

Table des matières

1	Contexte du projet	3
1.1	Le modèle couplé de l'IPSL	3
1.1.1	Informations techniques	3
1.1.2	Les données utilisées	4
1.1.3	Le cycle du carbone	4
1.2	L'analyse par clusters	5
1.2.1	Idée de départ	5
1.2.2	La méthode des nuées dynamiques	5
1.3	Intérêt de la méthode	6
2	Première étude de l'hémisphère Sud	6
2.1	Scénario LF7	6
2.2	Scénario LF8	7
2.3	Combinaison des scénarios	8
3	Nouvelles expériences et données d'observations	8
3.1	Les réanalyses NCEP	8
3.2	L'expérience CLIMATO	9
3.3	L'expérience GISST	9
4	Conclusion et perspectives	10
	Bibliographie	21

Résumé

Ce projet contribue à l'étude de la variabilité climatique basse-fréquence dans l'Hémisphère Sud (de l'intra-saisonnier à l'inter-annuel). Le climat a été simulé à l'aide du modèle couplé océan-atmosphère-glace de l'Institut Pierre Simon Laplace.

Dans une première partie, on présente le contexte du projet ainsi que les outils statistiques utilisés au cours de l'analyse. On décrit dans le chapitre qui suit l'évolution du modèle pour deux simulations : une première simulation de référence, équilibrée d'un point de vue énergétique et correspondant à des émissions anthropiques nulles, qui servira pour l'étude de la variabilité climatique, et une deuxième simulation, dans laquelle les émissions de gaz carbonique anthropiques suivent un scénario réaliste (IPCC SRES98). Enfin le troisième chapitre traite des informations apportées par un nouveau modèle ainsi que par des données d'observations réanalysées. Les résultats permettront d'étudier la sensibilité de l'outil statistique aux différents paramètres.

Ce projet a été réalisé dans le cadre du Projet Personnel en Laboratoire (PPL), stage de fin de deuxième année à l'ENSTA¹, sous la tutelle de M. Laurent Li et avec l'aimable soutien de Sébastien Conil (thèse).

¹Ecole Nationale Supérieure de Techniques Avancées, 32, bd Victor, 75015 Paris.
[http ://www.ensta.fr](http://www.ensta.fr)

1 Contexte du projet

Ce projet s'intègre dans le cadre d'une coopération entre la France et l'Argentine. En février 2000, le Comité d'Évaluation et d'Orientation de la Coopération Scientifique (ECOS) donne son feu vert pour un projet qui durera trois ans, et dont le sujet est la modélisation des changements climatiques régionaux sur l'Amérique du Sud associés à un changement global.

Cette coopération met en relation :

- en France : le laboratoire de météorologie dynamique du CNRS (Paris)
- en Argentine : le CIMA, Centro de Investigación para el Mar y la Atmosfera (Buenos Aires)

1.1 Le modèle couplé de l'IPSL

Le LMD utilise différents modèles, faisant intervenir différents paramètres. Celui qui nous concerne est le modèle IPSL-CMC2. Il s'agit d'un modèle couplé global atmosphère-glace-océan avec cycle du carbone. Il est composé du modèle de circulation générale atmosphérique LMD-5.3 et du modèle de circulation générale océanique OPA7, ces deux modèles étant interfacés via le coupleur OASIS développé au CERFACS (Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique).

Ce modèle a pu être comparé à des données satellitaires. Une faible dérive globale a été constatée : les régions tropicales sont un peu froides (-1 à -2 K) tandis que les hautes latitudes sont un peu chaudes (+2 à +4 K).

1.1.1 Informations techniques

Le modèle utilise la méthode des différences finies sur une grille tridimensionnelle uniforme recouvrant toute la surface du globe. La résolution est de 72 points en latitude et de 96 points en longitude. Une version du modèle en résolution faible est aussi disponible avec une grille de taille 50x64. Nous avons utilisé cette version pour des raisons de temps de calculs. La résolution verticale est relativement faible : seulement 15 niveaux répartis du sol jusqu'à une altitude de 3hPa.

Les équations de la dynamique des fluides sont exprimées en fonction des composantes du vent, du potentiel enthalpique, de l'humidité, et de la pression de surface. Le schéma d'advection est conçu pour conserver l'entropie de l'ensemble. L'énergie totale est aussi conservée. Les équations thermodynamiques sont écrites sous forme de flux, de conservation de la masse, et d'intégrales de la température, ainsi que de son carré. L'évolution de la vapeur d'eau est aussi exprimée sous forme de flux.

Le système ainsi constitué prend en considération un grand nombre de paramètres tels que le flux solaire, la température et la précipitation pour la biosphère, les flux de surface, les champs tridimensionnels de température, salinité, vitesse et diffusion verticale pour le modèle

de biogéochimie océanique. La concentration de l'atmosphère en CO_2 est uniforme sur le globe et évolue une fois par an.

1.1.2 Les données utilisées

Dans un premier temps, nous avons utilisé les simulations du modèle IPSL-CMC2 décrit précédemment. L'étude de ces données est décrite dans le chapitre 2.

- LF7 : simulation de contrôle de 241 ans (1860 à 2100)
couplage océan/glace/atmosphère/carbone pleinement interactif. Les émissions de carbone dues aux activités anthropogéniques sont nulles.
- LF8 : simulation "scénario", même type que LF7 sur la même période. Les émissions anthropogéniques prises en compte sont décrites dans le paragraphe suivant.

La séquence de calcul du modèle IPSL-CMC2 est décrite sur le schéma de la figure 1. Dans un deuxième temps, nous nous sommes intéressés au modèle de circulation générale LMDZ3.3. Les deux expériences concernées s'appellent CLIMATO et GISST. Leur étude fait l'objet du chapitre 3.

- GISST : SST (température de surface de la mer). 17 simulations de 45 ans chacune, forcées par les mêmes SST observées. Période : 1950-1994
- CLIMATO : une seule simulation de 150 ans forcées par les SST climatologiques (cycle saisonnier moyen).

Enfin, nous avons utilisé NCEP, un jeu de données issu de réanalyses d'observations (satellites, bouées, ballons...). En fait, l'hémisphère sud a fait l'objet de peu d'observations, et les données de NCEP dans la zone hémisphère sud ont été obtenues essentiellement à partir d'un modèle américain ([2]). La période d'analyse se situe sur 1948-1998, soit 51 années. La résolution horizontale est de 2,5 degrés de longitude et de 2,5 degrés de latitude.

1.1.3 Le cycle du carbone

Souhaitant se concentrer sur l'étude du couplage entre le climat et le cycle du carbone, les équipes de l'IPSL n'ont pris en compte que le dioxyde de carbone comme gaz à effet de serre. En ce qui concerne les sources de CO_2 anthropique, ont été prises en compte les émissions liées à la combustion de l'énergie fossile ainsi que celles liées à une modification de l'utilisation des sols. Par contre plusieurs phénomènes potentiellement importants n'ont pas été considérés vu leurs très fortes incertitudes : modification de la répartition géographique des différents types de végétations (due à l'homme ou à la migration des espèces), effet de fertilisation biosphérique additionnel dû à d'autres composants que le CO_2 (figure 2).

