

L'assombrissement et l'éclaircissement planétaires du rayonnement solaire reçu au sol depuis les années 1950

L'impact en France de deux phénomènes déconcertants

L'assombrissement et l'éclaircissement planétaires désignent les variations déconcertantes, qui ont affecté le rayonnement solaire reçu au sol au cours des dernières décennies. Le premier phénomène est relatif à la diminution continue et largement généralisée de la quantité d'énergie d'origine solaire atteignant la surface terrestre entre les années 1950 et la fin des années 1980. Cette diminution a été de l'ordre de 10% en moyenne, mais elle a pu doubler, voire presque tripler sur certaines zones. Le second phénomène concerne, au contraire, la forte augmentation de cette même énergie au sol qui s'est manifestée immédiatement à la fin de la précédente période, en moins d'un an ! Cette augmentation soudaine a pu parfois compenser complètement la diminution de l'énergie qui était survenue précédemment en 3 décennies.

L'éruption volcanique du Mont Pinatubo aux Philippines en juin 1991 fut la cause d'une très courte inversion de la tendance générale observée au début de la période d'éclaircissement.

Assombrissement (ou Obscurcissement) et éclaircissement planétaires sont les traductions de "Global Dimming and Brightening" que l'on trouve dans la littérature anglo-saxonne.

1 - La période d'assombrissement planétaire

La diminution continue du rayonnement solaire à la surface de la Terre depuis la fin des années 1950, n'a été décelée qu'au milieu des années 1980, presque simultanément par deux scientifiques: le Professeur Atsumu Ohmura géographe et climatologue à l'Institut Fédéral Suisse de Technologie (ETH Zürich), et le Docteur Gerald Stanhill, un Anglais, biologiste de formation, qui immigra très tôt en Israël où il participa à l'élaboration d'un projet d'irrigation.

Le professeur Ohmura s'intéressa aux résultats de mesures du rayonnement solaire au sol obtenus dans les réseaux radiométriques qui se développèrent dans le monde durant la seconde moitié du XX^e siècle, sous l'impulsion de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) créée en 1950, et probablement plus encore, après que les scientifiques ayant participé à l'Année géophysique internationale (AGI, juillet 1957 à décembre 1958), aient recommandé l'établissement de réseaux permanents de mesure des rayonnements d'origine solaire et tellurique, ainsi que du trouble atmosphérique.

Dans les années 1980, après avoir examiné les données mesurées pendant 2 décennies environ et s'être assuré qu'elles étaient fiables, le professeur Ohmura constata, à son grand étonnement, la nette diminution régulière du rayonnement Global d'origine solaire reçu au sol sur une surface horizontale. Il en fit part lors d'une Conférence qui laissa complètement indifférente la communauté scientifique à l'époque.

Nous connaissons bien le professeur Ohmura, aujourd'hui à la retraite, qui participa activement à l'établissement du réseau radiométrique mondial de référence BSRN (Baseline Surface Radiation Network) auquel le Centre radiométrique de Carpentras appartient.

À la même époque, en Israël, et indépendamment, Gerald Stanhill eut l'idée de comparer les résultats de mesures du rayonnement Global au sol qu'il avait obtenus une trentaine d'années plus tôt pour le projet d'irrigation, avec les résultats de mesures qu'il avait décidé de refaire, pour mettre en évidence un éventuel changement. Il fut extrêmement surpris quand il réalisa que l'énergie du rayonnement solaire au sol avait baissé de 22% en près de 3 décennies! Cela déclencha encore la même indifférence lorsque Stanhill publia ce résultat dans différentes revues scientifiques. C'était tellement "stupéfiant" que personne ne le crut. Seule une jeune climatologue allemande, Beate Liepert, qui prit la peine de consulter les résultats de mesures effectuées dans les Alpes bavaroises, arriva à la même conclusion : le rayonnement solaire au sol avait également diminué en Allemagne du Sud au cours des dernières décennies.

En fait cette diminution est généralisée, elle affecte pratiquement toute la planète. Au début, les scientifiques eurent beaucoup de difficultés à admettre que l'énergie solaire à la surface de la Terre diminuait alors que la température au sol croissait. C'est l'inverse qui aurait dû se passer dans l'esprit de beaucoup d'entre eux! En réalité la température météorologique croît parce que les gaz à effet de serre (GES) résultant des activités humaines sont la cause d'un effet de serre additionnel à l'origine de l'augmentation de cette température. Le gaz carbonique ou dioxyde de carbone (CO₂) que les hommes déversent en quantité toujours croissante dans l'atmosphère, agit davantage sur la température moyenne de la Terre que le Soleil. Pour de nombreux experts du Max Planck Institut en Allemagne, du CEA, du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), etc., le Soleil est certes la source primaire de l'énergie sur Terre, mais ses variations qui n'excèdent pas $\pm 0,1\%$, jouent un rôle plutôt mineur dans les changements climatiques terrestres.

L'assombrissement planétaire a créé un refroidissement qui s'est opposé au réchauffement dû à l'effet de serre. Les scientifiques s'inquiètent à présent parce que cet assombrissement a probablement masqué en partie l'ampleur du réchauffement climatique. Fera-t-il encore beaucoup plus chaud dans les décennies à venir que ne le laissent entendre les spécialistes ?

Des années 1950 à 1988/1990, la diminution du rayonnement solaire a été variable suivant les régions. Les 22% en Israël deviennent près de 30% dans l'ancienne Union Soviétique et environ 10% en Europe et en Amérique du Nord. Dans l'Antarctique la diminution a même été de l'ordre de 9% !

En France les diminutions du rayonnement Global constatées à Carpentras et à Trappes sont respectivement de 9,2% et 9,1% pour la période de temps trentenaire qui s'achève en 1988. Ces valeurs, très proches des 10% évoqués plus haut pour l'Europe, ont été en fait calculées d'après les équations des droites de tendance qui s'ajustent aux points représentant les variations annuelles de l'énergie solaire reçue au sol depuis que les mesures existent dans ces 2 Centres radiométriques (Voir Figures 1a et 1b). Les phénomènes d'Assombrissement et d'éclaircissement sont encore bien visibles à Montpellier et "à peu près visibles" à Agen par exemple. Mais dans cette dernière station, comme dans la plupart des stations du réseau radiométrique français, les mesures n'ont malheureusement débuté qu'à la fin de la période d'assombrissement. Toutes les stations en France n'ont pas été examinées en détail.

