



Caractérisation du couvert nuageux en Afrique équatoriale à l'aide des données MODIS.

PAVANI Florian,

Département des sciences de la Terre de LYON

Tutrice : PHILIPPON Nathalie,

UMR Biogéosciences, Dijon

Abstract

Les forêts tropicales humides correspondent à des zones clefs dans de multiples domaines dont celui de l'absorption du dioxyde de carbone. La zone étudiée ici en Afrique Centrale est couverte par l'une des trois forêts tropicales humide de notre planète. Elle correspond à celle dont on connaît le moins la sensibilité face au climat. Les changements climatiques actuels vont entraîner le changement d'un certain nombre de facteurs vitaux pour ce type d'environnement tels que la température, les précipitations, la nébulosité, etc. La compréhension de ces systèmes actuels est donc une nécessité pour pouvoir prédire au mieux leur réaction face à ces changements. Cette étude s'appuiera sur un ensemble de données satellites afin de caractériser la nébulosité sur l'Afrique Centrale. Elle permettra de comprendre les cycles saisonniers de la couverture nuageuse ainsi que les liens entre celle-ci et les températures de surface de la mer. Nous verrons aussi dans cette étude le rôle des différents nuages en fonction du taux de luminosité qu'ils laissent diffuser et en fonction des niveaux de couverture nuageuse plus ou moins élevés auxquels ils appartiennent.

Introduction

Cette étude vise à étudier la nébulosité en Afrique Centrale sur la période avril 2000/décembre 2012. La zone principale qu'on se propose d'étudier couvre 30 millions d'hectares soit de 0° à 5° Nord et de 13° à 19° Est. Elle recoupe plusieurs états : le Cameroun, La République centrafricaine, le Gabon et la République du Congo. Le climat est de type tropical humide avec une moyenne annuelle de précipitation de 1400-1700mm. La végétation est considérée comme une végétation « sèche » de forêt tropicale humide (*Gond et al., 2013*). L'un des objectifs majeurs de cette étude est de caractériser : 1) les cycles saisonniers de la couverture nuageuse 2) la typologie des nuages qui la compose et 3) sa variabilité

interannuelle et les liens avec les températures de surface de la mer. Les phénomènes atmosphériques pouvant être de dimension supérieure à celle de la région, on s'intéressera dans certains cas à une zone de plus grande dimension allant de -10° à 10° de latitude et de -15° à 30° de longitude.

Un second objectif sera d'évaluer l'adéquation des cycles saisonniers de nébulosité, de précipitations et d'activité photosynthétique de la végétation.

Données et Méthodes

Cette étude se base sur l'utilisation de données satellites. Le système MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) est un système

d'observation de la Terre. Il est composé d'un radiomètre à très haute résolution, d'une sonde à haute résolution d'infrarouge, d'un scanner couleur des zones côtières, etc... (King *et al.*, 2003).

Grâce à ce système, plusieurs informations atmosphériques peuvent être tirées. L'une des plus importante pour cette étude est la couverture nuageuse (CFC : Cloud Fraction Cover). Elle indique la présence ou l'absence de nuages sur le pixel. Elle est déterminée par un masque de nuages (MOD35). C'est un algorithme qui classifie chaque pixel comme *nuageux*, *probablement nuageux*, *probablement claire*, *claire* (King *et al.*, 2003). Une fois les pixels déterminés comme plus ou moins nuageux, certains algorithmes peuvent être employés pour obtenir des informations complémentaires. L'algorithme de produit des nuages (MOD06) combine des techniques dans les domaines des ondes infrarouges et des ondes visibles pour déterminer les propriétés physiques, microphysiques et radiatives des nuages (King *et al.*, 2003). Ces propriétés vont notamment servir à déterminer l'épaisseur optique et la pression au sommet des nuages. L'épaisseur optique des nuages dérive de l'utilisation de plusieurs bandes dans les domaines visibles et infrarouges. La pression au sommet des nuages dérive, elle, de l'utilisation du domaine infrarouge et des bandes d'absorption des ondes longues du CO₂. Une classification des types de nuages peut alors être établie à partir de ces deux produits. La classification utilisée dans cette étude provient de la classification modifiée des nuages de l'International Satellite Cloud Cover Project.

MODIS étant embarqué sur un satellite polaire, une seule image par jour est obtenue pour la zone (prise entre 9h et 11h). En moyennant toutes les images d'un mois, on obtient une image par mois pour l'ensemble de la période étudiée. Après avoir été analysées, retravaillées et dégradées, ces images ont une résolution de 1° latitude-longitude.

Les données d'activité photosynthétique de la végétation proviennent également du capteur

MODIS. C'est le cas de l'indice de la végétation EVI (Enhanced Vegetation Index) qui est produit à 500m de résolution spatiale et 16 jours de résolution temporelle. Les indices de végétations correspondent à des transformations spectrales de plusieurs bandes destinées à renforcer la contribution des propriétés de la végétation. Les données EVI répondent principalement aux variations structurales de la canopée ce qui inclut l'indice de surface foliaire, le type et l'architecture de la canopée et la physiologie des plantes (Huete *et al.*, 2002). Cet indice a été développé pour optimiser les signaux de végétations dans les régions à forte biomasse. C'est la raison pour laquelle il est utilisé dans cette étude de la forêt tropicale humide d'Afrique Centrale. Les données EVI dont nous disposons pour cette étude nous ont été fournies par Valéry Gond du CIRAD. Elles ne correspondent qu'à la zone de la sous-région. Ces données ont été classées en deux catégories : les couverts forestiers et les couverts non forestiers (Gond *et al.*, 2013). Un travail d'élaboration des cycles saisonniers de chaque classe de couvert végétal a été réalisé et des moyennes ont été calculées pour chacune des deux catégories.

Les données de précipitations proviennent de la base de données pluviométrique du Centre de Recherche de Climatologie. Elles correspondent à une compilation de données mensuelles stationnelles sur la période 1950-2000 pour l'Afrique. On dénombre huit stations au sein de la petite région. Le cycle saisonnier des précipitations a été réalisé à partir des données de ces stations sur la période 1960-2000. Etant donné que les données s'arrêtent avant notre période, le cycle saisonnier a été déterminé à partir d'une base de temps importante pour pouvoir montrer un cycle saisonnier moyen tout en évitant d'être marqué par événement important (année avec de fortes précipitations ou sécheresse).

Pour cette étude, plusieurs méthodes statistiques ont été employées. La classification hiérarchique ascendante (CHA) a été utilisée afin d'obtenir une zonation de la grande région

selon les cycles saisonniers de précipitations ou de CFC en regroupant les pixels ou les stations qui présentent les mêmes cycles saisonniers.

