



UNIVERSITÉ DE BOURGOGNE
ÉCOLE DOCTORALE « ENVIRONNEMENTS-SANTÉ/STIC »

THÈSE

pour obtenir le grade de
Docteur de l'université de Bourgogne

Discipline : Géographie – Option : Climatologie

**Étude climatique
de la mousson vietnamienne
et applications à la prévision saisonnière**

Présentée et soutenue publiquement le 8 décembre 2008
par

PHAM Xuan Thanh

Centre de Recherches de Climatologie – UMR CNRS 5210

Devant le jury composé de

Madame Christine AMORY-MAZAUDIER
Monsieur Téléphore BROU
Monsieur Pierre CAMBERLIN
Monsieur Bernard FONTAINE
Monsieur Minh LE HUY
Madame Nathalie PHILIPPON

Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Directeur de thèse
Examineur
Co-encadrant de thèse

Remerciements

Pendant son acheminement, cette thèse a bénéficié du soutien des laboratoires et organismes suivantes : le Centre de Recherches de Climatologie – UMR 5210 CNRS de l'Université de Bourgogne, l'Institut de Géophysique, l'Académie des Sciences et des Technologies du Vietnam (ASTV), le Ministère des Affaires Étrangères français et le projet « *Études de Géophysique intégrées dans le Système Soleil-Terre* ».

Bien évidemment, je veux adresser un grand merci à mes deux directeurs de thèse Bernard Fontaine, Directeur de Recherches au CNRS et directeur du Centre de Recherches de Climatologie, et Nathalie Philippon, Chargée de Recherches au CNRS, pour leur encadrement et leur soutien sans faille.

Pour l'évaluation de cette thèse, je remercie Madame Christine Amory-Mazaudier, HDR, Chargée de Recherches au CNRS, et Monsieur Téléphore Brou, Professeur à l'Université d'Artois, d'avoir consacré un peu de leur temps à la lecture de ce travail. Merci Monsieur Pierre Camberlin, Professeur, Directeur adjoint du Centre de Recherches de Climatologie, et Monsieur Le Huy Minh, Directeur adjoint de l'Institut de Géophysique, ASTV, d'avoir accepté d'être examinateur de cette thèse.

Je remercie sincèrement et chaleureusement Madame Michèle Dalby qui s'est occupée de mes papiers et dossiers administratifs et a aussi accepté de relire toute la thèse. Merci également à Pascal Oettli pour son aide en informatique.

Je remercie chaleureusement les collègues du CRC : Yves Richard, Pascal Roucou, Thierry Castel, Corinne Quintar, Samuel Louvet, Nicolas Vigaud, Benjamin Pohl, Nadège Martiny, Etienne Cassagne, Romain Marteau, Lotfi Bouali, Julien Crédat, Viviane Djoufack, Ernest Amoussou, Wilson Gitau, Isabelle Pocard et tous les autres collègues et étudiants du laboratoire, pour leur sympathie et leurs encouragements.

Je salue aussi mes collègues : Nguyen Xuan Anh, Le Van Luu, Nguyen Ngoc Thuy, Ha Duyen Chau, Le Viet Huy, Hoang Hai Son, Pham Le Khuong, Le Nhu Quan, Duong Quang Ve, Hoang Phuong Loan, Le Van Thao, et tous les autres membres de l'Institut de Géophysique, ASTV, Monsieur Nguyen Trong Hieu, Madame Pham Thi Thanh Huong de l'Institut de Météorologie-Hydrologie du Vietnam, Mademoiselle Pham Thu Ha de l'INRA et les étudiants Vietnamiennes à Dijon pour leur soutien et leurs conseils.

Bien sûr, un très grand merci à mes parents, à ma femme Dao Thi Ha, à ma fille Pham Huong Quynh, à mes frères et mes sœurs, et à tous les autres membres de ma famille.

ÉTUDE CLIMATIQUE DE LA MOUSSON VIETNAMIENNE ET APPLIQUATIONS À LA PRÉVISION SAISONNIÈRE

Résumé : Cette thèse vise à documenter les processus physiques et dynamiques associés à la circulation de mousson vietnamienne d'échelles régionale et synoptique, afin d'étudier la prévisibilité de ses principales composantes et de mettre en place des méthodes statistico-dynamiques de prévision des pluies de l'échelle saisonnière à celle des événements. Elle s'articule en deux parties.

La première partie est, en fait, une étude climatique fondée sur l'analyse diagnostique des données :

- d'abord, les données stationnelles des pluies et des températures mensuelles sur la période 1960-2000 sont utilisées pour analyser le cycle moyen et la variabilité interannuelle de ces champs sur les sept régions climatiques traditionnelles du Vietnam, à l'aide des précipitations observées en diverses stations. Des classifications et des corrélations sont appliquées sur les données de pluies afin de définir les sous-régions sur lesquelles seront calculés des indices spatiaux pour analyser les chroniques d'évolution et définir les prédictants et prédicteurs pour la seconde partie ;

- ensuite, les données atmosphériques de réanalyse du NCEP/DOE2 et les estimations pluviométriques du CMAP sur la période 1979-2004 en $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ sont utilisées pour décrire les processus de base, le cycle annuel moyen et la variabilité de la mousson dans la gamme des pas de temps synoptiques à interannuel.

La seconde partie est une étude de prévisibilité des précipitations saisonnières :

- les données de pluie *in situ* et le vent à 1 000 hPa sont utilisés pour définir l'onset de pluie sur le sud et nord Vietnam. Les dates d'onset sont prévues en se basant sur les indices régionaux qui sont sélectionnées à partir de données NCEP/DOE2 ;

- la prévisibilité des cumuls saisonniers de pluies est enfin définie par la double utilisation de cinq modèles couplés du programme européen ENSEMBLES et par la prévision statistique.

Mots-clés: mousson vietnamienne, onset de mousson, précipitation, Vietnam, prévision saisonnière.

Abstract : This thesis aims at documenting the physical and dynamic processes associated with the monsoon circulation of Vietnamese regional and synoptic scales, to explore the predictability of its key components and develop statistical and dynamical methods for forecasting the monsoon onset and seasonal. It is divided into two parts.

The first part is, in fact, a climate study based on analysis of diagnostic data:

- first, the monthly rainfall and temperature data station over the period 1960-2000 are used to analyze the cycle and the variability of these fields on the seven traditional climatic regions of Vietnam using the observed precipitation in various stations. Classifications and correlations are applied on rainfall data to identify sub-regions on which selected indices will be calculated to analyze time evolution and identify the best predictors for the second part;

- then, the atmospheric reanalysis of NCEP/DOE2 and estimates of CMAP rainfall over the period 1979-2004 ($2.5^\circ \times 2.5^\circ$) are used to describe the basic processes, the averaged annual cycle and the variability of the monsoon in the range of synoptic to interannual time scales.

The second part is a study of predictability of the monsoon onset and of the seasonal rainfall:

- data *in situ* rain and wind at 1 000 hPa are used to define the onset of rains over southern and northern Vietnam. The onset dates are provided, based on regional indices using the NCEP/DOE2 dataset;

- the predictability of cumulative seasonal rainfall is then defined by the dual use of coupled models of the European program (ENSEMBLES) and statistical forecasting.

Key words : Vietnamese monsoon, monsoon onset, rainfall, Vietnam, seasonal forecasting.

Table des matières

Avant-propos et Introduction.....	1
CHAPITRE 1. Données et méthodes.....	11
1.1 Les données.....	12
1.1.1 Données d'observations <i>in situ</i>	12
Données de précipitations.....	12
Données de températures	14
1.1.2 Les estimations satellitales - données CMAP	17
1.1.3 Les données relatives à la dynamique atmosphérique	17
Les réanalyses du NCEP/NCAR (R-1)	17
Les réanalyses du NCEP/DOE AMIP-II (R-2)	18
1.1.4 Les données de TSM	19
1.1.5 Les données issues des sorties de modèles couplés du projet européen ENSEMBLES	19
1.2 Les méthodes.....	20
1.2.1 L'analyse en composantes principales (ACP).....	20
1.2.2 L'analyse spectrale.....	21
1.2.3 Les corrélations linéaire.....	21
1.2.4 Les composites.....	22
1.2.5 La régression linéaire multiple (RLM).....	23
1.2.6 L'analyse discriminante linéaire (ADL).....	23
1.2.7 Classification (K-mean).....	24
1.2.8 Scores de performance	25
CHAPITRE 2. Climatologie de la mousson vietnamienne.....	27
2.1 Généralités	28
2.2 Évolution des températures et des précipitations dans les sept régions climatiques.....	31
2.2.1 La région Taybac.....	31
2.2.2 La région Dongbac	34

2.2.3 La Région DBBB.....	36
2.2.4 La région BTB.....	38
2.2.5 La région NTB.....	41
2.2.6 La région Taynguyen.....	43
2.2.7 La région Nambo.....	45
2.3 Analyse spatiale des champs pluviométriques au Vietnam.....	49
2.3.1 Classifications.....	49
2.3.2 Corrélations spatiales.....	54
<i>Synthèse de chapitre.....</i>	56
CHAPITRE 3. Circulation de mousson et précipitations au Vietnam.....	57
3.1 La circulation de mousson sur le Vietnam	58
3.1.1 Caractéristiques générales.....	58
3.2.1.1 Les masses d'air associées à l'alternance des flux de mousson.....	58
3.2.1.2 Les perturbations atmosphériques.....	61
3.1.2 Conditions atmosphériques associées à la mousson.....	64
3.1.3 Circulation de l'atmosphère.....	70
3.2 Précipitations de mousson sur la péninsule indochinoise au travers des données CMAP (1979-2004 en pentadaire).....	75
3.2.1 Cartes saisonnières et données in situ.....	75
3.2.2 Diagramme latitudes/temps sur différentes longitudes.....	78
<i>Synthèse de chapitre.....</i>	80
CHAPITRE 4. L'onset de mousson au Vietnam.....	81
4.1 L'onset de mousson au sud Vietnam et sa prévisibilité.....	82
4.1.1 Définir l'onset de mousson au sud Vietnam.....	82
4.1.2 Le schéma de prévision saisonnière.....	86
4.1.3 Conditions atmosphériques associées à l'onset de mousson.....	88
4.1.4 Prévisibilité de l'onset de mousson sur le sud Vietnam.....	94
4.2 Démarrage de la saison des pluies au nord Vietnam et prévisibilité.....	97
4.2.1 Définir le démarrage de la saison des pluies au nord Vietnam.....	97
4.2.2 Conditions atmosphériques associées au démarrage de la saison des pluies.....	100
4.2.3 Prévisibilité du démarrage de la saison des pluies au nord Vietnam.....	106
<i>Synthèse de chapitre.....</i>	109

CHAPITRE 5. Prévisibilité des cumuls saisonniers de pluies au Vietnam...	111
5.1 Prévisibilité saisonnière dans les modèles couplés, période 1991-2001.....	112
5.1.1 La pluie.....	112
5.1.1.1 Les champs moyens.....	112
5.1.1.2 Variabilité interannuelle et prévisibilité potentielle.....	112
5.1.2 La dynamique atmosphérique.....	119
5.1.2.1 Les champs moyens.....	119
5.1.2.2 Variabilité interannuelle et prévisibilité potentielle pour chaque paramètre.....	119
5.1.3 Prévision statistique des cumuls saisonniers de pluies à partir de la dynamique atmosphérique des modèles couplés.....	127
5.1.3.1 Prévision statistique pour le nord Vietnam.....	127
5.1.3.2 Prévision statistique pour le sud Vietnam.....	129
5.2 Prévisibilité des cumuls saisonniers de pluies sur la période 1979-2004 à partir des données de réanalyses NCEP/DOE2.....	131
5.2.1 Prévisibilité des cumuls de pluies au nord Vietnam.....	131
5.2.1.1 Définition des prédicteurs.....	131
5.2.1.2 L'équation de prévision.....	132
5.2.2 Prévisibilité des cumuls de pluies au sud Vietnam.....	135
5.2.2.1 Définition des prédicteurs.....	135
5.2.2.2 L'équation de prévision.....	135
<i>Synthèse de chapitre.....</i>	139
Conclusion et perspectives.....	141
Bibliographie.....	147
Liste des figures.....	153
Liste des tableaux.....	159
Annexes.....	163

Liste des Acronymes

ACP : Analyse en Composantes Principales

ADL : Analyse Discriminante Linéaire

AMJ : Avril-Mai-Juin

CMAF : CPC Merget Analysis Precipitation

CP : Composante Principale

CPC : Climate Prediction Center

DOE : Department of Energy

DPSYS : le système de prévision décadaire du Met. Office britannique

ECMWF : le modèle couplé de prévision saisonnière utilisé à l'ECMWF

ENSEMBLES : le projet européen ayant pour but le développement d'un système de prévision d'ensemble

ENSO : El Niño Southern Oscillation

ESH : Énergie Statique Humide

GLOSEA : le système de prévision saisonnière global du Met. Office britannique

IFMK : le modèle couplé utilisé pour la prévision saisonnière par l'Institut für Meereskunde/Geomar Kiel

JAS : Juillet-Août-Septembre

JFM : Janvier-Février-Mars

LEPS : Linear Error in Probability Space

MTFCE : le modèle couplé de prévision saisonnière de Météo France

NCAR : National Center for Atmospheric Research

NCEP : National Center for Environmental Prediction

OLR : Outgoing Longwave Radiation

OND : Octobre-Novembre-Décembre

PNM : Pression Niveau de la Mer

RLM : Régression Linéaire Multiple

TSM : Températures de Surface de la Mer

VIF : Variance Inflation Factor

ZCIT : Zone de Convergence Inter-Tropicale

Avant-propos

Si le système de mousson de l'Asie du Sud-est a fait l'objet de nombreuses études, de campagnes de mesures et programmes internationaux dont les résultats ont été affichés dans les revues spécialisées, la prise en compte des spécificités régionales de ses impacts climatiques et, notamment, pluviométriques à l'échelle d'un pays est restée jusqu'ici beaucoup plus confidentielle.

Le récent programme « *Études de Géophysique intégrées dans le Système Soleil-Terre* », coordonné par le Dr Christine Mazaudier et le Dr Le Huy Minh, se place dans le cadre des projets de coopération France-Vietnam. Son volet climatique a donné la priorité à l'étude des processus physiques et dynamiques associés à la circulation de mousson vietnamienne d'échelles régionale et synoptique, pour étudier la prévisibilité de ses principales composantes. Cette thèse n'en est que le premier jalon. Son but est de tester les méthodes statistiques et statistico-dynamiques de prévision développées au Centre de Recherches de Climatologie pour une application à l'onset de mousson qui fixe le démarrage de la saison des pluies, et aux cumuls saisonniers sur le nord et le sud du Vietnam.

Tout exercice de prévision est difficile, mais il l'est plus encore quand il s'applique à des régions où les montagnes (des cordillères), les collines et les hauts plateaux occupent l'essentiel d'un territoire entre Chine et Cambodge, très étendu en latitude, aux côtes d'orientations très variées et bordées par le golfe de Thaïlande, le golfe du Tonkin et la mer Bien Dong. Cette thèse n'est qu'un premier pas.

Introduction

Le Vietnam, situé au cœur de l'Asie du Sud-Est, s'étend le long de la côte orientale de la péninsule indochinoise sur 1 700 km du nord (23°23'N) au sud (8°27'N). Sa largeur n'excède pas 300 km (50 km pour la zone la plus étroite), avec une superficie de 331 000 km². Le territoire est délimité à l'est par la mer de Bien Dong (3 260 km de côtes), au nord par la Chine, à l'ouest et au sud-ouest par le Laos et le Cambodge. Le relief est très varié et formé, aux trois-quarts, de montagnes et de plateaux. On peut délimiter trois grandes régions (*figure 1*) :

- au nord, le Bac Bo, formé d'un secteur montagneux, dont le point culminant est le mont Phan Si Pan (3 142 m), qui entoure la vaste plaine du fleuve Rouge ;
- au centre, le Trung Bo, avec la chaîne Truong Son qui descend en pente douce vers le sud et le sud-ouest, mais qui tombe brutalement vers l'est en dominant l'étroite bande côtière de la mer Bien Dong (la mer sud de la Chine) ;
- au sud, le Nam Bo, essentiellement formé par la riche et vaste plaine du delta du Mékong.

Le climat du Vietnam

La connaissance des climats de l'Asie du Sud-Est a bénéficié de l'effort international et des chercheurs du pays. Actuellement, par exemple, l'expérience Asian Monsoon Years (AMY 2007-2012) est une étude réunissant vingt-quatre états qui est soutenue par le programme de recherche mondial sur le climat et reconnue par les programmes CLIVAR (Climate Variability and Predictability Project) et GEWEX (Global Energy and Water Cycle Experiment). Les détails sont accessibles sur :

http://www.wmo.ch/pages/prog/wcrp/documents/ASIAN_MONSOON_YEARS.pdf

Le climat vietnamien est de type tropical. Son caractère principal est d'être soumis au régime des moussons. Toutefois, le Vietnam connaît des types climatiques variés car son territoire s'étend sur de nombreuses latitudes et altitudes. Bien que le pays tout entier se

trouve placé dans la zone intertropicale, les conditions locales favorisent des hivers froids dans les montagnes les plus septentrionales, et des chaleurs humides subéquatoriales permanentes dans le delta du Mékong. Situés dans la zone des moussons de l'Est asiatique, le nord et le sud du Vietnam enregistrent une saison des pluies de mai à octobre, correspondant à l'été boréal, avec un maximum de pluies en août, tandis qu'au centre Vietnam, la saison se positionne entre août et décembre, et centrée sur octobre. Pendant la deuxième moitié de la mousson d'hiver (janvier-mars), le sud du Vietnam connaît une longue sécheresse, alors que le nord enregistre fréquemment un crachin que les Vietnamiens appellent « poussières de pluie ». Entre juillet et novembre, des typhons aussi violents qu'imprévisibles viennent souvent de l'océan, à l'est. Ils frappent le centre ou le nord du pays, causant de terribles dévastations.

Le rôle des pluies pour la société et l'économie du Vietnam

En 2002, le pays comptait plus de quatre-vingt-un millions d'habitants avec de fortes densités. Il a eu besoin de se remettre des ravages causés par la guerre, de la perte de l'aide financière de l'ancien Bloc Soviétique : entre 1993 et 1997, la croissance moyenne annuelle a avoisiné les 9 %.

L'Ambassade de France au Vietnam note que « *l'essor économique engagé en 1986 continue de porter ses fruits* » et que « *l'ouverture progressive de son économie a permis au Vietnam de s'intégrer progressivement aux échanges mondiaux et de développer une économie aujourd'hui fortement internationalisée* » : la croissance moyenne du PIB a été supérieure à 7 % sur les six dernières années et a atteint 8,2 % en 2006 (8,4 % en 2005). En fait, l'agriculture ne représente qu'un cinquième du PIB, d'après la Banque Mondiale ; ainsi, la part des principaux secteurs d'activités dans le PIB en 2005 se répartissait comme suit : industrie et mines : 41,0 % ; services : 38,1 %.

La FAO estime que le secteur agricole occupe 70 % de la population du Vietnam (<http://www.fao.org.vn/>). L'agriculture joue donc un rôle social important. « *Les exportations provenant de l'agriculture en 2008 représentent environ 11,67 milliards de dollars, soit 19,1 % des exportations du Vietnam* » (<http://vietnamnet.vn/kinhte>). Parmi les plantes cultivées, le riz est le plus important, car il est lié à la tradition culturelle et à l'histoire du Vietnam, « *la civilisation du riz* ». Ensuite, ce sont le caféier, le poivrier et l'anacadier...

L'astaciculture (élevage des écrevisses et crevettes) participe aussi au revenu des agriculteurs. Les productions agricoles (cultures et bétail) sont fortement tributaires des pluies, qui, quand elles sont fortes, peuvent causer la perte de plusieurs hectares de rizières et perturber la distribution des étangs de crevettes (www.thoitienguyhiem.net). Par contre, les trop faibles pluies diminuent les productions de plantes cultivées. « *La sécheresse de 1987-1998 a ainsi causé des dégâts se montant à 312 millions de dollars pour Taynguyen et Nambo* » (<http://www.vnexpress.net>).

La variabilité pluviométrique influence plusieurs secteurs industriels, particulièrement celui de l'électricité car les usines hydroélectriques fournissent environ 51 % de l'électricité du Vietnam (<http://www.evn.com.vn/>). Dans les années récentes, des sécheresses relatives récurrentes ont fait diminuer la production hydroélectrique, ce qui inquiète tout le pays.

Par ailleurs, des pluies diluviennes sont à l'origine d'inondations et de glissements de terrain, entraînant de graves famines et la perte de nombreuses vies humaines. Ces phénomènes sont surtout associés aux dépressions tropicales et cyclones (appelés ici tempêtes et typhons). Ainsi « *Le typhon appelé Lekima, avec des vents de 120 km/h, frappe le nord du Vietnam le 27 septembre 2007, et les inondations qui lui font suite sont à l'origine de la mort de soixante-dix personnes, de seize disparus, de dix mille maisons détruites, de cent vingt-cinq mille maisons endommagées, de quarante mille hectares de rizières et cent vingt mille hectares de terres détruites, d'un million quatre cent mille mètres cubes d'ouvrages routiers et hydrauliques anéantis* » (<http://vietbao.vn/>).



Lekima n'est qu'un exemple. En fait, pour le Centre d'Étude et de Coopération Internationale, le Vietnam serait un des dix pays les plus menacés par les cataclysmes causés par le bouleversement mondial du climat. C'est, dans tous les cas, une région qui subit des

aléas météorologiques importants. Ainsi, en septembre 2005, le typhon Damrey s'est abattu sur les côtes du Vietnam où trois cent mille personnes ont été déplacées ; en août 2008, des centaines de gens ont été tués au Vietnam et au Laos suite à l'élévation du niveau du Mékong, alors que le nord du pays enregistrait les pires inondations depuis des décennies, liées au passage de la tempête tropicale Kammuri, la neuvième de la saison, causant la mort de cent soixante personnes. Le gouvernement a dû définir un programme pour construire des digues et reloger plus de trente-trois mille familles de riziculteurs.

Ceci explique pourquoi la variabilité spatio-temporelle des champs de pluies et, particulièrement, les prévisions de l'onset et des cumuls saisonniers de la future saison des pluies sont une préoccupation majeure de la société vietnamienne.

La prévision saisonnière et la gestion des risques au Vietnam

La distribution spatio-temporelle des champs de pluies et les champs climatiques (température, humidité, insolation, vent...) ont été étudiés très tôt et de façon très minutieuse (Climat de l'Indochine, Bluzon E. et Carton P., 1930 ; Climat du Vietnam, Pham N.T. et Phan T.D., 1993 ; Climat et ressources climatiques du Vietnam, Nguyen D.N. et Nguyen T.H., 2004). Toutefois, la prévision saisonnière est un sujet très neuf pour le Vietnam, initié en 2001 avec le projet « Expérience d'enquête et de prévision climatiques au Vietnam » de l'Institut de Météorologie et d'Hydrologie. Ce projet vise à élaborer des données et à choisir les méthodes de prévision (Nguyen D.C., 2002). Les prévisions climatiques sont présentées sur le site Internet (<http://www.imh.ac.vn>). Toutefois, elles sont très simples, leur précision et leur performance n'ont pas encore été vérifiées.

Pham Sy Liêm, vice-président de l'Association générale de construction du Vietnam, disait le 5/11/2008 en parlant des dernières inondations de Hanoï: « *Dans l'immédiat, la ville doit élaborer une carte des zones inondables, centraliser les données de pluviosité pour prévoir l'ensemble des zones pouvant être inondées. Cela permettra aux organismes compétents et à la population de se préparer aux conséquences du changement climatique, dont les premières sont les pluies torrentielles et les crues. Sans oublier la création d'un service indépendant chargé de la lutte contre les inondations. En cas de nécessité, il pourra mobiliser l'assistance de scientifiques et d'experts. Ces récentes catastrophes nous invitent à réfléchir sur les moyens de prévention d'autres de même genre qui pourraient survenir par la suite.* ».

Le delta du fleuve Rouge est en effet l'une des principales zones de peuplement et développement économique du Vietnam. La nécessité est donc de maîtriser risques d'inondation et disponibilité de l'eau. Or le développement économique, modifie l'occupation des sols dans le delta et augmente les capitaux investis sans que pourtant la contrainte pluviométrique (inondations) ne soit prise en compte. Le réseau actuel des digues suffit-il à protéger le delta en cas de crue exceptionnelle qui excéderait le niveau de protection atteint ? On sait par ailleurs qu'avec le changement climatique les crues pourraient devenir à la fois plus importantes, plus longues et plus fréquentes dans la région : le Vietnam sera l'un des pays les plus touchés par les calamités naturelles, selon le rapport sur les changements climatiques publié récemment par la Banque mondiale et l'ONU.

Ce petit exemple montre que, vue de l'utilisateur final, la prévision saisonnière est au service de la gestion des risques et des politiques d'adaptation dans le sens où les anomalies pluviométriques causent des inondations. De façon plus large, les variations des cumuls saisonniers affectent aussi la sécurité alimentaire, le développement économique et social du Vietnam. Dans ce cadre l'information donnée par la prévision peut donc moduler la conception et la durabilité de nombreuses activités socio-économiques : ressources en eau, agriculture, urbanisme, transport, tourisme, exploitation des infrastructures. Les prévisions, permettent ainsi d'accroître l'adaptation et l'évaluation de la vulnérabilité car cette dernière fait partie de la gestion du risque. La vulnérabilité est en effet le « degré par lequel un système risque de subir ou d'être affecté négativement par les effets néfastes des changements climatiques, y compris la variabilité climatique et les phénomènes extrêmes » (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2001). En 1995, par exemple, de très fortes inondations au Vietnam ont fait grimper le prix des denrées alimentaires et créé des pressions inflationnistes que l'aide extérieure n'a pas pu entièrement neutraliser.

Le contexte et l'objectif de la thèse

En 2003, un projet de coopération France-Vietnam portant sur « Études de Géophysique intégrées dans le Système Soleil-Terre » a été mis en place par le Dr Christine Mazaudier et le Dr Le Huy Minh. Dans le cadre de ce projet, la thèse intitulée « *Étude climatique de la mousson vietnamienne et applications à la prévision saisonnière : processus physiques associés aux cycles de l'eau, flux verticaux et flux d'humidité atmosphérique, cycles annuels moyens et perturbés, étude de prévisibilité* » a pu commencer en 2005, sous la

direction des Dr Bernard Fontaine et Nathalie Philippon, et avec l'aide des Dr Le Huy Minh et Nguyen Xuan Anh.

Cette thèse vise à documenter les processus physiques et dynamiques associés à la circulation de mousson vietnamienne d'échelles régionale et synoptique, afin d'étudier la prévisibilité de ses principales composantes et de mettre en place des méthodes statistico-dynamiques de prévision des pluies de l'échelle saisonnière à celle des événements. Elle s'articule en deux parties.

La première partie est, en fait, une étude climatique fondée sur l'analyse diagnostique des données :

- d'abord, les données stationnelles des pluies et des températures mensuelles sur la période 1960-2000 sont utilisées pour analyser le cycle moyen et la variabilité interannuelle de ces champs sur les sept régions climatiques traditionnelles du Vietnam à l'aide des précipitations observées en diverses stations. Des classifications et des corrélations sont appliquées sur les données de pluies afin de définir les sous-régions sur lesquelles seront calculés des indices spatiaux pour analyser les chroniques d'évolution et définir les prédictants et prédicteurs pour la seconde partie ;
- ensuite, les données atmosphériques de réanalyse du NCEP/DOE2 et les estimations pluviométriques du CMAP sur la période 1979-2004 en $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ sont utilisées pour décrire les processus de base, le cycle annuel moyen et la variabilité de la mousson dans la gamme des pas de temps synoptiques à interannuel.

La seconde partie est une étude de prévisibilité des précipitations saisonnières :

- les données de pluie *in situ* et le vent à 1 000 hPa sont utilisées pour définir l'onset de pluie sur le sud et le nord Vietnam. Les dates d'onset sont prévues en se basant sur les indices régionaux qui sont sélectionnées à partir de données NCEP/DOE2 ;
- la prévisibilité des cumuls saisonniers de pluies est définie par la double utilisation des modèles couplés et la prévision statistique.

Le mémoire s'articule en cinq chapitres

Le premier chapitre introduit les données et les méthodes utilisées pour analyser les principaux caractères climatologiques, définir les prédictants et prédicteurs, et les prévisions.

Le deuxième chapitre présente d'abord l'évolution temporelle (le cycle annuel moyen et la variabilité interannuelle) des champs de températures et de pluies sur sept régions climatiques vietnamiennes à partir des données des quarante-quatre stations sélectionnées sur la période 1960-2000. Ensuite, les prédictants sont définis en appliquant les méthodes de classification et d'analyse de corrélation sur les données de pluies *in situ*.

Le troisième chapitre décrit les caractéristiques générales de la circulation de mousson en lien avec les précipitations (cycle moyen annuel, variabilité), ce qui conduit à replacer le Vietnam dans le contexte plus large du sud-est asiatique.

Le quatrième chapitre définit l'onset de la saison des pluies au sud Vietnam et au nord Vietnam et sa prévisibilité.

Le cinquième et dernier chapitre analyse la prévisibilité des cumuls saisonniers de pluies au Vietnam, à partir des sorties de modèles couplés du projet européen ENSEMBLES et des données réanalysées des NCEP/DOE2.



Figure 1 : La carte du relief du Vietnam

Chapitre 1

Données et méthodes

Ce chapitre présente simplement les données sélectionnées et l'approche méthodologique. Il est relativement bref puisque le détail de ces éléments peut être consulté sur les sites mentionnés dans le texte et les références bibliographiques.

1.1 Les données

1.1.1 Données d'observations *in situ*

✓ *Données de précipitations*

Deux fichiers de précipitations établis par l'Institut de Météorologie - Hydrologie du Vietnam ont été utilisés dans cette étude :

1) Le premier fichier concerne les cumuls de pluies mensuels de quarante-quatre stations sur sept régions climatiques du Vietnam pendant la période 1960-2000, qui ont d'abord été retenus pour estimer le caractère pluviométrique selon l'espace considéré et définir des domaines homogènes quant à la pluviométrie. Les positions des stations et des régions sont indiquées en figure 1.1 et leurs caractères géographiques (latitude, longitude, altitude) sont présentés dans le tableau 1.4. Les sept régions climatiques du Vietnam :

- la région Taybac se situe au nord-ouest du Vietnam, symbolisée par 'N1' sur la figure 1.1. C'est la région la plus élevée avec le relief le plus accidenté du Vietnam. Elle comprend sept stations : Dien Bien, Hoa Binh, Lai Chau, Mai Chau, Moc Chau, Muong Te et Son La ;

- la région Dongbac se situe au nord-est du Vietnam. Elle est symbolisée par 'N2'. C'est une région aux reliefs très variés avec des chaînes de montagnes, des collines, des plateaux et des vallées. Elle comprend sept stations : Bac Quang, Yen Bai, Van Chan, Cao Bang, Ha Giang, Hon Gai et Lang Son ;

- la région DBBB, symbolisée par 'N3', correspond à la plaine du delta du fleuve Rouge au nord du Vietnam. Elle comprend sept stations : Vinh Yen, Bac Giang, Ha Noi, Nam Dinh, Ninh Binh, Phu Lien et Son Tay ;

- la région BTB se situe au nord du centre du Vietnam ('N4') sur un cordon de plaines à l'est des hautes montagnes de la chaîne Truong Son. On y dénombre huit stations : Bai Thuong, Thanh Hoa, Tinh Gia, Tuong Duong, Vinh, Ha Tinh, Dong Hoi et Hue ;

- la région NTB se situe au sud du centre du Vietnam ('S1'), à l'est de la chaîne Truong Son. Elle comprend six stations : Da Nang, Quang Ngai, Quy Nhon, Tuy Hoa, Nha Trang et Phan Thiet ;

- la région Taynguyen ('S2') se situe sur de hauts plateaux sur le versant ouest au sud de la chaîne Truong Son. Elle comprend quatre stations : Playcu, Ban Me Thuat, Da Lat et Bao Loc ;

- la dernière région est Nambo, symbolisée par 'S3', dans la plaine du delta du Mékong au sud du Vietnam. Elle comprend cinq stations : Vung Tau, Can Tho, Giach Gia, Phu Quoc et Ca Mau.

Ces stations ont été sélectionnées parmi cent soixante-dix stations météorologiques disponibles sur le Vietnam en fonction de la qualité des mesures, de la faiblesse des lacunes, de la longueur des relevés et de leur répartition sur le pays. Ce sont toutes des stations de première classe au Vietnam et représentant bien la région. Ces données sont quasi complètes sur toutes les régions disponibles, les données manquantes étant de moins de 2.4 % (tableau 1.1). Ces manques ont été remplacés par la moyenne mensuelle de la région calculée sur la période 1960-2000.

Tableau 1.1 : Pourcentage de données de pluies manquantes sur les sept régions du Vietnam pendant la période 1960-2000.

Régions	Taybac	Dongbac	DBBB	BTB	NTB	Taynguyen	Nambo
Données manquantes (%)	0.67	0.35	0.15	1.07	1.39	2.39	1.02

2) Le deuxième fichier : les données de pluies au pas de temps journalier de vingt stations sur la période 1979-2004 ont été retenues pour définir les indices pluviométriques qui serviront à calculer les dates de l'onset de mousson et de prévoir les cumuls saisonniers de pluies. Ces stations appartiennent aux quarante-quatre stations du premier fichier, sauf deux stations : Tay Ninh et Tan Son Nhat (en rouge dans la figure 1.1). Le tableau 1.2 présente les manques aux stations en pourcentages. Ils sont inférieurs à 1 %, sauf à Hon Gai (3.2 %). Ces manques ont été remplacés par la moyenne journalière de la station calculée sur la période 1979-2004.

Tableau 1.2 : Pourcentages de données manquantes sur vingt stations du Vietnam pendant la période 1979-2004.

Nord VietNam		Centre VietNam		Sud VietNam	
Stations	Manques (%)	Stations	Manques (%)	Stations	Manques (%)
Lai Chau	0	Vinh	0.96	Bao Loc	0
Moc Chau	0	Dong Hoi	0.32	Tay Ninh	0
Ha Giang	0	Da Nang	0	T.S.Nhat	0
Yen Bai	0.95	Quy Nhon	0	Can Tho	0
Lang Son	0	Nha Trang	0	Rach Gia	0.35
Hon Gai	3.2			Ca Mau	0
Ha Noi	0				
Nam Dinh	0.32				
Thanh Hoa	0.65				

✓ *Données de températures*

Les données de températures de l'air mensuelles en surface de quarante-quatre stations sur la période 1960-2000 ont été ajoutées pour étudier la variabilité thermique dans le cycle annuel et interannuel. La qualité des données est présentée dans le tableau 1.3 pour sept régions climatiques. On observera que, dans le sud du Vietnam, le nombre de manques est élevé en raison de la guerre qui a perturbé longtemps la collecte de l'information. Par ailleurs, les données de températures sont incomplètes pour les stations observées par les agriculteurs.

Tableau 1.3 : Pourcentages de données de températures manquantes sur les sept régions du Vietnam pendant la période 1960-2000.

Régions	Taybac	Dongbac	DBBB	BTB	NTB	Taynguyen	Nambo
Données manquantes (%)	1.89	1.36	0.35	3.38	2.27	5.64	6.50

Tableau 1.4 : Les 46 stations météorologiques du Vietnam utilisées dans cette étude. Les 2 dernières se réfèrent à la seule période 1979-2004.

N°	Nom	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Altitude (m)	Données mensuelles (P=pluie ; T=température)	Données journalières
La région Taybac (nord-ouest - N1)						
1	Dien Bien	21.40	103.02	479	P, T (1960-2000)	
2	Hoa Binh	20.82	105.33	23	P, T (1960-2000)	
3	Lai Chau	22.07	103.15	244	P, T (1960-2000)	P (1979-2004)
4	Mai Chau	20.67	105.05	160	P, T (1960-2000)	
5	Moc Chau	20.82	104.70	958	P, T (1960-2000)	P (1979-2004)
6	Muong Te	22.38	102.83	310	P, T (1960-2000)	
7	Son La	21.32	103.88	676	P, T (1960-2000)	
La région Dongbac (nord-est - N2)						
8	Bac Quang	22.50	104.87	74	P, T (1960-2000)	
9	Yen Bai	21.72	104.85	56	P, T (1960-2000)	P (1979-2004)
10	Van Chan	21.58	104.52	257	P, T (1960-2000)	
11	Cao Bang	22.65	106.25	258	P, T (1960-2000)	
12	Ha Giang	22.82	104.98	118	P, T (1960-2000)	P (1979-2004)
13	Hon Gai	20.97	107.07	87	P, T (1960-2000)	P (1979-2004)
14	Lang Son	21.87	106.77	259	P, T (1960-2000)	P (1979-2004)
La région DBBB (delta du fleuve Rouge - N3)						
15	Vinh Yen	21.28	105.58	10	P, T (1960-2000)	
16	Bac Giang	21.28	106.22	7	P, T (1960-2000)	
17	Ha Noi	21.03	105.85	5	P, T (1960-2000)	P (1979-2004)
18	Nam Dinh	20.40	106.15	3	P, T (1960-2000)	P (1979-2004)
19	Ninh Binh	20.23	105.97	2	P, T (1960-2000)	
20	Phu Lien	20.80	106.63	113	P, T (1960-2000)	
21	Son Tay	21.13	105.50	12	P, T (1960-2000)	
La région BTB (nord du centre Vietnam - N4)						
22	Bai Thuong	19.92	105.37	21	P, T (1960-2000)	
23	Dong Hoi	17.47	106.62	7	P, T (1960-2000)	P (1979-2004)
24	Ha Tinh	18.40	105.90	3	P, T (1960-2000)	
24	Hue	16.40	107.70	17	P, T (1960-2000)	
25	Tuong Duong	19.28	104.43	97	P, T (1960-2000)	
26	Thanh Hoa	19.82	105.78	5	P, T (1960-2000)	P (1979-2004)
27	Tinh Gia	19.58	105.78	5	P, T (1960-2000)	
29	Vinh	18.67	105.67	6	P, T (1960-2000)	P (1979-2004)
La région NTB (sud du centre Vietnam - S1)						
30	Da Nang	16.03	108.18	6	P, T (1960-2000)	P (1979-2004)
31	Nha trang	12.25	109.20	5	P, T (1960-2000)	P (1979-2004)
32	Phan Thiet	10.93	108.10	9	P, T (1960-2000)	
33	Quang Ngai	15.13	108.78	8	P, T (1960-2000)	
34	Quy Nhon	13.77	109.22	5	P, T (1960-2000)	P (1979-2004)
35	Tuy Hoa	13.08	109.28	12	P, T (1960-2000)	
La région Taynguyen (hautes plateaux du centre Vietnam - S2)						
36	Bao Loc	11.47	107.80	850	P, T (1960-2000)	P (1979-2004)
37	Ban Me Thuot	12.67	108.05	490	P, T (1960-2000)	
38	Da Lat	11.95	108.43	1513	P, T (1960-2000)	
39	PLaycu	13.98	108.00	800	P, T (1960-2000)	
La région Nambo (delta du Mékong - S3)						
40	Ca Mau	9.17	105.17	3	P, T (1960-2000)	P (1979-2004)
41	Can Tho	10.03	105.78	3	P, T (1960-2000)	P (1979-2004)
42	Phu Quoc	10.22	103.97	2	P, T (1960-2000)	
43	Rach Gia	10.00	105.08	2	P, T (1960-2000)	P (1979-2004)
44	Vung tau	10.33	107.08	4	P, T (1960-2000)	
45	Tan Son Nhat	10.82	106.67			P (1979-2004)
46	Tay Ninh	11.32	106.07			P (1979-2004)

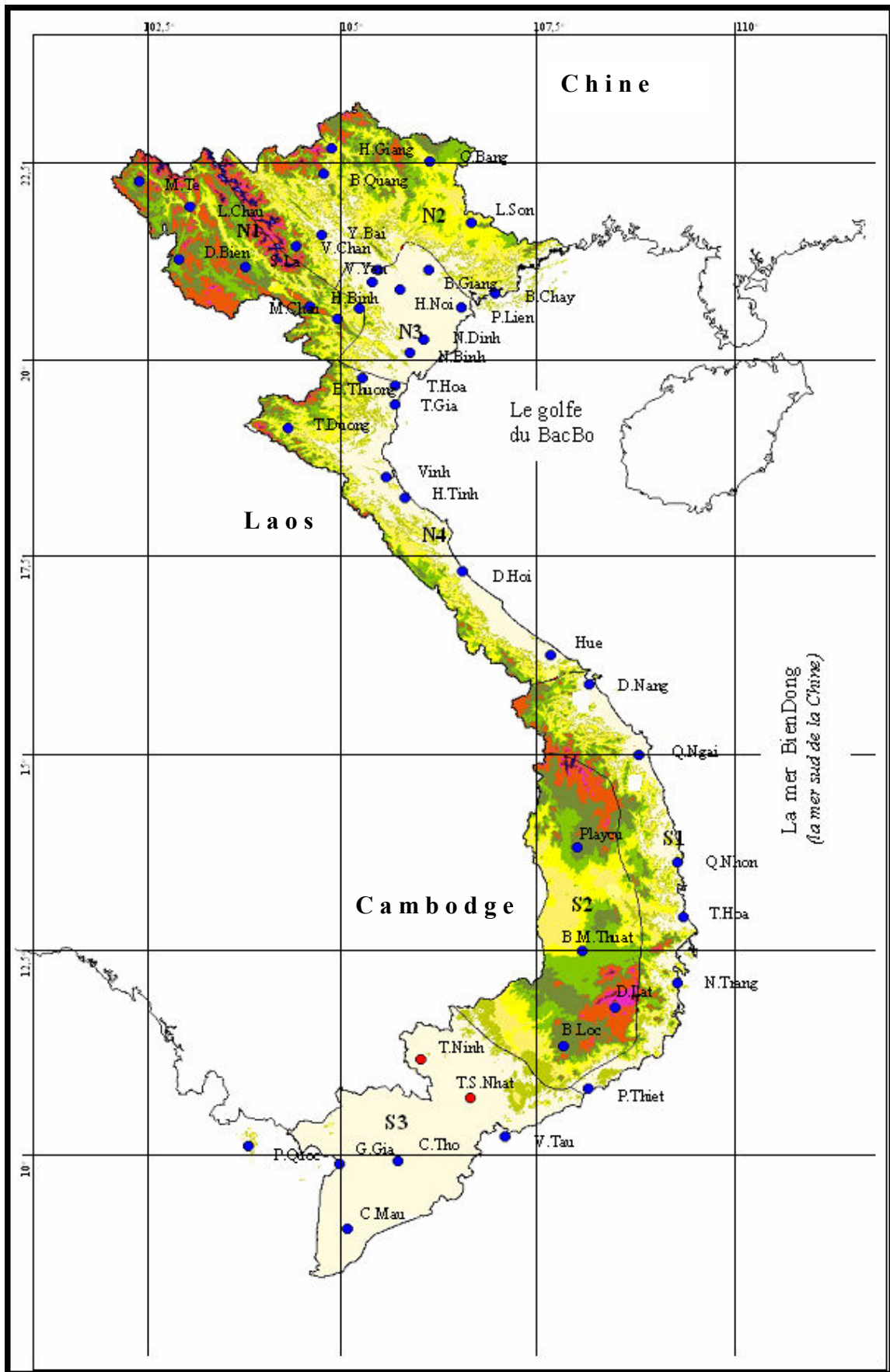


Figure 1.1 : Positions des stations pluviométriques sélectionnées (les stations en rouge sont considérées seulement sur la période 1979-2004).

1.1.2 Les estimations satellitales - données CMAP

Le fichier des données CMAP (Climate Prediction Center Merged Analysis Precipitation) a été constitué au sein du CPC par Xie et Arkin (1997). Avec un pas de temps mensuel et une grille $2,5^\circ \times 2,5^\circ$, il couvre l'ensemble du globe sur la période 1979 à aujourd'hui. La particularité de ces données est qu'elles sont construites à partir d'observations pluviométriques d'origines différentes. Elles incluent :

- *des données de pluviomètres* vérifiées et mises en forme par le Global Precipitation Climatology Centre (GPCC),
- *des données d'observations satellitales*, incluant des observations dans les parties visible et infrarouge du spectre électromagnétique, dans les radiations sortantes grandes ondes (OLR) et micro-ondes ; une revue de ces différents types de mesures satellitales de la pluviométrie est donnée dans Kidd (2001).
- *de façon optionnelle, des données réanalysées du modèle numérique du NCEP/NCAR.*

Dans une première étape, les données satellitales et réanalysées sont combinées selon la méthode d'estimation du maximum de vraisemblance. Dans un deuxième temps, les données issues de la première étape sont mélangées aux données des pluviomètres. Cette combinaison linéaire des différents types de données mise au point permet de tirer les avantages de chaque source de données et donc de produire les meilleures données analysées possibles : les champs pluviométriques continentaux sont essentiellement basés sur les données des pluviomètres, les champs océaniques sur les données satellitales, les réanalyses intervenant plutôt dans les régions mal documentées par les deux sources précédentes (Arctique et océans austraux).

➔ En fait, deux sous-fichiers CMAP existent, la différence portant sur l'intégration ou non des réanalyses du NCEP/NCAR. Nous avons travaillé avec le sous-fichier ne comprenant pas les réanalyses, de façon à être le plus proche possible de l'observation *in situ* (Philippon, 2002).

1.1.3 Les données relatives à la dynamique atmosphérique

✓ *Les réanalyses du NCEP/NCAR (R-1)*

Les données réanalysées des National Center for Environmental Prediction et National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) sont issues d'une assimilation de données

provenant de différentes sources (observations bateaux, radio-sondages, estimations satellitaires...) par un modèle numérique de prévision du temps (Kalnay *et al.*, 1996). Elles documentent, à l'échelle globale et sur plusieurs niveaux, à la verticale de nombreux champs atmosphériques et continentaux sur la période 1948 à aujourd'hui à différents pas de temps.

Ces champs ont été classés en quatre catégories selon l'influence relative des données observées par rapport au modèle dans la détermination de la valeur de la variable réanalysée. Les classes s'échelonnent de « A », pour les variables principalement influencées par les données observées et donc considérées comme très fiables, à « C » pour des variables uniquement déterminées par le modèle. Ces dernières doivent être utilisées avec précaution pour tout diagnostic.

✓ *Les réanalyses du NCEP/DOE AMIP-II (R-2)*

Ce projet a été initié en 1998, avec la mise à disposition des ressources de calcul du Department Of Energy (DOE) américain et sous l'impulsion du projet AMIP-II (Atmospheric Model Intercomparison Project – reanalysis II). Dans cette version, les précipitations modèles ont été remplacées par les précipitations observées (satellite + *in situ*) pour chaque période pentadaire (5 jours). Des améliorations ont été apportées à la fois sur les erreurs humaines et la physique du modèle (Kanamitsu *et al.*, 2002). Les données NCEP/DOE AMIP-II sont disponibles sur la période 1979 à aujourd'hui.

Ce sont les réanalyses R-2 qui seront privilégiées dans cette thèse. Parmi l'ensemble des pas de temps et des champs existants, nous avons retenu le pas de temps mensuel et le pas de temps journalier des huit variables recensées dans le tableau 1.5.

Tableau 1.5 : Récapitulatif des principales caractéristiques des champs mensuels et journaliers des réanalyses NCEP/DOE AMIP-II utilisées.

Données	Unité	classe	Nb de niveaux	Grille
T : température	°C	A	17 (1 000 à 100 hPa)	régulière (2,5°x2,5°)
U : vent zonal	m.s ⁻¹	A	17	régulière
V : vent méridien	m.s ⁻¹	A	17	régulière
Ω : vitesse verticale	P.s ⁻¹	A	17	régulière
wtr : eau précipitable	kg.s ⁻²	B	surface	gaussienne
Mslp : pression au niveau de la mer	hPa	A	surface	gaussienne
Shum : humidité spécifique	g.kg ⁻¹	B	surface	gaussienne
Air : température à 2 m	°K	B	surface	gaussienne

1.1.4 Les données de TSM

Les données de températures de surface de la mer retenues dans cette étude proviennent de la version 2.3 du fichier GISST (Global sea Ice and Sea Surface Temperature) du Hadley Centre, United Kingdom Meteorological Office (UKMO). Élaboré par Rayner *et al.* (1996), il met à disposition, sur la période 1871 à aujourd'hui, des données mensuelles analysées de TSM sur une grille de 1° x 1°. La nouvelle climatologie 1961-1990 dans la version utilisée, ainsi que la nouvelle technique de reconstruction des manques et d'interpolation par analyse en composantes principales (ACP) apportent des améliorations notables par rapport à la version 2.0 précédente : les TSM des océans austraux et les gradients de températures à proximité des grands courants ou des zones d'upwelling sont mieux reproduits. Ce fichier semble donc plus pertinent pour l'estimation des anomalies et la détection des changements climatiques (Parker *et al.*, 1995). D'autre part, son accessibilité en ligne et sa mise à jour mensuelle en font une base pratique pour les prévisions opérationnelles.

1.1.5 Les données issues des sorties de modèles couplés du projet européen ENSEMBLES

Les simulations analysées ont été générées dans le cadre du projet européen ENSEMBLES. Ce projet a pour but le développement d'un système de prévision d'ensemble s'appuyant sur l'état de l'art des modèles couplés globaux et régionaux et de son évaluation au regard des observations. Dans le cadre du thème de recherche n°1 consacré aux activités de la prévision saisonnière à décennale, un ensemble, basé sur cinq modèles couplés différents avec neuf membres chacun, a été développé. Il fournit deux jeux de prévisions saisonnières sur sept mois initialisés le 1^{er} mai et le 1^{er} novembre pour la période 1991-2001 (Hewitt, 2005). Pour les objectifs de notre étude, nous avons travaillé avec les données des simulations démarrées au 1^{er} mai avec les cinq modèles couplés suivants :

- DPSYS : utilisé par le système de prévision décadaire du Met. Office britannique ;
- ECMWF : le modèle couplé de prévision saisonnière utilisé à l'ECMWF ;
- GLOSEA : le système de prévision saisonnière global du Met. Office britannique ;
- IFMK : le modèle couplé utilisé pour la prévision saisonnière par l'Institut für Meereskunde/Geomar Kiel ;
- MTFCE : le modèle couplé de prévision saisonnière de Météo France.

(http://www.ecmwf.int/research/EU_projects/ENSEMBLES/table_experiments/index.html)

1.2 Les méthodes

N.B. Cette section est principalement basée sur l'ouvrage de Nathalie Philippon (2002) téléchargeable sur le site : <http://www.u-bourgogne/climatologie/staff/nathalie/>

Les méthodes sélectionnées ont été utilisées afin d'atteindre les objectifs suivants :

- définir les indices pluviométriques saisonniers et les futurs prédictants, qui soient à la fois cohérents dans l'espace (région homogène) et dans le temps (variabilités intra et interannuelle homogènes),
- sélectionner les signaux régionaux qui, dans le système océan-atmosphère-continent, renseignent l'état futur du prédictant,
- synthétiser ces signaux afin qu'ils puissent servir de prédicteurs dans des modèles statistiques de prévision.

1.2.1 L'analyse en composantes principales (ACP)

Réaliser une ACP revient à remplacer n variables $x_1 \dots x_i$ corrélées entre elles, par de nouvelles variables $c_1 \dots c_i$, appelées composantes principales. Ces composantes sont des combinaisons linéaires non corrélées entre elles et de variance maximale des variables initiales (Saporta, 1990). Lorsque les variables représentent l'espace et les observations le temps, une ACP permet de mettre en évidence les ressemblances et les oppositions en termes de variabilité temporelle des unités géographiques. Cependant, la procédure de maximisation de la variance inhérente à la méthode peut conduire à la création de composantes artificielles ne représentant pas de structures spatiales véritables. Pour des objectifs de régionalisation, Richman (1986) a montré l'apport de la procédure de rotation qui consiste à redistribuer l'information contenue dans les k premières composantes, entre k nouvelles composantes : les CP issues d'une ACP avec rotation individualisent et stabilisent davantage les structures spatiales, surtout lorsqu'elles sont d'une échelle supérieure à celle du domaine analysé.

La méthode d'ACP a été employée de façon limitée et à deux fins : créer des indices multivariés et aider à la définition des prédictants.

• Création d'indices synthétiques par ACP

Lorsque plusieurs signaux océano-atmosphériques représentent les différentes composantes d'un seul et même mécanisme climatique reconnu ou supposé, il peut être intéressant de les synthétiser plutôt que de n'en conserver qu'un seul : le choix d'un indice unique est subjectif et incomplet. L'intérêt d'appliquer une ACP sur de tels indices est évident : la première composante explique la majeure partie de la variance de départ et

possède un bon sens physique et une valeur de corrélation avec le prédicteur généralement équivalente ou supérieure à la plus forte valeur obtenue entre le prédicteur et chaque indice séparément. Le prédicteur multivarié obtenu est aussi plus robuste.

- Recherche des limites spatio-temporelles des prédicteurs par ACP

Pour trouver les limites spatiales et les indices pluviométriques saisonniers, nous avons travaillé par ACP avec rotation Varimax. Ici, les séries temporelles des quarante et un ans des quarante-quatre stations retenues ont donc été considérées comme des variables à part entière.

1.2.2 L'analyse spectrale

L'analyse des cycles a été entreprise à partir de méthodes spectrales. Rappelons que l'**analyse spectrale** décompose la variance totale (l'énergie) d'une série chronologique sans lacune en des variances (des énergies) particulières associées à chaque harmonique. Elle mesure en fait la distribution de la variance sur toutes les longueurs d'onde comprises entre l'infini et deux fois le pas de temps de la série. Lorsque l'échantillon n'est pas organisé, les niveaux d'énergie sont du même ordre de grandeur : on parle alors de « bruit blanc ». L'énergie contenue dans une harmonique peut être calculée selon différentes méthodes : à partir de la fonction d'autocorrélation, par décomposition en série de Fourier (FFT), et par la méthode de l'entropie maximum (MEM). Les résultats reportés dans cette thèse ont été établis sur la base de décompositions FFT.

