
Soumis le : 18/06/2016

Forme révisée acceptée le : 31/05/2017

Auteur correspondant : haddad_mahdi@yahoo.fr

Nature & Technology

<http://www.univ-chlef.dz/revuenatec/>

Analyse des séries temporelles d'observations du système climatique

Mahdi Haddad

Centre des Techniques Spatiales. 1 Avenue de la Palestine, BP 13 Arzew. Oran 31200. Algérie. Email: haddad_mahdi@yahoo.fr

Résumé

Cette étude est consacrée à l'analyse des séries temporelles d'observations du système climatique en vue de l'analyse de la variabilité des changements, à long et moyen termes, de l'atmosphère, de l'océan, de la cryosphère et de la surface des terres émergées. Les résultats confirment l'augmentation des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère, le réchauffement de l'atmosphère et de l'océan, le recul des neiges et des glaces et l'élévation du niveau moyen mondial. Ces résultats pointent vers une même conclusion ; la planète s'est réchauffée depuis la fin du XIX^{ème} siècle et suggèrent que les changements de climat observés, restent tributaires à l'activité humaine.

Mots- clés: Réchauffement climatique; Série temporelle ; Décomposition ; Tendence ; Saisonnalité.

Abstract

This study focuses on analysis of time series of observations of the climate system in order to have consistent information of variability and changes, over the medium and long term, of the atmosphere, ocean, cryosphere and land surface. The findings confirm the increases in CO₂ concentrations in the atmosphere, warming of the atmosphere and the oceans, widespread melting of snow and ice and rising global average sea level. These results point to one very clear conclusion: the planet has warmed since the end of the 19th century and suggests that the observed climate changes remain dependent of human activity.

Keywords : Global warming; Time series; Decomposition ; Trend; Seasonality.

1. Introduction

Lorsqu'on parle du « réchauffement climatique » devenu progressivement et insidieusement « changement climatique », il s'agit le plus souvent de phénomènes globaux s'appliquant, soit à la terre entière, soit à de vastes ensembles : hémisphères, terres, océans, pôles, tropiques etc. Le premier signe du réchauffement climatique est évidemment la hausse globale de la température (de l'atmosphère ainsi que des océans). Cette modification entraîne de nombreuses conséquences dans son sillage : dérèglements climatiques (sécheresses anormales dans certaines régions du globe, pluies diluviennes, etc.), élévation du niveau de la mer, réchauffement des océans, fonte des glaciers, accentuation du phénomène "El Nino", modification de la répartition géographique de la faune et de la flore, ...etc.

La découverte de la problématique du changement climatique remonte à 1824, où le physicien français Joseph FOURIER a proposé une théorie selon laquelle la

température sur la Terre est accrue par l'atmosphère qui piège une partie du rayonnement infrarouge émis par la Terre [1]. C'est une première ébauche de l'effet de serre. Voulant comprendre et expliquer le cycle des glaciations, le chimiste suédois Svante ARRHENIUS a élaboré en 1896 une théorie qui relie l'augmentation du CO₂ atmosphérique à une augmentation sensible des températures terrestres en raison d'un « effet de serre » dû à la vapeur d'eau et à l'acide carbonique (CO₂ dissous dans la vapeur d'eau) [2]. Il indiquait déjà avec beaucoup de clairvoyance que le doublement de la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère devrait entraîner l'augmentation de la température de 4° à 6°C, ce qui correspond à peu près aux estimations actuelles.

En 1958, Charles David KEELING commence à mesurer les concentrations de CO₂ sur le volcan Mauna Loa à Hawaï ; elles sont alors de 315 ppm [3]. En 1961, Keeling fournit des résultats de mesures, qui ont donné naissance à la fameuse courbe de Keeling, montrant que les niveaux de CO₂ augmentaient fortement, une tendance qui n'a cessé de

s'accroître depuis. En 1979, l'Académie Nationale des Sciences américaine lance la première étude rigoureuse sur le réchauffement de la planète. Sur la base de cette enquête, le comité *Charney*¹ qui en a eu la charge concluait déjà que le CO₂ anthropique, d'origine industrielle, est la seule cause du déséquilibre catastrophique de l'effet de serre et que la température globale moyenne annuelle va croître continûment à cause de l'accroissement de la concentration en CO₂ [4].

Depuis 1988, plusieurs chercheurs internationaux se sont réunis sous l'égide des Nations Unies pour constituer le *Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC)*² afin de travailler sur les changements climatiques. Cinq rapports ont d'ores et déjà été publiés en 1990, 1995, 2001, 2007 et 2014. Ces rapports confirment que le réchauffement du système climatique est sans équivoque et que nombre des changements observés sont sans précédent depuis des décennies, voire des millénaires : réchauffement de l'atmosphère et des océans, diminution de la couverture neigeuse et recul des glaces, élévation du niveau des mers et augmentation des concentrations de gaz à effet de serre. En juin 2004, une équipe européenne (European Project for Ice Coring in Antarctica) avait retracé l'histoire de notre atmosphère sur 740 000 ans à partir d'investigations sur des carottes glaciaires extraites en Antarctique. Les analyses des bulles d'air emprisonnées dans la glace confirment que les teneurs actuelles en gaz à effet de serre atteignent le plus haut niveau jamais vu au cours des 440 000 dernières années [5]. Signé en 1997, le protocole de *Kyoto*³ qui est un accord international, bâti sur la Convention–Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques, vise à réduire l'émission des gaz à effet de serre. Entrant en vigueur en 2005, il a été ratifié par 183 pays. L'Union européenne, ainsi que les pays susceptibles d'être directement concernés par la menace des conséquences du changement climatique, ont été les plus ardents défenseurs du plan. Cependant, Il existe depuis peu une controverse dans le monde scientifique concernant le réchauffement climatique. Le pavé dans la marre fut lancé lorsque plus de 31 000 scientifiques américains signèrent un texte⁴ affirmant qu'il n'y a aucune preuve tangible que nos rejets de CO₂ sont susceptibles d'entraîner une augmentation catastrophique des températures sur la Terre.