C'est une méthode de classification automatique qui permet de regrouper un ensemble d'individus en plusieurs classes qui seront composées d'éléments portant une information identique. Cette méthode part d'une situation où tous les individus sont seuls dans une classe, puis sont rassemblés en classes de plus en plus grandes jusqu'à obtenir un nombre de classes satisfaisant. Ce nombre est choisi en fonction des arbres de classification et des cartes obtenues après plusieurs tests.

Nous avons utilisé l'analyse en composantes principales afin d'extraire des modes de variabilité de la CFC sur l'ensemble des années étudiées. Cette méthode consiste à transformer des variables corrélées entre elles en variables décorréliées. Ces dernières sont dites composantes principales. Celles-ci nous donnent les axes principaux expliquant au mieux la dispersion des points. Enfin, pour déterminer l'intensité de la relation statistique linéaire entre deux variables et notamment entre cycles saisonniers moyens de CFC, EVI et de précipitations, nous avons employé des corrélations.

Résultats

1- Cycles saisonniers moyens de couverture nuageuse, d'activité photosynthétique et de précipitations.

La figure 1 présente la couverture nuageuse (Cloud Fraction Cover) mensuelle moyenne. On observe que la densité de couverture n'est pas la même selon les mois. Nous pouvons ainsi localiser la nébulosité élevée associée à la mousson Ouest Africaine de juin à septembre au Nord-ouest de notre carte. Nous observons également que le maximum de couverture nuageuse se trouve le long de la côte est du Golfe de Guinée, quel que soit le mois. Nous remarquons aussi des différences de couverture selon les mois dans

la sous-région. La couverture nuageuse croît avec la mousson, ce qui se traduit par une augmentation de la CFC entre juin et septembre.

A partir de ces cartes, la réalisation d'une CHA semble appropriée pour savoir quels pixels possèdent les mêmes cycles saisonniers de CFC.

La figure 2a nous montre la carte de la répartition spatiale des différentes classes de CFC. On peut voir que la sous-région est divisée en trois classes.

Les cycles saisonniers associés à ces classes sont représentés dans la seconde partie de la figure. Avant de s'intéresser aux différentes classes composant la sous-région, nous pouvons déjà observer que celle-ci est composée de classes ayant une nébulosité importante tout au long de l'année avec des minima aux alentours de 40% de couverture et des maxima atteignant les 90%. Si l'on s'intéresse maintenant à chaque classe individuellement, la classe 1 (au Nord) a un cycle saisonnier en adéquation avec la mousson Ouest-Africaine. Un pic de forte nébulosité est donc retrouvé en août. Sur la classe 2 (à l'Est), on observe deux pics de nébulosité, l'un en avril, l'autre en octobre. Enfin, la classe 5 (à l'Ouest) a un cycle saisonnier qui varie peut au cours de l'année. C'est aussi la classe qui présente le plus fort taux de nébulosité tout au long de l'année avec une couverture de 80% en moyenne. Elle contient aussi un pic de nébulosité vers la période de septembre octobre.

Pour notre étude, nous avons moyenné l'ensemble des cycles saisonniers des différentes classes composant la sous-région pour obtenir un seul cycle, marqueur de la sous-région. Celui-ci est représenté avec son écart-type en figure 3a. Les mois ayant les plus forts écart-types sont situés entre octobre et février. Ce sont ceux où la nébulosité est susceptible de varier intensément d'une année à l'autre. A l'inverse, les mois ayant les écart-types les plus faibles sont situés entre mars et septembre. Sur ce même graphique, les cycles saisonniers d'EVI pour les classes forestières (rouge,

moyenne de 12 classes) et non forestières (cyan, moyenne de 13 classes) sont représentés. On peut voir que les pics d'EVI, c'est-à-dire les maxima d'activité photosynthétique, sont plus ou moins synchrones avec les pics de couverture nuageuse. La valeur de corrélation entre ces deux cycles est de 0,634 pour les classes forestières.

Les cycles saisonniers des classes non forestières suivent davantage celui du régime de précipitation (figure 3c) car elles sont composées de savane (essentiellement herbeuse) plus sensible aux variations de quantité d'eau que les classes composées d'arbres. Nous observons donc un pic en mai et un creux en juillet. Pourtant, le second pic ne se trouve pas en octobre mais en septembre. Ceci peut être expliqué par le fait que les couverts non forestiers sont répartis sous forme de patchs sur la zone et sont parfois très distants. Le fait de moyenner des régions très localisées et distantes à la fois peut donner des résultats peu significatifs car le régime de précipitations peut changer entre ces différentes localités. Nous nous attacherons donc plutôt aux couverts de types forestiers.

Les minima d'activité photosynthétique du couvert forestier sont situés entre décembre et janvier (hiver) et en juillet (faibles précipitations). C'est l'arrivée de la saison humide vers février qui fait augmenter le nombre de feuilles et donc, le signal EVI.

En comparant les cycles saisonniers précédents, nous pointons l'existence de quatre saisons, dont deux saisons sèches en décembre/janvier/février (DJF) et en juin/juillet/août (JJA). Elles sont caractérisées par de faibles précipitations, une faible couverture nuageuse ainsi qu'une faible activité photosynthétique. Inversement, on retrouve deux saisons humides en mars/avril/mai (MAM) et septembre/octobre/novembre (SON). Or, si on observe les pics du signal EVI, celui aux valeurs les plus élevées correspond à celui associé aux plus faibles valeurs de précipitations et de CFC. Cela montre que dans cette région, la disponibilité

lumineuse est un facteur plus limitant que celle en eau. En effet, si l'on augmente à la fois la nébulosité et les précipitations et que le signal EVI diminue, c'est donc que la nébulosité (qui est en lien direct avec la disponibilité lumineuse) a un plus fort impact sur la végétation de cette zone que les précipitations. En comparant les résultats de cette étude avec ceux de Gond *et al.* (2013), nous remarquons que les tendances obtenues en termes de cycles saisonniers sont similaires. Deux saisons sèches en DJF et JJA ainsi que deux saisons humides en MAM et SON sont retrouvées. Ce résultat est intéressant car leurs données CFC sont obtenues à partir de la base de données de l'ISCCP.

2- Typologie nuageuse.