1.2 L'analyse par clusters

1.2.1 Idée de départ

L'analyse par clusters, née en 1939 avec Tryon, regroupe différents algorithmes de classification. Elle répond à une question assez générale rencontrée dans le milieu scientifique : comment classer un grand nombre de données de manière significative ? Par exemple, les biologistes doivent organiser les différentes espèces animales avant de pouvoir donner une description des différences possibles entre espèces. L'étude du climat nous amène à un problème équivalent : après avoir fait de longues simulations qui ont fourni de nombreuses cartes, il s'agit de pouvoir classer ces cartes en catégories (ou clusters).

L'approche du laboratoire est dite par régimes de temps. Si on considère un espace de phases dans lequel on peut représenter un champ atmosphérique par un point, il s'agit d'étudier la distribution de ces points dans l'espace des phases (regroupements...) et ainsi, d'en déduire des régimes de temps. Le fait que les variables atmosphériques basse-fréquence aient des régions privilégiées de leur espace des phases a été mis en évidence par Hansen et Sutera ([1]). La méthode des clusters est donc toute désignée pour fournir, à partir des données simulées, les différents régimes de temps de la zone étudiée.

1.2.2 La méthode des nuées dynamiques

L'algorithme de partition utilisé correspond à la méthode des nuées dynamiques. Elle a longtemps été utilisée en météorologie pour classer des images satellitaires de nuages. Etant donné un nombre k de clusters C_1, C_2, \dots, C_k , le but de l'algorithme est de trouver une partition P des données qui minimise la variance totale W à l'intérieur des clusters :

$$W(P) = \sum_{j=1}^k \sum_{x \in C_j} d^2(x, y_j)$$

où y_j est le centre du cluster C_j , et d la distance euclidienne. L'algorithme, partant d'une position aléatoire, fabrique une partition de manière itérative, convergeant alors vers un minimum de W .

Il s'agit ensuite de définir un indice de classifiabilité. L'algorithme des nuées dynamiques est appliqué 50 fois avec des données initiales aléatoires, fournissant ainsi 50 partitions $P_m(k)$. L'index de classifiabilité est alors obtenu en sommant la covariance entre ces partitions :

$$c^*(k) = \frac{1}{50(50-1)} \sum_{1 \leq m \neq m' \leq 50} c(P_m(k), P_{m'}(k))$$

L'index de classifiabilité est calculé pour k variant de 2 à 10. Par comparaison, il est ensuite calculé pour un modèle de référence bruité contenant 100 "cartes atmosphériques". Le

meilleur choix de k est alors celui qui correspond à la différence la plus grande entre l'index atmosphérique et celui du modèle bruité.

Le logiciel de statistique utilisé, ANAXV 5.4, a été développé en 1998 par le LMD (Équipe d'Analyse de la Variabilité du Climat).

1.3 Intérêt de la méthode

Bien que le concept soit né dans les années 50 avec Rex ([7]), la notion de régime de temps n'a émergé que récemment. Elle repose sur la supposition que la circulation atmosphérique à grande échelle prend un nombre fini d'états au cours du temps. Bien sûr, l'évolution de l'atmosphère est continue, et la classification est une opération délicate. On distingue d'ailleurs plusieurs notions de régimes de temps, selon que l'on s'intéresse à la récurrence (états qui reviennent le plus souvent), à la persistance (motifs qui ont tendance à rester un certain temps) ou à la quasi-stationnarité (états qui semblent correspondre à un état d'équilibre du système global).

Ce concept de régime de temps s'applique aux écoulements atmosphériques aux moyennes latitudes sur une échelle de temps de 10 à 20 jours. Une autre notion, celle de régime de climat, repose sur ces régimes de temps : elle correspond aux échelles de temps saisonnières et inter-annuelles. L'analyse par cluster permet, comme nous allons le voir, de visualiser les grandes tendances et les anomalies de la circulation atmosphérique.

2 Première étude de l'hémisphère Sud

Les simulations que nous avons utilisées dans cette partie consistent en 2892 champs (une mesure par mois pendant 241 ans) définis en 1024 points de la carte (16 points en latitude, 64 points en longitude). Nous avons gardé les champs correspondant aux mois de juin, juillet et août (JJA). C'est en effet sur cette période que les résultats des analyses sont les plus significatifs.

Notre étude porte sur les anomalies atmosphériques de la région. On peut s'intéresser aux variations intra-saisonnières (on retire la moyenne mois par mois) ou aux variations inter-annuelles (on retire la moyenne mois par mois, puis on moyenne l'anomalie sur une saison). On constate que la deuxième approche réduit notablement le nombre de données (3 fois moins de données sur une saison typique de 3 mois), ce qui diminue l'efficacité des calculs statistiques. Nous avons donc conservé la première méthode.

2.1 Scénario LF7

Dans ce scénario, les émissions anthropiques sont mises à zéro. La moyenne et la variance du géopotential à 500mbars ont été représentées sur la figure 3. On remarque que l'hiver (JJA)

est la saison la plus “active” dans la région (variance nettement plus élevée).

Nous avons retiré la moyenne mois par mois et nous avons conservé les 8 premiers EOFs. Elles représentent 79,2 % de la variance totale. L’index de classifiabilité obtenu pour la période JJA est représenté sur la figure 4. L’index est maximal pour $k = 2$ et se détache notablement du bruit rouge pour $k = 3$. Les trois classes déterminées sur les mois de juillet à août sont représentées sur la figure 6. La répartition des données est indiquée au-dessus de chaque classe (quantité de cartes et pourcentage). Nous avons aussi représenté les 8 premiers EOFs (figure 5).

Nous obtenons trois régimes de temps bien distincts. La moyenne ayant été retirée mois par mois, nous obtenons les composantes à la fois intra-saisonnières et inter-annuelles du champ. Les cartes de géopotentiel sont intéressantes pour l’étude du climat. En effet, l’équilibre géostrophique loin de l’équateur impose aux courants atmosphériques de suivre les lignes de niveaux du géopotentiel. Plus précisément, dans l’hémisphère sud, les dépressions correspondent à des circulations dans le sens horaire, alors que les hautes pressions correspondent à des circulations dans le sens anti-horaire (ce schéma est inversé dans l’hémisphère nord). La première carte correspondrait donc à un courant d’advection d’air chaud et humide en provenance d’Amérique du Sud vers les régions polaires. La deuxième carte a le même aspect, mais inversé. Les pôles sont aussi légèrement décalés en longitude (de -30 degrés). On pourrait donc considérer ces deux premières cartes comme les composantes en quadrature d’une onde progressive en rotation autour du pôle sud (leur part de variance sont d’ailleurs proches l’une de l’autre).

Par ailleurs, il peut être intéressant d’étudier d’autres variables climatiques pour caractériser plus efficacement les régimes de temps trouvés. Nous avons représenté sur la figure 7 les composites de température de surface de la mer (SST) fabriqués à partir de la répartition des cartes dans les clusters. Nous pouvons ainsi remarquer que le cluster numéro 3 correspond à un régime non-forcé par les SST entre les tropiques (aucune forme caractéristique ne se dégage de la carte composite). Ces cartes pourraient aussi permettre de reconnaître certains phénomènes climatiques connus, tels que La Nina, El Nino...

