la rupture des cordons littoraux. Cela a aussi été le cas pour « the Christmas storm » le 24 et 25 décembre 1717 (Fig.12) et ses 14 000 morts aux Pays-Bas en Allemagne du Nord et au Danemark. Le recul par érosion des cordons dunaires est même sensible sur la côte méridionale de la Bretagne (Fig.13).

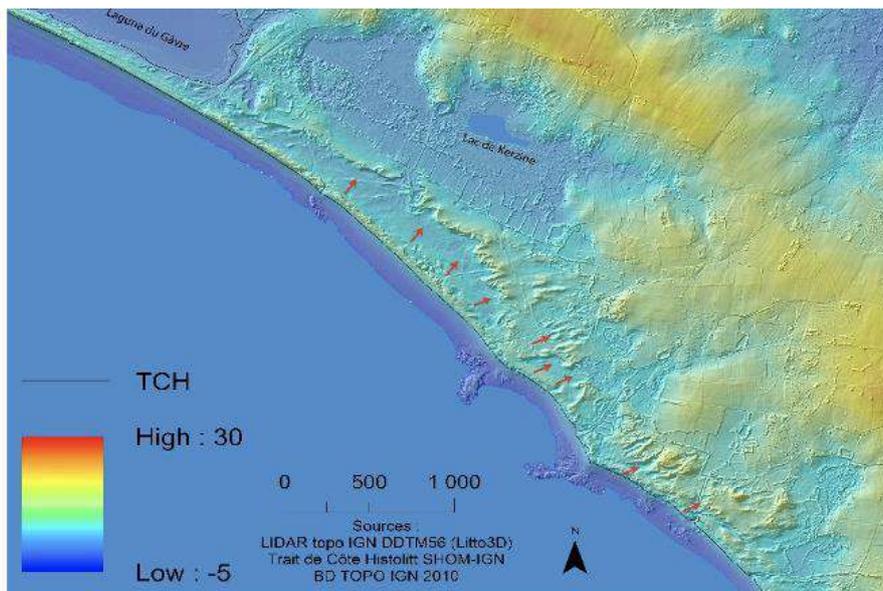


Fig. 13 Erosion du cordon littoral dunaire de Gâvres (au SE de Lorient Morbihan ; flèches rouges) suite aux tempêtes monstrueuses du XVIII<sup>e</sup> s. (MNT Litto 3D)

### 4.3 L'anthropisation du littoral

**La remontée actuelle du niveau marin est un processus naturel complexe et très lent contrôlé par le GIA, probablement par la tectonique depuis au moins 1700 AD et modulé par l'évolution séculaire du climat (dilatation thermique de l'océan) sans impact direct de l'homme.** Le rôle des périodes de tempêtes est primordial et sous contrôle indirect de l'activité solaire. Les submersions de tempêtes qui en découlent sont prévisibles à court terme à la différence des tsunamis. **Ces aléas apparaissent en période de bascule climatique**, comme cela en a été le cas avant et après l'Optimum Climatique du Moyen Âge (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2014) et, avant puis en fin du Global Warming.....

Depuis le XVIII<sup>e</sup> siècle, le développement des villes côtières portuaires s'est accentué avec les échanges commerciaux, notamment dans les zones subsidentes des deltas. La pression démographique a favorisé le pompage de l'eau douce et la mise en culture des terres littorales, rendant une situation temporaire, ayant déjà existé de par le passé, beaucoup plus critique et plus fréquente des points de vue humains et économiques. L'exploitation récente des granulats ou sables a accentué la fragilité du trait de côte comme en Bretagne (Henaff *et al.*, 2018), ou plus particulièrement dans les zones intertropicales, très urbanisées mais localisées dans un secteur où la dilatation thermique de l'océan est maximale.

La protection du trait de côte contre l'érosion est relativement peu efficace et coûteuse. La création d'infrastructures portuaires avec digues ou brises lames, modifient la vulnérabilité du trait de côte en perturbant la dérive littorale des sédiments, en favorisant localement l'érosion et la disparition vraisemblable des barrières naturelles, comme c'est le cas à l'Est de Dunkerque ou l'ensablement d'autres. L'installation de digues s'avère protectrice à court terme, mais elles sont vulnérables par l'affouillement surtout sur substrat sableux comme à la Nouvelle Orléans ou par la bioturbation (digues en terre, galeries de rats musqués, d'écrevisses de Louisiane, ou prises d'eau pour l'irrigation) comme dans le delta du Rhône ou celui du Mississippi. Différents aménagements pharaoniques ont été construits pour limiter la propagation des crues de surcote dans les zones très peuplées, comme le **Plan Delta** dans celui du Rhin-Meuse-Escaut aux Pays Bas (Zeeland), la **Thames Barrier** en aval de Londres, le **barrage de Saint Petersburg** ou encore le **programme Mose** pour la Lagune de Venise où les surcotes sont plus marquées que les marées maxima, les *aqua alta* (sites web en références).

En France, [le Conservatoire du littoral](#) limite cette emprise en rachetant les terrains côtiers ; sa politique vise le plus souvent à les re-naturer, à limiter et canaliser le passage des touristes et à **laisser le travail érosif et invasif de la mer s'effectuer**. C'est également le cas pour la réserve naturelle du Westhoek en Belgique ou les dunes côtières de la région de Scheveningen aux Pays Bas (Klijn, 1999). Aux Pays Bas, **la politique de dépoldérisation permet l'existence en arrière des côtes basses de zones d'extension des submersions** à l'instar de ce qu'il existe plus les crues fluviales (Aerts, 2009).

### 4.4 Conclusion

**Pour conclure, la fréquence plus élevée des épisodes pluvieux accompagnant ou non des tempêtes est bien relation avec une bascule climatique, mais en réalité vers le froid en raison de la diminution importante de l'activité solaire depuis 2010, après une période d'activité exceptionnelle à l'échelle du millénaire ; ce refroidissement est prévu pour une cinquantaine d'années. Le contraste thermique avec les périodes très chaudes de 1930-1940 et de 1985-2019 accentue l'intensité des aléas. L'inertie thermique d'une dizaine d'années de l'océan austral a heureusement allongé et adouci la période de contraste. L'impact de l'activité humaine sur**

**l'importance des dégâts occasionnés est également certain, que ce soit en termes d'occupation et de gestion des sols, ou plus particulièrement de l'urbanisation croissante des côtes et des grandes vallées fluviales. L'homme n'est pas le responsable des périodes chaudes que nous venons de subir, mais il est pour beaucoup dans l'accentuation « artificielle » des dégâts occasionnés par les aléas climatiques générés indirectement par l'activité solaire.**

#### Références

- Aerts, J.C.J.H. 2009 . Adaptation cost in the Netherlands: Climate Change and flood risk management. *Climate Changes Spatial Planning and Knowledge for Climate*. pp. 34–36. ISBN 9789088150159.
- Cazenave A. Et Berthier E. 2010- « La montée des océans : jusqu'où ? », *Pour la Science*, n° 388,.
- Cazenave A., Chambers DP., Cipollini P., Fu L.L., Hurrell J.W., Merrifield M., Nerem S., Plag H.P., Shum C.K., Willis J., 2014. The challenge for measuring sea level rise and regional and global trends [https://www.researchgate.net/publication/269134342Sea Level Rise – Regional and Global Trends Conference Paper · December 2010](https://www.researchgate.net/publication/269134342Sea_Level_Rise_-_Regional_and_Global_Trends_Conference_Paper_-_December_2010) , DOI: 10.5270/OceanObs09.pp.11
- Church, J. A., et al. 2001, Changes in sea level, in *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, edited by J. T. Houghton et al., pp. 385– 432, Cambridge Univ. Press, New York.
- Church J. A., White N.J., 2006 . Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century”, *Surveys in Geophysics*, 32, (4-5) , . 585-602.
- Clemmensen, L, Band Murray, A (2006). “The termination of the last major phase of aeolians and movement, coastal dune fields, Denmark,” *ESPL*, Vol 31, pp 795-808.
- Hénaff A., Le Cornec E., Jabbar M, Pétré A, Corfou, Yann Le Drezen et B. van Vliët-Lanoë, 2018 « Caractérisation des aléas littoraux d'érosion et de submersion en Bretagne par l'approche historique », *Cybergeo : European Journal of Geography [En ligne]*, Environnement, Nature, Paysage, document 847, mis en ligne le 08 février 2018, consulté le 08 février 2018. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/29000>
- Goslin, J., Fruergaard, M., Sander, L., Gałka, M., Menviel, L., Monkenbusch, J., Thibault, N., Clemmensen, L.B., 2018. Holocene centennial to millennial shifts in North-Atlantic storminess and ocean dynamics. *Scientific Reports* 8, 12778. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-77829949-8>
- Jevrejeva, S., J. C. Moore, A. Grinsted, and P. L. Woodworth (2008), Recent global sea level acceleration started over 200 years ago?, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L08715, doi:10.1029/2008G
- Jevrejeva, S., A. Grinsted, J. C. Moore, and S. Holgate (2006), Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records, *J. Geophys. Res.*, 111, C09012, doi:10.1029/2005JC003229. L033611
- Klijn, JA 1990 .“The Younger Dunes in The Netherlands; chronology and causation”. In: Bakker, TW, Jungerius, PD and Klijn, JA (Eds), *Dunes of the European coast; geomorphology– hydrology– soils*. Catena Supplement 18, pp 89-100.
- Lamb, H.H .and Frydendahl , K. 2005 . *Historic Storms of the North Sea, British Isles and Northwest Europe*. Cambridge University Press, (UK), 228 pp.
- Meurisse-Fort, M. 2009: Enregistrement haute résolution des massifs dunaires ; Manche, mer du Nord 489 et Atlantique. Le rôle des tempêtes. PhD, Université de Lille 1. Coll. Recherches - Sciences 490 (Sci. Terre). Publibook (ed.) 2009, Paris, 312 pp
- Shum C. and Kuo C., 2009. Quantification of geophysical causes of present-day sea level rise, *Symposium on 'Global sea level rise: causes and prediction'*, American Association for Advancement of Science (AAAS) Annual Meeting, Chicago.

Plan Delta : <https://www.government.nl/topics/delta-programme>

Plan MOSE : <https://www.mosevenezia.eu/?lang=en>

PPR La Faute sur Mer Plan de prévention des risques [Http://www.vendee.gouv.fr/IMG/pdf/notice\\_de\\_presentation.pdf](http://www.vendee.gouv.fr/IMG/pdf/notice_de_presentation.pdf)

Thames Barrier : <https://www.gov.uk/guidance/the-thames-barrier>

St Petersburg dam : <https://www.themoscowtimes.com/2019/02/21/st-petersburgs-dam-is-holding-back-floods-for-now-a64066>

Van Vliet-Lanoë B., Goslin J., Hénaff A., Hallégouët B., Delacourt C., Le Cornec E., Meurisse-Fort M.. 2016a The Holocene formation and evolution of coastal dune ridges, Brittany (France). 2016 CR Géosciences.348, 462-470.

Van Vliet-Lanoë B., Lauer, T., Meurisse-Fort, M., Gosselin, G. & Frechen, M. 2016b : Late Holocene coastal dune activity along the Dover Strait, Northern France – Insights into Middle Ages and Little Ice Age coastal dynamics constrained by optically stimulated luminescence dating. – Z. Dt. Ges. Geowiss., 168: 53–66, Stuttgart

Van Vliet-Lanoë B., Penaud A., Henaff A. *et al.* 2014. Middle to late Holocene storminess in Brittany (NW France). Part II: The Chronology of Events and Climate Forcing. The Holocene 24: 434-453.

## 5. La fin du réchauffement ... Pas de changement climatique

Mis en ligne SCE : 01.01.2021

**Un hiver froid s’annonce : le premier d’une série qui devrait durer au moins jusqu’en 2053** (Youssef et al., 2009 ; Zharkova et al. 2015 ; Van Vliet, 2019), période où les médias nous assènent une disparition de la banquise estivale, des ours polaires et des phoques ! Ceci est favorisé par l’activité solaire réduite depuis et le minimum solaire actuel (Fig.1). Le cycle solaire suivant (n°25) devrait aussi être faible. Nous y sommes entrés sans un Minimum d’activité aussi profond que celui Dalton (1790-1830) qui a présidé à la « Bérézina ».

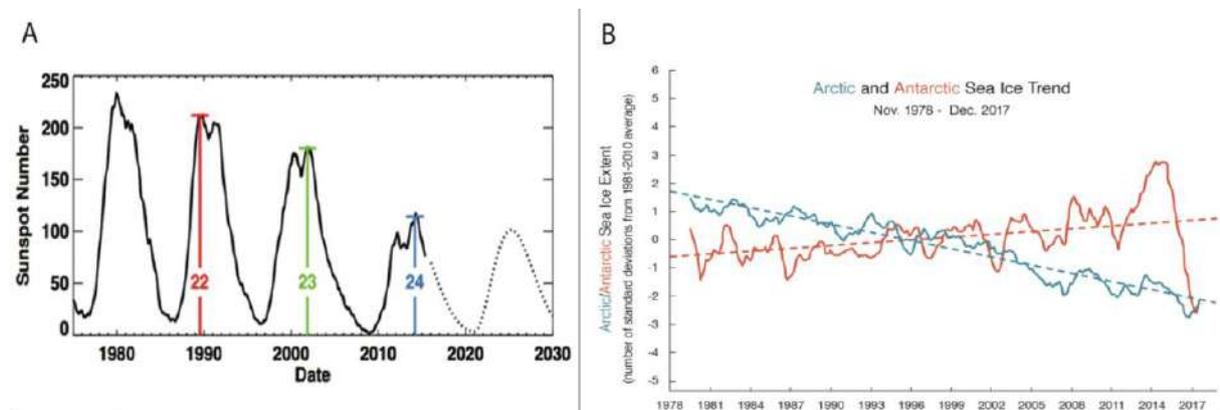


Fig. 1: Intensité des cycles solaires depuis 1975 et la prédiction du cycle 25 (calculés avec le nombre de taches solaires 2018 \* ANRPFD ). B) évolution de l’extension en km2 des banquises arctique et antarctique depuis 1978 par rapport à la déviation standard 1981-2010 (NSDIC). En fait le soleil se met au repos après une très forte activité pendant les années 1960 (cycle 19) et une décharge énergétique puissante sous la forme de vents solaires (van Vliet, 2019, Fig.2).

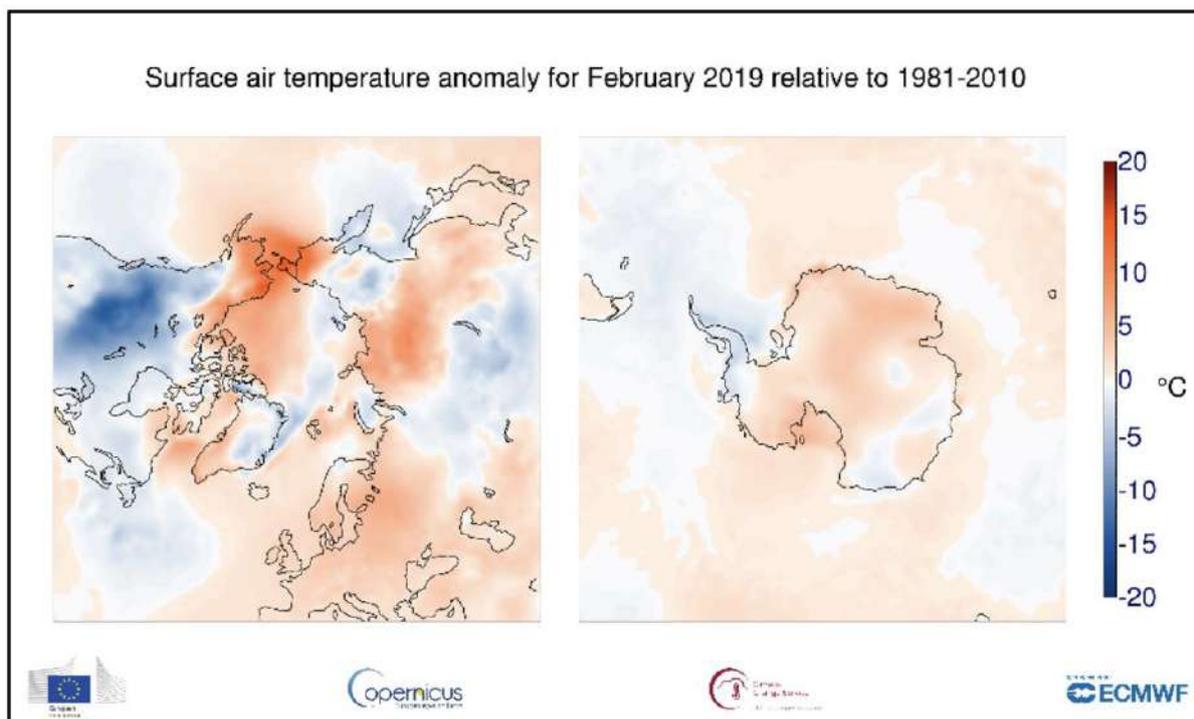


Fig.2: Anomalie des températures sur les pôles, (image <https://climate.copernicus.eu/sites/default/files/>) accentuée par un rôle majeur des perturbations atmosphériques en zones polaires liées aux vents solaires en 2019 (HN) selon He et al.,2020.

La banquise antarctique continue son extension amorcée pendant les années 1970 (Fig.3.1). La banquise arctique progresse plutôt, sauf dans le secteur nord européen jusqu'à l'Oural-Nouvelle Zemble (Fig.3.1), en relation avec une branche de la **dérive Nord Atlantique** ou DNA (Fig.3.2).

Une des conséquences de l'activité solaire est le stockage thermique dans l'océan austral qui augmente la température de surface de l'océan et son transfert à nos latitudes par le Gulf Stream et sa continuation vers l'Arctique, la DNA (voir Van Vliet-Lanoë, 2020).

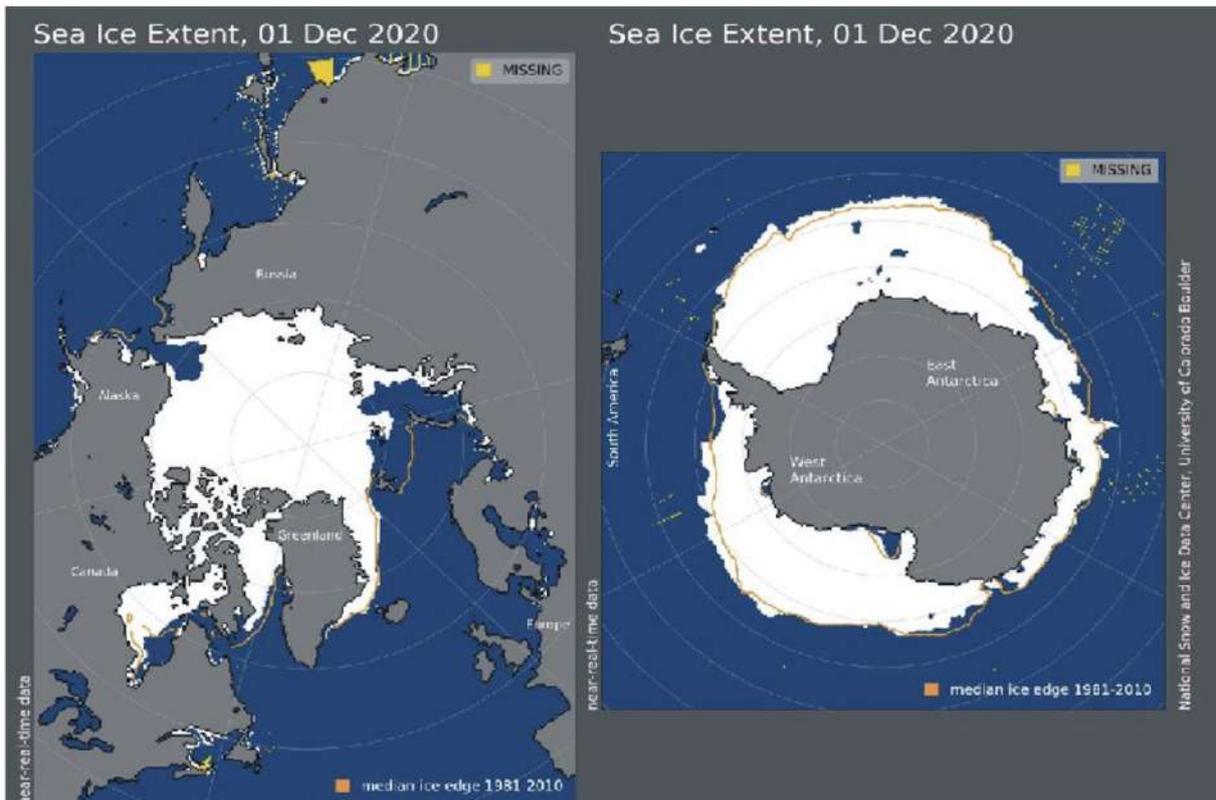


Fig.3.1. : Extension de la banquise le 1er décembre 2020 par rapport à sa position moyenne entre 1981-2010 (ligne jaune) (ressources satellitaire Nasa) Source NSDIC.

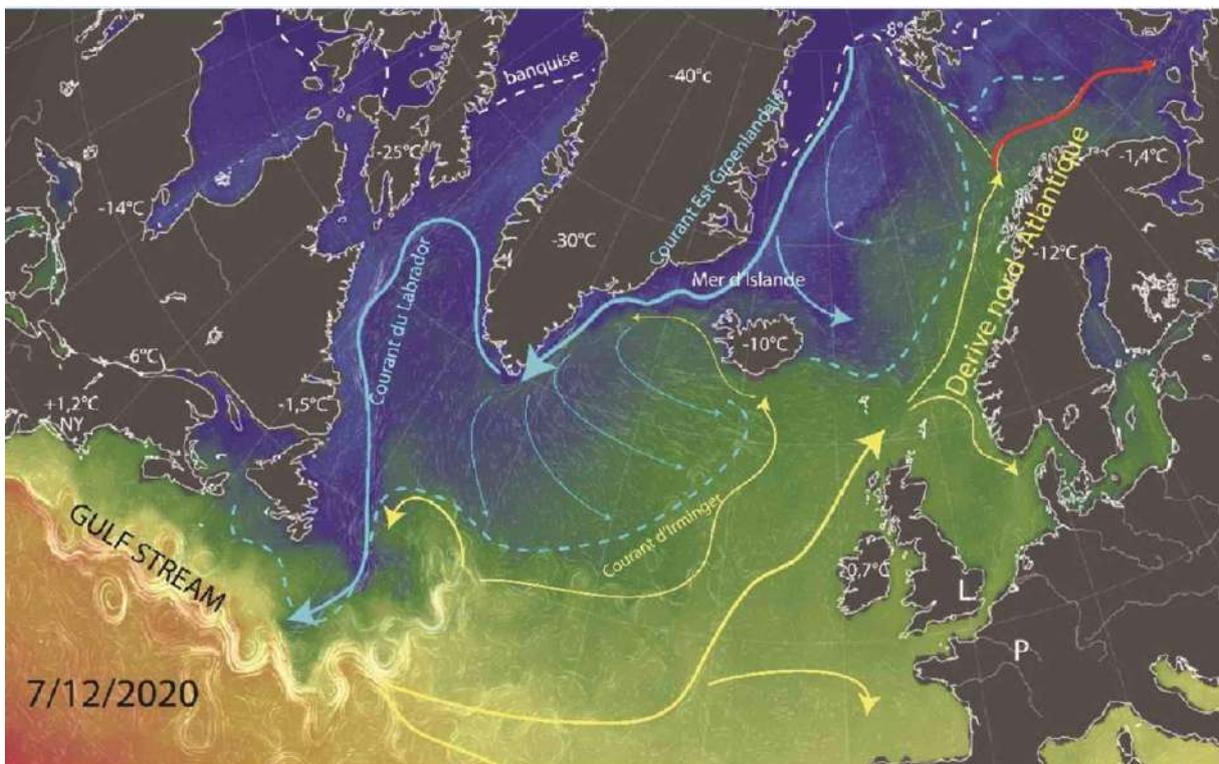


Fig.3.2: Etat actuel des températures de surface de l'océan et des écoulements de surface avec un Arctique en fort refroidissement et une transgression superficielle des eaux froides et douces (pointillé bleu) issues de la fonte de la banquise arctique 2017-2019 transférées par le courant Est groenlandais. L'anomalie d'extension de la banquise 2020 est lié à la propagation d'eaux tièdes le long la côte N de l'Arctique russe (flèche rouge) (image Earthforthenull).

**Une image thermique de l'Atlantique nord permet de comprendre la bascule qui est en train de s'opérer. Le Gulf Stream est beaucoup moins chaud aujourd'hui que ces dernières années. On voit parfaitement grâce à sa température de surface la persistance d'une langue de chaleur au NE de l'Europe (flèche rouge), ici de la DNA. Cette anomalie est particulièrement flagrante sur la carte des anomalies de surface de température attestant d'un Gulfstream encore relativement chaud et de l'anomalie thermique persistante sur l'Arctique européen. Néanmoins le courant est-groenlandais a pris beaucoup de puissance, alimenté par les eaux de fontes des années 2017-2018, des périodes de fort réchauffement arctique lié au vent solaire (van Vliet, 2019). Ses eaux froides ont repoussé le GS vers le sud et le courant d'Irmingier (au sud de l'Islande) ne rejoint plus la mer d'Islande comme en 1943 et en 2000 (Fig. 4b). Une telle situation a été observée en 1883.**

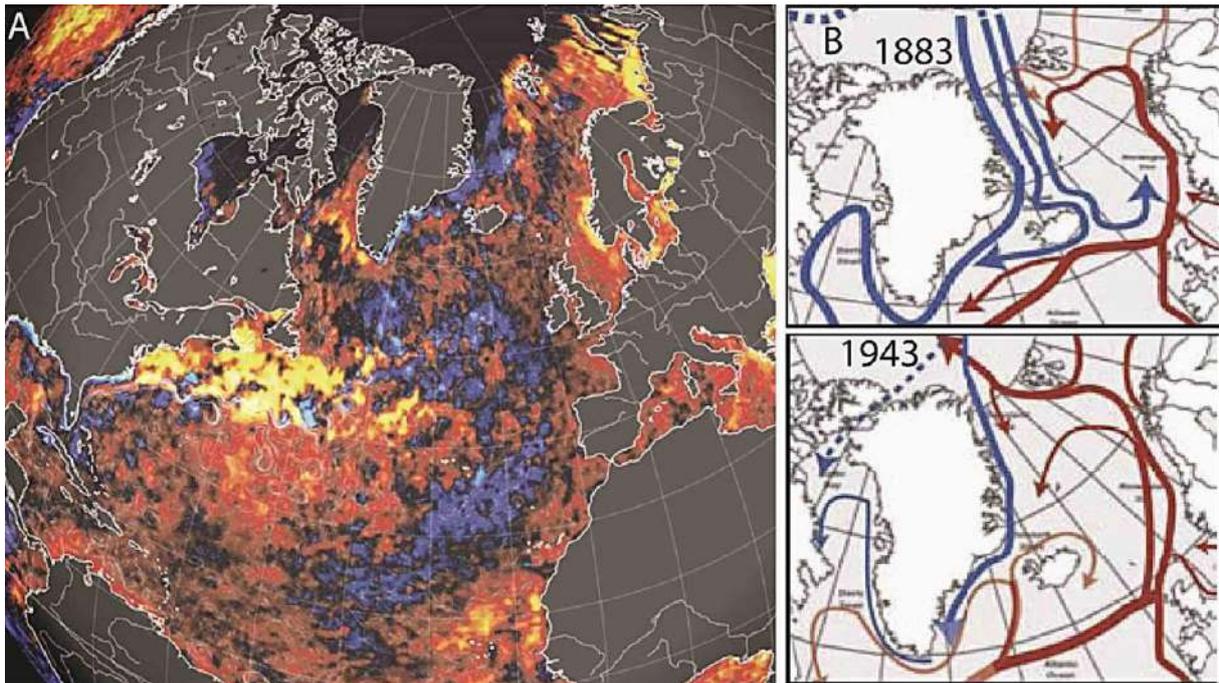


Fig.5: Une Niña puissance va de pair avec un refroidissement après des Niños puissants. Anomalie des températures de surface océaniques, NOAA.