La figure 3b présente les différents types de nuages recensés sur la sous région et leur proportion en fonction des mois, moyennée sur toutes les années. Grâce à cette figure, nous remarquons la prépondérance de deux types de nuage: Middle Clouds Altostratus (MCAs) et High Clouds Cirrostratus (HCCs). Un renversement important de la nébulosité s'effectue entre deux périodes. Entre janvier et avril, ce sont les nuages de type High Clouds qui prédominent (notamment les cirrostratus). Alors qu'entre mai et décembre, la nébulosité est dominée par des nuages plus bas de type Middle Clouds (notamment les altostratus). En faisant le lien avec le cycle saisonnier de la CFC et d'EVI, il semble donc que l'altostratus laisse moins passer la lumière que le cirrostratus. Ainsi, les altostratus correspondent à des niveaux de CFC plus élevés que les cirrostratus. De plus le lien avec le cycle saisonnier des précipitations nous permet d'émettre une autre hypothèse. Les altostratus seraient porteurs de plus de pluie que les cirrostratus.

Les altostratus (figure 5a) sont principalement retrouvés sur l'océan, notamment en période de mousson. Ils sont aussi retrouvés sur le continent sous forme d'une bande allant du Nord-Ouest au Sud-Est. Les cirrostratus (figure 5b) sont quant à eux retrouvés majoritairement

dans la partie sud de la région. Ils ne sont donc pas liés à la mousson. Sur l'ensemble de la région étudiée, un troisième type de nuage est fortement retrouvé, même s'il n'est pas présent dans la sous-région. Il s'agit des Low clouds Stratocumulus (LCSc). Ils sont principalement présents sur le continent dans la partie nord-est de la grande région et sont aussi retrouvés en période de mousson (figure 5c).

3- Variabilité interannuelle de la couverture nuageuse.

Nous avons réalisé en premier lieu une analyse en composantes principales (ACP) sur la CFC pour en extraire les modes de variabilité. Puis, nous avons établi des corrélations entre les températures de surface de la mer (SST) et les composantes principales de l'ACP afin de relier les SST à la CFC. L'objectif est de voir si une modulation de la CFC se met en place lors des années ENSO (El Niño Southern Oscillation) ou lorsque l'on retrouve des anomalies de SST en Atlantique équatoriale.

Les figures 4a et 4b présentent les patrons spatiaux et les chroniques temporelles associées des deux premières composantes principales de l'ACP appliquées sur chaque mois indépendamment.

Certains mois sont très peu homogènes pour ce qui est des patrons spatiaux de corrélations et d'autres le sont beaucoup plus. Les mois avec une variabilité cohérente sur la grande région sont janvier, février et mars. Dans un second temps, les mois d'avril, mai et juin sont aussi intéressants. Pourtant, tout ces mois ne présentent pas forcément de réelles relations avec la SST (que se soit pour la PC1 ou la PC2). Les relations entre PC1 et SST ne montrent du signal dans l'Atlantique que pour le mois de juin. Compte tenu du signe des corrélations entre PC1 et CFC d'une part et entre PC1 et SST d'autre part, il semble que plus la SST est élevée dans la région du courant du Benguela, moins la couverture nuageuse est importante sur notre petite région d'étude.

Discussion

L'un des points les plus discutables de cette étude réside dans les données satellites. En effet, les images proviennent de satellites polaires qui ne prennent qu'une image par jour de la zone étudiée, le matin entre 9h et 11h. La nébulosité pouvant énormément varier lors d'une journée, nous pouvons donc douter de la représentativité des moyennes obtenues par mois. Les cycles diurnes de nébulosité sont mal connus. En étudiant une seule image par jour obtenue le matin, une grande partie de l'information nuageuse est probablement manquée. De plus, la résolution spatiale de ces images reste trop grande pour ce type d'étude. En effet, la résolution d'un degré latitude-longitude pose certains problèmes notamment dans la classification du type de nébulosité. Si l'on prend l'exemple des nuages de type deep convective, ceux-ci sont des nuages très localisés et n'atteignent généralement pas ces ordres de grandeurs. De ce point, de l'information est ici encore manquée.

Un autre point remarquable est que si nous nous intéressons aux minima de couverture nuageuse, nous pouvons en observer deux, l'un en mai et l'autre en décembre/janvier. Pourtant, lorsque l'on regarde le cycle saisonnier des précipitations, le mois de mai correspond à un mois de fortes précipitations ; ce qui ne coïnciderait pas avec le minima de couverture nuageuse. Il faudrait là encore pouvoir disposer des cycles diurnes de nébulosité et de précipitations car il pourrait y avoir création de convection durant certaines parties de la journée et laisser un ciel clair le reste du temps. Par exemple, Knippertz *et al.* (2011) ont montré la présence de nuages bas entre 21h et 9h en juillet au nord du Golfe de Guinée, qui sont associés à très peu de précipitations. Il serait donc nécessaire d'employer des données issues de satellites géostationnaires prenant plusieurs images par jour avec une résolution bien plus fine (de l'ordre du kilomètre) pour documenter des cycles diurnes.

Les données de SST peuvent elles aussi être biaisées. Ces données sont récoltées par mesure directe par bateaux, mais aussi par satellites. Or, en cas de couverture nuageuse, les données satellites des SST sont en partie faussées. Pour palier à ce problème, il serait préférable de ne se servir que de données récoltées en mer. Malheureusement, ces données sont ponctuelles dans l'espace et sont donc couplées aux données satellites.

Il serait aussi intéressant de disposer de l'information interannuelle pour les données EVI. En effet, nous ne disposons ici que du cycle saisonnier. Cette information supplémentaire nous permettrait par exemple de réaliser un travail similaire à celui réalisé sur la nébulosité et les SST. Une ACP sur les données EVI permettrait de voir quelles sont les années (ou mois) avec une activité photosynthétique plus ou moins élevée puis ensuite relier ceci avec les années (ou mois) qui présente plus ou moins de CFC.

C'est pourquoi, dans le cadre du projet VEGREENE accepté récemment, ces problèmes seront pris en compte afin de réaliser un travail plus précis. En effet, ce projet consiste à étudier des données issues de satellites géostationnaires prenant des images toutes les quinze minutes à une résolution spatiale d'un kilomètre.

Conclusion

L'étude de la CFC en Afrique Centrale à permis de mieux caractériser ses cycles saisonnier et sa variabilité interannuelle. Cela nous a permis de mieux comprendre son évolution saisonnière et le rôle que joue chaque type de nuages sur celle-ci. Sur la sous-région, on dénombre donc deux pics de CFC, l'un en mars/avril/mai (MAM), l'autre en septembre/octobre/novembre (SON). Le pic de MAM est associé au pic principal pic d'EVI ainsi qu'au pic minimal de précipitations. La nébulosité qui lui est retrouvé lors de cette période correspond aux High Clouds, soit, aux

cirrostratus. Pour la période de SON, c'est le pic minimal d'EVI qui est associé au pic principal de précipitations. Ce sont les nuages de type Middle Clouds (altostratus) qui prédominent. Ces informations nous ont permis d'émettre certaines hypothèses, à savoir que les cirrostratus correspondrait à des nuages qui laisserait passer plus de lumière et serait porteur de moins de pluies que les altostratus.