2.2 Scénario LF8

La simulation LF8 correspond à un scénario d’émission de carbone due à l’activité humaine. Nous avons effectué la même classification que pour le scénario précédent. Les données correspondant aux mois de juillet à décembre 2054 étaient manquantes dans les données LF8. Nous avons donc procédé à une interpolation en remplaçant les valeurs manquantes par la moyenne sur les quatre années situées de part et d’autre de l’année 2004 (2002, 2003, 2005 et 2006).

Nous avons commencé par vérifier que notre correction était efficace. Ainsi, des analyses effectuées sur la période 1860-2050 d’une part, et sur la période 1860-2100 corrigée d’autre

part, ont donné des résultats identiques. Travailler sur la période 1860-2100 corrigée avait donc un sens.

Nous avons conservé ici aussi les 8 premiers EOFs, ce qui correspond à 77,5 % de la variance. L'index de classifiabilité suit la même évolution que dans le scénario LF7 (figure 8). Il atteint aussi son maximum pour $k = 3$. Les classes obtenues sont sensiblement les mêmes que celles du scénario LF7, la répartition étant identique à 2 % près. Les classes principales et les 8 premières EOFs ont été reproduites sur les figures 9 et 10.

Les résultats sont donc sensiblement les mêmes pour LF8 que pour LF7. Les émissions de gaz carbonique ne modifieraient donc pas les régimes de temps de la planète sur une période de 200 ans, ni même leur répartition.

2.3 Combinaison des scénarios

Pour enrichir les résultats précédents, nous avons mélangé les données des simulations LF7 et LF8. Le but était de déterminer des régimes de temps communs aux deux scénarios. Nous avons donc fabriqué une simulation fictive, d'une durée de 482 ans, dans laquelle les 241 premières années étaient occupées par la simulation LF7, et les 241 suivantes par la simulation LF8. L'analyse par clusters a donné des résultats sensiblement identiques aux précédents. Nous avons rapporté l'index de classifiabilité sur la figure 11. Les 8 premiers EOFs représentent cette fois 78,0 % de la variance. La figure 12 représente l'histogramme comparé des populations de cartes dans chaque cluster pour LF7, LF8 et les deux combinées.

Cette analyse met en avant les régimes de temps communs aux deux scénarios. On retrouve les mêmes régimes de temps que précédemment. L'analyse est donc stable sur les données de LF7 et LF8. Nous verrons plus loin que ce n'est pas toujours le cas.

3 Nouvelles expériences et données d'observations

Cette partie concerne les résultats apportés par un nouveau modèle (LMDZ3.3) ainsi que par des données d'observations réanalysées. La plupart du temps, les résultats trouvés étaient non significatifs. Cette partie s'attache donc essentiellement à étudier la sensibilité des analyses aux différents paramètres (taille de la fenêtre, nombre d'EOFs conservés, période d'analyse considérée...)

3.1 Les réanalyses NCEP

Nous avons étudié la sensibilité des analyses au nombre d'EOFs conservés. La figure 13 représente l'indice de classifiabilité obtenu lorsqu'on conserve soit 8 soit 6 composantes principales. Nous avons appliqué les calculs sur la saison étendue (de mars à novembre) de manière à

avoir plus de valeurs que pour un hiver simple (juin à août). La fenêtre utilisée est de -180 à 175 degrés en longitude et de -22 à -78 degrés en latitude. L'évolution globale de l'indice ne change pas. Cependant, on remarque que l'indice dépasse le bruit rouge pour $k = 5$ dans le cas de 8 EOFs, ce qui n'est pas le cas pour 6 EOFs.

Nous avons aussi étudié la sensibilité par rapport à la fenêtre utilisée. La figure 14 représente les indices de classifiabilité obtenus pour la fenêtre précédente (-180/175 en longitude, -22/-78 en latitude) et pour une nouvelle fenêtre plus basse (mêmes longitudes mais -30/-86 degrés en latitude). On constate une très nette différence non seulement dans l'évolution du bruit rouge mais aussi dans l'évolution de l'indice de classifiabilité lui-même.

3.2 L'expérience CLIMATO

Nous avons étudié ici la sensibilité par rapport à la saison considérée (étendue ou non). La fenêtre utilisée était de -180 à 175 degrés en longitude et de -22 à -78 degrés en latitude. Nous avons conservé les 8 premières composantes principales. La figure 15 représente les indices de classifiabilité obtenus pour la saison d'hiver (juin à août) et pour la saison étendue (mars à novembre). On remarque une très nette différence. Dans le cas de la saison étendue, les variations de l'indice sont plus fortes, bien qu'elles gardent la même allure (pics pour $k = 2$ et $k = 4$). Nous avons tracé les 4 clusters obtenus pour la saison étendue (voir figure 16). Nous obtenons deux paires de clusters opposés. Le résultat n'est donc pas très significatif. Cependant, le cluster numéro 3 est à rapprocher du cluster numéro 2 obtenu avec la simulation LF7 (figure 6). Le rapport de 10 est dû au fait que les simulations LF7 et LF8 ont été divisées par la valeur de la constante gravitationnelle g .

3.3 L'expérience GISST

Le modèle LMDZ3.3 est un modèle très récemment utilisé par le LMD. La documentation a son sujet était donc très limitée. Nous possédons 17 analyses successives de 45 années chacune. Des erreurs ayant été repérées dans la quinzième série, nous nous sommes limitée aux douze premières, sur la saison étendue (mars à novembre).

Nous avons d'abord réuni les 12 premières séries en une seule en effectuant une moyenne mois par mois. Nous avons effectué une analyse sur la saison étendue (mars à novembre). L'indice de classifiabilité obtenu est représenté sur la figure 18 (8 EOFs ont été conservées). Le résultat n'est pas significatif. Cela est certainement dû à la faible quantité de données (seulement 405 cartes).

Nous avons donc décidé de garder les valeurs des 12 séries en fabriquant une série fictive de $12 \times 45 = 540$ années. Nous avons représenté sur la figure 19 l'indice de classifiabilité obtenu pour la fenêtre -180/175, -22/-78. Le nombre d'EOFs est de 8. L'indice est plus élevé que le bruit rouge pour $k = 3$ et $k = 5$. Le pic le plus marqué est atteint pour $k = 5$. Nous avons tracé les cinq classes principales correspondantes (figure 20). Les EOFs ont été représentées

avec leur variance sur la figure 21. Nous avons enfin tracé les classes obtenues pour $k = 3$ et nous avons retrouvé trois des classes obtenues pour $k = 5$: les classes numéro 3, 4 et 5 avec comme variances respectives 21.9 %, 40.2 % et 37.8 %.

Pour vérifier la stabilité des régimes de temps trouvés, nous avons aussi divisé ce jeu de douze séries en deux jeux de six séries (figure 17). On remarque que l'évolution globale de l'indice est presque conservée : pics pour $k = 2$ et $k = 5$. L'indice marque un pic notable pour $k = 5$. Les classes principales obtenues sont les mêmes que précédemment. Pour $k = 3$, on trouve les mêmes classes principales (numéro 3,4,5). L'analyse est donc restée très stable par ce découpage des données en deux parties.

4 Conclusion et perspectives

La méthode que nous avons utilisée est un outil objectif qui permet de classer les données climatiques par régimes de temps. Une première application envisageable de cette méthode est la prévision du climat à long terme. En effet, la classification des données simulées dans le futur permet de savoir quels régimes de temps seront prépondérants, quels régimes apparaîtront le plus souvent, etc...