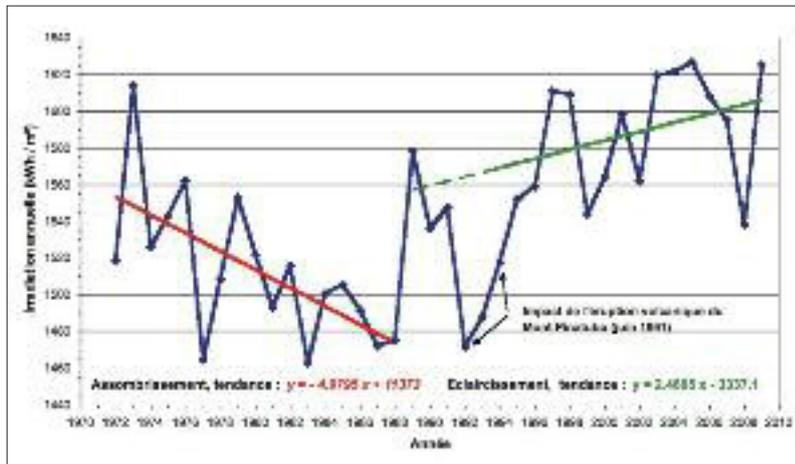


Figure 1a : CARPENTRAS. Variation de l'énergie solaire reçue au sol entre 1972 et 2010. La transition entre les périodes d'Assombrissement et d'éclaircissement est nette à la fin de l'année 1988. L'impact de l'éruption volcanique du Mt Pinatubo aux Philippines en juin 1991, est également bien visible de 1992 à 1994 inclus.

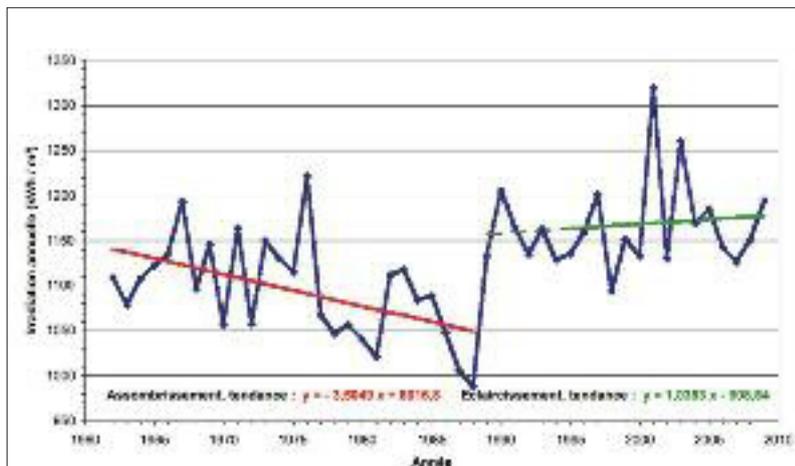


Figure 1b : TRAPPES. Variation de l'énergie solaire reçue au sol entre 1962 et 2010. La transition entre les périodes d'Assombrissement et d'éclaircissement est nette à la fin de l'année 1988. L'impact de l'éruption volcanique du Mt Pinatubo aux Philippines en juin 1991, est un peu moins visible.

cette incertitude concerne en fait la mesure instantanée de l'éclairement énergétique (ou Irradiance) du rayonnement Global que l'on pourrait effectuer dans des régions climatiquement aussi différentes que le Sahara ou le Groenland, avec un pyranomètre étalonné à Carpentras. Cette mesure est faite ponctuellement pendant les étalonnages des radiomètres, ou pour estimer le Trouble atmosphérique (Voir Chapitres 2 et 5), son résultat s'exprime en Watt/m² (W m⁻²).

L'incertitude précédente ne s'applique pas à la mesure d'une autre grandeur bien plus importante et plus courante : l'Exposition énergétique du rayonnement Global (ou Irradiation) qui est égale à l'intégrale de la fonction précédente sur un temps donné pouvant varier de l'heure à l'année. Le résultat de cette mesure s'exprime en Joule/m² (J m⁻²) dans le

On doit cependant noter que les phénomènes d'assombrissement et d'éclaircissement n'ont pas affecté certains sites dans le Monde, probablement à cause de conditions locales inconnues (?) alors que ces phénomènes sont parfaitement visibles sur un site très proche. C'est le cas de la station météorologique de Tours en France, par exemple, où l'on ne distingue rien de semblable à ce que l'on a observé à Carpentras, à Trappes et à Montpellier.

Le phénomène d'assombrissement a pu aussi se prolonger bien au-delà de l'année 1990 dans certaines zones en Chine ou en Inde. Il semble, a priori, plutôt affecter les régions urbanisées et très polluées.

Naturellement certaines personnes ont pu douter de la fiabilité des mesures des rayonnements qui sont toujours difficiles. Les pyranomètres sont, de très loin, les radiomètres les plus utilisés dans les réseaux radiométriques pour effectuer la mesure du rayonnement Global d'origine solaire au sol. L'incertitude des résultats de cette mesure a été évaluée à Carpentras (et ailleurs) à environ 4 à 5%. Cela peut paraître élevé. Mais

1. Ces 4 à 5% sont associés à un intervalle de confiance de 95% (généralement adopté), c'est-à-dire que la probabilité est de 0,95 pour que le résultat réel de la mesure (inconnu naturellement) se trouve compris entre le résultat de la mesure moins 4 à 5%, et le résultat de la mesure plus 4 à 5%.

Système International d'Unités (SI). Ce résultat qui représente l'énergie solaire mesurée sur une surface horizontale au sol, est dans ce cas affecté d'une incertitude qui n'excède certainement pas 1% sous nos latitudes. Ce sont les résultats de cette mesure que l'on trouve dans les Bases de données de Météo France.

D'autres personnes ont encore pu douter de la propreté des coupelles en verre qui protègent la surface sensible des pyranomètres contre les effets du vent et des précipitations. Peut-on imaginer que Stanhill ait utilisé les mêmes radiomètres sans retirer les éventuelles poussières qui se seraient accumulées sur les coupelles des pyranomètres pendant plus de 20 ans, comme l'ont suggéré méchamment certains ? Peut-on imaginer encore que Stanhill n'ait pas procédé à un réétalonnage des pyranomètres avant toutes nouvelles séries de mesures comme il est recommandé de le faire ?

Quelles sont les causes de l'assombrissement planétaire ? Quelles en sont ses conséquences ?

Selon l'hypothèse la plus communément admise, l'assombrissement planétaire est dû à la présence dans l'atmosphère d'aérosols ou de microparticules, de suie, de cendres, de dioxyde soufre (SO_2), etc., causés par les activités humaines. Ces aérosols proviennent en majorité de l'utilisation de combustibles fossiles qui contiennent du soufre. Cet élément est oxydé avant de se transformer en acide sulfurique autour duquel s'agglomèrent de minuscules gouttelettes d'eau dans l'atmosphère.