Dans le cadre de cette étude, il sera appréhendé l'étude de la variabilité des changements à long et moyen termes de l'atmosphère, de l'océan, de la cryosphère et de la surface des terres émergées à partir de séries d'observations du système climatique : niveau moyen des mers à l'échelle du globe, température de surface combinant les terres émergées et les océans, contenu thermique océanique, rayonnement solaire total, étendue des glaces de mer, étendue du manteau neigeux de l'hémisphère Nord, teneur atmosphérique en CO₂ et l'*Index ENSO Multivariable (MEI)*. Ces données sont publiées sur le site de l'organisme international, géré par le KNMI néerlandais : *European climate assesment and data, ECA&D*. Cet organisme publie également des séries longues concernant notamment le régime des vents, l'évapotranspiration, la pluviométrie et les températures.

Afin d'analyser les séries d'observations du système climatique dont on dispose, on a utilisé la technique *Seasonal - Trend Decomposition Based on Loess - STL* [6], qui est une des méthodes récentes proposées pour décomposer des séries temporelles. Il s'agit d'extraire, par l'application de cette technique, des ces séries pluriannuelles de mesures climatiques, des signaux indépendants et interprétables, représentant la composante principale de la tendance, la composante de saisonnalité et la composante bruit. Les tendances infimes constitueront un nouveau feuillet thématique qui permettra de découvrir les évolutions temporelles du climat constatées à l'échelle de notre planète.

2. Recueil des données

Les observations du système climatique s'appuient sur des mesures directes et sur la télédétection à partir de satellites ou d'autres plates– formes. À l'échelle mondiale, les observations de l'ère instrumentale ont débuté vers le milieu du XIX^{ème} siècle pour certaines variables telles que la température, les jeux de données d'observation étant plus complets et diversifiés à partir des années 1950. Des reconstructions effectuées à partir d'archives paléoclimatiques permettent d'étendre certains enregistrements sur plusieurs centaines voire plusieurs millions d'années vers le passé. L'ensemble de ces données fournit une vision globale de la variabilité et des changements à long terme de l'atmosphère, de l'océan, de la cryosphère et de la surface des terres émergées. Nous avons analysé dans le cadre de cette étude les séries d'observations du système climatique suivantes :

¹ http://people.atmos.ucla.edu/brianpm/download/charney_report.pdf

² IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): www.ipcc.ch

³ http://unfccc.int/files/cooperation_and_support/cooperation_with_international_organizations/application/pdf/kpfrench.pdf

⁴ <http://www.petitionproject.org/index.php>

1. La série temporelle d'anomalies de hauteurs de mer (Sea Level Anomalies) produite à l'échelle du globe (ensemble des mers et océans) et calculée par l'Université de Colorado⁵ sur la période de janvier 1993 à décembre 2015 à une résolution mensuelle, a été utilisée dans le cadre de cette étude. Cette série résulte de l'homogénéisation et de la combinaison de multiples données altimétriques acquises et produites par différentes missions d'altimétrie spatiale. Notons ici que les anomalies de hauteurs de mer représentent la différence entre la hauteur de la mer observée par l'altimétrie spatiale et la hauteur de la mer moyenne. Cette donnée permet de suivre les variations de l'océan (variations saisonnières, phénomènes climatiques comme El Niño).

2. La série de la reconstruction de Church and White [7] des évolutions passées du niveau moyen global des océans sur le XX^{ème} siècle, estimée à partir des mesures marégraphiques. Cette série de résolution mensuelle, disponible sur le site 6, couvre la période de 1880 à 2013.

3. Il existe trois principales séries historiques pour la température mondiale : l'enregistrement combiné CRU-Hadley (HADCRU), l'enregistrement NASA GISS-(GISTEMP) et l'enregistrement de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Dans cette étude, la série temporelle d'anomalies de température de surface utilisée (1880–2015) est celle publiée par la NOAA⁷. Ils indiquent sur le site NOAA que la série terrestre est issue de l'archive GHCN (Global Historical Climatology Network), et aucune autre source n'est citée.

4. Les mesures mensuelles du contenu de chaleur de l'océan entre 0 et 700 mètres de profondeur (en référence à sa dénomination en anglais de Ocean Heat Content). La large majorité des données provient de mesures effectuées par les profileurs du programme international Argo (Array for Real-time Geostrophic Oceanography) [8]. Cette série qui couvre la période de 1971 à 2015 est disponible sur le site 8.