La méthode des nuées dynamiques avait été utilisée dans l'étude du climat dans l'hémisphère Nord ([5]). Son application dans l'hémisphère Sud sur les simulations LF7 et LF8 a donné des résultats significatifs. Ainsi nous avons pu distinguer trois régimes de temps identiques dans les deux scénarios. Ces deux régimes se retrouvaient lorsqu'on mélangeait les données de LF7 et LF8, ce qui prouve la stabilité des résultats. Il reste à savoir maintenant si les résultats obtenus sont réalistes, en étudiant par exemple des données satellitaires en quantité suffisantes.

Appliquée sur d'autres données (LMDZ3.3, NCEP), la méthode des nuées dynamiques a donné des résultats peu significatifs. Notamment, il nous a été impossible d'identifier les classes principales obtenues avec les simulations LF7 et LF8 d'une part, et avec les réanalyses NCEP d'autre part. Cependant, nous avons pu étudier la sensibilité de la méthode aux trois paramètres principaux : la taille de la fenêtre, le nombre d'EOFs conservés et la saison étudiée. Les résultats apparaissent alors très variables selon la fenêtre utilisée. Un décalage de 4 degrés de latitude peut aboutir à des résultats sensiblement différents.

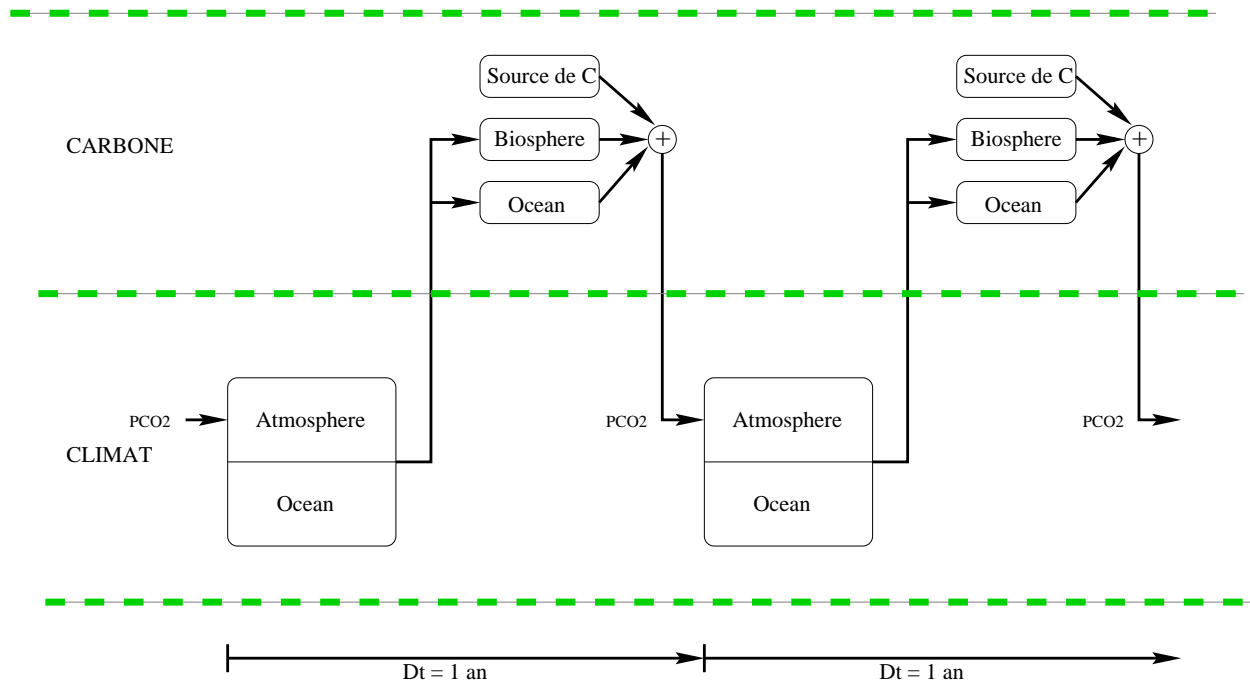


FIG. 1 – Séquence de calcul du modèle IPSL-CMC2

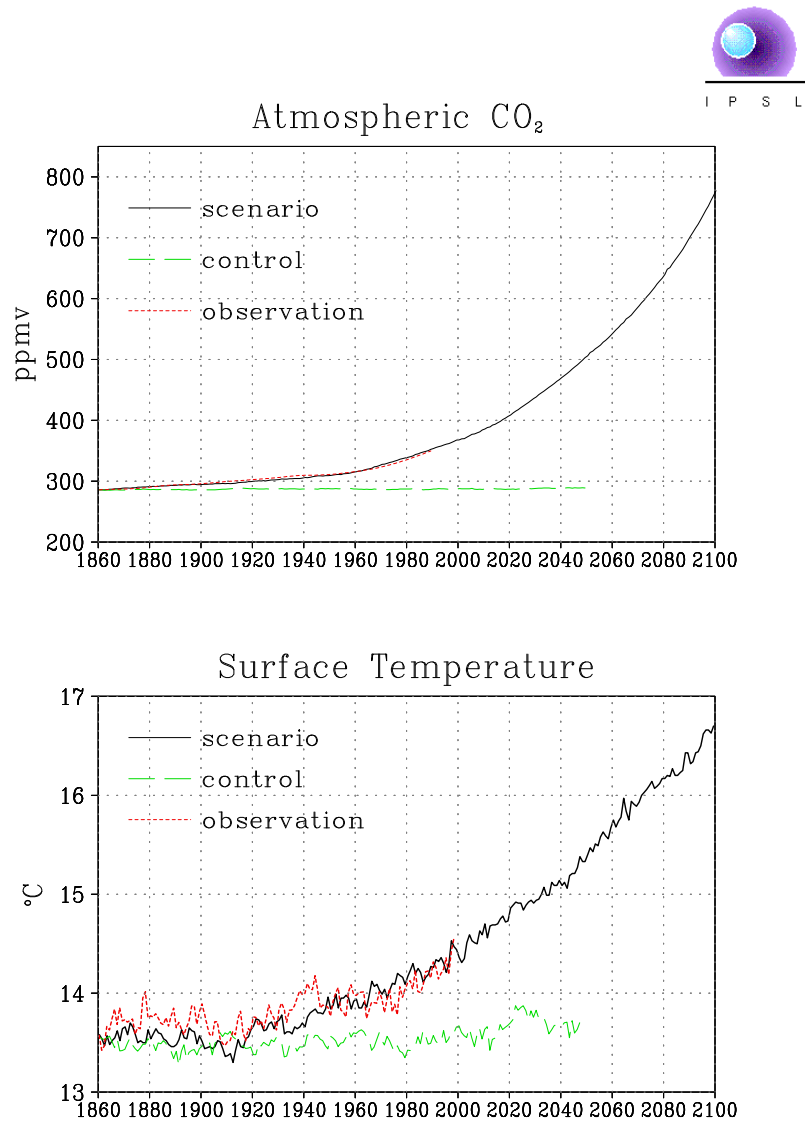


FIG. 2 – Evolution de la concentration du CO₂ atmosphérique (en haut) et de la température de surface moyenne du globe (en bas) de 1860 à 2050, telle que simulée par le modèle couple climat-carbone de l'IPSL. Nous avons également tracé en pointillé une estimation de ces deux valeurs à partir d'observations, et en tirets longs ces grandeurs pour la simulation de contrôle. Remarque : le CO₂ étant le seul gaz à effet de serre pris en compte, la variation de la température de surface du globe est inférieure à ce qu'elle serait si l'ensemble des gaz à effet de serre étaient pris en compte.