Cette étude montre aussi certaines relations entre les températures de surface du Golfe de Guinée et la CFC sur la sous-région, bien que ces relations soient très variables en fonction des mois.

Les résultats obtenus lors de cette étude suggèrent qu'il faut travailler d'autres données. L'utilisation de satellites géostationnaires pourrait rendre les données de CFC plus précises, et donc des résultats plus fiables.

Références

- Gond V. et al.*, 2013. Climatic control on vegetation structure and functioning in Central Africa: new insights from MODIS multi-temporal data. Philosophical Transactions of the Royal Society. Accepté.
- Huete A. et al.*, 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sensing of Environment 83.
- King M.D. et al.*, 2003. Cloud and aerosol properties, precipitable water, and profiles of temperature and water vapor from MODIS. transactions on geoscience and remote sensing, vol. 41, no. 2
- Knippertz P. et al.*, 2011. Ultra-low clouds over the southern West African monsoon region. Geophysical research letters, vol. 38.
- Michelangeli P-A. et al.*, 1995. Weather regimes : Recurrence and quasi stationarity. Journal of atmospheric sciences, vol 52, no 8.
- Rossov W.B. & Schiffer R.A.* 1991. ISCCP Cloud Data Products. Bulletin American Meteorological Society, vol.72, no 1.
- Zhang X. et al.*, 2002. Monitoring vegetation phenology using MODIS. Remote Sensing of Environment 84, p 471-475.

Annexes

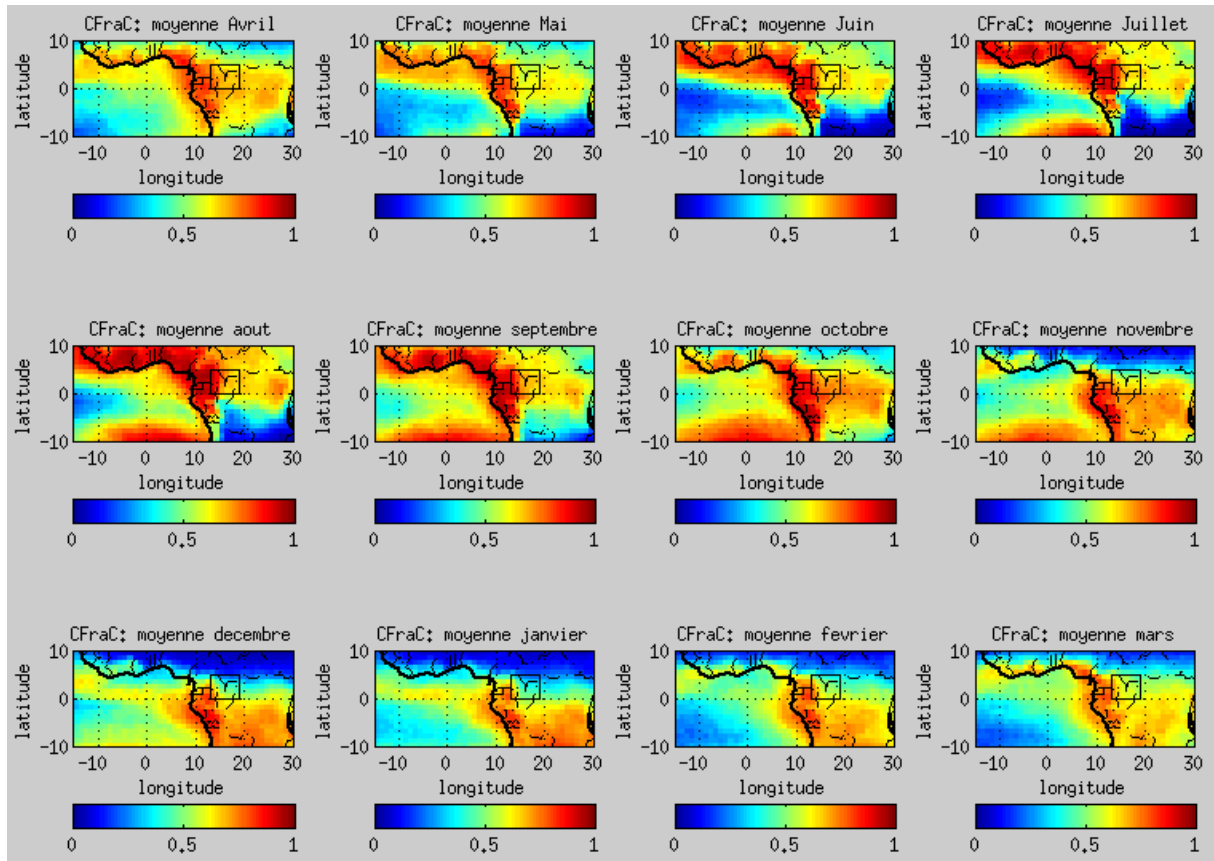


Figure 1: Répartition de la couverture nuageuse en fonction des mois; les teintes rouges montrent une couverture nuageuse maximale et inversement pour les teintes bleues. Le carré noir délimite la petite région d'Afrique Centrale qui nous intéresse plus particulièrement.