Ces minuscules gouttelettes d'eau ont la propriété de réfléchir, vers l'espace, davantage d'énergie solaire que ne le font les gouttes plus grosses qui se sont formées autour des noyaux de condensation naturels relativement plus gros : cristaux de sel marin (provenant des embruns maritimes), pollens, poussières désertiques, etc. Par ailleurs ces minuscules gouttelettes d'eau précipitent plus difficilement que les gouttelettes d'eau des nuages conventionnels. La durée de vie des nuages croît. L'albédo de la Terre augmente et le sol tend à se refroidir. En fait il continue à se réchauffer, mais plus lentement. Voir aussi Chapitre 4.

Les précipitations ont été également moindres parce que l'évaporation de l'eau des océans, des différents plans d'eau, du sol et des couverts végétaux, a été réduite par suite de la diminution de l'énergie solaire au sol. On ne doit pas oublier que l'évaporation est un processus physique endothermique qui a besoin d'un apport d'énergie extérieur au système pour ce produire. Sur Terre l'énergie mise en œuvre dans les phénomènes météorologiques a toujours une origine solaire.

C'est une erreur de croire que la température joue le rôle déterminant en matière d'évaporation. Il n'y a rien de "paradoxal", comme l'a signalé le Professeur Graham Farquhar (universitaire Australien), à constater que l'évaporation était en baisse alors que la température était en hausse pendant la période d'Assombrissement, même si potentiellement un air plus chaud peut contenir plus de vapeur d'eau selon la formule de Clapeyron. L'humidité et de la vitesse du vent jouent aussi un rôle important dans le processus d'évaporation.

Il a été suggéré que l'assombrissement planétaire et la baisse de l'évaporation dans les océans qui en est résulté, pourraient être à l'origine de la sécheresse et de la famine qui firent des centaines de milliers de victimes en Afrique subsaharienne et en Éthiopie dans les années 1970 et 1980. L'assombrissement planétaire n'a pas seulement affecté la Mousson en Afrique, il a également eu un impact négatif sur la Mousson en Asie selon le Docteur Veerabhadran Ramanathan un climatologue reconnu originaire de la Région et qui enseigne à l'Université de San Diégo en Californie.

2 - La période d'éclaircissement planétaire

Pour les scientifiques la période d'assombrissement aurait été causée par l'augmentation de la pollution atmosphérique – ou du trouble atmosphérique – qui découle des activités humaines. La période d'éclaircissement qui a suivi à partir des années 1988-1990, est plutôt attribuée à une diminution de cette pollution à la suite des mesures prises dans de nombreux pays occidentaux pour réduire la quantité d'aérosols et de microparticules d'origine anthropique injectés dans l'atmosphère. En Europe la quantité de dioxyde de soufre (SO_2) a baissé de façon spectaculaire de 18Tg/an en 1980 à 4Tg/an en 2002 selon la NASA [Tg/an signifie Téra gramme par an ou 10^{12} g par an] alors que l'utilisation des combustibles fossiles continuait à croître!

Voir Figure 2.a. Des scientifiques ont confirmé que la réduction des aérosols contenant du Soufre et celle des nuages qui se forment autour de ces particules, ont permis à davantage de rayonnement solaire d'atteindre le sol plutôt que d'être réfléchi en direction de l'espace. La Terre aurait donc tendance à se réchauffer davantage depuis le début de cette période d'éclaircissement. Mais ceci n'est pas vraiment évident en France.

Le trouble atmosphérique n'est pas seulement dû aux activités humaines. Il a, avant tout, une origine naturelle (embruns marins,

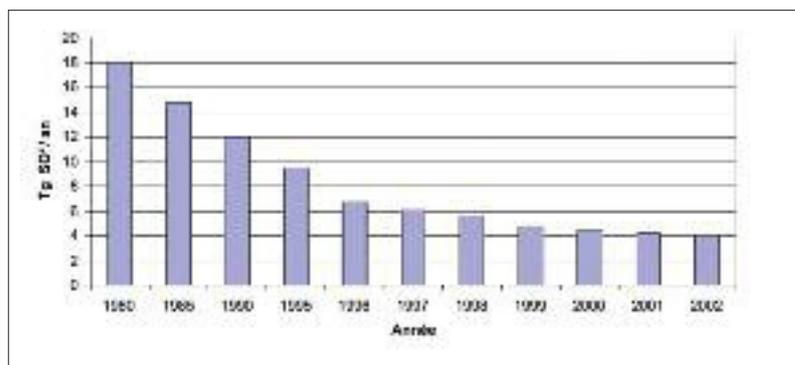


Figure 2a : émissions annuelles de SO_2 en Europe entre 1980 et 2002. Tg signifie Tégragramme ou 10^{12} grammes.

poussières désertiques, pollens, aérosols d'origine volcanique, etc.). De nombreux paramètres ont été introduits à partir des années 1920 afin d'estimer le trouble atmosphérique et la quantité d'aérosols présents dans l'atmosphère. Ces paramètres se déduisent tous de la mesure de l'extinction du rayonnement solaire Direct traversant l'atmosphère, sur des longueurs d'onde bien spécifiques, du spectre solaire, sur une partie du spectre solaire ou sur tout le spectre solaire. Ces paramètres sont donc calculés à partir de résultats de mesures pyréliométriques spectrales ou non spectrales.

On examine les différents paramètres mesurés à Carpentras pour estimer la quantité des aérosols contenus dans l'atmosphère ainsi que certaines de leurs propriétés physiques et optiques. Ces paramètres sont :

1 – L'épaisseur optique des aérosols : AOD (Aerosol Optical Depth, ou AOT Aerosol Optical Thickness). Les AOD sont les résultats de mesures spectrales du rayonnement solaire Direct, effectuées sur des longueurs d'onde bien spécifiées. Ils sont définis par la relation suivante :

$$I_{\lambda} = I_{o\lambda} \exp(-m\tau_{\lambda})$$

$I_{o\lambda}$ est l'éclairement énergétique spectral du rayonnement solaire Direct hors atmosphère, pour la radiation de longueur d'onde λ ,

I_{λ} est l'éclairement énergétique spectral du rayonnement solaire Direct au sol,

m est la masse d'air approximativement égale à $1/\sin h$ (h représente la hauteur angulaire du Soleil),

τ_{λ} est l'épaisseur optique.

Pour un modèle donné d'aérosols, l'épaisseur optique τ_{λ} dépend de la longueur d'onde λ , et elle est directement proportionnelle à la concentration des aérosols dans une colonne d'air verticale unité, ou masse d'air égale à 1. On admet que cette propriété est à peu près conservée pour les aérosols couramment rencontrés dans l'atmosphère.