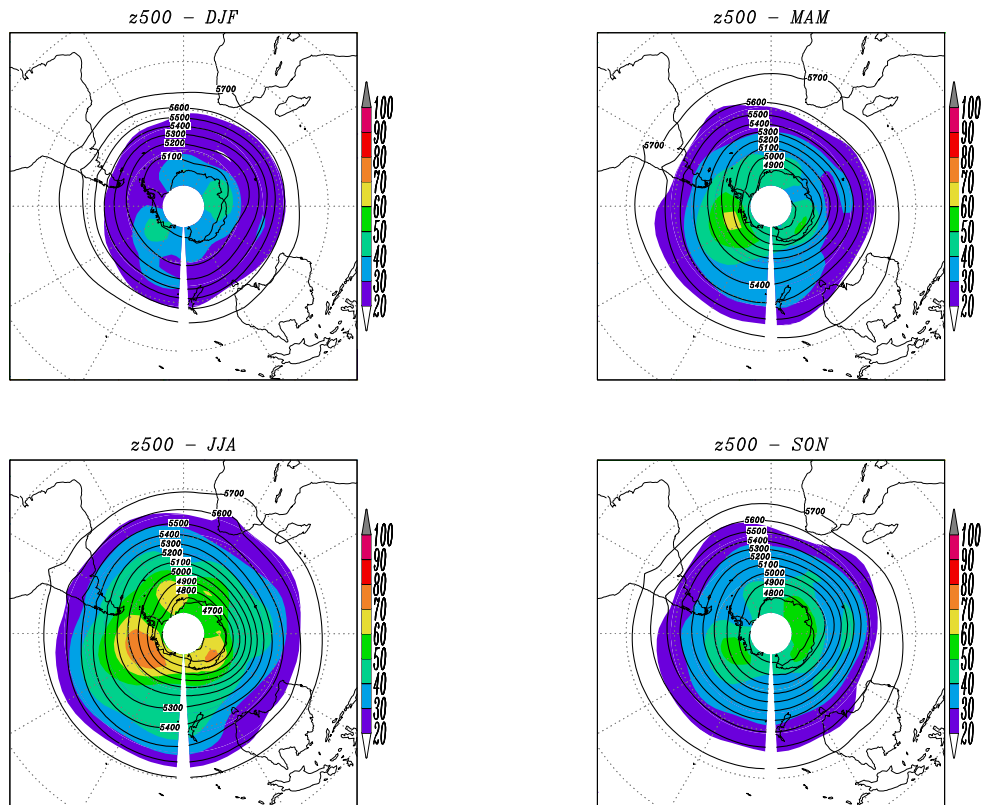


FIG. 3 – Moyenne par saison du géopotential à 500 mbars - Simulation LF7 - période : 1860-2100

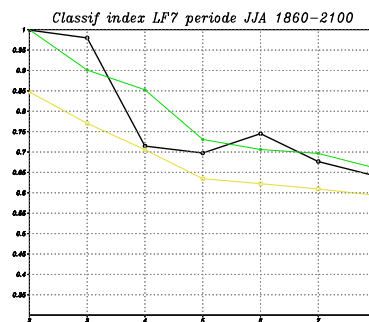


FIG. 4 – Indice de classifiabilité obtenu pour la saison JJA - Simulation LF7 - période : 1860-2100. Bruit rouge en jaune et vert et indice réel en noir.

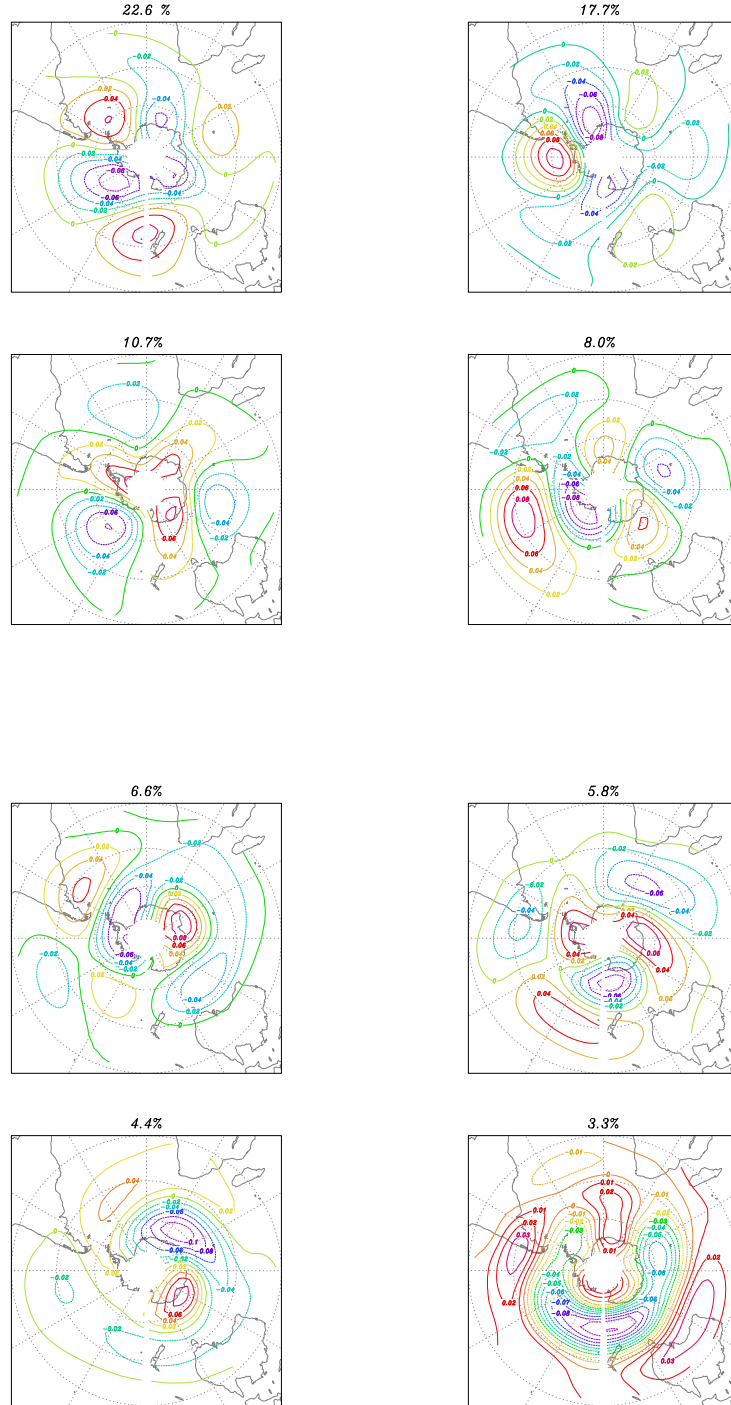


FIG. 5 – 8 premières EOFs de z_{500} sur le domaine hémisphère Sud pour la période JJA - Simulation LF7 - période : 1860-2100