**Ceci veut dire qu'avec l'évolution à la baisse de l'apport thermique lié à l'activité solaire (Youssef *et al.*, 2009 ; Zharkova *et al.*, 2015 ; Van Vliet, 2020) et des phénomènes El Niño puissants, le refroidissement amorcé par la baisse de l'activité solaire en 2010 va prendre de l'ampleur assez rapidement, comme le montre l'intensité du phénomène La Niña actuel (Fig.5), ce malgré l'inertie thermique de la masse océanique. L'apport d'eau de fonte du bassin arctique via le courant Est Groenlandais, est actuellement en train de tamponner l'impact d'un Gulfstream encore chaud, mais déjà affaibli, et, va favoriser comme par le passé une ré-extension de la banquise arctique, à la grande joie de l'ours Nanouk ! Un autre changement climatique s'installe.**

**N'oubliez pas vos pelles à neige.....**

#### Références

He S., Huijun H., Li F., Li H., Wang C. 2020 Solar-wind-magnetosphere energy influences the interannual variability of the northern-hemispheric winter climate National Science Review, Volume 7, Issue 1, January 2020, Pages 141-148, <https://doi.org/10.1093/nsr/nwz082>

Van Vliet Jean 2019. Les-vagues-de-chaleur-mondiales-récentes-sont-correlées-a-un-cycle-solaire-exceptionnel [Science-Climat-Energie](#)

Van Vliet Jean, 2020. Le-20eme-siècle-a-été-anormalement-chaud-mais-le-21eme-siècle-revient-à-la-normale-1-2/ [Science-Climat-Energie](https://www.science-climat-energie.be/2020/08/14/le-20eme-siècle-a-ete-anormalement-chaud-mais-le-21eme-siècle-revient-a-la-normale-1-2/), <https://www.science-climat-energie.be/2020/08/14/le-20eme-siècle-a-ete-anormalement-chaud-mais-le-21eme-siècle-revient-a-la-normale-1-2/> xxx <http://www.science-climat-energie.be/2020/08/22/le-20eme-siècle-a-ete-anormalement-chaud-mais-le-21emesiècle-revient-a-la-normale-2-2/> [Science-Climat-Energie](http://www.science-climat-energie.be/2020/08/22/le-20eme-siècle-a-ete-anormalement-chaud-mais-le-21emesiècle-revient-a-la-normale-2-2/)

Van Vliet-Lanoë B., 2020 : Déluge et changement climatique (1/2) <https://www.science-climat-energie.be/2020/11/20/deluge-et-changement-climatique-1-2/> [Science-Climat -Energie](https://www.science-climat-energie.be/2020/11/20/deluge-et-changement-climatique-1-2/)

Yousef S. , SM. Amin, W. Abdel-Sattar 2009. The Shrinking of the Heliosphere Due to Reduced Solar Wind, DOI: 10.1012/S120027852019

Zharkova VV, Shepherd SJ, Popova E, et al. 2015 Heartbeat of the sun from principal component analysis and prediction of solar activity on a millennium timescale. Sci Rep. 2015;5:15689. Disponible sur : <https://www.nature.com/articles/srep15689> [Crossref], [PubMed], [Web of Science ®], [Google Scholar]

## [6. Changements météorologiques et changement climatique : un refroidissement en marche sur l'Atlantique Nord \(1/2\)](#)

Mis en ligne SCE : 23.09.2022

### 6.1 Introduction

Nous pouvons comparer la Terre à une habitation avec un chauffage central, dont la chaudière serait chauffée par notre étoile, le Soleil. Les radiateurs-accumulateurs sont constitués par l'océan avec, le cas échéant, une évaporation intense responsable d'une augmentation de la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère et des précipitations intenses. Cependant, la maison ne sera bien chauffée que s'il y a une pompe de circulation : c'est la **circulation thermohaline des océans (THC)**, ou « thermal conveyor belt ».

**Selon Eiriksson et al., 2006, une interaction évidente existe entre les processus atmosphériques et la THC, comme en atteste la grande variabilité de la température de l'océan au Moyen-âge et pendant le Petit Age glaciaire (PAG).** Cela a été aussi le cas pour les températures à la surface de la mer d'Islande et sur la marge ibérique, plus élevées pendant la période chaude romaine que pendant la période chaude médiévale. Cependant, bien qu'un certain nombre de données indiquent un réchauffement des eaux côtières et du plateau continental au cours des 200 dernières années, le XXe siècle ne semble pas inhabituel par rapport aux deux derniers millénaires. Les périodes climatiquement instables et plus fraîches sont associées à de très fortes tempêtes (Lamb & Frydendahl 1991; van Vliet-Lanoë et al. 2014; Goslin et al., 2018), comme le rappelle l'épisode de l'Invincible Armada espagnole qui a perdu en 1588 trois fois plus de navires face aux tempêtes que face à la marine anglaise.

Au cours du dernier millénaire, des changements notables ont été enregistrés des températures chaudes à la surface de la mer (SST) associées une THC active entre 700 et 1000 AD, une phase de transition beaucoup plus froide associée à des tempêtes monstrueuses entre 890 et 1060 AD (Van Vliet-Lanoë et al., 2014) et un ralentissement de la THC entre 1000 et 1300 AD, remplacée pendant le PAG, par des SST plus froides jusqu'à 1900 AD, puis suivi d'une légère ré-accélération très brève de la THC, des eaux de surface étant légèrement plus chaudes au milieu du XXe siècle (Fig. 1).

**Les phases de fonte épidermiques du Groenland et l'éjection de la banquise ancienne du bassin arctique dans les années 1990-2000 ont considérablement modifié le climat continental européen en ralentissant la THC dans l'Atlantique Nord.** L'eau douce de fonte a réduit la salinité de

l'Atlantique Nord rendant l'eau de surface moins dense (et moins lourde), de sorte qu'elle ne peut pas couler correctement dans les profondeurs. Comme le courant océanique profond ne coule pas aussi vite qu'en surface, il cause un « embouteillage », ce qui ralentit tout le courant.

La THC se ralentit en fait rapidement depuis la déglaciation du PAG (Minimum de Dalton ;1800-1815) avec une réduction de plus en plus rapide les dernières décennies (Thompson et al., 2010; Rahmstorf et al., 2015; Caesaer et al., 2021 ; Fig. 1), accentuée possiblement par d'autres effets liés directement ou indirectement aux forces de marée du système solaire.

**Néanmoins le décalage entre le réchauffement atmosphérique, l'apport d'eau douce de fonte et le réchauffement de la masse océanique est de l'ordre de 300 ans, donc le milieu du XIX s, confortant les anomalies de température.** Cette évolution est parallèle avec l'évolution des SST au Nord de l'Islande et sur la marge Ibérique (Eiriksson et al. 2006). Cependant ces courants ne se sont jamais arrêtés, même au plus froid de la dernière glaciation, amenant une exacerbation du contraste entre les centres de pressions de l'Atlantique et une extension de l'aridité sur l'Ouest Européen et sur l'ouest de l'Afrique.

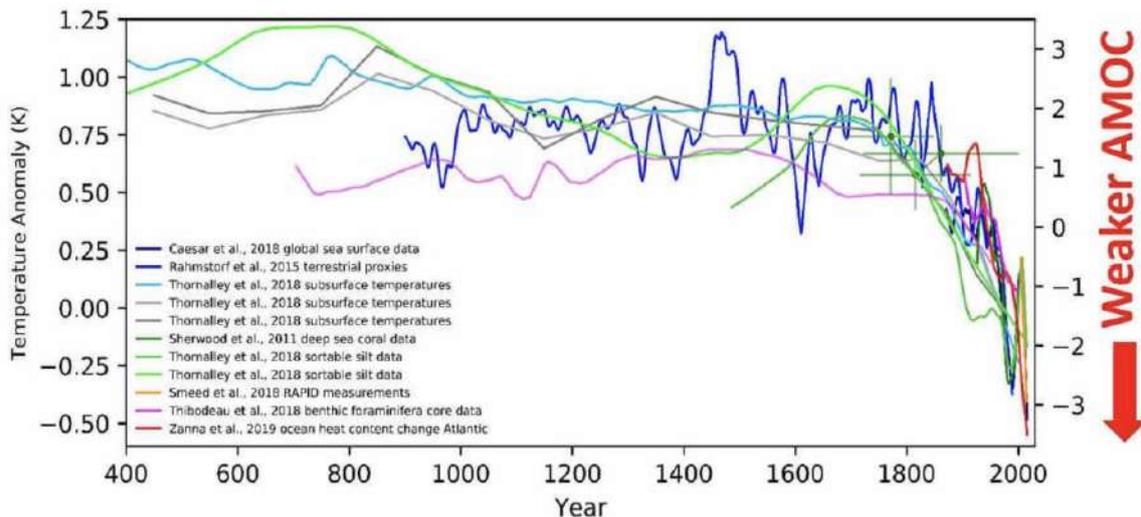


Figure 1 : Indice de l'intensité de la circulation de retournement Atlantique (AMOC), calculé à partir de la température dans l'Atlantique subpolaire par rapport à la température moyenne de l'hémisphère Nord (courbes rouge et bleue). La courbe verte montre les données coralliennes de Sherwood et ses collègues. Source : Rahmstorf et al., 2015 .

En ce qui concerne le « chauffage central », pendant la fin du XXe siècle, nous avons subi, depuis les années 1960, 3 cycles particulièrement intenses d'activité solaire (cycles 19 et 21 et 22), ce qui s'est exprimé avec un décalage d'une trentaine d'années, par la période chaude du « Global Warming » qui s'est terminée au début du XXIe siècle (Van Vliet, J., 2020). Une série de cycles solaires plus faibles a démarré en 2008 (cycles de Schwabe 24, 25 et 26/modèle) amenant potentiellement un refroidissement de l'Arctique, une forte instabilité du Jet Stream, avec une remontée estivale des dépressions cycloniques jusqu'au Spitzberg ou en Alaska (Shishmareff), disloquant la banquise au printemps.

L'intensité du réchauffement liés aux cycles solaires intenses augmente avec la latitude et est particulièrement puissant en Arctique (+4°C) et corrélée *pro parte* avec la fonte estivale de la banquise. Cette anomalie anthropogène aux yeux de l'IPCC, est en fait surtout corrélée avec 1° l'obliquité du rayonnement solaire estival à hautes latitudes, et 2° son absence en hiver du fait de la position de la Terre par rapport au plan de l'écliptique et de sa variation saisonnière (précession

**orbitale) (Berger, 1979).** Il apparaît donc que la configuration actuelle proche du maximum de précession qui a eu lieu il y a 1 000 ans, correspond à une configuration propice à l'installation d'un climat plus froid. Cette installation est légèrement contrebalancée par :1° la diminution de l'obliquité, le dernier maximum ayant eu lieu il y a 10 000 ans (Berger et Loutre, 1991), et 2° la diminution de l'excentricité depuis 12 000 ans. Ainsi, **les conditions orbitales tendent actuellement vers des conditions propices à une entrée en début glaciaire.**

## 6.2 Le contexte météorologique

**La météorologie, en Europe occidentale, est très largement influencée par la localisation et la puissance des deux centres d'actions que sont la « dépression d'Islande » et « l'anticyclone des Açores ».** Les caractéristiques de pression habituelles relevées dans l'Atlantique Nord sont une grande région de haute pression (High ou H) centrée sur les îles des Açores autour de 30°N, et de basse pression (Low ou L) centrée sur l'Islande la dépression subpolaire ou islandaise. L'intensité et l'extension spatiale de ces pôles de pression ont une très forte influence sur les conditions météorologiques et climatiques hivernales en Europe et en Amérique du Nord, et peuvent s'étendre plus loin en Asie du Nord si les phases sont prolongées. L'oscillation nord-atlantique ou NAO enregistre ces changements relatifs de pression entre les deux régions encadrant l'Atlantique Nord.

La NAO positive est comme dans les années 1997-2000 associée à un H et un L peu contrastés, le H des Açores est réduit en extension sur l'Atlantique. Elle est généralement associée à une période chaude, pluvieuse et assez calme d'un point de vue météorologique mais, pouvant en Europe évoluer en précipitations intenses de neige et de pluie comme pendant les hivers 1999-2000. Les dépressions classiques se forment à l'aplomb de masses d'eaux chaudes, évoluant en « ouragans ». Elles se forment généralement dans le Golfe de Guinée, celui du Mexique ou à l'aplomb du courant chaud du Gulf Stream, en contexte tempéré (NAO+). Mais leur fréquence est en train de baisser depuis 1880-1900 (Chand et al., 2022) après une petite augmentation entre 1975 et 2003.

**En bascule vers une NAO négative, cet anticyclone s'étend jusqu'à la côte européenne et fusionne avec la haute pression saharienne, bloquant le passage vers l'Est des dépressions et donc amenant une sécheresse en Europe et le bassin méditerranéen (Cresswell-Clay et al., 2022). Ce passage vers une NAO négative est contrôlé par un changement dans l'intensité et d'emplacement du jet stream polaire sur l'hémisphère Nord.** Les hautes pressions sont souvent associées à des tourbillons circulaires du jet stream qui bloquent les dépressions cycloniques, par exemple sur les îles britanniques (Fig. 2) permettant la circulation des langues de haute pression correspondant aux anticyclones mobiles polaires (AMP : voir 2/2).

**Les jets stream sont des vents d'altitude très rapides localisés en couloirs vers 10 km de hauteur dans la très haute troposphère.** Ils ondulent faiblement en latitude en cas de NAO+, mais en NAO- oscillent de 32-36°N jusqu'au Spitzberg, pour atteindre au maximum la convergence intertropicale des vents (ITCZ), située entre 16.5 °N (interglaciaire, Cap Vert) et 5°N (glaciaire, Cap Palmas), c'est-à-dire au Sud de la limite des oscillations du jet polaire. Les 3 phénomènes importants sont l'**ITCZ, une zone des agglutinations anticycloniques affaiblis à 40°N**, descendant exceptionnellement jusqu'à l'ITCZ, **et un jetstream polaire ondulant de 80 à 32 °N** mais pouvant aller exceptionnellement jusqu'à 30°N proche du contact avec le jet tropical. Il est associé en hiver à partir de 66-75°N au vortex stratosphérique sur l'Océan Arctique.

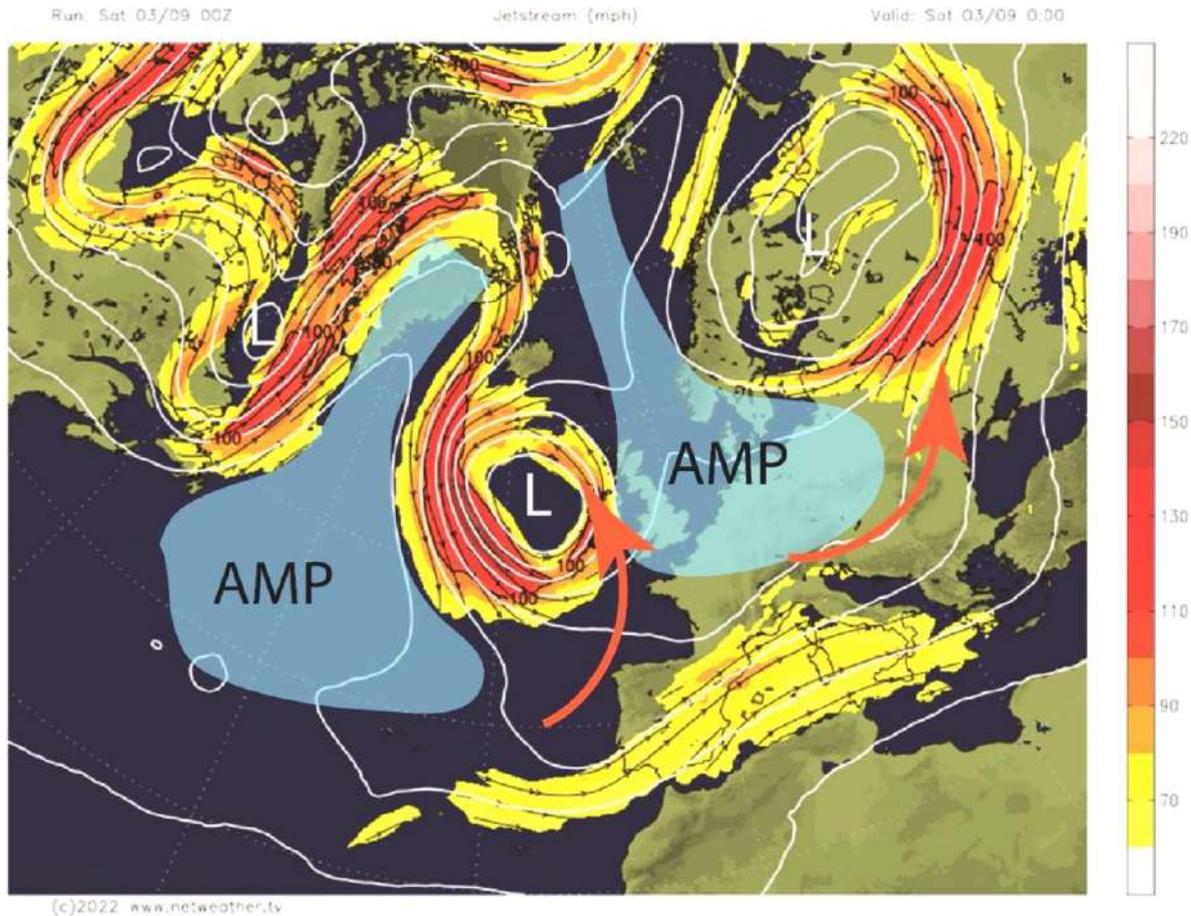


Figure 2 : boucle du jet stream polaire bloquant une basse pression (L) entre 2 Anticyclones mobiles polaires ( AMP ; un sur la mer d'Islande et un sur la Scandinavie ). 3 septembre 2022 ( Netweather.tv). NAO négative. L'air chaud des canicules est aspiré (flèche rouges) du Sahara vers le Nord par les vents du SE tournant autour de la dépression . Ce flux du Sud peut être bloqué par un dédoublement du jet polaire sur le bassin méditerranéen.

### 6.3 De la météorologie au climat et au paléoclimat

Depuis les années 1960, nombre de chercheurs ont mis en évidence un contrôle important de **l'activité solaire (irradiance solaire)** sur les conditions météorologiques à moyens et courts termes, surtout en utilisant les taches solaires comme traceurs de cette activité, mais également sur les paléoclimats à travers les phases de réchauffement de type Dansgaard- Oeschger (DO), mesuré au travers de différents proxies directs comme le  $^{14}\text{C}$  ou le  $^{10}\text{Be}$  ou, indirects comme la température de surface de l'océan (SST) ou encore le niveau de précipitation. **Ce contrôle s'arrêterait selon l'IPCC 2007 avec l'industrialisation du XXIème siècle et sa production de  $\text{CO}_2$ .**

Cela a déjà de par le passé entraîné une migration vers le sud de la zone de subsidence vers les grands fonds des eaux froides et sursallées, la NADW (North Atlantic Deep Water), de la THC, avec une diminution temporaire du transport thermique superficiel via le Gulf Stream. Par conséquent toute la zone nord-est de l'Atlantique, de l'Europe tempérée jusqu'au Groenland se rafraichit avec une ré-extension de la banquise. Néanmoins, la THC ne s'arrêtera pas à cause des forces de Coriolis et de la pérennité des vents qui l'entretiennent (Ezat et al., 2014), elle se confinera par contre en surface dans une bande latitudinale plus étroite et une circulation persistera sous la couche d'eau dessalée, comme aujourd'hui en Arctique.

**Même si le forçage orbital de l'hémisphère Sud ne se traduit que 3000 ans plus tard sur les températures de l'Arctique, l'activité solaire, elle donne la prévalence à l'Atlantique nord, exutoire**

**principal du bassin arctique: les autres oscillations (AMO, NAO, El Niño, PDO ou Pacific Decadal Oscillation, etc) en découlent avec un décalage temporel de plus en plus important vers le Sud et vers le bassin nord pacifique.**

Cet apport énergétique à la surface de la Terre est en outre perturbé par les grosses éruptions volcaniques et ses émissions de cendres et d'aérosols sulfuriques (SO<sub>2</sub>), qui réduisent à la manière d'un filtre solaire, le rayonnement incident au sol. Cela fut il y a quelques années le cas du Pinatubo en 1991, qui a entraîné un refroidissement temporaire mondial de 1°C, ou du volcan Toba il y 73 000 BP, qui a déclenché la formation des grands inlandsis de l'hémisphère Nord (Svendsen et coll., 1999).

**L'évolution météorologique est une image à très court terme du système climatique : elle n'a de valeur que si on l'intègre dans un contexte au minimum décennal. Madame Soleil (F) et Monsieur Météo (B) ne peuvent pas prédire l'évolution du climat. Encore moins les médias.**

#### **6.4 Les variations de l'activité solaire (TSI) et ses phénomènes amplificateurs**

Les valeurs des variations de l'irradiance au cours des cycles solaires sont très faibles, trop limitées pour expliquer à elles seules la variation de température observées ces dernières décennies. Le cycle à 11 ans de l'activité solaire présente quelques irrégularités en durée avec des cycles allant de min 9 à max 14 ans. Lorsque le cycle est court (environ 10 ans), le nombre de taches magnétiques solaires est élevé et l'irradiance peut augmenter de 0,23 %. Il fait chaud. Lorsqu'il est long, c'est l'inverse. La variation d'irradiance mesurée pour le cycle 22 (de durée 9,9 ans) est de 0,07 %. **Le maximum d'irradiance récent correspond à la canicule de 2001 (cycle 23, durée 12,3 ans). Celles de 2003 et 2018 correspondent par contre à l'apport énergétique puissant et polaire du vent particulière émis par le soleil, sous contrôle du champ magnétique terrestre (Van Vliet, 2019).** Pendant le « refroidissement » de 1970 (1945-1975), les cycles étaient un peu plus longs et les taches sont passées par un bref minimum lors du cycle 20. Le dernier cycle 24, d'une durée de 12 ans a montré une réduction notoire du nombre de taches, et il a également été marqué par des hivers rigoureux en milieu continental comme ceux des périodes de minima solaire : **l'activité solaire vient de passer par un minima. Le cycle 25 semble également se révéler comme un cycle faible, mais ceci ne pourra pas être confirmé avant 2025.**

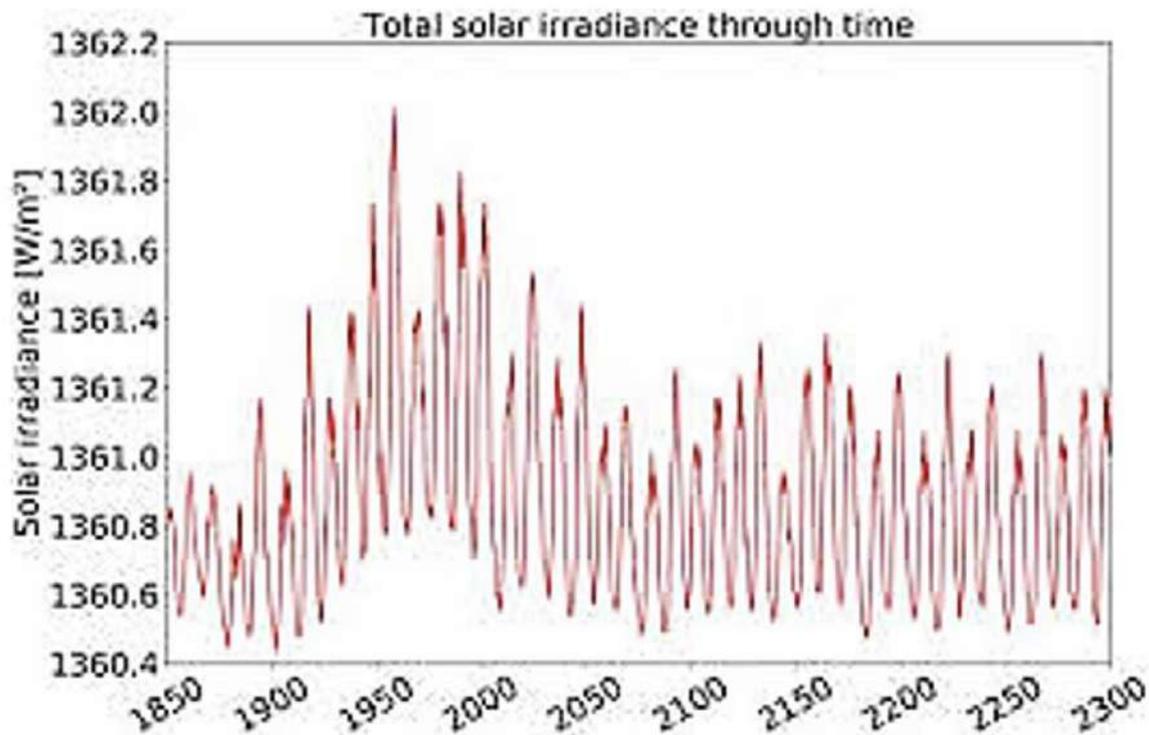


Figure 3 : TSI reconstituée pour les derniers 400 ans et une évolution jusqu' en 2300 AD modélisée par le laboratoire Simon Laplace, membre de l'IPCC (Lurton et al. 2000), montrant une évolution pulsée de l'insolation avec des petits minimas tous les 60 ans.