Tests de signification : chaque spectre a été testé à l'aide de mille simulations de Monte Carlo effectuées sur les séries temporelles analysées avec permutations aléatoires des rangs. Les mille spectres obtenus ont été classés par ordre croissant en fonction de la distribution des PSD (Densité spectrale ou Power Spectral Density) pour chacune des harmoniques. Chaque PSD dépassant la 95^e valeur a été jugée significative à $p=0.05$ (seuil de confiance = 95 %).

1.2.3 Les corrélations linéaires

C'est la méthode la plus classique pour détecter des téléconnexions entre deux paramètres climatiques car elle se fonde sur la variance commune entre les variables. En corrélant une première variable fixée en un point et prise au temps t (dans cette étude, par exemple, la pluie) et une seconde variable représentée en champ (TSM, pression au niveau de la mer...) et considérée au temps $t-n$, on obtient une carte des corrélations décalées entre ces paramètres. Les noyaux de corrélation apparaissant sur la carte localisent les régions sur lesquelles s'établit le plus la connexion au temps $t-n$. La significativité statistique de la connexion est obtenue en testant la valeur des coefficients de corrélation avec le test de Bravais Pearson et/ou par simulations de Monte Carlo.

Lorsqu'on travaille sur des connexions décalées dans le temps, les coefficients sont parfois inférieurs à ceux obtenus en synchrone (rôle du cycle saisonnier, faible inertie de certaines composantes du système climatique). Or, à nombre d'observations/degrés de liberté égal, il y a un risque de rejeter statistiquement l'existence de la connexion. Le choix des signaux à conserver doit donc se baser aussi sur l'analyse de l'évolution intermensuelle de la connexion. Cependant, un affaiblissement, voire une disparition du signal à mesure que le décalage diminue ne doit pas conduire à invalider systématiquement la connexion, surtout lorsqu'elle implique des champs atmosphériques dont la persistance est typiquement inférieure à quinze jours. Dans ce cas de figure, la connexion peut être relayée par une troisième variable : c'est typiquement le cas du forçage atmosphérique sur l'océan. Le choix des paramètres à corrélérer et le choix des signaux à conserver comme prédicteurs potentiels ne doivent donc surtout pas se faire sur la seule base de la significativité statistique. Ils doivent s'appuyer sur les mécanismes climatiques et physiques qui sous-tendent la corrélation.

D'autre part, dans la perspective du développement de schémas statistiques de prévision des pluies, il est important que les différents signaux précurseurs identifiés soient non redondants afin qu'ils puissent modéliser la plus grande part de la variance de précipitations. L'utilisation des coefficients de corrélation linéaire partielle permet de s'assurer d'une certaine indépendance statistique des signaux dans la mesure où l'influence d'un ou plusieurs signaux déjà identifiés est enlevée lors de la recherche de nouvelles connexions.

Le coefficient de corrélation partielle entre deux variables indépendamment d'une troisième s'obtient par la formule suivante (Saporta, 1990) :

$$r_{yx1.x2} = \frac{r_{yx1} - (r_{yx2} \times r_{x1x2})}{\sqrt{(1 - r_{yx2}^2) \times (1 - r_{x1x2}^2)}}$$

où y et x_1 sont les deux variables à corrélérer et x_2 la troisième variable dont on veut éliminer l'influence.

1.2.4 Les composites

La méthode des composites est utilisée pour voir si un signal préalablement identifié dans un premier paramètre z (ici la pluie) apparaît dans un second paramètre v (Von Storch et Zwiers, 1999). Deux échantillons (les composites) contenant les valeurs prises par v quand z connaît respectivement des anomalies négatives et positives marquées ont été construits. On conclut ensuite à l'existence statistique du signal dans v en testant la différence des moyennes des deux échantillons grâce au test en t de Student. Il est recommandé de faire des analyses avec différents seuils d'anomalies pour z , afin de s'assurer que les composites représentent

bien l'état pris par v pour tout signal dans z . De même que pour les téléconnexions décalées, il est possible de considérer z et v à deux pas de temps différents et de travailler de façon partielle en supprimant ou gardant dans les échantillons les observations comportant un signal particulier, par exemple l'ENSO (Montecinos *et al.*, 2000 ; Camberlin et Philippon, 2002 entre autres).

L'un des avantages de la méthode des composites par rapport, notamment, à la méthode des corrélations linéaires est qu'aucune hypothèse n'est faite sur le type de relation entre les deux paramètres z et v étudiés : cette relation peut tout aussi bien être linéaire que non linéaire. Par contre, on suppose que les anomalies de z sont toujours associées ou dues aux mêmes types d'anomalies dans v . D'autre part, la composite, fondée sur la comparaison des moyennes, est plus robuste, moins sensible aux valeurs extrêmes. Les autres avantages ainsi que les limites des composites sont plus amplement rappelés dans Sun *et al.* (1999) et Ward (1992).

1.2.5 La régression linéaire multiple (RLM)

Les données et objectifs d'une régression linéaire multiple appliquée à notre étude de prévisibilité et prévision des dates d'onset de mousson et des cumuls saisonniers de pluie peuvent être posés ainsi : soit une saison des pluies décrites à l'aide d'un groupe X de prédicteurs x_j (indices de TSM, de PNM, d'ESH...) ainsi qu'avec un indice de cumul pluviométrique y ; on cherche à reconstruire y au moyen des x_j .

Ceci s'effectue par l'équation :

$$y^* = b_0I + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_jx_j$$

où l'on désire que y^* soit le plus proche possible de y (Saporta, 1990). Il faut donc estimer les coefficients b_j afin que $|y^*-y|$ qui correspond au critère des moindres carrés soit minimal. Lorsque le but est de prévoir la valeur y_{l+1} d'une $l^{\text{ème}} + 1$ saison des pluies dont on connaît les valeurs des prédicteurs x_j , et, ayant préalablement calculé les paramètres b_j sur un échantillon, on pose :

$$y_{l+1} = b_0I + b_1x_{l+1} + b_2x_{2+l} + \dots + b_jx_{j+l}$$

Si les prédicteurs ont été centrés et réduits, et s'ils sont non colinéaires, les paramètres b_j donnent le poids relatif de chaque prédicteur dans la détermination du cumul pluviométrique.

1.2.6 L'analyse discriminante linéaire (ADL)

L'analyse discriminante recherche la combinaison linéaire des prédicteurs x_i permettant de séparer au mieux les k classes de cumul pluviométrique y . On obtient une

fonction linéaire du type RLM pour chaque classe. L'affectation d'une $I^{\text{ème}} + 1$ saison des pluies connaissant les valeurs des prédicteurs x_j revient à un problème de classement. En posant que chaque classe Q à la même probabilité p_i d'apparaître et d'après la règle bayésienne, la probabilité de classer le nouvel individu dans la catégorie Q_i est notée :

$$P(Q_i / x) = \frac{p_i f_i(x)}{\sum_{i=1}^k p_i f_i(x)}$$

où $f_i(x_j)$ est la densité de probabilité de x_j quand Q_i est connu. Le dénominateur étant égal pour les i groupes (car on admet ici une équiprobabilité des classes), le but est de trouver la plus forte valeur pour $p_i f_i(x_j)$. En assumant que x_j possède une distribution normale dans chaque catégorie, la règle de maximisation de $(p_i f_i(x_j))$ de Bayes revient, dans une formulation logarithmique, à minimiser :

$$\ln(p_i f_i(x)) = (x - \mu_i)' \Sigma_i^{-1} (x - \mu_i) - 2 \ln p_i + \ln(\det \Sigma_i)$$

où μ_i contient la valeur moyenne de x dans la classe i et Σ est la matrice de covariance des prédicteurs. Pour $\Sigma_1 = \Sigma_2 = \dots = \Sigma_i$ et des classes équiprobables, calculer $\ln(p_i f_i(x_j))$ revient à calculer la distance de Mahalanobis (notée distance $\Delta^2(x, \mu_i)$) entre x et μ_i . Finalement, lorsqu'on présente un nouvel individu, sa probabilité *a posteriori* d'appartenir à la classe i quand x est réalisé est :

$$P(Q_i / x) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2} \Delta^2(x, \mu_i)\right)}{\sum_{i=1}^k \exp\left(-\frac{1}{2} \Delta^2(x, \mu_i)\right)}$$

1.2.7 Classification (K-mean)

K-means est un algorithme qui permet de classer les objets (dans ce travail, ce sont les stations pluviométrique) dans K groupes en minimisant la somme des carrés de distance entre les données et le centre du cluster correspondant. Le choix du cluster initial est aléatoire car il dépend des premières valeurs considérées. Il est donc important de ne pas considérer un seul résultat mais l'ensemble des résultats. Dans la pratique, on répète donc un certain nombre de fois l'algorithme de clusterisation. Ici, l'algorithme est répété mille fois avec de nouvelles séries pour chaque centre cluster initial et a été testé avec un nombre différent de classes. Ceci permet de séparer de façon robuste le signal et d'aboutir à une classification utile.

1.2.8 Scores de performance

Test de Pettitt Le test de Pettitt est non-paramétrique et dérive du test de Mann-Whitney. L'absence d'une rupture dans la série (x_i) de taille N constitue l'hypothèse nulle. Pettitt définit la variable $U_{t,N}$:

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij}$$

où $D_{ij} = \text{sgn}(x_i - x_j)$ avec $\text{sgn}(Z) = 1$ si $Z > 0$, 0 si $Z = 0$ et -1 si $Z < 0$

Il propose de tester l'hypothèse nulle en utilisant la statistique K_N définie par le maximum en valeur absolue de $U_{t,N}$ pour t variant de 1 à $N - 1$. A partir de la théorie des rangs, Pettitt montre que si k désigne la valeur de K_N prise sur la série étudiée, sous l'hypothèse nulle, la probabilité de dépassement de la valeur k est donnée approximativement par :

$$\text{Prob}(K_N > k) \approx 2 \exp[-6k^2/(N^3 + N^2)]$$

Pour un risque α de première espèce donné, si la probabilité de dépassement estimée est inférieure à α , l'hypothèse nulle est rejetée. La série comporte alors une rupture localisée au moment τ où est observée K_N .

Test de VIF Le problème soulevé par l'utilisation de plusieurs prévisionneurs est la redondance d'information traduite par une forte corrélation (« colinéarité ») entre certains prévisionneurs surtout lorsqu'ils sont jointifs dans l'espace. Si cette corrélation est trop importante, elle biaise le calcul des paramètres des modèles et les résultats sont artificialisés. Un des moyens de connaître le degré de colinéarité des prédictors est de calculer le facteur d'inflation de la variance (VIF). Il est noté :

$$VIF = \frac{1}{1 - R_k^2}$$

où R_k^2 est le carré du coefficient de corrélation multiple entre le prédictor x_k et les $p-1$ autres prédictors.

Test de LEPS Le LEPS se décline en deux mesures de précision selon le type de variables travaillées. Le LEPSCONT, pour des valeurs continues, est calculé à partir de l'équation :

$$LEPS = 3(1 - |P_f - P_v| + P_f^2 - P_f + P_v^2 - P_v) - 1$$

où P_f et P_v consistent respectivement en la position de la prévision et la position de l'observation dans la distribution de probabilité cumulée.

Le LEPSCAT, pour les valeurs discrètes en catégories, est obtenu en multipliant le tableau 1.6 fourni dans Potts *et al.* (1996) par la table de contingence issue de l'entraînement du modèle d'ADL.

Tableau 1.6 : Poids relatifs au test LEPS pour un tableau croisé 3x3

		Observations		
		Sec	Normal	Humide
Prévisions	Sec	0.89	-0.11	-0.78
	Normal	-0.11	0.22	-0.11
	Humide	-0.78	-0.11	0.89

Test de Kappa Le test non paramétrique Kappa de Cohen permet de chiffrer l'accord entre deux observateurs ou techniques lorsque les jugements sont qualitatifs. L'accord entre des jugements est défini comme la conformité de deux informations qui se rapportent au même objet. Cette notion implique l'existence d'une liaison entre les variables, exige des variables de même nature et un appariement des jugements.

$$K = \frac{p_o - p_a}{1 - p_a} = 1 - \frac{q_o}{q_a}$$

avec P_o : proportion observée de concordance et P_a proportion attendue de concordance.

Cette formule du Kappa est valable quand la variable qualitative n'a que 2 modalités. S'il y a plus de 2 modalités, la formule est légèrement modifiée et tient compte de l'importance du désaccord entre les 2 estimateurs. Dans ce cas, le calcul se fera avec les proportions observées et attendues de divergence (et non plus de concordance), chacune étant pondérée par la somme des carrés des distances à la diagonale du tableau de contingence (cette diagonale précise les effectifs concordants entre les 2 estimateurs). Dans ce travail le Kappa a été calculé sur des tableaux croisés à 3 modalités (tableaux 3x3).

Chapitre 2

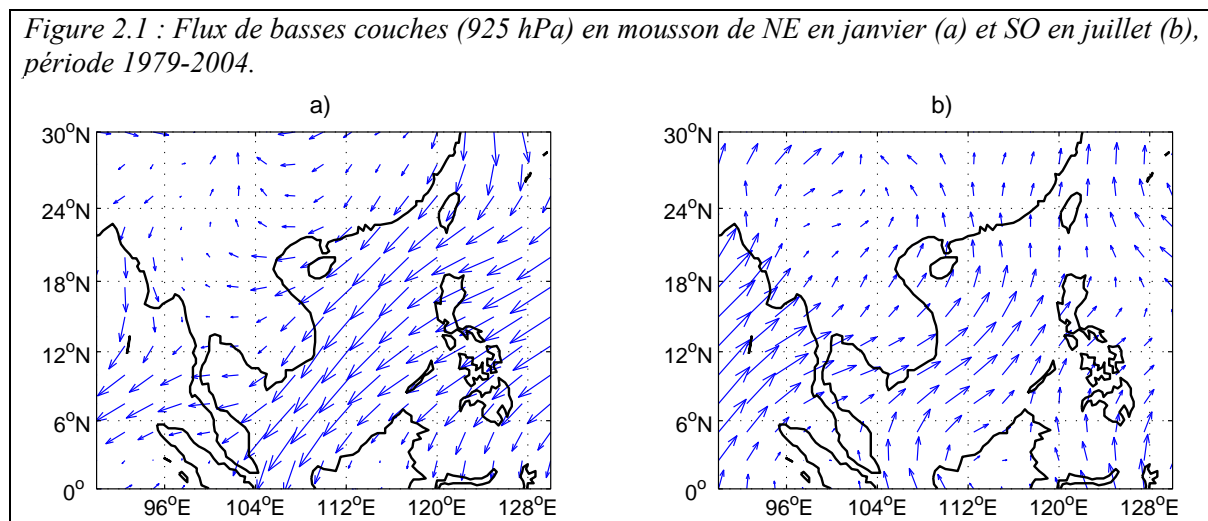
Climatologie de la mousson vietnamienne

Ce chapitre est consacré à la présentation des principales caractéristiques de la climatologie de la mousson vietnamienne. Il est structuré en trois sections, de façon à :

- préciser les caractéristiques générales du régime des températures et des précipitations sur le territoire du Vietnam ;
- analyser les variabilités temporelles des températures et de la pluie sur chacune des sept régions climatiques traditionnelles avec l'utilisation des données des quarante-quatre stations sur la période 1960-2000 et le cadre géographique national ;
- présenter les résultats issus des méthodes de classification et de tableaux de corrélation afin de définir des régions homogènes quant à la mousson et aboutir à une nouvelle régionalisation plus efficace au regard des précipitations.

2.1 Généralités

D'une façon générale, le climat du Vietnam est un climat tropical, variant assez uniformément dans ses régions maritimes et de plaine deltaïque et de façon plus contrastée dans ses régions intérieures, abritées de l'influence de la mer par les massifs montagneux. Son caractère principal est d'être soumis au régime des moussons. Celui-ci fait alterner, essentiellement, une saison sèche de mousson d'hiver et une saison pluvieuse de mousson d'été ; la première s'étend en moyenne de novembre à avril, la deuxième de mai à octobre. On passe, d'ailleurs, de l'une à l'autre par une période de transition qui participe plus ou moins au régime de chacune d'elles et au cours de laquelle les perturbations sont nombreuses. Ainsi, ce sont principalement l'étendue du Vietnam en latitude et son orographie qui apportent les profondes modifications qui dictent la variété des climats locaux des régions qui le composent (Bluzon E., Carton P., 1930 ; Pham N.T., Phan T.D., 1993).



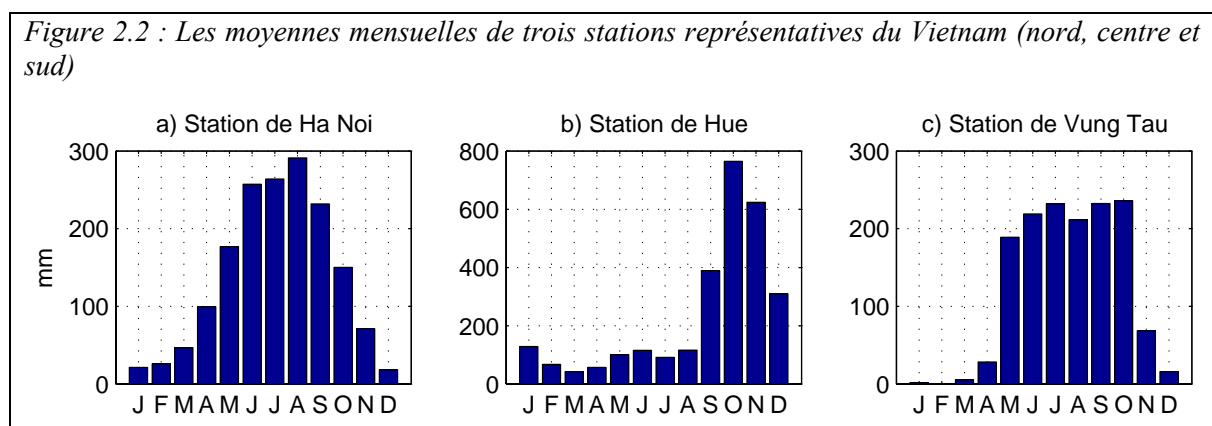
En mousson d'hiver (figure 2.1a), les flux de basses couches viennent du nord-est en raison du gradient de pression interhémisphérique orienté vers les terres froides de l'Eurasie où l'air présente un mouvement subsident. Dans l'ensemble, les vents soufflent du continent vers l'océan Indien et sont donc relativement peu chargés en vapeur d'eau, excepté pour la partie purement océanique sur la mer de Chine. Par contre, en mousson d'été (figure 2.1b), les flux sont de sud-ouest, par suite de l'inversion du gradient de pression interhémisphérique (le continent eurasiatique est plus chaud que les océans au sud) et, à l'échelle régionale, de la rotation cyclonique des flux d'air provoquée par l'échauffement des terres et la baisse des pressions de surface conséquentes. Dans les basses couches, les vents soufflent donc ici de la

mer vers la terre et sont chargés d'humidité. Ils convergent au-dessus du continent, ce qui favorise les mouvements ascendants, donc les systèmes nuageux cumuliformes et les précipitations. Celles-ci sont abondantes, particulièrement sur les versants montagneux exposés à la mousson où l'ascendance est nettement renforcée par le relief.

Le régime thermique de la partie nord du Vietnam (au nord de 16°N) diffère profondément de celui de la partie sud. Dans la partie nord, les températures sont fortement influencées par la mousson de nord-est d'hiver boréal : elles sont donc faibles. Si l'on compare, par exemple, Cantho, à 10°03 N, à Hanoi, à 21°03 N, la température moyenne annuelle diminue de 3°C puisqu'elle est de 26,7°C à Cantho et de 23,7°C à Hanoi (tableaux 2.4 et 2.8). D'autre part, la température varie peu à Cantho au cours de l'année, tandis que la variation annuelle est beaucoup plus importante à Hanoi : l'amplitude moyenne annuelle pour ces deux stations est, en effet, de 3,1°C à Cantho et de 12,8°C à Hanoi.

Le régime pluviométrique du Vietnam est en relation étroite avec le régime des moussons et met bien en lumière l'influence des reliefs sur le climat des différentes régions.

Dans le sud Vietnam qui se prolonge par le promontoire de Ca Mau (8.5°N) au col de Ca (12°N), le régime équatorial prévaut avec ses deux maxima de précipitations, souvent confondus, mais parfois distincts, inégaux et inégalement répartis de part et d'autre du solstice d'été au cours de la saison pluvieuse ; ces deux maxima ressortent nettement, en tout cas, des chiffres de l'année moyenne (figure 2.2c).



Au nord Vietnam, à partir du Thanh Hoa (19°N) au Ha Giang (23°N), qui est très près du tropique du Cancer, on trouve un type tropical simple : une seule saison des pluies avec un maximum après le solstice d'été (figure 2.2a).

Dans le centre Vietnam, qui s'étend du col de Ca (latitude 12°N) au Nghe An (19°N), sur toute la zone littorale et sur les reliefs orientaux de la cordillère Truong Son, la saison des pluies se prolonge jusqu'en décembre et le maximum absolu de précipitations est retardé jusqu'en octobre (figure 2.2b). Ce maximum est, en effet, associé aux perturbations atmosphériques qui se développent au sein de la zone de convergence intertropicale (ZCIT), mais aussi au passage erratique de cyclones tropicaux ou de perturbations de front polaire, d'autant qu'il faut passer l'obstacle de la chaîne de montagnes.

2.2 Évolution des températures et des précipitations dans les sept régions climatiques

Cette section présente de façon succincte les évolutions moyennes annuelles et interannuelles (période 1960-2000) sur les sept régions climatiques vietnamiennes à partir des données des quarante-quatre stations disponibles sur cette période (voir Tableau 1.4). Pour chacune des régions, nous présentons les éléments physiques, le régime thermique et le régime pluviométrique. Cette régionalisation est la régionalisation classique établie par la Météorologie du Vietnam (Nguyen D.N., Nguyen T.H., 2004). Nous verrons que, pour les paramètres sélectionnés, elle n'est peut-être pas la plus efficace. La lecture pourra paraître un peu fastidieuse en raison du grand nombre de régions retenu ici. C'est aussi la raison pour laquelle cette présentation se limite aux deux paramètres fondamentaux du climat en surface. Cette description est essentielle pour bien comprendre la complexité climatique du Vietnam, d'autant que c'est l'une des premières climatologies établies sur le pays sur une aussi longue période.

2.2.1 La région Taybac

C'est la région la plus haute, au relief le plus accidenté (figure 1.1). Elle se compose de hauts plateaux d'altitude moyenne de 300 à 700 m et de nombreux petits massifs dont les sommets dépassent les 2 000 m (Mt Pu Si Lung, Mt Pu Den Dinh et Mt Pu Sam Sao) (Pham N.T., Phan T.D., 1993). Cette région est séparée de la région Dongbac par la chaîne du Hoang Lien Son (> 2 000 m) qui la protège des vents du nord-est en hiver. Taybac est donc plus chaude et plus sèche en hiver que Dongbac : la température en janvier de Taybac est de 16.0°C, soit 1°C de plus que Dongbac. Les cumuls de pluie en hiver (novembre-mars) correspondent à environ 8 % du total annuel, alors que ceux des régions Dongbac et DBBB sont à 10 %.

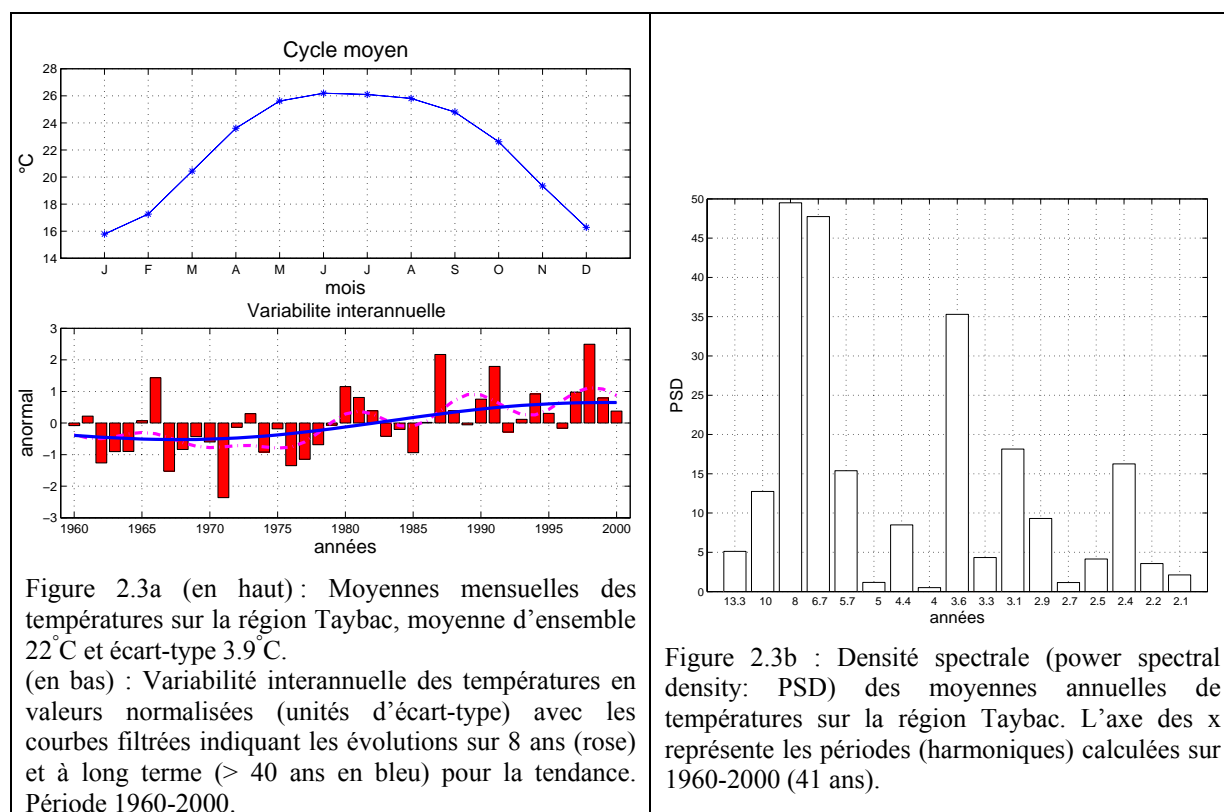
Tableau 2.1 : Les caractéristiques des sept stations de la région Taybac (période 1960-2000).

Stations	Position			Températures			Précipitations	
	latitude (nord)	longitude (est)	altitude (m)	janvier (°C)	juillet (°C)	moyenne annuelle	moyenne annuelle	mai-sept. (%)
Dien Bien	21.40	103.02	479	16.3	25.8	22.0	1 574	78.9
Hoa Binh	20.82	105.33	23	16.5	28.5	23.4	1 884	76.5
Lai Chau	22.07	103.15	244	17.0	26.5	23.0	2 104	79.9
Mai Chau	20.67	105.05	160	16.9	27.7	23.1	1 766	79.3
Moc Chau	20.82	104.70	958	12.2	23.1	18.6	1 630	77.2
Muong Te	22.38	102.83	310	16.7	26.1	22.5	2 417	82.2
Son La	21.32	103.88	676	14.9	25.1	21.0	1 439	77.9

- Régime des températures

Les moyennes annuelles de température sont d'environ 23°C dans les vallées situées à 200-300 m (Lai Chau, 23.0°C ; Mai Chau, 23.1°C), 20-22°C dans les montagnes moyennes ayant une altitude de 300-500 m (Dien Bien, 22.0°C ; Muong Te, 22.5°C), et 18-19°C dans les hautes montagnes (1 000 m) (Moc Chau, 18.6°C). Les moyennes mensuelles des températures sur Taybac ont un maximum d'environ 26°C et un minimum d'environ 16°C, soit 10°C d'amplitude annuelle (tableau 2.1).

La figure 2.3a (en bas) présente la variabilité interannuelle des températures moyennes mensuelles sur Taybac pour la période 1960-2000. On peut d'abord noter la tendance à la hausse des températures avec des fluctuations de plus courtes périodes et des concentrations d'énergie autour de 3-4 ans et 6-8 ans, mais non significatives (figure 2.3b)



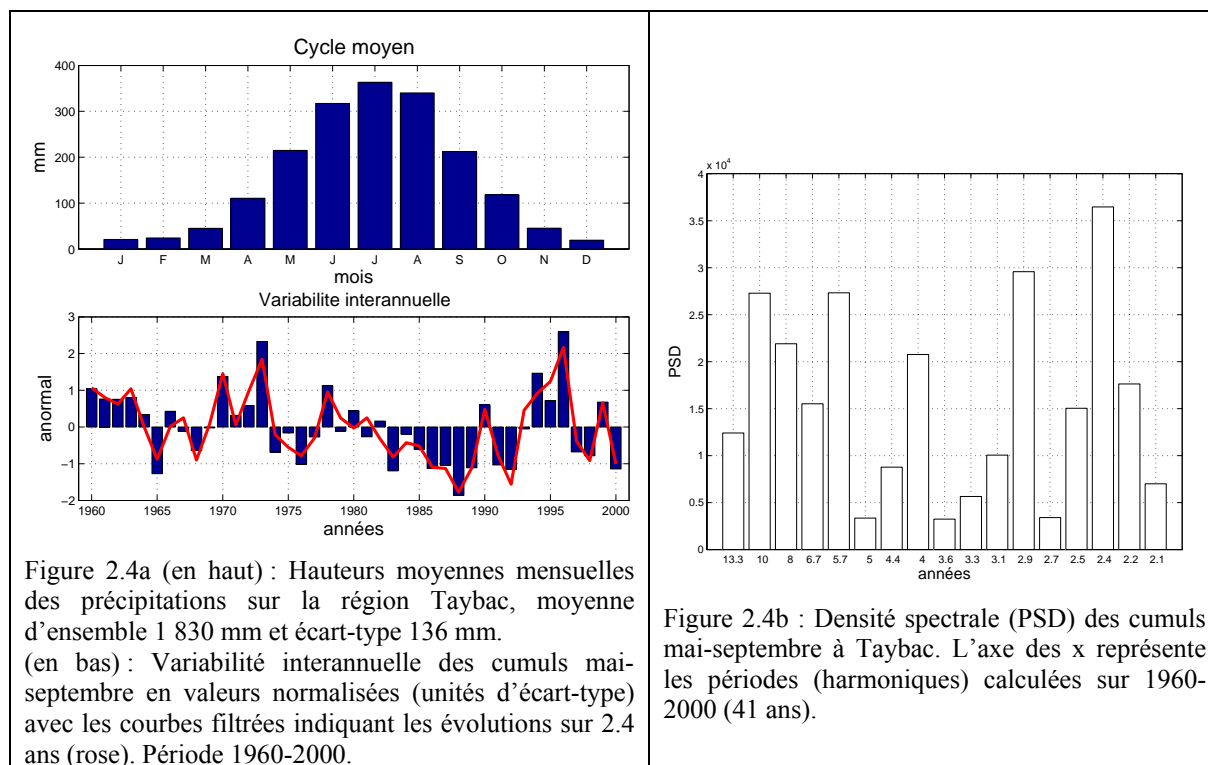
- Régime pluviométrique

Les pluies, dans cette région, ne sont pas distribuées de façon régulière. Par ailleurs, dans le nord très montagneux, les cumuls de pluies enregistrés sont très élevés : Muong Te, 2 417 mm/an (tableau 2.1), et particulièrement la station de Sin Ho avec 3 200 mm/an (Nguyen D.N., Nguyen T.H., 2004). Inversement, dans les vallées, les cumuls baissent

considérablement (Dien Bien : 1 562 mm/an, Son La : 1 439 mm/an), avec un minimum régional autour de Yen Chau : 1 200 mm/an (Nguyen D.N., Nguyen T.H., 2004). Sur les bas plateaux, au sud, les pluies sont comprises entre 1 600 et 1 800 mm par an (Mai Chau : 1 630 mm/an, Moc Chau : 1 766 mm/an).

La saison des pluies est associée à la circulation de mousson de sud-ouest d'été boréal qui dure ici d'avril/mai à septembre/octobre et est centrée sur juillet (> 350 mm) : elle correspond à environ 80-90 % du total annuel. La saison sèche, centrée sur décembre-février, correspond au régime de flux de nord-est d'hiver boréal et enregistre des cumuls d'environ 20-25 mm/mois.

Les cumuls mai-septembre de pluies sur Taybac (figure 2.4a, bas) montre, pour la période 1960-2000, qu'il n'y a pas de tendance à long terme évidente, les valeurs oscillant autour de la valeur moyenne (1 448 mm) avec un écart-type de 153 mm. Le coefficient de variation est donc de 10.6 %. Sur la période récente 1980-2000, on observe une certaine « oscillation » quasi décennale. La figure 2.4b présente les diagrammes PSD (power spectral density) des cumuls mai-septembre de pluies sur la même région. On observe un maximum de PSD correspondant à 2.4 ans et une petite concentration de l'énergie sur les périodes quasi décennales (8-13 ans).



2.2.2 La région Dongbac

C'est une région aux reliefs très compliqués qui comprend des chaînes de montagnes d'une altitude allant de 500 à 900 m. Ces montagnes s'organisent selon une orientation méridienne (la chaîne Song Gam, la chaîne Ngan Son et la chaîne Dong Trieu) au milieu de basses collines (200-400 m), des plateaux, des vallées et des bassins du système hydrographique du nord du Vietnam. Le climat de cette région est donc très disparate. Elle s'articule en deux sous-régions (Pham N.T., Phan T.D., 1993).

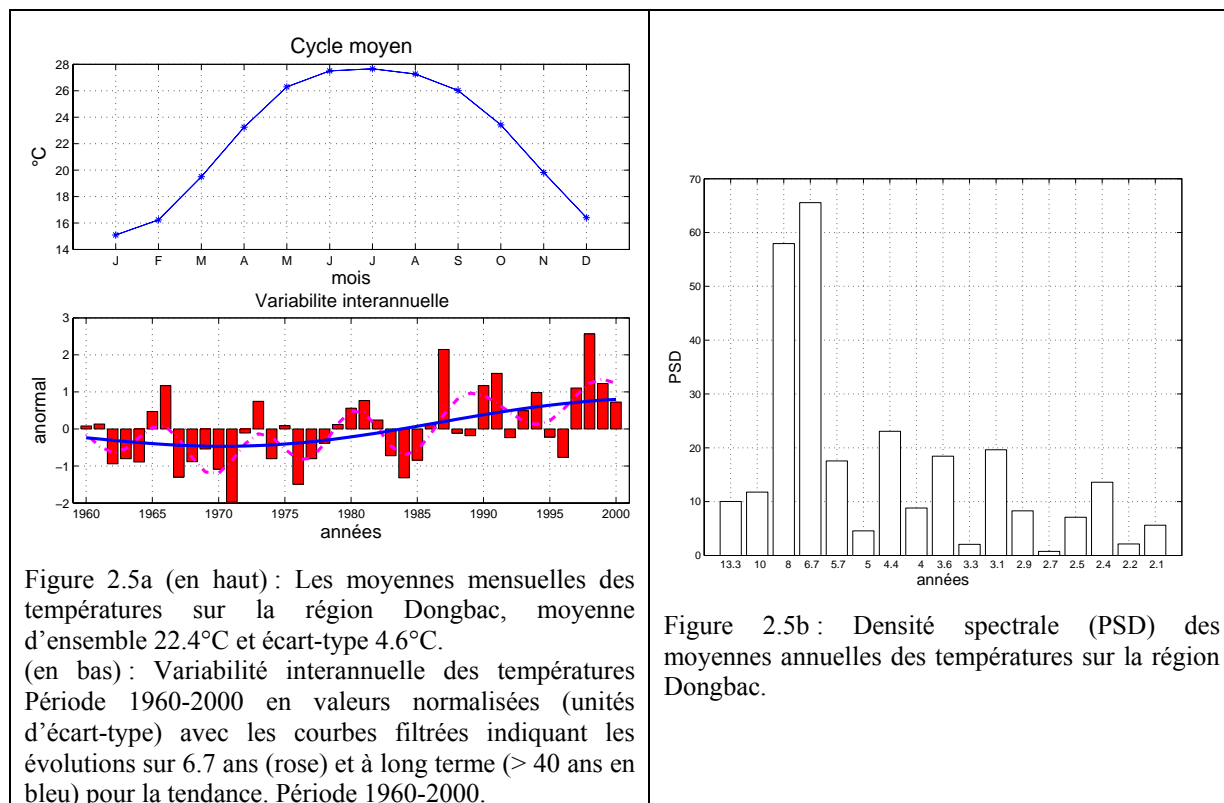
- **La sous-région de l'est** : elle se compose de bas plateaux et de collines de 200-300 m d'altitude (Cao Bang-Lang Son). Elle comprend deux parties : l'une protégée par la chaîne Dong Trieu (Cao Bang-Lang Son) et l'autre (zone littorale du Quang Ninh) devant la chaîne Dong Trieu. C'est la partie Cao Bang-Lang Son qui accueille le plus tôt la mousson de nord-est en hiver boréal. C'est ici aussi qu'en hiver, il fait le plus froid au Vietnam : la température en janvier de Lang Son (258 m) est de 13.2°C (tableau 2.2), alors qu'elle est de 17.0°C à Lai Chau (244 m) (tableau 2.1). C'est également une des régions les plus sèches du Vietnam (Cao Bang : 1 427 mm/an, Lang Son : 1 303 mm/an), et surtout Na Sam : 1 100 mm/an et Bao Lac : 1 200 mm/an (Nguyen D.N., Nguyen T.H., 2004). La partie Quang Ninh, devant la chaîne Dong Trieu, en face de la mer, enregistre des cumuls de pluies plus élevés (Hon Gai : 1 918 mm/an), particulièrement, autour de Mong Cai : 2 800 mm/an (Nguyen D.N., Nguyen T.H., 2004).
- **La sous-région de l'ouest** : les entités hydrographiques majeures associées à cette partie sont les bassins des fleuves Chay, Lo et Gam. Ils n'offrent pas d'obstacles aux vents humides et concentrent une quantité importante de vapeur d'eau (Pham N.T., Phan T.D., 1993). Cette région enregistre donc des cumuls annuels relativement élevés (Ha Giang : 2 493 mm/an). On peut représenter cet espace avec les stations de Sa Pa : 3 600 mm/an ; Tam Dao : 2 800 mm/an (Nguyen D.N., Nguyen T.H., 2004) ; Bac Quang : 5 000 mm/an (arrondi de 4 848 mm/an, tableau 2.2). La température est aussi plus élevée que dans la partie est. À la même altitude de Lang Son, la température de Van Chan est pourtant plus élevée de 2.3°C (tableau 2.2).

Tableau 2.2 : Les caractéristiques des sept stations de la région Dongbac (période 1960-2000).

Stations	Position			Températures			Précipitations	
	latitude (nord)	longitude (est)	altitude (m)	janvier (°C)	juillet (°C)	moyenne annuelle	moyenne annuelle	mai-oct. (%)
Bac Quang	22.50	104.87	74	15.7	27.8	22.8	4 848	85.3
Yen Bai	21.72	104.85	56	15.7	28.1	22.9	2 033	81.6
Van Chan	21.58	104.52	257	15.5	27.4	22.4	1 523	85.1
Cao Bang	22.65	106.25	258	13.8	27.0	21.6	1 430	82.6
Ha Giang	22.82	104.98	118	15.6	27.6	22.7	2 493	84.6
Hon Gai	20.97	107.07	87	16.1	28.6	23.1	1 918	87.9
Lang Son	21.87	106.77	259	13.2	27.1	21.2	1 304	80.0

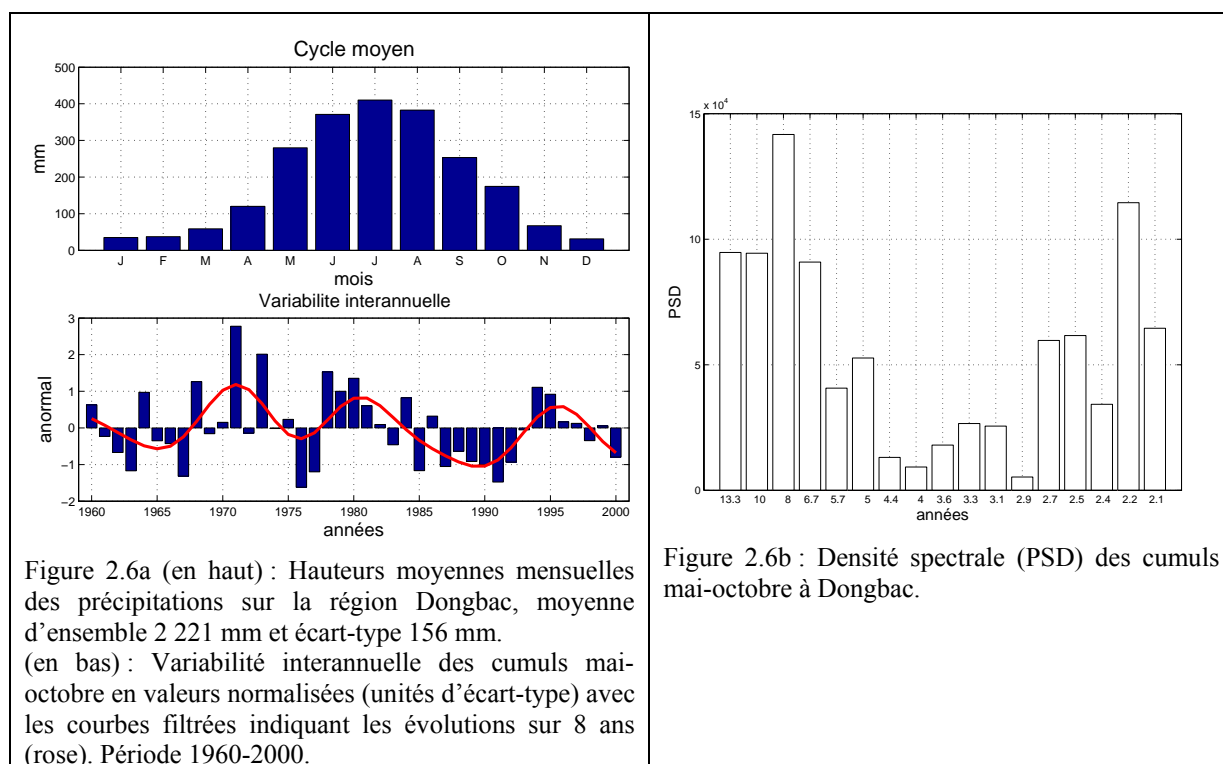
- Régime des températures

Les moyennes annuelles de températures sont d'environ 21-23°C (tableau 2.2) à l'exception des hautes montagnes de Hoang Lien Son (14-18°C). La température moyenne du mois le plus chaud est de 26-28°C et celle du plus froid d'environ 12-16°C. L'amplitude annuelle des températures est donc de 12-14°C. La figure 2.5a (en bas) présente la variabilité interannuelle des températures sur Dongbac pour la période 1960-2000. On peut noter une légère tendance à la hausse des températures avec des fluctuations non significatives autour de 6-8 ans (figure 2.5b).



- Régime pluviométrique

La saison des pluies, de mai à octobre, est centrée sur juillet (> 400 mm), et enregistre environ 80-85 % du total annuel. La saison sèche, centrée sur décembre-janvier, correspond à l'hiver boréal lorsque les flux sont de nord-est et enregistrent des cumuls d'environ 30-35 mm/mois. La figure 2.6a (en bas) montre que les cumuls saisonniers de pluies sur Dongbac n'ont pas de tendance évidente : les valeurs oscillent autour de la valeur moyenne (1 872 mm) avec un écart-type de 213 mm. Le coefficient de variation est donc de 11.4 %. Sur les diagrammes PSD des cumuls mai-octobre à Dongbac (figure 2.6b), seul le cycle à deux ans est jugé significatif. On peut aussi noter une petite concentration de l'énergie sur les périodes quasi décennales (7-13 ans) que l'on voit aussi en figure 2.6a.



2.2.3 La région DBBB

C'est une large région de plaines du delta du fleuve Rouge. Globalement, elle présente un relief plat, sauf certaines collines d'altitude inférieure à 150 m. Les pluies sont ici distribuées de façon uniforme, sauf pour deux stations du nord où on note des cumuls de pluies plus faibles (Vinh Yen : 1 559 mm/an ; Bac Giang : 1 558 mm/an). Les autres stations enregistrent des cumuls entre 1 600 et 1 800 mm/an.

Tableau 2.3 : Les caractéristiques des sept stations de la région DBBB (période 1960-2000).

Stations	Position			Températures			Précipitations	
	latitude (nord)	longitude (est)	altitude (m)	janvier (°C)	juillet (°C)	moyenne annuelle	moyenne annuelle	mai-oct. (%)
Vinh yen	21.28	105.58	10	16.6	29.2	23.8	1 559	83.8
Bac Giang	21.28	106.22	7	16.2	29.0	23.4	1 558	83.1
Ha Noi	21.03	105.85	5	16.4	29.2	23.7	1 654	82.9
Nam Dinh	20.40	106.15	3	16.5	29.3	23.5	1 743	83.9
Ninh Binh	20.23	105.97	2	16.6	29.2	23.6	1 835	84.9
Phu Lien	20.80	106.63	113	16.3	28.4	23.1	1 698	85.0
Son Tay	21.13	105.50	12	16.3	28.9	23.5	1 814	84.7

- Régime des températures

Les moyennes annuelles de températures se situent aux environs de 23.5°C et sont spatialement homogènes : la différence thermique entre les stations est très réduite (< 1°C). Par ailleurs, la température de janvier pour l’ensemble des stations est supérieure à 16.2°C.

La figure 2.7a (en bas) présente la variabilité interannuelle pour la période 1960-2000 des températures moyennes sur DBBB. On peut noter une tendance à la hausse des températures avec des fluctuations autour de 6.7 ans (maximum PSD, voir figure 2.7b).

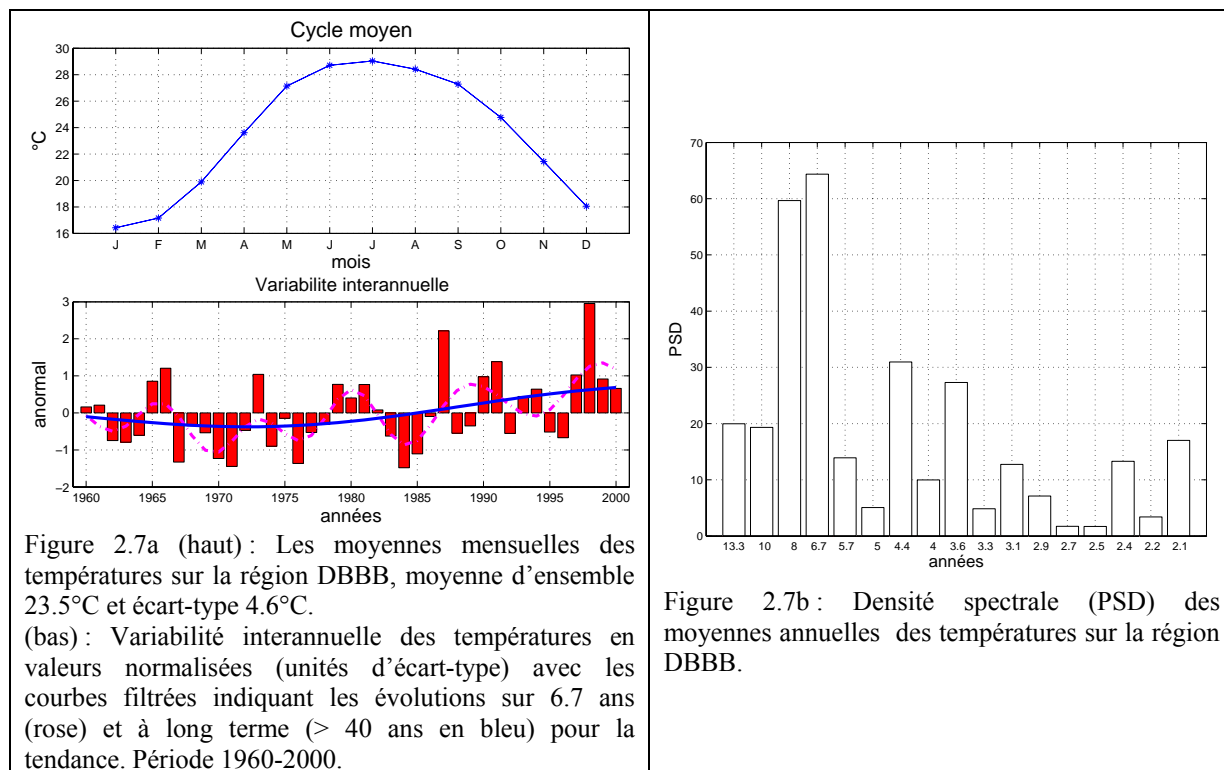


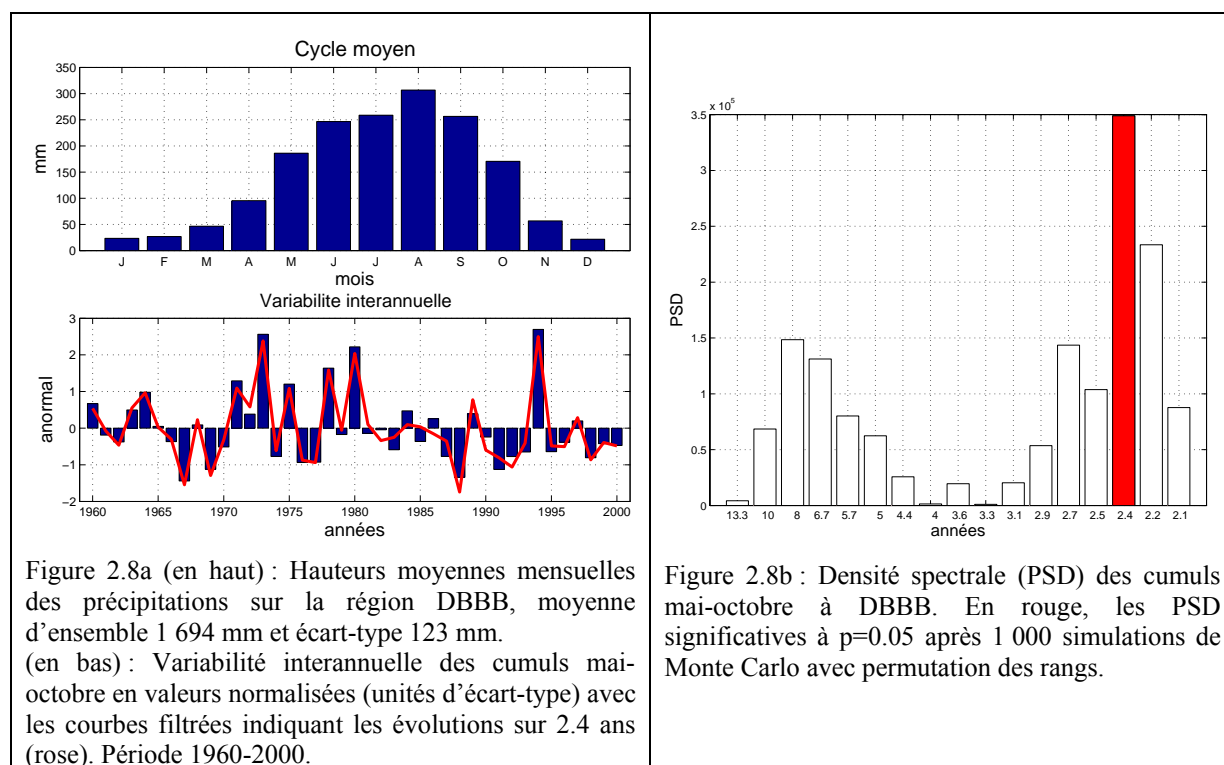
Figure 2.7a (haut) : Les moyennes mensuelles des températures sur la région DBBB, moyenne d’ensemble 23.5°C et écart-type 4.6°C. (bas) : Variabilité interannuelle des températures en valeurs normalisées (unités d’écart-type) avec les courbes filtrées indiquant les évolutions sur 6.7 ans (rose) et à long terme (> 40 ans en bleu) pour la tendance. Période 1960-2000.

Figure 2.7b : Densité spectrale (PSD) des moyennes annuelles des températures sur la région DBBB.

- Régime pluviométrique

La saison des pluies dure ici de mai à octobre, le cœur de cette saison se situant en août (> 300 mm) pendant la période active de ZICT et de typhon (Pham N.T., Phan T.D., 1993). La période d’hiver est contrastée : durant la première moitié (décembre-janvier), l’air est très sec, tandis que, pendant la seconde, il devient très humide en raison de crachins très fréquents.

La figure 2.8a (en bas) présente les cumuls de pluies de mai à octobre pour la période 1960-2000. Comme pour la région Taybac, il n’y a pas de tendance évidente et les valeurs oscillent autour de la valeur moyenne (1 425 mm) avec un écart-type de 270 mm. Les diagrammes PSD des cumuls juin-août de pluie sur Taybac sont présentés en figure 2.8b : le cycle quasi biennal sur 2.4 ans est significatif et ressort très nettement.



2.2.4 La région BTB

Il faut, en fait, diviser cette région en deux parties :

- la partie sud se prolonge du col de Hai Van (16°N) au col de Ngang (18°N). Le relief y est complexe : un cordon étroit de plaines sur la bordure littorale à l’est et une région de hautes montagnes d’environ 1 000 m d’altitude à l’ouest. C’est ici qu’on enregistre

les cumuls de pluies les plus élevés du Vietnam (Dong Hoi : 2 250 mm/an ; Hue : 2 806 mm/an, tableau 2.4), et plus particulièrement encore au pic pluviométrique de Nam Dong : 3 600 mm/an (Nguyen D.N., Nguyen T.H., 2004) ;

- la partie nord, dont l'altitude augmente dans la direction SE-NO : le sud-est est constitué d'une petite plaine au bord de la mer, suivi d'une zone de transition (100-200 m) et de montagnes (1 000 m). Les cumuls de la plaine sont élevés (station de Ky Anh : 2 800 mm/an ; Ha Tinh : 2 685 mm/an ; Vinh : 2 057 mm/an ; Thanh Hoa : 1 725 mm/an), mais diminuent dans la zone de transition (Tuong Duong : 1 269 mm/an) et particulièrement Muong Xen : 800 mm/an, la plus sèche (Nguyen D.N., Nguyen T.H., 2004).