5. Série des moyennes mensuelles de l'activité solaire mesurée par des radiomètres embarqués sur différents satellites depuis Novembre 1978: HF sur Nimbus⁷, ACRIM I sur SMM, ERBE sur ERBS, ACRIM II sur UARS, VIRGO sur SOHO, et ACRIM III sur ACRIM-Sat. Cette série est téléchargeable depuis le site⁹. La description des procédures utilisées pour construire le

composite de l'activité solaire à partir des données d'origine peut être trouvée dans [9,10].

6. Plusieurs organismes observent l'évolution des glaces de mer (les glaces qui flottent à la surface de la mer) aux deux pôles. Ils produisent des bases de données et des graphiques dont l'origine est 1979 (début des observations par satellites) et qui sont régulièrement mis à jour, mensuellement ou quotidiennement. Il ne faut pas confondre ces évolutions des glaces de mer avec celles des calottes polaires, formées à partir des chûtes de neige. L'extension des glaces de mer fluctue bien entendu au cours de l'année. Mais il existe aussi des évolutions annuelles se superposant aux cycles saisonniers. Ces évolutions sont scrutées, surtout dans les zones polaires nord, à la fois pour des raisons de navigation (éventualité de passages maritimes nord pour relier les trois continents) et de ressources fossiles (supposées) convoitées par plusieurs pays riverains. Contrairement à la zone polaire nord, qui n'est constituée que d'une banquise, la zone polaire sud comporte un véritable continent glacé (inlandsis) de 13,6 Mkm² (près de 2 fois la surface de l'Australie et 8 fois l'inlandsis du Groenland). Ce continent est entouré de glaces de mer dont la surface évolue au fil des saisons, et dont la surface maximum en hiver dépasse la surface du continent lui-même. Dans cette étude, deux séries de couverture de surface de mer « sea ice extent »¹⁰. La première concerne la partie de l'hémisphère Nord, la seconde concerne l'hémisphère Sud. Ces deux séries couvrent la période de 1979 à 2015. L'unité utilisée est le million de kilomètres carrés (Mkm²).

7. Les observations et les analyses de changements de la glace se sont élargies et se sont améliorées depuis ces dernières années, y compris en ce qui concerne le rétrécissement du volume des glaciers de montagne, les diminutions de la couverture neigeuse, les réductions des sols saisonnièrement gelés, la couverture de glace des rivières et des lacs, etc. Celles-ci permettent une meilleure compréhension de la manière dont la cryosphère change, y compris ses contributions aux évolutions récentes du niveau de la mer. La série d'anomalies¹¹ de l'étendue de neige observées dans l'hémisphère Nord au cours de la

⁶ http://www.cmar.csiro.au/sealevel/downloads/church_white_gmsl_2011_up.zip

⁷ <http://www.ncdc.noaa.gov/monitoring-references/faq/>

⁸ http://www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT/basin_data.html
⁹ <http://www.pmodwrc.ch/pmod.php?topic=tsi/composite/SolarConstant>

¹⁰ Produites par la National Sea Ice data center NSIDC, Université de Boulder, Colorado (USA). <http://nsidc.org/data/g02135>

¹¹ fournie par la Rutgers University: <http://climate.rutgers.edu/snowcover/>

⁵ <http://sealevel.colorado.edu/>

période allant de 1966 à aujourd'hui a été utilisée dans cette étude.

8. Série mensuelle des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère mesurées à l'observatoire de Mauna Loa à Hawaï (Lat. : 19°32'10" N; Long. : 155°34'34" W; altitude: 3 397 m), exprimée en fraction molaire dans l'air sec (ou ppmv). Datant de 1958, Mauna Loa est la station de mesure du CO₂ atmosphérique la plus ancienne au monde. Les concentrations moyennes mensuelles sont calculées à partir de mesures continues¹².

9. L'indice multi-varié d'ENSO est une mesure multi-variables du signal ENSO fourni par le Climate Diagnostic Center (NOAA)¹³. Sa construction repose sur une ACP étendue de champs à la fois atmosphériques et océaniques observés sur le Pacifique tropical : pression au niveau de la mer, composantes zonale et méridienne du vent en surface, température de surface océanique, température de l'air en surface et nébulosité du ciel [11]. Chaque valeur mensuelle est basée sur des données bimensuelles ; par exemple pour février 2000 la valeur est calculée sur les données de janvier et février 2000. Les valeurs mensuelles de MEI sont standardisées par rapport à la période de référence 1950–1993 et exprimées comme fractions de la déviation standard dont la moyenne est donc égale à 0 et l'écart-type égal à 1.

3. Technique d'analyse : Seasonal - Trend Decomposition Based on Loess - STL

Parmi les méthodes récentes proposées pour décomposer des séries temporelles, certaines de ces méthodes sont développées uniquement pour identifier des changements sur la saisonnalité [12], des changements sur les résidus [13] ou des changements sur la tendance et la saisonnalité [14]. De part sa capacité à gérer des données aberrantes ou manquantes dans une série temporelle, la technique Seasonal-Trend Decomposition Based on Loess - STL [6] fournit une estimation fiable et robuste de la tendance et de la saisonnalité. De plus, selon [15, 16], sa flexibilité, sa simplicité et sa performance de calcul offrent la possibilité de traiter aisément un grand volume de données. STL est une méthode non-paramétrique qui, à partir d'un modèle additif, décompose une série temporelle (Y_t) en trois composantes—tendance (C_t), saison (S_t) et résidus (ε_t) : $Y_t = C_t + S_t + \varepsilon_t$.