La **figure 2b** représente les variations des AOD depuis 1981 sur toute la planète et sur chacun de ses hémisphères. Cette figure a été établie d'après des données de la NASA pour $\lambda = 550 \text{ nm}$. Elle illustre bien la décroissance des épaisseurs optiques des aérosols évaluée à environ 0,002/an pendant la période d'éclaircissement pour la planète toute entière. Ceci correspond à une diminution de la concentration des aérosols de 30% approximativement.

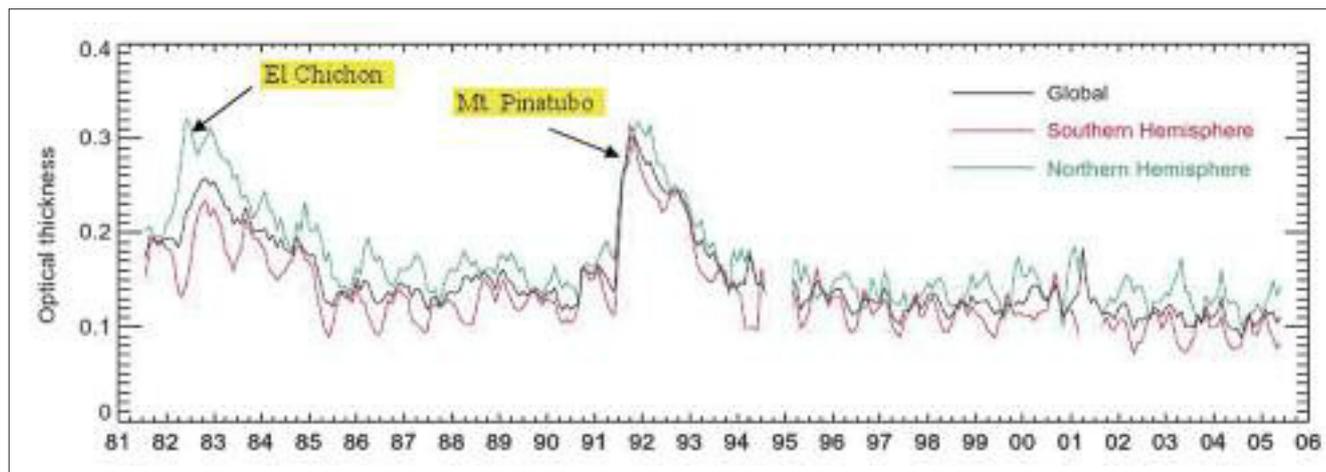


Figure 2b : épaisseur optique des aérosols, variation dans le Monde depuis 1981. Ces épaisseurs optiques ont été calculées d'après des données de la NASA, pour $\lambda = 550 \text{ nm}$.

2 – Le Facteur de trouble atmosphérique β d'Ångström. Ce facteur est défini par la formule empirique bien connue que proposa Anders K. Ångström² en 1929 : $\tau_A(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha}$, où $\tau_A(\lambda)$ est l'épaisseur optique des aérosols (AOD) à la longueur d'onde λ , β représente l'AOD des aérosols à $\lambda = 1\mu\text{m}$, l'exposant de la longueur d'onde α , ou **coefficient d'Ångström**, a une valeur qui dépend de la taille des aérosols. Sa valeur varie théoriquement de **4**, pour des aérosols ayant la taille des molécules d'air, à **0** pour des aérosols de très grande taille procurant une atténuation "neutre", (c'est-à-dire indépendante de λ) du rayonnement solaire Direct.

Après avoir consulté de nombreux résultats de mesures spectrobolométriques effectuées par des scientifiques de l'Institution Smithsonian aux USA au début du XX^e siècle, A. Ångström proposa d'adopter la valeur $\alpha = 1,3$ statistiquement correcte dans nos régions, par ciel clair, en l'absence de poussières d'origine volcanique ou résultant d'incendies de forêts. Cette valeur est celle qui est utilisée à Carpentras.

2. Anders Knutsson Ångström (1888-1981) est le fils de Knut Johan Ångström (1857-1910) et le petit-fils d'Anders Jonas Ångström (1814-1874) un peu plus connu, peut-être, de la communauté scientifique. Les Ångström sont tous des physiciens célèbres qui ont contribué à améliorer les méthodes de mesure dans le domaine radiométrique et à perfectionner les instruments. On attribue à Anders Knutsson Ångström l'invention du pyranomètre, le radiomètre le plus utilisé dans le monde.

Le facteur de trouble atmosphérique β d'Ångström peut être estimé de différentes façons

2.1 – La méthode de A. Ångström préconisée par les scientifiques à la suite de l'AGI (Année Géophysique Internationale) a fait l'objet d'une publication très détaillée destinée à homogénéiser les résultats des mesures dans le monde. La méthode est basée sur des mesures pyréliométriques (mesure du rayonnement solaire Direct) effectuées dans un domaine spectral inférieur à 630 nm dans lequel la vapeur d'eau, en quantité très variable dans l'atmosphère, n'agit pas. On peut donc faire abstraction de la vapeur d'eau. Dans ce domaine, seuls les aérosols, dont on ne connaît pas la teneur, sont la cause d'une extinction par diffusion variable du rayonnement solaire Direct. Les extinctions par diffusion par les molécules d'air (diffusion de Rayleigh) et par absorption d'un certain nombre de gaz (tels que l'Ozone) dont les concentrations dans l'atmosphère sont supposées être constantes ici, sont aisément calculées. Cette supposition n'est pas une source d'erreur importante.

Connaissant le résultat de la mesure pyréliométrique spectrale I_k dans le domaine défini ci-dessus, et la masse d'air traversée par le rayonnement solaire Direct, m_a , il est possible de déterminer le facteur β [$\beta = f(I_k, m_a)$] dans le tableau édité par l'AGI. Il suffit de chercher sur la ligne correspondant à m_a , la valeur inscrite dans le tableau qui est égale à I_k . Cette valeur se trouve dans la colonne correspondant au β recherché. Le tableau AGI est grand, mais pas suffisamment pour nous éviter des interpolations! Pour des raisons pratiques le tableau AGI a d'abord été représenté sous forme graphique puis modélisé à Carpentras, après une mise à jour, pour une utilisation sur calculateur, sous la forme :

$$1000 \cdot \beta = A(m_a) - B(m_a) \cdot \ln(I_k)$$

les fonctions $A(m_a)$ et $B(m_a)$ ont été ajustées à des polynômes de degré 6, les masses d'air m_a sont comprises entre 1 et 6.

Le tableau AGI initial a été établi à partir du spectre solaire hors atmosphère de Nicolet (un scientifique belge qui a été l'un des responsables de l'AGI). Ce spectre étant un peu ancien, le Tableau AGI a été mis à jour à Carpentras vers 1990, en utilisant un spectre solaire plus récent à l'époque: le spectre solaire de Bird.