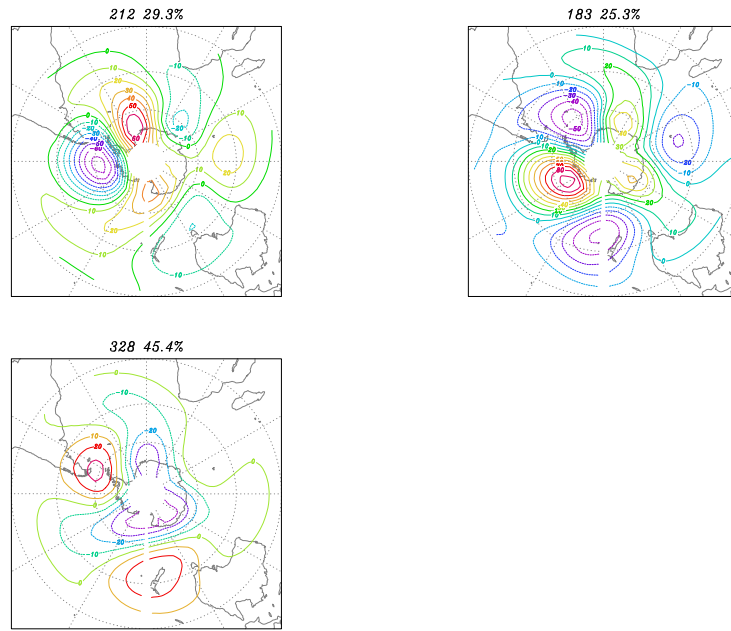


FIG. 6 – Centres de gravités des classes obtenues par classification automatique des simulations LF7 sur l'hémisphère Sud pendant JJA avec $k=3$ classes. Unités : $J.kg^{-1}$

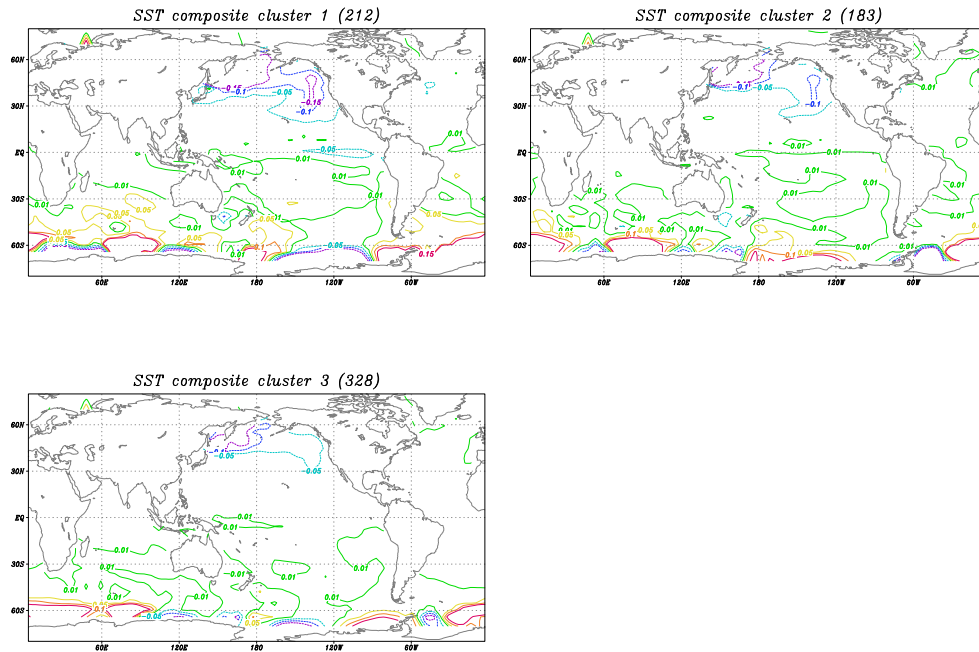


FIG. 7 – Cartes composites de la température de surface de la mer (SST) sur la période JJA - Simulation LF7 - période : 1860-2100

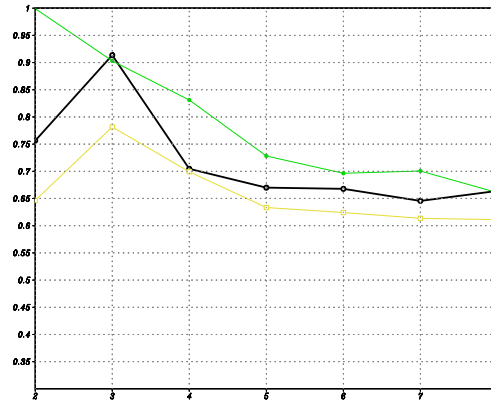


FIG. 8 – Indice de classifiabilité obtenu pour la saison JJA - Simulation LF8 - période : 1860-2100

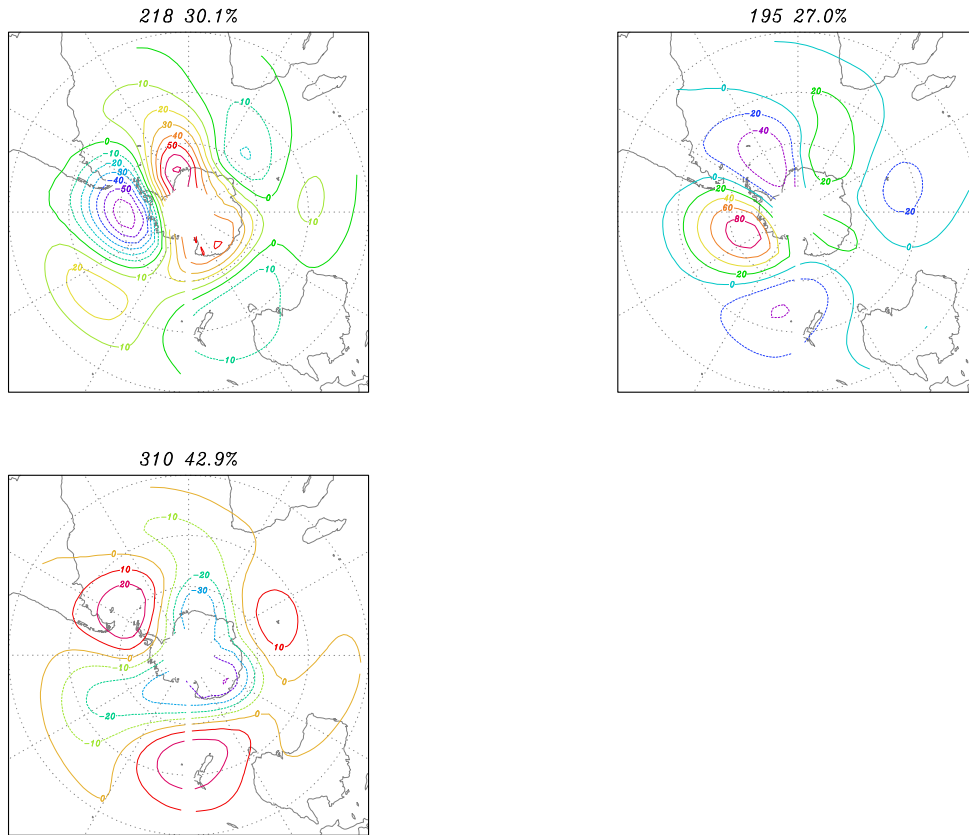


FIG. 9 – Centres de gravités des classes obtenues par classification automatique des simulations LF8 sur l'hémisphère Sud pendant JJA avec $k=3$ classes. Unités : $J.kg^{-1}$