Les variations très faibles de la TSI sont d'abord accentuées par une **accumulation thermique dans les 700 m supérieurs de l'océan intertropical (augmentation de 5% des UV solaires irradiés)**, ce qui a induit un accroissement des températures de surface de l'océan SST en 1997-1998 et en 2017-2019, ce qui perturbe pour quelques années les températures mondiales, accompagnée par une perturbation thermique positive des eaux de surface du Pacifique (El Niño) ou de l'Atlantique, avec une perturbation moindre à hauteur de la zone de l'ITCZ. Ce phénomène est associé pour notre région avec une NAO instable, mais plutôt positive. **Dans ce cas la banquise régresse.**

**Un second facteur** d'accentuation du réchauffement est induit par la **vapeur d'eau**, le gaz à effet de serre le plus puissant. Ce réchauffement induit dans l'atmosphère un dégazage secondaire du CO<sub>2</sub> par l'océan (SCE), des précipitations plus élevées et l'arrivée par convection de vapeur d'eau dans les 500 km inférieurs de la stratosphère, là où son effet de serre pourra s'exprimer pleinement. Ceci explique l'augmentation de la fréquence et l'intensité des événements El Niño entre 1975-2021, associés aux trois cycles solaires correspondants (19-20-22). **Deux événements majeurs sont marqués en 1992-1993 et surtout 1997-1998. Ces événements ont eu des répercussions sur l'ensemble de la planète: le réchauffement « global » s'est fait sentir avec le premier super-Niño de 1992-1993 avec une augmentation synchrone et brutale de la température à Brest mais également au Spitzberg. Le maximum de fonte du pergélisol en Alaska est atteint en 1996. Le second super-Niño a été le plus important et le responsable des inondations de 1999-2000 en Europe (Van Vliet-Lanoë, 2021).**

**Un troisième mécanisme** intervient: le **vent solaire**. Ce dernier est contrôlé par l'activité solaire ainsi que par le **champ magnétique terrestre**. Sa diminution refroidit globalement la température de surface polaire (durée du jour au pôle et albédo), et donc les masses d'air polaires (Van Vliet, 2019). Cet apport de protons interagit donc directement avec le jet-stream polaire en parallèle avec

l'extension de la banquise (Solenheim et al. 2021) et donc sur la génération de la NAO. L'oscillation multidécadale atlantique ou AMO (cycle de 60 ans) est en antiphasse avec celle de NAO et redevient négative, tout comme la Pacific Decadal Oscillation (Fig.4).

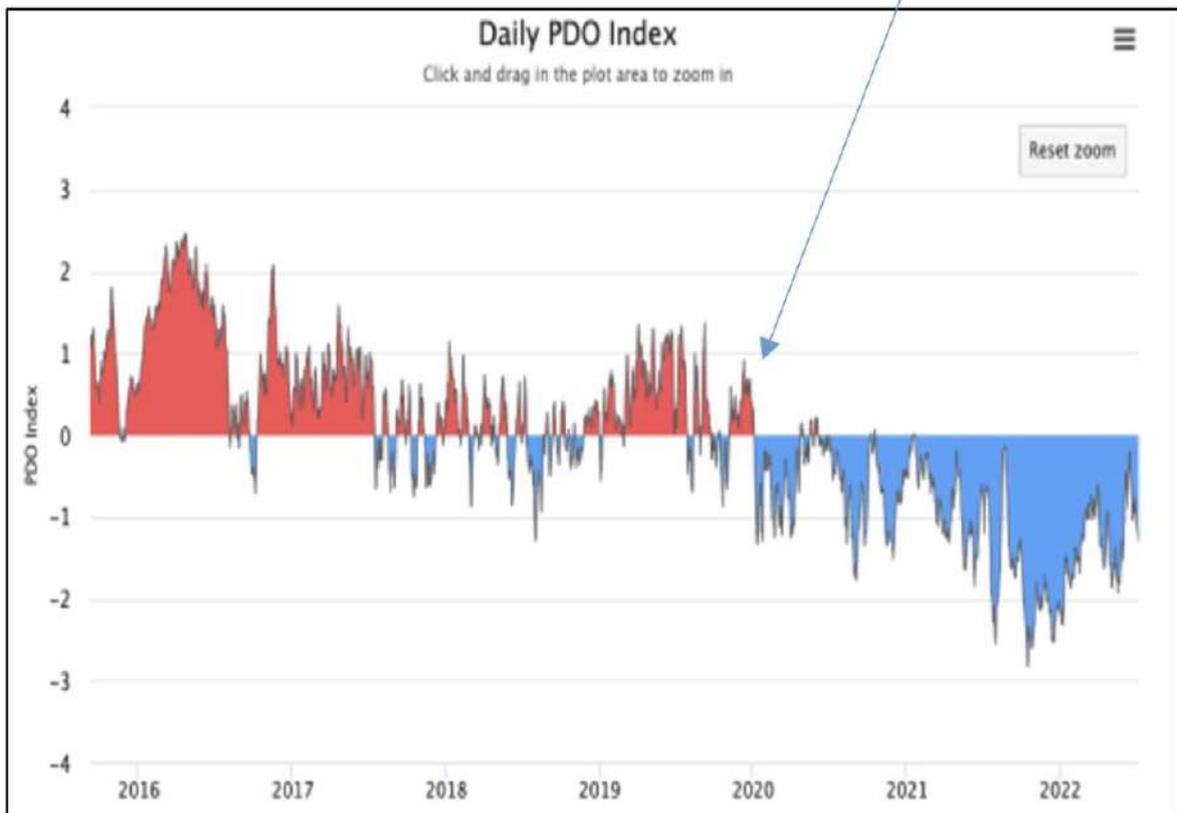
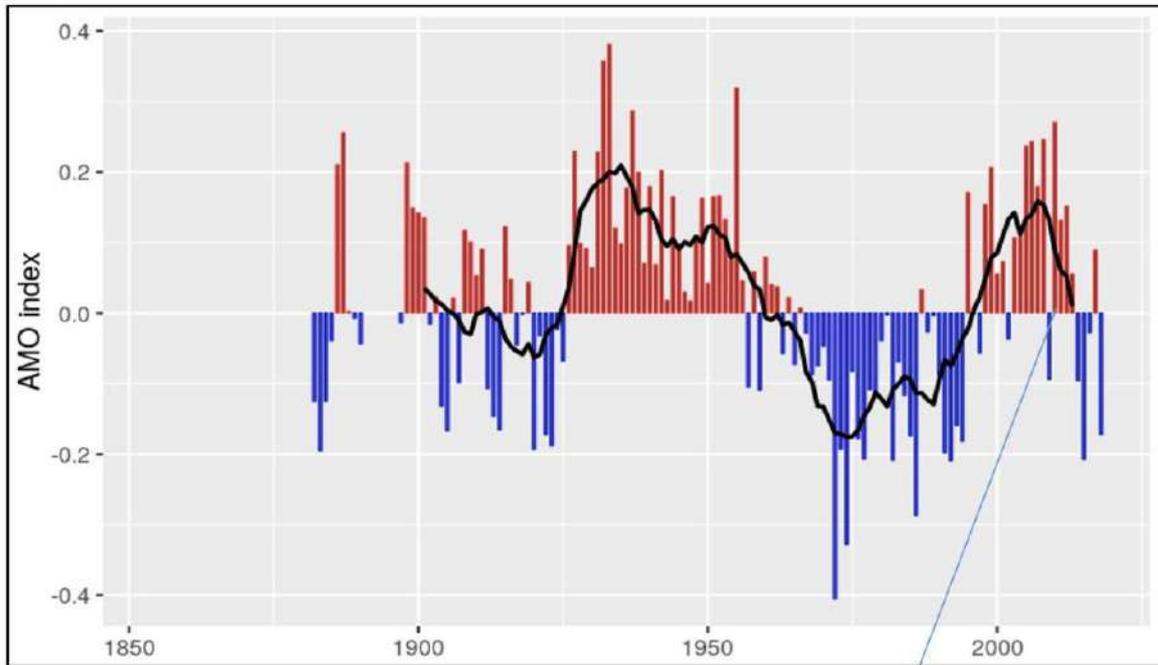


Figure 4 : Index AMO jusqu'en 2022 (Meier et al. 2022 : rapport IPCC Baltique) et évolution récente de la PDO <https://www.worldclimateservice.com/2021/09/01/pacific-decadal-oscillation/>

**Un quatrième mécanisme** est actif au niveau de la couche d'ozone au sommet de la tropopause. Les UVC solaires (0,28 -0,1  $\mu\text{m}$ ) sont interceptés en haute altitude par cette couche qui se détruit surtout sous l'impact avec protons solaires véhiculés par le vent, de manière nettement plus efficaces que les seuls UV solaires. Les protons ( $\text{H}^+$ ) incidents amènent dans la basse stratosphère la génération de vapeur eau en se combinant à l'ozone dissociée. Pour un tel évènement (juillet 2000), un chercheur a calculé une augmentation de près de 2% de la teneur en vapeur d'eau de la basse stratosphère (Krivolutsky et al., 2005). Cet apport de protons en période de fort vent solaire induit d'abord un bilan énergétique positif en zones polaires, mais augmentent également la nébulosité et la turbulence donc une accumulation thermique en régions intertropicales. Des vents solaires faibles favorisent le développement d'une haute pression atmosphérique froide sur l'océan Arctique : les futurs Anticyclones mobiles polaires ou AMP (voir partie 2/2).

Ces mécanismes amplificateurs de l'influence solaire (TSI) s'additionnent donc plus efficacement que la seule TSI. A ces facteurs d'amplification se surajoutent des effets rétroactifs, cette fois de nature essentiellement anthropiques (érosion des sols, aridification, urbanisation, GES dont surtout la vapeur d'eau produite par la combustion des hydrocarbures et les arrosages). **Mais surtout le rôle de l'océan est primordial, en tant que stockage d'énergie, comme l'a souligné J.C. Duplessy (1996) . Il est responsable de la cyclicité à 1500 ans qui domine l'Holocène depuis 6000 BP et d'une part très importante du  $\text{CO}_2$  atmosphérique dégazé à partir de son réchauffement solaire.**

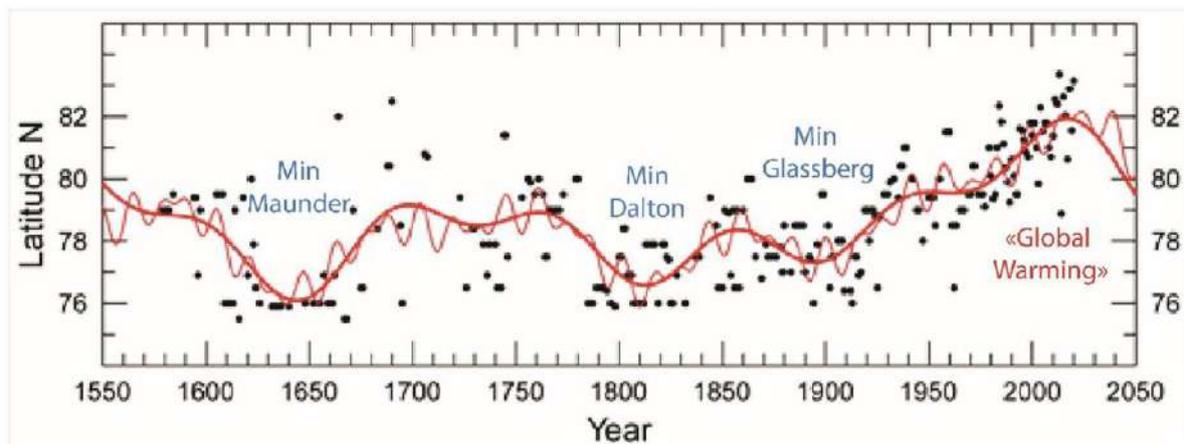


Figure 5 : Extension latitudinale de la banquise de la mer de Barents (Solhenheim et al. 2021) enregistrant les minimas solaires.

## 6.5 Et le système solaire là-dedans ?

Une théorie tidale du système solaire comme contrôle sur le climat a été développée par Keeling & Whorf, 2000; avec synthèse dans Hung, 2007) donne pour origine de ces cycles les « marées solaires » provoquées par les planètes du Système solaire, principalement Vénus, Terre, Mercure, Mars, Jupiter et Saturne.

Hung (2007) a mis en évidence une relation entre la position des planètes « génératrices de marées solaires », Mercure, Vénus, Terre et Jupiter, et 25 tempêtes solaires parmi les 38 plus importantes de l'histoire. **Il a mis en évidence un cycle de 11 ans décrit par le groupe Vénus-Terre-Jupiter correspondant à celui des taches solaires.** Solhenheim et al (2021) ont montré que la périodicité de 179 ans, caractéristique des forçages planétaires, correspond étonnamment bien (Fig. 5) à l'extension de la banquise de la mer de Barents (BIE) sous influence du vent solaire et son impact sur la magnétosphère terrestre (cycles à 11 ans).

## 6.6 Apport de la Géologie

Toute période climatique de **réchauffement** est associée au niveau mondial à un niveau marin élevé, des précipitations élevées et une production végétale importante, celle qui a nourri les brontosaurus, il y a > 60 Ma, malgré une  $PCO_2$  de 1000 ppm !! **C'est ce que nous racontent les archives géologiques.**

**Par contre, un refroidissement climatique est associé – à une baisse des précipitations très marquée comme cette année 2022, à une baisse de la  $PCO_2$ , du fait de sa très forte solubilité dans les eaux froides (Larryn et al., 2003), – à une aridité et, *in fine* – à une augmentation de la force et de la fréquence des vents (instabilité atmosphérique).** Cette année, outre la sécheresse et les vagues de chaleurs en alternances avec l'arrivée d'air polaire, viennent se surajouter **une fonte très limitée du Groenland, un retrait estival de la banquise dans l'HN, se rapprochant de la médiane des années 1981-2010 (NSDIC), et une réduction de la couverture végétale augmentant l'albédo (aridité et feux), comme en début de stades glaciaires précoces.** Le passé géologique enregistré au sein des différentes archives nous montre que les feux sont comme les tempêtes, les crues brutales ou les vagues de chaleur associés à des périodes d'instabilité météorologiques, lesquelles sont contrôlées *pro parte* par la qualité de l'insolation à haute latitude et l'apport des vents solaires et des apports thermiques véhiculés par la THC. Les périodes de tempêtes récurrentes sont le plus souvent associées à la fin des 5 derniers interglaciaires (Van Vliet-Lanoë et al., 2022), à un océan intertropical encore chaud, à une baisse globale de l'insolation sous contrôle orbital pour l'Holocène et enfin, à une NAO le plus souvent négative (Van Vliet-Lanoë et al. 2014).

Les grandes calottes glaciaires sont apparues surtout dans l'hémisphère sud il y a 48 Ma. Avec le développement de glaciers sur l'hémisphère nord, ce contraste évident entre le Miocène et le Pliocène moyen a induit un positionnement nord des cellules tropicales de Hadley (aridité) comme sur le bassin méditerranéen pendant la crise messinienne (7.2-5.8 Ma), associée à un assèchement à la fois tectonique et « glaciaire » de la Méditerranée. Avec le développement d'importantes calottes glaciaires principalement à partir de 33 Ma au Groenland, en Islande, en Amérique du Nord et en Scandinavie, cette dissymétrie a été progressivement réduite (Van Vliet-Lanoë, 2017). L'aridité globale pendant le Dernier Glaciaire est maximale vers 25-21 ka BP, tel qu'extrait de la teneur élevée en poussière des carottes de glace (De Angelis et al., 1997). Cette aridité maximale est également documentée à cette époque dans les loess européennes et est à mettre en relation avec l'étendue maximale atteinte par le pergélisol. Après 23 ka BP, les précipitations augmentent en Europe (Frechen et al., 2001) comme le démontre également une modélisation pré-GIEC (Joussaume, 1983), mais elle a été interrompue par de brefs épisodes de froid et de sécheresse de 20 à 17 ka enregistrés par le dépôt de loesses post-LGM notamment en Pologne.

## 6.7 Les événements Dansgaard-Oeschger ou les sautes d'humeur cycliques de l'océan

**La plupart des perturbations climatiques séculaires et multiséculaires en période glaciaire commencent par un réchauffement brutal (c. 50-100 ans), correspondent à un réchauffement de 7 à 15 °C / 20 °C.** Ce réchauffement est suivi par un plateau d'une vingtaine d'années pour les plus courts (minimums solaires). Ce cycle se termine par une phase associée et prolongée de forte instabilité climatique suivie par un refroidissement progressif (Dansgaard et al. 1993). Il en est de même pour les événements millénaires de type Dansgaard-Oeschger (DO, période glaciaire) ou de Bond, qui ont marqué le début de l'Holocène. Ces événements sont plus intenses et plus visibles en période glaciaire, étant donné le volume de glace à fondre (inlandsis et banquise, mais ils ont tous les mêmes caractéristiques. Le refroidissement lent et final des interstades Dansgaard-Oeschger (DO) freine la convection de la circulation océanique profonde, la NADW avec une cyclicité de 1500 ans ou

ses multiples allant jusqu'à 7200 ans. L'Antarctique est toujours le premier à se refroidir par rapport à l'Arctique, notamment pour raison orbitale, d'isolement maritime et d'albedo avec un décalage de 3000 ans par rapport à l'hémisphère Nord. Contrairement aux affirmations de Ganopolski et al., 2018, la teneur atmosphérique en CO<sub>2</sub> et en méthane biogène augmente pour la même raison 300 ans après la fin orbitale de la glaciation (17 ka) dans l'HS. **La baisse cénozoïque du CO<sub>2</sub> atmosphérique est essentiellement contrôlée, surtout depuis 33 Ma, par son stockage dans un océan global profond refroidi de plus de 5°C, mis en évidence par le stockage d'hydrates de gaz entre 1200 et 1500 m de profondeur**

## 6.8 Conclusion

Dans cette première partie, le développement des calottes glaciaires est clairement lié à la **source d'humidité** pour favoriser le stockage de glace et **au refroidissement lié à une réduction de l'insolation**. Ces dernières années, l'océan était encore chaud et permettait une pluviosité soutenue de rang interglaciaire. Mais avec une insolation en baisse très sensible à haute latitude pour raison orbitale, une activité solaire en berne et la THC qui se ralentit de manière très inquiétante, tous ces phénomènes signent la fin du DO « Global Warming ». Depuis 2021 et surtout avril 2022, une instabilité atmosphérique s'est installée, annonçant comme dans le cas des DO, **une descente lente** vers des conditions de type glaciaire. L'installation de hautes pressions sur l'Europe, également observables, sur la côte ouest des USA et celle d'une aridité avec steppisation et tempêtes de poussière signent **une désolidarisation de la météorologie européenne de la masse océanique Atlantique** (THC en berne) **et une continentalisation** identique à celle observée en début glaciaire (stade froid MIS 5d :113-104 ka). L'AMO comme la PDO deviennent négatives.

## BIBLIOGRAPHIE COMMUNE AUX DEUX PARTIES (1/2) ET (2/2)

Berger, A. Spectrum of climatic variations and their causal mechanisms. *Geophysical Surveys* 3, 351–402 (1979).  
<https://doi.org/10.1007/BF01449756>

Berger A. & Loutre M.F. 1991 Insolation values for the climate of the last 10 million years *Quaternary Science Reviews* 10(4):297-317 DOI: 10.1016/0277-3791(91)90033-Q

Byrne, M.P., Pendergrass, A.G., Rapp, A.D. et al. (2018). Response of the Intertropical Convergence Zone to Climate Change: Location, Width, and Strength. *Curr. Clim. Change Rep* 4, 355–370 <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0110-5>

Caesar L., G. D. McCarthy, D. J. R. Thornalley et N. Cahill, 2021 Current Atlantic Meridional Overturning Circulation weakest in last millennium. *Nature Geoscience*, 14, 118–120, DOI 10.1038/s41561-021-00699-z,

Chand S.S, Walsh K.J., Camargo S.J et al., 2022, Declining tropical cyclone frequency under global warming *Nature climate change* <https://www.nature.com/articles/s41558-022-01388-4.pdf>

Coillat J. 2022. Climat / Mortelles canicules. Hérodote Publié ou mis à jour le : 2022-08-25 17:46:21 [https://www.herodote.net/Mortelles\\_canicules-synthese-2294.php](https://www.herodote.net/Mortelles_canicules-synthese-2294.php).

Connolly R., Soon W., Connolly M., et al. 2021. How much has the Sun influenced Northern Hemisphere temperature trends? An ongoing debate. *Res. Astron & Astrophys.* 2021 Vol. 21 No. 6, 131(68pp) doi: 10.1088/1674-4527/21/6/131

[Cresswell-Clay, N., Ummenhofer, C.C., Thatcher, D.L. et al. \(2022\)](#) Twentieth-century Azores High expansion unprecedented in the past 1,200 years. *Nat. Geosci.* 15, 548–553.

Dansgaard, W., Johnsen, S. J., Clausen, H. B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N. S., Hammer, C. U., Hvidberg, C. S., Steffensen, J. P., Sveinbjörnsdóttir, A. E., Jouzel, J., Bond, G. (1993) Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, 364 (6434). 218-220 doi:10.1038/364218a0

## LA METEOROLOGIE

De Angelis, M., et al. (1992), Source of continental dust over Antarctica during the last climatic cycle, *J. Atmos. Chem.*,14, 233–244.

Duplessy J.C. (1996) : Quand l'Océan se fâche, *Histoire Naturelle du Climat*, Odile Jacob

Eiríksson J., Bartels-Jónsdóttir, H. B., Cage, A. G., et al. 2006 Variability of the North Atlantic Current during the last 2000 years based on shelf bottom water and sea surface temperatures along an open ocean/shallow marine transect in western Europe. *The Holocene* 16,7 . 1017 &029

Ezat MM. Rasmussen T.L. Groeneveld G., 2014. Persistent intermediate water warming during cold stadials in the southeastern Nordic seas during the past 65 k.y., 2014; 42 (.8. 663–666 doi:10.1130/G35579.1

Ganopolski, A., Winkelmann, R. & Schellnhuber, H. Critical insolation–CO<sub>2</sub> relation for diagnosing past and future glacial inception. *Nature* 529, 200–203 (2016). <https://doi.org/10.1038/nature16494>

[Goslin, J., Fruergaard, M., Sander, L., et al., 2018](#). Holocene centennial to millennial shifts in North-Atlantic storminess and ocean dynamics. *Scientific Reports* 8, 12778.

Holton J.R., Hakim G.J., *Dynamic Meteorology*, Academic Press, 2013

Huck V. 2017. <https://www.prevision-meteo.ch/almanach/1300-1399>

Hung CC (2007) Apparent relations between solar activity and solar tides caused by the planets [archive] NASA Report, TM-214817, 2007

Joussaume S.1989 Simulations du climat du dernier maximum glaciaire à l'aide d'un modèle de circulation générale de l'atmosphère incluant une modélisation du cycle des isotopes de l'eau et des poussières d'origine désertique Thèse : Terre, océan, espace : Paris 6 : 1989

[Keeling C. D. and Whorf T. P. 2000](#). The 1,800-year oceanic tidal cycle: A possible cause of rapid climate change .*PNAS* 97 (8) 3814-3819

Krivolutsky, A., Kuminov, A., and Vyushkova, T., 2005 Ionization of the Atmosphere Caused by Solar Protons and Its Influence on Ozone of the Earth during 1994–2003, *J. Atmos. Sol.–Terr. Phys.*, 67 ( 1–2), 105–117.

Lamb HH, Frydendahl K (1991) *Historic storms of the North Sea, British Isles and Northwest Europe*. Cambridge University Press, Cambridge

Larryn W. Diamond\*, Nikolay N. Akinfiev (2003) Solubility of CO<sub>2</sub> in water from –1.5 to 100 °C and from 0.1 to 100 MPa: evaluation of literature data and thermodynamic modelling. *Fluid Phase Equilibria* 208) 265–290

Lashkari H. , Mohammad Z. Keikhosrav G. 2017 Annual Fluctuations and Displacements of Inter Tropical Convergence Zone (ITCZ) within the Range of Atlantic Ocean-India *Open Journal of Ecology* 07(01):12-33 DOI: 10.4236/oje.2017.71002

Lee, S.H., Williams, P.D. & Frame, T.H.A. Increased shear in the North Atlantic upper-level jet stream over the past four decades. *Nature* 572, 639–642 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1465-z>

Leroux, M., Aubert, L., Comby, J., Mollica, V., Passerat de La Chapelle, P. Reynaud, R. 1992 Déficit pluviométrique hivernal sur la France : autopsie des agglutinations anticycloniques des hivers de 1988 à 1992", *Science et Changements Climatiques, Sécheresse*, 3, ( 2) 103-113. Libbey Eurotext.

Leroux,1993 « The Mobile Polar High: a new concept explaining the actual mechanisms of the meridional air-mass and energy exchanges, and the global propagation of palaeoclimatic changes », *Global and Planetary Changes*, 7, Elsevier Science Publ., 69-93.

Lu, Q.-B. 2009 Correlation between Cosmic Rays and Ozone Depletion 2009, *Phys. Rev. Lett.* 102, 118501

[Lurton, T., Balkanski, Y., Bastrikov, V., Bekki, S et al. \(2020\)](#). Implementation of the CMIP6 forcing data in the IPSL-CM6A-LR model. *Journal of Advances in Modelling Earth Systems*, 12, e2019MS001940.

## LA METEOROLOGIE

Lynch-Stieglitz J., Adkins J.F., Curry W.B., Dokken T et al. 2007. Atlantic meridional overturning circulation during the last glacial maximum Science, 316 pp. 66-69

Marusek JA (2010) A Chronological Listing of Early Weather Events, 580 pp. Available at: <http://www.breadandbutter-science.com/Weather.pdf>.

Meier, H.E M., Kniebusch, M., Dieterich, C., et al. 2022. Climate change in the Baltic Sea region: a summary, Earth Syst. Dynam., 13, 457–593, <https://doi.org/10.5194/esd-13-457-2022>,

[Rahmstorf, S., Box, J. E., Feulner, G., Mann, M. E., Robinson, A., Rutherford, S., & Schaffernicht, E. J. \(2015\)](#). Exceptional twentieth-century slowdown in Atlantic Ocean overturning circulation. Nature Climate Change, 5(5), 475–480.

Rossby CG. 1939 Relation between variation in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semipermanent centers of action. J Marine Res; 2: 38-50.

Ruddiman, W.F (2003).. The Anthropogenic Greenhouse Era Began Thousands of Years Ago. Climatic Change 61, 261–293 <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000004577.17928.f8>

Schneider, T., Bischoff, T. & Haug, G. 2014 Migrations and dynamics of the intertropical convergence zone. Nature 513, 45–53 (). <https://doi.org/10.1038/nature13636>

[Solheim, J.-E., Falk-Petersen, S., Humlum, O. and Mörner, N.-A. \(2021\)](#) Changes in Barents Sea Ice Edge Positions in the Last 442 Years. Part 2: Sun, Moon and Planets. International Journal of Astronomy and Astrophysics, 11, 279-341.

Steinhilber, F., Beer J., Fröhlich C. (2009), Interplanetary magnetic field during the past 9,300 years inferred from cosmogenic radionuclides, J. Geophys. Res, doi:10.1029/2009GL040142,

Svendsen, J-I et al. (1999): Maximum extent of the Eurasian ice sheets in the Barents and Kara Sea region during the Weichselian. Boreas, 28(1), 234-242, <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1999.tb00217.x>

Thompson, D.W. J., Wallace, J. M., Kennedy, J. J. & Jones, P. D. (2010) « An abrupt drop in Northern Hemisphere sea surface temperature around 1970 », Nature, 467, 444-447.

Van Vliet-Lanoë B. 1986 : Le pédocomplexe du Dernier Interglaciaire (de 125000 à 75000 BP). Variations de faciès et signification paléoclimatique, du sud de la Pologne à l'ouest de la Bretagne. Bull. A.F.E.Q., 1-2, 139-150.