Tableau 2.4 : Les caractéristiques des huit stations de la région BTB (période 1960-2000).

Stations	Position			Températures			Précipitations	
	latitude (nord)	longitude (est)	altitude (m)	janvier (°C)	juillet (°C)	moyenne annuelle	moyenne annuelle	août-nov. (%)
Bai Thuong	19.92	105.37	21	16.9	28.6	23.4	1 966	50.1
Dong Hoi	17.47	106.62	7	18.9	29.7	24.5	2 250	73.6
Ha Tinh	18.40	105.90	3	17.7	29.6	24.0	2 685	68.5
Hue	16.40	107.70	17	20.0	29.4	25.2	2 806	67.5
Tuong Duong	19.28	104.43	97	17.9	28.0	23.7	1 254	51.6
Thanh Hoa	19.82	105.78	5	17.1	29.2	23.6	1 723	60.3
Tinh Gia	19.58	105.78	5	17.2	29.5	23.6	1 823	64.8
Vinh	18.67	105.67	6	17.5	29.7	23.9	2 057	68.7

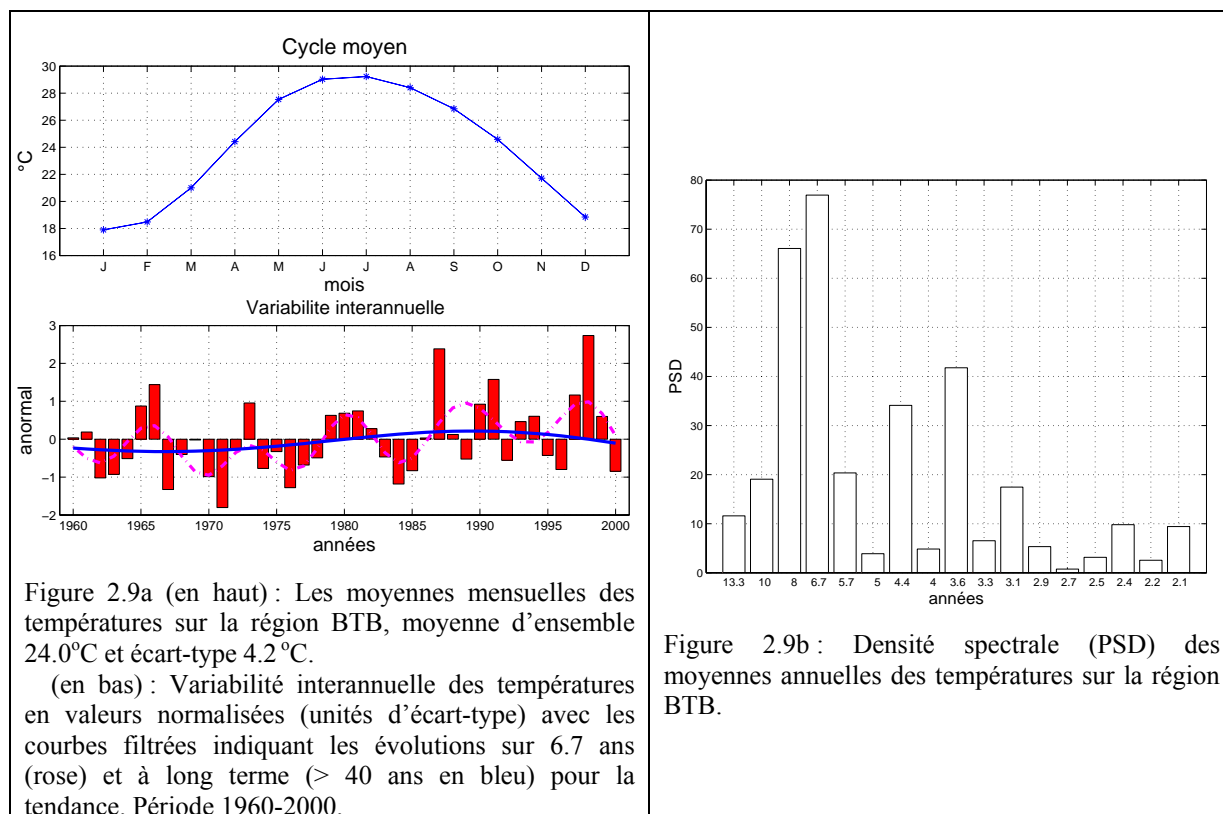
- Régime des températures

Cette région est affectée par la branche la plus forte des flux issus de la circulation de mousson de SO, après franchissement de la chaîne de montagnes Truong Son de mai à juillet. À cause de l'effet de foehn¹, fréquent pendant cette période, la température peut atteindre

¹ Lorsqu'un **courant aérien** rencontre un relief suffisamment large, et même si celui-ci est assez peu élevé, une partie au moins de la masse d'**air** transportée par le **vent** ne peut contourner l'obstacle que lui oppose le relief, mais franchit cet obstacle en subissant une **ascendance orographique**. Alors, en amont du relief, les **parcelles** d'air sont soumises à une **détente** et se refroidissent : souvent, leur température atteint celle du **point de condensation** où, à un niveau déterminé de **pression** et donc d'altitude, des **nuages** se forment ; parfois, aussi, des **précipitations** de **pluie** ou de neige apparaissent, évacuant une partie de l'eau transportée par le **flux d'air** et diminuant par conséquent la valeur du rapport de mélange des parcelles. Puis, une fois franchis les sommets, l'air subit au contraire, en aval du relief, une **compression** qui le réchauffe ; en outre, la **condensation** et, éventuellement, les précipitations par lesquelles est passé cet air bloquent ou éliminent une part importante de son **humidité** : ainsi, le vent soufflant sur le flanc situé en aval du relief est réchauffé et asséché par rapport au **courant** qui approchait le relief en amont, et c'est cette modification — souvent très sensible — que l'on appelle l'effet de foehn.

De façon générale, la différence de température que suscite l'effet de foehn entre les versants au vent et sous le vent d'un massif montagneux peut être remarquablement ample (jusqu'à une dizaine de **degrés Celsius**). Une explication courante de cette amplitude se réfère à l'influence des précipitations accompagnant l'**ascendance** forcée du courant aérien en amont. Alors, les parcelles d'air subissent une détente pseudo adiabatique et la température y diminue avec l'altitude selon un taux variable, mais dans l'ensemble assez voisin de 0,5 **°C** tous les 100 m, tandis que le rapport de mélange ne cesse d'y diminuer du fait des précipitations ; cette diminution

38°C et l'humidité relative peut être inférieure à 40 % (Pham N.T., Phan T.D., 1993). Les moyennes annuelles de températures se situent aux environs de 23-25°C (tableau 2.4), le mois le plus chaud (froid) enregistrant 28.5-30°C (16.5-19.5°C), l'amplitude s'installant aux environs de 8-9°C.

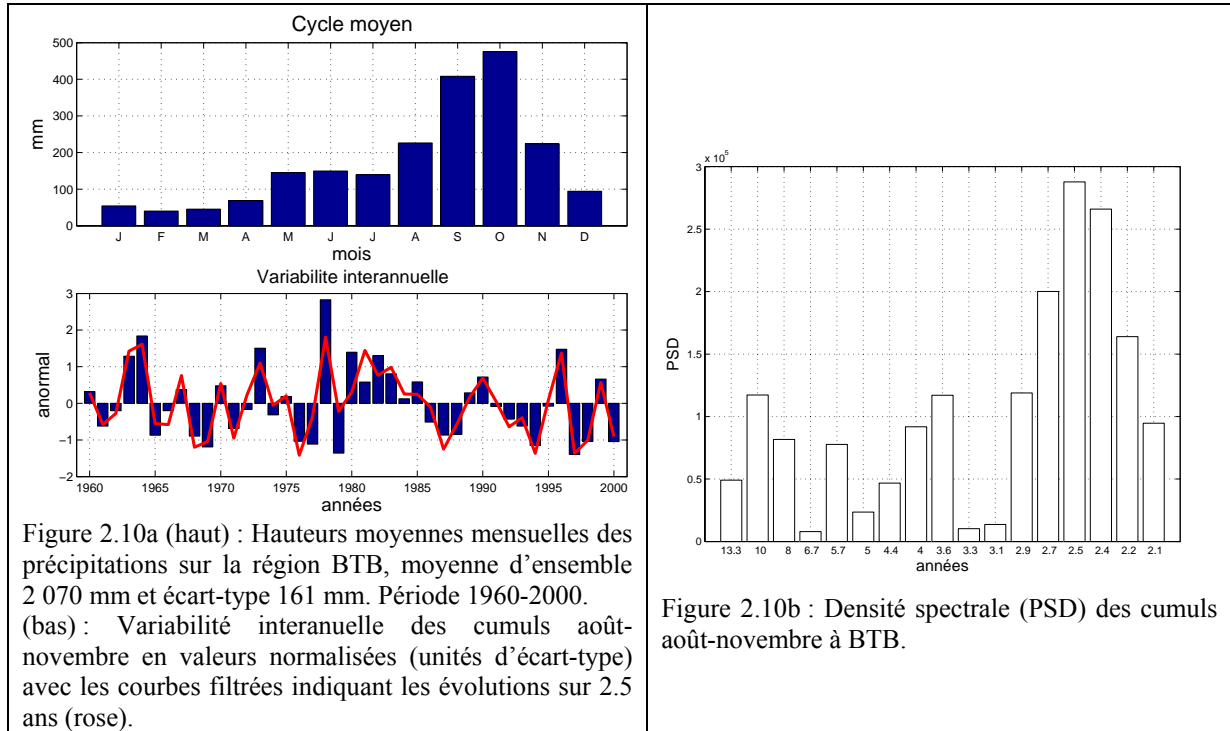


- Régime pluviométrique

La saison des pluies débute ici lentement à partir de mai ; toutefois, les cumuls de pluies ne dépassent pas 150 mm/mois avant le mois d'août. Le milieu de la saison des pluies se situe sur septembre-octobre (> 400 mm/mois). Il est différent de celui des régions Dongbac et DBBB. La saison sèche sur février-mars enregistre des cumuls de pluies

entraîne que les parcelles, une fois les sommets franchis, ne sont plus **saturées** en redescendant et subissent d'emblée une détente **adiabatique** sèche, dont le taux de variation avec l'altitude est pratiquement de 1°C tous les 100 m : et c'est cette différence cumulée d'environ un demi **degré Celsius** tous les 100 m entre les parcours ascendant et descendant du flux d'air qui créerait le réchauffement, couplé avec l'assèchement dû aux précipitations. Toutefois, on a pu remarquer sur le terrain que l'effet de foehn pouvait se manifester en dehors de toute production de pluie ou de neige, de sorte que l'explication précédente n'est pas satisfaisante : il semblerait que le déroulement de ce phénomène, en fait, soit plus complexe et inclue une séparation du **flux** incident en plusieurs **courants** qui, selon leurs altitudes respectives, contourneraient ou, au contraire, franchiraient l'obstacle créé par le relief avant de se rejoindre en aval ; seul le courant des couches supérieures, alors, induirait l'effet de foehn par compression adiabatique lors de sa descente après franchissement du relief, cette compression déclenchant un réchauffement qui a lui-même pour conséquence (pour une valeur fixée du rapport de mélange) une diminution de l'humidité relative (http://www.meteo.fr/meteonet/decouvr/a-z/html/905_curieux.htm#top).

d'environ 30-40 mm/mois (figure 2.10a en haut). Les diagrammes PSD des cumuls d'août-novembre (figure 2.10b) montrent une petite concentration d'énergie sur des périodes quasi biennales (2-3 ans), mais non vraiment significatives.



2.2.5 La région NTB

Cette région est située à l'est de la chaîne Truong Son et s'étend du col de Hai Van (latitude 16°N) à la région Ninh Thuan-Binh Thuan. C'est un cordon de plaines littorales où les cumuls diminuent du nord au sud :

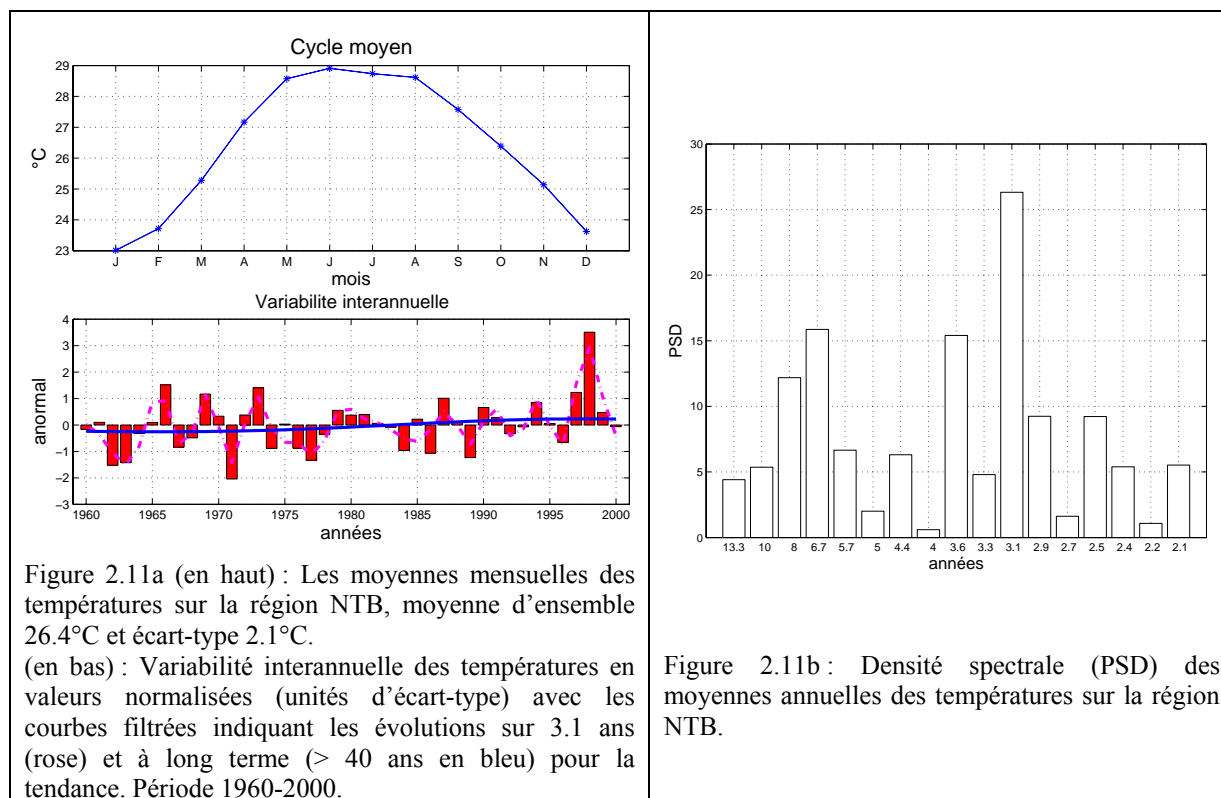
- au nord : Da Nang : 2 147 mm/an ; Quang Ngai : 2 465 mm/an) et, plus particulièrement, station de Tra My : 4 000 mm/an, station de Ba To : 3 600 mm/an (D.N. Nguyen, T.H. Nguyen, 2004).
- au centre, les stations de Quy Nhon : 1 816 mm/an et Tuy Hoa : 1 824 mm/an ;
- au sud, s'étend la partie la plus sèche, comme sur l'ensemble du Vietnam (Nha Trang : 1 334 mm/an et Phan Thiet : 1 069 mm/an) et, notamment, la station de Nha Ho : 700 mm/an (D.N. Nguyen, T.H. Nguyen, 2004).

Tableau 2.5 : Les caractéristiques des cinq stations de la région NTB (période 1960-2000).

Stations	Position			Températures			Précipitations	
	latitude (nord)	longitude (est)	altitude (m)	janvier (°C)	juin (°C)	moyenne annuelle	moyenne annuelle	sept-déc. (%)
Da Nang	16.03	108.18	6	21.5	29.2	25.8	2 147	74.8
Nha Trang	12.25	109.20	5	23.9	28.6	26.6	1 334	75.1
Phan Thiet	10.93	108.10	9	24.8	27.8	26.7	1 069	39.6
Quang Ngai	15.13	108.78	8	21.6	28.8	25.7	2 465	72.2
Quy Nhon	13.77	109.22	5	23.2	29.8	26.9	1 816	78.2
Tuy Hoa	13.08	109.28	12	23.1	29.3	26.5	1 824	80.1

- Régime des températures

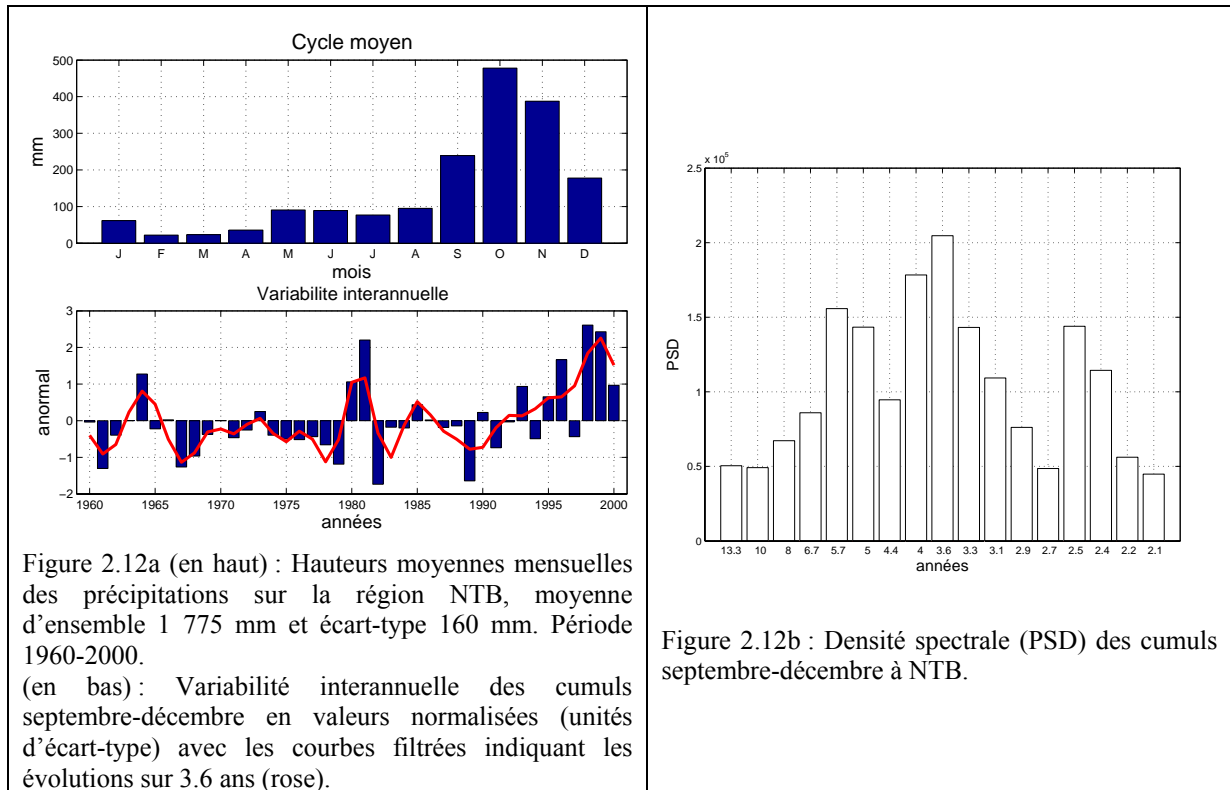
Les moyennes annuelles de températures se situent aux environs de 25-27°C, avec une amplitude thermique annuelle située dans l’intervalle 2-8°C : mois le plus chaud (froid) 28.5-30°C (20-24°C) (tableau 2.5).



- Régime pluviométrique

La saison des pluies intervient de septembre à décembre, le pic pluviométrique étant centré sur octobre (> 400 mm/mois). La saison sèche, sur février-mars, enregistre des valeurs d'environ 10-20 mm/mois. Contrairement à la région BTB, on peut observer une tendance à la

hausse sur quarante ans pour la variabilité interannuelle des cumuls de septembre-novembre avec certaines fluctuations présentant un pic d'énergie non significatif sur la période 3-4 ans.



2.2.6 La région Taynguyen

C'est une région montagneuse avec de vastes et hauts plateaux situés près de la côte ouest de la chaîne Truong Son. Elle se compose de trois plateaux :

- le haut plateau nord (Pleycu, 800 m),
- le haut plateau central (Ban Me Thuat, 490 m)
- le haut plateau sud (Da Lat 1 513 m et Bao Loc 850 m).

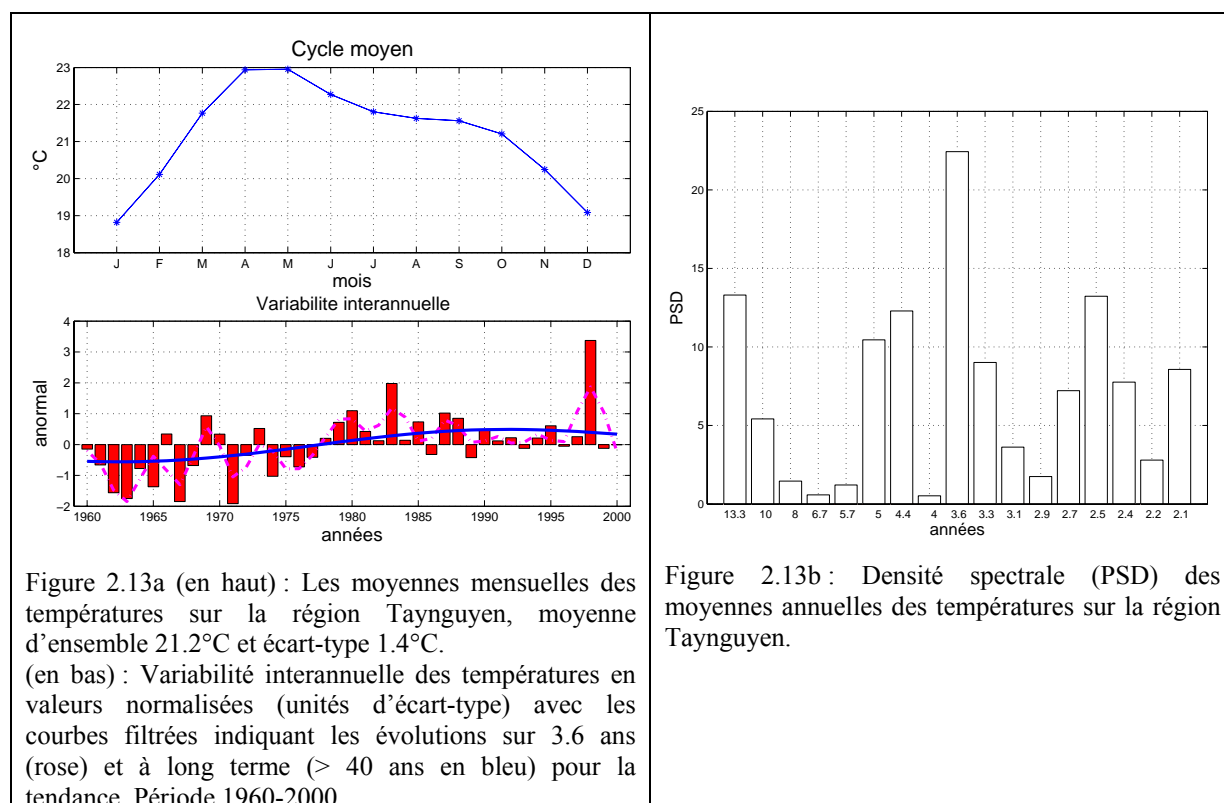
Les cumuls de précipitations dépendent ici principalement de la hauteur du relief et de la protection contre les vents que constitue la chaîne Truong Son (tableau 2.6).

Tableau 2.6 : Les caractéristiques des quatre stations de la région Taynguyen (période 1960-2000).

Stations	Position			Températures			Précipitations	
	latitude (nord)	longitude (est)	altitude (m)	janvier (°C)	avril (°C)	moyenne annuelle	moyenne annuelle	mai-oct. (%)
Bao Loc	11.47	107.80	850	19.8	22.8	21.6	2 784	75.8
Ban Me Thuat	12.67	108.05	490	20.9	26.0	23.6	1 798	86.9
Da Lat	11.95	108.43	1513	15.8	18.9	17.9	1 806	78.2
Pleycu	13.98	108.00	800	18.8	24.2	21.7	2 203	90.8

- Régime thermique

La variation de la température en fonction de la hauteur du relief est très importante : il existe un net gradient en direction des fonds de vallée (Pham N.T., Phan T.D., 1993). Ainsi, la moyenne annuelle de Ban Me Thuat (490 m) est de 23.6°C ; à Playcu (800 m), elle passe à 21.7°C et à Da Lat (1 513 m) elle n'est plus que de 17.9°C (tableau 2.6). Pourtant, l'amplitude annuelle reste très limitée (environ 4-5°C). En revanche, l'amplitude jour-nuit est très élevée (10-11°C).

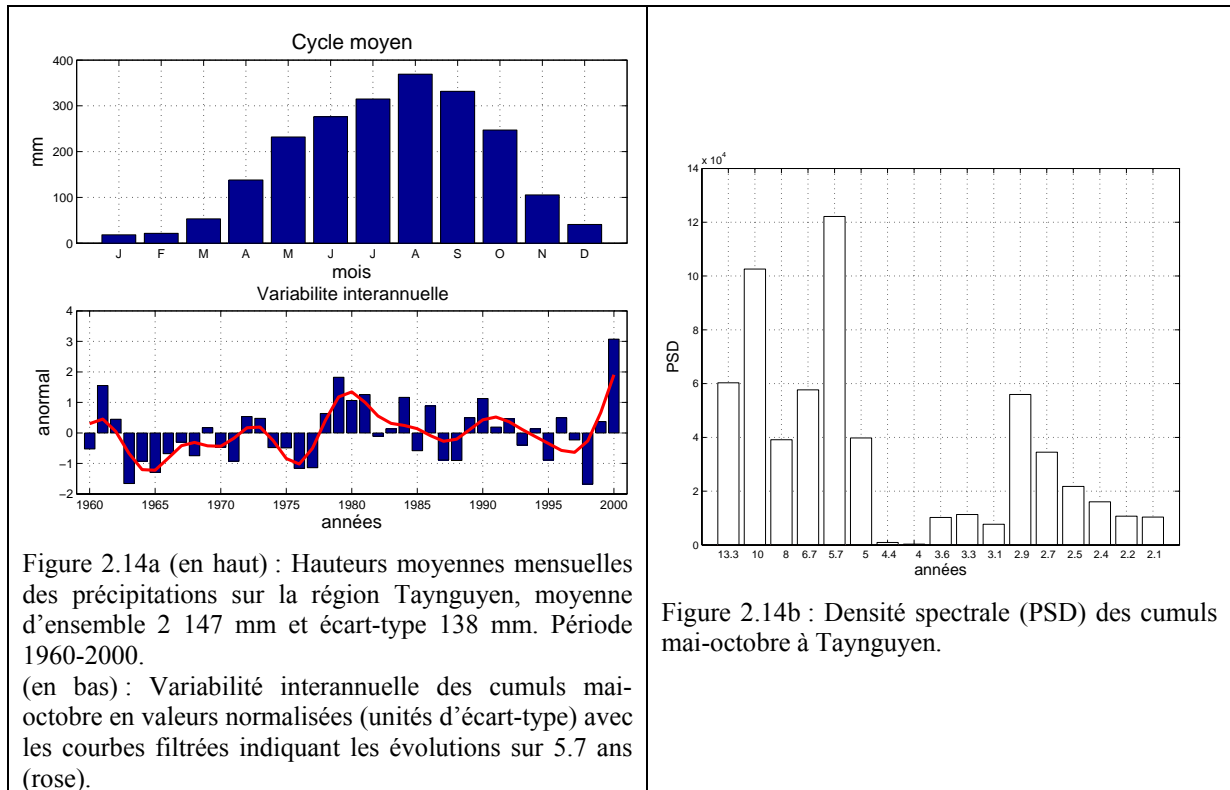


- Régime pluviométrique

Les moyennes annuelles sur le haut plateau nord sont d'environ 2 000-2 400 mm/an (Playcu : 2 203 mm/an), mais diminuent sur le haut plateau central d'environ 1 600-2 000 mm/an (Ban Me Thuat : 1 798 mm/an). Le haut plateau sud présente une forte variabilité spatiale des cumuls entre Da Lat (1 806 mm/an), et Bao Loc : 2 400-2 800 mm/an (2 783 mm/an).

La saison des pluies dure de mai à octobre et est centrée sur août (> 350 mm/mois). Cette saison apporte des abats assez considérables en juillet-septembre. Pourtant, la saison

sèche est bien marquée : les cumuls novembre-mars correspondent à seulement 7-8 % du total annuel.



2.2.7 La région Nambo

C'est une vaste région de plaine autour du delta du fleuve Mékong. Par sa position proche de l'équateur, Nambo connaît un climat tropical caractérisé par de hautes températures et une différence pluviométrique très marquée entre saison des pluies et saison sèche (Pham N.T., Phan T.D., 1993) (tableau 2.7). Le régime équatorial dans le Nambo est fortement atténué, mais toutefois reconnaissable. La modulation annuelle des pluies aux stations présente encore deux maxima : l'un en juin ou juillet, l'autre en septembre ou octobre, et deux minima en août et février (tableau 2.8)

Tableau 2.7 : Les caractéristiques des cinq stations de la région Nambo (période 1960-2000).

Stations	Position			Températures			Précipitations	
	latitude (nord)	longitude (est)	altitude (m)	janvier (°C)	avril (°C)	moyenne annuelle	moyenne annuelle	mai-oct. (%)
Ca Mau	9.17	105.17	3	25.3	28.1	26.8	2 438	82.5
Can Tho	10.03	105.78	3	25.2	28.3	26.7	1 673	86.1
Phu Quoc	10.22	103.97	2	25.6	28.4	27.1	3 036	83.5
Rach Gia	10.00	105.08	2	25.6	28.7	27.4	2 153	83.3
Vung Tau	10.33	107.08	4	25.0	28.2	26.7	1 439	91.7

Tableau 2.8 : Le cycle annuel de pluie avec deux maxima au Nambo.

Station	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aou	Sept	Oct	Nov	Déc	M. an
Tay Ninh	13.34	<u>10.92</u>	23.85	103.7	202.9	264.7	256.6	<u>233.7</u>	352.6	317.5	138.7	47.67	1 966.1
Vung Tau	3.105	<u>0.135</u>	5.307	27.98	189.0	218.8	232.3	<u>206.3</u>	232.5	235.7	80.13	15.94	1 447.2

Chiffres soulignés : les minima ; chiffres en gras : les maxima

- Régime thermique

La moyenne annuelle des températures se situe aux alentours de 26.5-27.5°C avec de faibles variations mensuelles : minimum en janvier (25-25.5°C), maximum en avril et mai (28-28.5°C) (figure 2.15a en haut). La figure 2.15a (en bas) présente les moyennes annuelles de températures sur la région Nambo pour la période 1960-2000. Il y a une tendance à la hausse évidente.

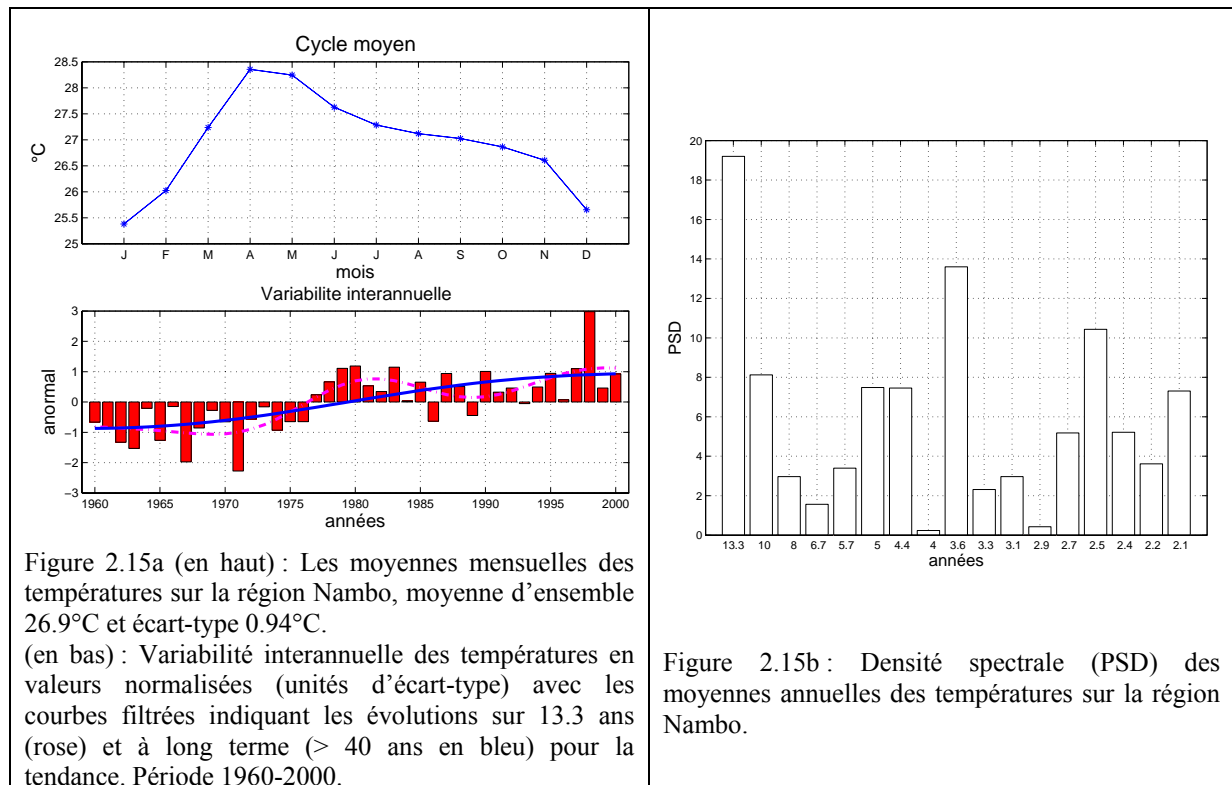


Figure 2.15a (en haut) : Les moyennes mensuelles des températures sur la région Nambo, moyenne d'ensemble 26.9°C et écart-type 0.94°C. (en bas) : Variabilité interannuelle des températures en valeurs normalisées (unités d'écart-type) avec les courbes filtrées indiquant les évolutions sur 13.3 ans (rose) et à long terme (> 40 ans en bleu) pour la tendance. Période 1960-2000.

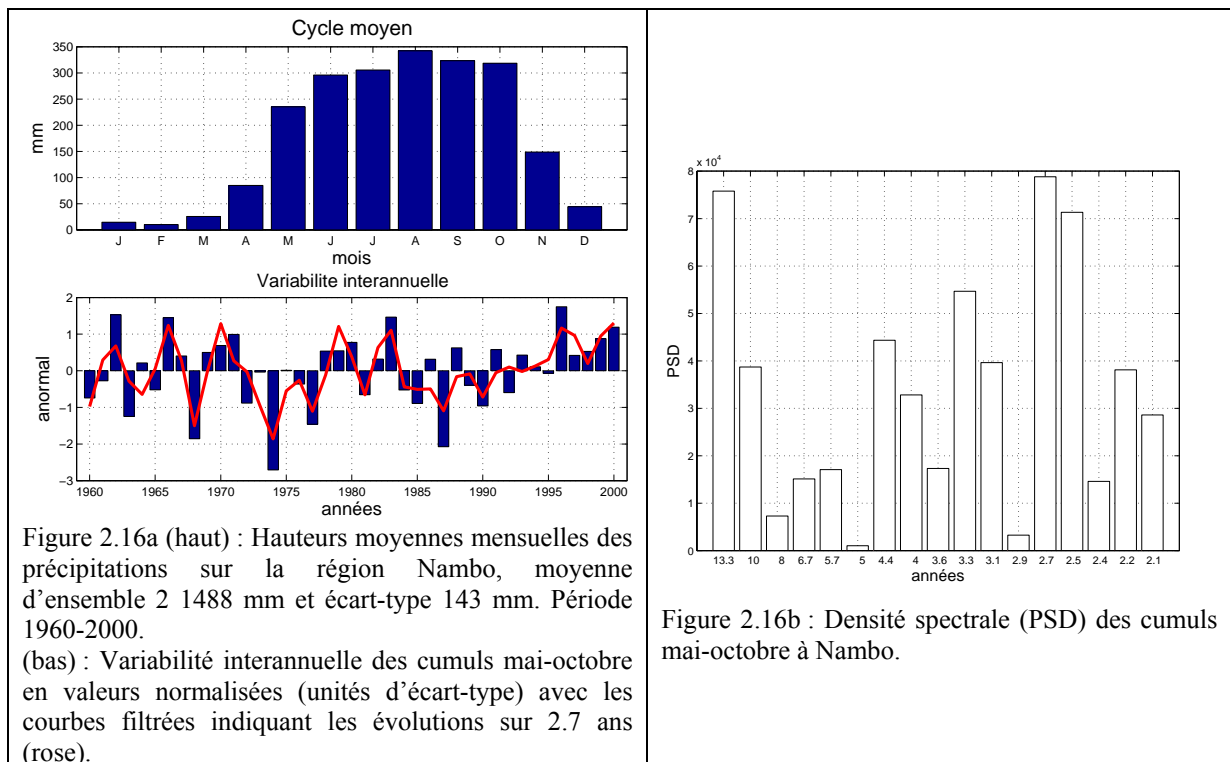
Figure 2.15b : Densité spectrale (PSD) des moyennes annuelles des températures sur la région Nambo.

- Régime pluviométrique

Les cumuls de précipitations dans cette région ne sont pas distribués de façon régulière. La région littorale côtière de NTB enregistre des cumuls très faibles (1 300-1 500 mm/an, comme à Vung Tau : 1 439 mm/an), tandis que sur la région côtière de Taynguyen, ils s'élèvent à 1 800-2 200 mm/an (Tay Ninh : 1 966 mm/an). Plus à l'ouest, à proximité de la

mer, les cumuls annuels avoisinent les 2 000-3 000 mm (Ca Mau : 2 438 mm ; Rach Gia : 2 153 mm ; Phu Quoc : 3 036 mm/an). Les autres stations de Nambo enregistrent des cumuls d'environ 1 500-1 800 mm/an (Can Tho : 1 673 mm/an ; Tan Son Nhat : 1 821 mm/an).

En saison des pluies, de mai à octobre, pendant la mousson de sud-ouest d'été boréal, les cumuls correspondent à environ 80-90 % du total annuel et l'on enregistre cinq mois de pluies supérieures à 300 mm/mois. La saison sèche, centrée sur décembre-février (10-15 mm/mois), correspond à l'hiver boréal lorsque les flux sont de nord-est.



Le tableau 2.9 présente les coefficients de corrélation entre les séries pluviométriques des sept régions. Les résultats montrent qu'il est possible de diviser le territoire du Vietnam en deux parties avec une frontière au col de Hai Van (16°N). Le nord Vietnam comprend ainsi quatre régions : Taybac, Dongbac, DBBB et BTB, les coefficients de corrélation entre ces régions étant supérieurs à 0.44. Le sud Vietnam compte trois autres régions : NTB, Taynguyen et Nambo, avec des coefficients supérieurs à 0.42.

Tableau 2.9 : Coefficients de corrélation linéaire entre les séries pluviométriques de sept régions climatologiques traditionnelles. Les signes *, **, *** si significatif à $p=0.1$, 0.05 et 0.01 respectivement.

	Taybac	Dongbac	DBBB	BTB	NTB	Taynguyen	Nambo
Taybac	1.00	0.55***	0.61***	0.59***	0.16	0.09	0.19
Dongbac		1.00	0.72***	0.44***	0.16	0.12	0.13
DBBB			1.00	0.62***	0.03	0.11	0.03
BTB				1.00	0.28*	0.16	0.26
NTB					1.00	0.42**	0.55***
Taynguyen						1.00	0.47*
Nambo							1.00

En résumé

Les résultats montrent que :

- les séries climatiques de la température sur la période 1960-2000 sont marquées notamment par une tendance à la hausse sur plusieurs régions du Vietnam, particulièrement sur la région du Nambo. La figure 2.17a montre la série temporelle des températures à Nambo aussi que le diagramme de test de Pettitt qui illustre une rupture statistique en 1977. Ce résultat souligne que le Vietnam est une des régions les plus sensibles au réchauffement global.

- en revanche, les séries temporelles des cumuls de pluies sur la période 1960-2000 ne montre pas de tendance à long terme évidente au niveau régional, sauf sur la région NTB. La figure 2.17b donne un exemple pour le Nambo : il n'y a pas de rupture dans le série des pluies.

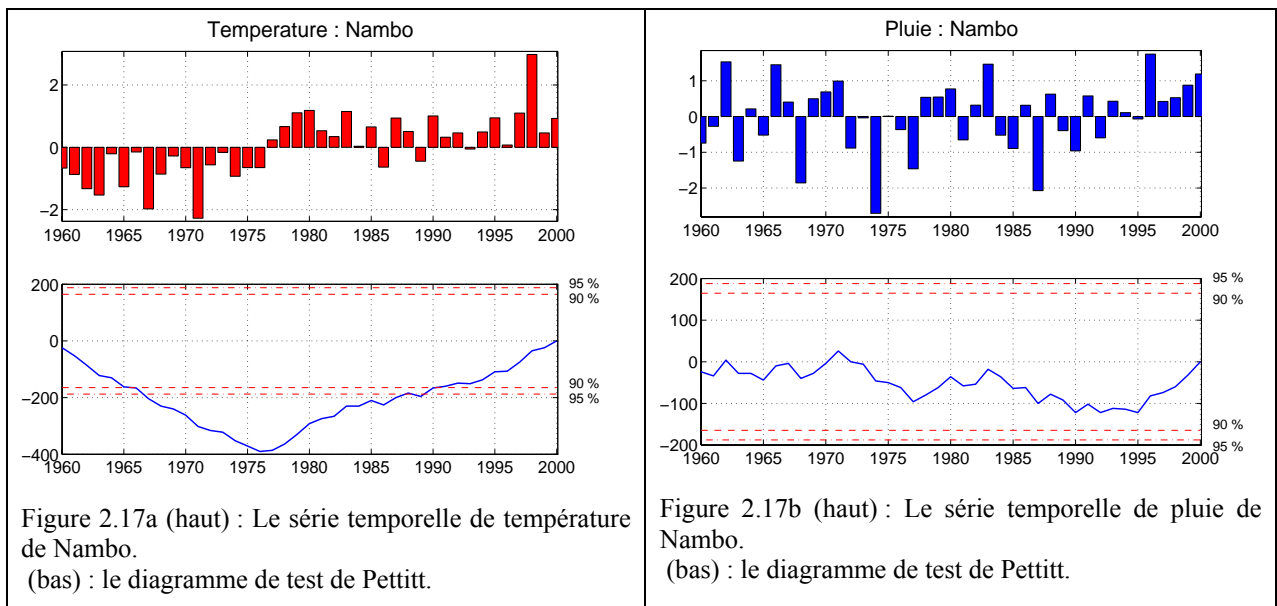


Figure 2.17a (haut) : Le série temporelle de température de Nambo.
(bas) : le diagramme de test de Pettitt.

Figure 2.17b (haut) : Le série temporelle de pluie de Nambo.
(bas) : le diagramme de test de Pettitt.

2.3 Analyse spatiale des champs pluviométriques au Vietnam

Les sept régions climatiques vietnamiennes ont été établies en s'appuyant sur plusieurs grandeurs mesurées : le rayonnement solaire, la température, les précipitations, l'humidité de l'air... (Nguyen D.N., Nguyen T.H., 2004). Dans cette section, nous utilisons seulement les données de pluies avec des méthodes de classification et de tableaux de corrélation afin de définir des régions homogènes plus spécifiques quant à la mousson et aboutir ainsi à une nouvelle régionalisation plus efficace au regard des précipitations.

2.3.1 Classifications

La méthode de classification avec l'algorithme clustering (K-means) a été appliquée aux données pluviométriques mensuelles des stations du Vietnam sur la période 1960-2000. K-means est un algorithme qui permet de classer les objets (ici, ce sont les stations) dans K groupes en minimisant la somme des carrés de distance entre les données et le centre du cluster correspondant. Le choix du cluster initial est aléatoire car il dépend des premières valeurs considérées. Il est donc important de ne pas considérer un seul résultat mais l'ensemble des résultats. Dans la pratique, on répète donc un certain nombre de fois l'algorithme de clusterisation. Ici, l'algorithme est répété mille fois avec de nouvelles séries pour chaque centre cluster initial et a été testé avec un nombre différent de classes. Ceci permet de séparer de façon robuste le signal et d'aboutir à une classification utile. Les résultats sont présentés en figures 2.18 à 2.21 et dans le tableau 2.10, et permettent ici de répertorier six classes homogènes :

- ✓ La classe 1 (rond bleu) qui domine, concerne la région du nord Vietnam, sauf les stations de Dalat, Buon Me Thuat, Phan Thiet, Vung Tau et Can Tho. Les moyennes annuelles de cumuls de pluies des stations de cette classe enregistrent environ de 1 500 à 1700 mm/an (tableau 2.10). La proportion de hauteurs moyennes mensuelles de précipitation pendant la saison des pluies n'est pas importante (30 mm). La figure 2.20 (classe 1) présente la variabilité interannuelle sur la période 1960-2000. Il n'y a pas de tendance évidente et les valeurs oscillent autour de la valeur moyenne 1 651 mm/an, avec un écart-type de 203 mm. On peut aussi noter un cycle significatif à 2.4 ans.
- ✓ La classe 2 (triangle rose) se retrouve dans la zone de hautes montagnes du nord. Les cumuls annuels moyens enregistrent environ 2 100-2 500 mm/an (tableau 2.10). À la

différence de la classe 1, la proportion des moyennes mensuelles de précipitations est plus élevée (50 mm) pendant la saison des pluies. Juin, juillet et août sont les mois qui enregistrent le plus de précipitations pendant l'année (> 400 mm/mois). La variabilité interannuelle est illustrée par la figure 2.20 (classe 2). Comme pour la classe 1, il n'y a pas de tendance évidente et les valeurs oscillent autour de la valeur moyenne (2 339 mm/an) avec un écart-type de 224 mm. On peut remarquer une concentration non significative de la variance sur 3.1 ans.

- ✓ La classe 3 (carré rouge) ne comprend qu'une seule station (Bac Quang). On la trouve dans les vallées qui concentrent les vents venus des fleuves Lo et Gam (nord Vietnam). Contrairement à l'ensemble des stations, Bac Quang enregistre des cumuls particulièrement élevés (4 848 mm/an) qui restent supérieurs à 600 mm/mois pendant six mois (tableau 2.10).
- ✓ La classe 4 (triangle jaune) se trouve dans la zone littorale de BTB. Cette région est souvent confrontée aux typhons. Les moyennes annuelles de précipitations se situent aux environs de 2 100-2 600 mm/an (Tableau 2.10). Il pleut fortement en deuxième partie de saison des pluies : septembre (> 400 mm), octobre (> 500 mm). La variabilité interannuelle présentée en figure 2.20 montre une tendance à la diminution avec une concentration non significative de la variance sur 2.7 ans. Les moyennes annuelles s'établissent à 2 339 mm/an, avec un écart-type de 445 mm. Le coefficient de variation est donc de 19 %, le double de celui de la classe 2. Cela peut être expliqué par l'activité cyclonique sur cette région.
- ✓ La classe 5 (losange turquoise) se trouve dans la zone littorale de NTB. Les moyennes annuelles avoisinent les 1 200-2 200 mm/an (tableau 2.10). Comme pour la classe 4, il pleut fortement en deuxième moitié de saison des pluies : septembre, octobre (> 400 mm). La variabilité interannuelle marque une tendance à l'accentuation avec une concentration non significative de la variance sur 2.4 ans. Les moyennes annuelles de pluies sont égales à 2 058 mm, avec un écart-type de 418 mm.
- ✓ La classe 6 (triangle vert) réunit en fait les régions Taynguyen et Nambo. Les moyennes annuelles de pluie atteignent environ 2 100-2 800 mm/an. La proportion des moyennes mensuelles de précipitations par rapport à la saison des pluies n'est pas élevée (30 mm). Sur la figure 2.20, on n'enregistre pas de tendance évidente, les valeurs oscillant autour de la valeur moyenne (2 685 mm/an) avec un écart-type de

275 mm. On peut aussi noter une concentration non significative de la variance sur 2.4 ans.

La classification est efficace : on retrouve ainsi certaines séparations entre régions traditionnelles, par exemple entre les classes 1 et 4 vers 19°N et entre la classe 5 et la partie du sud vers 12°N.

Figure 2.18 : Les six classes de stations

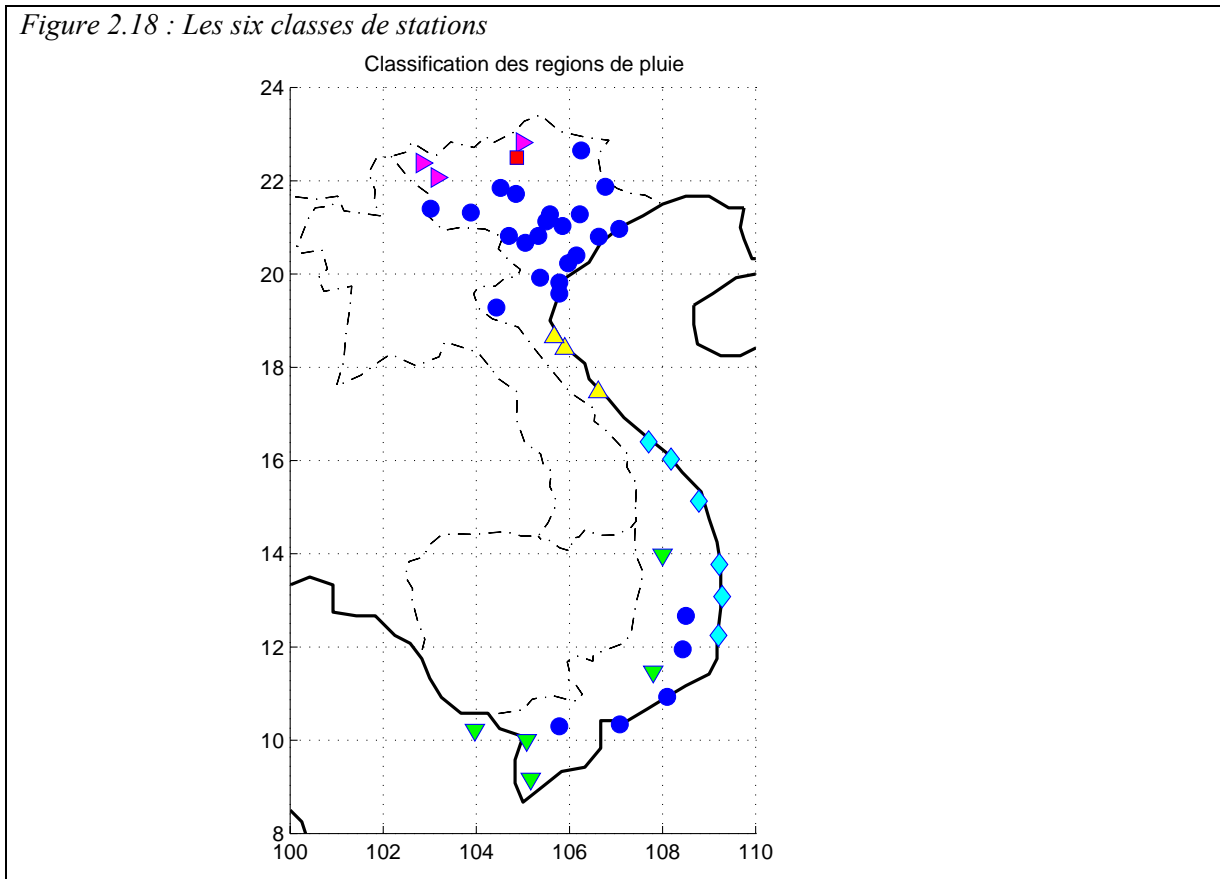


Figure 2.19 : Hauteurs moyennes mensuelles des précipitations sur les régions issues des classifications en nuées dynamiques sur le territoire du Vietnam pour la période 1960-2000.