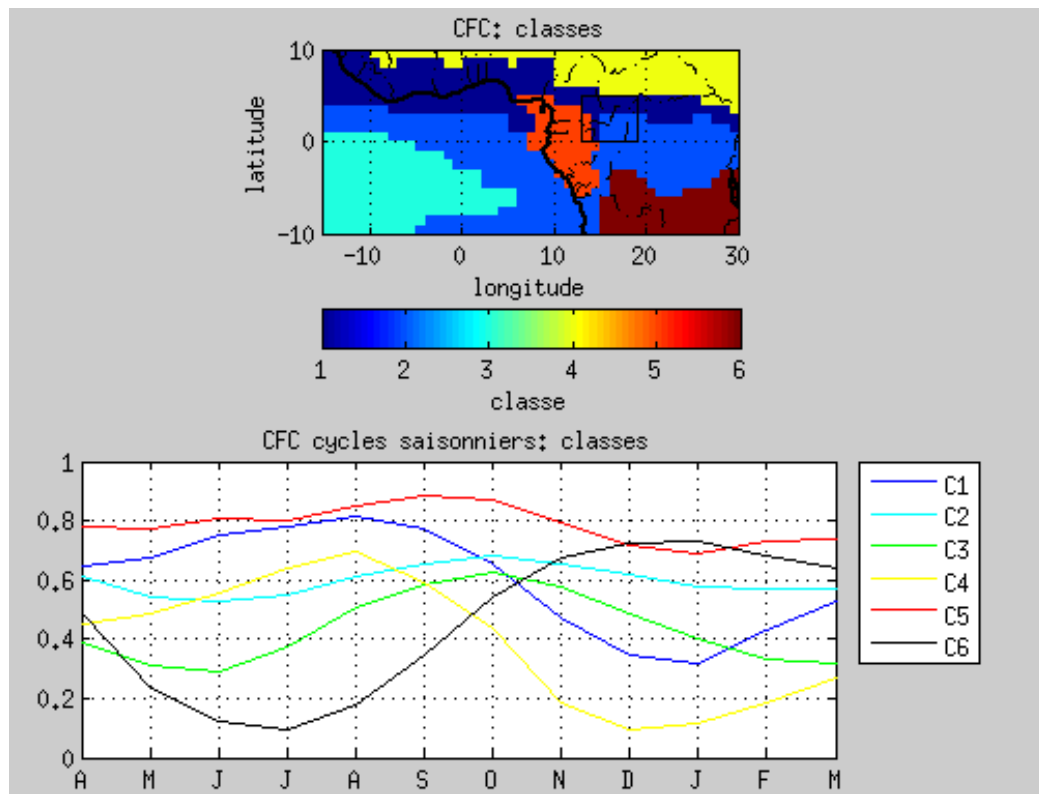


Figure 2 : Classification en 6 classes de CFC ; 2a (haut) : répartition spatiale des 6 classes, 2b (bas) : cycle saisonnier de chacune des 6 classes.

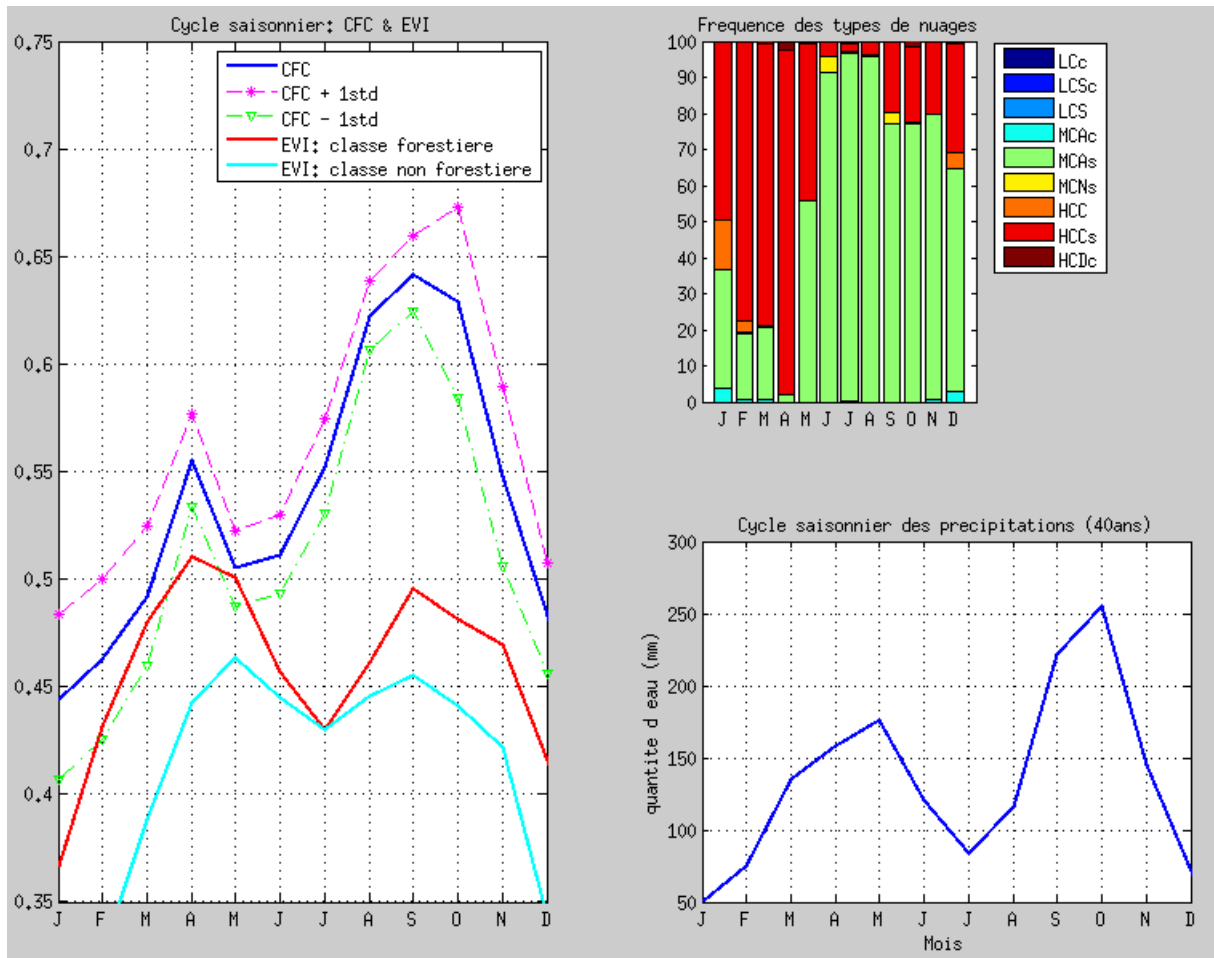


Figure 3, pour la petite région d'Afrique Centrale : a : cycles saisonniers de CFC et EVI, b : fréquence des types de nuages, c : cycle saisonnier des précipitations.