Van Vliet-Lanoë B., 2007. The autocyclic nature of glaciations. Bull. SGF, 178, 4, 257-272

[Van Vliet-Lanoë B., 2020](#)

Van Vliet-Lanoë B., Penaud A., Henaff A. et al. 2014. Middle to late Holocene storminess in Brittany (NW France). Part II: The Chronology of Events and Climate Forcing. The Holocene 24: 434-453.

Van Vliet J., 2019 SCE, [Recent global heat waves are correlated to an exceptional solar cycle 24 | Science, climat et énergie \(science-climat-energie.be\)](#)

Van Vliet J., 2020 SCE, [Le 20ème siècle a été anormalement chaud mais le 21ème siècle revient à la normale \(1/2\) | Science, climat et énergie \(science-climat-energie.be\)](#)

Van Vliet J. & Van Vliet-Lanoë B. 2021 SCE. [Températures extrêmes et foehn – Démontez le mythe des 'dômes de chaleur' | Science, climat et énergie \(science-climat-energie.be\)](#)

Zharkova VV, Shepherd SJ, Popova E, et al. 2015 Heartbeat of the sun from principal component analysis and prediction of solar activity on a millennium timescale. Sci Rep. 2015; 5:15689. Disponible sur : <https://www.nature.com/articles/srep15689> et en français, sur <https://www.climato-realistes.fr/un-grand-minimum-solaire-attendu-pour-la-période-2020-2053-conduira-a-un-refroidissement-terrestre/>

## 7. Les Anticyclones Mobiles ou AMP, mécanismes logiques de forçage de la météo (2/2)

Mis en ligne SCE : 07.10.2022

### 7.1 . L'océan et les tempêtes historiques

En cas de refroidissement, les conditions hivernales de l'Holocène découlent de celui des mers nordiques et de Barents ainsi que de l'expansion de la glace de mer sous contrôle d'un transfert restreint et multi-centenaire du transport de chaleur vers le nord par le courant Nord Atlantique (NAC) et son transfert vers l'océan profond via le **gyre subpolaire** (entre le Labrador et le sud du Groenland). Ces rétroactions climatiques internes connexes ont été responsables de l'amplification hivernale du refroidissement du PAG européen avec des courants d'Irminger et du Gulf Stream infléchis vers le sud en hiver. Lors des maximums d'extension glaciaire, dont le dernier (LGM), une réduction de 30 à 50 % de la formation d'eau profonde entraîne une nette baisse de chaleur vers l'Europe, mais des eaux tempérées (NAC) visitent toujours la mer de Barents en été. **La THC ralentit mais ne s'est jamais arrêtée** (Lynch-Stieglitz et al. 2007 ; Jonker et al, 2012 ; Ezat et al. 2014).

**Aujourd'hui, la période du Global Warming a culminé vers 2003 et avait permis la formation intensive d'eau profonde accompagnée par une forte chaleur et beaucoup d'humidité sur les continents adjacents à l'Atlantique Nord.** Le stockage thermique dans l'océan a permis également une augmentation des précipitations, particulièrement sensible aux hautes latitudes (fonte des glaciers et du pergélisol : chaleur latente de fusion), en zone subtropicale (réduction en taille de la bande aride au profit des grands lacs au Sahara à l'Optimum climatique de notre interglaciaire (8-6000 ans BP), à l'époque Romaine et plus récemment en Europe (nombreuses crues de 1999 à 2003). Les températures élevées des années 2017-2019 sont en relation avec l'inertie thermique de l'océan, l'intensité des vents solaires (Van Vliet et Van Vliet-Lanoë, 2021) et une instabilité croissante de la météo amenant la remontée cyclique d'air saharien sur l'Europe.

**Les dépressions tempétueuses se forment généralement sur le courant chaud du Gulf Stream en contexte tempéré, vers Terre Neuve (en cas de NAO positive).** Rossby (1939) et ses collaborateurs avaient noté l'étroite similitude entre le profil de vitesse du jet-stream en régime rapide et celui qu'on observe dans les tourbillons horizontaux des cyclones tempérés. Or cette variation est corroborée par les variations saisonnières du jet-stream, d'autant plus puissantes que les perturbations du front polaire sont plus actives en hiver.

**Lamb (1979) a établi un lien entre le Petit Age Glaciaire (PAG) et le refroidissement de la surface de l'océan mer dans le Nord de l'Atlantique en se fondant sur les données historiques de la pêche à la morue.** Cela correspondrait à des conditions de glace de mer rigoureuses autour de l'Islande et à des vitesses de vent plus élevées en raison de l'augmentation des gradients de température. Le minimum solaire de Maunder au XVIIIe siècle a été une période relativement fraîche et sèche, avec des températures océaniques froides et une grande étendue de la banquise, bien que les glaciers alpins n'aient que peu augmenté pendant cette période (aridité).

Quant à l'origine de l'anticyclone des Açores à hauteur du Sahara, tout comme celle comme ses équivalents ailleurs dans le monde (à hauteur du désert du Namib, d'Atacama et de Basse Californie), elle n'est expliquée à ce jour que par la limite septentrionale ou méridionale de la cellule de Hadley intertropicale correspondante.

Une comparaison récente (Leroux, 2000) des conditions météorologiques hivernales des trois décennies de 1675 à 1704 avec celles de la période récente de 30 ans (1961 à 1990) montre que le Minimum d'activité solaire de Maunder a été caractérisé par de fortes alternances de pression au niveau de la mer avec des centres de haute pression localisés au-dessus du nord ou du nord-ouest de l'Europe et de grandes accumulations d'air continental froid et lourd du nord-est., avec des descentes d'air polaire sur l'Atlantique Nord. Cela a abouti à la formation d'un régime avec des anticyclones de surface au-dessus de la Scandinavie et de l'est de l'Atlantique Nord descendant de manière pulsée vers la **zone de convergence intertropicale des vents (ITCZ)**. En fait les anticyclones froids (polaires) et chauds (déserts) fusionnent. Ceci permettra le développement du concept **d'anticyclone mobile polaire ou AMP**.

Cette situation aboutit à un blocage mécanique de la remontée des masses d'air intertropical humide normalement véhiculées à partir du SW (Golfe du Mexique) à l'Europe, notamment à l'aplomb du Gulf Stream et donc une aridité sur l'Europe, aridité accompagnée d'incendies de forêts et de réduction de la productivité agricole. Ce phénomène se fait également sentir sur la zone sahélienne, ou le désert s'est remis à avancer, avec le retour de la famine après le répit du Global Warming des années 1980-2003. On assiste donc à un tassement vers l'équateur des zones climatiques tempérées et méditerranéennes, ce qui confirme le déplacement latitudinal de la zone de convergence intertropicale des vents (ITCZ).

## 7.2. La zone de convergence intertropicale des vents (ITCZ)

**La zone de convergence intertropicale des vents est une zone de basse pression contrôlée par la température de surface des océans et par la convection thermique localisée entre les cellules de Hadley correspondant aux grands déserts et les zones de vents alizés. Elle varie en latitude en fonction du climat, de la saison et de la nature de la surface sous-jacente (océan ou continent). Il existe une corrélation saisonnière et interannuelle significative entre la position de l'ITCZ et le contraste inter-hémisphérique contemporain des températures de surface des océans contemporaines (SST).** Cette relation est caractérisée par une sensibilité linéaire de la position de l'ITCZ au contraste de la SST entre l'Atlantique nord actuellement en cours de refroidissement et l'océan austral encore chaud. En été 2022, pour l'Atlantique, elle était généralement située au sud des îles du Cap Vert. La migration latitudinale saisonnière de l'ITCZ avec une position annuelle moyenne estimée à environ 13 °N et positionnée plus au sud (5°N) pendant le dernier maximum glaciaire sur la base de relevés similaires de la côte ouest-africaine (Leroux, 1993). L'ITCZ a pu monter à 30°N, avant la formation de la calotte groenlandaise permanente (9 Ma) amenant un climat méditerranéen en Bretagne il y a 14 Ma, accompagné par des troupeaux de lamentins !

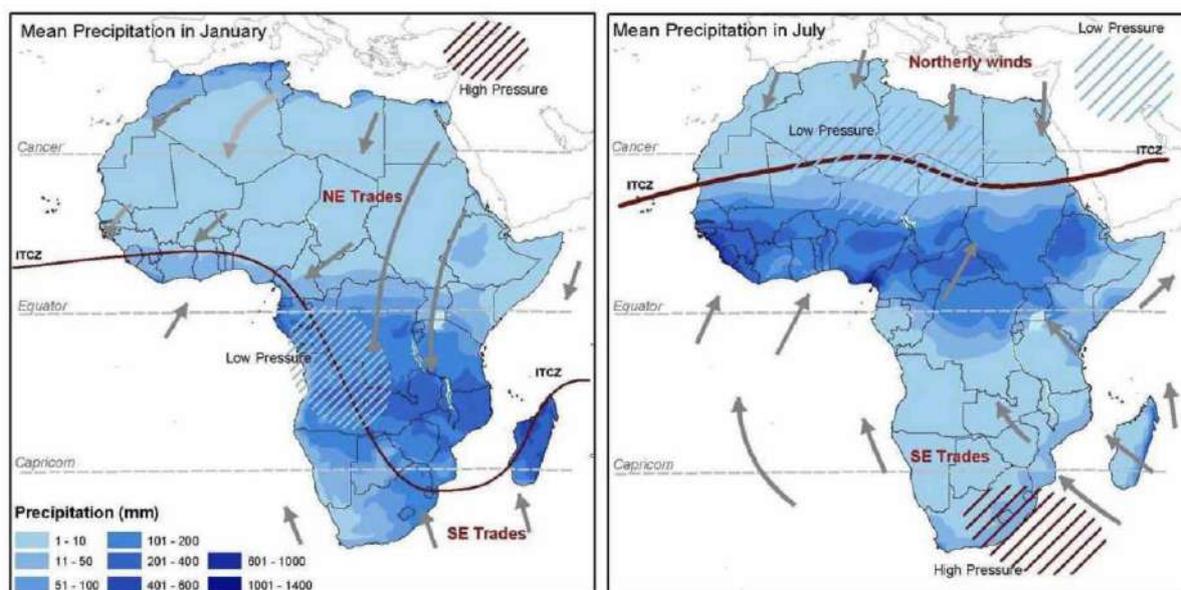


Figure 6 : Représentation de la position moyenne de l'ITCZ centrée sur l'Afrique en janvier (gauche – solstice d'été austral) et en juillet (droite – solstice d'été boréal), avec indication des vents dominants (flèches grises), des taux de précipitation moyens et des zones de haute (hachuré marron) et basse (hachuré bleu) pressions (Collier et Hughes, 2011). Aujourd'hui l'ITCZ n'est pas remonté jusqu'au Cap Vert. NB: la numérotation des figures fait suite à celle de la [partie 1](#) (se terminant avec la figure 5

L'amplitude saisonnière de variation latitudinale de l'ITCZ s'est réduite au cours des dernières décennies (Byrne et. 2018), mais sa position est demeurée à peu près constante pendant le Global Warming (NAO +). En 2011, sa position en juillet était à hauteur de 20°N le long de la côte ouest de l'Afrique. Elle peut descendre à 5°N en période d'insolation très faible (glaciation). Mais en juillet 2022, elle est autour de 7-10°N, sa position hivernale « normale ». Ce comportement est anormal.

### 7.3. Le contrôle sur la météo

Le temps en Europe occidentale, est très largement dicté par le comportement des deux centres d'actions que sont la dépression d'Islande et l'anticyclone des Açores ([voir 1<sup>re</sup> partie](#)). **Les dépressions se forment généralement sur le courant chaud du Gulf Stream en contexte tempéré, vers Terre Neuve en NAO+.** L'anticyclone des Açores, comme ses équivalents ailleurs dans le monde, aurait une origine dynamique: une ondulation du courant-jet d'altitude, plus connu sous le nom de jet stream, « *qui induirait une subsidence d'air sur la face arrière de la zone affaissée ou talweg* ». Rossby (1939) et ses collaborateurs avaient noté *l'étroite similitude entre le profil de vitesse du jet-stream en régime rapide et celui qu'on observe dans les tourbillons horizontaux des cyclones tempérés.* Or cette variation est corroborée par les variations saisonnières du jet-stream, d'autant plus puissantes que les « chaudes » du front polaire sont plus actives en hiver. » En fait, le jet stream souligne la face avant d'un anticyclone froid qui repousse vers le Nord-Est une masse d'air chaud dépressionnaire (dans l'hémisphère Nord), mobilisée par le jet à l'origine des tempêtes cycloniques (voir Fig. 2). Une relecture des cartes météorologiques et des premières images satellitaires conforte cette réinterprétation.

### 7.4. Les Anticyclones Mobiles Polaires ou AMP, l'inducteur de nos tempêtes et canicules

Le concept descriptif d'anticyclone mobile polaire ou AMP a été introduit par le climatologue français Marcel Leroux dans les années 1980-1990, théorie mise au point le long de la côte occidentale de l'Afrique en période hivernale. Ce concept est basé principalement sur les images satellitaires, qui montrent de manière journalière la descente vers l'équateur de masses d'air

**polaire avec des caractéristiques constantes. Les hautes latitudes étant en constant déficit radiatif, elles rayonnent plus d'énergie vers l'espace qu'elles n'en reçoivent. Ce déficit thermique implique le refroidissement par la base de la basse atmosphère, qui s'affaisse et s'étale par divergence, formant une zone de hautes pressions, autrement dit un anticyclone, caractérisés par :**

- une forme lenticulaire de 2.000 à 3.000 km de diamètre, le plus souvent reconnaissable par la présence sur de vastes zones de cumulus de beau temps panachées de cumulonimbus isolés, associés fréquemment à des chutes de grêle en hiver.
- un couloir dépressionnaire situé sur la face avant, conduisant à la formation d'un cyclone sous contrôle des vents chauds et humides, situé au nord-est de l'AMP (pour l'hémisphère nord), avec les formations nuageuses de type cumulonimbus avec enclumes, orages brutaux et chutes de grêle. Parfois la cellule cyclonique peut presque masquer l'AMP d'origine. Les images satellitaires montrent également que ces masses d'air polaire dense interagissent avec le relief en ne parvenant pas à franchir les obstacles orographiques de plus de 1.000 à 1.500 mètres d'altitude : elles sont soit repoussées soit divisées en 2 par le relief : ces masses d'air polaire contournent les Alpes, les Pyrénées et les Balkans, mais l'Himalaya, les Andes ou les Montagnes Rocheuses sont des obstacles quasiment infranchissables. Les pressions élevées peuvent cependant induire des vents chauds de type foehn générateurs de sécheresse et de canicule (Van Vliet & Van Vliet-Lanoë, 2021).

Ces observations sont donc cohérentes avec une masse d'air froid de 1,5 km d'épaisseur tournant dans le sens horaire de rotation et dont la forme est maintenue par la force géostrophique ou de Coriolis. Cette masse trouve son origine dans les régions polaires, elle se déplace en gardant son individualité sous l'effet du champ de pression et du relief : c'est pourquoi on parle d'anticyclone mobile polaire. Enfin, jusqu'à quelle latitude les AMP peuvent-ils se déplacer ? Leroux (2000) parle d'agglutination anticyclonique océanique au niveau des H tropicaux quasi-permanents, soit vers une latitude de 20° à 30°. Ils correspondent aux déserts du Sahara, du Kalahari ou du Namib, de Basse-Californie et d'Atacama : les pressions élevées correspondant à ces latitudes limitent vers le sud la progression des AMP affaiblis par la disparition de la force de Coriolis et les empêchent en période « chaude » d'atteindre la zone de convergence intertropicale des vents (ITCZ).

**La première question concernant les AMP est celle de leur genèse. Les hautes latitudes sont en constant déficit radiatif. Ce déficit thermique implique une zone de hautes pressions « collant » au sol, autrement dit un anticyclone dynamique.** Leroux (2000) a pu établir, en se basant sur les cartes journalières du Bulletin Météorologique européen, que les AMP formés au-dessus de l'Arctique de 1989 à 1993 l'étaient avec une fréquence de 1 par 1,1 jour, c'est-à-dire avec une fréquence très voisine de celle de la rotation terrestre. Les observations plus récentes corréler la formation des AMP avec les ondulations du jetstream polaire (Fig. 2). Enfin, les plus puissants AMP responsables des vagues de froid hivernales intenses semblent apparaître lors des épisodes d'affaissement gravitaire du vortex stratosphérique polaire (conduisant au SSW, sudden stratospheric warming) , comme ce fut le cas lors des vagues de froid de février 2021 au Texas et en Europe occidentale. Ces masses d'air froid glissent alors facilement sur une plaine continentale ou un océan froid et lisse, alors qu'une mer houleuse, tempétueuse, donc plus rugueuse favorise au contraire les échanges thermiques avec l'atmosphère notamment via les aérosols et, la génération de tempêtes cycloniques.

La genèse des AMP semble donc impliquer des phénomènes des hautes couches de la troposphère, voire de la stratosphère pour conduire à l'apparition de masses d'air froid coulant près de la surface du sol au sein des basses couches de l'atmosphère. Une telle connexion entre les hautes couches et les basses couches n'est pas exceptionnelle, puisque, pour rappel, la théorie classique de la

cyclogenèse fait appel à un tel modèle à 2 couches (Holton & Hakim, 2003). Elle présente une certaine analogie avec la circulation thermohaline. Mais une théorie de ce type n'existe pas à ce jour pour les AMP. Ces masses d'air froid, par leur nature même, sont pelliculaires, épaisses d'environ 1 500 mètres, pour un diamètre moyen de 2 000 à 3 000 kilomètres. Plus le froid au pôle est intense (donc la différence avec l'équateur grande, surtout en hiver et au printemps), plus les AMP sont puissants et plus les dépressions se trouvant sur leur face avant sont creuses (faible pression atmosphérique), induisant un vent plus violent, créant de très grosses tempêtes. En été et en automne, en raison du jour polaire, le contraste thermique est plus faible et les dépressions cycloniques deviennent dominantes, plus étendues et moins creuses, même si la descente de la goutte froide persiste.

Lors du déplacement des AMP vers le sud, la décroissance progressive de la force géostrophique va nécessairement conduire à un étalement puissant bien visible sur les images satellitaires et une réduction d'épaisseur de ces masses d'air froid. Par ailleurs, l'air sec et froid des AMP peut se réchauffer si un échange thermique est possible entre l'air de l'AMP et la surface : ce sera en particulier le cas si l'AMP se déplace sur une surface océanique chaude comme dans la zone intertropicale, les échanges liés aux phénomènes d'évaporation – condensation pouvant modifier la température des couches inférieures. Mais si l'AMP se déplace sur un continent avec une couverture neigeuse (ou sur une banquise), ces échanges seront négligeables : c'est ainsi qu'un AMP peut induire pendant plusieurs jours une température négative à la latitude de 30°N (Houston, Texas, février 2021). Au mois de Juillet 2022, ils descendaient jusqu'à l'ITCZ sous la forme de masses agglutinées en cours de réchauffement.

**Comme indiqué plus haut, le déplacement des AMP est contraint par le relief. Dès lors, seules certaines trajectoires sont possibles, comme indiqué sur la figure 7 ci-dessus. On retiendra en particulier que la majorité des AMP atteignant l'Europe occidentale proviennent :**

- **de la zone à l'Ouest du Groenland et de la Terre de Baffin, en transitant par la Baie d'Hudson ou le Golfe du Labrador.**
- **du Groenland, où ils peuvent être renforcés par les vents catabatiques descendant de la calotte glaciaire qui a une altitude voisine de 3.000 m, les courants marins froids de l'Est Groenlandais et du Labrador fonctionnant comme un « toboggan ».**
- **de la Mer Blanche à l'Est de la Scandinavie et à l'Ouest de l'Oural (le *Moscou Express*)**

Les AMP se déplaçant sur l'Europe orientale, à l'est des Balkans, ne sont que rarement déviés vers l'Europe occidentale, sauf en hiver. Des **agglutinations anticycloniques** ou empilement de pulses anticycloniques successifs peuvent également se produire sous nos latitudes comme au printemps 2022. Elles sont alors généralement décrites comme des situations de blocage. . Que plusieurs AMP s'agglutinent en hiver et l'on obtient à partir d'un air déjà très froid une situation anticyclonique stable favorable aux conditions « polaires » à nos latitudes. C'est ce qui s'est passé lors des deux (d'après tableau IRM) vagues de froid de l'hiver 2009-2010 et celle de février 2012. , ou encore celles des hivers 1954, 1956, 1962-3, 1973-4 et 1985-6.

Enfin, jusqu'à quelle latitude les AMP peuvent-ils se déplacer ? Marcel Leroux (2000) parle d'agglutination anticyclonique océanique hivernale au niveau des H tropicaux quasi-permanents, soit vers une latitude de 20° à 30°. Ils sont en connexion avec les déserts du Sahara, du Kalahari ou du Namib, de Basse-Californie et d'Atacama : en fin du XXème siècle les pressions élevées

correspondant à ces latitudes bloquent le mouvement des AMP affaiblis par la disparition de la force de Coriolis et les empêchent d'atteindre la zone de convergence intertropicale des vents (ITCZ).

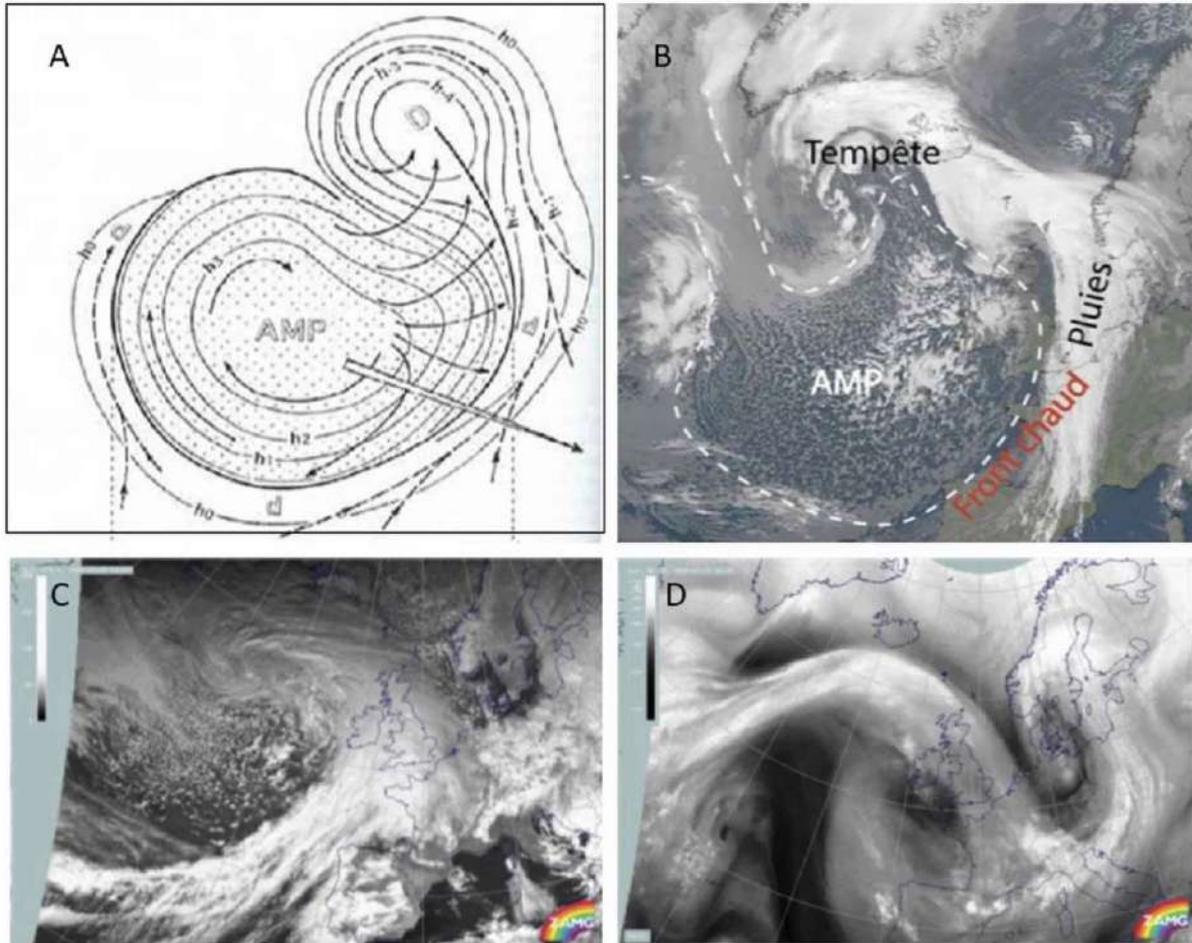


Figure 7 : A) AMP dessin M.Leroux. B-C-D. structure et circulation dans et autour d'un AMP et différentes configurations d'AMP vues en Juin 2022.

La genèse des AMP semble donc impliquer des phénomènes des hautes couches de la troposphère, voire de la stratosphère pour conduire à l'apparition de masses d'air froid dans les basses couches de l'atmosphère près de la surface. Une telle connexion entre les hautes couches et les basses couches n'est pas exceptionnelle, puisque, pour rappel, la théorie classique de la cyclogenèse fait appel à un tel modèle à 2 couches. Mais une théorie de ce type n'existe pas à ce jour pour les AMP. Ces masses d'air froid, par leur nature même, sont pelliculaires, épaisses d'environ 1 500 mètres, et d'un diamètre moyen de 2 000 à 3 000 kilomètres. Plus le froid au pôle est intense (donc la différence avec l'équateur grande), plus les AMP sont puissants et plus les dépressions se trouvant sur leur face avant sont creuses (faible pression atmosphérique), induisant un vent plus violent, responsable de très grosses tempêtes.