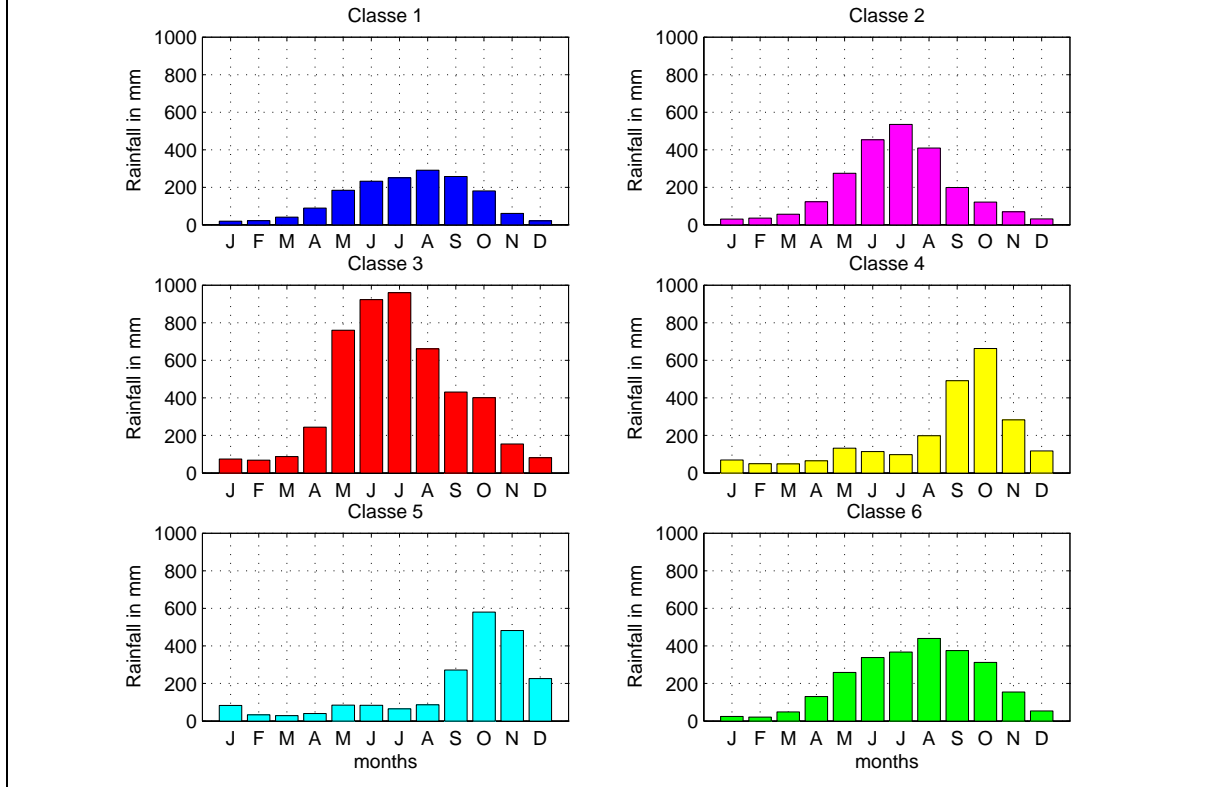


Figure 2.20 : Cumuls annuels (barres) et signal filtré (courbe) sur les six classes.

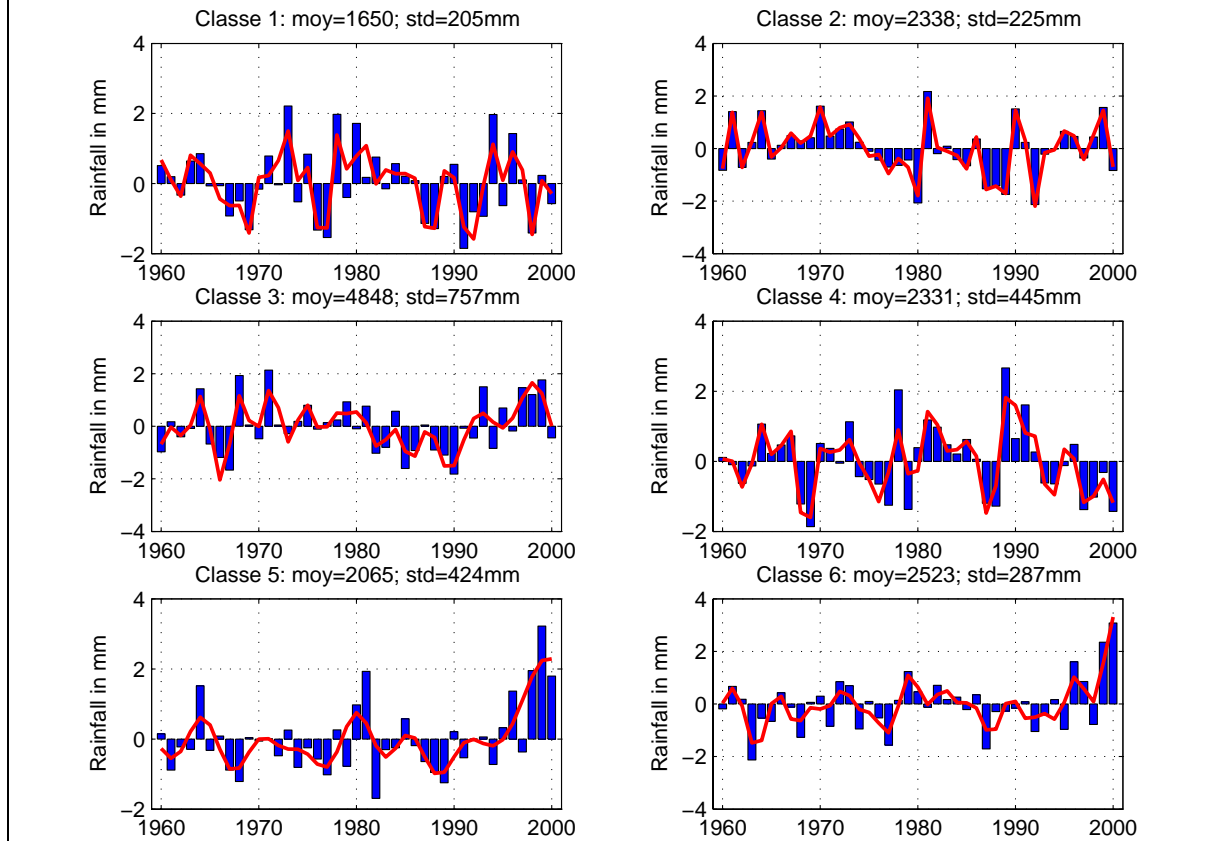


Figure 2.21 : Densités spectrales des cumuls annuels sur les six classes

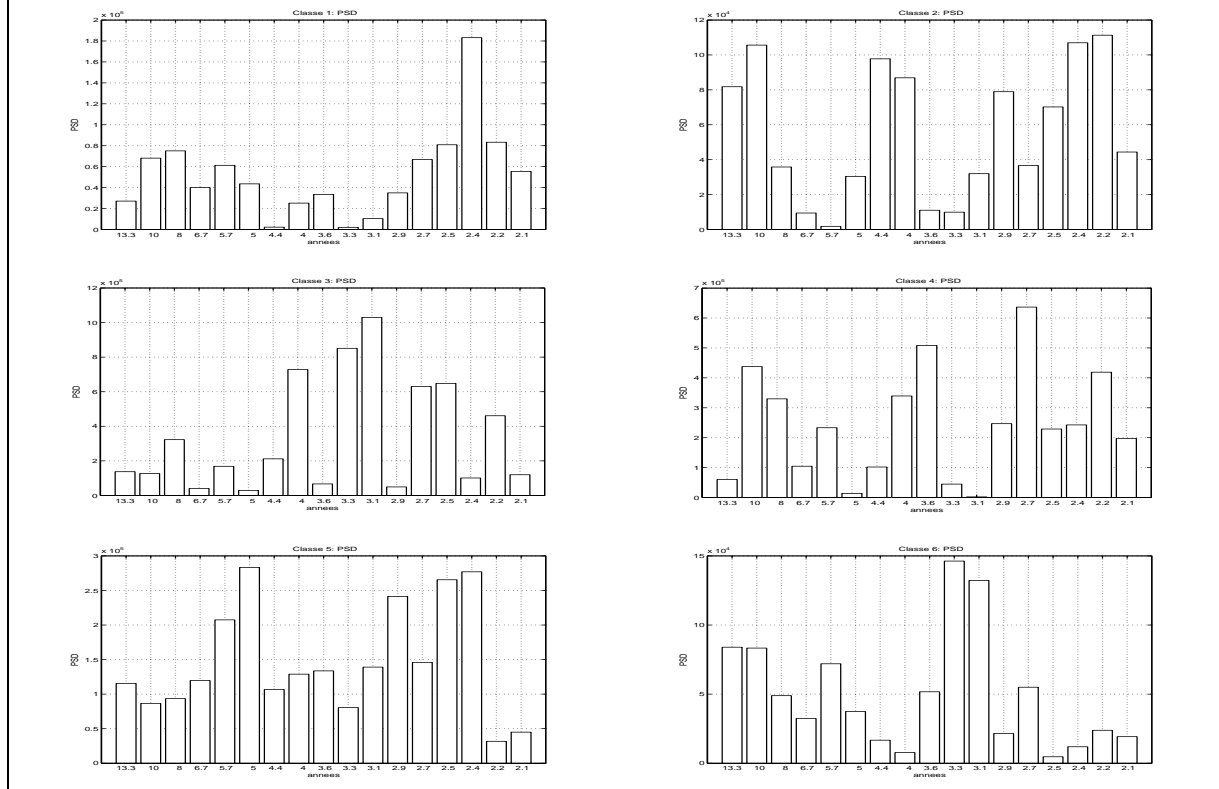


Tableau 2.10 : Les stations et les moyennes annuelles de pluie des six classes.

Stations	Moyenne annuelle	Stations	Moyenne annuelle	Stations	Moyenne annuelle
1^{ère} classification					
Dien Bien	1 574	Lang Son	1 304	Tuong Duong	1 254
Hoa Binh	1 884	Vinh yen	1 559	Thanh Hoa	1 723
Mai Chau	1 766	Bac Giang	1 558	Tinh Gia	1 823
Moc Chau	1 630	Ha Noi	1 654	Phan Thiet	1 069
Son La	1 439	Nam Dinh	1 743	Ban Me Thuat	1 798
Yen Bai	2 033	Ninh Binh	1 835	Da Lat	1 806
Van Chan	1 523	Phu Lien	1 698	Vung Tau	1 439
Cao Bang	1 430	Son Tay	1 814	Can Tho	1 673
Hon Gai	1 918	Bai Thuong	1 966		
2^e classification					
Lai Chau	2 104	Muong Te	2 417	Ha Giang	2 493
3^e classification					
Bac Quang	4 848				
4^e classification					
Vinh	2 057	Ha Tinh	2 685	Dong Hoi	2 250
5^e classification					
Hue	2 806	Quang Ngai	2 465	Tuy Hoa	1 824
Da Nang	2 147	Quy Nhon	1 816	Nha Trang	1 334
6^e classification					
Bao Loc	2 783	Ca Mau	2 438	Rach Gia	2 153
Play Cu	2 203	Phu Quoc	3 036		

2.3.2 Corrélations spatiales

Les résultats obtenus par la méthode de classification appliquée aux cumuls mensuels a permis de noter une frontière vers 19°N. On peut donc séparer la région BTB en deux parties : la partie nord (N-BTB) comprenant les stations Bai Thuong, Thanh Hoa, Tinh Gia et Tuong Duong, la partie sud (S-BTB) comprenant Vinh, Ha Tinh, Dong Hoi et Hue. Cette séparation correspond également aux caractéristiques climatiques, parce que la région Thanh Hoa est en réalité une zone de transition entre DBBB et BTB (Pham N.T., Phan T.D., 1993). Il existe aussi une séparation entre les parties nord et sud des régions NTB et Taynguyen. La limite vers 12°N est présentée sur la figure 2.18.

Au total et regardant la variabilité pluviométrique, on peut raisonnablement diviser l'espace en quatre nouvelles sous-régions : (1) N-NTB : stations de Da Nang, Quang Ngai, Quy Nhon, Tuy Hoa et Nha Trang, (2) S-NTB : stations de Phan Thiet ; (3) N-Taynguyen : stations de Playcu et B.M.Thuat et (4) S-Taynguyen : stations de Da Lat et Bao Loc.

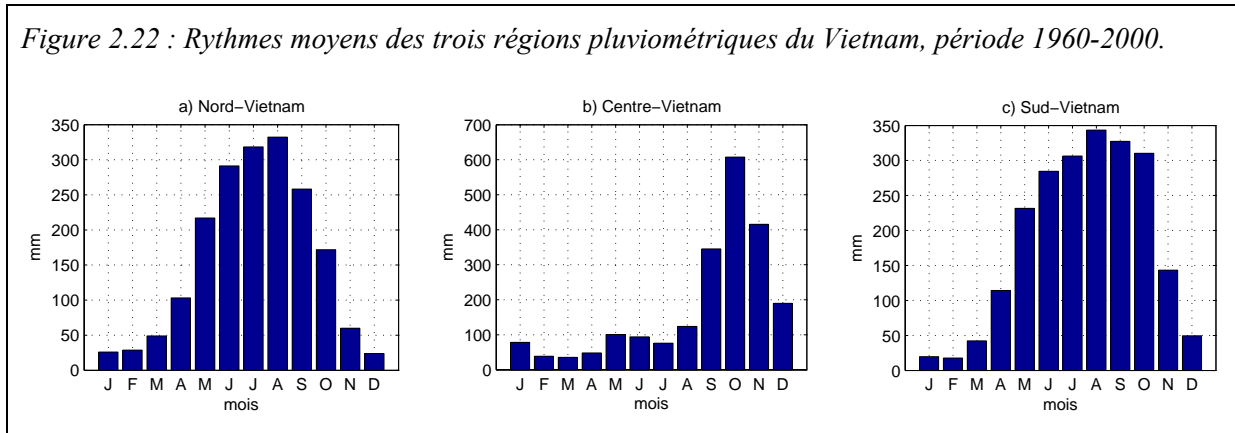
Le tableau 2.11 présente les coefficients de corrélation entre les séries pluviométriques des dix sous-régions. On notera que le coefficient de corrélation entre N-BTB et DBBB (0.76***) est plus élevé que celui avec S-BTB (0.55**). De même, la corrélation entre S-NTB et Nambo (0.60***) est légèrement plus forte qu'avec N-NTB (0.53**), comme d'ailleurs S-T.N. et Nambo (0.49***) l'est plus qu'avec N-T.N. (0.30*). Ces résultats attestent donc d'une forte homogénéité au sein de trois régions : (1) la région du nord Vietnam qui comprend Taybac, Dongbac, DBBB et N-BTB avec un minimum de corrélation de 0.55 ; (2) la région du sud Vietnam : S-Taynguyen, S-NTB et Nambo, $r=0.45$; (3) la région du centre Vietnam : S-BTB et N-NTB, $r=0.39$.

Tableau 2.11 : Coefficients de corrélation entre les séries pluviométriques des dix sous-régions. Les signes *, **, *** si significatif à $p=0.1$, 0.05 et 0.01 respectivement.

	Taybac	Dongbac	DBBB	N-BTB	S-BTB	N-NTB	S-NTB	N-T.N.	S-T.N.	Nambo
Taybac	1	0.55***	0.61***	0.66 ***	0.38**	0.17	0.09	0.22	-0.06	0.19
Dongbac		1	0.72***	0.45***	0.32**	0.15	0.14	0.18	0.03	0.13
DBBB			1	0.76***	0.35**	0.02	0.10	0.21	-0.02	0.04
N-BTB				1	0.55***	0.05	0.25	0.25	-0.07	0.15
S-BTB					1	0.39**	0.31**	0.29*	0.0	0.31*
N-NTB						1	0.53***	0.29*	0.33*	0.51 ***
S-NTB							1	0.43***	0.45***	0.60***
N-T.N.								1	0.30*	0.25
S-T.N.									1	0.49***
Nambo										1

L'ensemble de ces résultats permet une délimitation plus efficace que la division traditionnelle au regard de la pluie. On peut donc retenir que les champs pluviométriques sur le Vietnam définissent trois régions à forte cohérence spatiale : le nord Vietnam, le centre Vietnam et le sud Vietnam avec des frontières assez franches vers 12°N et 19°N. Les rythmes pluviométriques des trois régions sont présentés en figure 2.22. L'étape suivante consistera à décrire le comportement des saisons des pluies au sein de ces régions.

Figure 2.22 : Rythmes moyens des trois régions pluviométriques du Vietnam, période 1960-2000.



Synthèse de chapitre

L'objet de ce chapitre était de montrer les principales caractéristiques de la climatologie de la mousson vietnamienne et de définir des régions homogènes quant à la mousson afin d'aboutir à une nouvelle régionalisation plus efficace au regard des précipitations. Les résultats principaux de ce travail sont les suivants :

1) les cycles moyens des températures ont montré une amplitude importante dans la partie nord du Vietnam (au nord de 16°N) entre l'hiver et l'été, alors que celle-ci n'est pas significative dans la partie sud. Les températures sur la période 1960-2000 sont marquées notamment par une tendance à la hausse sur plusieurs régions du Vietnam, particulièrement sur la région du Nambo où elle est la plus évidente. Ceci est un fait qui n'avait pas encore été souligné dans la littérature ;

2) la saison des pluies dans le nord (Taybac, Dongbac et DBBB) et le sud du Vietnam (Taynguyen et Nambo) est associée à la circulation de mousson de sud-ouest de mai à octobre, mais centrée sur juillet ou août. Tandis que, dans le centre du Vietnam (BTB et NTB), la saison des pluies enregistre en raison du relief, du tracé des côtes et de la relative sécheresse du flux de sud-est, un maximum retardé jusqu'en octobre : les mois de septembre-novembre correspondent à la période active de la ZCIT, des typhons et du front polaire sur cette région. La variabilité interannuelle des cumuls de pluies sur la période 1960-2000 ne montre pas de tendance à long terme évidente au niveau régional, sauf sur la région NTB ;

3) le cycle moyen annuel et la variabilité des champs pluviométriques au Vietnam permettent de retenir trois régions à forte cohérence spatiale : le nord Vietnam, le centre Vietnam et le sud Vietnam avec des frontières assez franches vers 12°N et 19°N. Cette délimitation semble plus efficace au regard de la pluie que la division traditionnelle qui tend plus à morceler l'information.

Au chapitre suivant, nous analyserons les champs thermodynamiques de l'atmosphère associés à la pluie au Vietnam dans un contexte plus large.

Chapitre 3

Circulation de mousson et précipitations au Vietnam

Le but des analyses présentées dans ce chapitre est de décrire les caractéristiques générales de la circulation de mousson en lien avec les précipitations au Vietnam (cycle moyen annuel, variabilité) ce qui conduit à replacer le Vietnam dans le contexte plus large du Sud-Est asiatique.

La première partie présente les systèmes atmosphériques dominants : Front polaire, Zone de Convergence InterTropicale - ZCIT, circulation de mousson et typhons. Ce sont les *acteurs* qui influencent en premier le climat du Vietnam à différentes échelles. Les données de réanalyses du NCEP/DOE2 sont ensuite ajoutées pour décrire les champs atmosphériques moyens associés pour les principaux paramètres : pression moyenne au niveau de la mer, vent au niveau 925 hPa, température à la surface de la terre, précipitations, énergie statique humide (ESH) de l'atmosphère dans les basses couches, profils des vents. On présente enfin quelques analyses composites pour rendre compte de la variabilité.

La seconde partie cible les précipitations au Vietnam dans le contexte de l'Asie à l'aide des données CMAP, avec (i) les comparaisons nécessaires entre estimations CMAP et observations de pluies *in situ* ; (ii) les analyses spatio-temporelles des champs de précipitations.

3.1 La circulation de mousson sur le Vietnam

3.1.1 Caractéristiques générales

Le Vietnam en particulier et l'Indochine péninsulaire en général sont des régions de mousson dites de transition parce que positionnées entre les deux systèmes régionaux principaux de la mousson en Asie : mousson d'Asie du Sud et mousson d'Asie de l'Est (Pham et Phan, 1993 ; Zhang *et al*, 2002). Le territoire du Vietnam est donc sous l'influence permanente de flux d'origines et de caractères différents dont l'influence alternée et les fréquences différentes expliquent la forte variabilité climatique du Vietnam.

3.1.1.1 Les masses d'air associées à l'alternance des flux de mousson

Nous présentons ici les principales masses d'air influençant la météorologie selon la nomenclature toujours en usage au Vietnam, en établissant les liens avec les types de temps tels qu'ils sont perçus et la saisonnalité traditionnelle.

- *L'air polaire*

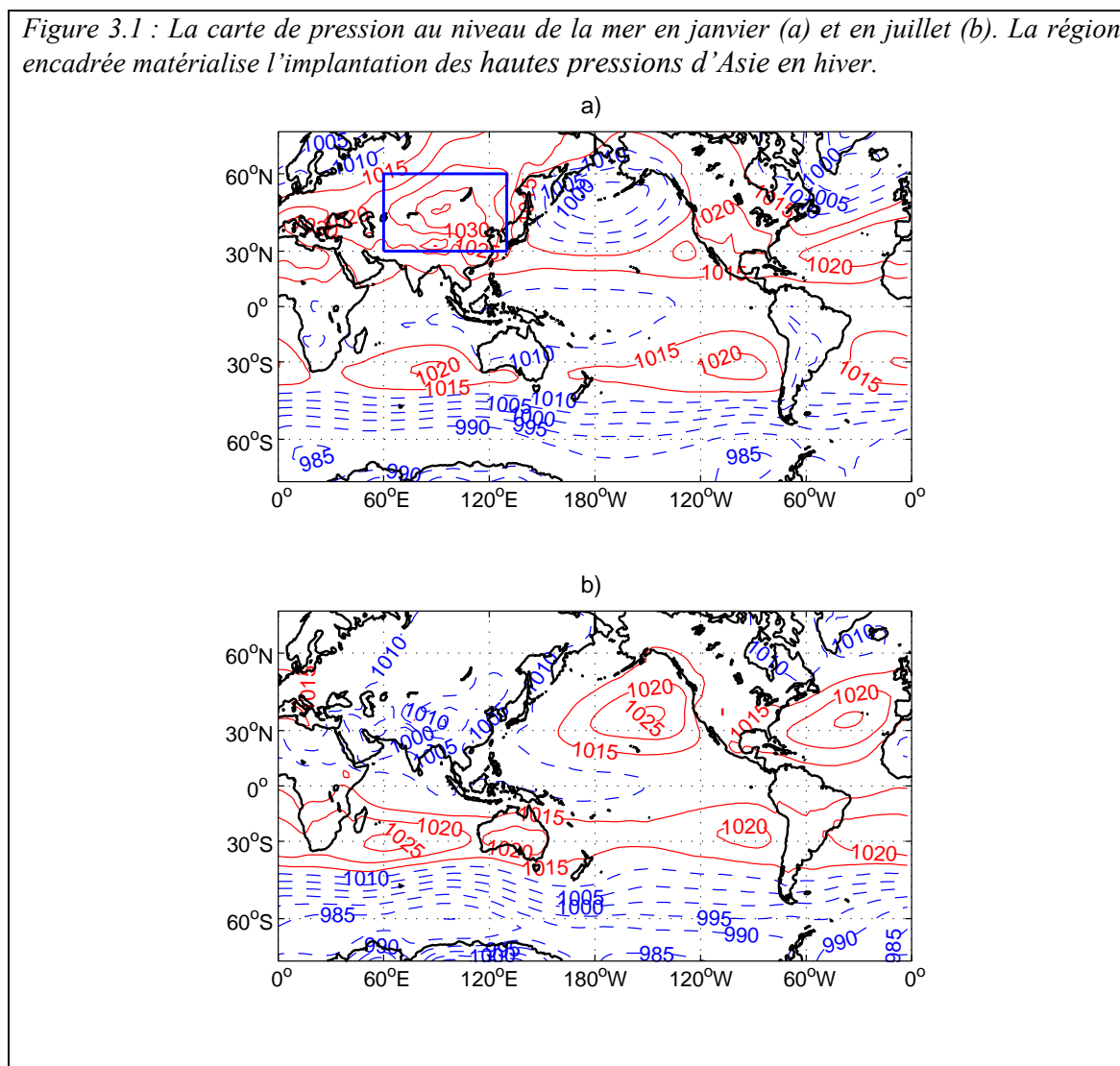
C'est une masse d'air qui tire son origine d'un séjour prolongé aux hautes latitudes où, pendant l'hiver, la surface est recouverte d'une couche de neige permanente (Pham N.T., Phan T.D., 1993). La température de l'air au contact de cette couche s'abaisse de quelques dizaines de degrés et devient inférieure à zéro. Il s'établit alors une zone de hautes pressions qui couvre une vaste région, appelées hautes pressions d'Asie (voir la région encadrée en figure 3.1a). Lors du développement d'une dorsale, cette masse d'air se déplace vers le sud et peut arriver directement sur le Vietnam après être passée au-dessus du territoire chinois. Elle forme alors une masse d'air polaire, transformé mais sec. Quand elle passe au-dessus de la mer du Japon, l'est de la mer de Chine ou sur le golfe Bac Bo du Vietnam, elle s'humidifie (air polaire transformé humide).

- L'air polaire transformé est sec quand l'humidité originelle du courant n'est pas modifiée, ce qui se produit quand il traverse le grand territoire de la Chine ; en revanche, la température connaît de profondes modifications. À son arrivée sur le Vietnam, sa température est d'environ 14-20°C et son humidité est d'environ 70-80 %. C'est l'air le plus froid et le plus sec relevé sur le territoire. Il domine dans le nord du pays (au-delà de 16°N), pendant la première moitié de l'hiver. Il établit la saison '*Hanh*' du Bac Bo Vietnam.

- L'air polaire transformé est humide lorsque, après le mois de janvier, le centre de hautes pressions d'Asie se déplace vers l'est. Arrivant au Vietnam, il doit alors traverser la mer de

Chine et la mer du Japon. L'humidité du courant change considérablement puisqu'en arrivant sur le golfe Bac Bo, l'air devient presque saturé. Sur le continent, il établit le type de temps 'Mua phun' pendant la deuxième moitié de l'hiver, un type de temps très particulier en région Bac Bo, qui consiste en un type de crachin (petites gouttelettes d'eau restant en suspension) (Bluzon E., Carton P., 1930)

Figure 3.1 : La carte de pression au niveau de la mer en janvier (a) et en juillet (b). La région encadrée matérialise l'implantation des hautes pressions d'Asie en hiver.



- L'air maritime de Chine de l'Est

Son origine tient à la masse d'air polaire qui a été en contact avec la surface de la mer de Chine de l'Est pendant plusieurs jours et qui, par la suite, s'est tropicalisée (Pham N.T., Phan T.D., 1993). Cette masse d'air perdure tout l'hiver sur le territoire du Vietnam. Au nord, elle domine au début et à la fin de cette saison, mais est repoussée par l'air polaire au milieu de l'hiver. Au sud Vietnam, elle est dominante pendant tout l'hiver.

En général, l'air maritime de Chine de l'Est est tiède, humide et assez stable (en région Bac Bo, la température moyenne est d'environ 19-24°C et l'humidité relative d'environ 85-90 %). Le soleil est présent et la nébulosité nulle. En fin d'hiver, quand il remplace l'air d'origine polaire, il se stabilise nettement au contact de la surface froide et se sature donc de vapeur d'eau. Il impose un temps dit '*Nom*' en région Bac Bo. Par contre, s'il est remplacé par l'air polaire, il devient instable, des nuages se forment et la pluie tombe.

- L'air tropical de l'océan Indien nord

Présent principalement au début de la mousson d'été (mai et juin), il s'accompagne d'un flux de sud-ouest généralisé sur le Vietnam (température moyenne d'environ 26-34°C et humidité d'environ 80-85 %). Au nord du pays, cet air passe au-dessus des chaînes montagneuses Truong Son. L'effet de foehn rend l'air très chaud et sec sur les régions Taybac et BTB. Il est à noter que la température peut atteindre 38°C sous une humidité relative inférieure à 40 % (Pham N.T., Phan T.D., 1993). Toutefois, l'effet de foehn se produit seulement au-dessous de 1 500 m ; au-dessus, sur les hautes terres, l'air reste humide et favorable au développement de nuages et de précipitations. Lorsqu'il affecte le sud du Vietnam, au relief moins marqué, cet air reste chaud et humide (pas d'effet de foehn, d'où une température d'environ 27-30°C et une humidité d'environ 85 %). Dans cette région, il annonce le début de la saison des pluies.

- L'air équatorial

Au Vietnam, cette masse d'air n'apparaît qu'en juillet-septembre. Elle doit son origine à la déviation des alizés de l'hémisphère sud par la composante horizontale de la force de Coriolis après qu'ils ont franchi l'équateur. Il est plus frais et humide que l'air tropical décrit ci-dessus. Au nord Vietnam, sa température est environ de 27-30°C et son humidité avoisine les 85-90 %. Il constitue la principale source d'humidité de la saison des pluies. Au sud Vietnam, en revanche, il n'y a pas de différence sensible entre l'air tropical maritime issu des régions nord de l'océan Indien et l'air équatorial.

- L'air tropical du Pacifique

Cette masse d'air qui vient de la bordure sud-ouest de la dorsale de hautes pressions du Pacifique établit un flux de sud-est sur le Vietnam (Pham N.T., Phan T.D., 1993 ; Yihui Ding et Sikka D.R., 2006). Il intervient surtout au début de la mousson d'été (mai) et à la fin (septembre) et s'accompagne d'un temps stable, avec une nébulosité faible.

3.1.1.2 Les perturbations atmosphériques

La mousson vietnamienne n'est pas seulement une circulation moyenne appréhendable à l'échelle mensuelle et la saisonnalité ne dépend pas seulement des types de temps décrits ci-dessus. Les caractères climatiques régionaux dépendent aussi de l'influence des perturbations synoptiques et intrasaisonnières souvent associées à l'activité des fronts en hiver, de la ZCIT et des typhons en été. Ces perturbations ont un rôle important dans le climat du Vietnam. De façon pédagogique, on peut distinguer.

- *Le Front polaire*

Le Front polaire est établi quand la dorsale de hautes pressions d'Asie se développe dans le plan méridien. Il se manifeste non seulement par une accélération des vents de NE, mais aussi par des « coups de froid » sensibles. On dénombre, en moyenne et par an, environ vingt occurrences (Pham N.T., Phan T.D., 1993) au nord de 16°N. Il est plus rare (trois ou quatre fois par an) qu'ils affectent les latitudes plus basses. Au milieu de l'hiver (décembre), ils interviennent à raison de trois ou quatre fois par mois en moyenne, les autres mois à raison d'une ou deux ou trois fois (voir le tableau 3.1).

Tableau 3.1 : Fréquences du Front polaire sur le Vietnam (occurrences).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Dongbac	2.6	3	2.8	2.6	1.4	0.4	0	0	0.4	2.4	2.8	3.6	22
DBBB	2.6	2.8	2.8	2.2	1.2	0.4	0	0	0.4	2.2	2.4	3.6	20
NTB	1.0	0.8	0.2	0.2	0	0	0	0	0	0	0.2	0.8	3.2
Nambo	0.4	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.8

La première conséquence importante de l'arrivée du Front polaire est la diminution de la température. La différence de température avant et après le passage d'un front est de 5°C en moyenne, mais elle peut atteindre 10-15°C. La deuxième conséquence est qu'il engendre des pluies importantes pour le nord Vietnam pendant le dernier mois de la saison sèche (mars-avril). De nombreux auteurs ont montré que, sur le centre Vietnam, les très fortes précipitations sont associées à la présence du Front polaire et à la ZCIT pendant la saison des typhons en septembre-décembre (Pham V.A., 1993 ; Le B.H., 1997 ; Dao T.L., Nguyen T.T.T., 2004 ; Le D.Q., Nguyen N.T., 2006).

- *La Zone de Convergence InterTropicale (ZCIT)*

À l'échelle planétaire, la ZCIT est associée aux zones de plus basses pressions de la bande intertropicale et concentre la convergence des vents au niveau de ces basses pressions

(Philippon N., 2002). Elle se caractérise par des mouvements ascendants engendrant le développement de nuages convectifs pluvio-gènes (de type cumulonimbus) qui participent au maintien de la balance énergétique de la zone équatoriale.

La structure de la ZCIT varie selon les régions et les saisons. Dans la région du Sud-Est de l'Asie, elle se manifeste le plus nettement sur le territoire du Vietnam et des Philippines (Pham N.T., Phan T.D., 1993).

À partir de la fin avril, la ZCIT franchit l'équateur. À ce moment-là, elle adopte une direction zonale, les basses pressions continentales de l'Asie se développant aussi vers le sud et le sud-est. Au fil des mois, le flux de mousson du SO originaire de l'océan Indien repousse les hautes pressions du Pacifique vers l'est et le nord. C'est pour cette raison que l'axe de la ZCIT tourne dans le sens NO-SE ou N-S quand elle migre vers les hautes latitudes. Au mois de juin et de juillet, la ZCIT n'atteint pas encore l'Asie de l'Est, et tout le Vietnam est dominé par des vents de mousson d'été.

Au mois d'août, les vents de SO commencent à s'affaiblir. La crête de hautes pressions subtropicale du Pacifique nord se développe vers l'ouest et suscite une rotation de la ZCIT qui se rétracte et s'étend à l'Asie de l'Est. À partir du début du mois d'août, la ZCIT est sur le territoire vietnamien. Elle se positionne dans une direction ONO-ESE sur la mer du sud de la Chine et le nord du Vietnam. Au mois de septembre, la ZCIT s'étend dans le sens zonal et se positionne aux latitudes du centre du Vietnam. En octobre, sa position est plus méridionale, aux latitudes du sud du Vietnam (Pham N.T., Phan T.D., 1993).

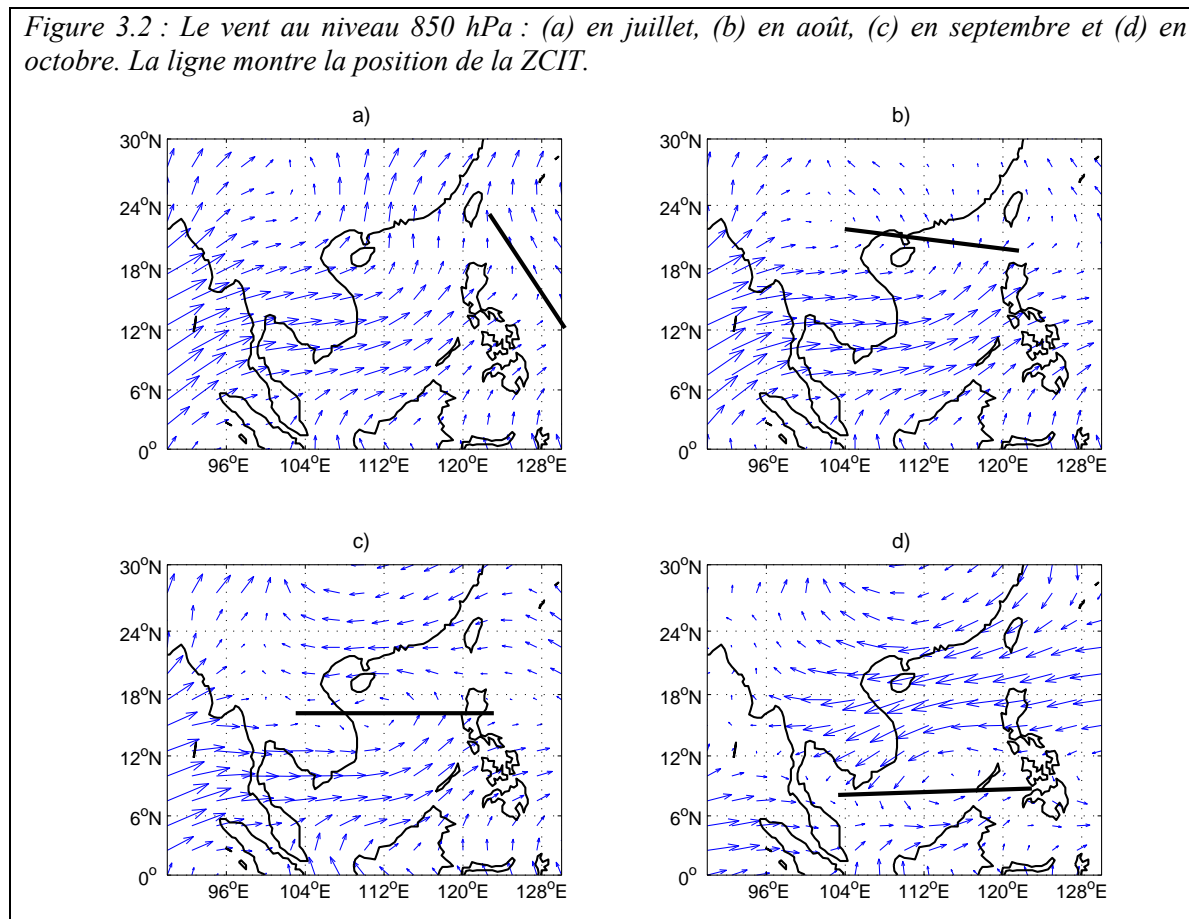
Pour définir les positions de la ZCIT, Philippon N. (2002) a utilisé le champ de vent ; Ding Y. et Sikka D.R. (2006) ont travaillé avec les lignes de courant au niveau 850 hPa. Dans cette étude, nous avons sélectionné le champ du vent au niveau 850 hPa sur la période 1979-2004 pour définir ces positions (figure 3.2). Ces résultats sont très concordants avec les résultats de Pham N.T., Phan T.D. (1993) et de Ding Y., Sikka D.R. (2006).

La ZCIT se caractérise par sa translation méridienne, mais s'affaiblit et se désagrège aux latitudes extratropicales. Au nord Vietnam, les cumuls de pluies associés à la ZCIT ne sont pas importants, avec des précipitations de 50 mm/jour environ, mais les pluies sont prolongées dans le temps et ceci sur une bande de quelque cent kilomètres environ qui correspond à une région de convergence et d'ascendance des flux associée à la ZCIT. C'est le type de temps '*Mua gau*' au Bac Bo. Par contre, au sud Vietnam, la ZCIT est très active et la

région d'ascendance et de convergence associée plus concentrée dans l'espace. Cette structure assez étroite (100 km environ) génère de fortes précipitations sous orage.

Par ailleurs, la ZCIT dans la région nord-ouest Pacifique et la mer Bien Dong est très active. Elle est à l'origine de la plupart des cyclones et des typhons (Pham N.T., Phan T.D., 1993 ; Ding Y. et Sikka D.R., 2006).

Figure 3.2 : Le vent au niveau 850 hPa : (a) en juillet, (b) en août, (c) en septembre et (d) en octobre. La ligne montre la position de la ZCIT.



- Les cyclones ou les typhons

C'est en 1845 que le mot *cyclone* fut utilisé pour la première fois par Piddington, de l'observatoire de Calcutta, pour désigner ce que l'on appelait, jusqu'alors, coup de vent, tempête ou ouragan. Un cyclone tropical est une perturbation atmosphérique occasionnant des vents tourbillonnants et des pluies diluviennes. Il se forme sur les océans tropicaux où il génère houle, marée et tempête. Le cyclone se caractérise par une énorme masse nuageuse, d'un diamètre moyen de 500 km, pouvant dépasser 1 000 km, organisée en bandes spiralées qui convergent vers un anneau central : c'est la partie la plus active du cyclone. Les pluies y sont torrentielles et les vents très violents. Au cœur de cet anneau, se trouve l'œil, une zone de

calmes où le vent est faible et le ciel généralement peu nuageux. Celui-ci se présente comme un entonnoir, plus large en haut qu'en bas, entouré d'une muraille nuageuse de 14 000 à 18 000 mètres de hauteur, appelée mur de l'œil. Son diamètre est de 40 km en moyenne. Il est associé à une zone de basses pressions atmosphériques. Les cyclones arrivent en général de l'océan (Pacifique sud, nord et sud de l'océan Indien). Le mot typhon désigne les cyclones du Sud-Est asiatique (http://www.refer.mg/madag_ct/).

Le tableau 3.2 présente une statistique du nombre de typhons ayant atteint les côtes du Vietnam entre 1911 et 1965 (Pham N.T., Phan T.D., 1993) : leur nombre diminue du nord au sud, surtout au sud du 16°N, une limite déjà indiquée dans notre régionalisation pluviométrique. Il y a également une différence au regard du cycle annuel : au nord de 16°N, l'occurrence maximale est centrée sur août-septembre, alors qu'au sud le maximum d'activité est déporté vers la fin de l'année (entre octobre et décembre).

Tableau 3.2 : Nombre de typhons atteignant les côtes du Vietnam sur une période de cinquante-cinq ans (de 1911 à 1965).

Régions	Apr.	Mai.	Jin .	Jui.	Aôu.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
>20°N	-	1	2	9	13	10	5	-	-	40
20°N-18°N	-	1	2	8	8	16	6	-	-	41
18°N-16°N	-	2	2	3	4	14	11	4	-	40
16°N-13°N	1	1	-	-	-	7	12	7	1	29
13°N-11°N	1	1	-	-	-	1	6	7	2	18
<11°N	1	1	-	-	-	-	1	3	2	8

3.1.2 Conditions atmosphériques associées à la mousson

L'élément majeur de la circulation atmosphérique sur le Vietnam est la circulation de mousson, caractérisée par un renversement saisonnier des vents. Selon les directions dominantes et de façon schématique, l'année peut être divisée en deux saisons de mousson :

- la mousson d'hiver boréal, qui correspond au semestre dominé par les flux de NE d'octobre à mars : on distinguera la période du début d'hiver (OND) et la période de la fin d'hiver (JFM) ;
- la mousson d'été boréal, qui correspond à la période dominée par les flux de SO : elle comprend la période associée à la mise en place au printemps (AMJ) et la période de pleine mousson en été (JAS).

Pour préciser les conditions atmosphériques associées, plusieurs paramètres ont été choisis : la pression au niveau de la mer, la température en surface, l'énergie statique humide en surface et l'eau précipitable. Ces informations sont analysées en quatre cartes présentant les quatre périodes de l'année : JFM, AMJ, JAS et OND (figures 3.3-3.7a, b, c et d).

- Températures en surface

Le cycle saisonnier de températures répond à la variation de l'angle d'incidence des rayons solaires. En hiver boréal, la position apparente du soleil est dans l'hémisphère sud, et les températures sur la Chine et le nord Vietnam sont inférieures à 20°C (figure 3.3ac). En effet, les hautes pressions thermiques associées à l'anticyclone sibérien favorisent les advections d'air froid de NE. En revanche, en été, les températures sont supérieures à 22°C (figure 3.1bc), suite aux advections chaudes dans la mousson depuis le sud-ouest et à l'effet radiatif.

Le tableau 3.3 permet avant de comparer les données du NCEP et celles directement issues d'observations au Vietnam. On note une très bonne adéquation, sauf dans la région du delta du fleuve Rouge (DBBB) et la partie nord du centre Vietnam (BTB) où les températures estivales NCEP en été sont minorées de 1.5-3.5°C par rapport à celles observées aux stations. Cette différence est localement due à l'effet de foehn (voir note au chapitre 2) lié aux flux de SO en aval de la chaîne Truong Son orientée NO/SE et d'altitude d'environ 1 000 m. On note, en effet, une différence de 3-5°C entre les régions BTB (juste derrière la chaîne) et les régions du Laos en amont de la chaîne. Les données NCEP établies sur un carré de 2.5°x 2.5° de côté ne peuvent rendre compte de ces différences.

Tableau 3.3 : Les températures de données du NCEP et d'observations, période 1979-2000 : températures NCEP (20.0°N-21.9°N, 105°E-106.9°E, 2^e colonne) et températures observées aux stations en région DBBB (3^e colonne) ; NCEP (18.0°N-20.0°N, 105°E-106.9°, 4^e colonne) et région BTB (5^e colonne) ; NCEP (12.4°N-16.2°N, 108.75°E-110.6°E, 6^e colonne) et région NTB (7^e colonne) ; NCEP (8.6°N-10.52°N, 105°E-106.9°E, 8^e colonne) et région Nambo (9^e colonne). Unité : degrés Celsius.

Période	DBBB		BTB		NTB		Nambo	
	NCEP (°C)	Obs. (°C)	NCEP (°C)	Obs. (°C)	NCEP (°C)	Obs. (°C)	NCEP (°C)	Obs. (°C)
JFM	17.8	18.0	20.5	19.4	24.3	24.2	26.6	26.5
AMJ	24.4	26.5	25.6	27.1	27.4	28.3	28.3	28.3
JAS	24.8	28.4	26.0	28.3	27.2	28.4	27.2	27.3
ONS	18.3	21.6	21.1	21.8	24.9	25.0	26.2	26.5

- Pressions au niveau de la mer

Le champ de pressions au niveau de la mer est présenté à la figure 3.4. Elles sont les révélateurs évidents de l'influence, en hiver boréal, des hautes pressions thermiques (froides) venues du nord, et, en été boréal, des basses pressions d'Asie du Sud. Pendant la période OND, l'axe de la crête de hautes pressions se place sur la Chine et le Vietnam (figure 3.4d), mais par la suite en JFM, il se déplace sur l'est de la mer de Chine et la région Bien Dong (figure 3.4a). En AMJ, le Vietnam est pris dans le talweg de la bordure est des basses pressions d'Asie du Sud (figure 3.4b). En JAS, ce type de talweg se développe en direction de l'est, ce qui établit des basses pressions sur le golfe Bac Bo (figure 3.4c).

- L'énergie statique humide de l'atmosphère

Les champs d'énergie statique humide (ESH) à la surface de la terre sont présentés à la figure 3.5. En hiver boréal, le contenu énergétique inférieur à 355kJ/kg dans les basses couches au nord du Vietnam et au sud de la Chine illustre la sécheresse et la stabilité de la masse d'air d'origine continentale associée aux flux de NE (figure 3.3ad). À l'inverse, en été boréal, le contenu énergétique, supérieur à 360kJ/kg (figure 3.3bc), est observé sur tout le territoire du Vietnam, qui révèle la chaleur et l'humidité du flux de SO (issu de la masse d'air équatorial) après un parcours au-dessus de l'océan Indien.

- L'eau précipitable

L'humidité intégrée dans la colonne de l'atmosphère est présentée en figure 3.6. Elle montre une grande variabilité au cours de l'année. En hiver, l'eau précipitable est de 28-40 kg/m² au nord Vietnam ; au sud, elle atteint 36-48 kg/m². En revanche, l'été enregistre une homogénéisation puisque sur tout le territoire du Vietnam les valeurs oscillent autour de 42-54 kg/m². Cette homogénéisation des valeurs vient de l'advection généralisée de la vapeur d'eau au sein du flux de mousson.

Enfin, la figure 3.7 présente les cycles moyens annuels des variables sélectionnées sur le fuseau 102-110°E. Ceux-ci peuvent être décrits assez simplement. Les températures enregistrent un maximum en mai par 10°N par effet radiatif et diminuent donc en direction du nord (figure 3.7a). Le champ de pressions au niveau de la mer (PNM) est, quant à lui, partiellement régi par l'effet thermique de basses couches : il montre un minimum d'été par 20°N et les pressions augmentent en lien avec les températures vers le nord et en hiver (figure 3.7b). Le champ d'énergie statique humide montre un maximum d'été en région équatoriale (figure 3.7c) en raison de la double présence de températures élevées et d'une humidité

spécifique importante, ce qui explique aussi le maximum d'eau précipitable (figure 3.7c) équatorial d'hiver et sub-équatorial d'été. En été, le maximum de convection équatorial se déplace vers le nord où les eaux sont plus chaudes (figure 3.7d).

Figure 3.3 : Les moyennes de température à la surface de la terre. Les isolignes bleues (rouges) indiquent la valeur supérieure (inférieure) de 300°K en janvier-mars (a), en avril-juin (b), en juillet-septembre (c) et octobre-décembre (d).

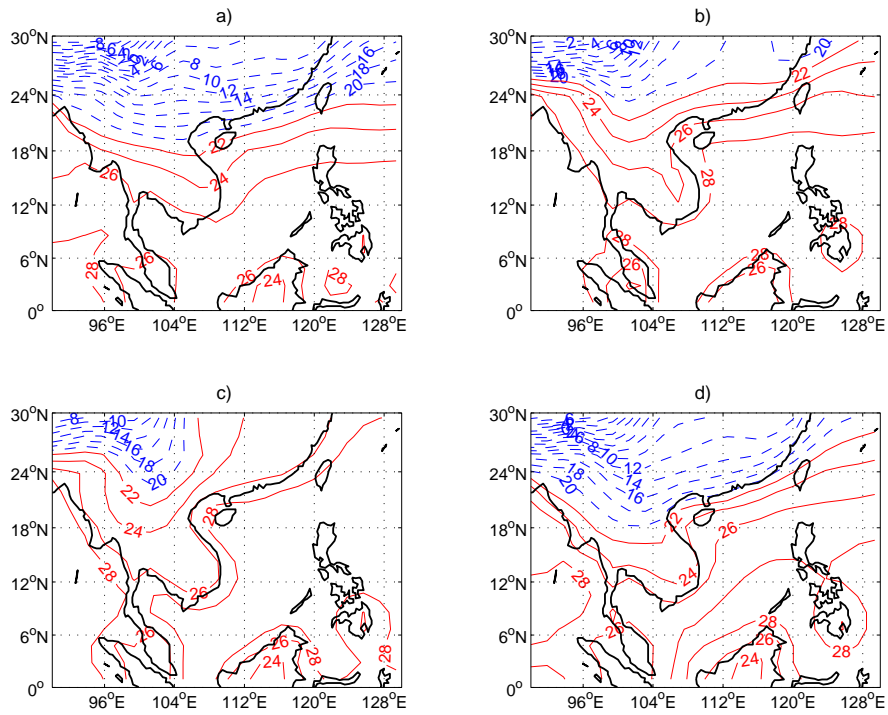


Figure 3.4 : Les moyennes de pressions niveau de la mer. Les isolignes bleues (rouges) indiquent la valeur supérieure (inférieure) de 1 012 hPa en janvier-mars (a), en avril-juin (b), en juillet-septembre (c) et octobre-décembre (d).

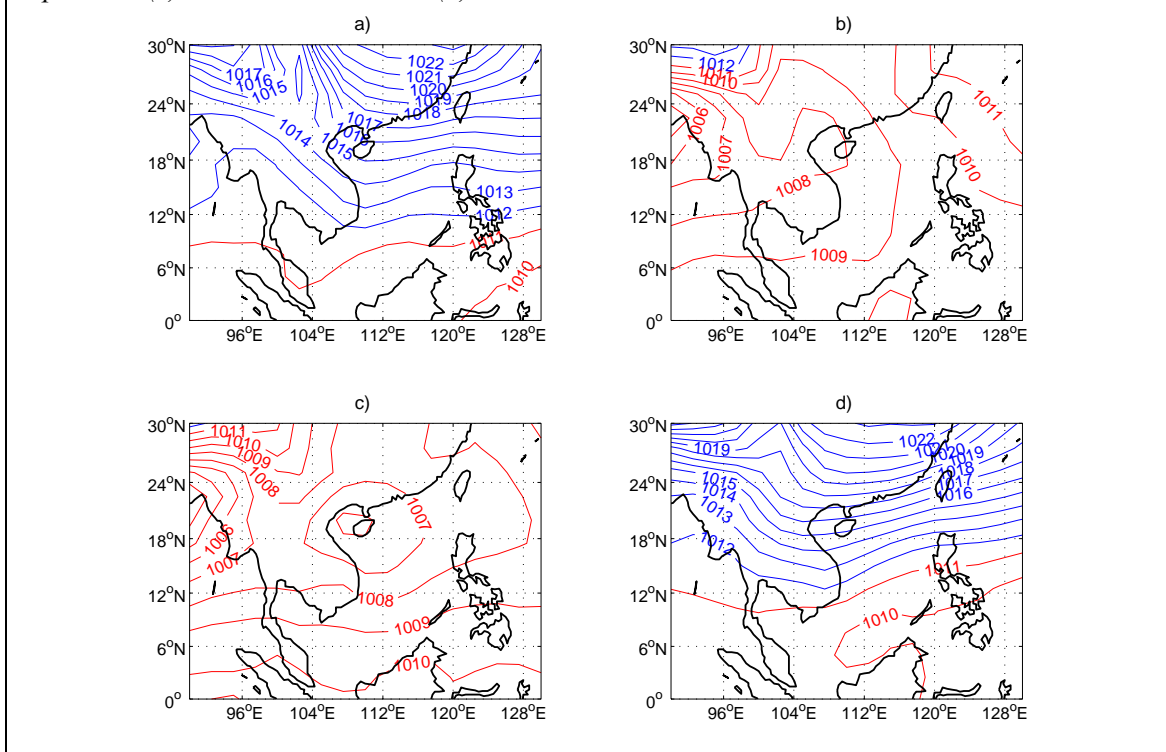


Figure 3.5 : Les moyennes de ESH. Les isolignes bleues (rouges) indiquent la valeur supérieure (inférieure) de 360 kJ/kg en janvier-mars (a), en avril-juin (b), en juillet-septembre (c) et octobre-décembre (d).

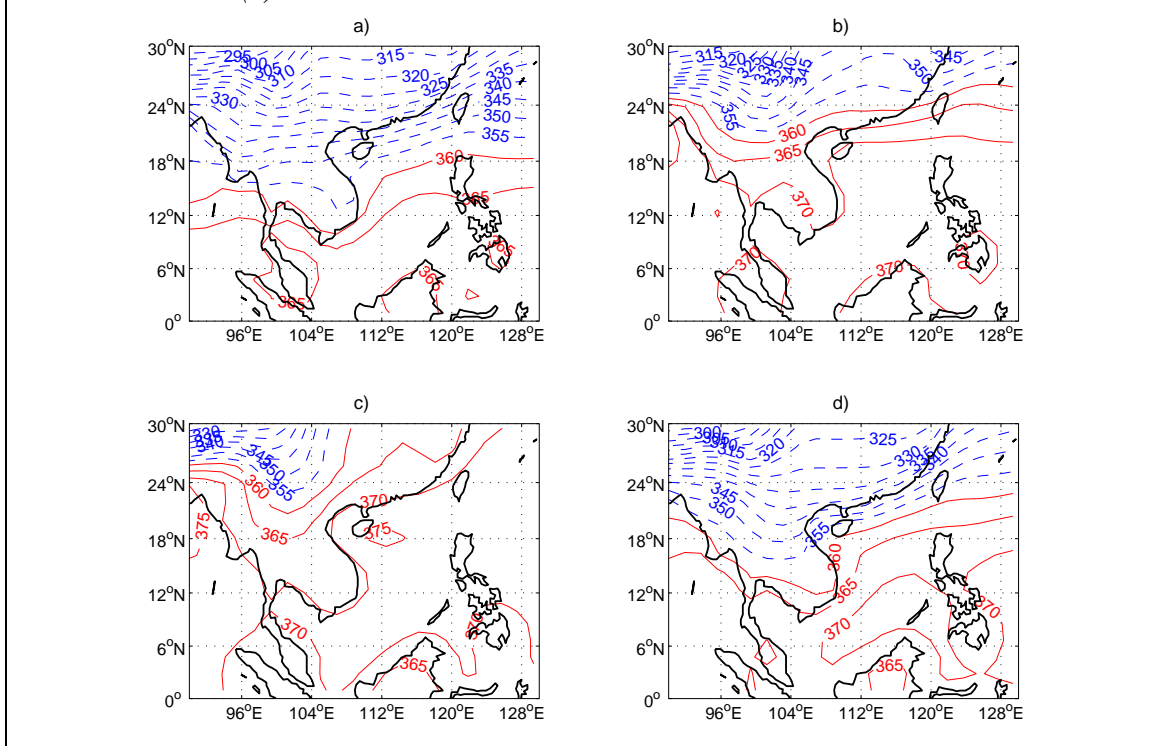


Figure 3.6 : Les moyennes de l'eau précipitable. Les isolignes bleues (rouges) indiquent la valeur supérieure (inférieure) de 50 kg/m^2 en janvier-mars (a), en avril-juin (b), en juillet-septembre (c) et octobre-décembre (d).