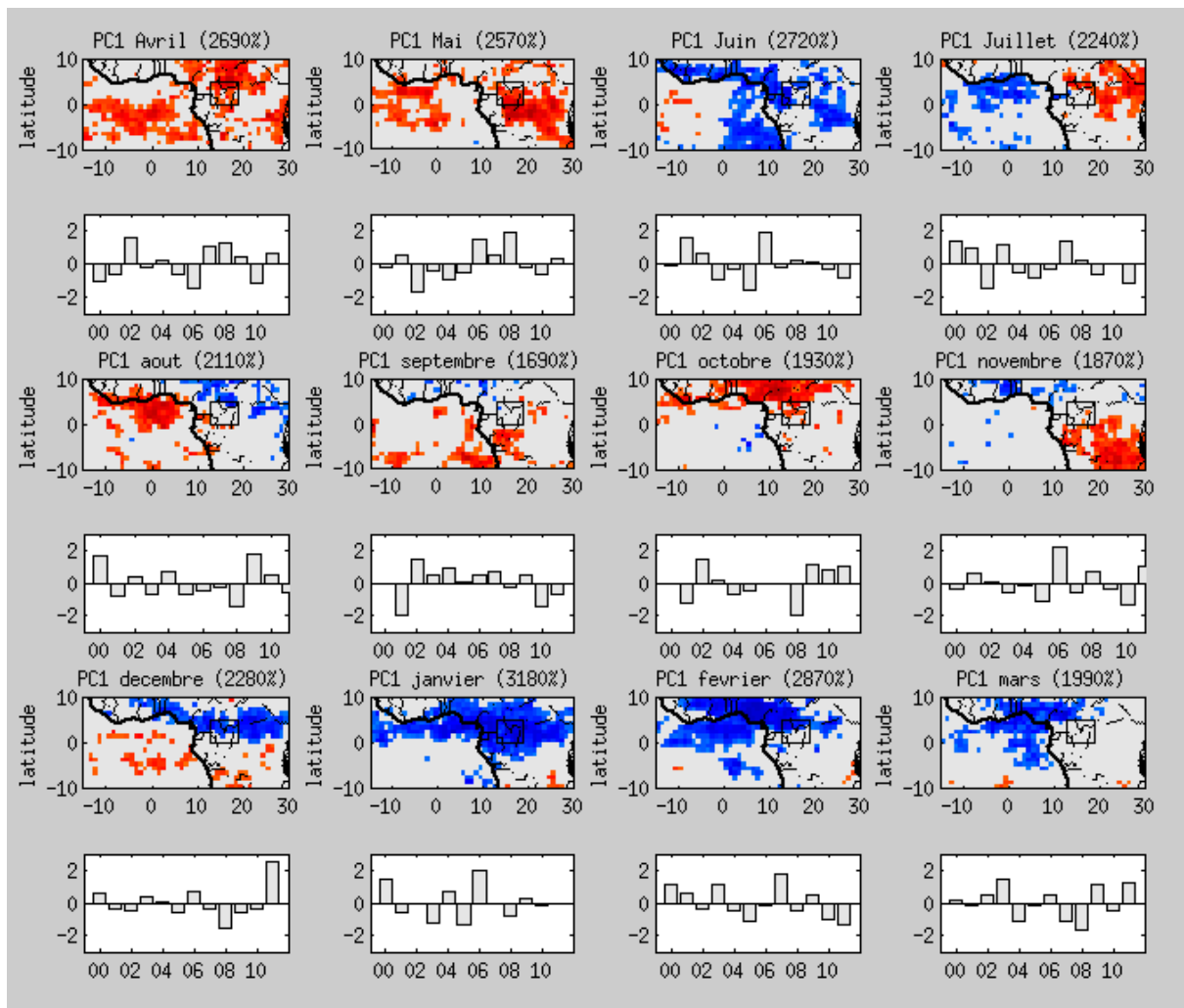


Figure 4a : Pattern spatiaux de la PC1 ; En rouge sont représentées les corrélations positives et en bleu les corrélations négatives. Seules les corrélations significatives sont montrées. Entre parenthèse est donné le pourcentage de variance expliqué. Les graphiques sous les cartes représentent les chroniques temporelles associées (exprimées en anomalies standardisées) montrant si le mois en question a connu une couverture nuageuse plus ou moins importante. Seules les corrélations significatives au seuil de 95% sont reportées.

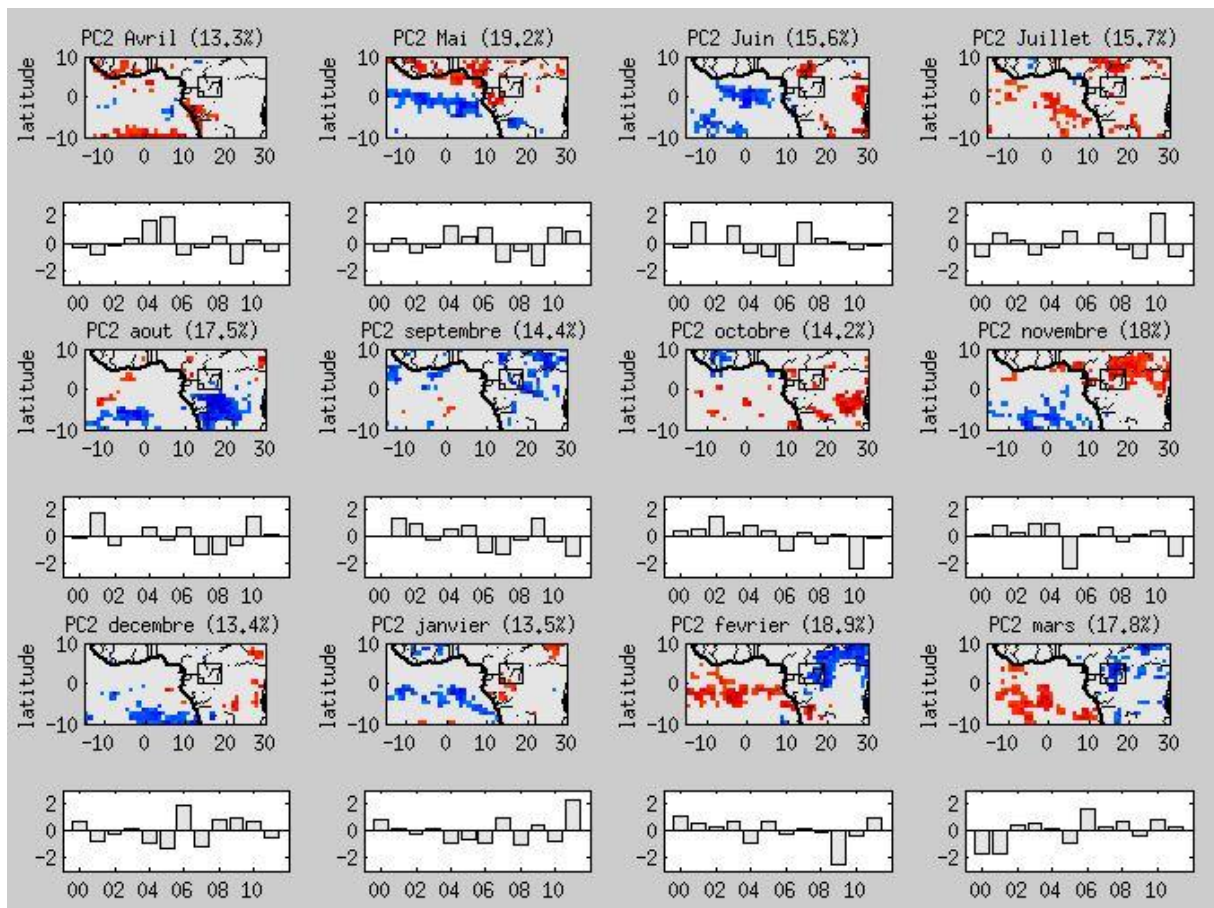


Figure 4b : identique à la figure 4a mais pour la PC2.