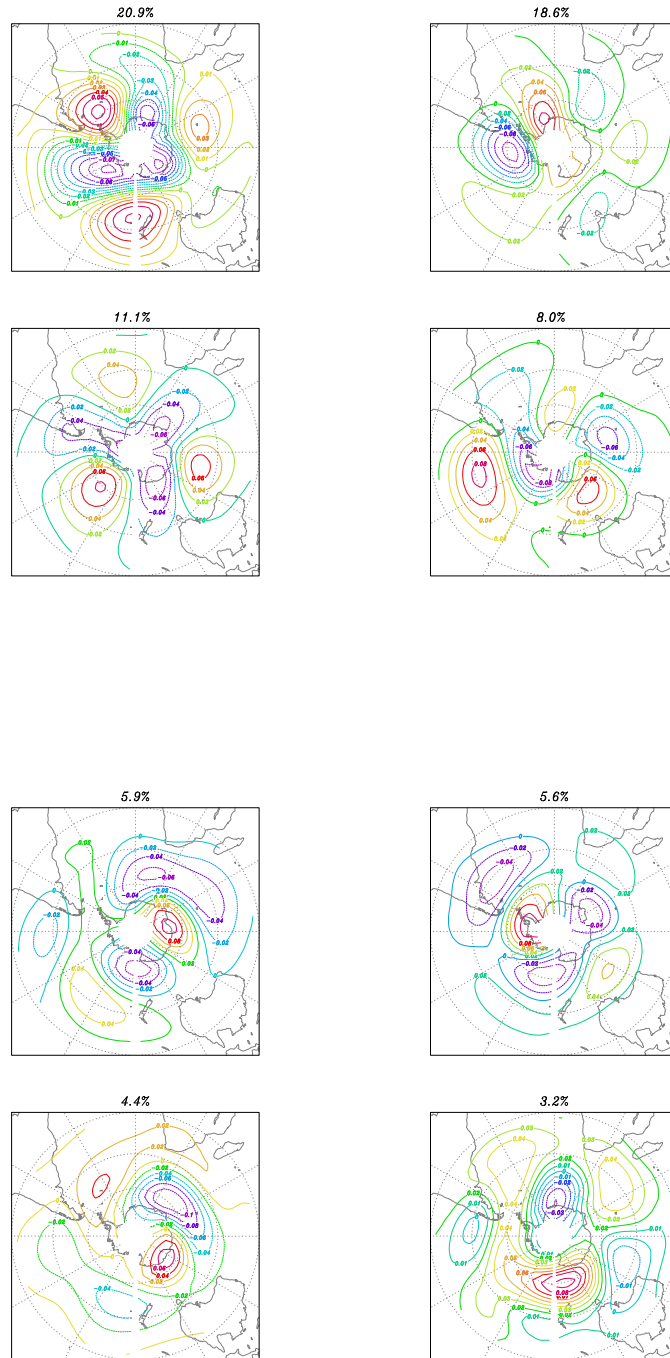


FIG. 10 – 8 premières EOFs de z_{500} sur le domaine hémisphère Sud pour la période JJA - Simulation LF8

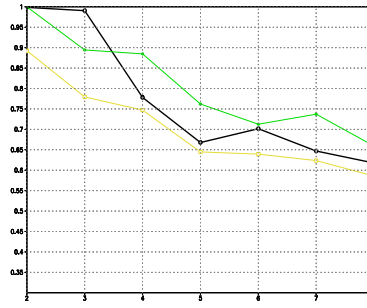


FIG. 11 – Indice de classifiabilité obtenu pour la période JJA - Simulations LF7 et LF8 combinées - Durée : 482 ans

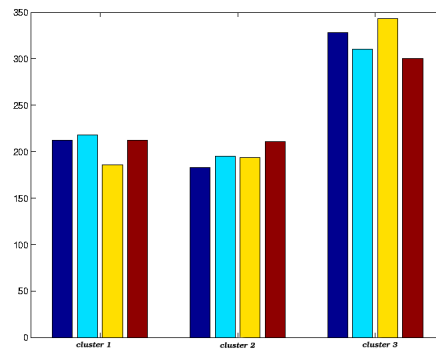


FIG. 12 – Répartition des cartes dans les clusters pour les simulations LF7, LF8 dans les simulations séparées (barres bleues) et dans la simulation combinée (barres jaune et rouge) - période JJA

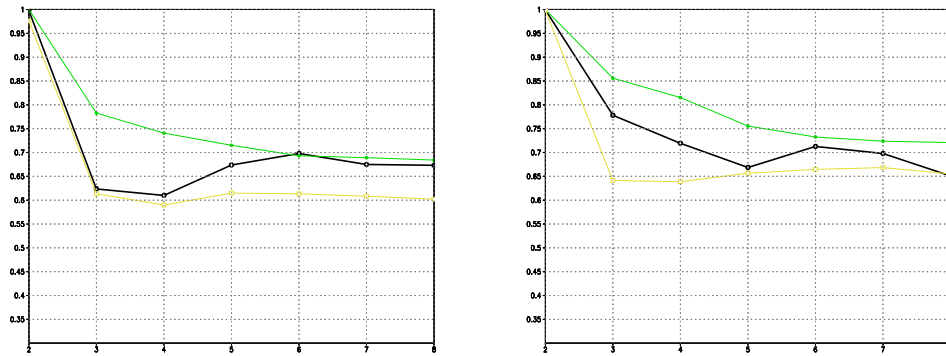


FIG. 13 – Indices de classifiabilité obtenus sur la saison étendue (mars à nov.) avec 8 EOFs (gauche) et 6 EOFs (droite) - Simulations NCEP

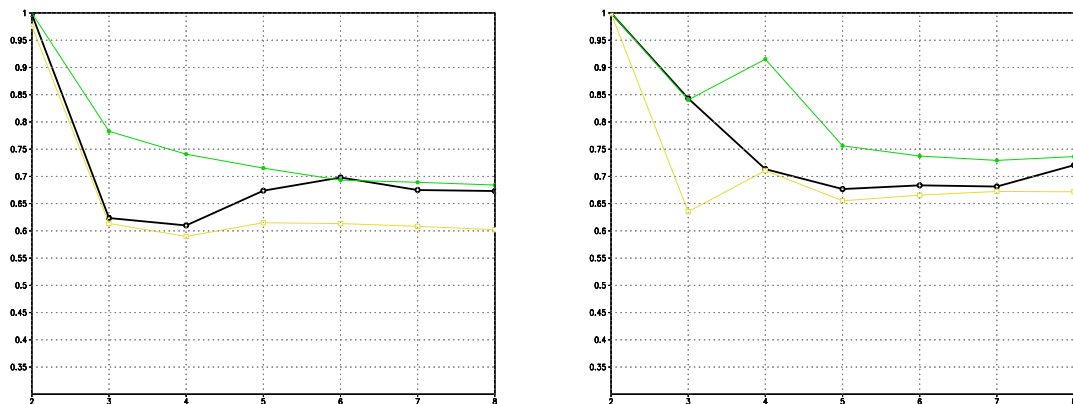


FIG. 14 – Indices de classifiabilité obtenus sur la saison étendue (mars à nov.) avec deux fenêtres différentes : latitudes -22/-78 à gauche et -30/-86 à droite - Simulations NCEP