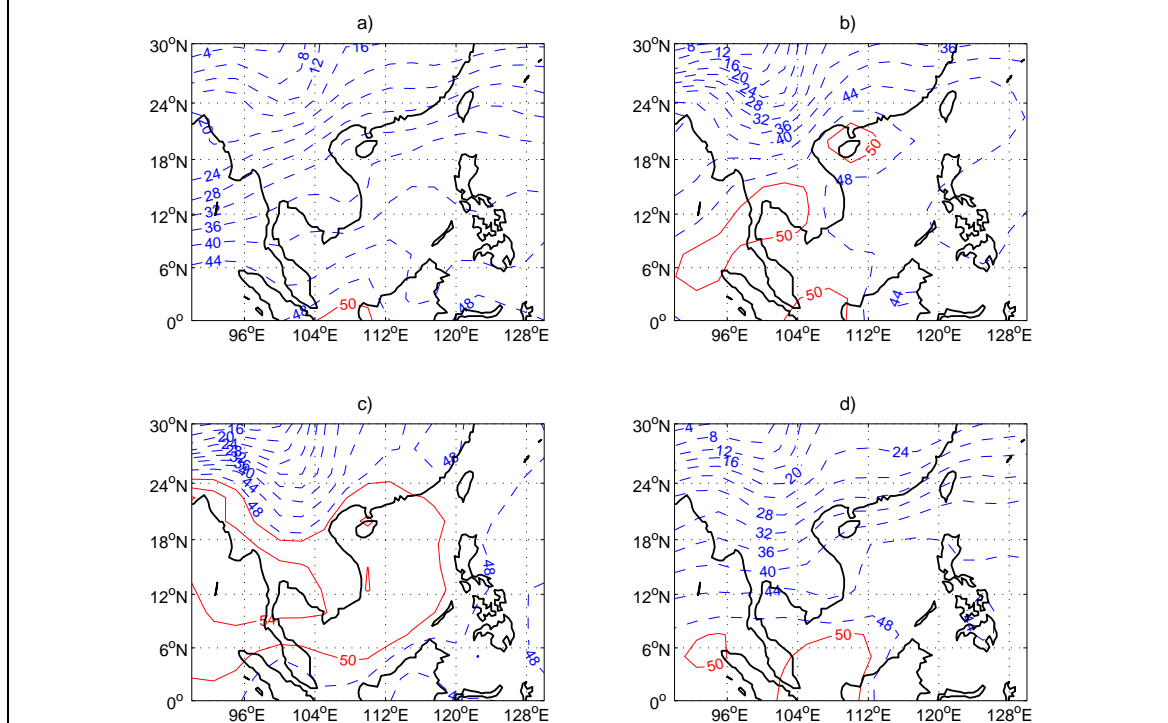
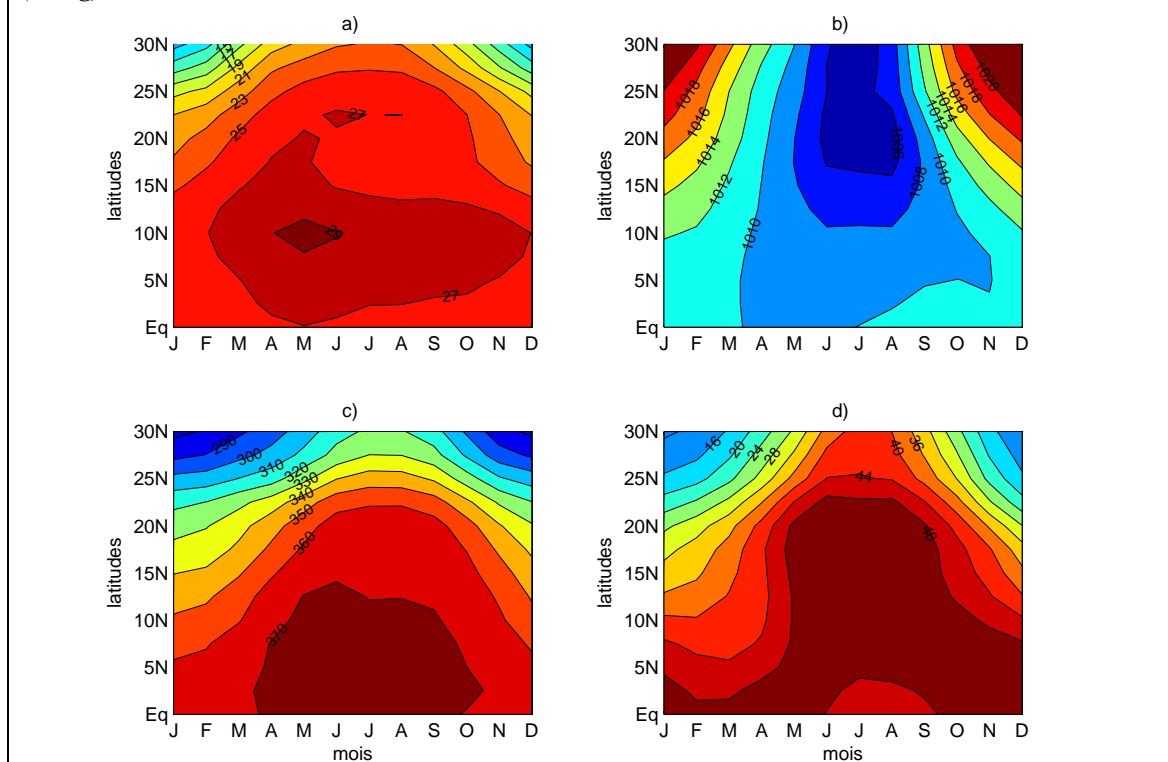


Figure 3.7 : Cycles moyens saisonniers des variables sélectionnées sur le fuseau 102E-110E de : (a) température $^{\circ}\text{C}$ à 2 m, (b) pression au niveau de la mer (hPa), (c) l'énergie statique humide (kJ/kg) à 2 m, et (d) eau précipitable (kg/m^2).



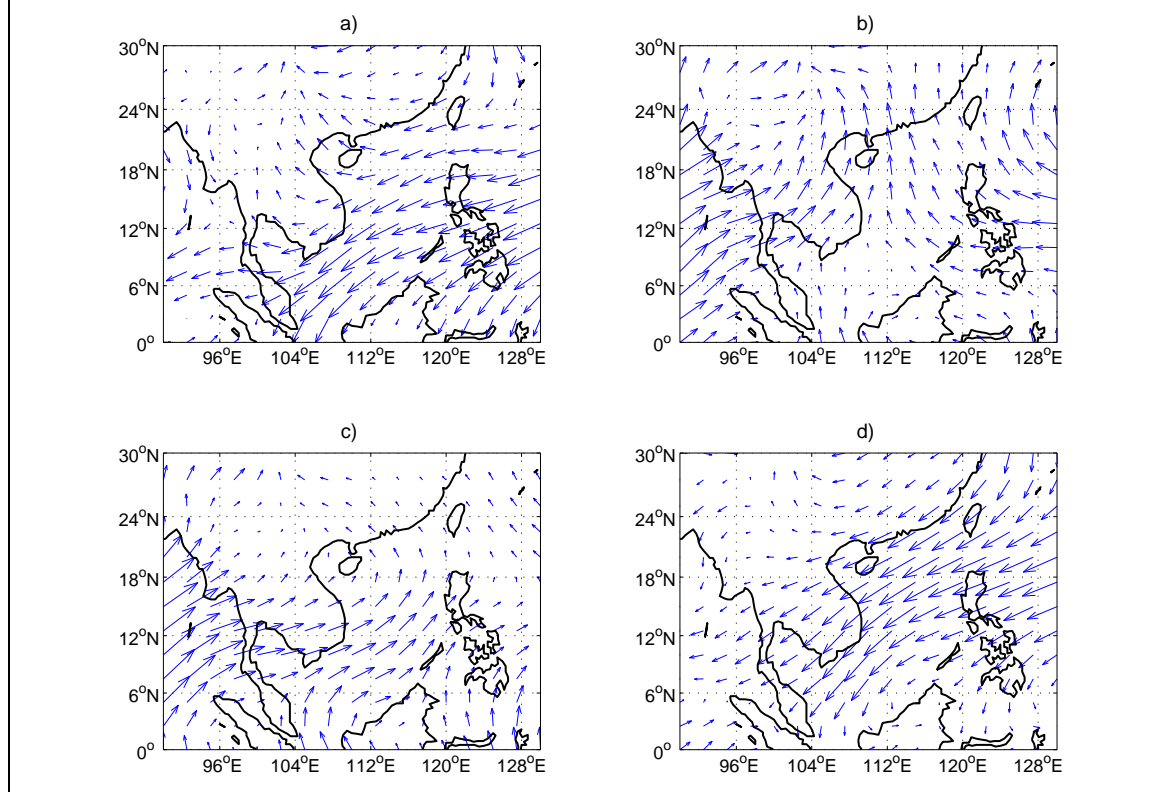
3.1.3 Circulation de l'atmosphère

Dans cette section, les données du vent du NCEP/DOE2 sont utilisées sur plusieurs niveaux géopotentiels pour définir la circulation de basses couches et le profil vertical du vent au Vietnam.

- La circulation de basses couches

La circulation de basses couches, présentée à partir du champ du vent au niveau 925 hPa (figure 3.8), reproduit de nombreuses caractéristiques de circulation de mousson avec, notamment, l'alternance de vents de sud-ouest en été et de nord-est en hiver. Toutefois, l'évolution saisonnière des directions diffère de façon importante entre le nord et le sud du Vietnam. Le sud est marqué par un renversement total des flux entre l'hiver et le printemps boréal : de NE, ils passent à SO. Il s'agit donc là d'un régime pur de moussons saisonnières. Plus au nord, en revanche, la situation est plus complexe en raison de la présence orographique et de la géométrie des côtes (golfe de Bac Bo) : les flux d'hiver (JFM) et de printemps (AMJ) prennent plutôt des composantes ESE et S, respectivement (figure 3.5a).

Figure 3.8 : Les moyennes du vent au niveau 925 hPa (vecteurs, m/s) en janvier-mars (a), en avril-juin (b), en juillet-septembre (c) et octobre-décembre (d).



- Le profil du vent

Les recherches récentes de Qian et Lee (2000), Zhang *et al.* (2002), Wang et LinHo (2002) montrent que la région d'Indochine connaît un démarrage de mousson plus précoce qu'ailleurs sur l'Asie, au début de mai. C'est aussi la mousson d'Asie qui connaît l'onset le plus précoce sur le golfe du Bengale avant de s'étendre vers le nord-est sur l'Indochine et l'Asie orientale. Pour définir les conditions au moment du démarrage et de la fin de la mousson d'été, on a établi le profil du vent sur deux positions : la première centrée sur 20°N-105°E représente le nord Vietnam, la deuxième (20°N, 105°E) représente le sud Vietnam. Afin de faciliter la présentation, nous décrirons d'abord l'évolution dans les basses couches (couche limite planétaire), puis en altitude dans la troposphère libre.

Au nord Vietnam (figure 3.9a), l'évolution est caractéristique : la circulation de surface (1 000 hPa) est dominée par des vents de sud-est ($\bar{U} = -0.9\text{m/s}$, $\bar{V} = 2.6\text{m/s}$) au mois d'avril, de sud en mai ($\bar{U} = -0.2\text{m/s}$, $\bar{V} = 2.1\text{m/s}$) et de sud-ouest en juin ($\bar{U} = 1.3\text{m/s}$, $\bar{V} = 2.3\text{m/s}$). Par conséquent, on peut considérer qu'au nord Vietnam, la mousson d'été de SO démarre en moyenne vers la mi-mai. Le flux de SO domine jusqu'en septembre, moment où il diminue et est remplacé par un flux de NE ($\bar{U} = -0.9\text{m/s}$, $\bar{V} = -0.5\text{m/s}$) qui devient dominant. En octobre, les vents de nord-est ($\bar{U} = -2.6\text{m/s}$, $\bar{V} = -1.4\text{m/s}$) s'installent et la mousson d'hiver : c'est le début de la mousson d'hiver. La circulation en altitude (figure 3.9a) montre une variation importante entre l'hiver et l'été, et selon la latitude. La circulation d'hiver est assez homogène jusqu'au niveau 925 hPa. Au-dessus, dans l'atmosphère libre, elle se modifie profondément. À partir de 825 hPa, le vent change de direction et sa vitesse s'accélère. En janvier, le flux est d'ouest au niveau 500 hPa et atteint 28.5 m/s à 200 hPa dans le jet subtropical d'ouest. En revanche, en été, le vent de SO ne change pas notablement jusqu'à 500 hPa ; au-dessus, à partir de 400 hPa, il change de direction et atteint son maximum à 200 hPa (-12.2 m/s en juillet) en association avec le Jet Tropical d'Est (JTE).

Les figures 3.10a.b présentent l'évolution moyenne annuelle des vecteurs de vent dans les plans zonal-vertical (composantes u , ω -omega) et méridien-vertical (composante v , ω) par 20°N-105°E. On constate qu'au nord Vietnam, du milieu à la fin de l'hiver (JFMA), les basses couches (1 000-850 hPa) enregistrent un flux d'ESE ascendant en fin d'hiver. Ceci est favorable à l'occurrence des petites pluies et du crachin : c'est un type de temps très particulier au nord Vietnam (Pham V.A., 1996). En effet, l'absence de convection profonde, les faibles températures et l'humidité spécifique de l'air favorisent des subsidences dans les

couches moyennes et élevées et un développement nuageux en nappe de type stratus. Ceci entrave la diffusion de la vapeur d'eau dans les hauts niveaux de la troposphère et limite la taille des gouttes d'eau. Par contre, en début d'hiver, l'ascendance est très faible alors que les subsidences occupent tous les niveaux dès 750 hPa, en lien avec les types de temps froids, secs et très stables. L'été, l'ascendance se développe dans toute la colonne jusqu'au niveau 200 hPa, en lien avec la convection profonde, ce qui favorise une augmentation des cumuls de pluie.

Au sud Vietnam (figure 3.9b), au mois d'avril, la circulation de surface est dominée par des vents de sud-est ($\bar{U} = -1.8\text{m/s}$, $\bar{V} = 1.3\text{m/s}$) ; en mai, par des vents de sud-ouest ($\bar{U} = 1.1\text{m/s}$, $\bar{V} = 1.8\text{m/s}$) : au sud Vietnam, la mousson d'été démarre début mai. Le flux de SO se développe de façon stable de juin à septembre (environ de 3.5-4 m/s). En fait, la vitesse du vent s'accroît et atteint son maximum à 850 hPa (8.7 m/s en août), passe par un minimum à 500 hPa et un second maximum d'est à 200 hPa (-15.1 m/s en août) en lien avec le JTE. En octobre, le flux de SO est remplacé par le flux de N ($\bar{U} = 0.3\text{m/s}$, $\bar{V} = -1.2\text{m/s}$). En novembre, la circulation est dominée par des vents de NE ($\bar{U} = -2.7\text{m/s}$, $\bar{V} = -3.4\text{m/s}$), et c'est le commencement de la mousson d'hiver boréal : au sud Vietnam, la mousson d'été finit plus tard. La circulation d'hiver est homogène jusqu'au niveau 200 hPa. Sur la figure 3.9, on voit aussi qu'il y a de fortes différences entre le sud et le nord en termes de vitesses de vents de SO et de NE. Dans le sud, la vitesse du vent de secteur SO en été est d'environ 3.5-4m/s et celle du vent de NE en hiver de 4m/s. En revanche, dans le nord du pays, les vitesses moyennes sont plus faibles en raison, notamment, de la topographie (en l'été de 2-2.5m/s et de 2.5-3 m/s en l'hiver, environ).

Au sud Vietnam (figure 3.10c.d) l'hiver (l'été) enregistre des subsidences (ascendances) sur tous les niveaux à partir de 1 000 hPa.

Le tableau 3.4 présente le vent NCEP au point de grille 20°N-105°E sur la période 1979-2004 et le vent observé à la station de Hanoi (21.03°N-105.85°E) pour la période 1971-2000 (Hoang P.H., Nguyen D.Q., 2007). Il y a une bonne concordance entre ces deux types de données sachant que le vent NCEP est un vecteur moyen représentant un carré de 2.5° de latitude/longitude, alors que le vent observé est ponctuel. En conséquence, les vitesses observées sont plus élevées avec NCEP. Toutefois, l'évolution saisonnière est très concordante. En janvier, les deux sources de données montrent ensemble des vents de SO ou S-SO avec des modules de vitesse de 3-5 m/s à 850 hPa et des vents d'ouest de 30-34 m/s à

200 hPa associés au Jet Subtropical d'Ouest. En juillet, la circulation est de SO avec des vitesses de 3.5-4 m/s à 850 hPa et d'ENE avec une vitesse de 12.5 m/s à 200 hPa, en lien avec le jet tropical d'est.

Tableau 3.4 : Les vents de données du NCEP au point de grille 20°N-105°E sur la période 1979-2004 et le vent observé à la station de Hanoi (21.03°N-105.85°E) pour la période 1971-2000.

Niveaux (hPa)	Janvier				Juillet			
	U (m/s)		V(m/s)		U (m/s)		V(m/s)	
	NCEP	Obs.	NCEP	Obs.	NCEP	Obs.	NCEP	Obs.
850	0.4	2.7	2.7	3.7	3.5	3.1	2.3	1.7
700	8.4	10.7	-0.2	0.1	2.8	2.6	1.4	3.1
500	17.5	21.6	1.4	0.2	0.1	-0.2	1.3	2.0
400	22.0	27.1	2.2	2.2	-2.3	-2.7	-0.1	0.8
300	26.1	30.5	4.8	4.2	-5.8	-6.6	-1.4	-2.0
200	28.5	32.6	8.0	9.9	-12.2	-11.2	-3.7	-5.1

Figure 3.9 : Directions et intensité du vent horizontal sur les différents niveaux (vecteurs, m/s)

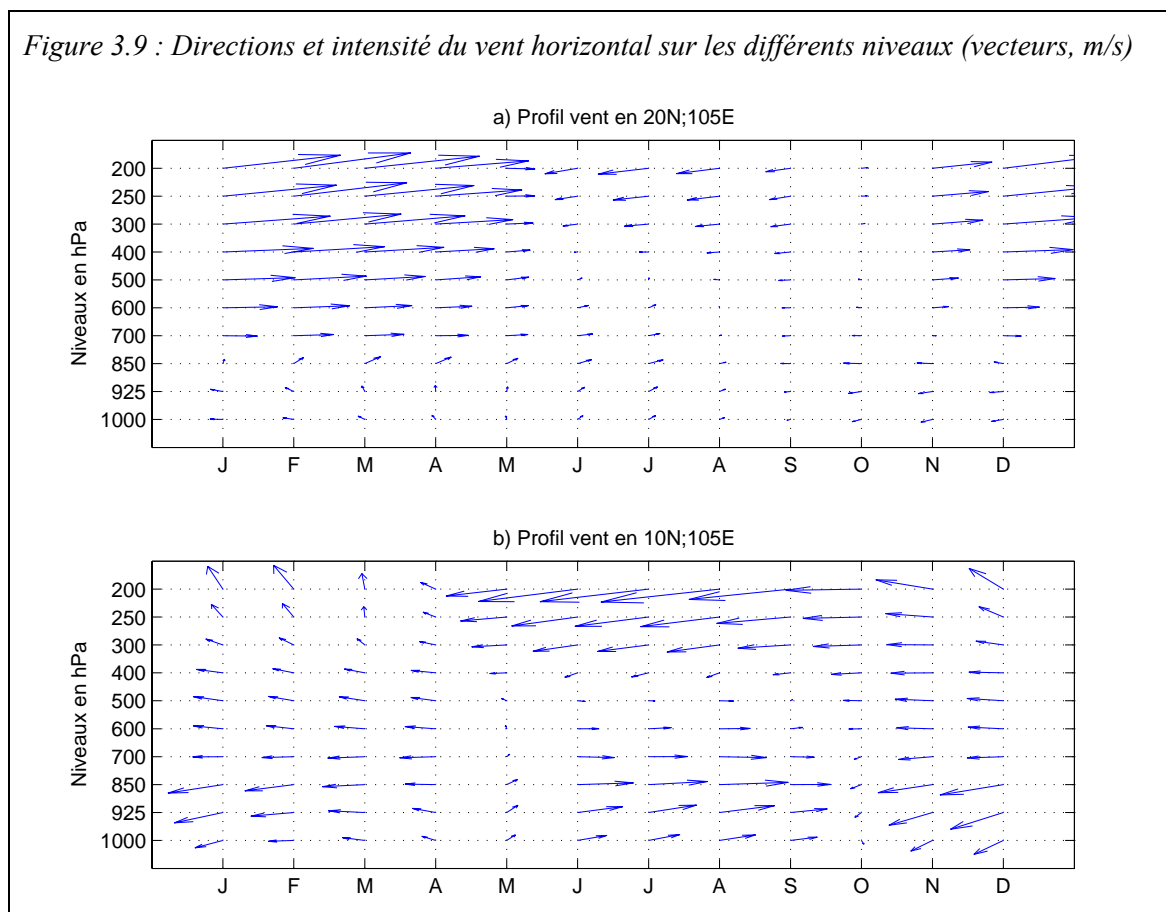
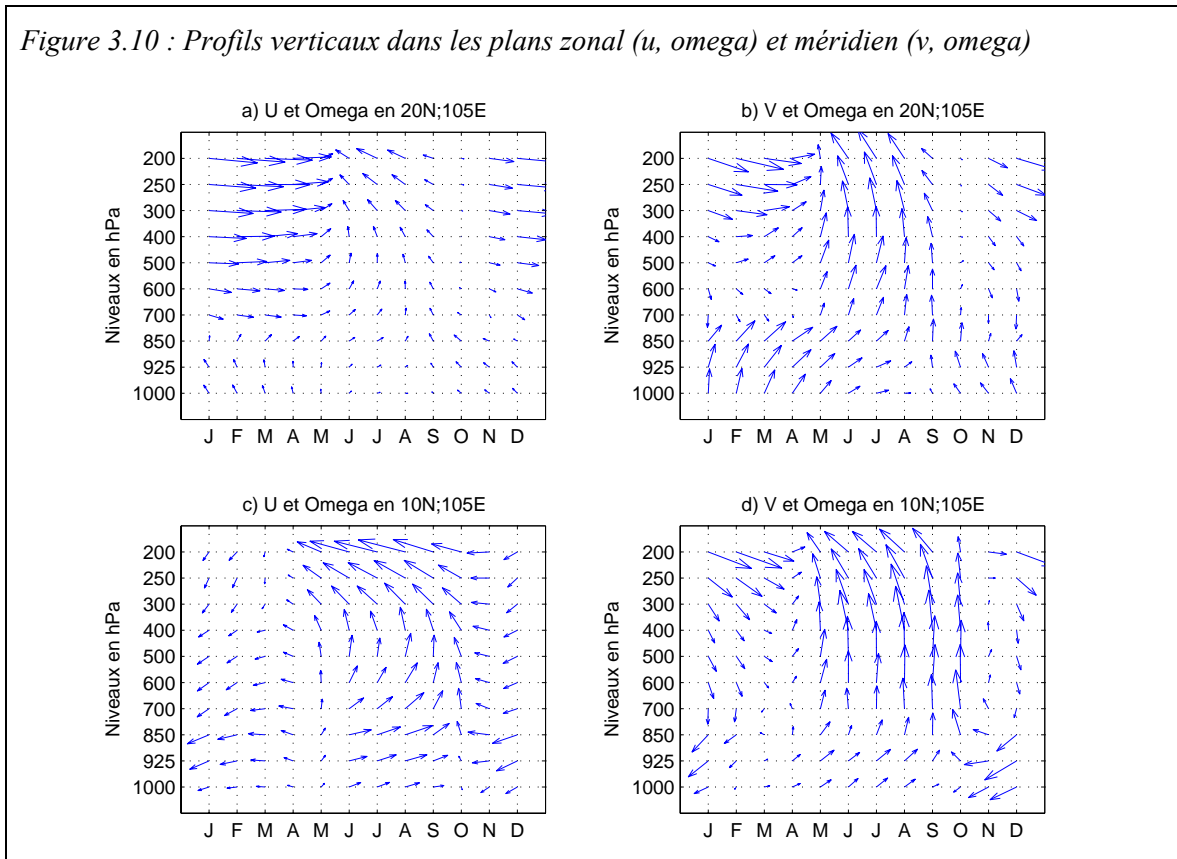


Figure 3.10 : Profils verticaux dans les plans zonal (u , ω) et méridien (v , ω)



3.2 Précipitations de mousson sur la péninsule indochinoise au travers des données CMAP (1979-2004 en données pentadaires)

3.2.1 Cartes saisonnières et données *in situ*

La figure 3.11a présente l'intensité des précipitations pour les mois de mai-octobre (période 1979-2004), établie à partir de la base de données CMAP. En général, les pluies CMAP sous-estiment un peu les précipitations relevées aux stations. Sur le Vietnam, on peut noter une faiblesse des pluies située sur la zone littorale du centre du Vietnam (5 mm/jour), alors qu'au nord on relève environ 6-7 mm/jour et 8-9 mm/jour au sud. On constate, en particulier, que dans la région ouest de Nambo, la pluie peut être supérieure à 12 mm/jour.

La figure 3.11b présente le cycle moyen annuel des précipitations du CMAP en trois points représentatifs : au nord Vietnam, le point de grille est centré sur 21.25°N-106.25°E ; centre Vietnam (16.25°N-108.75°E) et sud Vietnam (11.25°N-106.25°E). On note une saison des pluies d'intensité > 5 mm/jour de mai au septembre (au nord Vietnam), de mai à octobre (au sud Vietnam), et d'août à décembre (au centre Vietnam).

La figure 3.11c présente le cycle moyen annuel en trois stations qui sont proches de ces trois points : Hanoi est proche du point 21.03°N-105.85°E, Da Nang (16.03°N-108.18°E), Tay Ninh (11.32°N-106.07°E). Les cumuls de mai à octobre vus par CMAP et les observations diffèrent légèrement du fait que CMAP présente une vision lissée de la réalité au pluviomètre puisqu'il s'agit d'une moyenne établie sur un carré de 2.5°x 2.5° de côté. Les valeurs sont les suivantes : le point du nord Vietnam/la station de Hanoi = 6.1mm.jour⁻¹ /7.6mm.jour⁻¹ ; centre Vietnam/Da Nang = 5.4mm.jour⁻¹ /7.3mm.jour⁻¹ ; sud Vietnam/Tay Ninh = 6.4mm.jour⁻¹ /8.6mm.jour⁻¹.

La figure 3.12 présente les intensités moyennes journalières en janvier-février-mars (JFM), avril-mai-juin (AMJ), juillet-août-septembre (JAS) et octobre-novembre-décembre (OND), pour la période 1979-2004. Pendant JFM, en deuxième moitié de saison sèche, on note une absence totale de pluies, sauf dans les régions Dongbac et DBBB où on relève environ 1 mm/jour, à cause des crachins de fin d'hiver. En début de saison des pluies (AMJ), la majeure partie du territoire du Vietnam connaît un cumul de pluies d'environ 4-5 mm/jour, sauf dans la région côtière du centre moins arrosée (2-3 mm/jour) et dans la région ouest Nam Bo qui l'est beaucoup plus (6-8 mm/jour). Ceci se reproduit en JAS. En OND, à l'inverse de

ce qui se passe sur l'ensemble du territoire (cumuls de 1-3 mm/jour), la région côtière reçoit des cumuls d'environ 6-7 mm/jour.

Le tableau 3.5 présente les corrélations linéaires entre données CMAP et cumuls *in situ* pendant la période mai-octobre 1979-2000. On remarquera que les deux types de données ne traduisent pas la même réalité : les valeurs CMAP représentent les précipitations cumulées au niveau de la maille à partir à la fois d'observations satellitales et *in situ*, alors que les observations sont les mesures locales aux stations. Les premières sont donc des moyennes spatiales pondérées multisources issues d'un algorithme de calcul qui atténue leur variabilité ; les secondes sont beaucoup plus proches de la vérité-terrain mais plus sensibles aux variations et plus bruitées. Néanmoins, il y a un certain accord global entre les deux jeux de données.

Au nord Vietnam, les coefficients de corrélation sont plus élevés, supérieurs à 0.70*** pour toutes les régions. Au centre Vietnam, ils restent toutefois supérieurs à 0.55*** et à 0.46*** au sud Vietnam. Ceci confirme les résultats de la classification (figure 2.18) où le nord Vietnam apparaît comme une région homogène alors que le sud est divisé en deux classes, le champ de pluie ici n'étant pas homogène.

Figure 3.11 : (a) Cumuls de pluies de mai-octobre au Vietnam établis à partir de la base de données CMAP 1979-2004 (unités en mm/jour) ; (b) Cycle moyen annuel de précipitations du CMAP ; (c) Cycle moyen annuel de pluies *in situ*. Dans les diagrammes (b, c) : nord Vietnam en bleu, centre Vietnam en vert et sud Vietnam en rouge.

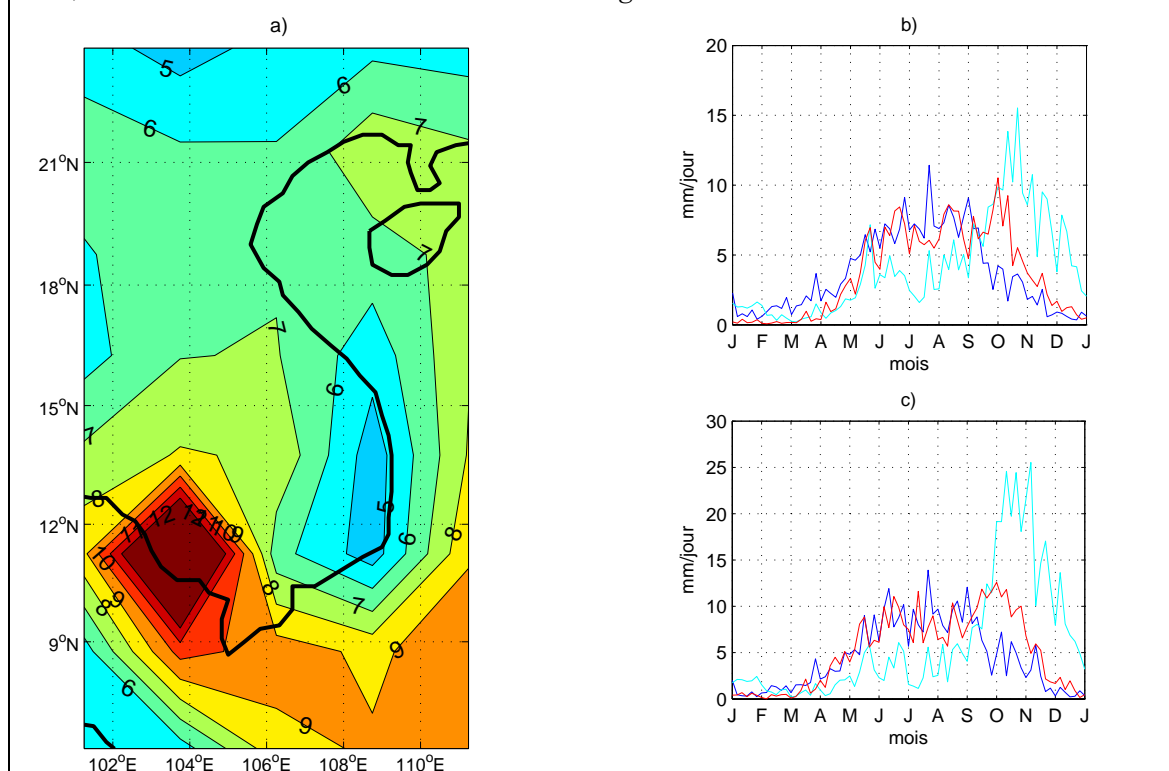


Figure 3.12 : La pluie sur le Vietnam et les régions environnantes (unités en mm/jour), période 1979-2004.

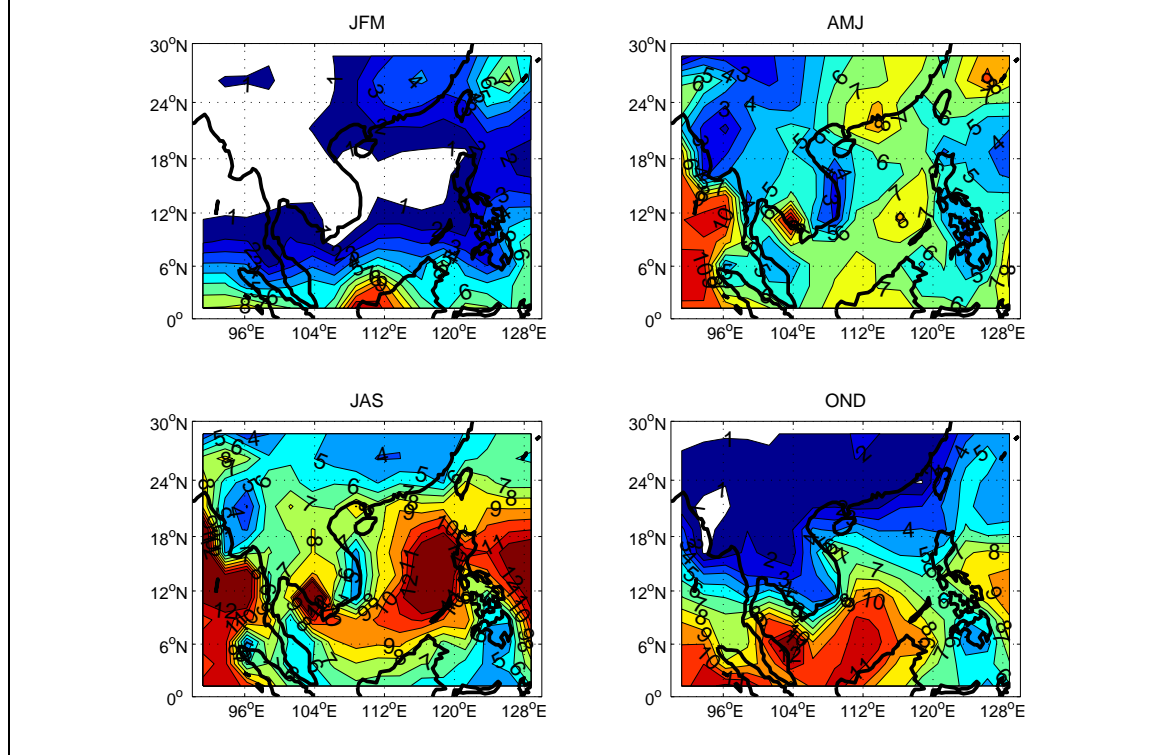


Tableau 3.5 : Précipitations in situ et estimations CMAP (en mm) pour la période mai-octobre 1979-2000, différences relatives in situ – CMAP exprimées en pourcentages et coefficients de corrélation testés par méthode de Monte Carlo (*, **, *** pour la significativité à $p=0.10, 0.05$ et 0.01).

La 2^e colonne présente les cumuls de pluie de mai à octobre de région TAYBAC et la précipitation estimée CMAP de point 21.25°N-103.75°E ; la 3^e colonne : DONGBAC et deux points 21.25°N-103.75°E, 106.25°E ; la 4^e colonne : DBBB et le point 21.25°N-106.25°E ; la 5^e colonne : BTB et deux points 18.75°N-16.25°N, 106.25°E ; la 6^e colonne : NTB et trois points 16.25°N-13.75°N-11.25°N, 106.25°E ; la 7^e colonne : TAYNGUYEN et deux points 13.75°N-11.25°N, 106.25°E ; la 8^e colonne : NAMBO et quatre points 11.25°N-8.75°N, 106.25°E-108.75°E.

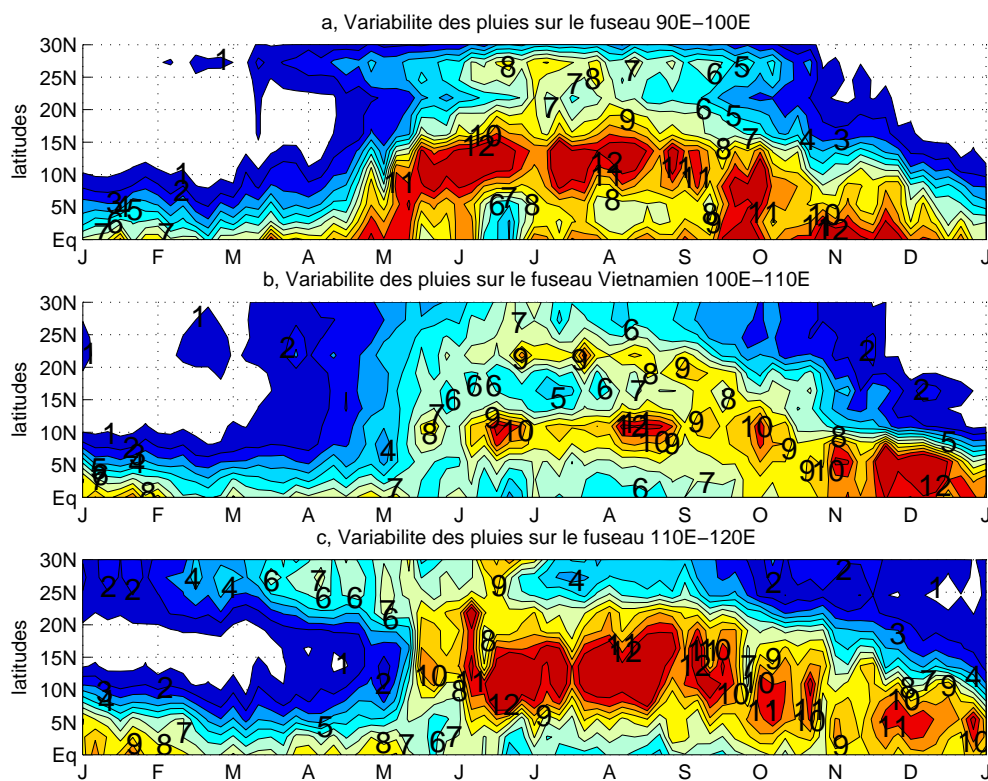
	Région 1	Région 2	Région 3	Région 4	Région 5	Région 6	Région 7
Pluies <i>in situ</i>	253.4	244.1	231.9	256.0	189.3	306.1	308.3
CMAP	196.0	190.0	184.0	217.8	148.3	227.8	227.6
Diff. Rel. en % ^(*)	6.4	6.2	5.8	4.0	6.1	7.3	7.5
Coefficients de corrélation	+0.76***	+0.77***	+0.70***	+0.55***	+0.64***	+0.46***	+0.47***

3.2.2 Diagramme latitudes/temps sur différentes longitudes

La figure 3.13 présente trois diagrammes latitudes/temps sur trois fuseaux correspondant à : (a) la partie est du golfe du Bengale (90°E-100°E); (b) le territoire indochinois (100°E-110°E); (c) la mer de Bien Dong (110°E-120°E). La comparaison entre ces cartes montre que l'onset de mousson sur le golfe du Bengale se place début mai, alors que, plus à l'est (la mer Bien Dong), il se situe mi-mai : sur l'océan, l'amplitude avec le maximum est aussi plus importante : de 2-3 mm/jour à 7-8 mm/jour, mais de 3-4 mm/jour au 6-7 mm/jour sur la péninsule.

Le diagramme 3.13b présente donc les précipitations continentales (période 1979-2004). Le cycle moyen est le suivant. Aux latitudes 20-22°N, correspondant à la région DBBB, on ne relève aucune pluie en décembre et janvier, et 1 ou 2 mm/jour en février. Ensuite, on note une accentuation des précipitations en juin (7-8 mm/jour) et un maximum d'environ 9-10 mm/jour en juillet-septembre, puis les précipitations diminuent. Ces relevés sont très concordants avec le diagramme de pluies *in situ* (voir la figure 2.5a). Aux latitudes de 13-18°N, correspondant à la zone littorale du centre du Vietnam, le cumul des précipitations est de 0 mm en janvier et février, à 4-6 mm/jour en mai-juillet et 9-10 mm/jour en septembre-novembre. Aux latitudes 9-11°N correspondant à la région Nam Bo, on constate une différence très nette entre la saison des pluies et la saison sèche : de décembre à avril, il ne pleut presque pas, tandis que sur juin-octobre, le cumul de pluies atteint environ 9-11 mm/jour.

Figure 3.13 : Diagrammes Hovmöller latitude/temps des pluies CMAP pentadaires en mm/jour sur la période 1979-2004 : a) fenêtre (0°N-30°N, 90°E-100°E) ; b) Vietnam (0°N-30°N, 100°E-110°E); c) fenêtre (0°N-30°N, 110°E-130°E)



Synthèse de chapitre

Dans ce chapitre, les caractéristiques générales de la circulation de mousson et des précipitations au Vietnam ont été décrites par les observations et en utilisant des données interpolées en points de grille (réanalyses atmosphériques du NCEP, estimations du CMAP). Les principaux résultats sont rappelés ci-dessous :

- L'Indochine péninsulaire en général et le Vietnam en particulier sont des régions de mousson dites de transition parce que positionnées entre les deux systèmes régionaux principaux de la mousson en Asie : mousson d'Asie du Sud et mousson d'Asie de l'Est (Pham N.T., Phan T.D., 1993 ; Zhang *et al*, 2002). Le territoire du Vietnam est donc sous l'influence permanente de flux d'origines et de caractères différents dont l'influence alternée et les fréquences différentes expliquent la forte variabilité climatique sur le pays.
- Toutefois la mousson vietnamienne n'est pas seulement une circulation moyenne appréhendable à l'échelle mensuelle et sa saisonnalité ne dépend pas seulement des flux. Les caractères climatiques régionaux sont aussi sous l'influence des perturbations synoptiques et intrasaisonniers souvent associées à l'activité des fronts en hiver, de la ZCIT et des typhons en été. Ces perturbations ont un rôle important dans le climat du Vietnam.

Le cycle moyen annuel des conditions climatiques au Vietnam et dans le Sud-Est asiatique (températures, pressions au niveau de la mer, énergie statique humide et eau précipitable) est en relation étroite avec le régime des moussons.

En général, les pluies CMAP sous-estiment un peu les précipitations relevées aux stations. Toutefois, la variation spatio-temporelle montre une bonne concordance entre pluies CMAP et pluies *in situ*. La comparaison entre les cartes diagrammes latitudes/temps sur des fuseaux différents montre que l'onset de mousson sur le golfe du Bengale se place début mai, alors que plus à l'est (la mer Bien Dong), il intervient mi-mai.

Chapitre 4

L'onset de mousson au Vietnam

Dans ce chapitre, les données journalières de pluie *in situ* sur la période 1979-2004 ont été utilisées pour définir l'onset (le démarrage) de la saison des pluies dans le sud Vietnam et dans le nord Vietnam. Ensuite, les données réanalysées de NCEP/DOE-II et l'OLR de la NOAA ont été utilisées pour estimer l'évolution des champs météorologiques associés à l'onset de mousson et le démarrage des pluies. Enfin, la prévisibilité de la date d'onset a été déterminée par méthodes statistiques.

La raison pour laquelle l'onset de la saison des pluies sur le centre Vietnam n'est pas considéré est liée à ses particularités géographiques et météorologiques. En effet, dans cette région, l'influence du relief et la relative sécheresse du flux de sud-est font que l'onset de la saison des pluies est décalé de trois mois par rapport à l'onset dynamique de mousson : la saison des pluies démarre ici au mois d'août, alors que l'onset dynamique est attesté dès le mois de mai.

Les résultats présentés dans ce chapitre ont fait l'objet de deux articles portant sur l'onset de la circulation de mousson dans le sud Vietnam, sa prévisibilité (Pham X.T, Fontaine B. et Philippon N., 2007), ainsi que le démarrage et la prévisibilité de la saison des pluies dans le nord Vietnam (Pham X.T, Fontaine B. et Philippon N., 2008).

4.1 L'onset de mousson au sud Vietnam et sa prévisibilité

4.1.1 Définir l'onset de mousson au sud Vietnam

Selon Tao et Chen (1987), en général, la mousson en Asie démarre sur la mer Bien Dong à la mi-mai. Ensuite, elle se déplace au nord jusqu'à la Chine et au nord-est jusqu'au nord-ouest Pacifique et le sud de la mer du Japon, puis vers l'ouest jusqu'au golfe du Bengale et en Inde. Toutefois, Wu et Zhang (1998), Mao, Chan et Wu (2004) montrent que la mousson d'Asie démarre tout d'abord sur le golfe du Bengale début mai, puis se déplace au nord-est à la mi-mai avant d'arriver sur le territoire indien début juin.

Sur l'Indochine, la date de l'onset varie entre la fin avril et la mi-mai. Plusieurs approches ont été déjà testées sur ces régions. Matsumoto (1997) a ainsi utilisé les données des stations sur la période 1975-1987 pour définir une date d'onset. Il a supposé que l'onset survenait lors de la pentade pendant laquelle la valeur dépassait celle de la pluie en moyenne annuelle ($P_m = (\text{pluie annuelle})/73$) pour la même pentade. Il a montré que l'onset sur l'Indochine (notamment la Thaïlande) se situait entre fin avril – début mai. Wang et LinHo (2002) ont, quant à eux, défini l'onset en s'appuyant sur la différence de cumuls observés entre la pentade de l'onset et les cumuls moyens de janvier à la condition que cette différence soit supérieure à 5 mm/jour. Avec les données CMAP sur la période 1979-1998, ils ont montré que l'onset sur l'Indochine survenait début mai (pentades 25-26). De façon complémentaire, Zhang *et al.* (2002) ont utilisé les données des stations sur la période 1951-1996 pour définir l'onset sur l'Indochine. Ils ont donné pour cela trois critères : (1) les cumuls de pluies sont supérieurs à 5 mm/jour ; (2) ils sont consécutifs sur au moins cinq jours ; (3) ceci est observé pendant au moins dix jours parmi les vingt jours suivants avec des cumuls > 5 mm/jour. Ils ont trouvé que la date moyenne de l'onset sur cette région était le 9 mai avec un écart-type de douze jours. Qian et Lee (2000) ont préféré utiliser une approche multivariable en travaillant sur une composite de données de CMAP, de vapeur d'eau hautes couches (the upper-tropospheric water vapour band Brightness Temperature (BT)), d'OLR, de vent zonal aux basses couches (850 hPa) et de pluie *in situ* sur la période 1980-1995. Ainsi défini, l'onset indochinois survient entre fin avril et la mi-mai.

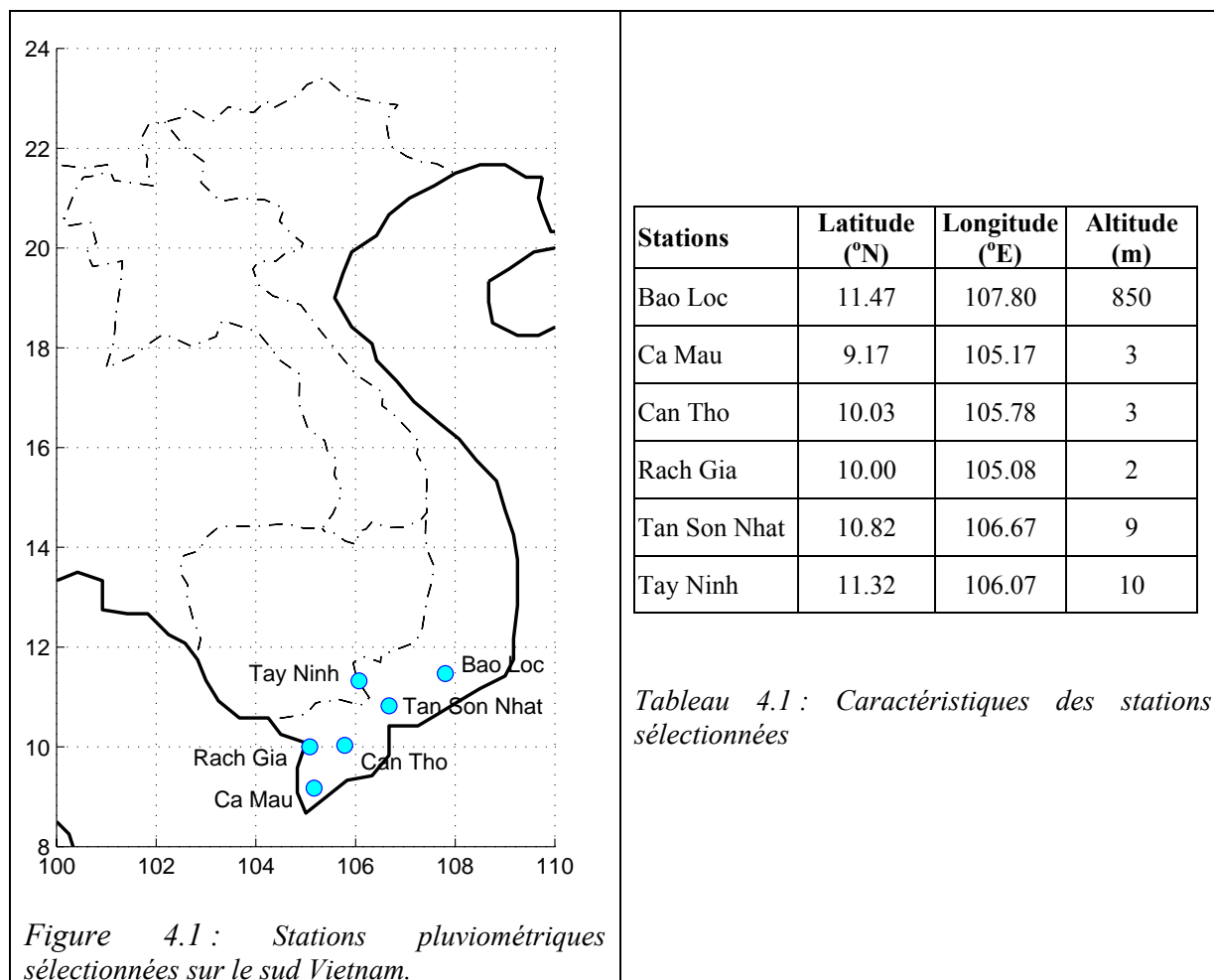
Les dates de l'onset peuvent être définies par plusieurs méthodes : Holland (1986) s'est appuyé seulement sur le vent pour définir l'onset, alors que d'autres auteurs, Matsumoto (1997), Wang et LinHo (2002), Zhang *et al.* (2002), Fontaine B. et Louvet S. (2006) ont utilisé les cumuls de pluies : quand ceux-ci dépassent un certain seuil, on peut définir l'onset.

Une composite entre le champ de vents et le champ de pluies et/ou les autres champs a été également utilisée pour définir l'onset (Lau et Yang, 1997 ; Qian et Lee, 2000 ; Yihui et Yanju, 2001). Récemment, il a été montré que le renversement du gradient de température méridien était aussi un signal à prendre en compte (Li et Yanai, 1996 ; Mao, Chan et Wu, 2004).

Pour définir la date d'onset au sud Vietnam, deux séries de données ont été utilisées :

(1) les données journalières de précipitations de six stations, pendant la période 1979-2004. Les positions des stations sont montrées en figure 4.1 et dans le tableau 4.1. Toutes les stations ont moins de 1 % de données manquantes (tableau 1.2) ; ces manques ont été remplacés par la moyenne journalière sur la période disponible.

(2) le champ de vent NCEP/DOE2 sur quatre points (105°E-107.5°E ; 10°N-12.5°N) au niveau de 1 000 hPa.



La figure 4.2 présente l'indice de pluie sous la forme de moyennes mobile de cinq jours sur six stations ainsi que le vent zonal pendant vingt-six ans. Il montre que le passage de la saison sèche à la saison des pluies est marqué par un changement soudain des cumuls qui passent de 3 mm/jour mi-avril à 7 mm/jour à mi-mai avec, vers le début mai, une composante d'est (négatif) à ouest (positif).

En s'appuyant sur les indices de pluies et les vents zonaux, les dates d'onset sur vingt-six ans ont été définies selon les critères suivants :

- 1) les cumuls de pluies sont supérieurs à 5 mm/jour et sont consécutifs pendant au moins cinq jours ;
- 2) le vent zonal est dans le même temps, supérieur à +0.5 m/s.

Ces deux critères assurent que la date d'onset correspond au début de la saison des pluies pendant la saison de mousson de sud-ouest. Ces critères sont efficaces. Par exemple, si l'on ajoute le critère de cumul de pluies de Zhang *et al.* (2002), les résultats ne changent pas, à l'exception de l'année 1989. Le tableau 4.2 présente les dates d'onset sur vingt-six ans. L'onset le plus précoce survient en 1979 (19 avril), le plus tardif en 1993 (9 juin). L'onset moyen se place autour du 12 mai avec un écart-type de 11.6 jours. Ces résultats s'accordent avec ceux d'autres auteurs qui ont travaillé sur l'Indochine (*voir ci-dessus*). Pour le sud Vietnam, Pham T.T.H., Tran T.T. (1999) ont utilisé les données de pluies aux stations pour définir la date de démarrage de la saison des pluies et les données de vent observées à la surface pour la date de l'onset de mousson sur la période 1979-1997. Ils ont montré que les deux événements survenaient en même temps. Ces deux événements s'accordent bien (ils ont une cohérence interne) et apparaissent de la fin avril au début de juin. Nguyen T.H.T (2001) a aussi défini la date de l'onset de la mousson en utilisant le champ de vent à 850 hPa et a montré que, dans la période 1993-1998, la date de l'onset varie du 2 au 23 mai.