¹² <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends>

¹³ <http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/index.html>

STL est une procédure itérative qui utilise des fonctions de régression locale pondérée, appelée LOcally wEighted regreSSion Smoother - LOESS et initialement proposée par [17] et développée par [18]. Chaque point (x_0, y_0) dans l'ensemble de données est remplacé par une régression linéaire sur les points (x_i, y_i) de son voisinage, affectés d'une pondération dépendant de l'éloignement $|x_i - x_0|$ par rapport au point (x_0, y_0) . Il s'agit d'un lissage non paramétrique déterminé par le nombre de points participant aux régressions locales. Les paramètres à définir sont la taille du voisinage et le degré du polynôme pour la fonction d'ajustement (constant, linéaire ou quadratique). La composante «saison» permet de déterminer le cycle de variation du niveau de la mer, valable pour la période couverte par la série temporelle et dans laquelle les effets dus à des changements sur la tendance ou sur les résidus sont éliminés. La composante «tendance», qui peut être modélisée par une fonction linéaire (avec ou sans ruptures), permet de déterminer des changements sur la tendance au cours de la période étudiée. La technique Seasonal-Trend Decomposition Based on Loess - STL est implémenté dans R^{14} pour les séries temporelles par la fonction « stl ». Cette fonction renvoie un objet de classe STL comportant en particulier une composante appelée time series qui est une série temporelle multiple composée de colonnes appelées *trend*, *seasonal* et *remainder*, correspondant respectivement à la tendance, l'effet saisonnier et le reste (résidus).

4. Résultats expérimentaux et discussion

Les figures 1 à 8 illustrent les trois composantes (tendance, saison, résidus) résultantes de la décomposition temporelle avec la méthode STL, des 10 séries d'observations du système climatique considérées dans le cadre de cette étude.

4.1. Niveau moyen des mers à l'échelle du globe

Les données historiques relatives au niveau des mers indiquent que le niveau moyen des mers à l'échelle du globe s'est élevé de 0,231 m (de -0,168 à 0,063 m) sur la période de 1880 à 2013, (Figure 1, trend). La vitesse moyenne d'élévation du niveau des mers a été de 1,6 mm.an⁻¹. En raison de la variabilité naturelle, la vitesse moyenne d'élévation du niveau des mers sur les séries

¹⁴ Un langage de programmation gratuit, multiplateforme. Son développement met à contribution des utilisateurs qui peuvent créer de nouveaux paquets («packages») rendant les possibilités d'utilisation immenses dans des domaines d'études très différents.

courtes est très sensible à la date de début et de fin de la période considérée : la vitesse moyenne d'élévation du niveau des mers a été de $1,72 \text{ mm.an}^{-1}$ entre 1901 et 2013, de $2,33 \text{ mm.an}^{-1}$ entre 1971 et 2013, et de $3,57 \text{ mm.an}^{-1}$ entre 1993 et 2013 (ère de l'altimétrie spatiale).

Les données issues de l'altimétrie spatiale indiquent que le niveau moyen des mers à l'échelle du globe s'est élevé de $3,25 \text{ mm.an}^{-1}$ entre 1993 et 2013 ($3,57 \text{ mm.an}^{-1}$ à partir des données historiques) et de $3,36 \text{ mm.an}^{-1}$ entre 1993 et 2015. Les données fournies par les marégraphes et les satellites altimétriques, sont ainsi cohérentes en ce qui concerne la vitesse caractérisant la période 1993–2013.

4.2. Température de surface

La tendance de la moyenne globale des anomalies de température de surface combinant les terres émergées et les océans indique que la quasi-totalité de la surface du globe a connu un réchauffement de 1.17°C ($-0,11$ à $1,06^\circ\text{C}$) au cours de la période 1880–2015. La tendance des anomalies de température moyennes à la surface du globe présente une grande variabilité aux échelles décennale et interannuelle (Figure 2, trend), qui se superpose à un réchauffement multi-décennal considérable.

4.3. Contenu thermique océanique de 0 à 700 m

Le réchauffement océanique constitue l'essentiel de l'augmentation de la quantité d'énergie emmagasinée au sein du système climatique. Il ressort de la tendance extraite que l'océan superficiel (jusqu'à 700 m de profondeur) s'est réchauffé entre 1971 et 2015 (Figure 3, trend). Pendant la période de 45 ans allant de 1971 à 2015, l'augmentation nette d'énergie absorbée par le système climatique a été emmagasinée dans l'océan superficiel (0-700 m). L'augmentation du contenu thermique de l'océan superficiel pendant cette période est estimée par une tendance linéaire à $\sim 19 \times 10^{22}$ Joules (de $-4,24$ à $15,12 \times 10^{22}$ J).