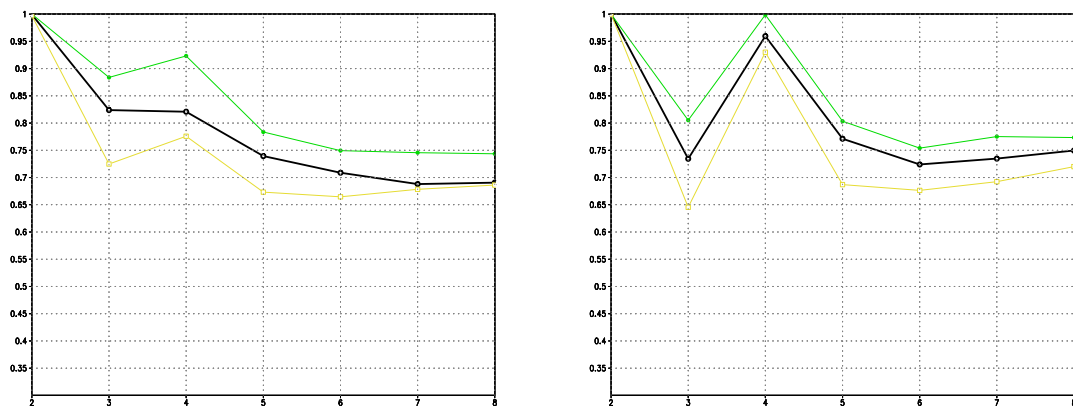


FIG. 15 – Indices de classifiabilité obtenus sur la période hiver JJA (à gauche) et sur la saison étendue (mars à novembre à droite) - Expérience CLIMATO

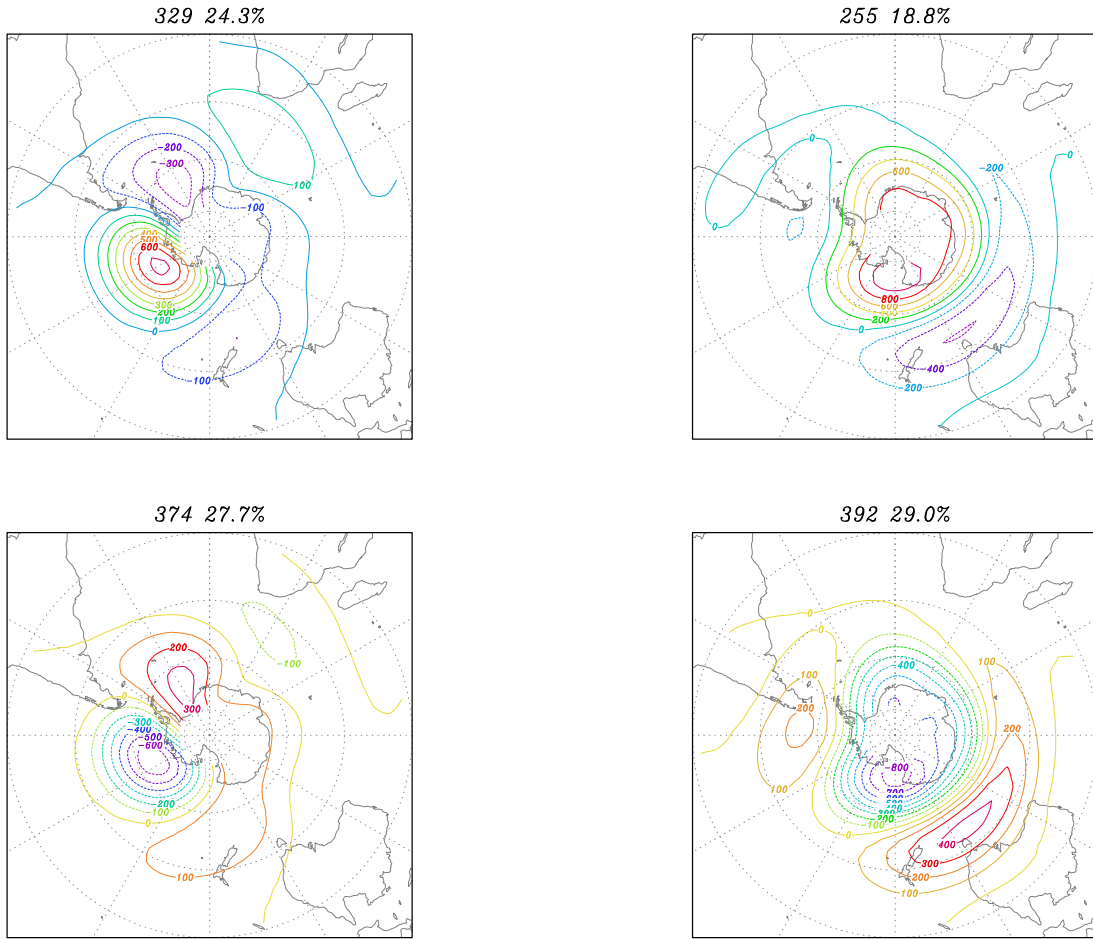


FIG. 16 – Centres de gravités des classes obtenues par classification automatique des simulations CLIMATO sur la saison étendue (mars - nov.) avec $k=4$ classes. Unités : m

Références

- [1] HANSEN, A.R., and A. SUTERA : *On the probability density distribution of large-scale atmospheric wave amplitude*, J. Atmos. Sci.,**43**, 1996, p.3250-3265.
- [2] KALNAY, E., and Coauthors : *The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project.*, Bull. Amer. Meteor. Soc.,**77**, 1996, p.437-471.
- [3] KINGSTE C. Mo : *Relationship between Low-Frequency in the Southern Hemisphere and Sea-Surface Temperature Anomalies*, Climate Prediction Center, NCEP/NWS/NOAA, Camp Springs, Maryland, 2000
- [4] LAURENT, C : *Variabilité climatique basse-fréquence simulée en Atlantique Nord par un modèle couplé océan-atmosphère*, Thèse, spécialité Physique de l'environnement : Université de Paris VI, 2000, 220p.
- [5] MICHELANGELI, P.A. : *Variabilité atmosphérique basse-fréquence observée et simulées aux latitudes tempérées*. Thèse, spécialité Météorologie : Université de Paris VI, 1996. 188p.
- [6] MICHELANGELI P.A., Vautard R., Legras B. : *Weather Regimes : Recurrence and Quasi-Stationnarity*, Journal of The Atmospheric Sciences,vol.52,**8**, 1995
- [7] REX, D. F. : *Blocking action in the middle troposphere and its effects on regional climate. Part. I : An aerological study of blocking action*,Tellus,**2**, 1950, p.196-211.