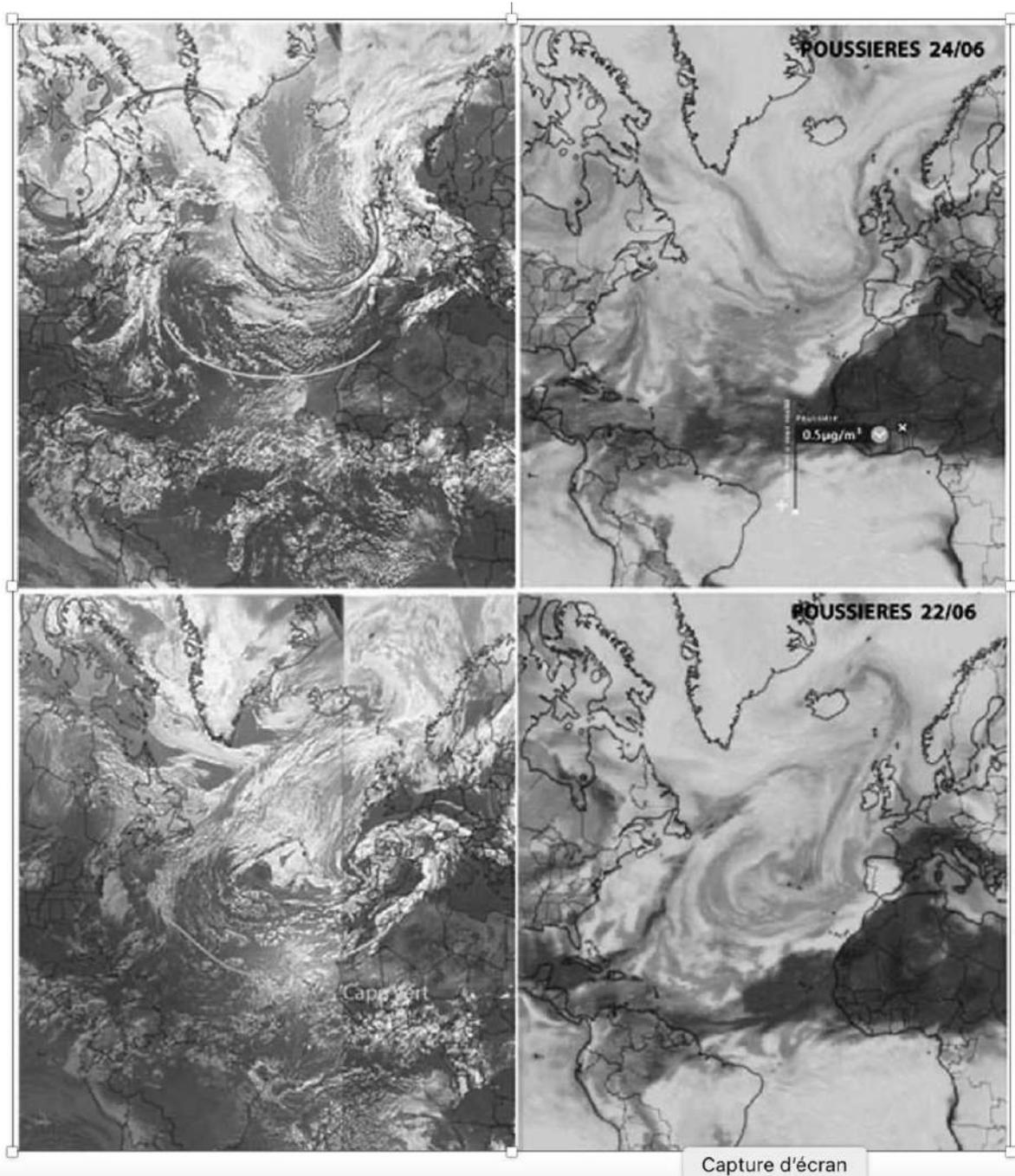


Figure 8 : Images satellitaires successives visible et charges de poussières associées du 22 et 24 juin 2022, soulignant le pédoncule (ex-vallée froide) lié à la progression des masses d'air froid vers l'équateur (<https://www.windy.com>). Ces poussières s'observent chez nous lors de la remontée d'air chaud saharien.

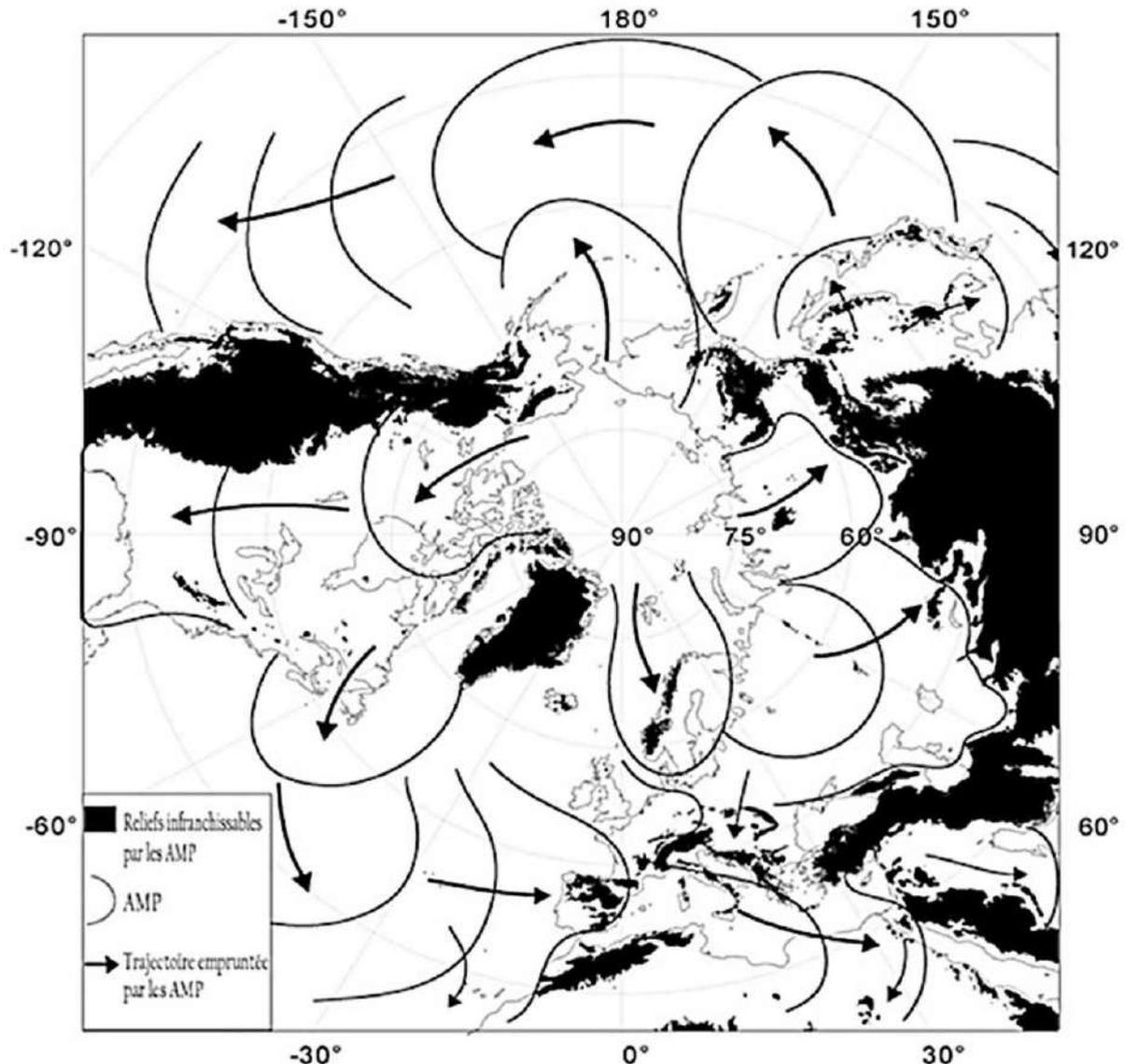


Figure 9 : Trajectoires des AMP avec agglutination dans l'hémisphère nord d'après Leroux, 2000. Les aires montagneuses sont en noir. A comparer avec la figure 10.

aires montagneuses sont en noir. A comparer avec la figure 10. Lors du déplacement des AMP vers l'équateur, la décroissance progressive de la force géostrophique va nécessairement conduire à une augmentation de taille et une réduction d'épaisseur de ces derniers. Par ailleurs, l'air sec et froid des AMP se réchauffe par un échange thermique est possible entre l'air de l'AMP et la surface, et devient moins marqué : ce sera en particulier le cas si l'AMP se déplace sur une surface océanique chaude, les échanges liés aux phénomènes d'évaporation – condensation pourront relever la température des couches inférieures. Mais si l'AMP se déplace sur un continent avec une couverture neigeuse (ou sur une banquise), ces échanges seront négligeables : c'est ainsi qu'un AMP peut induire pendant plusieurs jours une température négative à la latitude de 30°N (Houston, Texas, février 2021).

### 7.5. Implications météorologiques des AMP

Ces masses d'air froids glissent facilement sur un océan froid et lisse, alors qu'une mer houleuse, tempétueuse, donc plus rugueuse favorise au contraire les échanges thermiques avec l'atmosphère via les aérosols, creusant les dépressions cycloniques et les ouragans. Celles-ci sont canalisées par les

anticyclones « désertiques » et véhiculent vers le Nord de l'air chaud et humide provenant d'une mer chaude comme la mer Méditerranée (28°C cet été) ou les Caraïbes ou encore la Mer de Chine méridionale. Ces dépressions se forment dans le Golfe de Guinée ou plus au Nord le long du Gulf Stream mais peuvent ainsi remonter directement du Golfe de Guinée sous le guidage du Jet Stream comme dans le cas de la tempête Xynthia en 2010 ou de Lorenzo en 2019 (Fig. 11).

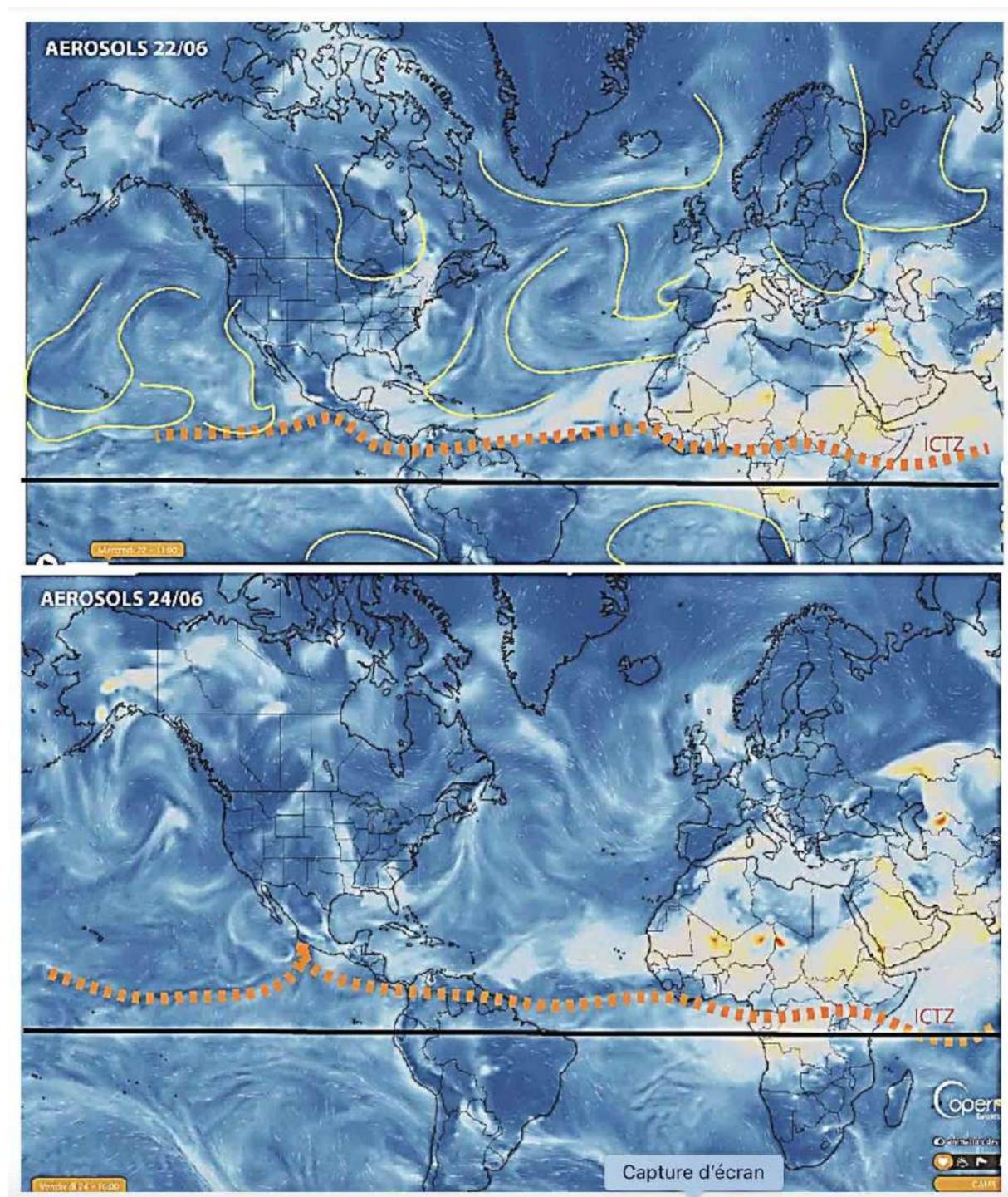


Figure 10 : Evolution de la descente des AMP successifs du 22 au 24 juin 2022 visualisée par la charge en aérosols de la basse troposphère. Images Copernicus. La zone de l'ITCZ correspond à la ligne en pointillé et la ligne noire représente l'équateur.

## 7.6. AMP et tempêtes

Les plus grosses tempêtes qui ont affecté l'Atlantique Nord, ont été accompagnées systématiquement par des remontées d'air tropical suivies par de l'air polaire, bien visible sur l'imagerie satellitaire. Cela a été le cas du hurricane Sandy (Octobre 2012, US), ou Xynthia (F), de la grosse tempête de Janvier 1953 en Belgique et aux Pays Bas mais également celles de 1986, 1987 et 1990 (Fig.11). La tempête d'Octobre 1987 a été précédée de vents du Sud, très chauds.

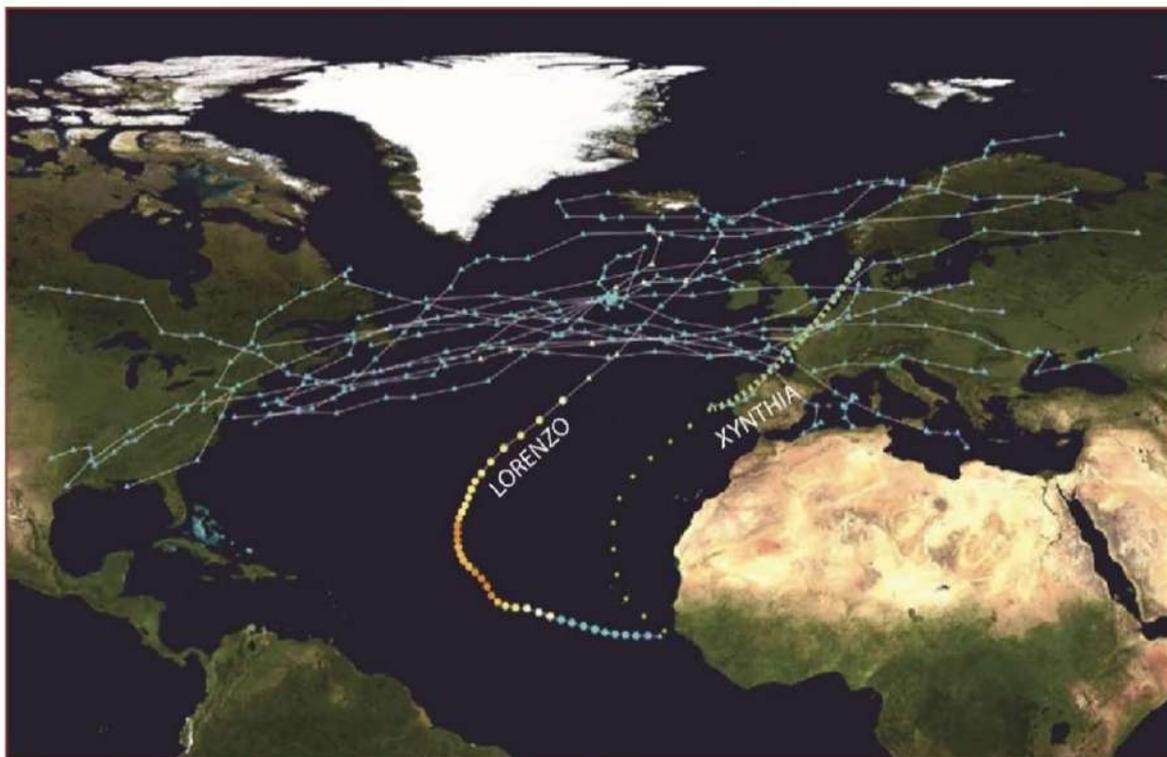


Figure 11 : Trajectoire de l'ouragan Lorenzo du 16 Decembre 2019. (ligne pointillée jaune) vient de la zone intertropicale au niveau de de l'ITCZ, et repoussée à l'ouest par les alizés, avant d'être reprise par le flux ouest sur l'Atlantique. La trajectoire de Xynthia (du 27 février 2010) semble emprunter le même cheminement (vert). Les lignes en bleu reprennent la trajectoire des grosses tempêtes de la décennie.

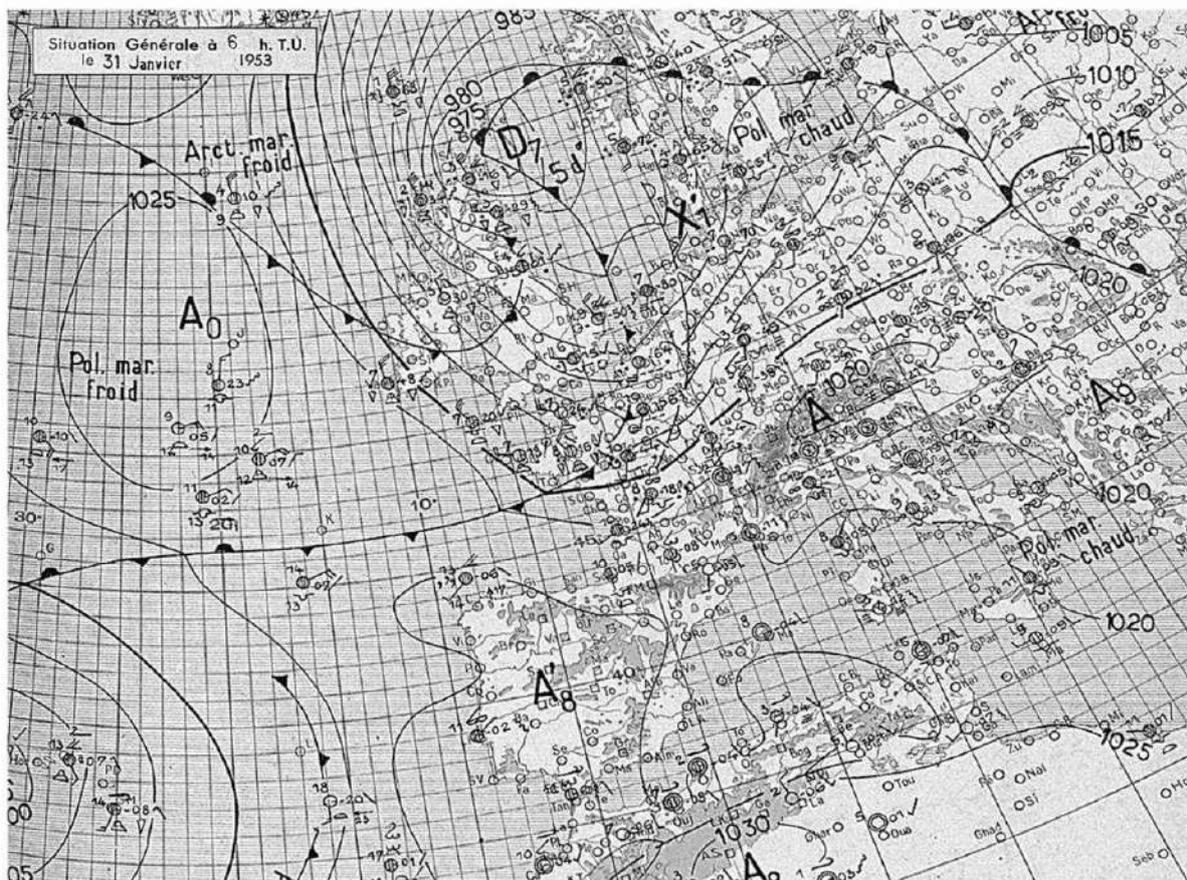


Figure 12 : Carte météorologique de la tempête catastrophique du 31 Janvier 1953, avec une surcote de tempête de plus de 3,6 m aux Pays Bas et pays avoisinants, a été combinée avec la marée haute et, selon les données thermiques et barométriques, à l'avant d'une série d'AMP avec descentes d'air polaire (Polaire et Arctique maritime froid) (<http://tempetes.meteo.fr/spip.php?article179>).

Ceci veut dire que les AMP ont toujours été présents, même au plus fort du réchauffement climatique récent, avec seule différence par rapport à cette année, une migration limitée vers le Sud. Mais leur fréquence a augmenté après 2010, selon les pilotes de vols transatlantiques et moyens courriers (Lee et al. 2019).

Plus loin de nous, une tempête monstrueuse en hiver 1052 AD, la « St Thomas Storm » centrée sur la Manche (Van Vliet-Lanoë et al. 2014) a été suivie l'été 1053 AD par une canicule majeure, préalable à un refroidissement climatique notoirement instable mais marqué qui persistera jusqu'en 1200 ans (Marusek 2010). Certains épisodes décrits dans les archives climatiques correspondent à la période 1300-1399 AD (Marusek 2010, Huck 2022) dans un contexte également instable et froid qui marque l'entrée dans le PAG. En 1718, 1719, 1747 et 1779 AD, les canicules sont très meurtrières (Coillat 2022). De l'air saharien s'abat en été 1719 sur la région parisienne et les témoins rapportent même l'invasion de nuées de sauterelles en provenance d'Afrique du Nord et qui ravagent les cultures jusqu'en Normandie. La sécheresse est si importante qu'à Paris, la Seine atteint son plus bas niveau historique.

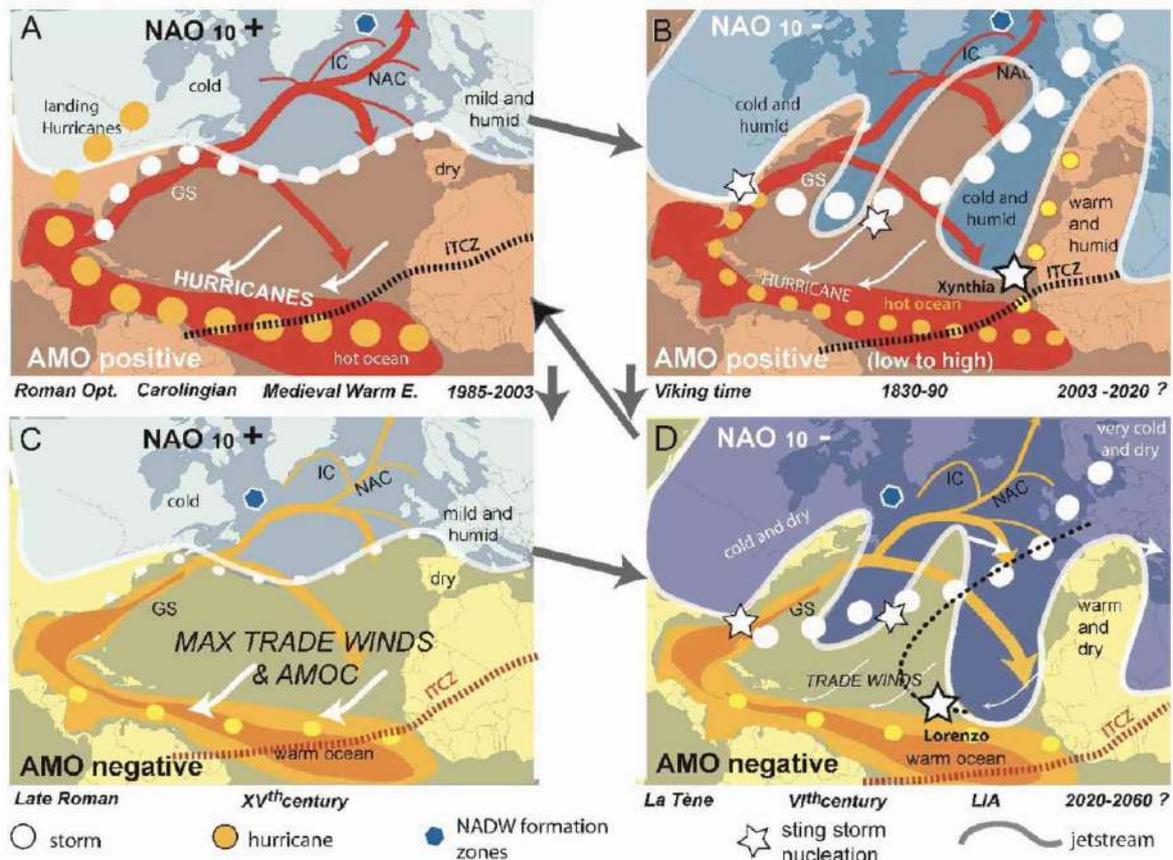


Figure 13 : Evolution de circulation des tempêtes en relation avec l'instabilité latitudinale du jet polaire (NAO décennale) et des températures de surface de l'océan (Modifié de Van Vliet-Lanoë et al., 2014).

Les deux canicules les plus meurtrières eurent lieu en 1846 et 1859 (année marquée en France par l'un des mois de juillet les plus chauds de l'histoire). La crue millénaire de la Seine en janvier 1910 résultant d'un hiver très froid et neigeux a été suivie par la canicule terrible de 1911. Cette situation ressemble étonnamment à ce que nous sommes en train de (re)vivre. Ce sont des conditions météorologiques qui, selon les enregistrements sédimentaires, se sont étendues au début du Dernier Glaciaire, incendies de forêt, ruissellement et crues inclus.

**Nous pouvons donc, sans jouer les prédicateurs, reconstruire les conditions météorologiques probables pour la décennie à venir : une transition climatique naturelle agitée, avec tempêtes et inondations plus fréquentes en association avec des vagues de chaleurs remontant du Sahara, également associées à une aridité plus puissante et des feux de forêt difficile à maîtriser. La remontée d'ouragans depuis l'ITCZ est assez aléatoire (Xynthia, Lorenzo), mais probablement sous contrôle des profondes oscillations du Jet Stream (Fig.2 ; Van Vliet-Lanoë et al. 2014).**

Dans ce contexte, la modélisation des AMP est loin d'être triviale parce que leur limite supérieure correspond à une zone d'inversion de température séparant l'air froid de l'AMP de l'air plus chaud qui le domine (l'image incorrecte des médias d'un point de vue physique du « dôme de chaleur », Van Vliet et Van Vliet-Lanoë, 2021). Cette inversion de température introduit 2 régimes différents de mouvement vertical : un mouvement de stagnation vertical en-dessous de l'inversion thermique (l'AMP) et un régime convectif normal au-dessus de cette dernière. Seul ce dernier régime est pris en compte dans les modèles « officiels » actuels.

## 7.7 Conclusion finale

**La majeure partie du réchauffement climatique récent étant due à des changements dans l'activité solaire et des vents solaires, ce réchauffement est principalement d'origine naturelle, probablement tidale, au sein du système solaire (Connely et al, 2021). Il présente en outre de très fortes similarités avec les perturbations de la période préindustrielle et plus particulièrement les DO ou évènements de Bond qui ont rythmés l'Holocène et au moins le dernier glaciaire.**

La deuxième moitié du XXe siècle a été marquée par un pic d'activité solaire, également modélisé par l'IPCC (GIEC ; fig.3). Ce pic mesuré s'est terminé depuis l'an 2003, et le cycle solaire 24 (2008-2019) a été marqué par une première réduction spectaculaire d'activité solaire. Plusieurs auteurs annoncent un premier minimum d'activité pour les cycles 25 à 27 (2020-2053) comme Keeling & Whorf (2000) et Zharkova et al. (2015). L'activité solaire devrait donc continuer à se réduire par étapes pour atteindre un nouveau Grand minimum comparable à celui de Maunder au XXIVe siècle (Keeling & Whorf, 2000). Ce Grand Minimum et la période calme qui suit, pourrait signer vers 2300 l'entrée très progressive de la planète Terre dans la prochaine glaciation, comme pour la majorité des cyclicités, après un interglaciaire qui aura duré pratiquement 10.000 ans ou 15.000 ans si on se réfère au début de la déglaciation dans l'hémisphère sud.