4.4. Rayonnement solaire total

Sur la base de mesures directes du rayonnement solaire total, on peut affirmer que les changements de ce

rayonnement solaire n'ont pas contribué au réchauffement de la planète au cours de la période allant de 1978 à 2015 (Figure 4), période pour laquelle les mesures directes par satellite du rayonnement solaire total sont disponibles. La tendance extraite exprime clairement le cycle de variabilité solaire de 11 ans qui influe sur les fluctuations climatiques décennales (température de surface par exemple). Les observations satellitaires relatives aux changements du rayonnement solaire total de 1978 à 2011 indiquent que, le dernier cycle solaire était inférieur aux deux précédents.

4.5. Etendue des glaces de mer

L'étendue moyenne annuelle de la banquise arctique (glaces de mer) a diminué au cours de la période 1979–2015 en données corrigées des variations saisonnières avec une vitesse de $0,48$ million de km^2 par décennie (Figure 5, Trend). L'étendue spatiale a diminué en toutes saisons et à chaque décennie successive depuis 1979 (Figure 5, trend). On remarque bien et d'une manière distincte les chutes récentes de 2009–2010 et 2012–2015. Le minimum observé en 2015 s'est produit en décembre avec $10,82 \text{ Mkm}^2$. L'étendue moyenne annuelle de la banquise en Antarctique (glaces de mer) a augmenté de $0,20$ million de km^2 par décennie entre 1979 et 2015. L'extension maximale de la glace de mer est observée durant le mois de mars 2014 ($13,17 \text{ Mkm}^2$, en données corrigées des variations saisonnières). Celle-ci dépasse les plus hauts niveaux historiques (satellites s'entend). Les extensions des glaces polaires nord et sud semblent donc évoluer en sens inverse l'une de l'autre.

4.6. Anomalies de l'étendue du manteau neigeux de l'hémisphère Nord

Au cours de la période 1966-2015, la tendance extraite de l'étendue du manteau neigeux dans l'hémisphère Nord montre une baisse au cours des dernières décennies (Figure 6, Trend). Les plus fortes baisses sont observées au printemps et en été.

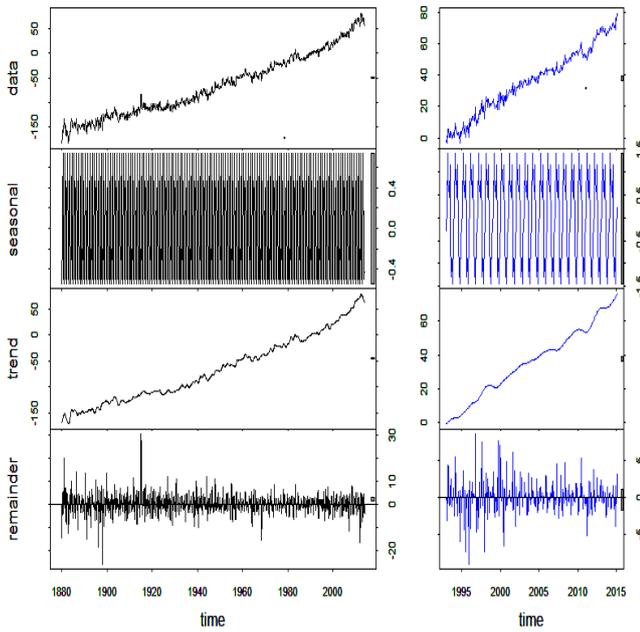


Figure 1 : Niveau moyen des mers à l'échelle du globe.
A gauche et en noir : mesures marégraphiques
A droite en bleu : mesures issues de l'altimétrie spatiale

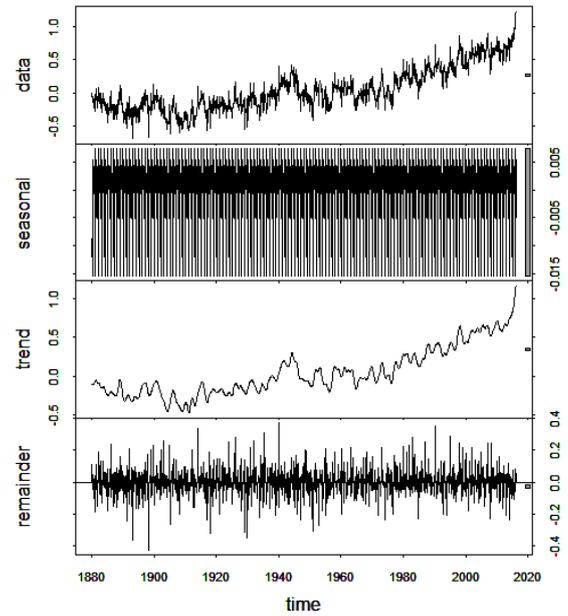


Figure 2 : Anomalies de température de surface combinant les terres émergées et les océans, en °K.