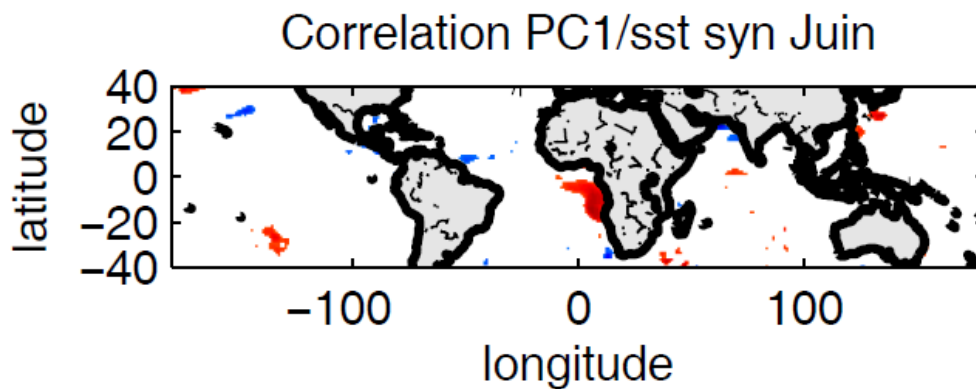


Figure 4c : Corrélation entre la PC1 et les SST pour le mois de juin. Les teintes rouges correspondent aux corrélations positives et les teintes bleues aux corrélations négatives. Seules les corrélations significatives au seuil de 95% sont reportées.

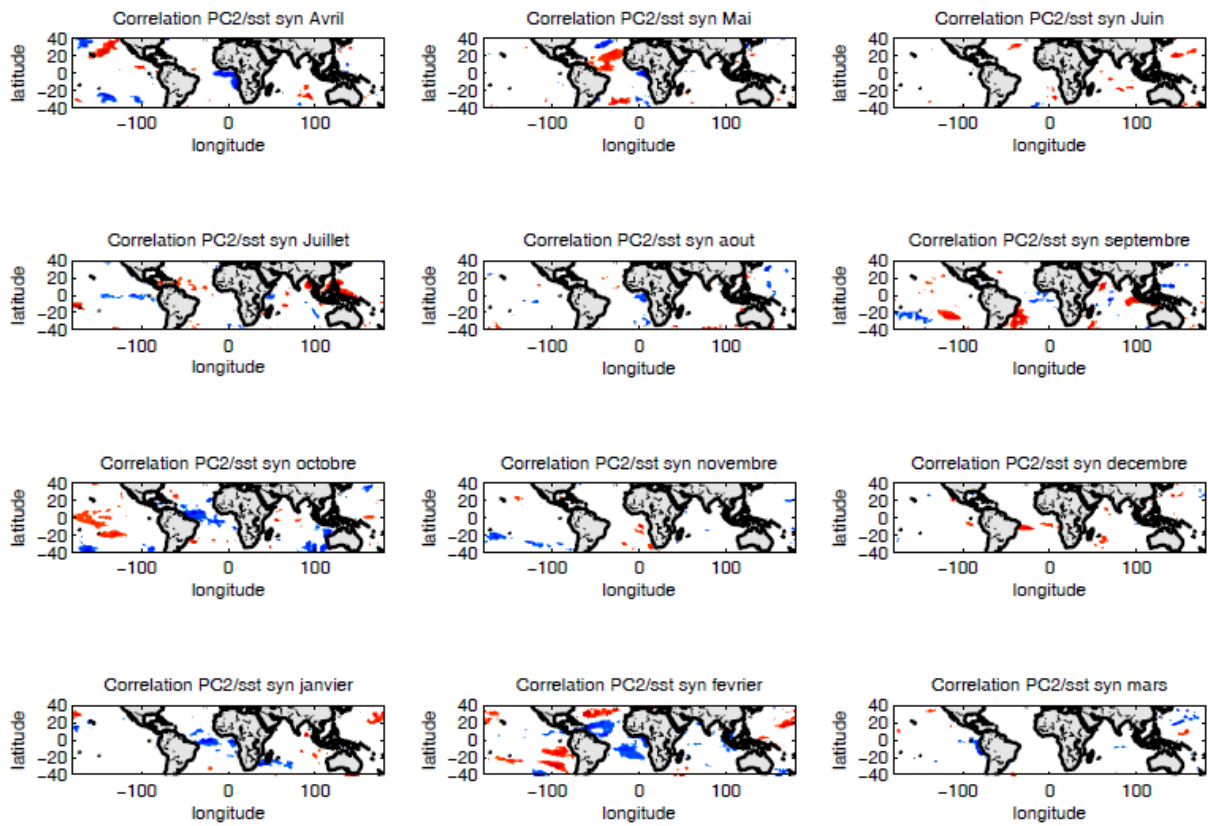


Figure 4d : Identique à la figure 4c mais pour la PC2.