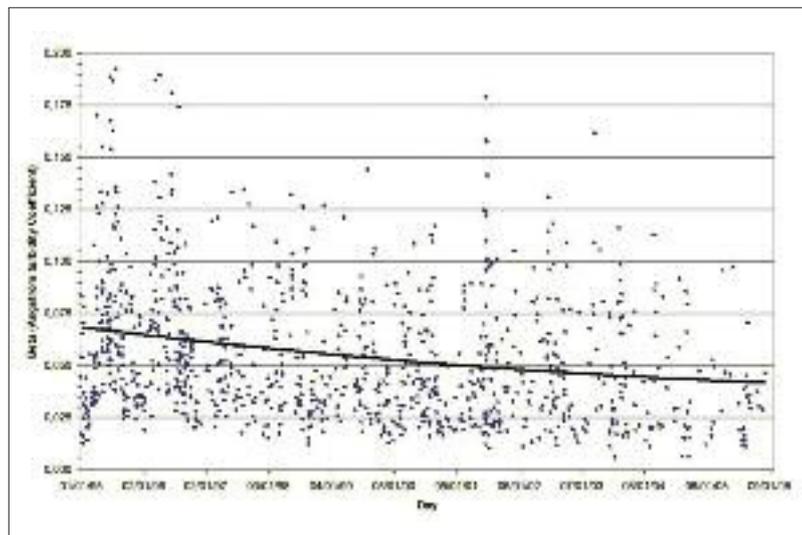
L'incertitude de mesure de β dépend avant tout du type d'aérosols auxquels on a affaire car on compare des I_k mesurés à des valeurs du tableau AGI (révisé), qui ont été calculées initialement pour un seul type d'aérosols (modèle "rural") et pour $\alpha = 1,3$. Les valeurs inscrites dans le tableau AGI, ne sont rien d'autre que des " I_k ".

Les variations dans le temps du facteur de trouble atmosphérique β mesuré à Carpentras entre 1995 et 2006 et utilisant la relation précédente pour son calcul, sont représentées figure 2c. Ce facteur a été déterminé durant la période d'éclaircissement, après que les effets de l'éruption volcanique du Mt Pinatubo aient complètement disparu. Cette figure montre bien une décroissance du trouble atmosphérique sur la période de temps considérée.

2.2 – La méthode basée sur des résultats de mesures héli-photométriques (spectrales) du Réseau AERONET (AEROSOL ROBOTIC NETWORK). Ce réseau entièrement automatisé est géré par la NASA, il permet de faire des mesures très complètes pour déterminer les propriétés physiques et optiques des aérosols (taille, fonction de phase, etc.).

Des résultats des mesures AERONET disponibles depuis 2003 à Carpentras, Christian Gueymard, a établi le graphique représenté **figure 2d**. Par cette méthode on ne considère plus que le Coefficient d'Ångström α a une valeur fixe égale à 1,3. Le coefficient α est déterminé en utilisant des résultats de mesures effectuées sur 2 (ou plus) longueurs d'onde différentes avant de calculer β avec une incertitude plus faible que précédemment.

La valeur moyenne actuelle du coefficient α est égale à 1.40 ± 0.40 . Cette valeur a été déterminée à partir de mesures des héli-photomètres du réseau AERONET entre 2003 et 2009.



Bien que les facteurs β aient été déterminés par des méthodes et des instruments différents, il est réjouissant de constater que les allures des courbes des **figures 2”c et 2”d** sont similaires et que la tendance à la baisse de β et donc à la baisse de la quantité des aérosols dans l'atmosphère, se poursuivent.

2.3 – La méthode de A. Louche. Quelques auteurs (A. Louche, Yamamoto, etc.) ont proposé de déterminer le Facteur de trouble β par des méthodes ne faisant pas appel à des mesures spectrales et donc à l'utilisation d'un filtre type RG630 (rouge) pour

Figure 2c : Variation du Facteur de trouble atmosphérique β mesuré à Carpentras. La méthode d'Ångström est utilisée ici avec $\alpha = 1.3$ comme valeur fixe du Coefficient d'Ångström.

s'affranchir de la vapeur d'eau quand on mesure I_k . Il est dans ce cas indispensable de connaître la hauteur d'eau condensable pour évaluer l'extinction du rayonnement solaire Direct due à la vapeur d'eau.

La méthode Louche a été testée à Carpentras dans des conditions naturelles il y a une vingtaine d'années. Les résultats de mesure de β sont généralement un peu sous-estimés par rapport à ceux obtenus par la méthode Ångström.

Des corrections sont certainement possibles, si tant est que l'on considère que la méthode Ångström utilisée à Carpentras constitue « la référence ». L'avantage de la « méthode Louche » réside dans la possibilité d'établir éventuellement une climatologie du facteur de trouble atmosphérique à partir de mesures anciennes du rayonnement solaire Direct, à condition de connaître l'humidité de l'air, et donc la hauteur d'eau condensable au moment des mesures.

3 – Le facteur de trouble T_L de Linke (1922) est le premier paramètre qui a été proposé par Boda et Linke. Il est égal au nombre d'atmosphères supposées pures et sèches (pas d'aérosols ni de vapeur d'eau, mais avec l'Ozone) qui procureraient la même extinction du rayonnement solaire Direct que l'atmosphère réelle sur le site de mesure. Ce nombre se calcule aisément. La mesure est faite sur la totalité du spectre solaire. Le facteur de trouble T_L ne fait donc aucune distinction entre les atténuations du rayonnement solaire produites par les aérosols et par les autres composants de l'atmosphère dont la vapeur d'eau. Il n'existe aucune relation entre les facteurs de trouble β d'Ångström et T_L de Linke. On peut seulement estimer très grossièrement qu'à un très faible trouble atmosphérique correspond une couleur du ciel d'un bleu intense, un β de l'ordre de 0,020 et un T_L d'environ 2, et qu'à un fort trouble atmosphérique correspond une couleur « bleu-délavé » du ciel (de plus en plus blanchâtre à mesure que le trouble augmente), un β de l'ordre de 0,250 et un T_L d'environ 5 à 6.

Le facteur de trouble T_L ne nous intéresserait pas ici, s'il n'avait pas fait l'objet de mesures à Carpentras pendant de nombreuses années (en même temps que β) et surtout s'il n'avait pas fait l'objet d'une application « originale » (?) pour estimer les effets de l'éruption volcanique du Mt Pinatubo sur le rayonnement solaire Direct à Carpentras. Voir Chapitre 5.