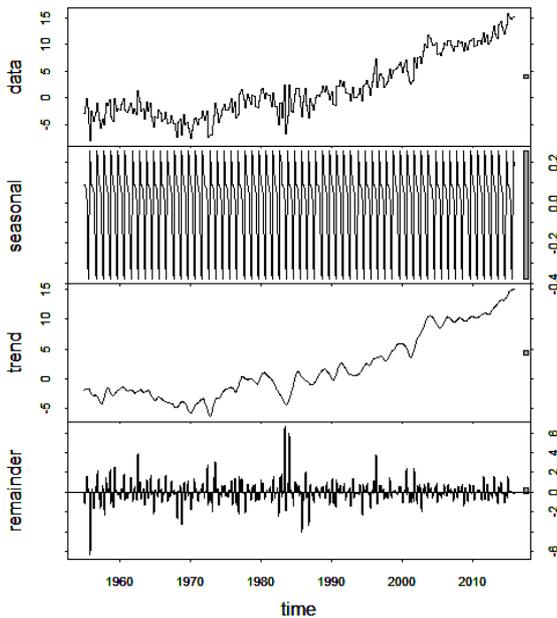


Figure 3 : Contenu thermique océanique de 0 à 700 m, en 10^{22} J.

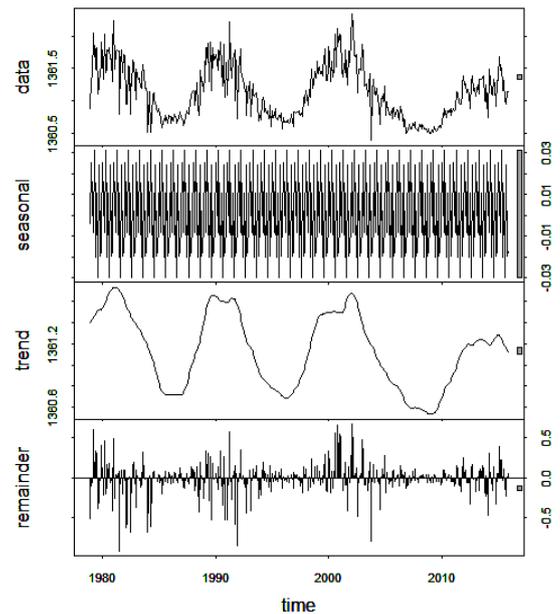


Figure 4 : Rayonnement solaire total, en W/m^2

4.7. Teneur en CO_2 mesurées à Mauna Loa

L'enregistrement de la teneur en dioxyde de carbone (CO_2) présente une tendance croissante claire qui est due à l'ajout des gaz anthropiques. Les concentrations atmosphériques en CO_2 ont augmenté pour atteindre des niveaux sans précédent depuis ces 58 dernières années

(Figure 6, Trend). La concentration en CO_2 a augmenté de 314,63 ppm (mars 1958) à 402,47 ppm (décembre 2015). Le taux moyen d'augmentation de la concentration atmosphérique est de $1,51 \text{ ppm an}^{-1}$ sur la période de 1958 à 2015. Le cycle annuel de CO_2 (Figure 5, seasonal) peut être facilement expliqué par l'observation : d'octobre à avril l'hémisphère Nord (HN) se refroidit tandis que

l'hémisphère Sud (HS) se réchauffe. A cause de la localisation de la plupart des terres dans HN et de la majorité des océans dans HS, la concentration atmosphérique attendue est croissante durant cette période et ce du fait que les plantes dans NH et l'océan étant plus chaud dans SH absorberaient moins de CO₂ de l'atmosphère. La situation inverse se produirait de mai à septembre.

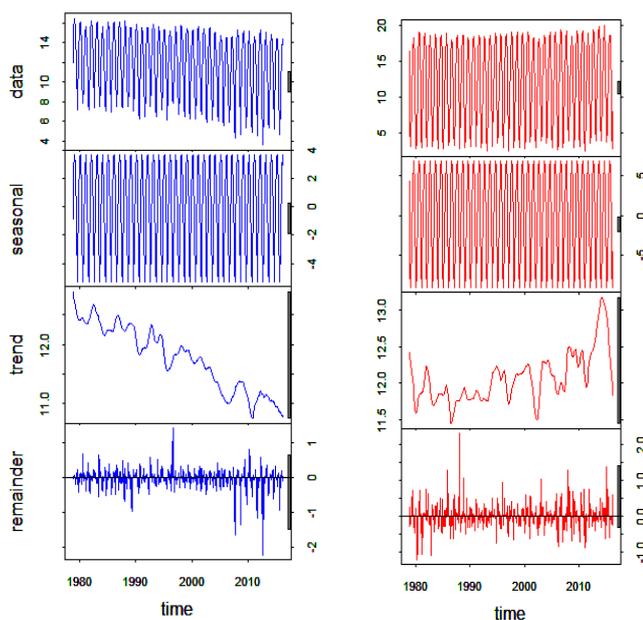


Figure 5 : Étendue des glaces de mer (En Mkm²)

A gauche et en bleu : hémisphère Nord - A droite en rouge : hémisphère Sud

4.8. Index ENSO Multivariable (MEI)

L'index MEI fluctue de manière irrégulière autour d'une moyenne zéro. Le MEI ne présente pas de variabilité cyclique annuelle régulière évidente. Cependant, les épisodes du phénomène climatique El Niño/El Niña sont bien décrites par le MEI qui combine six variables météorologiques représentatives mesurées dans le Pacifique tropical : événements El Niño de 1998, El Niña de 2011 et El Niño de 2015 (Figure 8, Trend).