La figure 4.3 présente le cycle moyen des cumuls de pluies au sud Vietnam lors des huit années à onset précoce (trait continu bleu) et des huit années à onset tardif (tiretés en rouge). Il montre que les années à onset précoce (tardif) sont associées à des cumuls de pluies plus élevés (plus bas) que la normale. Ceci démontre l'intérêt des recherches sur les dates de démarrage de la saison des pluies, car elles constituent un indice précurseur de la qualité de la saison : un onset arrivant tôt (tard) tend assez souvent à précéder une saison excédentaire (déficitaire).

Figure 4.2 : L'indice de pluies journalières (moyenne mobile de 5 jours) en mm/jour (bleu, ligne continue) et vent zonal en m/s (rouge, discontinue) pendant la période 1979-2004.

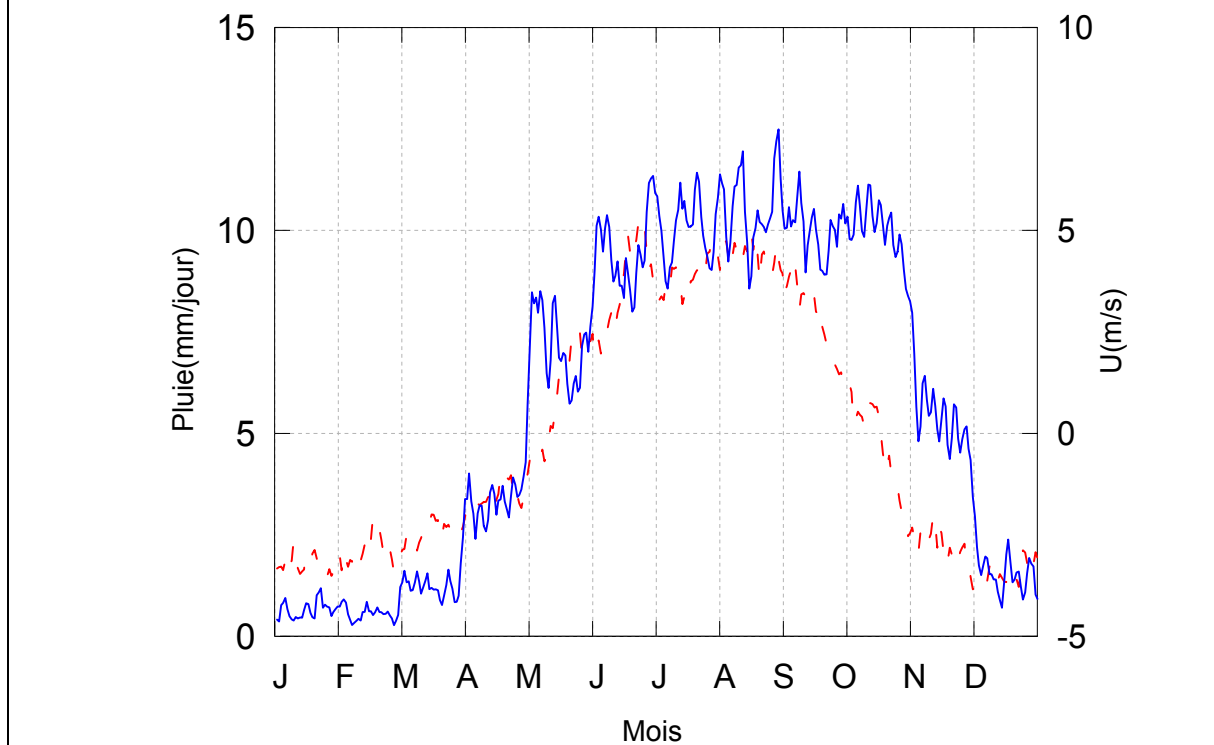
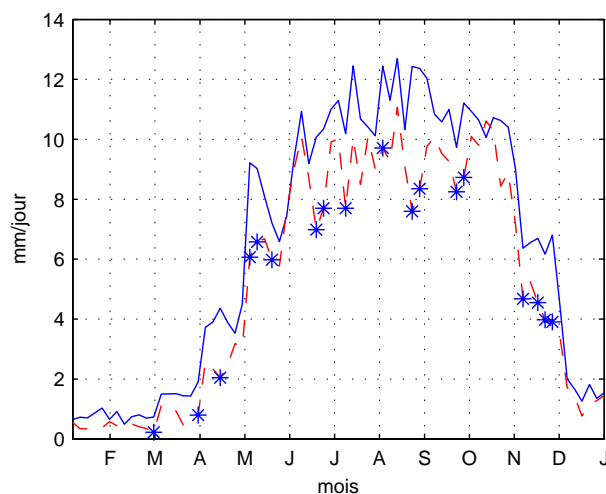


Tableau 4.2 : Les dates d'onset de la saison des pluies dans le sud Vietnam pendant la période 1979-2004.

années	date d'onset	années	date d'onset
1979	19 avril	1993	9 juin
1980	19 mai	1994	13 mai
1981	11 mai	1995	13 mai
1982	1 mai	1996	1 mai
1983	12 mai	1997	4 mai
1984	5 mai	1998	25 mai
1985	25 mai	1999	23 avril
1986	11 mai	2000	2 mai
1987	16 mai	2001	13 mai
1988	21 mai	2002	14 mai
1989	8 mai	2003	4 mai
1990	16 mai	2004	10 mai
1991	8 juin	moyen	12 mai
1992	7 mai		

Figure 4.3 : Précipitations moyennes des huit années à onset précoce (bleu, ligne continue) et des huit années à onset tardif (rouge, discontinue) au sud Vietnam, période 1979-2004.

* si la différence est significative à $p=0.1$.



4.1.2 Le schéma de prévision saisonnière

Pour prévoir la date de l'onset et les cumuls de pluies au chapitre prochain, on utilise une méthodologie en quatre étapes (E1 à E4) présentée en figure 4.4 :

- E1 : les champs prédicteurs à sens physique déterminés lors des analyses diagnostiques préalables sont considérés. Une analyse composite est ensuite appliquée sur ces champs pour définir des prédicteurs potentiels sous forme d'indices régionaux ;

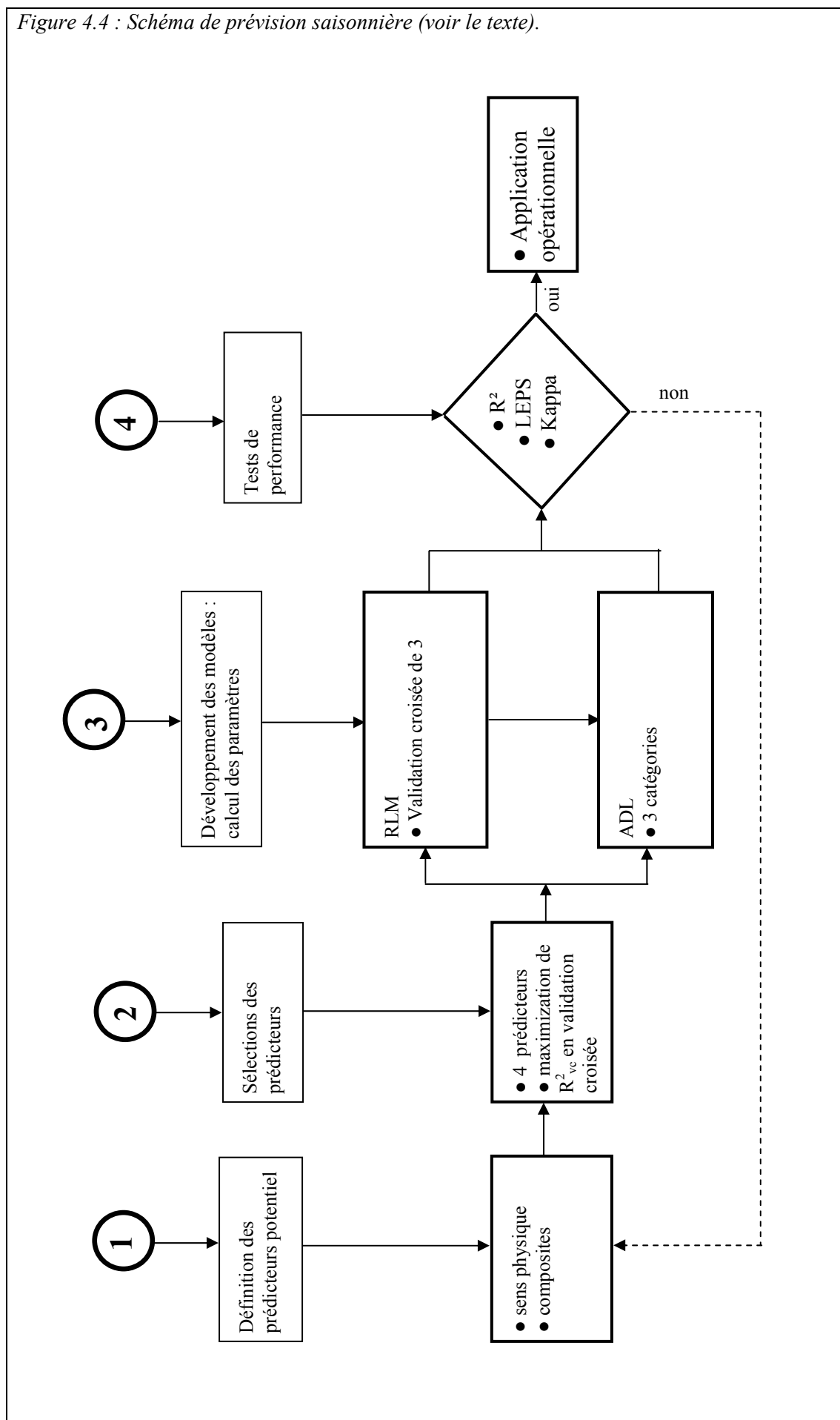
- E2 : les quatre meilleurs prédicteurs sont sélectionnés par la méthode régression linéaire multiple (RLM) avec sélection pas à pas. Le critère de sélection est le coefficient de corrélation linéaire avec une approche de validation croisée ;

- E3 : les prédicteurs sélectionnés sont utilisés selon deux méthodes différentes (RLM et Analyse Discriminante Linéaire) en se servant de l'ensemble des observations disponibles pour définir les paramètres et caler les coefficients des modèles, et de différentes sous périodes d'observation pour calculer les scores de prévision de chacun des modèles ;

- E4 : les performances des modèles de prévision sont testées selon plusieurs critères statistique : le coefficient de corrélations entre les valeurs prévues et observées, le score de LEPS (Linear Error in Probability Space), et le score de Kappa. Elle aboutit soit à leur rejet (« non ») soit à leur validation (« oui »). Dans le premier cas, il faut procéder à une nouvelle sélection de prédicteurs ; dans le second cas, les modèles sont prêts pour l'application en mode opérationnel.

Ce schéma est établi en se basant sur des expériences préalables de prévisions saisonnières pour l'Afrique effectuées au Centre de Recherches de Climatologie (Fontaine B., Nathalie P., Camberlin P., 1999 ; Fontaine B., Philippon N., 2000 ; Philippon N., 2002 ; Philippon N., Fontaine B., 2002).

Figure 4.4 : Schéma de prévision saisonnière (voir le texte).



4.1.3 Conditions atmosphériques associées à l'onset de mousson.

Afin de montrer les conditions atmosphériques associées à l'onset, on considère les champs journaliers d'ESH, PNM, OLR et le vent. Le jour d'onset est noté 0, les jours avant (après) sont notés - (+), respectivement. Les champs qui représentent la situation d'avant l'onset sont la moyenne de j '-15' à j '-1' et les champs d'après l'onset sont la moyenne de j '0' à j '+14'. Les figures 4.5-4.8a.b présentent les champs moyens d'ESH, PNM, OLR et de vent avant et après l'onset. Dans ces figures, les isolignes discontinues donnent les valeurs d'ESH, PNM et OLR inférieures à 355KJ/Kg, 1 011hPa, et 240Wm⁻². Les cartes composites qui montrent les différences (après-avant) sont en figures 4.5-4.8c.

Avant l'onset, deux maxima d'ESH (375 KJ/Kg) apparaissent sur l'ouest et le nord du golfe du Bengale (figure 4.5a). Après l'onset, ils s'étendent à tout le golfe, tandis qu'un autre centre apparaît sur la mer Bien Dong (Fig. 4.5b). Toutefois, la figure 4.5c montre un changement d'ESH d'échelle globale avec une bande d'augmentation sur 30°N-35°N (maximum sur l'est de la Chine) et une bande de diminution de 15°S-20°S (minimum sur l'Australie). Les tendances d'ESH sont associées à la tendance négative (positive) de PNM sur la même bande 30°N-35°N (15°S-20°S) avec le minimum (maximum) sur la Chine (centres identiques) (figure 4.6c). Ainsi, au moment de l'onset, des signaux robustes peuvent être définis à partir des gradients d'ESH et de PNM. Ces gradients sont bien connus pour conduire la dynamique de mousson, soit directement *via* le changement du contenu énergétique en surface et de la force du gradient de pression, soit indirectement *via* ses nouveaux arrangements verticaux.

Ce changement en contenu énergétique est associé aussi à des modifications dans le champ de vent 1 000 hPa (figure 4.7a, b). La transition avant/après l'onset est caractérisée premièrement par un renforcement du vent de sud-ouest sur le golfe du Bengale (figure 4.7c). Avant l'onset, il est faible ; après l'onset, il souffle fortement et pénètre sur l'Indochine. Ceci est concomitant avec le creusement du centre de basses pressions (1 002 hPa) sur le nord de l'océan Indien et le golfe du Bengale. Deuxièmement, l'onset se place au moment de la substitution des vents d'est par des vents de sud sur la mer Bien Dong en raison du retrait de la dorsale de hautes pressions sur l'ouest Pacifique (figure 4.7b). Lors de l'onset de mousson, le vent au sud du Vietnam passe du sud-est au sud-ouest et transporte la vapeur d'eau de l'océan Indien et de l'archipel de Malaisie. Parallèlement, l'ESH augmente très vite.

Enfin, le champ d'OLR (figure 4.8 a, b) permet de détailler l'évolution de la convection profonde au moment de l'onset de mousson. Avant l'onset, deux minima d'OLR (région de convection profonde) apparaissent sur Sumatra et l'Indonésie, alors que le nord du golfe du Bengale et la mer Bien Dong enregistrent un maximum. Après l'onset, le minimum d'OLR sur Sumatra s'étend au nord, alors que le minimum sur l'Indonésie décline. Les régions où il y a la plus forte convection ($< 210 \text{Wm}^{-2}$) recouvrent le sud-est du golfe du Bengale et le sud-ouest du Vietnam et du Cambodge. La figure 4.8c montre les tendances positives (négatives) de l'OLR sur l'Indonésie (golfe du Bengale et mer Bien Dong). Cette observation concorde bien avec l'étude de Zhang *et al.* (2002), qui ont observé que l'extension et l'intensification du centre de forte convection sur Sumatra pourrait résulter des pluies de mousson sur l'Indochine.

Tous ces résultats (figure 4.5-4.8c) montrent que des signaux atmosphériques robustes marquent la date d'onset (i.e., gradients de pression ESH, OLR et champs de vent). Une prévision statistique de la date d'onset basée sur ces signaux est donc envisageable. Elle est illustrée ci-dessous.

Figure 4.5 : Champs moyens de l'énergie statique humide en KJ/Kg : 15 jours avant l'onset (a) ; 15 jours après l'onset (b) ; et composite (après-avant) (c), période 1979-2004. Les aplats gris indiquent les différences significatives à 95 % au regard du test en t de Student. Les carrés localisent les prédicteurs (potentiels en bleu et retenus en rouge).

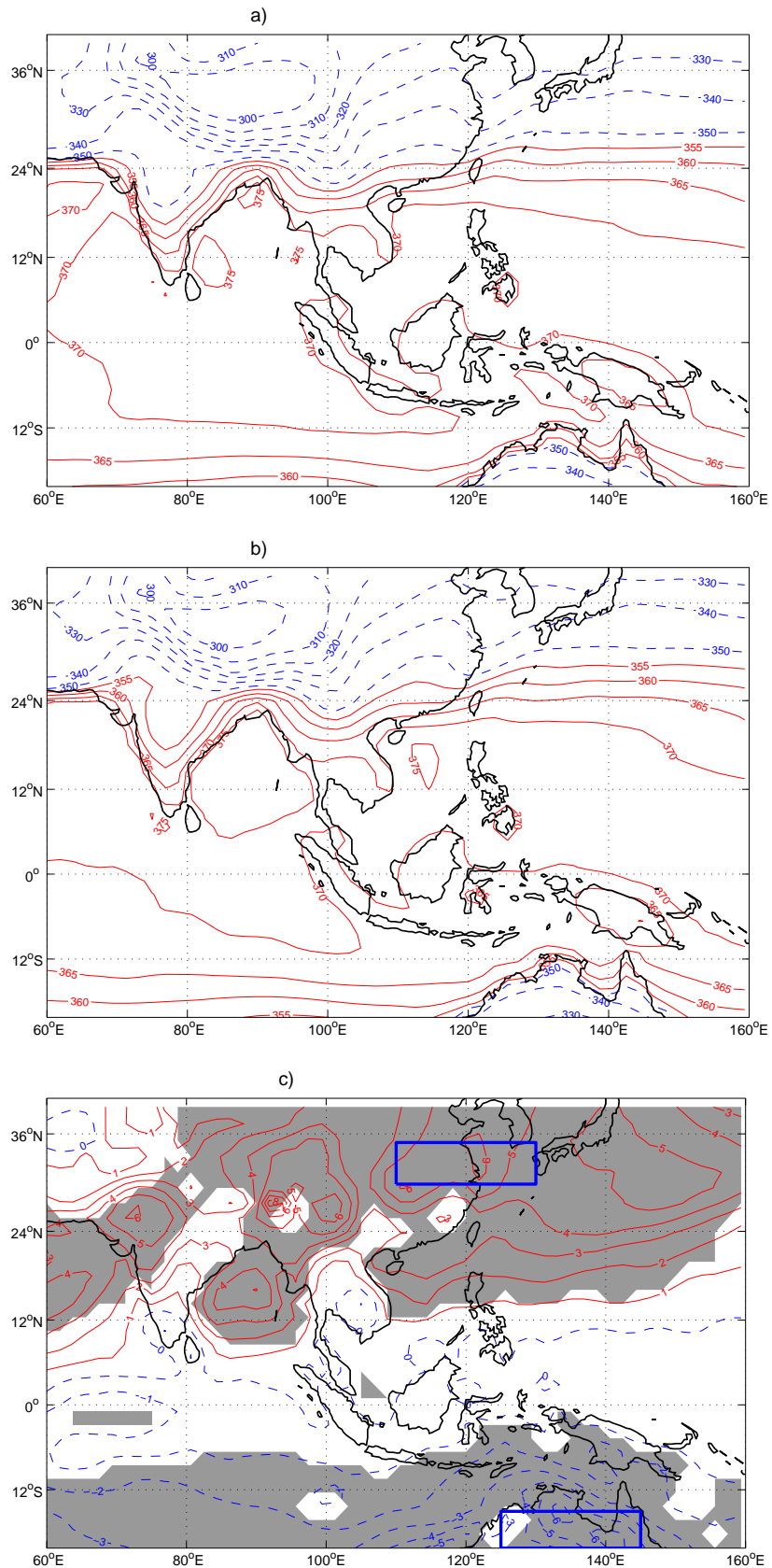


Figure 4.6 : Identique à la figure 4.5, mais pour la pression au niveau de la mer en hPa.

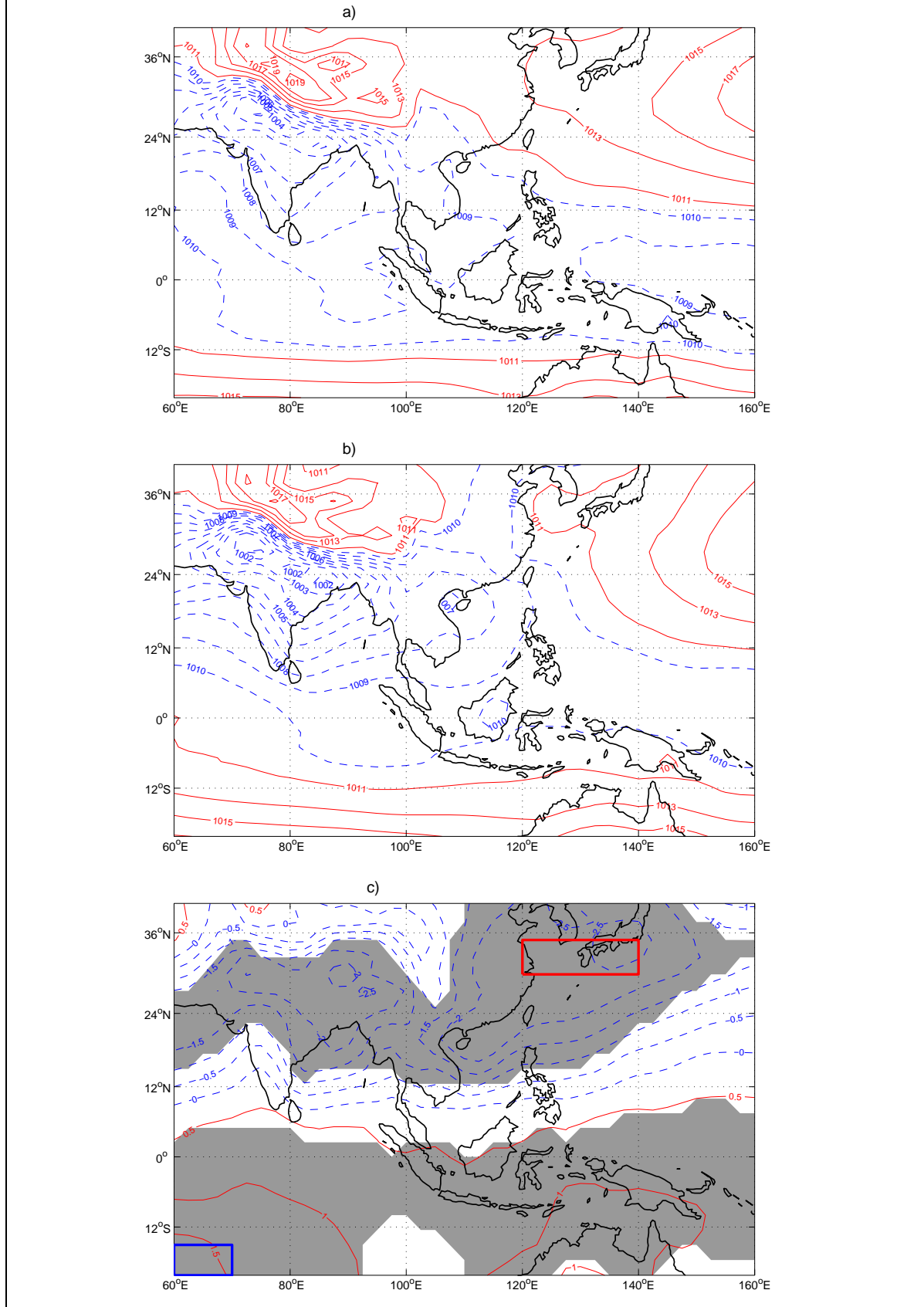


Figure 4.7 : Identique à la figure 4.5 mais pour le vent en surface en m/s.

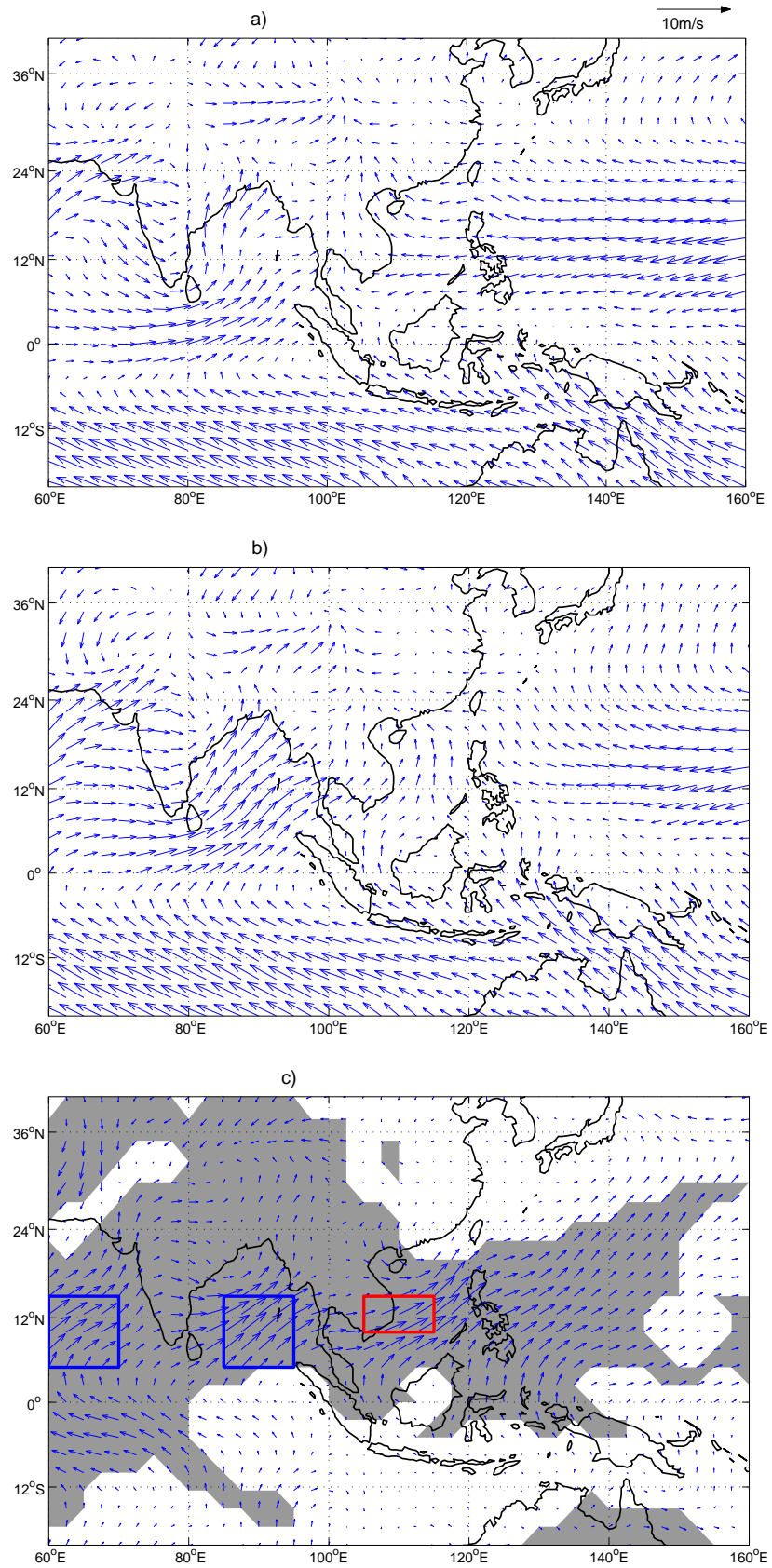
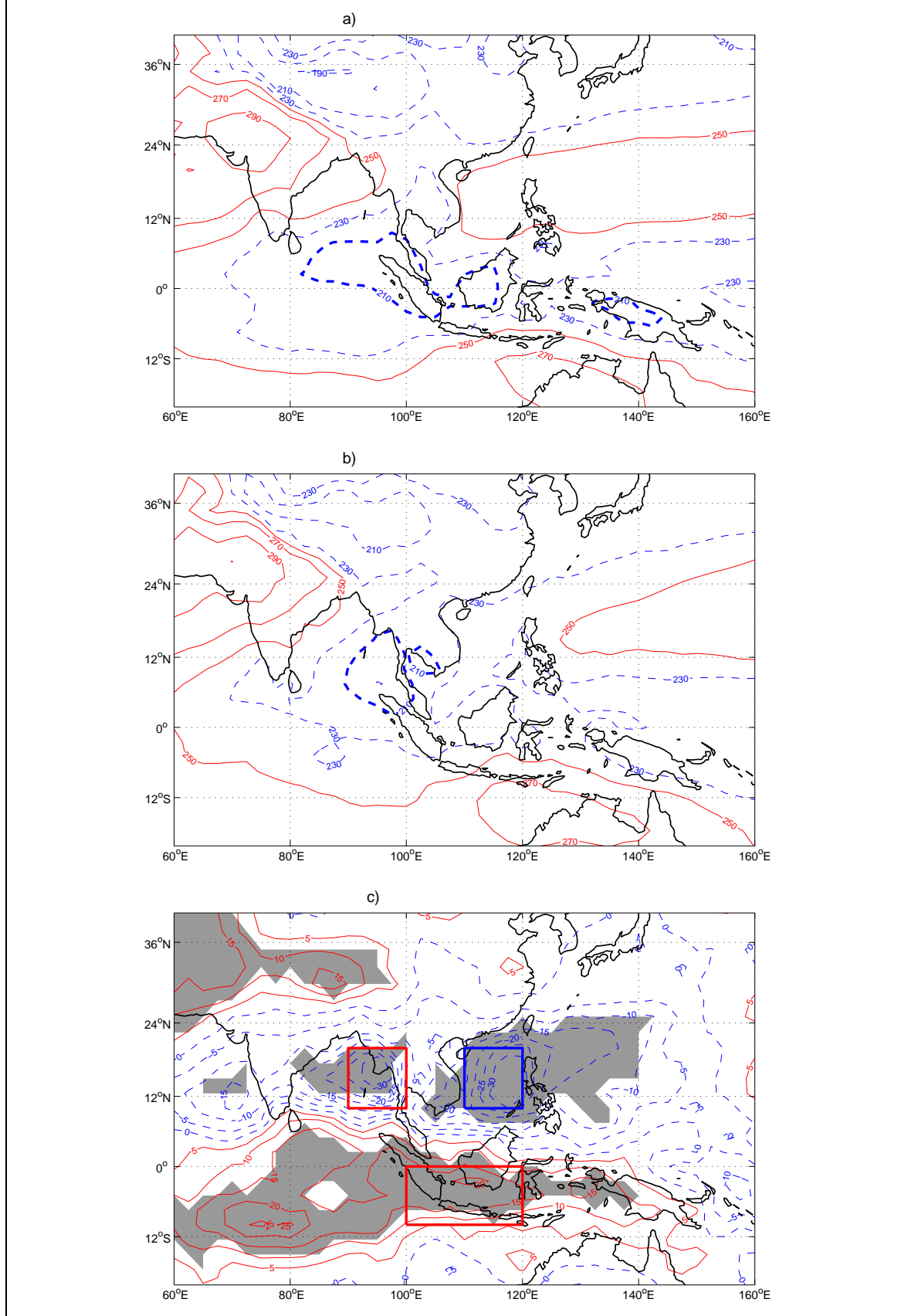


Figure 4.8 : Identique à la figure 4.5 mais pour la radiation sortante de grandes longueurs d'ondes en Wm^{-2} .



4.1.4 Prévisibilité de l'onset de mousson sur le sud Vietnam.

Un exercice de prévision de l'onset est effectué en utilisant la méthode de régression linéaire multiple. Le prédicteur (la valeur à prévoir) est la date annuelle d'onset présentée au tableau 4.2. Les prédicteurs sont les dix indices régionaux d'énergie statique humide, de pression au niveau de la mer, et de module de vent ($\sqrt{U^2 + V^2}$) au niveau 1 000 hPa, et d'OLR considérés de la 18^e à la 21^e pentade de l'année (30 mars-19 avril), c'est-à-dire avant la date d'onset la plus précoce de la période étudiée. Tous les prédicteurs ont un sens physique. Ils décrivent l'énergie et la dynamique de mousson *via* le gradient méridien de pression au niveau de la mer et d'énergie statique humide près de la surface. Ils contiennent aussi les signaux significatifs associés à l'onset, comme le changement de direction et de la force du vent et la transition géographique des maxima de convection profonde. Précisément, les dix prédicteurs potentiels sont : (1) l'ESH sur la région Chine-Japon ; (2) l'ESH sur la région de l'Australie ; (3) la PNM sur la région de l'Inde ; (4) la PNM sur l'est de la mer de Chine ; (5) le vent sur la mer d'Arabie ; (6) le vent sur le golfe du Bengale ; (7) le vent sur le sud du Vietnam ; (8) l'OLR sur le golfe du Bengale ; (9) l'OLR sur la mer Bien Dong, et (10) l'OLR sur la région de l'Indonésie (cf. les boîtes dans la figure 4.3-4.6c).

Les quatre meilleurs parmi ces dix prédicteurs ont été sélectionnés par la méthode de régression linéaire multiple pas à pas sous une procédure de validation croisée. La validation croisée permet de s'assurer de la robustesse du modèle puisque les informations de l'année prévue, de l'année d'avant et de l'année d'après, ne sont pas utilisées. Le coefficient de régression pour chaque année est donc calculé à partir des vingt-trois ans subsistants. Ceci minimise l'inflation des scores de corrélation dus à l'autocorrélation dans les chroniques temporelles des prédicteurs et/ou prédicteurs. Il nous permet de fournir une meilleure estimation de prévision (Michaelsen, 1987 ; Barnston, 1993). Ces quatre prédicteurs sont : (1) l'indice moyen du champ PNM sur la mer de Chine (120°E-140°E, 30°N-35°N, figure 4.6c) pendant la 18^e pentade (PNMcn18) ; (2) le vent sur le sud du Vietnam (105°E-115°E, 10°N-15°N, figure 4.7c) pendant la 20^e pentade (ventvn20) ; (3) l'OLR sur le golfe du Bengale (90°E-100°E, 10°N-20°N, figure 4.8c) pendant la 18^e pentade (OLRbg18), et (4) OLR sur la région de l'Indonésie (100°E-120°E, 0-10°S, figure 4.8c) pendant la 20^e pentade (OLRid20) (figure 6d). La figure 4.9 présente le nuage de points entre les dates d'onset observées et celles prévues pour chaque année. Elle montre que le coefficient de corrélation est élevé et significatif au niveau 99 % ($R_{cv} = 0.75^{***}$) bien que les dates d'onset prévues en 1991, 1993 (1979, 1982) soient inférieures (supérieures) à celles observées. Les coefficients de régression

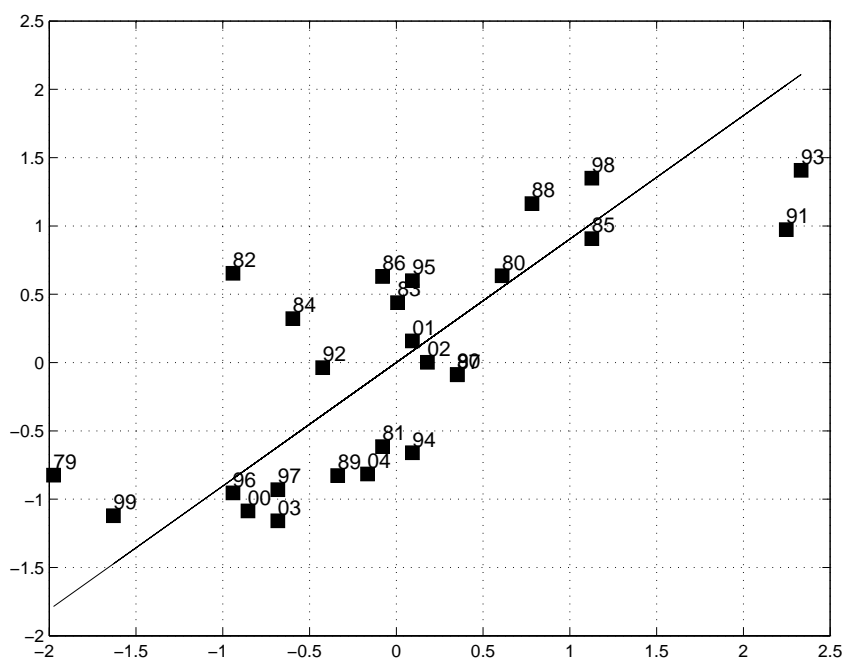
et les critères statistiques de l'équation de prévision sont présentés dans le tableau 4.3. Les coefficients de régression montrent que l'onset tardif (l'inverse est observé pour les dates précoces) est précédé par :

1. une augmentation de la PSM sur la mer de Chine (coefficient positif) au début avril. Cela dénote une diminution du gradient méridien, donc de la force du gradient de pression, ce qui entrave la pénétration des vents de sud-ouest vers le nord à cause de l'influence de l'air polaire ;
2. une accentuation des vents de sud-est sur le sud Vietnam (positif) à la mi-avril, associée à la pénétration à l'ouest de la dorsale de hautes pressions d'ouest Pacifique ;
3. un renforcement de la convection profonde sur l'Indonésie mi-avril (négatif) avec un affaiblissement sur le golfe du Bengale début avril (positif)

Tableau 4.3 : Coefficients de régression en valeurs standardisées pour les quatre prédicteurs sélectionnés : PNMcn18, ventvn20, OLRbg18 et OLRid20. Le coefficient de corrélation $R^2_{cv} = 0.56^{***}$, le score de RMSE = 0.56, le score de mvif = 1.19.

Prédicteurs	PNMcn18	ventvn20	OLRbg18	OLRid20
Reg. C	+0.30	+0.39	+0.50	-0.43

Figure 4.9 : Nuage de points entre les dates d'onset observées (axe x) et prévues (axe y) en valeurs standardisées : valeurs positives/négatives pour l'onset tardif/précoce. Les années sont notées près du carré correspondant.



Parallèlement, l'analyse discriminante linéaire (ADL) a aussi été utilisée pour prévoir les dates d'onset selon trois catégories (précoce, normal, tardif) avec les quatre mêmes prédicteurs que ceux du modèle RLM. Cette méthode permet de distinguer les groupes ou les catégories distinctes par une combinaison linéaire des prédicteurs qui fournit une meilleure séparation des groupes (Keenan, 1986).

Le tableau 4.4 confirme la bonne performance du modèle quand les années d'onset sont classées en trois catégories : seize onsets sur vingt-six sont bien classés avec seulement une grosse erreur (un onset précoce, prévu tardif). Enfin, le score de LEPS (linear error in probability space skill-score, Ward et Folland, 1991 ; Potts *et al.*, 1996) est de 52 %, le score de Kappa est de 0.61, ce qui est considéré comme bon ($K > 0.60$).

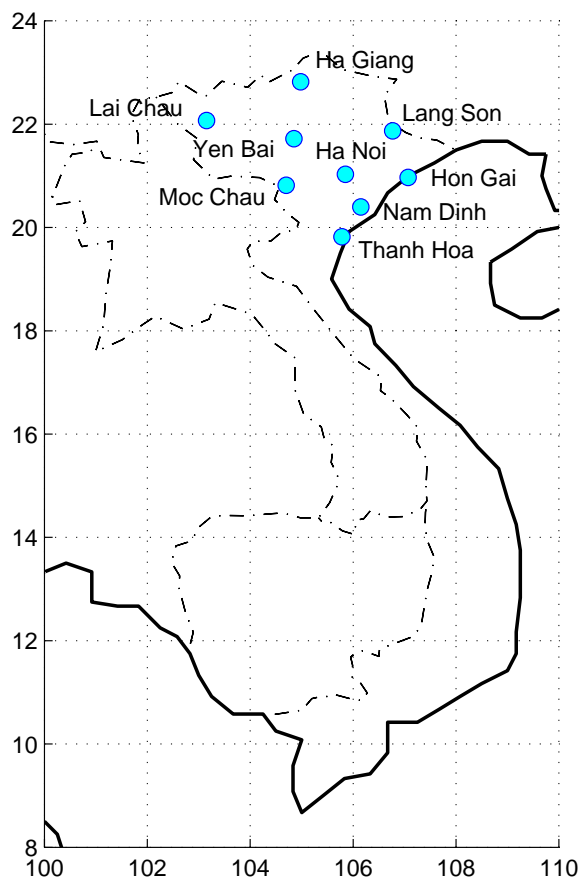
Tableau 4.4 : Les dates d'onset prévues et observées après classification dans trois catégories (précoce normal et tardif).

		Observations		
		tôt	normal	tard
Prévisions	tôt	6	2	0
	normal	3	5	3
	tard	1	1	5

4.2 Démarrage de la saison des pluies au nord Vietnam et prévisibilité

4.2.1 Définir le démarrage de la saison des pluies au nord Vietnam

Pour définir la date de démarrage de la saison des pluies au nord Vietnam, les données journalières de pluies de neuf stations pendant la période 1979-2004 ont été utilisées. Ces stations sont sélectionnées en s'appuyant sur leur qualité et leur représentativité. Elles comprennent : Lai Chau, Moc Chau représentant la région Taybac ; Ha Giang, Yen Bai, Lang Son, Hon Gai pour la région Dongbac ; et Hanoi, Nam Dinh, Thanh Hoa représentent la région de plaine du nord Vietnam. Seule Hon Gai présente des manques supérieurs à 1 % : 3.2 %. La figure 4.10 et le tableau 4.5 présentent les positions et les caractéristiques géographiques des stations sélectionnées.



Stations	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Altitude (m)
Lai Chau	22.07	103.15	244
Moc Chau	20.82	104.70	958
Ha Giang	22.82	104.98	118
Yen Bai	21.72	104.85	56
Lang Son	21.87	106.77	259
Bai Chay	20.97	107.07	87
Hanoi	21.03	105.85	5
Nam Dinh	20.40	106.15	3
Thanh Hoa	19.82	105.78	5

Tableau 4.5 : Caractéristiques des stations sélectionnées.

Figure 4.10 : Stations pluviométriques sélectionnées sur le nord Vietnam.

La circulation atmosphérique sur le nord Vietnam subit une forte influence du relief et du champ de pressions local. Pendant l'été, les vents de sud-ouest tournent au sud-est sous l'influence de la basse pression du Bac Bo (Pham et Phan, 1993). On n'observe pas de changement de vent en direction et en vitesse sur le nord Vietnam au moment du démarrage de la saison des pluies (figure 4.15a.b), contrairement à ce qui est observé au sud Vietnam. Toutefois, les cumuls de pluie sur cette région sont encore fonction de l'origine de la vapeur d'eau au sein de la circulation d'été. Donc, le démarrage de la saison des pluies est encore lié à l'onset de la mousson sur la région.

La figure 4.11 présente l'indice de pluie en moyenne mobile de cinq jours pour neuf stations au nord Vietnam. Préliminairement, on a estimé que la saison des pluies était démarrée début mai, caractérisée par l'augmentation brusque du cumul des pluies passant de 3 mm/jour à 6 mm/jour, puis arrêtée fin octobre, caractérisée par la diminution brusque des cumuls de 5 mm/jour à 2 mm/jour. S'appuyant sur les indices de pluies, la date de démarrage de la saison des pluies pour chaque année peut être définie ainsi : ***le cumul de pluies journalier doit dépasser 6 mm/jour pendant au moins cinq jours consécutifs.***

Cette double condition satisfait le sens physique : (1) la pluie sur cette région est associée en général à une situation météorologique d'échelle synoptique et se prolonge normalement pendant trois à cinq jours ; (2) le cumul de pluies est assez important pour éliminer les événements pluvieux provenant du Front polaire en fin de la saison sèche. Quant à la statistique, la double condition permet d'obtenir une distribution des dates d'onset quasi gaussienne. Le tableau 4.6 présente les dates d'onset pendant la période 1979-2004. Le démarrage le plus précoce est le 23 avril 1979, le plus tardif le 2 juin 1982 et l'onset moyen le 13 mai avec un écart-type de 11.5 jours. Ces résultats s'accordent avec ceux déjà publiés dans la littérature (Matsumoto, 1997 ; Qian et Lee, 2000 ; Wang et LinHo, 2002 ; Zhang *et al.*, 2002 pour l'Indochine) (*voir section 4.1.1*). Pour le nord Vietnam, Pham N.T., Phan T.D., 1993 ; Nguyen D.N., Nguyen T.H., 2004 ont montré que toutes les sub-régions du nord Vietnam avaient un onset de saison des pluies en avril ou mai quand on considérait le critère suivant : l'onset de saison des pluies correspond au mois où le cumul des pluies dépasse 100 mm.

La figure 4.12 présente le cycle moyen des cumuls de pluies au nord Vietnam lors des huit années à onset précoce (ligne continue) et des huit années à onset tardif (tiretés). Elle montre que les années à onset précoce (tardif) sont associées aux cumuls de pluie plus élevés (bas) que la normale.

Figure 4.11 : Indices de pluies journalières (moyenne mobile de 5 jours) en mm/jour, période 1979-2004.

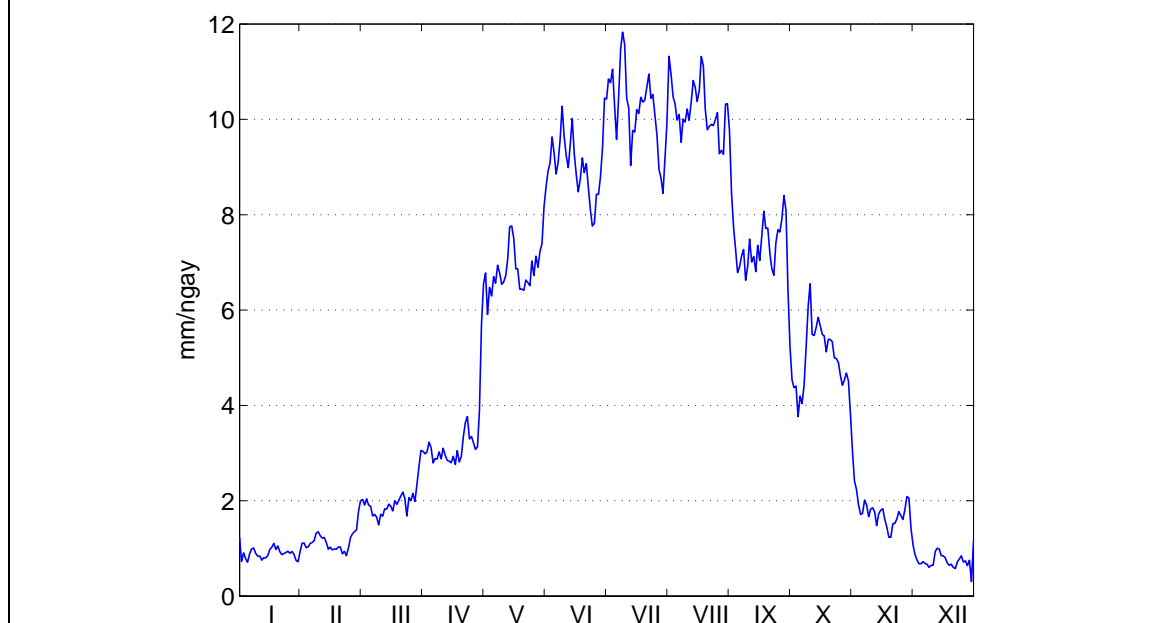
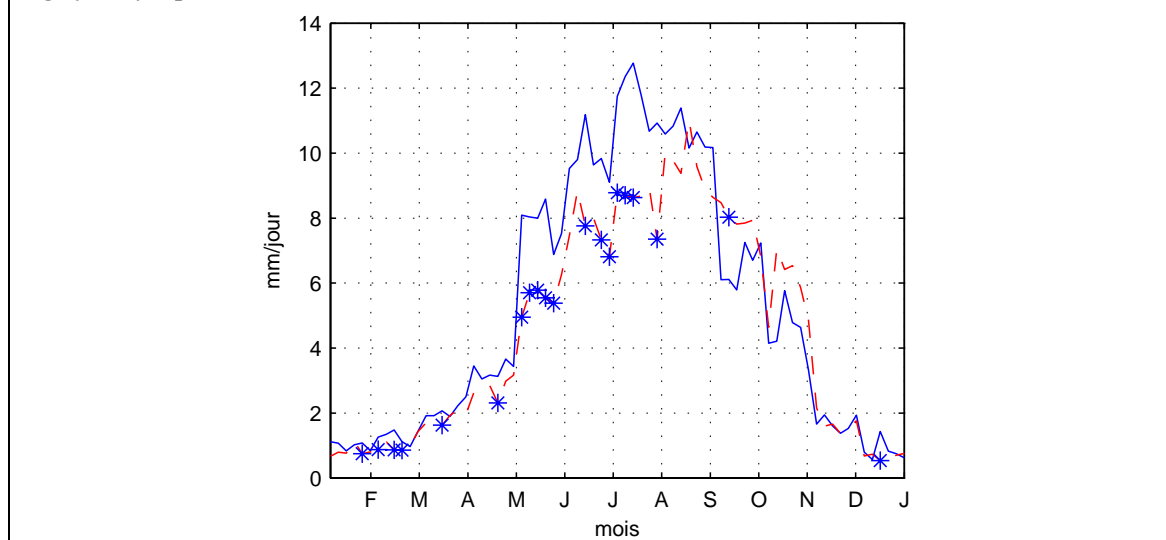


Tableau 4.6 : Dates de démarrage de la saison des pluies au nord Vietnam, période 1979-2004.

années	date d'onset	années	date d'onset
1979	23 avril	1993	8 mai
1980	2 mai	1994	1 juin
1981	5 mai	1995	22 mai
1982	2 juin	1996	19 mai
1983	15 mai	1997	3 mai
1984	12 mai	1998	26 mai
1985	11 mai	1999	1 mai
1986	1 mai	2000	1 mai
1987	2 mai	2001	13 mai
1988	13 mai	2002	27 mai
1989	29 mai	2003	25 mai
1990	12 mai	2004	19 mai
1991	23 mai	moyen	13 mai
1992	3 mai		

Figure 4.12 : Précipitations moyennes des huit années à onset précoce (bleu, ligne continue) et des huit années à onset tardif (rouge, discontinue) au nord Vietnam, période 1979-2004. * si significatif à $p=0.1$.



4.2.2 Conditions atmosphériques associées au démarrage de la saison des pluies

Pour montrer les conditions atmosphériques associées au démarrage de la saison des pluies au nord Vietnam, les cartes moyennes avant la date d'onset (figure 4.13-4.16a), et après la date d'onset (figure 4.13-4.16b) et les cartes composites (après-avant) des champs ESH, PNM, OLR, et vent (figure 4.13-4.16c) ont été construites de façon similaire à ce qui a été présenté pour le sud Vietnam. Dans les figures 4.13-4.16ab, les isolignes discontinues donnent les valeurs d'ESH, PNM et OLR inférieures à 355KJ/Kg, 1 011hPa, et 240Wm⁻² respectivement.

Les figures 4.13a et b présentent les champs moyens d'ESH. Avant la date d'onset, les deux maxima d'ESH (375 KJ/Kg) apparaissent sur l'ouest et au nord du golfe du Bengale (figure 4.13a). Après l'onset, ils s'étendent sur tout le golfe. La figure 4.13c montre un changement d'ESH d'échelle globale avec une augmentation sur 30°N-35°N (maximum sur l'est de la Chine) et une diminution sur 15°S-20°S (minimum sur le centre de l'océan Indien).

Notons qu'avant l'onset, la région est de la Chine est sous la dorsale des hautes pressions de l'ouest Pacifique, alors qu'après cette dorsale de hautes pressions décline et est remplacée par une structure de basses pressions avec la basse pression de Bac Bo en formation sur le nord Vietnam (figure 4.14a, b). La figure 4.14c montre la tendance positive

(négative) de PNM sur la bande 30°N-35°N (15°S-20°S) avec un maximum (minimum) sur la Chine (centre de l'océan Indien).

Les figures 4.15a et b présentent les champs de vent à 1 000 hPa pendant, avant et après l'onset. Au moment de l'onset, on peut observer une augmentation du vent de sud-ouest sur le golfe du Bengale et une diminution du vent de sud-est sur la mer Bien Dong. Toutefois, on ne constate pas de changement de vent sur le nord du Vietnam.

Enfin, le champ d'OLR (figure 4.16) montre clairement l'évolution de la convection associée au démarrage de la saison des pluies. Avant l'onset, une bande de minimum d'OLR (convection profonde) se trouve sur la région équatoriale de l'Indonésie, tandis que le nord du Bengale et la mer Bien Dong enregistrent un maximum d'OLR. Après l'onset, l'OLR sur la mer Bien Dong diminue, le contour de 250W/m² recule vers l'est des Philippines. Le minimum d'OLR sur Sumatra s'intensifie et s'étend au nord. Ainsi, la région de plus forte convection (< 210Wm⁻²) recouvre le sud-est du golfe du Bengale et le sud-ouest du Vietnam et du Cambodge.

Au total, les signaux attestant le mieux le démarrage de la saison des pluies sont les gradients méridiens d'ESH et de PNM, l'intensification du vent de sud-ouest sur la mer d'Arabie, le golfe du Bengale et la mer Bien Dong, et la transition des maxima de convection équatoriaux vers le nord.

Figure 4.13 : Champs moyens d'énergie statique humide en KJ/Kg : 15 jours avant l'onset (a) ; 15 jours après l'onset (b); et composite (après-avant) (c), période 1979-2004. Les aplats gris indiquent les différences significatives à 95 % au regard d'un test en t de Student. Les carrés localisent les prédicteurs (potentiels en bleu et sélectionnés en rouge).