Cette réduction d'activité solaire est à mettre en regard (i) du ralentissement rapide de la circulation thermohaline, (ii) du rabatement progressif du Gulf Stream vers l'Afrique du Nord au détriment de l'Atlantique Nord, et enfin, (iii) de la remontée estivale en latitude anormalement faible de l'ITCZ vers le nord : tous ces éléments accompagnent un processus de refroidissement de l'Atlantique Nord et du Pacifique Nord qui ont déjà démarré et se font nettement sentir cette année 2022. **Cette tendance est renforcée des précipitations dépressionnaires limitées mais parfois exceptionnelles en hiver, des remontées « caniculaires » d'air tropical ou désertique marquées même en hiver. Cette situation a pour résultat un déficit pluviométrique estival majeur couplé à un ensoleillement élevé depuis la fin avril sur l'Europe et une aridification** similaire à celle des années 1960-1980.

Cette aridification est due au passage presque incessant depuis le début de l'année 2022 d'anticyclones mobiles polaires, quasi-diurnes le long des côtes de l'Europe. Beaucoup de ces derniers allant ensuite s'agglutiner sur l'ITCZ avec l'anticyclone des Açores donnent à ce dernier une dimension inhabituellement grande, attribuée à tort et par défaut aux effets anthropiques. Il mérite d'être souligné que les conditions météorologiques calmes et ensoleillées caractéristiques des AMP conduisent à des vents faibles et une insolation importante. La sécheresse de l'air réduit la chaleur spécifique de ce dernier et contribue à des températures diurnes élevées et à des nuits fraîches comme le dimanche 18 septembre 2022. Ces amplitudes diurnes sont caractéristiques d'un climat plus continental : les températures élevées de l'été 2022 ne résultent donc pas du sempiternel « réchauffement climatique », mais bien d'une aridification. Enfin, il est à craindre que ce climat plus continental ne se traduise par un hiver 2022-23, déjà en position décennale (2010 +12 ans) notoirement plus froid. C'est ce que montre également le développement de la Niña, froide et sèche à l'ouest des Galápagos au niveau de l'ITCZ (19°C au lieu des 28°C d'un Niño).

**Avec cette aridification, la bataille de l'eau s'étend à l'Europe occidentale**, et elle devient aussi cruciale que celle de l'énergie. Au niveau mondial, cette situation marque le grand retour de la famine des années 1960 avec son cortège de paupérisation et de régression sociale.

La sécheresse de plus en plus présente et l'insolation élevée liée à une météo anticyclonique persistante expliquent, la fréquence des incendies de végétation et l'état calamiteux des glaciers de

montagnes, aussi bien que des épisodes pluvieux exceptionnels et les canicules. Le responsable de cette situation n'est ni l'homme, ni les gaz à effet de serre, mais tout simplement la force irrésistible des dynamiques atmosphériques et océaniques réagissant au refroidissement orbital programmé de l'Arctique et à l'activité solaire sous influence tidale de notre système solaire.

#### 7.8 BIBLIOGRAPHIE COMMUNE AUX DEUX PARTIES (1/2 et 2/2)

Berger, A. Spectrum of climatic variations and their causal mechanisms. *Geophysical Surveys* 3, 351–402 (1979).  
<https://doi.org/10.1007/BF01449756>

Berger A. & Loutre M.F. 1991 Insolation values for the climate of the last 10 million years *Quaternary Science Reviews* 10(4):297-317 DOI: 10.1016/0277-3791(91)90033-Q

Byrne, M.P., Pendergrass, A.G., Rapp, A.D. et al. (2018). Response of the Intertropical Convergence Zone to Climate Change: Location, Width, and Strength. *Curr. Clim. Change Rep* 4, 355–370 <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0110-5>

Caesar L., G. D. McCarthy, D. J. R. Thornalley et N. Cahill, 2021 Current Atlantic Meridional Overturning Circulation weakest in last millennium. *Nature Geoscience*, 14, 118–120, DOI 10.1038/s41561-021-00699-z,

Chand S.S, Walsh K.J., Camargo S.J et al., 2022, Declining tropical cyclone frequency under global warming *Nature climate change* <https://www.nature.com/articles/s41558-022-01388-4.pdf>

Coillat J. 2022. Climat / Mortelles canicules. Hérodote Publié ou mis à jour le : 2022-08-25 17:46:21 [https://www.herodote.net/Mortelles\\_canicules-synthese-2294.php](https://www.herodote.net/Mortelles_canicules-synthese-2294.php).

Connolly R., Soon W., Connolly M., et al. 2021. How much has the Sun influenced Northern Hemisphere temperature trends? An ongoing debate. *Res. Astron & Astrophys.* 2021 Vol. 21 No. 6, 131(68pp) doi: 10.1088/1674-4527/21/6/131

[Cresswell-Clay, N., Ummenhofer, C.C., Thatcher, D.L. et al. \(2022\)](#) Twentieth-century Azores High expansion unprecedented in the past 1,200 years. *Nat. Geosci.* 15, 548–553.

Dansgaard, W., Johnsen, S. J., Clausen, H. B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N. S., Hammer, C. U., Hvidberg, C. S., Steffensen, J. P., Sveinbjörnsdóttir, A. E., Jouzel, J., Bond, G. (1993) Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, 364 (6434). 218-220 doi:10.1038/364218a0

De Angelis, M., et al. (1992), Source of continental dust over Antarctica during the last climatic cycle, *J. Atmos. Chem.*, 14, 233–244.

Duplessy J.C. (1996) : Quand l'Océan se fâche, *Histoire Naturelle du Climat*, Odile Jacob

Eiríksson J., Bartels-Jónsdóttir, H. B., Cage, A. G., et al. 2006 Variability of the North Atlantic Current during the last 2000 years based on shelf bottom water and sea surface temperatures along an open ocean/shallow marine transect in western Europe. *The Holocene* 16, 7 . 1017 & 029

Ezat MM. Rasmussen T.L. Groeneveld G., 2014. Persistent intermediate water warming during cold stadials in the southeastern Nordic seas during the past 65 k.y. , 2014; 42 (.8. 663–666 doi:10.1130/G35579.1

Ganopolski, A., Winkelmann, R. & Schellnhuber, H. Critical insolation–CO<sub>2</sub> relation for diagnosing past and future glacial inception. *Nature* 529, 200–203 (2016). <https://doi.org/10.1038/nature16494>

[Goslin, J., Fruergaard, M., Sander, L., et al., 2018.](#) Holocene centennial to millennial shifts in North-Atlantic storminess and ocean dynamics. *Scientific Reports* 8, 12778.

Holton J.R., Hakim G.J., *Dynamic Meteorology*, Academic Press, 2013

Huck V. 2017. <https://www.prevision-meteo.ch/almanach/1300-1399>

Hung CC (2007) Apparent relations between solar activity and solar tides caused by the planets [archive] NASA Report, TM-214817, 2007

Joussaume S. 1989 Simulations du climat du dernier maximum glaciaire à l'aide d'un modèle de circulation générale de l'atmosphère incluant une modélisation du cycle des isotopes de l'eau et des poussières d'origine désertique Thèse : Terre, océan, espace : Paris 6 : 1989

[Keeling C. D. and Whorf T. P. 2000](#). The 1,800-year oceanic tidal cycle: A possible cause of rapid climate change .PNAS 97 (8) 3814-3819

Krivolutsky, A., Kuminov, A., and Vyushkova, T., 2005 Ionization of the Atmosphere Caused by Solar Protons and Its Influence on Ozone of the Earth during 1994–2003, *J. Atmos. Sol.–Terr. Phys.*, 67 ( 1–2), 105–117.

Lamb HH, Frydendahl K (1991) *Historic storms of the North Sea, British Isles and Northwest Europe*. Cambridge University Press, Cambridge

Larryn W. Diamond\*, Nikolay N. Akinfiev (2003) Solubility of CO<sub>2</sub> in water from –1.5 to 100 °C and from 0.1 to 100 MPa: evaluation of literature data and thermodynamic modelling. *Fluid Phase Equilibria* 208) 265–290

Lashkari H. , Mohammad Z. Keikhosrav G. 2017 Annual Fluctuations and Displacements of Inter Tropical Convergence Zone (ITCZ) within the Range of Atlantic Ocean-India *Open Journal of Ecology* 07(01):12-33 DOI: 10.4236/oje.2017.71002

Lee, S.H., Williams, P.D. & Frame, T.H.A. Increased shear in the North Atlantic upper-level jet stream over the past four decades. *Nature* 572, 639–642 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1465-z>

Leroux, M., Aubert, L., Comby, J., Mollica, V., Passerat de La Chapelle, P. Reynaud, R. 1992 Déficit pluviométrique hivernal sur la France : autopsie des agglutinations anticycloniques des hivers de 1988 à 1992", *Science et Changements Climatiques, Sécheresse*, 3, ( 2) 103-113. Libbey Eurotext.

Leroux, 1993 « The Mobile Polar High: a new concept explaining the actual mechanisms of the meridional air-mass and energy exchanges, and the global propagation of palaeoclimatic changes », *Global and Planetary Changes*, 7, Elsevier Science Publ., 69-93.

Lu, Q.-B. 2009 Correlation between Cosmic Rays and Ozone Depletion 2009, *Phys. Rev. Lett.* 102, 118501

[Lurton, T., Balkanski, Y., Bastrikov, V., Bekki, Set al. \(2020\)](#). Implementation of the CMIP6 forcing data in the IPSL-CM6A-LR model. *Journal of Advances in Modelling Earth Systems*, 12, e2019MS001940.

Lynch-Stieglitz J., Adkins J.F., Curry W.B., Dokken T et al. 2007. Atlantic meridional overturning circulation during the last glacial maximum *Science*, 316 pp. 66-69

Marusek JA (2010) *A Chronological Listing of Early Weather Events*, 580 pp. Available at: <http://www.breadandbutter-science.com/Weather.pdf>.

Meier, H.E M., Kniesbusch, M., Dieterich, C.,, et al. 2022. Climate change in the Baltic Sea region: a summary, *Earth Syst. Dynam.*, 13, 457–593, <https://doi.org/10.5194/esd-13-457-2022>,

[Rahmstorf, S., Box, J. E., Feulner, G., Mann, M. E., Robinson, A., Rutherford, S., & Schaffernicht, E. J. \(2015\)](#). Exceptional twentieth-century slowdown in Atlantic Ocean overturning circulation. *Nature Climate Change*, 5(5), 475– 480.

Rossby CG. 1939 Relation between variation in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semipermanent centers of action. *J Marine Res*; 2: 38-50.

Ruddiman, W.F (2003).. The Anthropogenic Greenhouse Era Began Thousands of Years Ago. *Climatic Change* 61, 261–293 <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000004577.17928.f8>

Schneider, T., Bischoff, T. & Haug, G. 2014 Migrations and dynamics of the intertropical convergence zone. *Nature* 513, 45–53 (). <https://doi.org/10.1038/nature13636>

[Solheim, J.-E., Falk-Petersen, S., Humlum, O. and Mörner, N.-A. \(2021\)](#) Changes in Barents Sea Ice Edge Positions in the Last 442 Years. Part 2: Sun, Moon and Planets. International Journal of Astronomy and Astrophysics, 11, 279-341.

Steinhilber, F., Beer J., Fröhlich C.. (2009), Interplanetary magnetic field during the past 9,300 years inferred from cosmogenic radionuclides, J. Geophys. Res, doi:10.1029/2009GL040142,

Svendsen, J-I et al. (1999): Maximum extent of the Eurasian ice sheets in the Barents and Kara Sea region during the Weichselian. Boreas, 28(1), 234-242, <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1999.tb00217.x>

Thompson, D.W. J., Wallace, J. M., Kennedy, J. J. & Jones, P. D. (2010) « An abrupt drop in Northern Hemisphere sea surface temperature around 1970 », Nature, 467, 444-447.

Van Vliet-Lanoë B. 1986 : Le pédocomplexe du Dernier Interglaciaire (de 125000 à 75000 BP). Variations de faciès et signification paléoclimatique, du sud de la Pologne à l'ouest de la Bretagne. Bull. A.F.E.Q.,1-2, 139-150.

Van Vliet-Lanoë B., 2007. The autocyclic nature of glaciations. Bull. SGF, 178, 4, 257-272

[Van Vliet-Lanoë B., 2020](#)

Van Vliet-Lanoë B., Penaud A., Henaff A. et al. 2014. Middle to late Holocene storminess in Brittany (NW France). Part II: The Chronology of Events and Climate Forcing. The Holocene 24: 434-453.

Van Vliet J., 2019 SCE, [Recent global heat waves are correlated to an exceptional solar cycle 24 | Science, climat et énergie \(science-climat-energie.be\)](#)

Van Vliet J., 2020 SCE, [Le 20ème siècle a été anormalement chaud mais le 21ème siècle revient à la normale \(1/2\) | Science, climat et énergie \(science-climat-energie.be\)](#)

Van Vliet J. & Van Vliet-Lanoë B. 2021 SCE. [Températures extrêmes et foehn – Démonter le mythe des ‘dômes de chaleur’ | Science, climat et énergie \(science-climat-energie.be\)](#)

Zharkova VV, Shepherd SJ, Popova E, et al. 2015 Heartbeat of the sun from principal component analysis and prediction of solar activity on a millennium timescale. Sci Rep. 2015; 5:15689. Disponible sur : <https://www.nature.com/articles/srep15689> et en français, sur <https://www.climato-realistes.fr/un-grand-minimum-solaire-attendu-pour-la-periode-2020-2053-conduira-a-un-refroidissement-terrestre/>

## [8. Le vortex saisonnier stratosphérique polaire et son impact sur la météo](#)

Mis en ligne SCE : 16.06.2023

### 8.1 INTRODUCTION

La Terre par sa position, en tant que satellite du soleil, reçoit son énergie de plusieurs façons :

1) Elle dépend directement par la qualité de l'insolation en fonction de la distance relative avec le soleil et l'obliquité de son axe de rotation, ce qui correspond au **forçage orbital**, pilier de **l'évolution climatique terrestre**, ce jusqu'à une échelle de quelques centaines d'années.

2) La troposphère reçoit superficiellement son énergie par les rayonnements photoniques solaires filtrés par la couche d'ozone ou Tropopause.

3) Un autre apport énergétique résulte de la présence du satellite terrestre, la lune, et à la constitution intrinsèque de l'ensemble du système solaire, **les forces tidales ou gravitaires** qui modulent également l'activité de notre étoile à l'échelle diurne à centennale en activant l'insolation directe (TSI) et jouent un rôle indirect dans beaucoup de processus terrestres comme le vortex polaire (Fig.1a).

4). La Terre reçoit enfin des flux d'ondes issu de l'activité du Soleil accompagnés de plasma, le **Vent Solaire** (Fig.1b), émis lors des tempêtes magnétiques, et modulé sur Terre par le champ magnétique terrestre.

5) Une dernière source énergétique, interne cette fois, est de nature **géomagnétique et géothermique**, issue des forces gravitaires (lune + système solaire) et de réactions nucléaires dans le noyau terrestre.

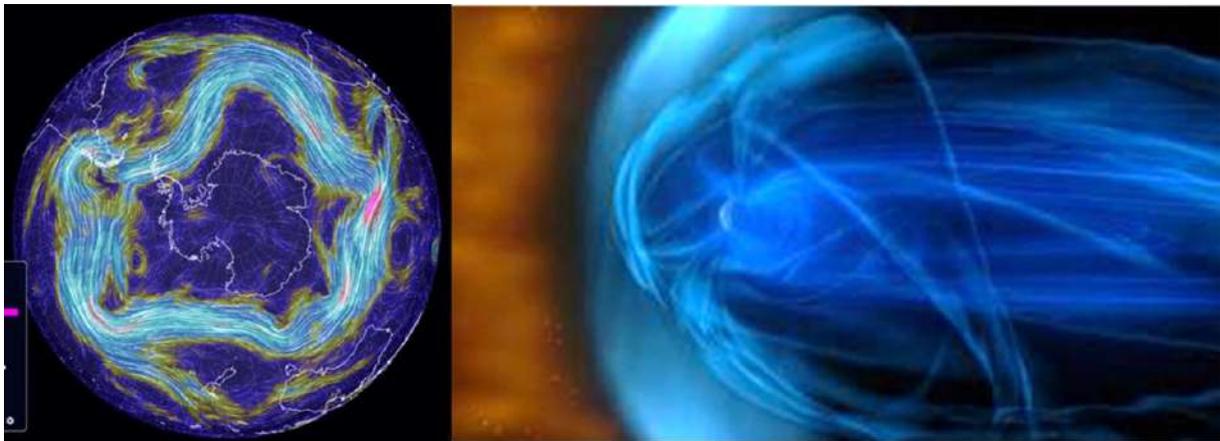


Figure 1 : a) hexagone gravitaire du jet polaire (altitude 10 km) de l'hémisphère sud 22/12/2022 (Earthfor null) ; b) impact d'une tempête magnétique de vent solaire sur la magnétosphère terrestre (Space weather NASA). Notez la présence des 2 cornets polaires (1 & 2).

**Les apports énergétiques sont donc essentiellement d'origine extraterrestre sauf le flux géothermique et géomagnétiques internes.** Mais la Terre interne se refroidit progressivement. Sa température globale est encore suffisante pour permettre les activités volcaniques et tectoniques, notamment sous les calottes glaciaires, Ouest Antarctique ou Islandaise. Le reste est transmis via l'océan dont la température basale (5000m) est comprise entre +4°C et 0°C.

Le réchauffement actuel de l'atmosphère et de l'océan superficiel (< 200m) est donc surtout contrôlé par divers **apports énergétiques externes** interactifs et puissants, n'était celui imputé à l'homme. Contrairement aux affirmations simplistes du GIEC, la troposphère terrestre qui se réchauffe très faiblement, est un système convectif instable, turbulent et chaotique, tout comme l'océan. C'est ce que montrent toutes les analyses satellitaires depuis au moins trois décennies. Il n'a aucun paramètre dominant spécifique du climat, si ce n'est l'activité solaire.

**Vu le faible pourcentage relatif de la surface terrestre émergée (30%), le stockage** de l'apport thermique solaire incident se fait essentiellement dans la **masse océanique** et dans une moindre mesure dans la troposphère. La rotation diurne de la planète (force Coriolis) en couplage avec la topographie des fonds océaniques induit au sein de la masse océanique la **circulation thermohaline**, un des moteurs d'échange thermiques inter-latitudinaux. Elle renvoie vers la **troposphère**, via l'évaporation et les vents zonaux, l'énergie solaire (UVA) surtout stockée dans l'océan intertropical. Des ondes planétaires inertielles comme sur les autres planètes du système solaire affectent de manière antihoraire dans l'hémisphère nord (HN) ces courants atmosphériques ou océaniques,

surtout pendant les mois d'hiver. Le vortex polaire et pro parte le jet stream polaire dessine sous l'impact des ondes gravitaires un hexagone, tout comme pour Jupiter ou Saturne (Fig.1a) (Fletcher et al., 2018) là où il existe un gradient latitudinal dans la vitesse des vents atmosphériques, ce qui est le cas des mésosphères des planètes telluriques.

Il se crée en conséquence, comme sur les autres planètes, – une zone de **haute pression polaire** de nature anticyclonique à rotation antihoraire, – suivie vers 60-50° de latitude par un flux tempéré et dépressionnaire de direction antihoraire (HN), les **vents d'Ouest** et, enfin, – une zone de hautes pressions subtropicales vers 30° qui génère pro parte **les vents alizés** de direction inverse (horaires) autour de l'équateur. Des ondes transitoires, de nature gravitaire se propagent de la **Troposphère** vers la haute atmosphère en déformant les **jets streams** et en interférant également sur la dynamique de la tropopause à la base de la stratosphère.

Si les climatologues s'intéressent surtout à la troposphère, cet apport énergétique extraterrestre transite d'abord via la « **stratosphère** » **plus particulièrement entre le sommet de la troposphère (vers 10 km) et la partie supérieure de l'atmosphère terrestre, l'ionosphère (> 100 km, Fig.2), une zone où la densité de l'atmosphère est très très faible mais hautement énergétique. Il est donc important d'analyser comment s'effectue cette transmission majeure de l'énergie et quels en sont les diverses conséquences pour notre planète.**

Aux latitudes moyennes, la stratosphère s'étend d'environ 10 km à 50 km au-dessus de la surface de la Terre, avec à sa base, la Tropopause ou **couche d'ozone** (Fig.2). Toute évolution du vent/ flux particulaire solaire entraîne des changements du gradient de température entre l'équateur et les pôles résultant d'une modification de la circulation stratosphérique générale, sous l'impulsion des forces de Coriolis. Au début du printemps, la circulation stratosphérique équatoriale s'inverse d'ouest en l'est (Hauchecorne et al., 2022), générant l'**Oscillation Quasi-Biennale** des vents stratosphériques ([https://fr.wikipedia.org/wiki/Oscillation\\_quasi-biennale](https://fr.wikipedia.org/wiki/Oscillation_quasi-biennale)). Il s'agit d'un changement oscillatoire de la direction de 2 courants puissants dans la stratosphère moyenne équatoriale (vers 65 km d'altitude). Dans l'hémisphère froid, la direction du flux stratosphérique est horaire alors que celui de l'hémisphère chaud est antihoraire. La transition, appelée **réchauffement stratosphérique final**, peut être douce et tardive, et est principalement contrôlée par l'apport solaire radiatif diurne de la région impliquée, ou précoce et abrupte avec un réchauffement rapide et une décélération du vent zonal, forcé, nous le verrons, par l'activité des ondes planétaires. La stratosphère estivale garde un souvenir de son réchauffement printanier jusqu'au solstice d'été.

## 8.2 LE CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE ET LE VENT SOLAIRE

La Terre possède un champ magnétique puissant, englobant la planète de manière dissymétrique vers le côté nuit (Fig.1b), issu à la fois de celui exercé par l'activité du soleil et d'une dynamo interne à notre planète (dynamo géomagnétique). L'apport énergétique solaire normal est limité par l'enveloppe magnétique de la Terre (Fig.1b) et par la couche d'ozone qui ne laisse passer pour l'essentiel que la lumière visible, les UV « mous » ou UV-A et une très faible proportion d'UV plus énergétiques les UV-B (coups de soleil). Les UV-C sont pour l'essentiel arrêtés par la Tropopause. La magnétosphère terrestre forme **deux cornets magnétiques**, construits par les lignes du champ magnétique terrestre, et localisés à l'aplomb des pôles magnétiques de la dynamo terrestre (Fig.1b).

L'activité magnétique du soleil est surtout exprimée dans l'espace par une émission magnétique explosive de particules chargées à partir de la corona : **le vent solaire**. Ces particules de haute énergie avec les rayons cosmiques, englobent la Terre mais sont également canalisées vers la planète par les lignes du champ magnétique terrestre. En revanche, au niveau des pôles magnétiques, les

cornets magnétiques polaires permettent à des altitudes plus hautes (60-150 km) l'injection du flux énergétique solaire, (RX, UV, protons et électrons rapides) (Fig.2). Les particules du vent solaire sont accélérées par le champ magnétique et les éruptions de vent solaire sont précédées par une onde de choc qui devrait forcer l'injection des particules ionosphériques dans les cornets via des ondes sonores (Sanchez-Lavega, 2011).

Une partie de ce flux atteint vers 100 km d'altitude l'ionosphère ou Thermosphère et peut transférer son énergie aux molécules constituant la Mésosphère et la partie supérieure de la Stratosphère (Fig.2). Les UV de très courte longueur d'onde (UV- D-F), pénètrent rarement les cornets magnétiques en dessous de 60 km d'altitude. La trace de l'arrivée du vent solaire dans les cornets est l'ovale auroral (Fig.3), localisé à une altitude comprise entre 80 et 150 km d'altitude et habituellement entre 65 et 75° de latitude géomagnétique. Il correspond à la bordure magnétique neutre du cornet (Askasofu 1966). Les aurores boréales se produisent dans l'ionosphère supérieure selon l'ovale auroral signant le flux particulaire canalisé par le renforcement nocturne du cornet polaire et de sa couche neutre externe (Teste, 2007). Si l'activité solaire est plus forte, le diamètre de l'ovale augmente. En cas de très fortes tempêtes magnétiques, l'ovale s'élargit de l'Arctique vers l'Equateur et s'épaissit côté nuit (Fig.3).

Le dernier épisode d'aurores boréales (28/02 au 1/03/ 2023) a atteint la Bretagne (45°N). Elles apparaissent au nord de la Loire après l'équinoxe d'automne, généralement après le solstice d'hiver. Lors d'un Minimum d'activité solaire, comme celui de Maunder (1645-1715 ; Eddy,1976), les aurores peuvent même descendre en zone intertropicale lors des maxima du cycle solaire à 11 ans. Ce phénomène se produit immédiatement à l'aplomb du sommet du vortex polaire (vers 60 – 80 km) mais n'est connecté avec lui. Il est seulement un traceur de l'activité magnétique solaire.