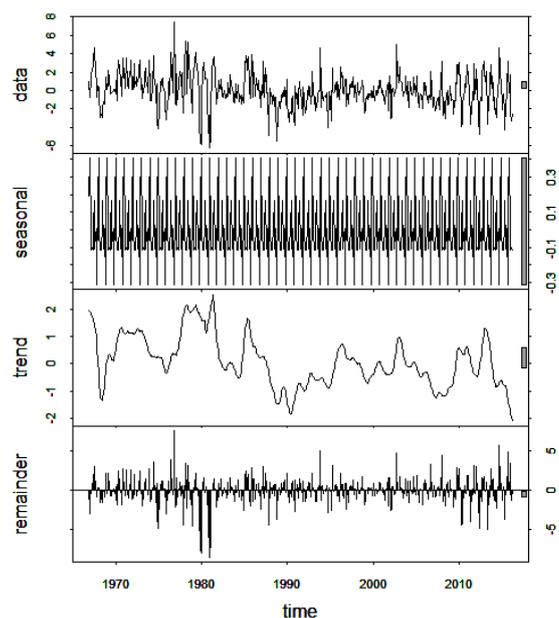


Figure 6 : Étendue moyenne du manteau neigeux de l'hémisphère Nord (En 106 km²).

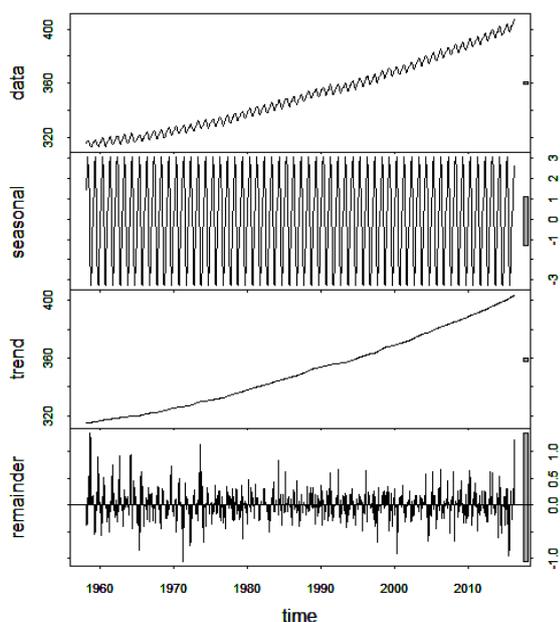


Figure 7 : Série temporelle des valeurs mensuelles de CO₂ (en ppm)
Mesurées à Mauna Loa

(Lat. 19°32'10'' N ; long. 155°34'34'' O ; alt. 3397m ; Intervalle 1958-2015).

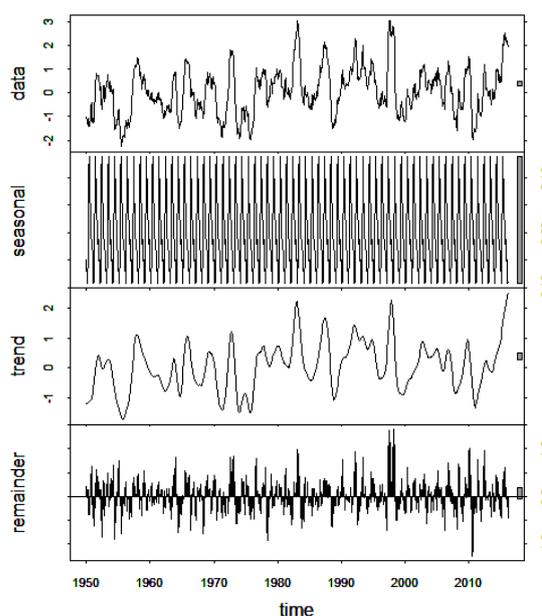


Figure 8 : Série temporelle des valeurs mensuelles de MEI
(Intervalle 1950-2011).

5. Conclusion

Dans la présente étude, on s'est intéressé à un certain nombre de séries d'observations du système climatique et pour lesquelles on disposait de données mensuelles continues sur de longues et/ou moyennes périodes. La détermination des tendances de ces séries est une question délicate. La technique Seasonal–Trend Decomposition Based on Loess permet de décomposer ces séries et de fournir une estimation fiable et robuste de la tendance et de la saisonnalité. Les résultats obtenus peuvent paraître primaires, mais ce sont ces « courbes » de tendance qui, pour les spécialistes en climatologie, présentent une importance capitale pour la recherche de corrélations entre les événements climatiques que subit la Terre. Chacune des dernières décennies a été successivement plus chaude à la surface de la terre qu'aucune autre décennie depuis 1850. La température moyenne enregistrée à la surface du globe a augmenté de 1,17 degré entre 1880 et 2015.

La fonte de la banquise arctique (glace de mer), en données corrigées des variations saisonnières, se traduit par une perte de 2 Mkm² de sa superficie depuis 1979. De même, l'étendue du manteau neigeux a diminué depuis les années 1950 dans l'hémisphère Nord. En 2014, exactement à l'opposé de celle de l'Arctique, l'étendue de la banquise Antarctique a atteint son record absolu d'extension maximale (13,17 Mkm², en données corrigées des variations saisonnières). L'Arctique et l'Antarctique se caractérisent par un comportement climatique opposé dans l'extension des banquises.