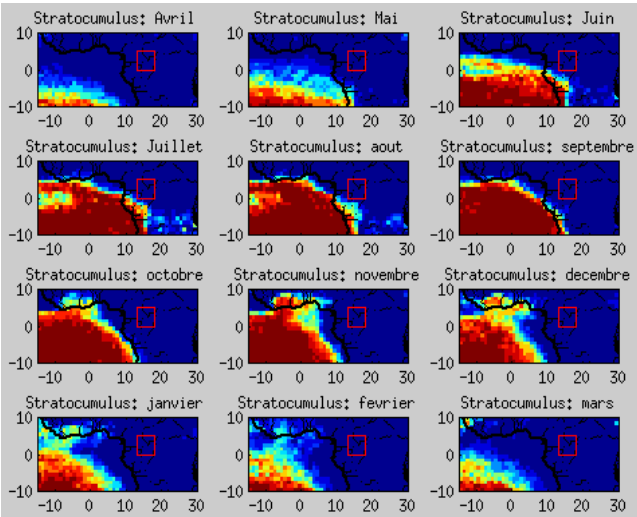
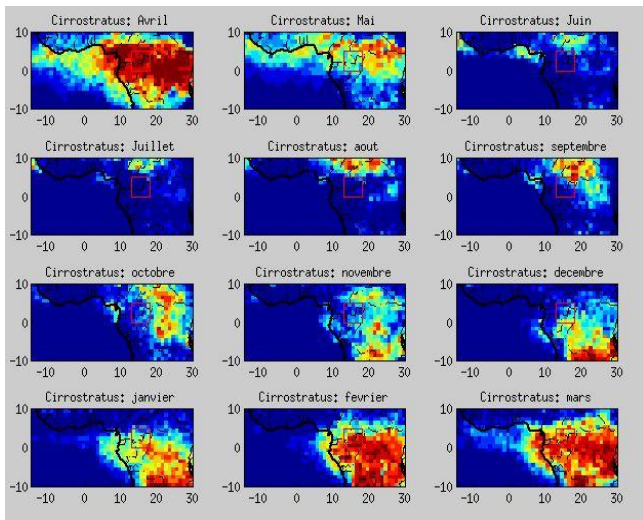
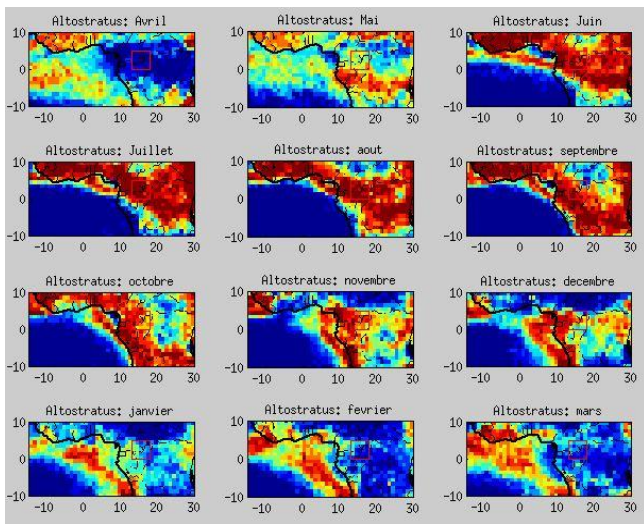


Figure 5 : Fréquence des différents types de nuages en fonction du nombre d'année où ils sont retrouvés ; (a) altostratus (b) cirrostratus (c) stratocumulus

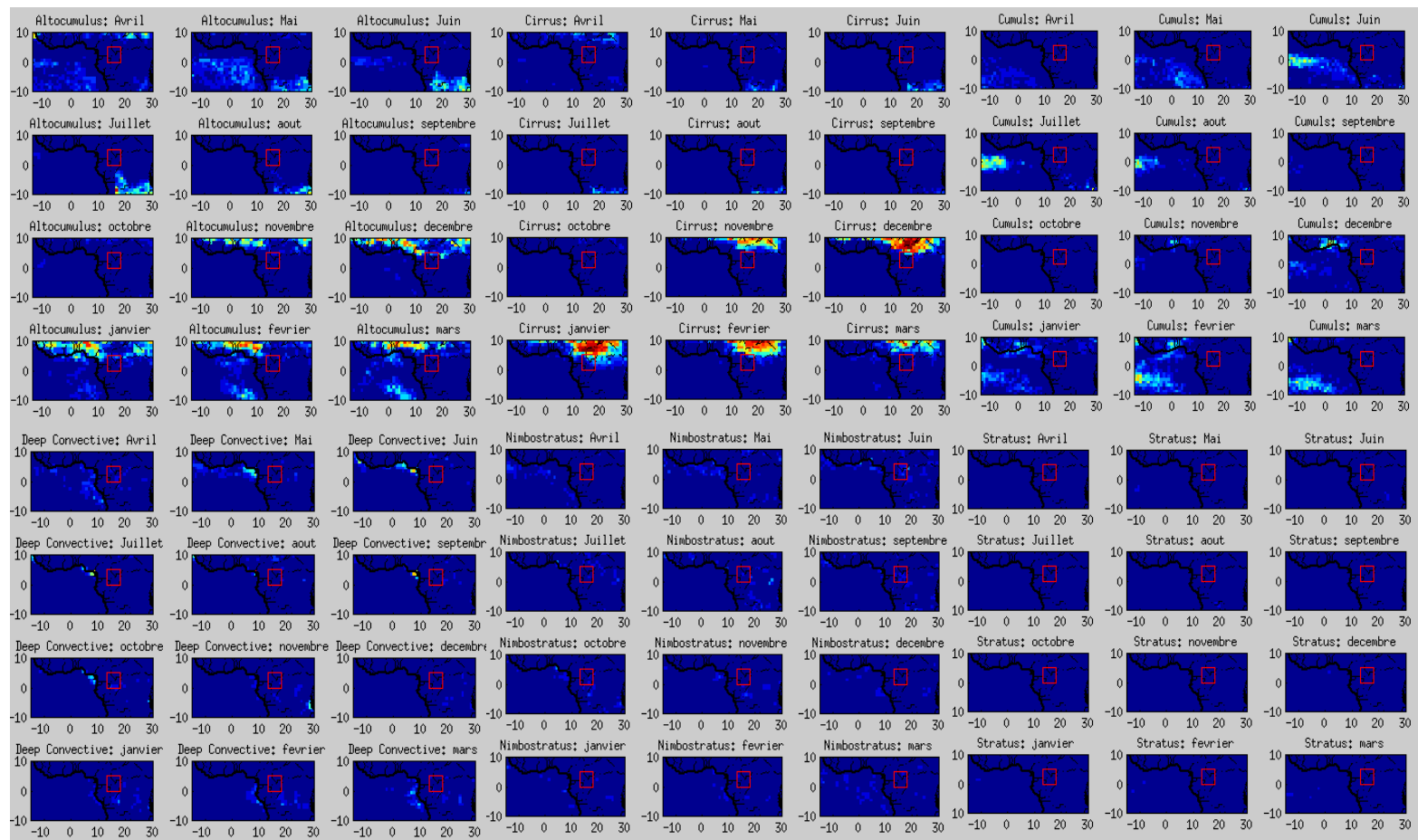


Figure 5 (d) Altocumulus (e) Cirrus (f) Cumulus (g) Altocumulus (h) Nimbostratus (i) Stratus.