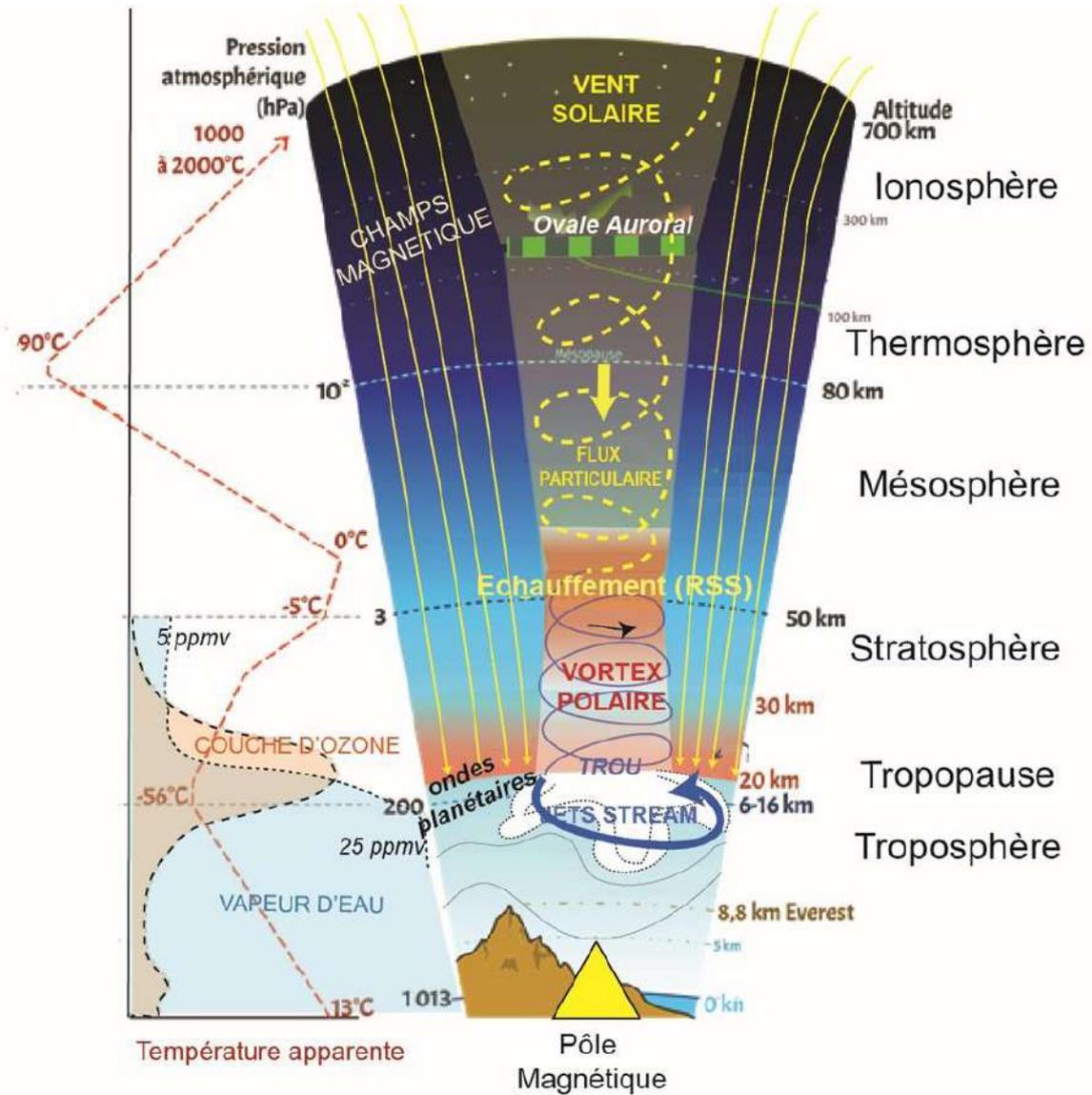


Figure 2. Schéma dynamique des relations entre Coriolis, le cornet magnétique polaire, le vortex stratosphérique polaire et le jetstream troposphérique, tous de sens de rotation antihoraire. Noter le saut de teneur en vapeur d'eau (Liu et al., 2020) à la base de la tropopause.

Un autre point pour comprendre la dynamique de notre atmosphère sont les ondes qui peuvent perturber son fonctionnement. Plusieurs types d'ondes interfèrent avec notre haute et basse atmosphère. Les plus importantes pour notre planète sont les ondes de gravité ou ondes atmosphériques ~~son~~ issues de la poussée d'Archimède et sont de type d'ondes sonores (Sanchez-Lavega, 2011 ; Schrantz et al., 2020). Elles sont créées par la topographie (ondes orographiques) et associées à des instabilités dues à la présence de zones de convection ou de fronts d'air associés au Jet Stream polaire. Elles peuvent être stationnaires ou mobiles, sous influence de Coriolis. Elles peuvent pulser la dynamique du vortex polaire et des Jets Streams sous l'influence des ondes de chocs précédant l'arrivée du vent solaire (« dépressions » sur une topographie plus régulière).

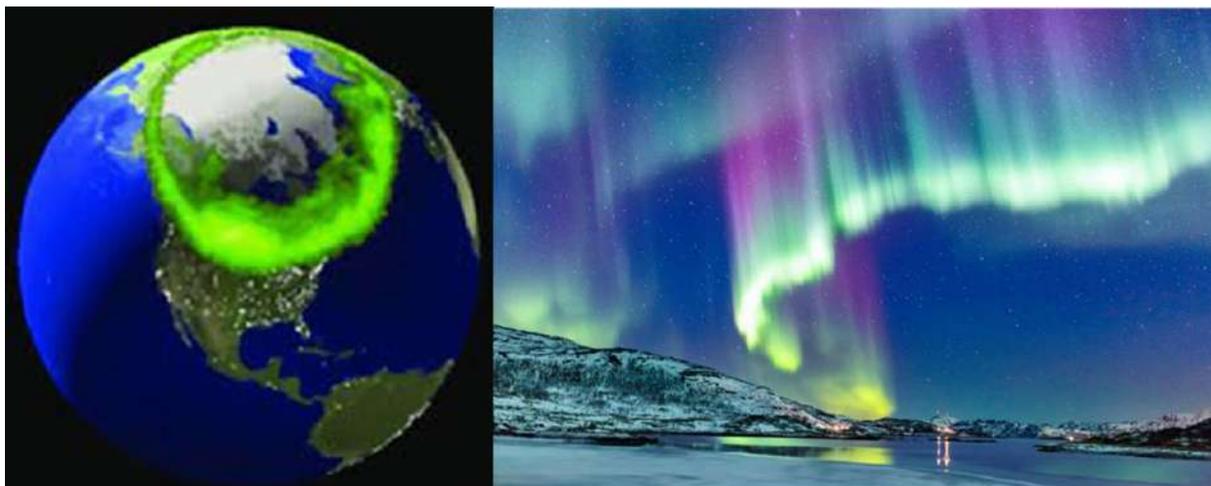


Figure 3 : Ovale auroral Nord et aurores boréales, plus développé côté nuit <http://www.swpc.noaa.gov/products/aurora-30-minute-forecast>

Les **ondes gravitationnelles**, elles, sont moins importantes pour la Terre, il s'agit d'ondulations invisibles générées dans l'espace par des étoiles binaires en orbite ou des trous noirs en collision. Elles voyageant à la vitesse de la lumière (<https://www.numerama.com/sciences/721083-quest-ce-que-une-onde-gravitationnelle.html>). Elles ont peu d'influence sur notre planète si ce n'est la récurrence potentielle de pseudo-cyclicités à 2-3 ans comme par ex l'Oscillation Quasi-Biennale (Van den Broek & Masson, 2023, SCE).

### 8.3 LE VORTEX POLAIRE : LE GRAND AGITATEUR DE NOTRE ATMOSPHERE

Le vortex polaire est un tourbillon de vents puissants localisé en hiver au-dessus des pôles magnétiques. Durant chaque hiver hémisphérique, le vortex de vent se développe dans la Stratosphère et la Mésosphère, dans la région polaire considérée. Il constitue le phénomène majeur de transmission énergétique direct entre l'ionosphère et la Troposphère.

Ce vortex est un système cyclonique, une ou des colonnes circulaires et descendantes de vent de gradient avec une rotation antihoraire (HN); il est entouré par de l'air froid, un anticyclone polaire stratosphérique (Fig.3). Les principaux moteurs du vortex sont – le flux des vents stratosphériques de plus basse latitude principalement sous contrôle de Coriolis, – les ondes planétaires et – le flux particulaire solaire. En l'absence de jour, le vortex marque aux environs du solstice d'hiver l'équilibre entre la force de Coriolis et un refroidissement de la basse stratosphère, entre 16 et 60 km d'altitude. La vitesse de rotation du vortex est généralement autour de 200 km/h et peut atteindre 360 km/h et plaquer au sol les hautes pressions troposphériques polaires et les immobilisent sur la zone polaire quand le vortex est froid et tourne vite (<-55°C), comme en mai 2023 sur l'Antarctique.

La base du vortex est située entre 16 et 30 km, dans la Tropopause, une zone riche en ozone. Cette **couche d'ozone** se forme par suite de la photodissociation par les UV-C des molécules d'O<sub>2</sub> atmosphérique, recombinaison en ozone. Cette couche est aussi contrôlée jusqu'à 25 km par une augmentation de 20% de la teneur en vapeur d'eau (Liu et al. 2010) et donc de sa densité par rapport à la stratosphère. Cette zone de friction entre le vortex stratosphérique et la troposphère tourne à peu près à la même vitesse que le vent du vortex. (200-300 km/h à la base de la Tropopause) induisant selon nous un prolongement troposphérique de même direction, **le jet stream polaire**, l'accélération en début d'hiver hémisphérique. Il amplifie les tourbillons transitoires du jet stream dans la basse atmosphère, déjà modulés par les ondes planétaires.

La puissance du vortex est maximale à la fin de l'hiver, de septembre à novembre dans l'hémisphère sud (HS) et en février à mars dans le Nord (HN ; Lecouffe 2021). Le vortex persiste généralement

jusqu'au solstice d'été (HN). Le vortex polaire HS est le plus puissant : il se forme rapidement en relation avec l'isolement et la massivité de l'Antarctique, couvre une plus grande surface, très plate, et persiste plus longtemps que celui de l'HN.

#### 8.4 LE RECHAUFFEMENT STRATOSPHERIQUE SOUDAIN DU VORTEX (RSS) ET L'OZONE

Il est fréquent que des rayons X ou UV du vent solaire, lorsqu'ils atteignent la Mésosphère supérieure, échangent leur énergie en arrachant un électron à différentes molécules. En novembre, les ondes planétaires stationnaires de grandes longueurs d'onde ou ondes planétaires troposphériques s'amplifient pour disparaître vers la fin décembre (Charlton et Polvani, 2007 ; Schrantz et al., 2020). Ces ondes sont accentuées par les ondes de chocs associées à l'arrivée du vent solaire (Lemoine et al., 2019), malgré un débit moyen de vent stratosphérique stable à l'échelle diurne avec un impact limité sur la morphologie du vortex (voir Fig.5). Le **plasma du vent** est mis en mouvement et **chauffé par le choc dans la Mésosphère supérieure** (Lemoine et al., 2019). Ce phénomène induit parfois selon nous, un **réchauffement stratosphérique soudain du vortex (RSS)** (Fig. 4), **le phénomène météorologique le plus puissant dans l'atmosphère moyenne** (stratosphère).

Lors d'un RSS, tel que celui de l'hiver 2018 / 2019, le vent zonal et anti-horaire HN qui supporte le vortex froid anti-horaire se dédouble brutalement (24 h) générant un second vortex de rotation inverse plus puissant issu d'une petite anomalie de pression préexistante présente la veille. Il devient horaire le 25/12 entre 60° N-90° N, et vers 80 km d'altitude (sommet de la Mésosphère, Schrantz et al., 2020), isolant une basse pression (Fig.5). Il est accompagné par une descente adiabatique d'air ionosphérique et par les ondes gravitaires. Ce mécanisme génère en moins d'une semaine et par compression relative (Lemoine et al. 2019) une augmentation de température jusqu'à 60 K ou plus, vers 60 km d'altitude, alors que plus bas, dans la Mésosphère, l'ascension adiabatique d'air conduit à une baisse de température à la base du vortex (Fig.4). Ce gradient inversé de température persistera pendant un mois, tout comme le sens de rotation horaire (« inverse ») du cyclone « chaud ». À 80° N, la température moyenne par zone du vortex a augmenté d'environ 45 K (Figs. 4, 5 & 6).

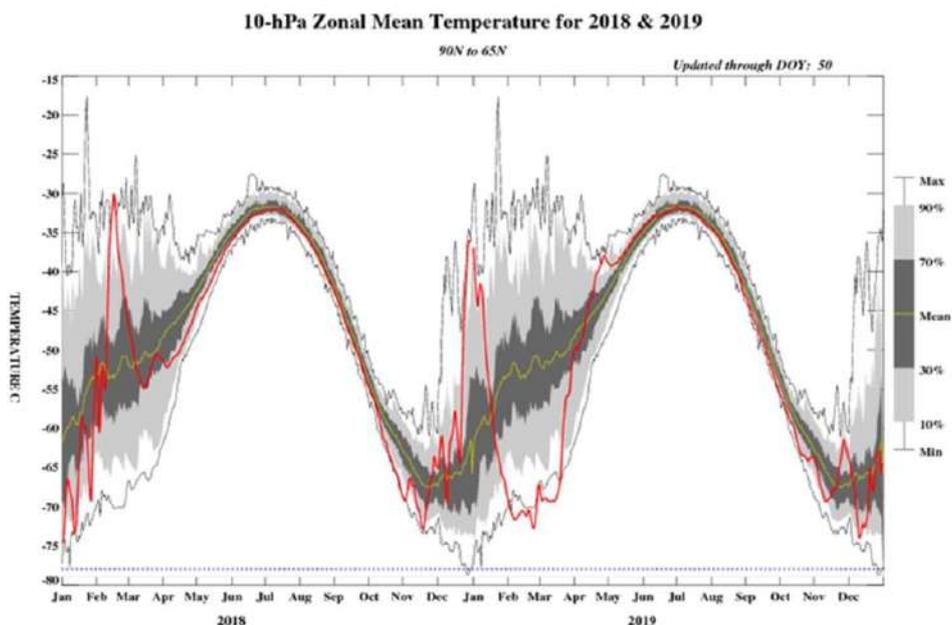


Figure 4 : Répartitions des températures (en rouge) à 80 km d'altitude lors réchauffements stratosphériques à mésosphériques soudains de 2018 et 2019 (© LATMOS/CNRS in Space Weather NASA) .

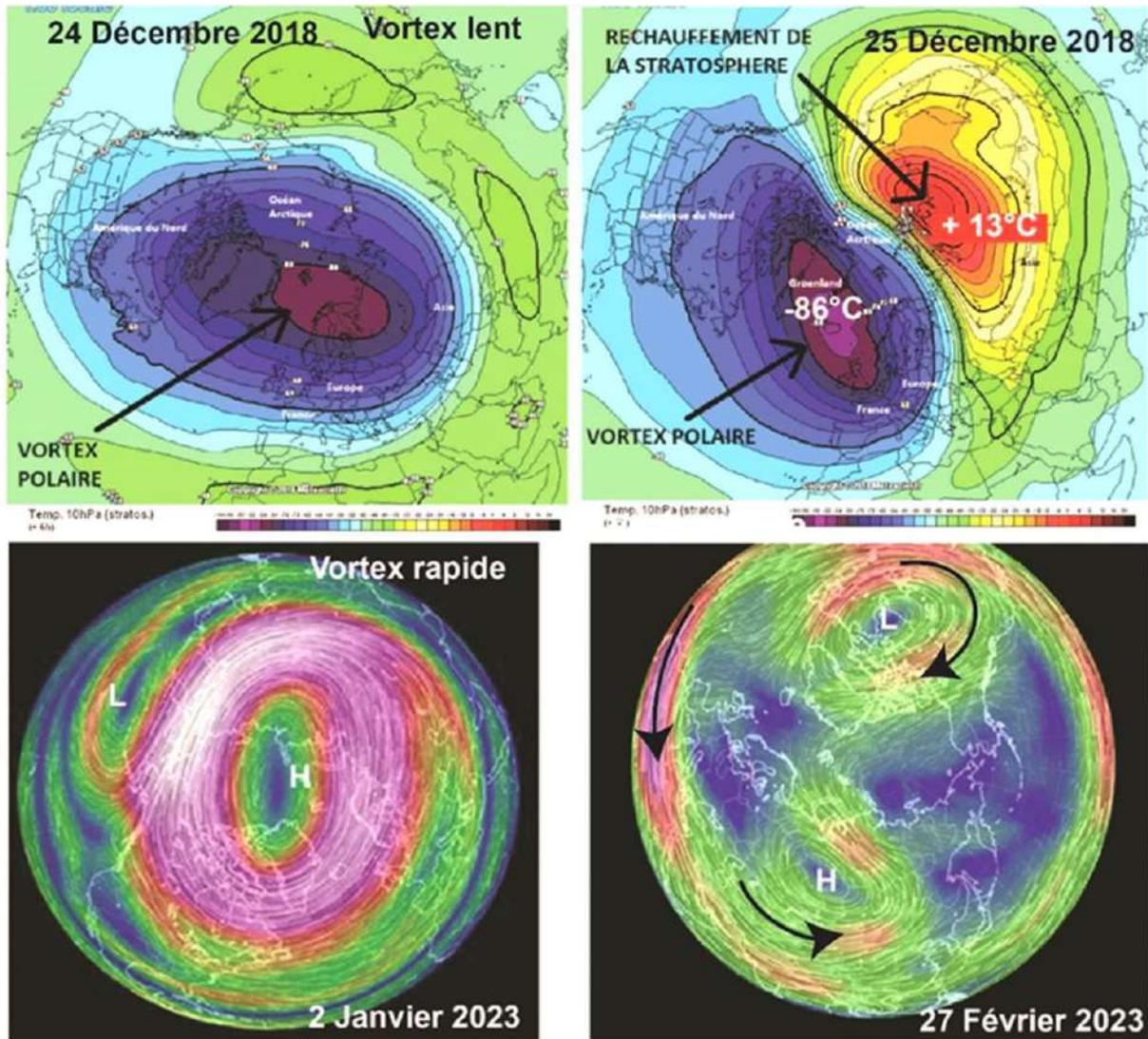


Figure 5 : Evolution des RSS de 2018-19 (modèle américain GFS de la NOAA matérialisé par les lignes de flux à 10 hPa et la température (en rouge, vers 30 km d'altitude). Pour celui de Janvier-Février 2023 (NOAA et earth.nullschool.ne.) Vortex polaire nord puissant le 2/01, colorisée selon la force du vent. Noter la boucle horaire qui se détache du vortex en haut à gauche et qui s'individualisera en vortex horaire dépressionnaire.

Le vortex polaire normal s'est ensuite reformé dans la Mésosphère à la mi-janvier 2019 et le vent a regagné en vitesse dans la stratosphère en février (10 hPa). Cette anomalie s'est poursuivie jusqu'à la fin de mars. Ce vortex complexe et puissant a seulement été précédé par de petites éruptions solaires.

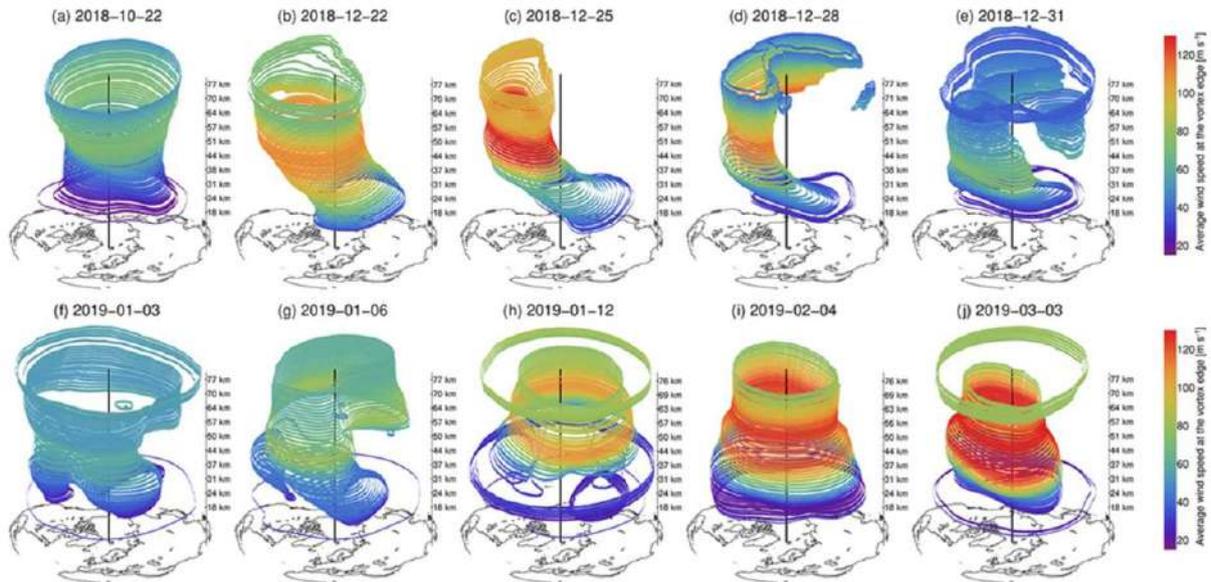


Figure 6. Evolution de la température (couleur) et évolution morphologique biphasée du vortex arctique chaud de d’octobre 2018 à Mars, 2019 (Schranz et al., 2020). Noter son dédoublement du 31/12 au 06/01/2019

Le vent solaire pénètre la magnétosphère terrestre au niveau des cornets magnétiques polaires et injecte du plasma choqué provenant du vent solaire. Bien que moins de 1 % de l’énergie totale transportée par le vent solaire parvienne à franchir le bouclier magnétique terrestre non polaire, au niveau des cornets, ces intrusions contrôlent les aurores boréales, accompagnées par une forte activité électromagnétique (Grison, 2006) et sont probablement plus efficaces. Leur température apparente apparaît comme élevée (mesures satellitaires) étant donné la faible densité en particules dans l’ionosphère (fig.2). Ce flux particulaire descend au moins jusque 80 km (ovale auroral). Il est donc susceptible d’atteindre sous forme d’UV et de RX la zone mésosphérique du vortex. Il est possible que la perturbation même minime liées aux tempêtes solaires les plus intenses peuvent créer des fissures dans la magnétosphère terrestre, qui restent ouvertes pendant plusieurs heures permettant la pénétration de flux énergétiques puissants dans la Mésosphère. Ce qui serait se produit en février 2023 après une succession de tempêtes puissantes (SpaceWeather, NASA ; RSS 2023 : Fig.6 et 7). Les RSS se produisent tous les 2-3 ans environ, à la fin de l’hiver en HN, la partie supérieure du vortex étant vraisemblablement sous contrôle de l’activité du vent solaire, en période de nuit polaire, modulée par les ondes planétaires en très haute atmosphère (Schranz et al., 2020). C’est ce que montre la morphologie temporairement hexagonale du vortex (Fig.1a).

### Mécanisme de réchauffement du RSS.

En captant et en bloquant les rayons UV-C & UVB- B du Soleil en dehors du vortex, l’ozone se redistribue en dispersant par photodissociation son gain énergétique sous forme de chaleur, de la base de la stratosphère jusque dans les hautes couches de la Mésosphère, (80 km ; Schranz et al., 2020 ; Friedel et al., 2022), ce jusqu’au réchauffement stratosphérique printanier normal.

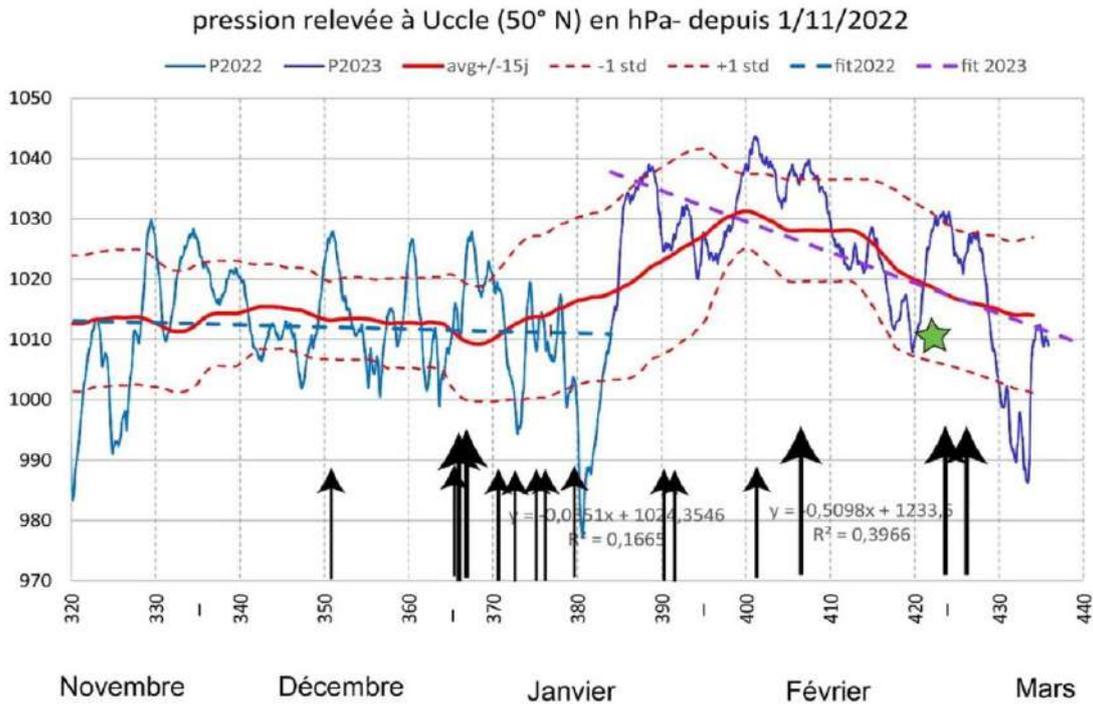


Figure 7 : Le RSS de février 2023 s’est également transmis à la troposphère comme semble montrer l’évolution de la pression atmosphérique à Uccle (OMB ; Belgique, 50°N ; Jean Van Vliet, 2023). Flèches noires : flux solaire (grosses tempêtes solaires, Space Weather), étoile verte : aurores boréales (27/02/2023) .

Lors d’un RSS, le vortex polaire est dédoublé ; **le vortex froid ralenti et dérape souvent du pôle vers les latitudes moyennes, générant des vagues de froids, notamment sur les US ou l’Europe centrale.** Ces changements adiabatiques dans la structure thermique de la Stratosphère et de la Mésosphère inférieure sont généralement attribués au mouvement et à l’interaction du vortex polaire avec la Troposphère, la Haute pression sur l’Arctique et les ondes planétaires (Gerrard et al. 2002). Mais, si l’augmentation de température d’un RSS s’explique très bien par la présence de la couche d’ozone à la base du vortex, il n’explique pas le réchauffement observé au sommet de la Mésosphère (Figs 4-6). Puisque l’énergie d’un photon est inversement proportionnelle à la longueur d’onde, les UV-B & UV-C, les rayons X et les rayons gamma sont principaux responsables de réactions de photodissociation de l’ozone (Finlayson-Pitts & Pitts 2000). En 2017-2018, 19 tempêtes solaires majeurs ont eu lieu en septembre affectant essentiellement le Vortex HS, et être attribuée à une perte d’ozone troposphérique polaire (Bodeker et al., 2002). C’est également le cas pour le RSS de 2023 dans l’HN (Fig.7 & 8).

Le centre d’un vortex dépressionnaire et tiède est ascendant depuis la tropopause, expliquant le sens de sa rotation horaire. Il est vraisemblable que le dédoublement du vortex froid sous impact gravitaire dans la Mésosphère (Fig.5) permette selon nous la création d’une cheminée ascendante et chaude enrichie en ozone, dont le réchauffement s’accroît sous l’impact du vent solaire. Le transport méridional et le mélange irréversible des gaz traces (ozone) à travers la paroi d’un vortex polaire dépressionnaire par un RSS instaure également un flux thermique ascendant (de la Cámara et al., 2018 ; Schranz et al., 2020).