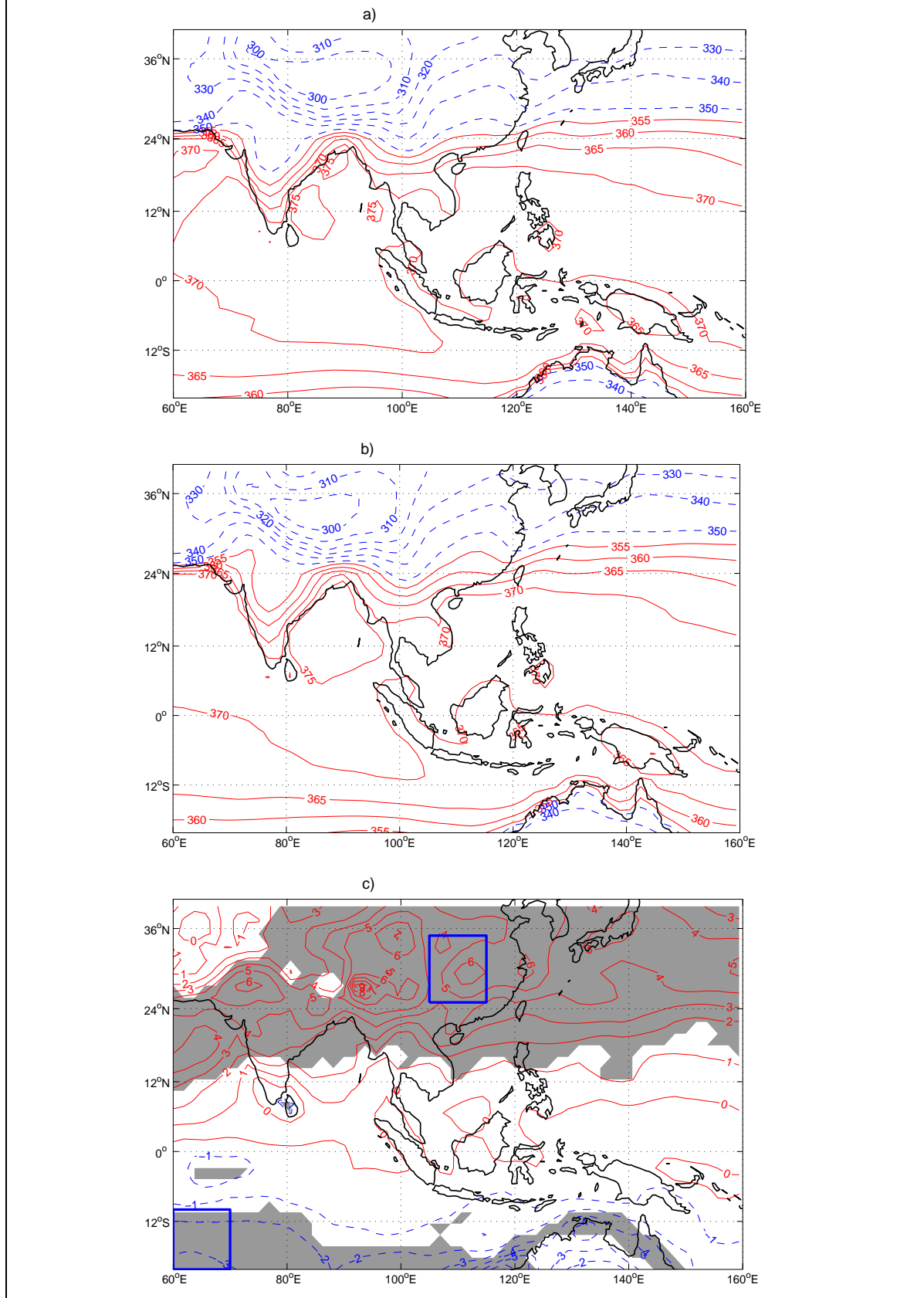


Figure 4.14 : Identique à la figure 4.13 mais pour la pression au niveau de la mer en hPa.

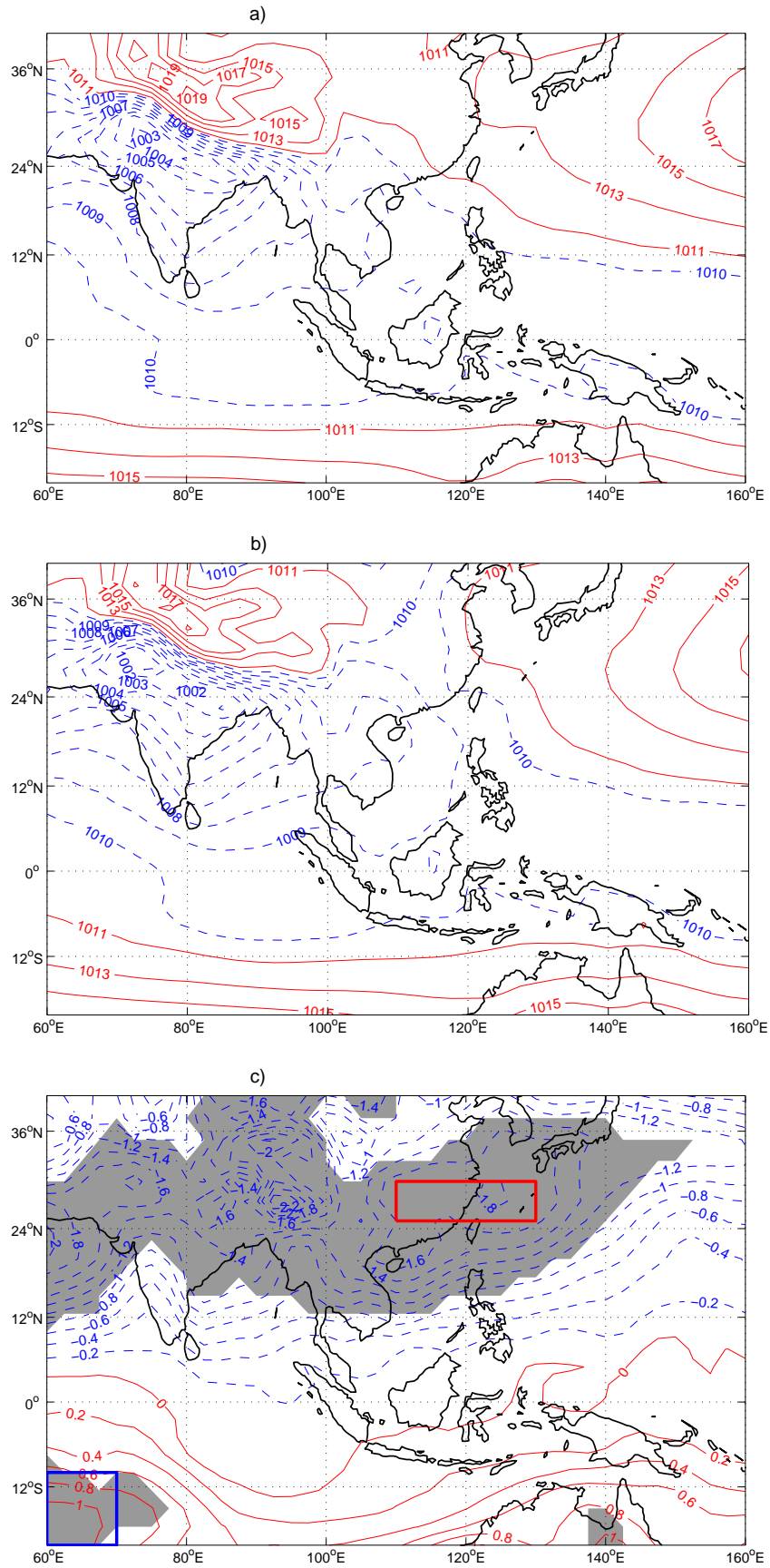


Figure 4.15 : Identique à la figure 4.13 mais pour le vent en surface en m/s.

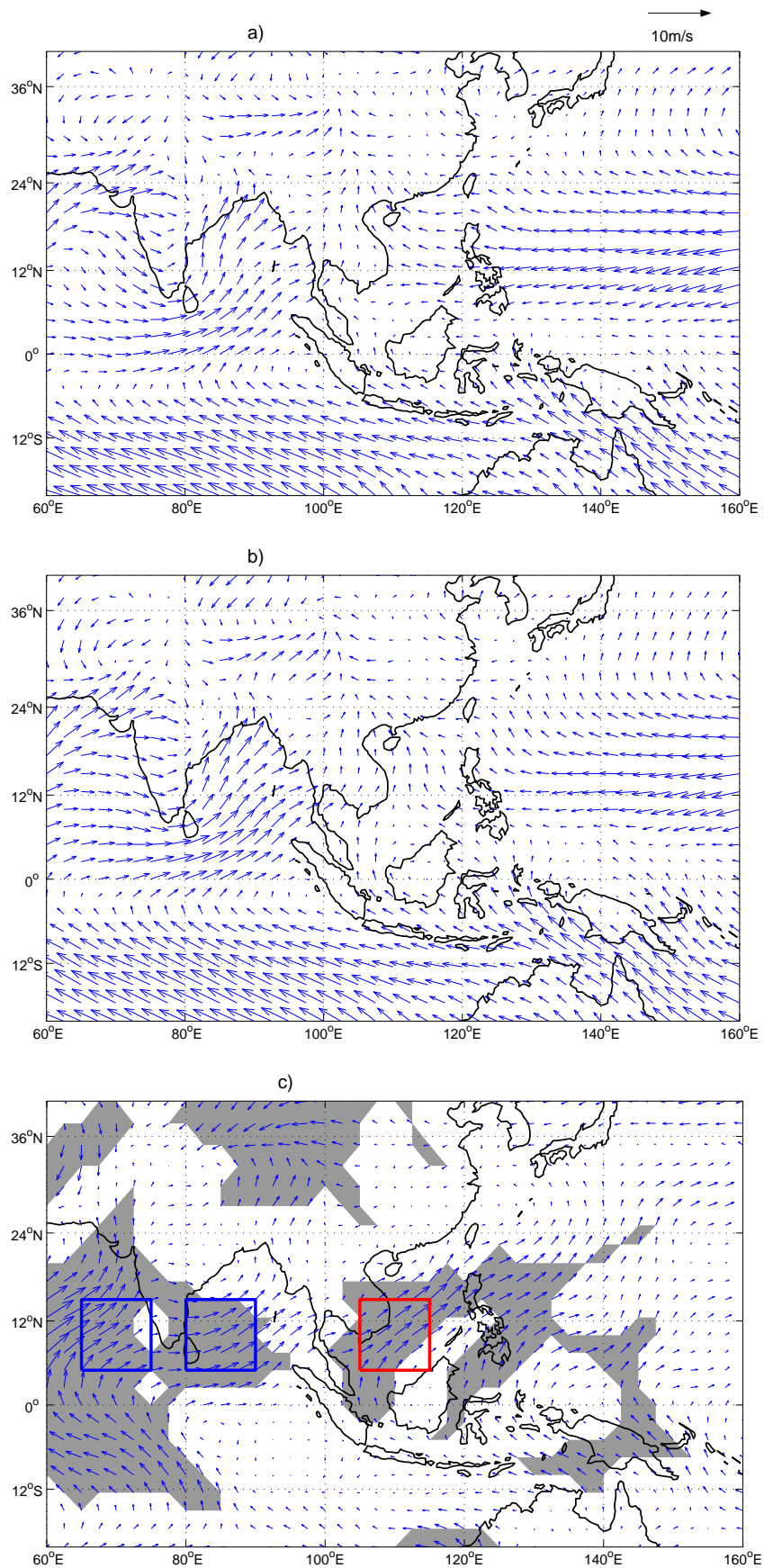
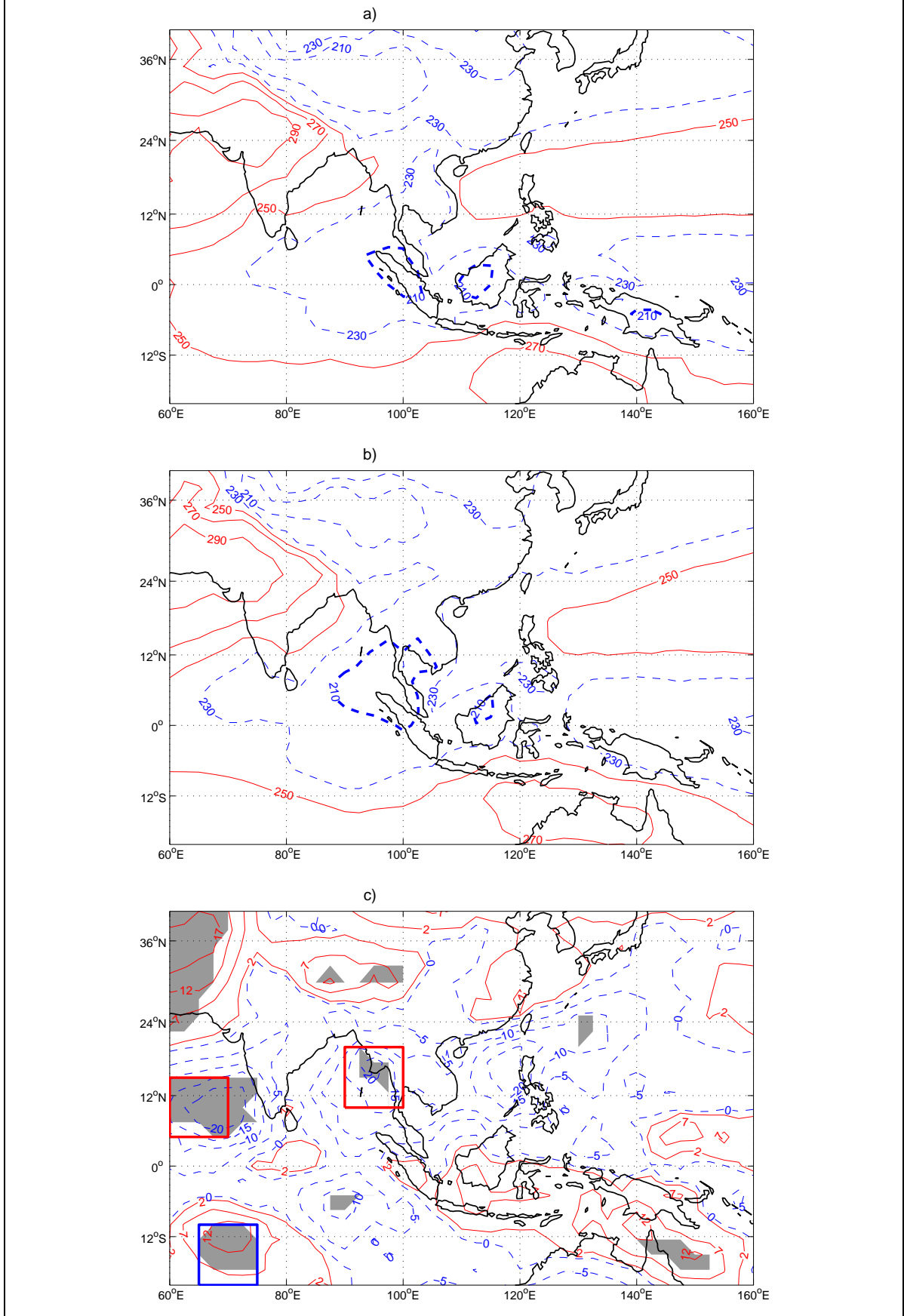


Figure 4.16 : Identique à la figure 4.13 mais pour la radiation sortante de grandes longueurs d'onde en Wm^{-2} .



4.2.3 Prévisibilité du démarrage de la saison des pluies au nord Vietnam

Comme pour le sud Vietnam, les dates de démarrage de la saison des pluies au nord Vietnam (le prédictant) sont prévues par une méthode de régression linéaire multiple. Les prédicteurs sont dix indices régionaux d'énergie statique humide, de pression au niveau de la mer, de module du vent ($\sqrt{U^2 + V^2}$) en surface, et OLR considéré de la 19^e à la 22^e pentade de l'année (3 avril-22 avril). Précisément, les dix prédicteurs sont : (1) l'ESH sur l'est de la Chine ; (2) l'ESH sur le centre de l'océan Indien ; (3) la PNM sur l'est de la Chine ; (4) la PNM sur le centre de l'océan Indien ; (5) le vent sur la mer d'Arabie ; (6) le vent sur le golfe du Bengale ; (7) le vent sur le sud du Vietnam ; (8) l'OLR sur la mer d'Arabie ; (9) l'OLR sur le centre de l'océan Indien , et (10) l'OLR sur le golfe du Bengale (voir les boîtes sur les figures 4.13 - 4.16c).

Les quatre meilleurs indices sélectionnés parmi ces dix prédicteurs sont : (1) l'indice moyen du champ PNM sur l'est de la Chine (110°E-130°E, 25°N-30°N, figure 4.14 c) pendant la 18^e pentade (PNMcn19) ; (2) le vent sur le sud Vietnam (105°E-115°E, 10°N-15°N, figure 4.15c) pendant la 22^e pentade (ventvn22) ; (3) l'OLR sur la mer d'Arabie (60°E-70°E, 5°N-15°N, figure 4.16 c) pendant la 19^e pentade (OLRar19), et (4) l'OLR sur le golfe du Bengale (90°E-100°E, 10°N-20°N, figure 4.16 c) pendant la 20^e pentade (OLRbg20). La figure 4.17 présente le nuage de points entre les dates d'onset observées et prévues pour chaque année. Elle montre que le coefficient de corrélation est important et significatif au niveau de 99 % ($R_{cv}=0.66^{***}$), bien que les dates d'onset prévues en 1979, 1983, 1990 et 1997 (1982, 1994 et 1999) soient supérieures (inférieures) à celles observées. Les coefficients de régression et les critères statistiques de la régression sont présentés dans le tableau 4.7. Les coefficients de régression montrent qu'une saison des pluies précoce (l'inverse est observé pour une arrivée tardive) est précédée par :

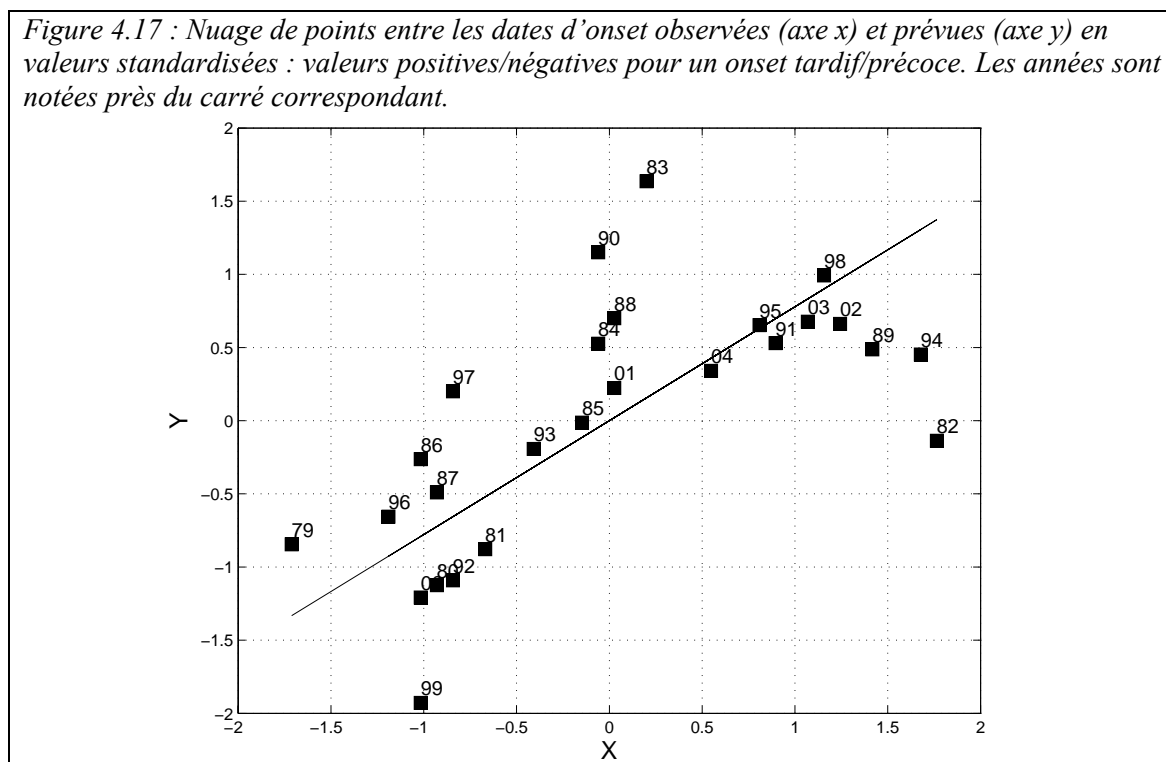
1. une augmentation des PNM sur l'est de la mer de Chine (coefficient négatif) début avril. La cause en est le Front polaire positionné sur le nord Vietnam qui impose des conditions favorables pour l'ascendance des flux humides de sud-ouest en aval des reliefs. En effet, la chaîne Truong Son, orientée NO-SE, offre une barrière orographique au flux de mousson si bien que normalement l'effet de foehn existant au nord du relief limite les ascendances et les précipitations. Mais la présence du Front polaire favorise l'arrivée de masses d'air relativement froides et plus denses qui suppriment l'effet de foehn et forcent dynamiquement l'ascendance dans l'air humide de SO (Pham X.T, Fontaine B., Philippon N., 2008) ;

2. une diminution des vents de sud-est sur le sud Vietnam (positif) mi-avril, associée au recul précoce de la dorsale de hautes pressions de l'ouest Pacifique ;
3. un renforcement de la convection profonde sur le golfe du Bengale début avril (positif).

Tableau 4.7 : Coefficients de régression en valeurs standardisées pour les quatre prédicteurs sélectionnés : PNMcn19, vntvn22, OLRar19 et OLRbg20. $R^2_{cv} = 0.43^{***}$, le score de RMSE = 0.60, le score de mvif = 1.32.

Prédicteurs	PNMcn19	vntvn22	OLRar19	OLRbg20
Reg. C	-0.47	+0.63	-0.45	+0.41

Figure 4.17 : Nuage de points entre les dates d'onset observées (axe x) et prévues (axe y) en valeurs standardisées : valeurs positives/négatives pour un onset tardif/précoce. Les années sont notées près du carré correspondant.



Parallèlement, l'analyse discriminante linéaire (ADL) en trois catégories (précoce, normale, tardive) avec les mêmes quatre prédicteurs que ceux du modèle RLM (tableau 4.8) confirme la bonne capacité du modèle : dix-huit onsets sur vingt-six sont bien classés et on ne remarque aucune grosse erreur (onset tardif, prévu précoce). Le score de LEPS est de 70 %, le score de Kappa est de 0.69, ce qui est considéré comme bon.

Tableau 4.8 : Dates d'onset prévues et observées après classification en trois catégories (tôt, normal et tard) avec une ADL.

		Observations		
		tôt	normal	tard
Prévisions	tôt	8	2	0
	normal	1	5	3
	tard	0	2	5

Synthèse de chapitre

L'objet de ce chapitre était de définir l'onset et d'étudier sa prévisibilité au sud Vietnam et au nord Vietnam. Si la définition de l'onset pour le Vietnam et l'Indochine a déjà été réalisée par plusieurs auteurs, la prévision de l'onset est très nouvelle pour le Vietnam. Dans ce travail, on s'est appuyé sur les données journalières de pluies *in situ* et les données réanalysées de NCEP/DOE-II sur la période 1979-2004 et sur une méthode de régression linéaire multiple (RLM) pas à pas utilisant une procédure de validation croisée, puis sur une analyse discriminante linéaire. Les principaux résultats sont rappelés ci-dessous :

- La date moyenne de l'onset au sud Vietnam est le 12 mai avec un écart-type de 11.6 jours. Ceci s'accorde avec les travaux de nombreux auteurs qui ont travaillé au niveau régional sur l'Indochine (Matsumoto, 1997 ; Qian et Lee, 2000 ; Wang et LinHo, 2002 ; Zhang *et al.*, 2002, pour l'Indochine) ou plus spécifiquement sur le seul sud Vietnam (Pham T.T.H., Tran T.T., 1999 ; Nguyen T.H.T., 2001).

- Les résultats des prévisions annuelles d'onset par la méthode RLM sont bons avec un coefficient de corrélation entre données observées et prévues : $R_{cv} = 0.75^{***}$. Les relations entre prédicteurs et prédicants montrent que l'onset tardif (l'inverse est observé pour les dates précoces) est précédé par : (1) une augmentation des PSM sur la mer de Chine début avril, (2) une accentuation des vents de sud-est sur le sud Vietnam à la mi-avril, (3) un renforcement de la convection profonde sur l'Indonésie mi-avril et un affaiblissement sur le golfe du Bengale début avril. Les résultats de prévision de l'onset par une méthode ADL en trois catégories : seize onsets sur vingt-six sont bien classés, avec un seul cas d'erreur notable (onset tardif, prévu précoce). Le LEPS est de 52 %.

- La date moyenne de l'onset de la saison des pluies au nord Vietnam est le 13 mai avec un écart-type de 11.5 jours. Ceci est en bonne concordance avec les résultats d'autres auteurs qui ont travaillé sur l'Indochine (Matsumoto, 1997 ; Qian et Lee, 2000 ; Wang et LinHo, 2002 ; Zhang *et al.*, 2002, pour l'Indochine) et le nord Vietnam (Pham N.T., Phan T.D., 1993 ; Nguyen D.N., Nguyen T.H., 2004).

- Le coefficient de corrélation en validation croisée entre dates observées et prévues par RLM est égal à 0.66^{***} . La méthode ADL a montré aussi de bons résultats avec un score de LEPS de 70 %. Les coefficients de régression montrent qu'une saison des pluies au nord Vietnam arrive plus tôt (l'inverse est observé pour une arrivée tardive) si l'on observe avant : (1) une augmentation des PNM sur l'est de la mer de Chine début avril, (2) une diminution

des vents sud-est au sud Vietnam mi-avril, (3) un renforcement de la convection profonde sur le golfe du Bengale début avril.

Chapitre 5

Prévisibilité des cumuls saisonniers de pluies au Vietnam

Ce chapitre analyse la prévisibilité des cumuls saisonniers de pluies au Vietnam à partir des sorties de modèles couplés du projet européen ENSEMBLES et des données réanalysées des NCEP/DOE2. Il est structuré en deux sections :

- **la prévisibilité saisonnière dans les modèles couplés, sur la période 1991-2001** : la performance directe des modèles pour prévoir les cumuls saisonniers de pluies au Vietnam est évaluée par comparaison avec les données d'observation (CMAP). Ensuite, les corrélations entre les champs de la dynamique atmosphérique simulée et observée (NCEP) et la pluie CMAP, ainsi que la pluie *in situ* sont calculées. Enfin, les champs de la dynamique atmosphérique simulée sont utilisés pour prévoir les cumuls saisonniers de pluie au nord Vietnam et au sud Vietnam par la méthode de régression linéaire multiple pas à pas.
- **la prévisibilité des cumuls saisonniers de pluies sur la période 1979-2004 à partir des données NCEP/DOE2** : la méthode d'analyse composite (pluvieux-sec) est appliquée sur les champs de la dynamique atmosphérique des réanalyses du NCEP/DOE2 afin de définir des prédicteurs potentiels. Ensuite, la méthode de régression linéaire multiple pas à pas est utilisée pour prévoir les cumuls saisonniers de pluies au Vietnam.

5.1 Prévisibilité saisonnière dans les modèles couplés, période 1991-2001

5.1.1 La pluie

Dans cette sous-partie, la performance des cinq modèles couplés (voir dans le chapitre 1) pour prévoir les cumuls de pluies au Vietnam est évaluée par la méthode ACP (Analyse en Composantes Principales), en comparaison avec les données d'observation (CMAP) sur la fenêtre 100-110°E – 5-25°N.

5.1.1.1 Les champs moyens

La figure 5.1 montre les champs moyens climatologiques des cumuls de pluies de juin à août au Vietnam dans les observations (CMAP, en haut à gauche), à partir du multimodèle ('ENSEMBLES', en haut à droite) et dans chaque modèle individuel (DPSYS, ECMWF, GLOSEA, IFMK, MTFCE, en bas). La figure 5.2 fournit les biais (modèle moins observation) pour chaque mois.

On note que les modèles ont du mal à reproduire le champ saisonnier moyen de pluies, en particulier le maximum de pluies sur le sud du Vietnam (figure 5.1). Le modèle IFMK est le plus habile à reproduire le champ moyen, tandis que le modèle MTFCE (ECMWF) surestime (sous-estime) très largement les cumuls.

En fonction du mois (figure 5.2), les biais varient entre -20 % et +20 %. Au mois de juillet, on enregistre un maximum de biais avec une valeur sous-estimée (environ -40 %) entre nord Vietnam et centre Vietnam et une autre surestimée (environ +40 %) entre centre Vietnam et sud Vietnam.

Enfin, la figure 5.3 présente la répartition statistique des biais (à gauche) et la configuration spatiale de la prévisibilité potentielle (à droite). En juillet et août, les modèles ont davantage tendance à surestimer les pluies. Les biais sont, par ailleurs, davantage systématiques sur la pointe sud de la péninsule d'Indochine, où la prévisibilité potentielle des biais est de 70 % en moyenne.

5.1.1.2 Variabilité interannuelle et prévisibilité potentielle

La variabilité interannuelle des cumuls de pluies sur le Vietnam est analysée à partir d'une Analyse en Composantes Principales appliquée sur les données d'observations (CMAP, figure 5.4a haut), du multi-modèle (ENSEMBLES, figure 5.4a bas) et sur chaque modèle

(figure 5.4b). La matrice d'entrée dans l'ACP se compose des mois (juin-août), des années et des simulations disponibles en lignes ($3 \times 11 \times 9$ observations), et des points de grille en colonnes. Le cycle saisonnier est préalablement enlevé, et les anomalies standardisées sont calculées en prenant en compte la climatologie de chaque modèle afin qu'ils aient le même poids.

Le mode 1 exprime la pluie au sud Vietnam et le mode 2 représente la pluie du nord Vietnam. La comparaison des configurations spatiales entre observations et simulations montre une bonne concordance spatiale (figure 5.4a), à l'inverse de ce qui était observé pour les champs moyens.

Le tableau 5.1 présente les corrélations entre l'évolution temporelle de modes CMAP et celle des modèles. Alors que les configurations spatiales moyennes sont satisfaisantes dans les modèles, ils ne reproduisent pas correctement la variabilité interannuelle des modes de pluie. Excepté MTFCE pour le mode 2, aucun modèle ne montre de corrélation positive significative avec les modes observés correspondants. La figure 5.5 décrit l'évolution temporelle des deux modes de pluie. Pour le mode 1, environ la moitié des observations sont comprises dans la bande $1.96 \times \text{std}$ du multimodèle. Pour le mode 2, un tiers seulement des observations se situent dans cette bande.

Enfin, la figure 5.6 montre la distribution des corrélations croisées entre les quarante-cinq simulations, ainsi que la prévisibilité potentielle (PP) des trois modes. On constate une très faible prévisibilité potentielle des modes de pluie. Par ailleurs, les distributions centrées sur zéro suggèrent pour cette région un faible forçage de la pluie par les TSM dans les modèles. Ces faibles valeurs de PP expliquent la faible reproductibilité de la variabilité interannuelle des modes.

Tableau 5.1 : Corrélations entre les composantes principales des modèles et celles de CMAP. Les signes *, **, *** indiquent une significativité à $p=0.1$, 0.05 et 0.01 respectivement en tenant compte de l'autocorrélation dans les séries.

		CMAP				CMAP	
		Mode 1	Mode 2			Mode 1	Mode 2
ENSEMBLES	Mode 1	-0.15	-0.14	GLOSEA	Mode 1	-0.10	-0.03
	Mode 2	-0.49***	0.16		Mode 2	-0.42**	0.14
	Mode 3	-0.25	0.39*		Mode 3	-0.10	0.46**
DPSYS	Mode 1	-0.25	0-.08	IFMK	Mode 1	-0.15	-0.08
	Mode 2	-0.34*	-0.03		Mode 2	-0.36**	-0.23
	Mode 3	-0.34*	0.26		Mode 3	-0.02	-0.23
ECMWF	Mode 1	0.14	-0.49**	MTFCE	Mode 1	-0.09	0.24
	Mode 2	0.06	0.10		Mode 2	-0.01	0.34*
	Mode 3	-0.15	0.34*		Mode 3	-0.15	0.32

Figure 5.1 : Champs moyens de pluie issus de CMAP, ENSEMBLES et de chaque modèle, pour les cumuls juin à août, en mm, période 1991-2001.

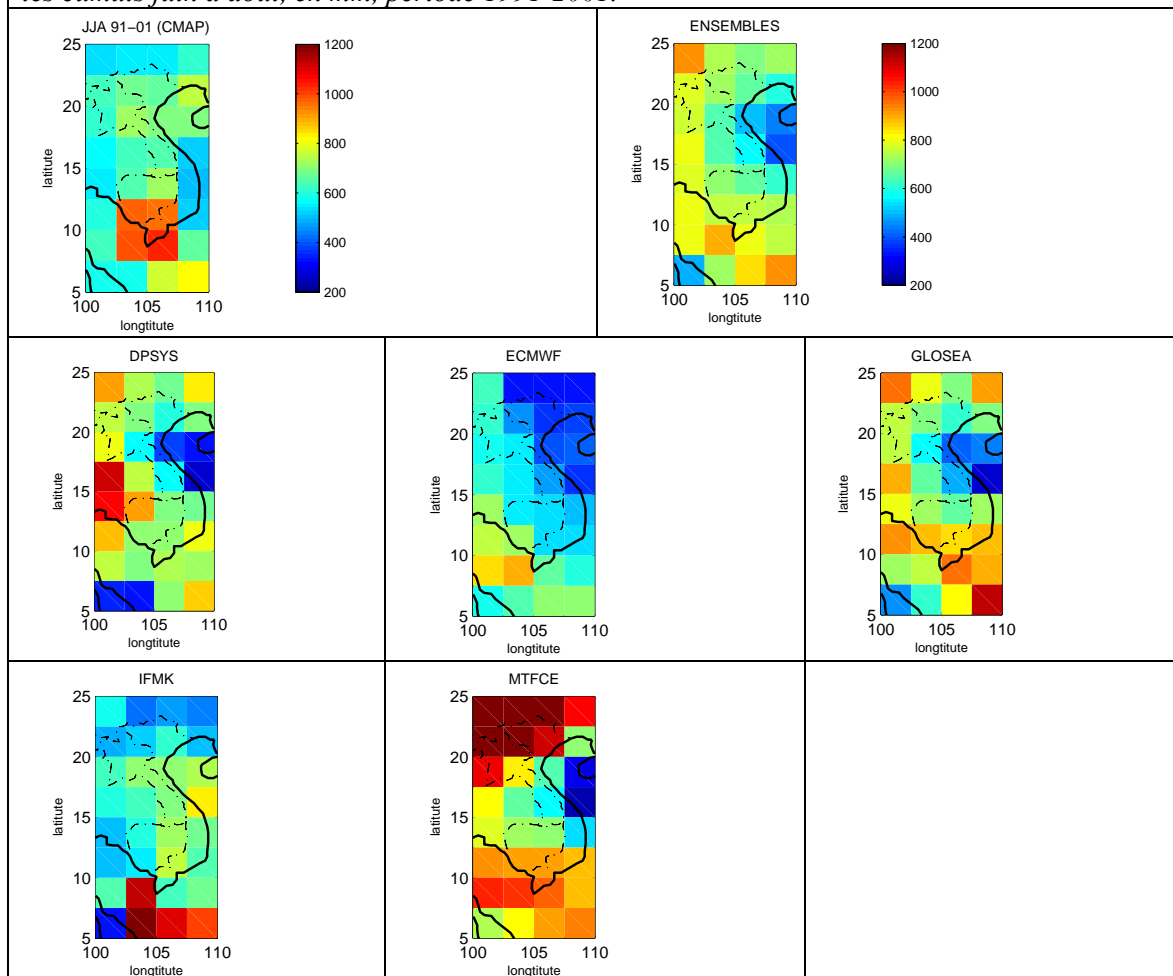


Figure 5.2 : Biais (Modèle-CMAP) en juin-août, en %, période 1991-2001.

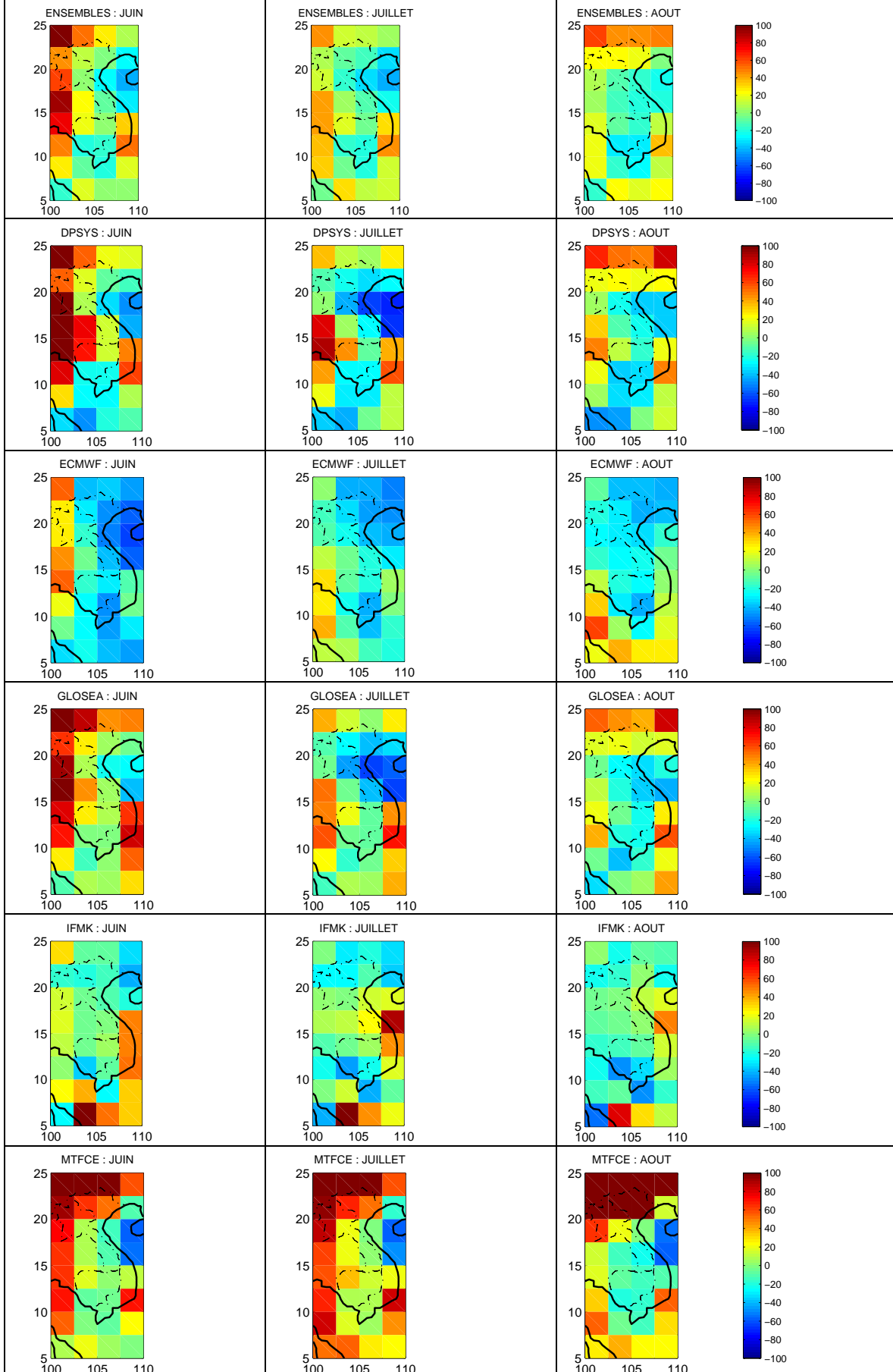


Figure 5.3 : Histogrammes des biais (Modèle-CMAP) et prévisibilité en juin-août, en %, période 1991-2001.

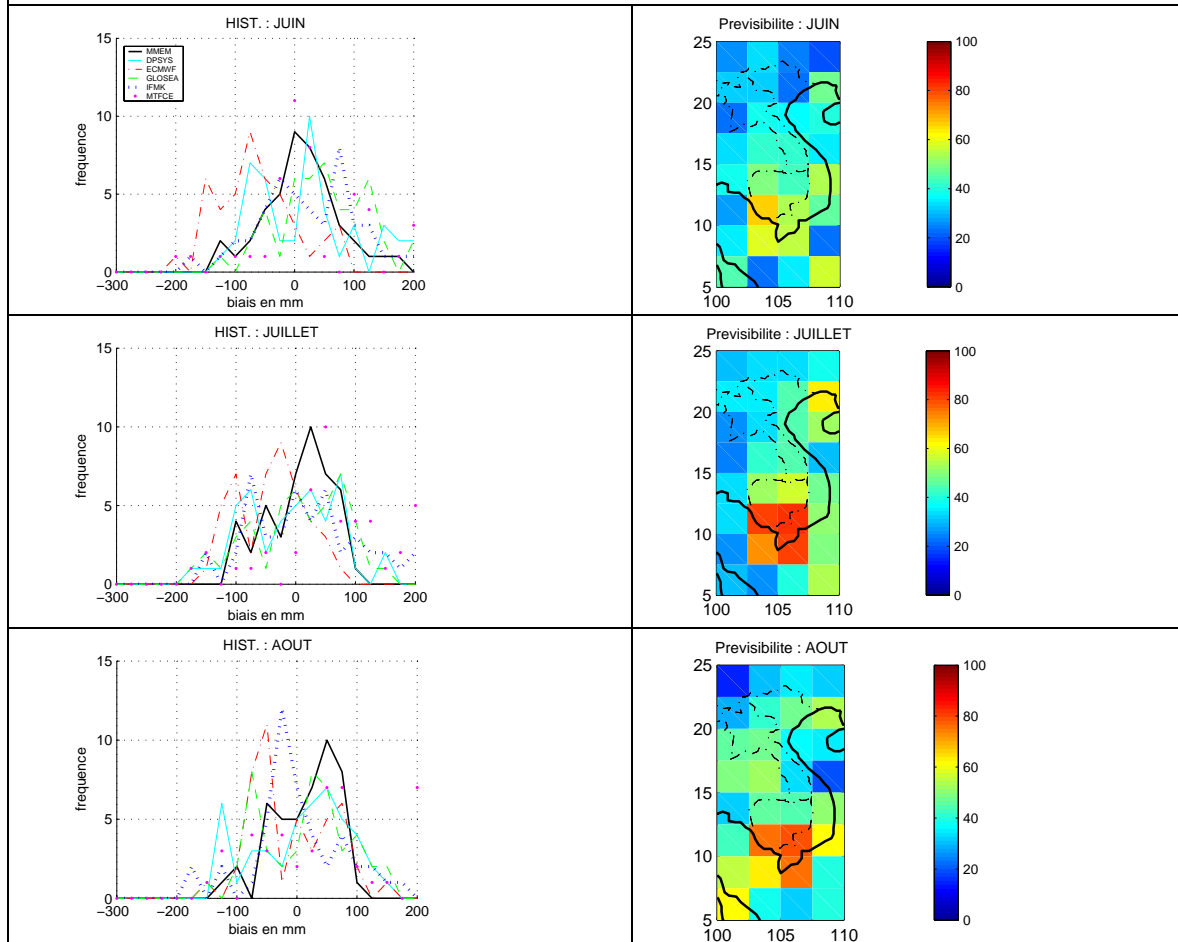


Figure 5.4a : Configurations spatiales des modes 1 (gauche), 2 (milieu), et 3 (droite) de variabilité des pluies issus de l'ACP appliquée sur les données CMAP (haut) et ENSEMBLES (bas) (juin à août, période 1991-2001), unité : coefficient de corrélation.

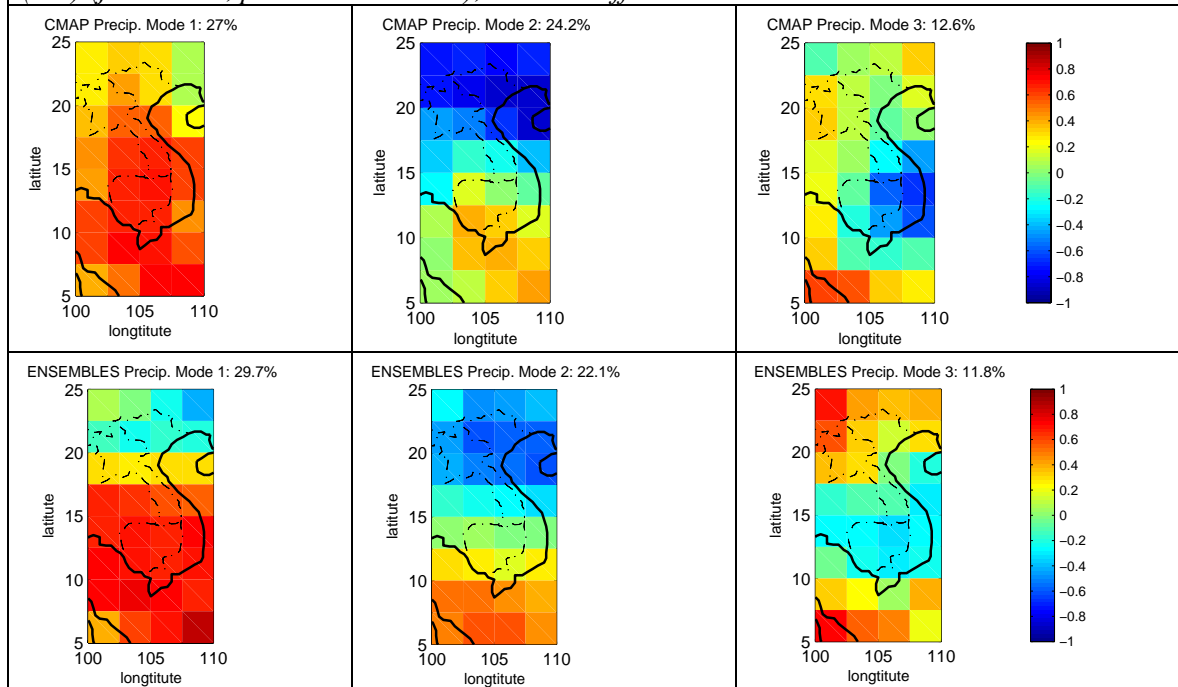


Figure 5.4b : Identique à la figure 5.4 mais pour chaque modèle.

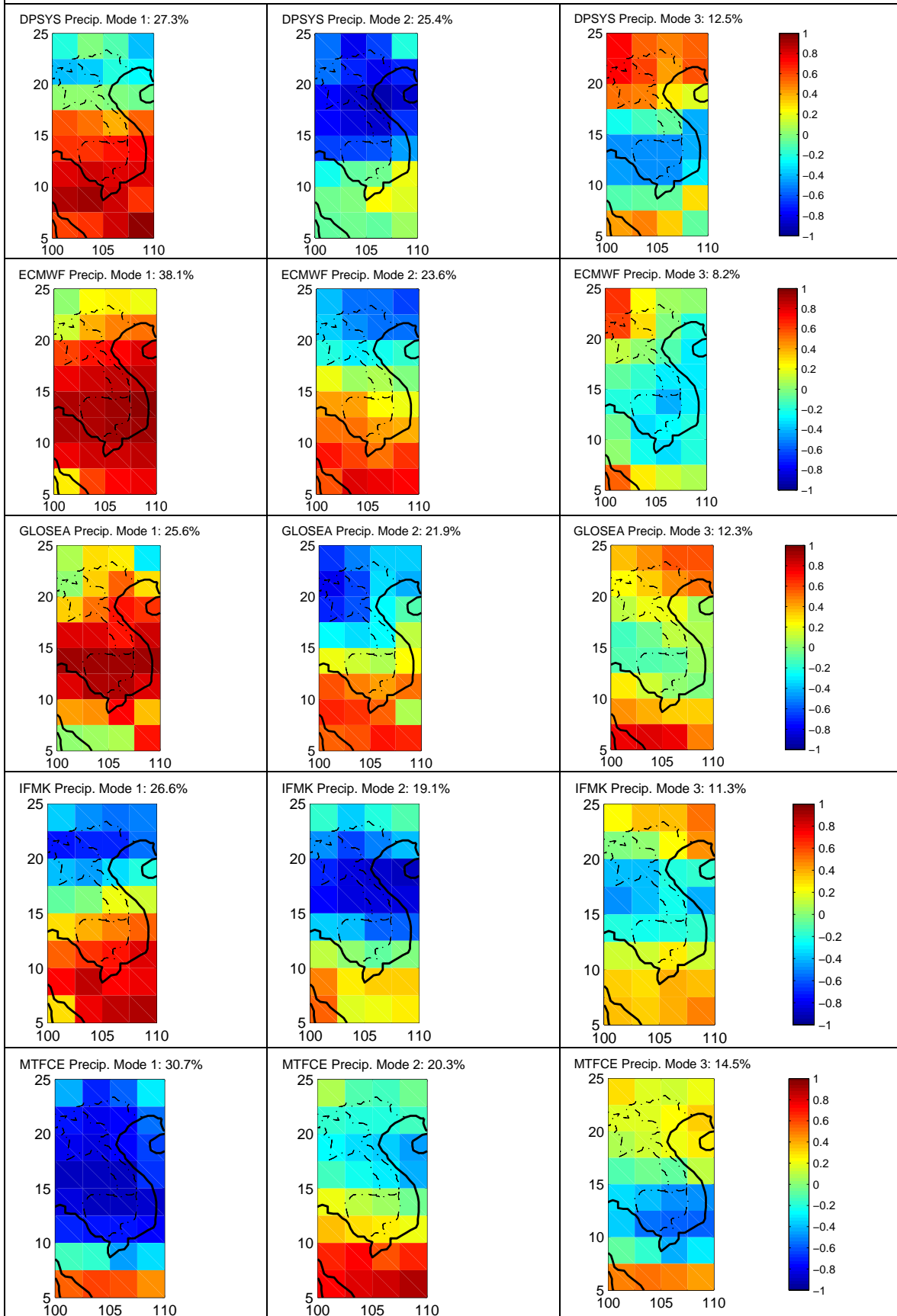


Figure 5.5 : Variabilité interannuelle des composantes principales des pluies dans les modèles, CMAP et NCEP, période 1991-2001, anomalies standardisées.

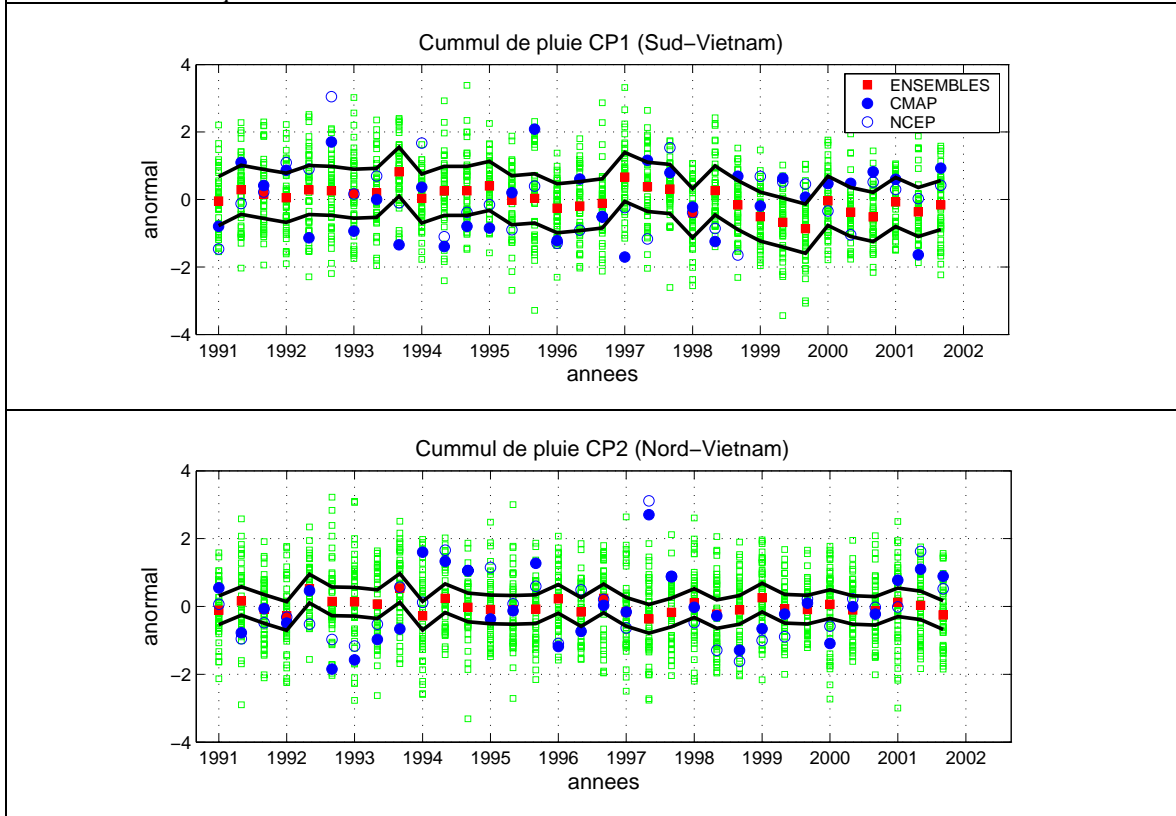
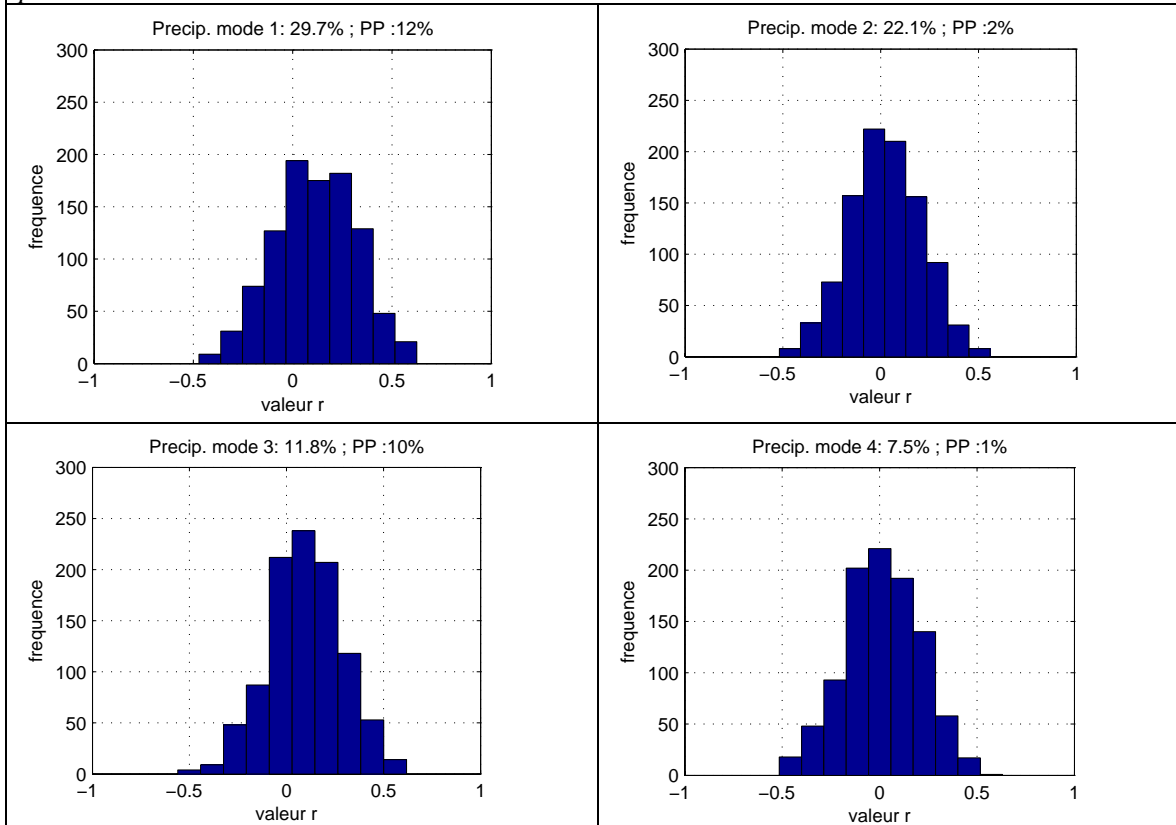


Figure 5.6 : Distribution des corrélations entre les runs et prévisibilité potentielle des modes de pluies.