3 - La Transition entre les périodes d'assombrissement et d'éclaircissement planétaires

La transition entre les 2 périodes s'est passée en moins d'un an : entre 1988 et 1989, en France, vraisemblablement à l'extrême fin de l'année 1988. La soudaineté et la rapidité de cette transition posent déjà un problème. Mais si l'on ajoute que la baisse du rayonnement solaire au sol, qui s'était produite antérieurement pendant 3 décennies, a été complètement réduite à zéro à Trappes pendant la courte période de transition, alors le problème devient encore plus complexe. Le même phénomène s'est passé à Carpentras, quoiqu'avec moins d'ampleur comme le montrent les calculs qui suivent.

Les équations des droites d'ajustement des **figures 1a et 1b** permettent d'estimer, par calcul, les **expositions énergétiques annuelles (kWh/m^2)** représentées dans le tableau suivant, pour les années 1958, 1988 et 1989 à Trappes et à Carpentras. Ces années sont respectivement: l'année supposée du début de la période d'assombrissement, l'année de la fin de cette période et l'année du début de la période suivante d'éclaircissement. On ne dispose d'aucune donnée en 1958. Les expositions énergétiques à cette date ont été extrapolées.

Trappes			Carpentras		
1958	1988	1989	1958	1988	1989
1154.22	1049.06	1156.54	1623.14	1473.75	1556.83

Expositions énergétiques annuelles exprimées en kWh/m^2 à Trappes et à Carpentras. Ces valeurs ont été obtenues en divisant par 360 les cumuls annuels exprimés en $Joule/cm^2$ (J/cm^2) que l'on trouve dans les bases de données de Météo-France.

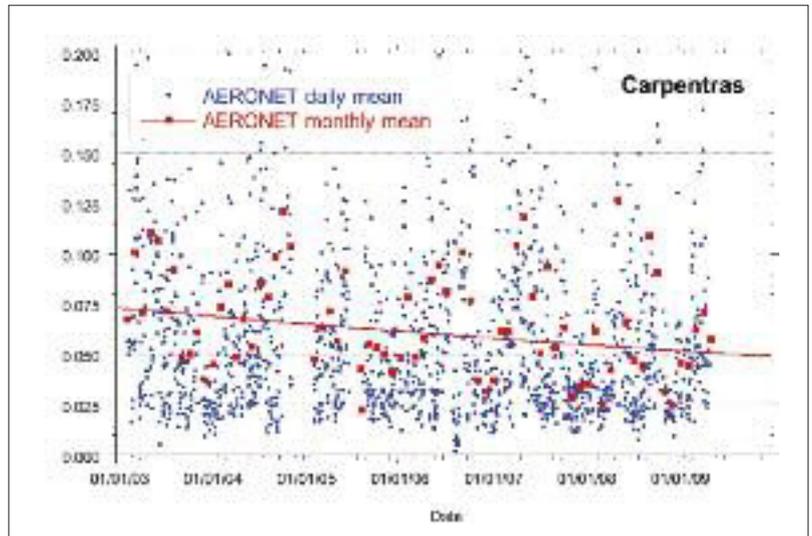


Figure 2d : Variation du Facteur de trouble atmosphérique β mesuré à Carpentras avec une valeur du Coefficient α qui n'est plus considéré comme étant fixe. Le Coefficient α a été calculé à partir des résultats de mesure des épaisseurs optiques mesurées dans le réseau AERONET. Les valeurs du Facteur β sont sur l'axe des ordonnées du graphique précédent.

• **Station de Trappes** : les données de rayonnement sont disponibles depuis 1962. On dispose donc de 26 ans (1988 – 1962) de données, soit près de la totalité des données de la période trentenaire qui est supposée correspondre à la période d'Assombrissement en France. Cela ne changerait pas grand-chose aux résultats des calculs qui vont suivre si cette période avait été un peu plus longue ou un peu plus courte.

Baisse du rayonnement Global 1958/1988 : $1154.22 - 1049.06 = 105.16$ (kWh/an)

soit en pourcentage : $(105.16/1154.22) \times 100 = 9.11$ %

Remontée du rayonnement pendant la transition : $156.54 - 1049.06 = 107.48$ (kWh/an)

La baisse du rayonnement Global pendant la période d'Assombrissement est pratiquement compensée en moins d'un an. Le rayonnement Global semble se stabiliser ensuite à Trappes pendant la période suivante d'éclaircissement (Fig. 1.b).

• **Station de Carpentras** : on dispose de moins de données (38 ans contre 48 ans pour Trappes). Les mêmes calculs montrent que la baisse du rayonnement Global a été de 9.20 % pendant la période d'assombrissement, avec probablement une incertitude légèrement supérieure à la précédente. Pendant la transition entre les 2 périodes d'assombrissement et d'éclaircissement, la baisse du rayonnement solaire au sol n'a été annihilée qu'à un peu plus de 50% à Carpentras (contre 100% à Trappes). Le rayonnement tend à croître ensuite (sauf pendant les 3 à 4 ans qui ont suivi l'éruption volcanique du Mt Pinatubo).

Les phénomènes d'assombrissement et d'éclaircissement planétaires ne se sont pas manifestés uniquement à **Trappes et à Carpentras**. Ils l'ont été également à Montpellier, et dans un certain nombre d'autres stations, bien qu'ils soient plus difficilement mis en évidence parce que les mesures ont souvent démarré à la fin de la période d'assombrissement.

4 – Le Réchauffement climatique

Y a-t-il un lien entre le réchauffement climatique et les phénomènes d'assombrissement et d'éclaircissement planétaires ?

Tous ces phénomènes paraissent être liés. Mais pour les scientifiques ils sont radicalement différents, même si tous semblent agir plus ou moins sur la température au sol. Le réchauffement climatique est causé par l'accroissement continu des gaz à effet de serre d'origine anthropique. L'assombrissement planétaire est probablement dû aux aérosols ou particules émis par les activités humaines qui tendent à réduire le réchauffement climatique, à l'échelle régionale au moins. La réduction de la pollution atmosphérique a conduit à l'éclaircissement planétaire qui devrait entraîner un réchauffement climatique additionnel.

Selon Martin Wild (ETH Zürich) la température moyenne de la Terre au sol a crû d'environ **+0.0036°C/an pendant la période d'Assombrissement et de +0.038°C/an pendant la période d'éclaircissement qui a suivi**. On observe bien un réchauffement pendant la première période, mais de plus forte ampleur, à Carpentras, à Trappes et à Montpellier, par exemple. La tendance de la seconde période est cette fois franchement différente. Les températures auraient plutôt tendance à se stabiliser dans ces stations, après avoir fait un bon au moment de la transition. Elles pourraient même commencer à décroître? L'avenir permettra de confirmer ou d'infirmer cette vague impression.