L'Index ENSO Multivariable ne présente pas de tendance ou de variabilité cyclique annuelle régulière évidente. Cependant, les épisodes d'ENSO restent bien décrits par le MEI. Enfin notons que les variations du rayonnement solaire total n'ont pas contribué au réchauffement de la planète au cours de la période allant de 1978 à 2015. Bien au contraire, le dernier cycle décennal solaire est inférieur aux deux précédents. Ce constat suggère donc, que les changements de climat observés, restent tributaires directement ou indirectement à l'activité humaine qui altère la composition de l'atmosphère mondiale.

Prise séparément, l'analyse de chaque série d'observations climatiques peut ne pas être concluante. Mais l'étude de ces différents indicateurs, des abysses de l'océan au sommet de la troposphère, les signes du réchauffement de l'air et de l'océan, de la fonte des glaces et de l'élévation du niveau de la mer, pointent tous sans équivoque, vers une même

conclusion : la planète s'est réchauffée depuis la fin du XIX^{ème} siècle.

Remerciements

L'auteur tient à remercier l'organisme néerlandais KNMI (European climate assesment and data, ECA&D) pour la mise à sa disponibilité les séries temporelles d'observations du système climatique, ainsi que le CTS (Centre des Techniques Spatiales – Algérie) qui a permis la réalisation de cette étude.

Références

- [1] Fourier J., Résumé Théorique des Propriétés de la Chaleur Rayonnante, Annales de Chimie et de Physique, 27 (1824) 236– 281.
- [2] S. Arrhenius, On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground, Philosophical Magazine and Journal of Science, 5 (41),(1896) 237– 276
<http://www.globalwarmingart.com/images/1/18/Arrhenius.pdf>
- [3] Kahele R., Behind the Inconvenient Truth, Hana Hou, ... 10 (5), octobre/novembre 2007.
- [4] National Academy of Sciences, Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment. Report of an Ad Hoc Study Group on Carbon Dioxide and Climate. Woods Hole, Massachusetts, July 23– 27, to the Climate Research Board, Assembly of Mathematical and Physical Sciences, National Research Council, 1979.
http://people.atmos.ucla.edu/brianpm/download/charney_report.pdf
- [5] EPICA Community Members, Eight Glacial Cycles from an Antarctic Ice Core, Nature, 429 (2004) 623– 628.
- [6] Cleveland R. B., Cleveland W. S., Mcrae J. E., Terpenning I. J., STL: A Seasonal– Trend Decomposition Procedure Based on Loess, Journal of Official Statistics, 6 (1) (1990) 3– 33.
- [7] Church J. A. and White N. J., Sea– Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century, Surveys in Geophysics, 32 (4– 5) (2011) 585– 602.
- [8] Levitus S., Antonov J. I., Boyer T. P., Baranova O. K., Garcia H. E., Locarnini R. A., Mishonov A. V., Reagan J. R., Seidov D., Yarosh E. S., Zweng M.M., World Ocean Heat Content and Thermocline Sea Level Change (0– 2000 m) 1955– 2010, Geophysical Research Letters, 39, L10603, 5 p. doi:10.1029/2012GL051106, 2012.
- [9] Fröhlich C. and Lean J., The Sun's Total Irradiance: Cycles and trends in the past two decades and associated climate change uncertainties, Geophysical Research Letters, 25 (1998) 4377– 4380.
- [10] Fröhlich C., Observations of Irradiance Variability, Space Science Reviews, 94 (2000) 15– 24.
- [11] Wolter K., Timlin M. S., Monitoring ENSO in COADS with a Seasonally Adjusted Principal Component Index, Proceedings of the 17th Climate Diagnostics Workshop, Norman, OK, NOAA/NMC/CAC, NSSL, Oklahoma Clim. Survey, CIMMS and the School of Meteor., Univ. of Oklahoma, 52– 57, 1993.
<http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/WTL1.pdf>
- [12] Jönsson P. and Eklundh L., Seasonality Extraction by Function Fitting to Time Series of Satellite Sensor Data, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40 (2002) 1824– 1832.
- [13] Millward A. A., Piwowar J. M., Howarth P. J., Time Series Analysis of Medium Resolution, Multisensor Satellite Data for Identifying Landscape Change, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 72 (2006) 653– 663.
- [14] Verbesselt J., Hyndman R., Newnham G., Culvenor D., Detecting Trend and Seasonal Changes in Satellite Image Time Series, Remote Sensing of Environment, 114, 106– 115, 2009.
- [15] Johnson L., Cooke B., Ramos V. H., Easson G., Use of NASA Satellite Assets for Predicting Wildfire Potential for Forest

- Environments in Guatemala, In, Preliminary Report: University of Mississippi Geoinformatics Center, 2008.
- [16] Lu H., Raupach M. R., McVicar T. R., Decomposition of Vegetation Cover into Woody and Herbaceous Components Using AVHRR NDVI Time Series, In, Technical Report, 35/01, Canberra (Australia): CSIRO Land and Water, 2001.
- [17] Cleveland W. S., Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots, *Journal of the American Statistical Association*, 74, 1979.
- [18] Cleveland W. S., Delvin S.J., Locally Weighted Regression: An Approach to Regression Analysis by Local Fitting, *Journal of the American Statistical Association*, 83 (1988) 596– 610.