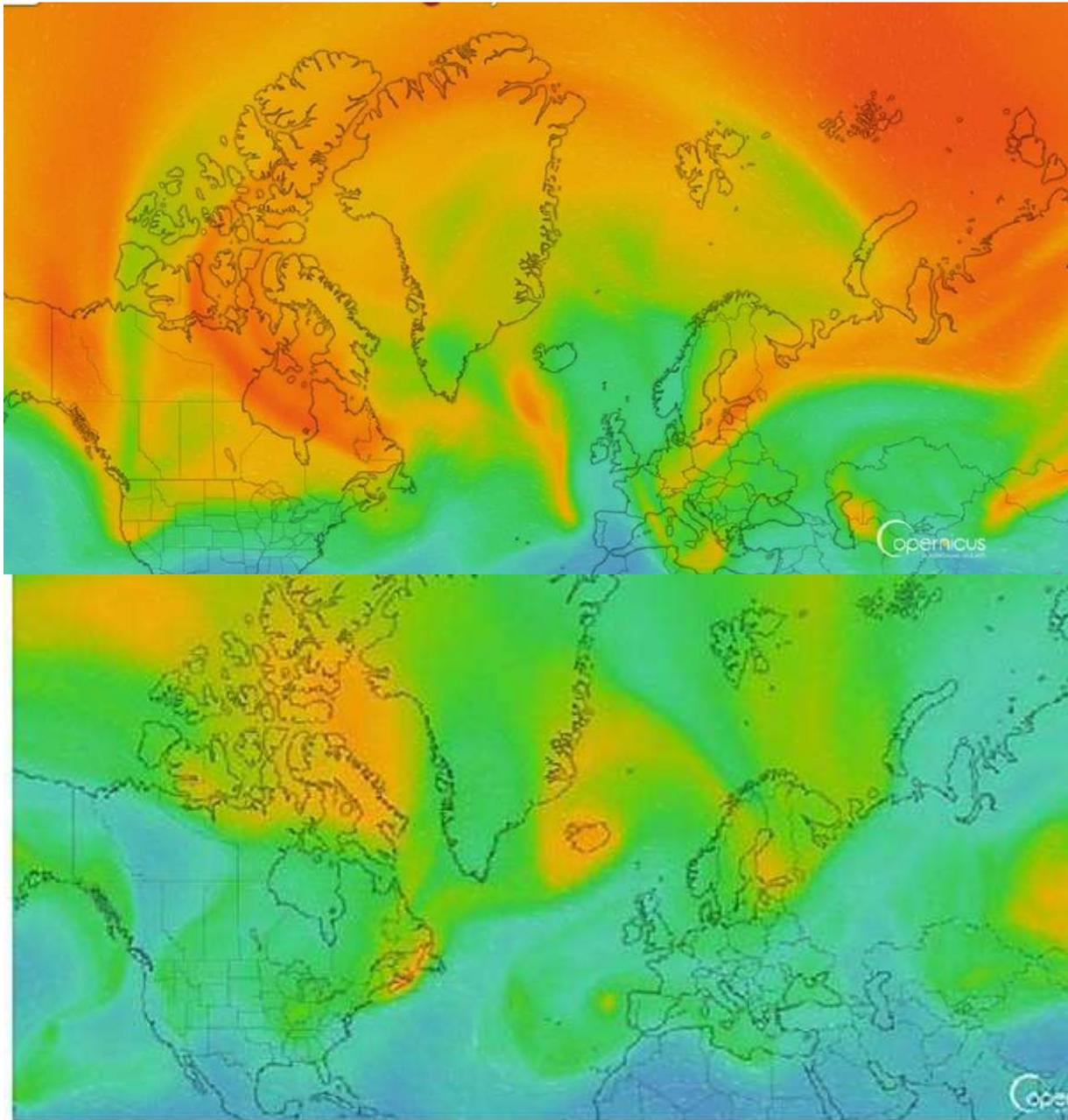


Figure 8 : Dispersion de l’ozone troposphérique un mois après le RSS de fin février 2023 (image Windy 3/04/2023). Noter que la concentration entoure la position totale du vortex (Fig.6) L’HS n’en présente pas. B) Ozone troposphérique le 27 mai 2023.

En Arctique, l’aspiration thermique et adiabatique à la base du vortex dépressionnaire conduit consécutivement à l’advection d’air de moyenne latitude jusqu’au pôle où l’ozone stratosphérique augmente jusqu’à 100 % et accroît de 50 % la teneur en vapeur d’eau dans la Mésosphère (Scheiben et al., 2012; Schranz et al., 2019). Après un RSS arctique, l’ozone accumulée est ensuite dispersé dans toute la haute troposphère boréale (Fig.8), permettant **une exportation méridionale de l’ozone et un réchauffement en altitude (<10km), expliquant la chaleur exceptionnelle du printemps 2023**. Ce processus est accentué plus particulièrement pour l’HS avec formation du trou d’ozone à la base du vortex. Les fluctuations annuelles de la superficie et de la profondeur du trou seraient classiquement causées par les variations de la température et de la circulation des vents stratosphériques, les conditions plus froides entraînent une plus grande surface du trou et des valeurs d’ozone plus faibles en son centre (Fig. 9).

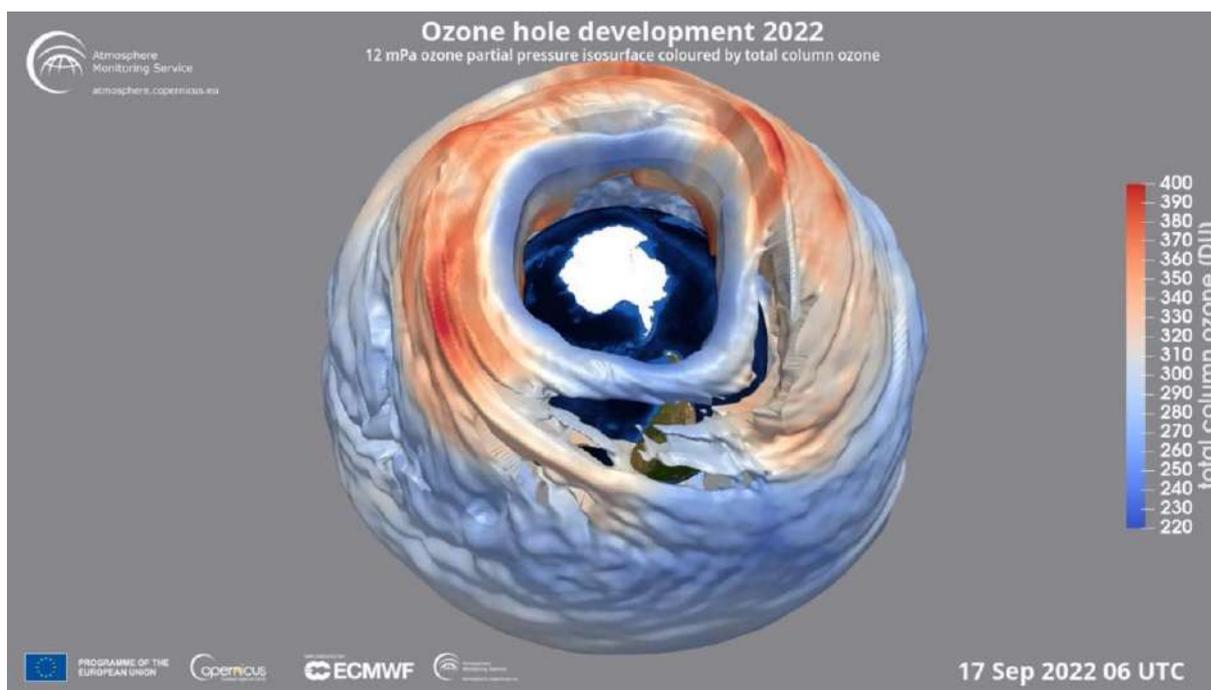


Figure 9 : image du 17 septembre 2022 : trou de l'ozone sur vortex polaire antarctique. Copernicus Atmosphere Monitoring Service. Noter la concentration élevée d'ozone dans la zone basse du vortex et sur ses bords, ce qui explique son expulsion dans la haute troposphère.  
Vidéo : ozone\_hole\_3d\_2022\_v08.mp4

## Forçages

Ce phénomène de RSS se produisant en alternance au-dessus des deux hémisphères, il peut à l'échelle planétaire se produire après chaque solstice (été HS ; hiver HN). C'est en fait **le missing lane** de la transmission énergétique dynamique du soleil à notre planète. Les évolutions thermiques et dynamiques couramment observées au niveau du vortex sont sous contrôle des ondes gravitaires et peuvent donc affecter l'ensemble de la haute atmosphère (Gerrard et al. 2002).

Les RSS de 2023 (HN) et de 2018-19 (HS) se sont produits après une série importante de tempêtes solaires (Fig.7) ce qui suggère, en plus de celui des UV-C et UV-B, un rôle des protons solaires voire de rayons gamma d'origine extra-galactique. Ceci veut dire qu'un pourcentage du flux de particules peut alimenter énergétiquement parlant la basse ionosphère et être potentiellement injecté au sommet du vortex, jusqu'à au moins 60 km d'altitude (Schrantz et al., 2020). Un accès direct de l'ionosphère aux particules chargées du vent solaire suggère un impact thermodynamique réel des cornets, une région-clef pour l'étude des transferts énergétiques entre le vent solaire et la magnétosphère (Grison, 2006 ; Van Vliet, 2019 SCE). Si le vortex est influencé via le corne par une tempête solaire, le phénomène de réchauffement de la basse mésosphère et de la stratosphère devrait suivre de quelques heures l'émission solaire et accélérer temporairement le vortex, permettant son dédoublement (H et L). Le réchauffement de la haute troposphère est la conséquence de l'expulsion de l'ozone en fin de vie du RSS (Fig.9).

## 8.5 IMPACT TROPOSPHERIQUE DU VORTEX SUR LA METEOROLOGIE TERRESTRE : LE JET STREAM ET L'OZONE

Le vortex stratosphérique polaire est bien le grand perturbateur direct de la circulation troposphérique terrestre de 10 à 3 km d'altitude (reliefs) et à la base de l'évolution météorologique. **Un vortex lorsqu'il est freiné** lors d'un dédoublement modeste ou d'un

réchauffement stratosphérique soudain (RSS) perturbe et ralentit **le jet stream troposphérique** et donc **la météo** ce que nous avons pu constater fin février 2023. La réponse troposphérique aux états d'un vortex polaire dédoublé peut agiter notre météo jusqu'à 2-3 mois. Ceci permet une meilleure expression descendante des ondes planétaires (NE canadien ou Sibérie ; Charlton et Polvani, 2007) et induit sous la Tropopause, une forte instabilité centrifuge transmise par le jet stream polaire, freiné et dirigé à plus basse altitude par la topographie terrestre en fonction de la latitude. De plus Best & Madrigali (2015) estiment que les **forces de gravité** variables pendant le cycle lunaire et **maximales en hiver** interviennent également sur le positionnement latitudinal des méandres du jet stream voir des boucles de ces méandres. La conjonction de ces facteurs engendre un important déséquilibre thermique et une forte instabilité latitudinale des masses d'air troposphériques en couplage avec l'apport énergétique solaire diurne, directement filtré par la tropopause et un réchauffement lié à l'injection d'ozone dans la haute troposphère.

Un vortex polaire rapide maintient surtout une barrière de transport entre les masses d'air polaires et celles des latitudes moyennes. Le jet-stream polaire sera alors puissant et affectera par entraînement le reste de la troposphère. La situation de fin février 2013 a permis via le RSS, d'amener un réchauffement des hautes latitudes : l'enrichissement consécutif en ozone de la haute troposphère est responsable d'un réchauffement progressif mais temporaire de la troposphère entre 55°- 80° N. Le cycle de photodissociation-recombinaison de l'ozone conduit donc à la transformation d'énergie radiative (le rayonnement solaire entre 240 nm et 280 nm absorbé par l'ozone) en énergie cinétique et provoque donc un réchauffement troposphérique (Mégie et al., 2005 : <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/ozone-stratosphere.xml>). Les mois de Février, Mars et Avril 2023 ont été très humides tempétueux avec orages ou grêles en Europe moyenne, malgré de très puissants anticyclones mobiles polaires (AMPs , voir VVL et VV, SCE 2022). La situation atmosphérique sèche sous dominance anticyclonique qui a disparu fin février avec le développement du RSS, et est réapparue vers le 15 mai 2013, en même temps qu'une baisse de la teneur en ozone dans la haute troposphère (Fig.8), d'un anticyclone bloqué sur la façade atlantique Européenne et, d'une descente de la circulation cyclonique très humide et instable sur la zone méditerranéenne, soit 80 jours après le développement des aurores boréales du 27 février 2023 (vent solaire) qui marquent le début du RSS.

Les augmentations significatives en latitude et en vitesse du jet hivernal sont observées au-dessus de l'Atlantique Nord et de l'Eurasie (Hallam et al, 2022) avec les AMPs ou des remontées d'air tropical chaudes et cycloniques (Jaiser et al. 2012), amenant des tempêtes jusqu'au Spitzberg comme en 1998 (bris précoce de la banquise). Les AMPs sont généralement circonscrits par les ondulations ou boucles du jet stream avec à l'Est de ce dernier, l'injection d'air tropical (L). Ces changements concordent avec la baisse des températures et l'augmentation des gradients de pression observés entre l'équateur et l'Arctique au cours de la période, et sont probablement associés au réchauffement des hivers arctiques (voir [http:// Climate4you](http://Climate4you)), comme lors du RSS de fin février 2023.

Lorsque l'Oscillation Arctique (AO) est dans sa phase positive, le vortex polaire est puissant, rapide, confinant l'air froid aux régions polaires. L'appauvrissement de l'ozone stratosphérique au printemps hémisphérique est constamment suivi d'anomalies de la température de surface et des précipitations compatibles avec une oscillation arctique positive, à savoir des conditions chaudes et sèches sur l'Europe. Ce phénomène module le flux d'air froid sur une période de quelques jours à des semaines voire deux mois, suivi dans la Troposphère par un renforcement des vents d'Ouest (antihoraires) et des alizés (horaires).

En régime à AO- (négative), l'accumulation d'air très froid et lourd est éjectée en AMP en raison de l'affaiblissement d'un jet stream d'altitude moins rapide et connecté à un vortex affaibli. Cette

année, une NAO/ AO négative s'est mise en place après le RSS, avec un repositionnant du vortex anticyclonique froid sur les latitudes moyennes comme les USA associé à un déplacement du secteur d'émission des AMPs guidé par le relief (ondes gravitaires). C'est aussi valable pour l'HS (Akstinas & Bukantis, 2015)

**Quand le climat se refroidit, le jet descend aussi en latitude** et inversement lorsqu'il se réchauffe : entre 1871 et 2011, il est remonté de 4° de latitude vers le pôle N. Cette année, il semble être redescendu sur la côte N de la Méditerranée (mi -Mai 40°N) avec des inondations séculaires, jusqu'au moins solstice d'été. Coté HS, le vortex est ultra puissant et un RSS est en train de se préparer (tourbillons cycloniques en bordure du vortex anticyclonique rapide).

Le fait que les RSS se produisent pratiquement tous les 2 ans dans l'HN, pourrait potentiellement être en relation avec un apport énergétique supplémentaire de nature gravitationnelle au niveau des cornets polaires, par exemple une émission gamma galactique pulsée d'~2-3 ans (Ackermamn et al. 2015). Cette récurrence simultanée d'ondes gravitaires et gravitationnelles suggère également un contrôle externe du vortex sur l'Oscillation quasi-biennale stratosphérique des vents et non l'inverse. Lorsque le vortex polaire est extrêmement faible, la trajectoire des tempêtes se déplace vers l'équateur et la vitesse des alizés est accélérée pendant la Niña, la phase froide de l'ENSO, (<https://www.meteocontact.fr/pour-aller-plus-loin/el-nino-la-nina>; Kusharski et al., 2016), permettant des remontées d'eaux profondes et froides le long de la côte du Pérou. Pendant El Niño, le flux d'ondes planétaires est plus important dans la stratosphère pendant l'hiver de l'HN et les alizés sont freinés permettant l'accumulation d'eau chaudes dans le Pacifique central, mais également dans l'Atlantique équatorial.

A plus long terme, la corrélation entre les situations de canicules terrestres ou de situations météorologiques « bloquées » et l'activité solaire entre 1999 et 2023, sont liées aux ondes planétaires stationnaires qui limitent avec Coriolis la dérive antihoraire du jet stream, et, la transmission énergétique au niveau des cornets magnétiques polaires (Van Vliet, 2019, SCE). Ceci pourrait être la résultante de la différence gravitaire entre le cycle lunaire (nutration ou triple Saros, 54.08 ans) et la cyclicité du soleil (≈ 55 ans) (Van den Broek & Masson 2023, SCE). C'est ce que suggère l'analyse comparé de la NAO et de la vitesse du Jet Stream arctique (Blackport & Fyfe 2022). Il semble donc plausible qu'une augmentation soudaine du vent solaire vers la partie mésosphérique du vortex, sous l'ovale auroral, puisse aboutir aux épisodes de réchauffement météorologique fortuit observés. Ce début d'année 2023 semble montrer le démontrer (Fig.8). **Ceci permettrait de comprendre pourquoi avec un vent solaire puissant, en fonction de l'activité superficielle du soleil ou, d'un forçage orbital nous rapprochant du soleil, l'énergie reçue au sommet de la stratosphère s'accroît et accélère le vortex et aussi par conséquent à sa base, le jet stream polaire, générant dans nos régions une période calme, chaude et pluvieuse, une NAO+, favorable au développement de la civilisation.** Les modèles ne sont pas encore parvenus à montrer cela. « Bien que les tendances relevées soient statistiquement significatives, elles ne sont pas nécessairement anthropiques » (Faranda et al., 2023).

La NAO comme l'AO, et la PDO sont des situations atmosphériques régionales équivalentes. En NAO+ positive, le régime météorologique est stable, doux et pluvieux sur l'Europe en raison de la stabilité du régime zonal cyclonique troposphérique à 50°N sous contrôle du jet stream polaire modulés par les ondes de gravité. En général, en NAO-, le vortex froid descend au-dessus la Russie (Moscou express), les hivers sont froids en Europe, mais doux sur l'Amérique du Nord. Quand la NAO est très négative, la base du vortex polaire affaibli est facilement déformé par les ondes planétaires, générant les ondulations exagérées du jet stream polaire avec formation de boucle du jet comme depuis 2021. Les étés sont alors caniculaires et les hivers particulièrement froids (en moyenne) en Europe. Ce fut le cas pendant la guerre 14-18, l'hiver 1962-63, très froid en France et en Belgique, mais également l'hiver actuel 2022-23 en Europe continentale et septentrionale (Climate4you).

## 8.6 CONCLUSION

Lorsque le soleil est actif, il est le siège d'une activité magnétique génératrice de vents solaires puissants. **La météorologie qui affecte notre planète est surtout sous l'influence de l'activité solaire (TSI), et des ondes gravitaires, le climat enregistre en revanche dans le temps l'impact des forçages orbitaux via ces mêmes paramètres.** Les phénomènes amplificateurs de l'intensité de l'insolation (TSI), se superposent au forçage orbital au niveau troposphérique. Suivre l'évolution des oscillations troposphériques complexes à 60 ans (ENSO, PDO, AO, NAO, etc.) est probablement **la trace la plus évidente d'un forçage gravitaire à l'échelle planétaire. Le gérant de toutes ces fluctuations météorologiques sur Terre, c'est l'intensité du vortex polaire et son prolongement troposphérique, le jetstream polaire. Les cornets magnétiques polaires contribuent à la formation hivernale du vortex qui pulsent la météo via l'injection du vent solaire dans les cornets magnétiques polaires et contribuent pro-parte à la transmission du forçage orbital sur l'insolation (climat), tels qu'enregistrés dans les archives géologiques.**

L'origine du faible réchauffement actuel est essentiellement extraterrestre (soleil inclus). Il est plus logique d'obtenir ce réchauffement via l'apport énergétique des principaux pourvoyeurs externes plutôt que de notre troposphère mince via le CO<sub>2</sub>. Il existe un problème de puissance relative. L'activité humaine industrielle n'a rien à voir avec ces forçages puissants par rapport à un gaz trace, le CO<sub>2</sub>. L'augmentation officielle (GIEC) supposée du CO<sub>2</sub> troposphérique en 2022 est tronquée effaçant un certain nombre de mesures par rapport aux mesures effectuées par voie chimique (Keeling et al., 1995 ; synthèses dans Beck 2007 et dans Van den Broek & Masson 2023, SCE). Il n'y a pas d'augmentation exponentielle du CO<sub>2</sub> depuis le début de l'ère industrielle, mais plutôt une variation du taux atmosphérique de CO<sub>2</sub> consécutif à l'évolution thermique du climat (Van Vliet-Lanoë 2005 ; Beck 2007). **L'expulsion d'ozone vers la troposphère (Fig.8) sous des vortex polaires en pourrait être la clef du réchauffement mesuré.**

## 8.7 Références

<https://www.aeronomie.be/fr/encyclopedie/ovales-auroraux-aux-deux-poles-geomagnetiques>

Akasofu, S.I., 1966 The auroral oval, the auroral substorm, and their relations with the internal structure of the magnetosphere. Planetary and Space Science 14(7):587-595 DOI: 10.1016/0032-0633(66)90043-2

Ackermann M., Ajello, M., Albert, A. et al. 2015. Multiwavelength evidence for Quasi-Periodic Modulation in the Gamma-Ray Blazar PG 1553+113 .Astrophysical J. Lett., 813 ( 2) DOI 10.1088/2041-8205/813/2/L41

Akstinas, V., Bukantis A., 2015. Quasi-biennial oscillation effect on climate indicators: Lithuania's case. Baltica 28 (1),19–28. Vilnius. (DOI 10.5200/baltica.2015.28.03)

Beck, E.G., 2007. 80 Years of atmospheric CO<sub>2</sub> gas analysis by chemical methods. Energy & Environment, 18 (2) 259-282. [http://icecap.us/images/uploads/EE\\_18-2\\_Beck.pdf](http://icecap.us/images/uploads/EE_18-2_Beck.pdf)

Blackport R. & Fyfe J.C, 2022 Climate models fail to capture strengthening wintertime North Atlantic jet and impacts on Europe. Sci. Adv. 8, 45

Bodeker, G., Struthers, H., Conno,r B., 2002. Dynamical containment of Antarctic ozone depletion. Geophys. Res. Lett. 9 (7) 1098, <https://doi.org/10.1029/2001GL014206>

Charlton, A.J. & Polvani, L. M.,2007.,A New Look at Stratospheric Sudden Warmings. Part I: Climatology and Modeling Bench-marks, Am. Meteorol. Soc., 20, 449–469, 2007.

## LA METEOROLOGIE

de la Cámara, A., Abalos, M., Hitchcock, P., Calvo, N., Garcia, R.R. 2018. Response of Arctic ozone to sudden stratospheric warmings, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 16499–16513.

Faranda D., G.Messori, A. Jézéquel, et al., 2023 Atmospheric circulation compounds anthropogenic warming and impacts of climate extremes in Europe. *PNAS* 2023, 120 (13), pp.e2214525120. (10.1073/pnas.2214525120).

Fletcher, L.N., Orton, G.S., Sinclair, J.A. et al. 2018. A hexagon in Saturn's northern stratosphere surrounding the emerging summertime polar vortex. *Nat Commun* 9, 3564 . <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06017-3>

Finlayson-Pitts B.J & Pitts J.N., 2000, Chapter 3 – Spectroscopy and Photochemistry: Fundamentals, IN Finlayson-Pitts B.J & Pitts J.N. (eds) *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere*, Academic Press, 43-85. <https://doi.org/10.1016/B978-012257060-5/50005-8>.

Eddy, J., 1976. The Maunder Minimum, *Science*, 192, 424.

Friedel, M., Chiodo, G., Stenke, A. et al., 2022. Springtime arctic ozone depletion forces northern hemisphere climate anomalies. *Nat. Geosci.* 15, 541–547 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00974-7>

Gerrard, A.J , Kane, T. , Jeffrey, P.T. 2002 Synoptic scale study of the Arctic polar vortex's influence on the middle atmosphere, 1, *Observations . JGR Atmos.* 107(16) DOI: 10.1029/2001JD000681

Grison B.. 2006 Etudes des interactions ondes-particules dans les cornets polaires à l'aide des données de la mission Cluster, Thèse de l'Université de Paris 6, <https://theses.hal.science/tel-00126368/document>.

Hallam S., Josey, S.A., McCarthy, G.D. et al. (2022). A regional (land–ocean) comparison of the seasonal to decadal variability of the Northern Hemisphere jet stream 1871–2011. *Clim Dyn* 59, 1897–1918 <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06185-5>

Hauchecorne, A., Claud, C., Keckhut, P. et al. 2022 Stratospheric Final Warmings fall into two categories with different evolution over the course of the year. *Earth Environ com.* 3, 4 (2022). <https://doi.org/10.5194/acp-18-16499-2018>, 2018.

Jaiser R., Dethloff, K., Handorf, D., Rinke, A., Cohen, J. 2012.) Impact of sea ice cover changes on the Northern Hemisphere atmospheric winter circulation, *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 64:1, DOI: 10.3402/tellusa.v64i0.11595

Keeling, Worhf, Whalhen & Vanderplich 1995 Interannual extreme in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980, *Lett.Nature* 375, 666-670

Kucharski F., Syed F.S, Burhan A. et al. 2016.Teleconnection of the Tropical Atlantic to Indo-Pacific Sea Surface Temperatures on Inter-Annual to Centennial Time Scales: A Review of Recent Findings. *Atmosphere* 2016, 7(2), 29; <https://doi.org/10.3390/atmos7020029>

Lecouffe A., 2021 Évolution et persistance des vortex stratosphériques polaires Arctique et Antarctique sur la période 1979 – 2021. *Phys. Atmos. Océan.* PhD Sorbonne Université, Université Pierre et Marie Curie – Paris VI.

Liu, X. M., Rivière E.D., Maréchal V. et al., 2010. Water vapor budget associated to overshoots in the tropical stratosphere: mesoscale modelling study of 4-5 August 2006 during SCOUT-AMMA. *Atmos.Chem.Phys.*10): 3975-4025.

OMM : Organisation météorologique mondiale, « oscillation biennale du vent » Glossaire météorologique, Eumetcal (consulté le 18 février 2009)

Schranz F., Hagen J., Stober G. et al. 2019 Small-scale variability of stratospheric ozone during the SSW 2018/2019 observed at Ny-Ålesund, Svalbard *Atmospheric chemistry and physics* 20.18 (2020): 10791-10806

Sanchez-Lavega, A. 2011 *An Introduction to Planetary atmospheres* CRC Press, Taylor & FrancisGroup.

Van Vliet J. 2019 Recent global heat waves are correlated to an exceptional solar cycle 24. 09/2019 (version française également) <https://www.science-climat-energie.be/2019/09/05/recent-global-heat-waves-are-correlated-to-an-exceptional-solar-cycle-24/>

## LA METEOROLOGIE

Van Vliet-Lanoë, B., 2005 : La Planète des Glaces. Histoire et environnements de notre ère glaciaire. 470 p. Vuibert . Mai 2005

Van Vliet-Lanoë B. & Van Vliet J. Les Anticyclones Mobiles ou AMP, mécanismes logiques de forçage de la météo (2/2). 10/2022  
<https://www.science-climat-energie.be/2022/10/07/les-anticyclones-mobiles-polaires-ou-amp-mecanismes-logiques-de-forçage-de-la-meteo-2-2/>

Van den Broek, R. & Masson H., 2023. Soleil, température et CO2 (version complète) <https://www.science-climat-energie.be/2023/04/14/soleil-temperature-et-co2-version-complete/>