Pour estimer la croissance de la température de la Terre de +0.038°C/an pendant la période d'éclaircissement, il semblerait que Martin Wild ait intégré dans son calcul l'augmentation rapide de la température moyenne terrestre qui a suivi le refroidissement de 0,3°C à 0,5°C que l'éruption volcanique du Mt Pinatubo avait initialement entraîné?

Pour éviter toute ambiguïté, seules les températures moyennes annuelles mesurées après 1994 ont été prises en considération pour estimer les variations de la température à Carpentras, à Montpellier et à Trappes pendant la période d'éclaircissement. Ces variations, pour les 2 périodes, sont fournies dans le tableau suivant et représentées **figures 4.a et 4.b**.

	Martin Wild	Carpentras	Montpellier	Trappes
Assombrissement	+ 0.0036	+ 0.0605	+ 0.032	- 0.0011
éclaircissement	+ 0.038	- 0.0017	- 0.004	+ 0.00015
Transition (°C)	///	+ 0.38	+ 0.77	+ 1.1

Variations de la température de la Terre en °C/an selon Martin Wild pendant les périodes d'assombrissement et d'éclaircissement. Variations (croissance et décroissance) de la température en °C/an, dans 3 stations de Météo France. On notera ici, que pendant la période d'éclaircissement les températures en France semblent se stabiliser, voire très légèrement décroître, alors que selon Martin Wild (ERH Zürich) elles croissent considérablement. Mais il y a peut-être là un problème lié à la date que Martin Wild a choisie pour débuter ses mesures (Voir Texte).

L'exemple de **Trappes** est assez singulier. La température annuelle moyenne a tendance à croître au rythme de + 0,040°C/an pendant 40 ans de 1970 à 2010. Mais de 1970 à 1990, cette température varie peu et sa moyenne est égale à + 10.1 °C. De 1995 à 2010, la température varie à nouveau très peu et sa moyenne est égale à + 11.2 °C. On peut considérer que la température à Trappes a fait un "bond" de + 1.1 °C pendant la transition entre les périodes

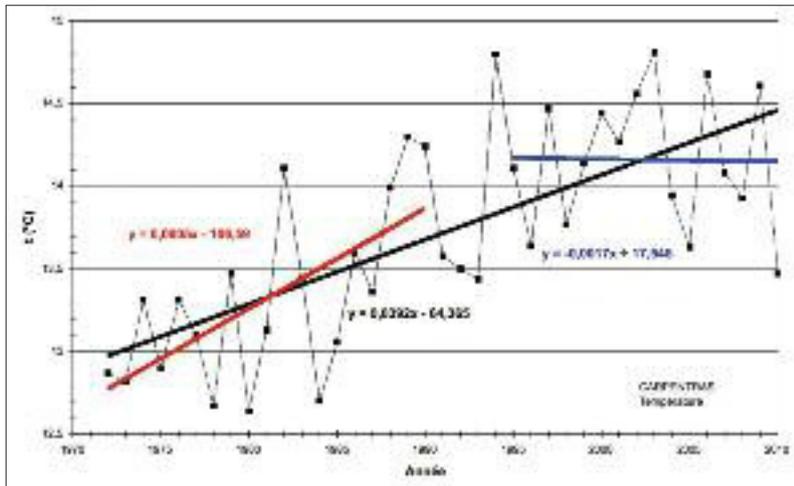


Figure 4a : Variation de la température à Carpentras entre 1972 et 2010. Les équations des Courbes de tendance sont inscrites dans la même couleur que les Courbes. Il n'est pas certain que la croissance observée de 0.0605 °C/ an (entre 1972 et 1990) soit identique depuis le début de la Période d'Assombrissement (1958). Les données n'existent pas.

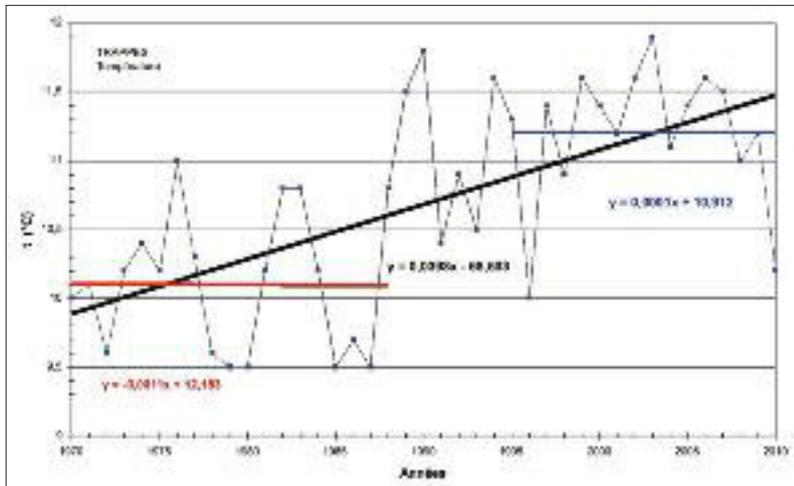


Figure 4b : Variation de la température à Trappes entre 1970 et 2010. Les équations des Courbes de tendance sont inscrites dans la même couleur que les Courbes. Notez le "Bond" de la température de 1,1 °C entre les Périodes d'Assombrissement et d'éclaircissement, et les faibles variations des Courbes de tendance de la température pendant ces périodes.

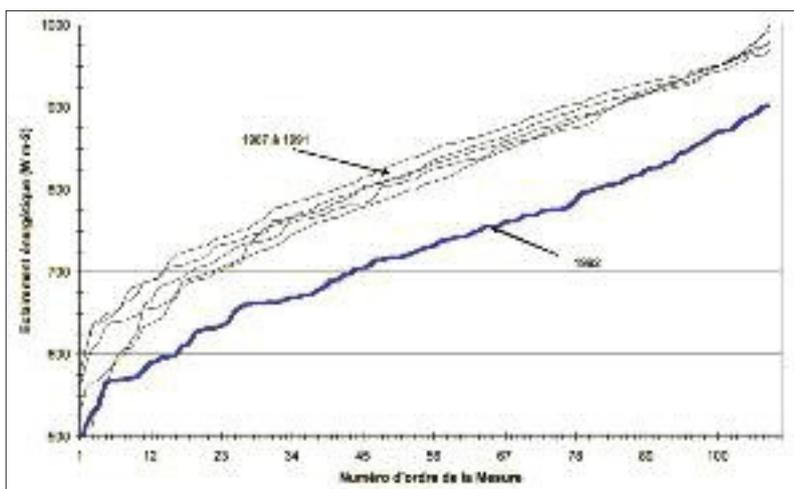


Figure 5 : Variations des éclaircissements énergétiques du rayonnement solaire Direct ($W m^{-2}$) de 1987 à 1992. Ces éclaircissements ont été calculés à 12:00 TSV d'après des mesures effectuées pour déterminer le facteur de trouble atmosphérique TL de Linke, afin de pouvoir comparer des résultats de mesure effectués à des heures quelconques (mais proches de midi temps solaire vrai). Les résultats des calculs ont ensuite été classés par valeurs croissantes. L'éruption volcanique du Mt Pinatubo (juin 1991), n'a encore produit aucun effet pendant les années 1987 à 1991 (courbes en traits fins). En 1992 (trait gras), les aérosols volcaniques ont produit leurs effets.

d'assombrissement et d'éclaircissement.

5 - L'éruption volcanique du Mont Pinatubo : ses conséquences sur le Trouble atmosphérique

L'éruption volcanique du Mt Pinatubo en juin 1991, a été l'une, sinon la plus importante éruption du XX^e siècle. Des quantités énormes d'aérosols (SO_2 puis produits dérivés) ont été déversés directement dans la stratosphère à plus de 20 000 mètres d'altitude. Ces aérosols se sont répandus en quelques mois dans les deux hémisphères terrestres où ils ont séjourné pendant 3 ans environ. Les effets de ces aérosols sont nettement visibles sur le rayonnement solaire Global au sol (Voir Figure 1a surtout), et sur le rayonnement solaire Direct : Voir figure suivante.

Cette figure a été établie, il y a quelques années, pour satisfaire une demande du Professeur Toyotaro Yamauchi, un enseignant de l'école de la météorologie qui dépend du Japan Meteorological Agency (JMA). Ce dernier était intéressé par "des" données du rayonnement solaire Direct mesurées en 1992 à la suite de l'éruption volcanique du Mt Pinatubo.

La figure 5 représente les variations des éclaircissements énergétiques du rayonnement solaire Direct calculés en milieu de belles journées à 12:00 TSV (Midi Temps Solaire Vrai). Ces données ont été obtenues à partir de résultats de mesures instantanées du rayonnement solaire Direct destinées à la mesure du facteur de trouble atmosphérique T_L de Linke. Ces dernières mesures ne se faisant qu'assez rarement à 12:00 TSV, on a supposé que T_L était constant dans la journée pour estimer, par calcul, les valeurs des éclaircissements énergétiques du rayonnement solaire Direct à 12:00 TSV "exactement". Toutes ces valeurs au nombre de 108 chaque année (plus grande valeur commune), ont été classées par valeurs croissantes pour les

NDLR : Les figures 4a et 4b concernant les variations de température respectivement à Carpentras et Trappes n'ont pas le même point de départ (1970 pour Trappes et 1972 pour Carpentras). Ceci est dû à la non disponibilité des données de température sur Carpentras liée à la date d'ouverture de la station météorologique. De ce fait la comparaison entre les deux sites, sans être remise en cause, doit être considérée avec prudence pour la première partie colorée en rouge sur la droite de régression (1970-1990).

années 1987 à 1992 avant d'être représentées graphiquement.

Les mesures n'ont pas été effectuées à des dates fixes, elles ont été faites pour une mesure du trouble atmosphérique lorsque le ciel était clair en direction du Soleil, en moyenne tous les 3 à 4 jours. **La figure 5.a** montre assez clairement une baisse du rayonnement solaire Direct de 10% environ en 1992, par rapport à la moyenne des 5 années qui ont précédé.

Les effets de l'éruption volcanique vont vite s'estomper. Après 1995, en pleine période d'éclaircissement, il devient un peu moins rare de mesurer des éclaircissements énergétiques du rayonnement solaire Direct supérieurs à 1000 W m^{-2} .

6 – Conclusion

Les phénomènes d'assombrissement et d'éclaircissement planétaires sont beaucoup plus complexes que ce qui avait été imaginé auparavant. Il semblerait que l'on ne puisse plus se satisfaire de l'explication qui a été donnée pour expliquer ces phénomènes : les polluants ou les aérosols produits par les activités humaines ne sont peut-être que l'arbre qui cache la forêt. La raison pour laquelle la transition entre les 2 périodes est apparue si soudainement, est probablement due à la combinaison d'autres facteurs dont on ne soupçonne peut-être pas encore l'existence!

Selon certains scientifiques, les aérosols atmosphériques ne peuvent pas expliquer seuls les variations du rayonnement solaire à la surface de la Terre. Les nuages jouent aussi un rôle qu'ils jugent encore plus important. Mais il y a des nuages à condition qu'il y ait des noyaux de condensation, donc présence d'aérosols dans l'atmosphère. La baisse de la quantité des aérosols constatée ces dernières années a inévitablement entraîné une baisse de la nébulosité, donc une diminution de l'albédo de la Terre constatée par les satellites. Cela suffit pour que la température de la Terre croisse (moins d'énergie solaire est réfléchiée vers l'espace). La réalité n'est malheureusement pas aussi simple. Le système climatique de la Terre est extraordinairement complexe et il n'est probablement pas prêt de livrer tous ses secrets.

Un profane admet difficilement que la transition entre les périodes d'assombrissement et d'éclaircissement se soit passée aussi soudainement, en moins d'un an, parce que la quantité des aérosols venait juste de "décliner" ! Le franchissement de seuils est certainement plus important que la quantité d'aérosols. Les conditions locales jouent un rôle, mais quelles peuvent bien être les différences qui existent entre deux sites souvent très voisins, où les phénomènes d'assombrissement et d'éclaircissement planétaires ont réellement eu lieu, ou, au contraire, ne se sont pas produits ? Il existe de nombreux exemples dans le monde : Trappes et Tours en France constituent l'un de ces exemples, semble-t-il.

JEAN-PHILIPPE MOREL

Centre radiométrique Carpentras ; jean-philippe.morel@meteo.fr

JEAN OLIVIÉRI

Retraité Météo France,

CHRIS A. GUEYMARD

Solar Consulting Services ; Chris@SolarConsultingServices.com

1. Ces 4 à 5% sont associés à un intervalle de confiance de 95% (généralement adopté), c'est-à-dire que la probabilité est de 0,95 pour que le résultat réel de la mesure (inconnu naturellement) se trouve compris entre le résultat de la mesure moins 4 à 5%, et le résultat de la mesure plus 4 à 5%.

2. Anders Knutsson Ångström (1888-1981) est le fils de Knut Johan Ångström (1857-1910) et le petit-fils d'Anders Jonas Ångström (1814-1874) un peu plus connu, peut-être, de la communauté scientifique. Les Ångström sont tous des physiciens célèbres qui ont contribué à améliorer les méthodes de mesure dans le domaine radiométrique et à perfectionner les instruments. On attribue à Anders Knutsson Ångström l'invention du pyranomètre, le radiomètre le plus utilisé dans le monde.