5.1.2 La dynamique atmosphérique

Quatre paramètres ont été considérés : les composantes zonales et méridiennes du vent à 10 m et au niveau 850 hPa, l'humidité spécifique à 850 hPa et la composante zonale du vent à 200 hPa. Les trois premiers paramètres permettent de déterminer l'intensité et l'épaisseur de la mousson. Le dernier décrit l'intensité du Jet Tropical d'Est. Ces paramètres sont considérés sur la région du Sud-Est asiatique (90-130°E, 0-30°N) qui comprend la partie est du golfe du Bengale, le territoire de l'Indochine, la mer Bien Dong et la mer des Philippines.

5.1.2.1 Les champs moyens

La figure 5.7 présente les champs moyens climatologiques du vent simulé (modèles) et réanalysé en assimilant les observations (NCEP) à 10 m en juin-août, période 1991-2001. On observe une très forte concordance entre simulations et observations, en particulier pour le flux de mousson de sud-ouest avec une vitesse de 5-8 m/s sur la mer et de 2-3 m/s sur le continent. Le champ de vents au niveau 850 hPa est présenté en figure 5.8 : sur le golfe du Bengale, on observe des vents de sud-ouest de 10-12 m/s dans NCEP et ENSEMBLES, sur l'Indochine, un vent d'ouest de 6-9 m/s dans ENSEMBLES (soit 1-2 m/s de plus par rapport à l'observation), et sur la mer Bien Dong, un vent d'ouest-sud-ouest de 5-7 m/s (soit 1 m/s de plus par rapport à l'observation). La figure 5.9 présente le champ moyen d'humidité spécifique. L'humidité spécifique dans le multimodèle est environ de 13-15 g/kg sur l'Indochine, et de 12.5-14 g/kg (plus 1 g/kg par rapport à l'observation) sur la mer Bien Dong est. Le Jet Tropical d'Est (figure 5.10) augmente du nord (8 m/s) au sud (12 m/s) sur le continent et la mer Bien Dong. Sur le golfe du Bengale, le vent est environ de 14-16 m/s (moins 2-4 m/s par rapport à l'observation). En général donc, les champs moyens de la dynamique atmosphérique issue des simulations sont en bonne concordance avec les données d'observation (NCEP/DOE2).

5.1.2.2 Variabilité interannuelle et prévisibilité potentielle pour chaque paramètre

La variabilité interannuelle des champs de la dynamique atmosphérique sur le sud-est de l'Asie est extraite en appliquant l'ACP sur les données d'observations (NCEP) et le multimodèle (ENSEMBLES) (figures 5.11-5.14). Une bonne concordance en termes de configurations spatiales entre simulation et observation est à noter pour les premiers modes du vent à 10 m (figure 5.11), du vent à 850 hPa (figure 5.12) et du vent à 200 hPa (figure 5.14). Par contre, pour les modes d'humidité spécifique (figure 5.13), les simulations ne sont pas concordantes avec les observations. Il semble, en particulier, que les deux premiers modes

soient inversés dans les simulations. Ceci est confirmé quand on regarde les corrélations entre l'évolution temporelle des modes simulés et observés au tableau 5.2. La corrélation entre le mode 1 de Q850 de NCEP et le mode 2 de Q850 d'ENSEMBLES est de 0.67***. Le bon accord concernant les configurations spatiales des modes 1 UV10m, UV850 et U200 se retrouve quand on regarde l'évolution interannuelle avec des corrélations significatives au seuil de 99 % (tableau 2, diagonale, UV10m = 0.76*** et UV850 = 0.77***, U200 = 0.42***). On constate, cependant, que la dynamique de basses couches semble mieux reproduite par les modèles que celle des hautes couches sur la fenêtre considérée.

Afin de déterminer la relation entre les champs de la dynamique atmosphérique des modèles et le champ de pluie observée, la méthode ACP est appliquée sur les champs de pluie CMAP sur la même fenêtre que celle des champs dynamiques (figure 5.15). Les résultats montrent que le mode 1 de CMAP représente la pluie en région équatoriale, le mode 2 sur la région sud du Bien Dong, alors que le mode 3 décrit la pluie sur le nord Vietnam et le sud de la Chine. Le tableau 5.3 présente les coefficients de corrélation entre les modes de pluies CMAP et ceux de la dynamique atmosphérique dans la région sud-est de l'Asie. Les résultats obtenus montrent que :

- la variabilité des pluies en région équatoriale est associée principalement aux modes 1 de UV10 et UV850 ; aux modes 2 de Q850 et U200 d'après les données NCEP ; aux modes 1 de UV10 et UV850 ; au mode 3 de Q850 ; au mode 4 de U200 d'après les données ENSEMBLES. Donc, un cumul élevé de pluies est associé à : (1) un affaiblissement du vent de surface et de basses couches en région sub-équatoriale (5-10°N, 90-130°E), (2) une augmentation de l'humidité spécifique à 850 hPa en région équatoriale (0-5°N, 100-120°E), (3) un renforcement du vent à 200 hPa en région équatoriale (0-5°N, 120-130°E).

- la variabilité des pluies dans la région sud du Bien Dong est associée aux modes 3 et 1 de UV10 et UV850, mode 1 de Q850, aux modes 4 et 1 de U200 (d'après les données NCEP), ainsi qu'au mode 1 de tous les champs dynamiques (d'après les données ENSEMBLES). Ceci montre qu'un cumul de pluies anormalement fort dans cette région est corrélé avec : (1) un renforcement du vent de surface et de basses couches en région sub-équatoriale (5-10°N, 100-130°E), (2) une diminution (augmentation) de l'humidité spécifique à 850 hPa en région équatoriale (dans la région Bien Dong et le nord des Philippines), (3) un affaiblissement du vent au niveau 200 hPa en région sub-équatoriale (0-10°N, 90-130°E).

- la variabilité des pluies dans le nord Vietnam et le sud de la Chine est associée principalement aux modes 3 de UV10, Q850, U200, et au mode 4 de UV850 (d'après les

données NCEP), ainsi qu'aux modes 3 de UV10, UV850, Q850 et mode 2 de U200 (d'après les données ENSEMBLES). Ces corrélations sont confirmées quand les modes 3 de UV10 et Q850 et le mode 2 de U200 d'ENSEMBLES seront utilisés pour prévoir les cumuls saisonniers de pluies au nord Vietnam dans la section prochaine.

Enfin, la distribution des corrélations entre simulations et la prévisibilité potentielle des modes de dynamique atmosphérique sont présentées en figure 5.16. Le vent UV10m possède la prévisibilité potentielle la plus importante, 31 %, puis UV850 de 28 %, Q850 de 23 % et enfin U200 de 15 % en mode 1. Pour ces derniers, les distributions sont plus aplaties. En comparaison des résultats obtenus avec les modes de pluies, on constate donc que les modes issus de la dynamique atmosphérique offrent une plus forte prévisibilité et reproductibilité dans les modèles couplés.

Figure 5.7 : Champs saisonniers moyens climatologiques du vent à 10 m de NCEP et des modèles, pour les mois de juin à août, en m/s, période 1991-2001.

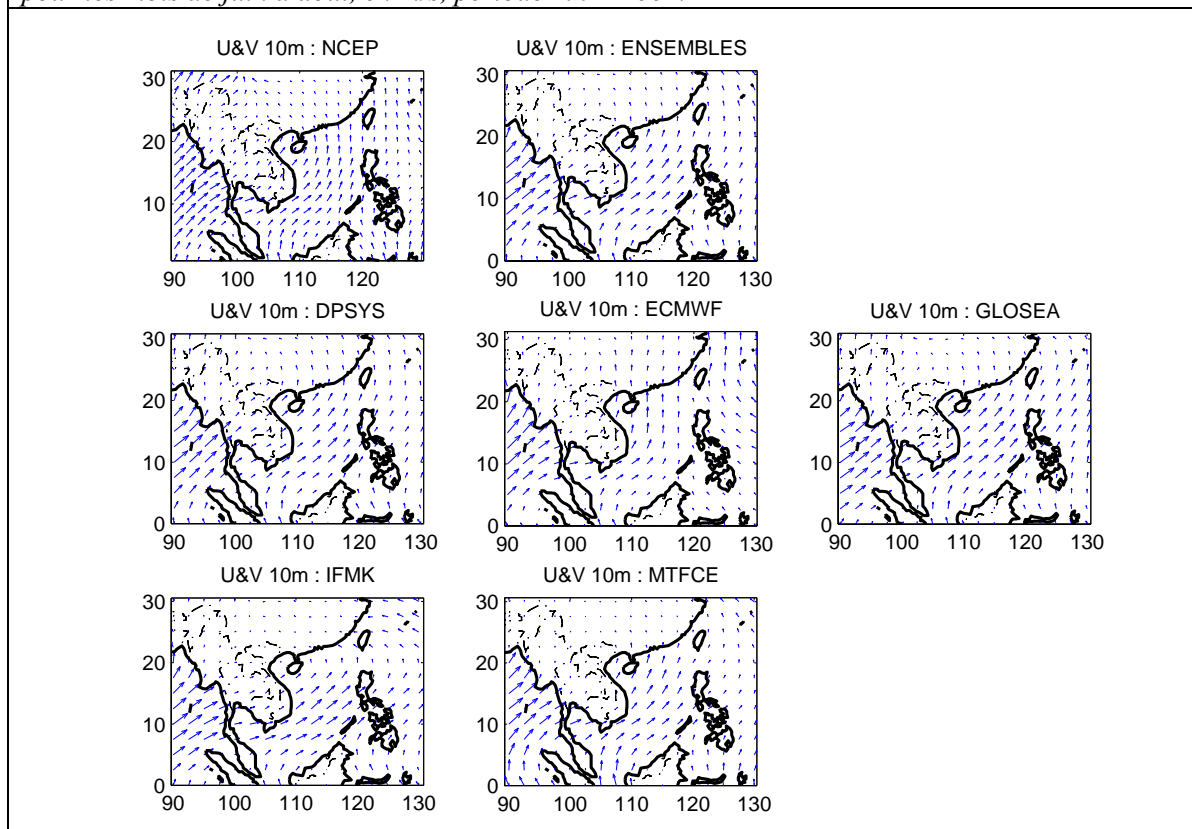


Figure 5.8 : Identique à la figure 5.7 mais pour le vent à 850 hPa, en m/s.

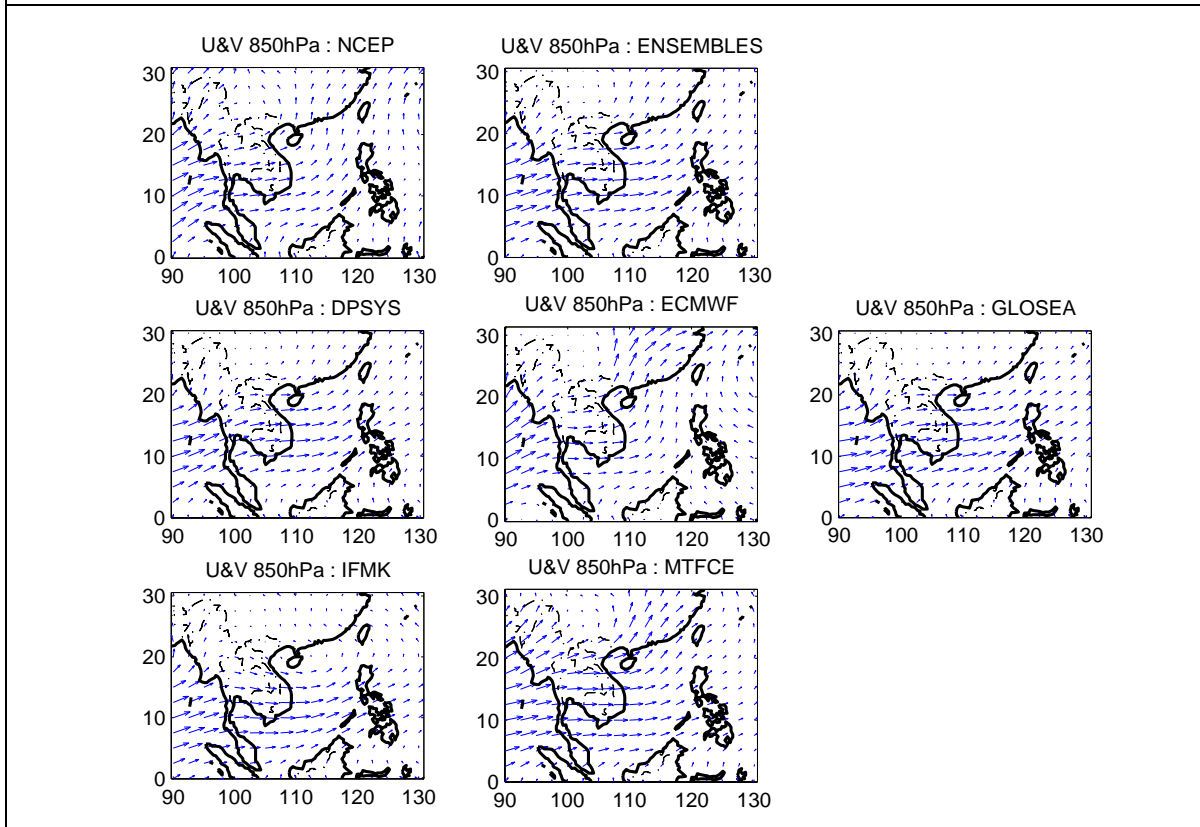


Figure 5.9 : Identique à la figure 5.7 mais pour l'humidité spécifique au niveau 850 hPa, en g/kg.

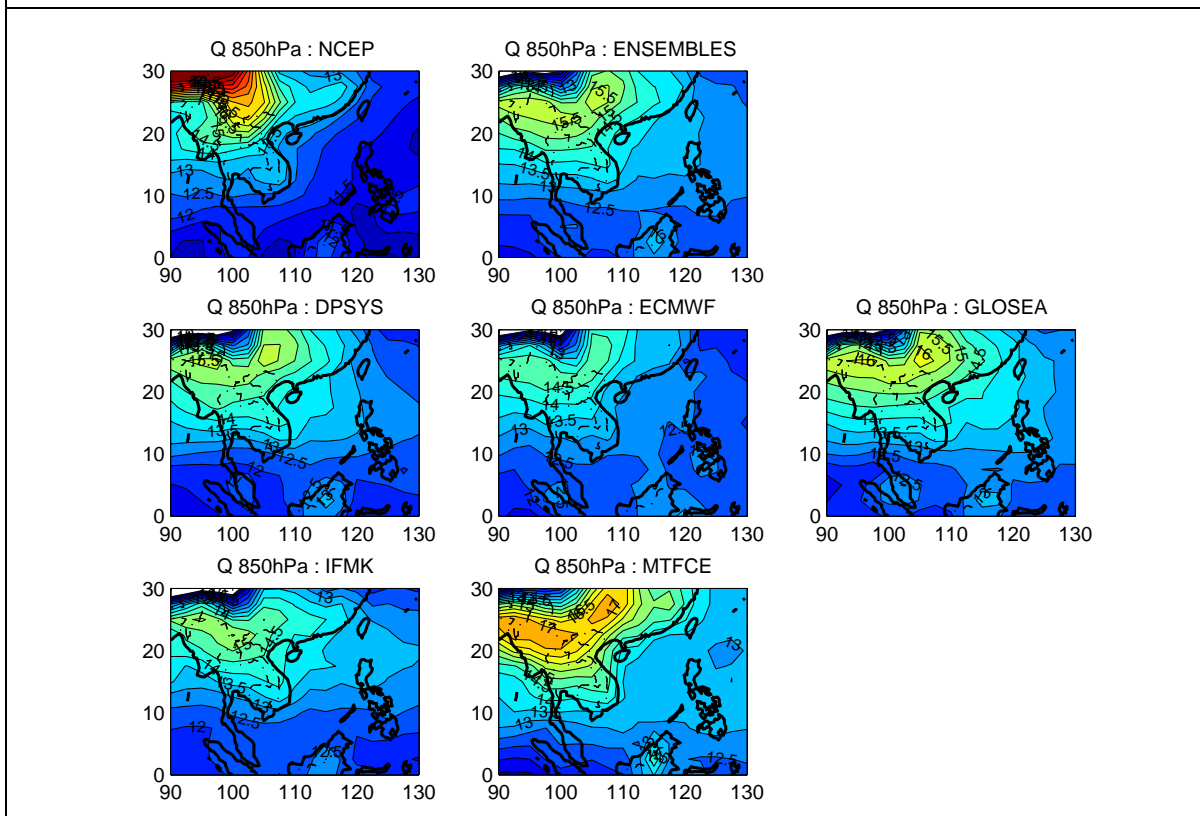


Figure 5.10 : Identique à la figure 5.7 mais pour le vent U au niveau 200 hPa, en m/s.

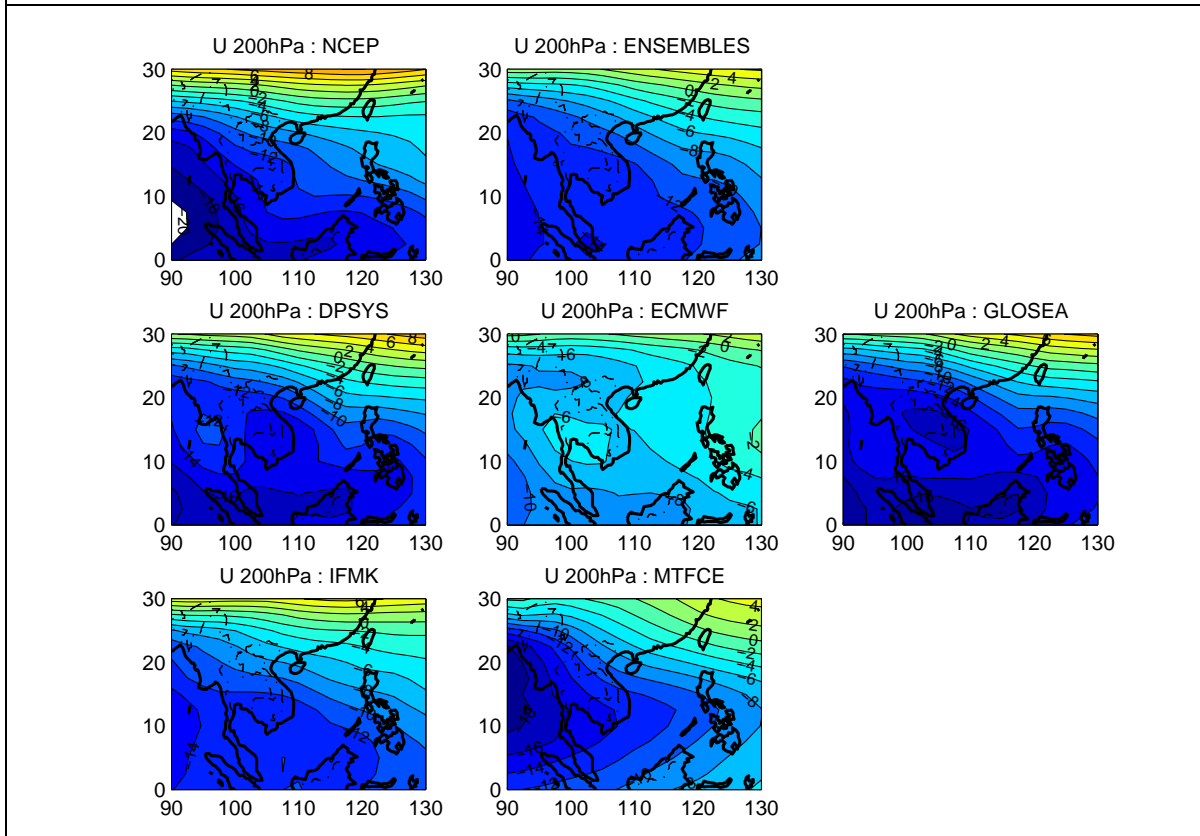


Figure 5.11 : Configurations spatiales des quatre premiers modes ACP sur le vent à 10 m de NCEP et ENSEMBLES.

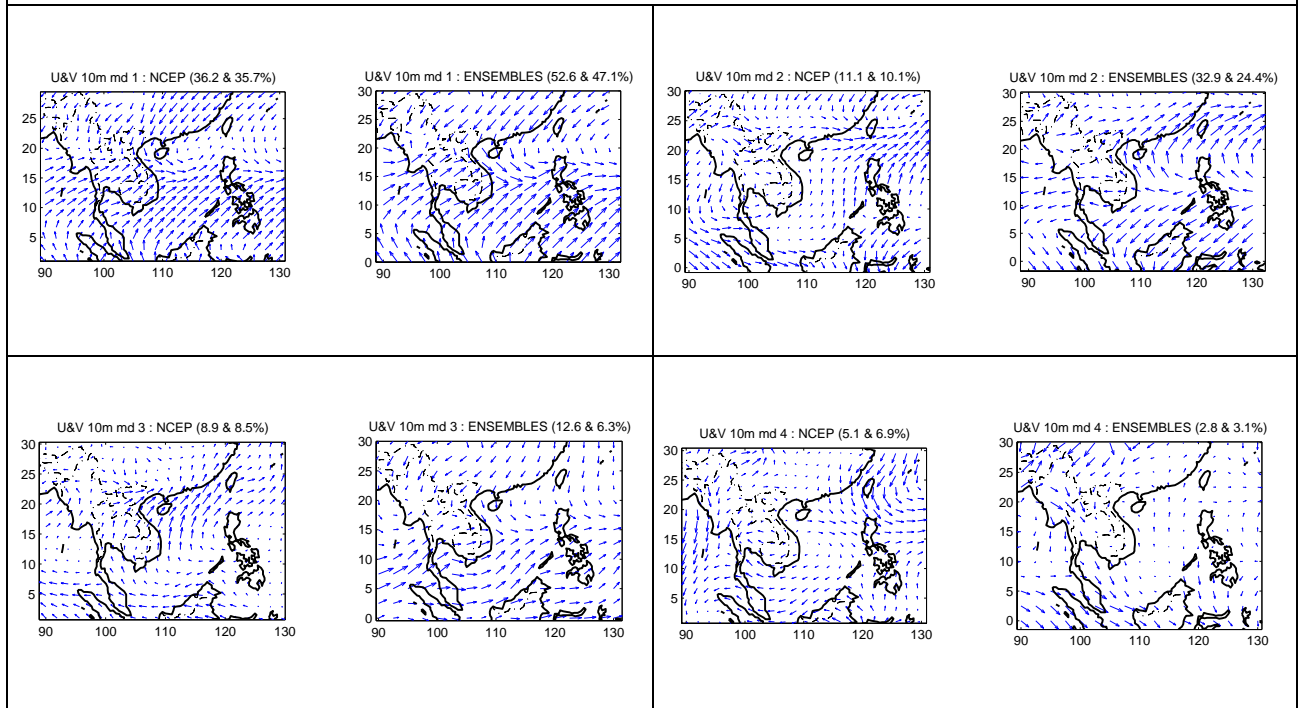


Figure 5.12 : Identique à la figure 5.11 mais pour le vent au niveau 850 hPa.

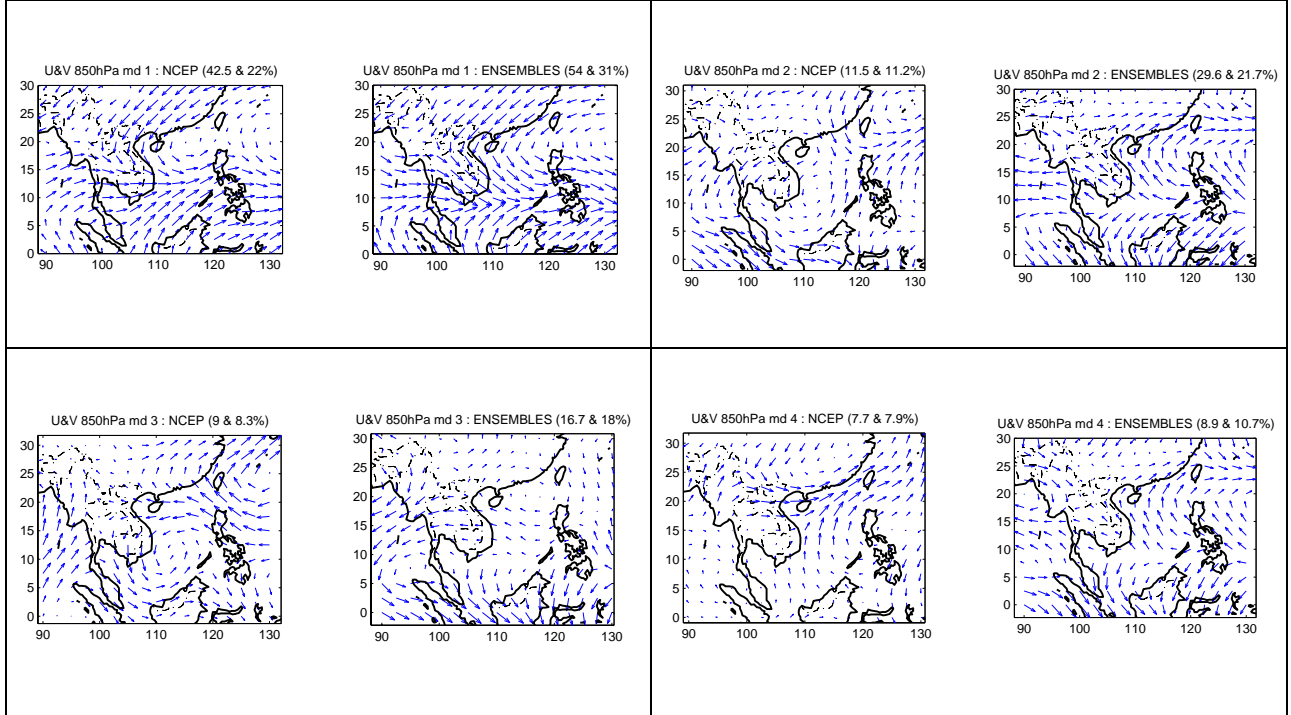


Figure 5.13 : Identique à la figure 5.11 mais pour l'humidité spécifique au niveau 850 hPa, unité : coefficient de corrélation.

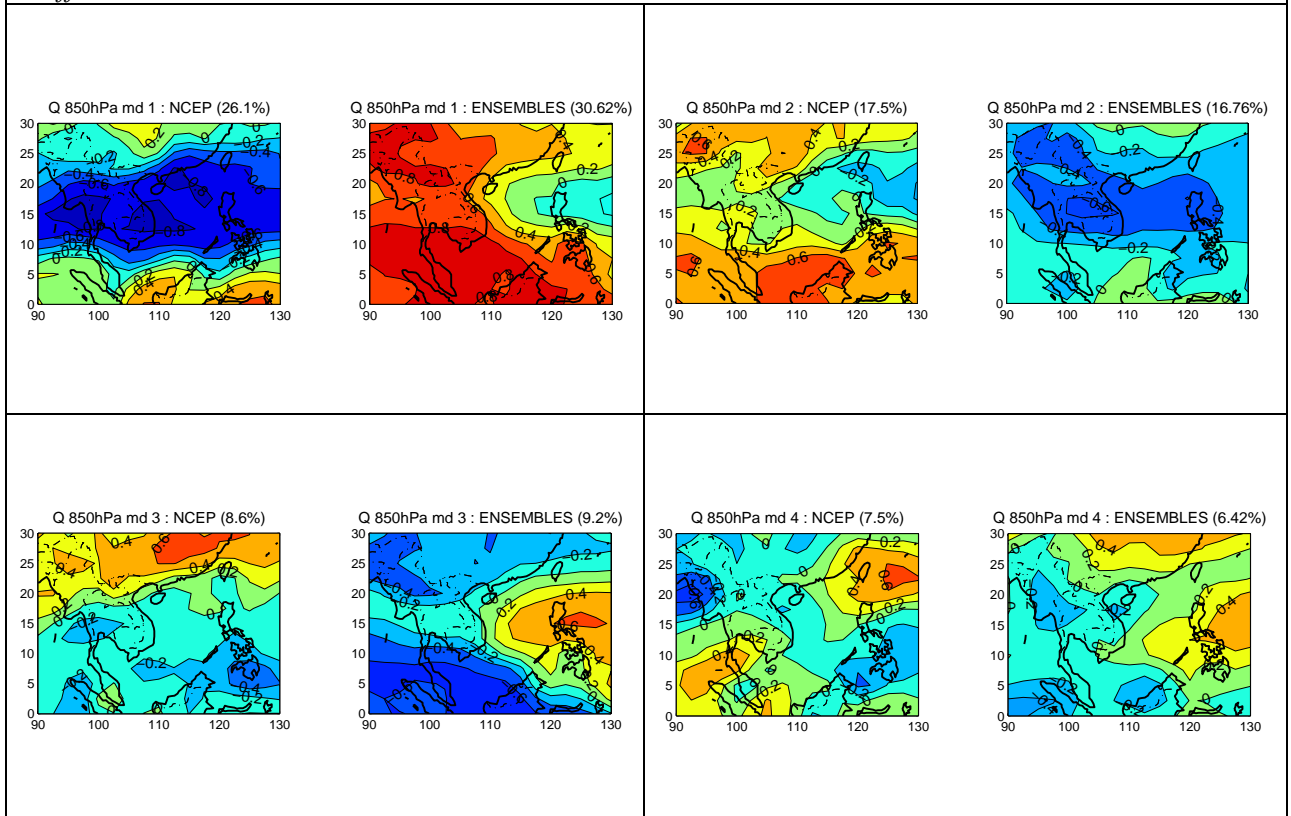


Figure 5.14 : Identique à la figure 5.11 mais pour le vent U au niveau 200 hPa, unité : coefficient de corrélation.

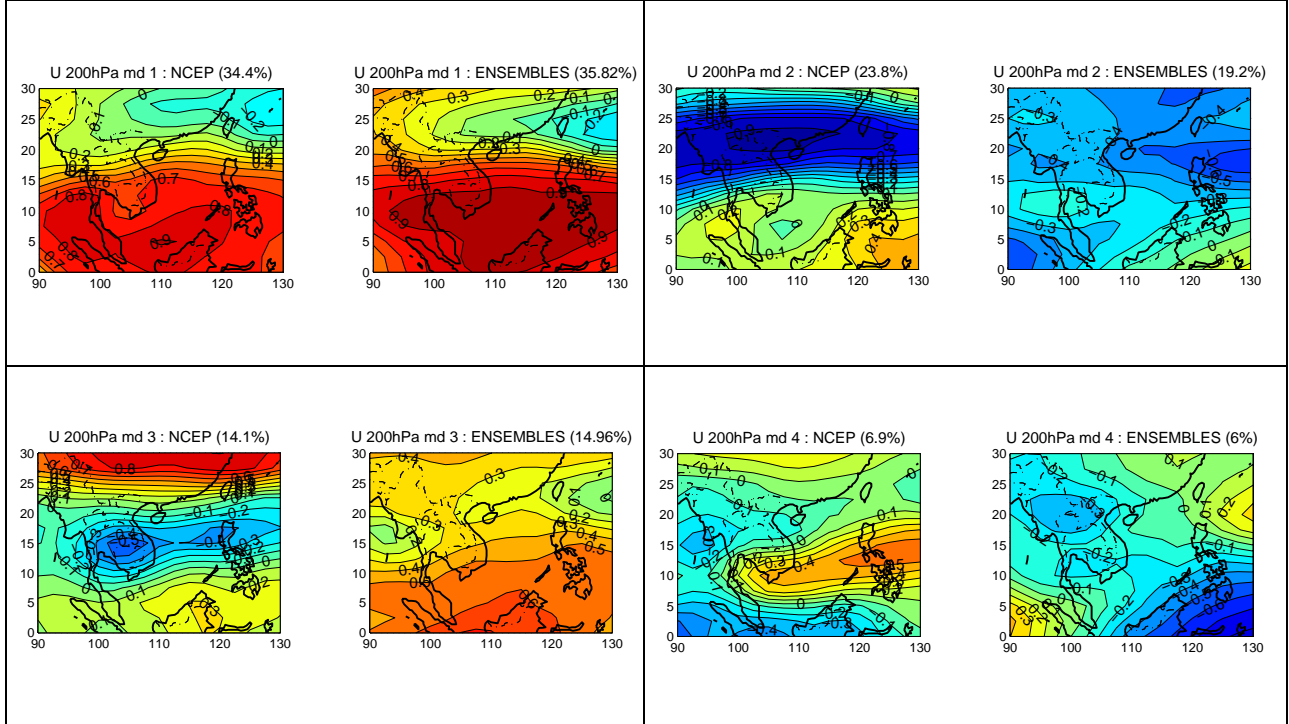


Tableau 5.2 : Corrélations entre les composantes principales de la dynamique atmosphérique d'ENSEMBLES et celles de NCEP. Les signes *, **, *** indiquent une significativité à $p=0.1$, 0.05 et 0.01 respectivement en tenant compte de l'autocorrélation dans les séries.

		NCEP Mode 1				NCEP Mode 2			
		UV10m	UV850	Q850	U200	UV10m	UV850	Q850	U200
ENSEMBLES Mode 1	UV10m	0.76***	0.77***	-0.58***	-0.40*	-0.33	-0.41**	-0.50***	-0.52**
	UV850	0.75***	0.77***	-0.56***	-0.41**	-0.27	-0.36*	-0.54***	-0.50**
	Q850	-0.56***	-0.61***	0.28	0.39*	0.03	0.13	0.67***	0.23
	U200	-0.50**	-0.57***	0.33	0.42**	-0.12	-0.05	0.42**	0.39*
ENSEMBLES Mode 2	UV10m	-0.27	-0.30*	0.09	0.04	0.43**	0.46***	0.49***	0.16
	UV850	-0.33*	-0.32	0.24	-0.01	0.54***	0.55***	0.29	0.32
	Q850	-0.13	-0.09	0.24	-0.04	0.24	0.31	-0.09	0.28
	U200	0.16	0.16	-0.26	-0.37*	0.44**	0.38*	0.07	0.23

Figure 5.15 : Configurations spatiales des modes 1 (gauche), 2 (milieu), et 3 (droite) de variabilité de la pluie CMAP, considérée pendant les mois de juin à août dans la période 1991-2001.

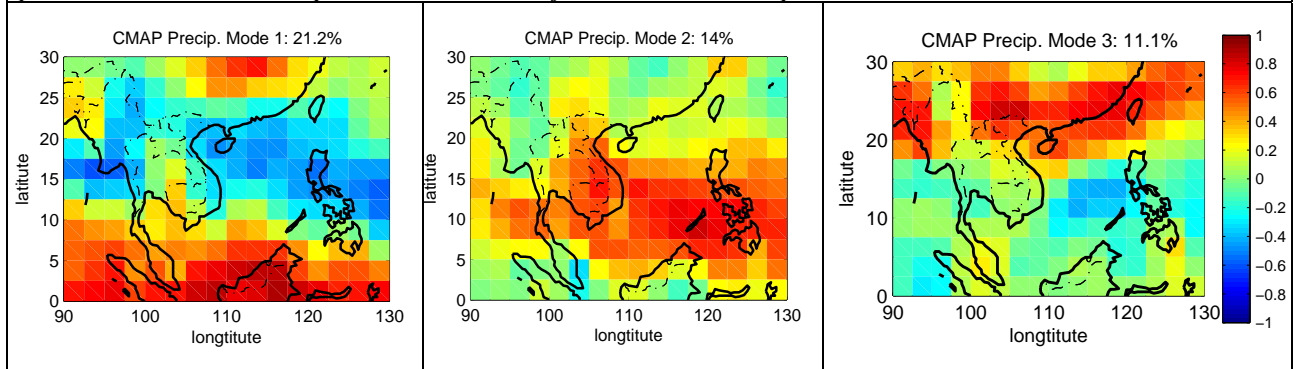
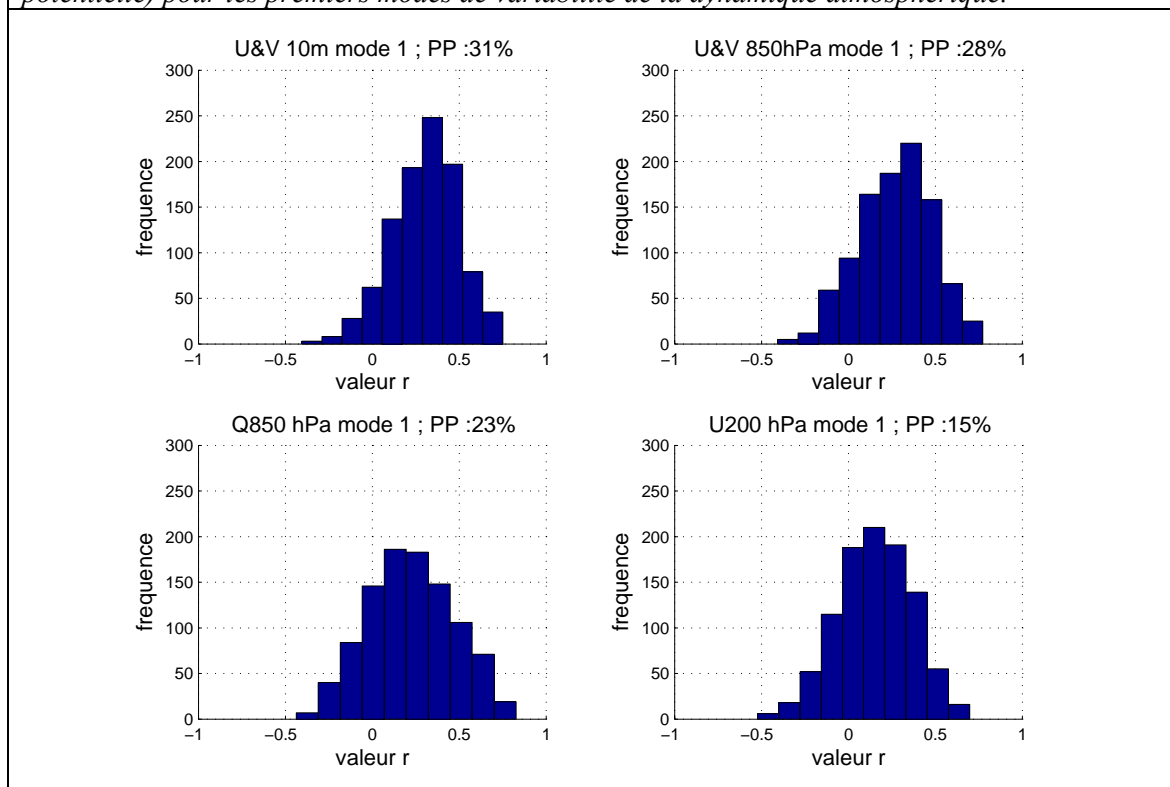


Tableau 5.3 : Coefficients de corrélation (x100) entre d'une part les composantes principales de pluies CMAP et d'autre part les composantes principales de la dynamique atmosphérique d'ENSEMBLES et de NCEP. Les signes *, **, *** indiquent la significativité à $p=0.1$, 0.05 et 0.01 respectivement en tenant compte de l'autocorrélation dans les séries. Seules les valeurs significatives à $P \leq 0.1$ sont reportées.

		CMAP Mode 1				CMAP Mode 2				CMAP Mode 3			
		UV10m	UV850	Q850	U200	UV10m	UV850	Q850	U200	UV10m	UV850	Q850	U200
NCEP	M. 1	-65***	-69***	54***	42**	41**	45**	-40**	-34*				
	M. 2		39**	60***	47***								
	M. 3		34*			-43**	50***	-32*		36*		32	41**
	M. 4				33*	-40**	-31*	-13	47***	-31	47**		
ENSEMBLES	M. 1	-69***	-68***	47***		32*	32*	-34*	-45**				
	M. 2	47***	46***										32
	M. 3		37**	-50***					-42**	40*	23	-20	
	M. 4				-55***								
DPSYS	M. 1	-54***	-53***	49***				-31*	-30*				-32*
	M. 2	43**	52***							41**	32*		
	M. 3			-43**	47***	32*	34*		-38**				
	M. 4	32*			-								
ECMWF	M. 1	-60***	-58***		40**	32*			-44**			37*	
	M. 2			43**				-41**					
	M. 3												
	M. 4										44**	40**	-35**
GLOSEA	M. 1	-58***	-60***	48***									-46**
	M. 2	49***	46***										
	M. 3			-35**									
	M. 4		45***		-44**								
IFMK	M. 1	-52***	-50***			32*	35**		-41**				
	M. 2	34*	41**					34*	-32*				
	M. 3	43**	31*	-36**									
	M. 4			-23	-49***		-31*		52***				
MTFCE	M. 1	-51***	-35**	38**	37**	42**	35**		-32*				
	M. 2			-48***									
	M. 3	-63***	73***	-46***					-39**				
	M. 4			36**						-34*			

Figure 5.16 : Distribution des corrélations entre les simulations des modèles (PP= prévisibilité potentielle) pour les premiers modes de variabilité de la dynamique atmosphérique.



5.1.3 Prévision statistique des cumuls saisonniers de pluies à partir de la dynamique atmosphérique des modèles couplés

5.1.3.1 Prévision statistique pour le nord Vietnam

Les coefficients de corrélation entre d'une part les cumuls de pluies d'été au nord Vietnam à l'échelle stationnelle et d'autre part un indice régionalisé (indice nord Vietnam) et les modes de la dynamique atmosphérique ENSEMBLES sont montrés dans le tableau 5.4. Bien que les corrélations entre l'indice de pluie du nord Vietnam et les modes d'ENSEMBLE soient faibles et non significatives, les corrélations à l'échelle de chaque station sont significatives (sauf pour la station de Moc Chau).

Tableau 5.4 : Corrélations entre la pluie aux stations du nord Vietnam et les composantes principales des dynamiques d'ENSEMBLES. Les signes *, **, *** si significatif à $p=0.1$, 0.05 et 0.01 respectivement en tenant compte de l'autocorrélation dans les séries.

	ENSEMBLES mode 1				ENSEMBLES mode 2				ENSEMBLES mode 3				ENSEMBLES mode 4			
	UV10	UV850	Q850	U200	UV10	UV850	Q850	U200	UV10	UV850	Q850	U200	UV10	UV850	Q850	U200
Lai Chau	-16	-18	25	1	43**	27	-6	12	1	-14	-49***	-20	-6	17	-34**	-28
Moc Chau	17	15	-15	-25	-10	-8	-23	-23	16	-20	-8	-14	27	11	-21	21
Ha Giang	-27*	-28*	4	8	20	28*	2	-3	-38**	1	-30*	21	1	-4	6	2
Yen Bai	25	25	1	-14	-26	-31*	-28	-30	29	-13	-2	-2	21	5	-6	19
Lang Son	17	16	7	-1	-19	-29*	-23	-17	17	-12	12	-24	-14	-22	7	26
Bai Chay	14	14	0	-13	-11	-16	-4	-12	37**	-5	-3	-12	7	7	-3	1
Ha Noi	32*	31	7	-32*	17	-5	-33*	23	21	-9	-2	-37**	-11	-6	2	18
Nam Dinh	29	28	-6	-45***	4	2	-24	-9	10	-2	5	-29	30*	13	-15	4
Thanh Hoa	31*	30*	-6	-20	-15	-28	-23	-6	28	-12	-5	-23	9	1	-25	12
Indice Nord	22	20	3	-25	1	-11	-28	-11	22	-15	-14	-25	11	4	-15	13

En se basant sur la corrélation entre les modes atmosphériques du multimodèle (les prédicteurs) et l'indice de pluie du nord Vietnam (le prédicteur), une prévision statistique est déterminée utilisant la méthode de régression linéaire multiple pas à pas.

Quatre prédicteurs parmi seize prédicteurs potentiels sont sélectionnés pour l'équation de prévision : (1) le mode 3 de vent en surface (UV10m-3), (2) le mode 3 de l'énergie statique humide à 850 hPa (Q850hPa-3), (3) le mode 2 du vent zonal à 200 hPa (200hPa-2), et (4) le mode 3 du vent zonal à 200 hPa (U200hPa-3). Cette sélection est en accord avec les corrélations entre les champs dynamiques des modèles et le champ de pluie CMAP (voir la partie 5.1.2). Les coefficients de régression de l'équation de prévision sont présentés au tableau 5.5. La RMSE égale 0.62, la part de variance expliquée est de 28 %, la probabilité significative : $P = 0.049$, le coefficient de corrélation en validation croisée : $R_{cv} = 0.53$.

Tableau 5.5 : Coefficients de régression, coefficients de corrélation, LEPS et VIF des quatre prédicteurs sélectionnés pour la prévision des cumuls de pluie au nord Vietnam sur la période 1991-2001. $RMSE = 0.62$, $R\text{-square} = 28\%$, $P = 0.049$, $R_{cv} = 0.53$, $mvif = 1.324$.

		Coefficients	R	LEPS	VIF
<i>Prédicteurs</i>	UV10m-3	+1.042	0.41**	0.179	1.17
	Q850hPa-3	-0.743	-0.26	-0.067	1.42
	U200hPa-2	-1.227	-0.22	-0.098	1.37
	U200hPa-3	-1.379	-0.46***	-0.174	1.34

Les relations entre prédicteurs et prédicteur montrent que des cumuls de pluies anormalement élevés au nord Vietnam sont associés à :

- (1) un renforcement du vent en surface (UV10m-3) dans la région sud-est du golfe du Bengale et du sud du Vietnam (5-15°N, 90-120°E) et un affaiblissement du vent dans la région sud de la Chine,
- (2) une augmentation d'humidité spécifique à 850 hPa (Q850hPa-3) dans la région sub-équatoriale (0-10°N, 90-110°E), nord du Myanmar et nord du Vietnam,
- (3) un renforcement du vent à 200 hPa (U200hPa-2) dans la région nord du Bien Dong et des Philippines (15-25°N, 110-130°E) et un affaiblissement du vent à 200 hPa (U200hPa-3) dans la région sub-équatoriale (0-10°N, 90-130°E).

Ceci est en accord avec les conditions de réalité locale. En effet, le cumul de pluies au nord Vietnam est associé principalement aux orages, à la ZCIT et aux typhons (Nguyen N.T., 1992 ; Le B.H., Duong T.L., 1992 ; Nguyen D.H., 2000). En général, ces phénomènes sont alimentés par une forte convergence de basses couches associée à une divergence de couches supérieures. Les orages se forment en général pendant l'après-midi dans le talweg de basses pressions Inde-Myanmar où l'air en surface est très chaud et sec (Nguyen V.L., 2000). L'advection d'humidité de basses couches (Q850 hPa) est donc nécessaire à l'alimentation énergétique du système.

5.1.3.2 Prévision statistique pour le sud Vietnam

Le tableau 5.6 présente les coefficients de corrélation entre les cumuls de pluies en été au sud Vietnam et les modes atmosphériques d'ENSEMBLES. Toutes les stations (sauf la station Tan Son Nhat) et l'indice pluie du sud Vietnam sont corrélés significativement avec un ou plusieurs modes atmosphériques, particulièrement la station Bao Loc est bien corrélée avec tous les premiers modes pour tous les paramètres.

Tableau 5.6 : Coefficients de corrélation ($\times 100$) entre la pluie des stations du sud Vietnam sur la période 1991-2001 et les composantes principales de la dynamique atmosphérique d'ENSEMBLES. Les signes *, **, *** indiquent la significativité à $p=0.1$, 0.05 et 0.01 respectivement, dans l'hypothèse de séries ayant 31 degrés de liberté.

	ENSEMBLE mode 1				ENSEMBLES mode 2				ENSEMBLES mode 3				ENSEMBLES mode 4			
	UV10	UV850	Q850	U200	UV10	UV850	Q850	U200	UV10	UV850	Q850	U200	UV10	UV850	Q850	U200
Bao Loc	38**	39**	-37*	-40**	-28	-17	10	8	32*	6	39**	-33*	5	-12	21	32*
Tay Ninh	25	24	-37*	-26	-40**	-23	23	-37*	-6	1	43**	-7	-9	-26	25	37**
T. S. Nhat	6	3	15	-6	-2	-3	5	-23	-15	-13	-7	15	10	1	-18	6
Can Tho	11	8	3	17	-13	-19	-15	-18	-21	-19	14	-6	-24	-33*	-2	9
Rach Gia	7	5	-7	-5	-6	-3	1	-7	-30*	-7	-1	-15	-13	-20	7	4
Ca Mau	28	26	-36*	-2	-14	-19	10	-21	-7	-31	34*	-20	-14	-22	-30	11
Indice Sud	30*	27	-26	-16	-27	-22	9	-26	-12	-17	32*	-17	-14	-30*	1	23

La méthode de régression linéaire multiple pas à pas est utilisée pour choisir quatre prédicteurs : (1) le mode 4 du vent à 850 hPa (UV850hPa-4), (2) le mode 1 du vent zonal à 200 hPa (200hPa-1), (3) le mode 2 du vent zonal à 200 hPa (200hPa-2) et (4) le mode 4 du vent zonal à 200 hPa (U200hPa-4). Les coefficients de régression de l'équation de régression sont présentés au tableau 5.7. Le score de RMSE est égal à 0.63, la part de variance expliquée de 24 %, le coefficient de corrélation en validation croisée : $R_{cv} = 0.49$.

Tableau 5.7 : Identique au tableau 5.5 mais pour l'indice sud Vietnam.

		Coefficients	R	LEPS	VIF
Prédicteurs	UV850hPa-4	-1.506	-0.62***	-0.29	2.23
	U200hPa-1	-0.634	-0.32*	-0.073	1.65
	U200hPa-2	-0.948	-0.52***	-0.26	1.19
	U200hPa-4	0.611	0.47***	0.31	2.63

Les coefficients de régression de l'équation montrent que les cumuls anormalement élevés au sud Vietnam sont associés à :

- (1) un renforcement du vent de basse couche (UV850-4) dans la région sud-est du golfe du Bengale et du sud du Vietnam(10-15°N, 90-120°E),
- (2) un affaiblissement du vent à 200 hPa (U200hPa-1) dans la région sub-équatoriale (5-15°N, 90-130°E), un renforcement du vent à 200 hPa (U200hPa-2) dans la région nord du Bien Dong et des Philippines (15-25°N, 110-130°E).

Ce résultat est en accord avec les conditions locales du sud Vietnam où le régime de mousson est typique (Pham N.T., Phan T.D., 1993). La pluie au sud Vietnam est associée principalement au flux de vent de sud-ouest de basses couches et à la perturbation du vent de couches supérieures (Tran T.T., 1997).

5.2 Prévisibilité des cumuls saisonniers de pluie sur la période 1979-2004 à partir des données de réanalyses NCEP/DOE2

Dans cette section, les cumuls saisonniers de pluies sont prévus en se basant sur leur corrélation avec les champs thermodynamiques de l'atmosphère. Les données réanalysées de NCEP/DOE2 ont été utilisées pour sélectionner les prédicteurs. Les champs retenus sont la température de surface de la mer (TSM), la température atmosphérique à 1 000 hPa (T1000), la température atmosphérique à 200 hPa (T200), l'énergie statique humide en surface (ESH), la pression au niveau de la mer (PNM), le vent à 1 000 hPa (Vent1000) et le vent à 200 hPa (Vent200). Tous les paramètres sont physiquement associés au système de mousson d'Asie du Sud. Ils représentent l'énergie et la dynamique de la mousson.

La méthode d'analyse composite a été utilisée pour déterminer les meilleurs prédicteurs potentiels. Les années retenues pour la construction des composites ou échantillons secs et humides sont celles pour lesquelles le prédicteur présente des anomalies centrées réduites supérieures à 0.5 écart-type en valeur absolue. Elles sont données dans le tableau 5.8 pour chacun des deux prédicteurs du Vietnam. Leur significativité a été testée avec le test en t de Student (H_0 : il n'y a pas de différence significative entre les deux échantillons) qui tient compte du nombre différent d'années dans les deux composites (Philippon N. 2002).

Tableau 5.8 : Années utilisées pour établir les composites sèches et pluvieuses pour chacun des deux prédicteurs du Vietnam et pour lesquelles ils présentent une anomalie pluviométrique supérieure à 0.5 écart-type en valeur absolue.

	<i>Composite sèche (<-0.5)</i>	<i>Composite humide (>0.5)</i>
nord Vietnam	1983, 85, 87, 88, 90, 93, 98, 99, 00, 03	1979, 80, 94, 95, 96, 97, 01
sud Vietnam	1985, 86, 87, 88, 89, 96, 98	1979, 80, 82, 83, 91, 92, 93, 00, 01

5.2.1 Prévisibilité des cumuls de pluies au nord Vietnam

5.2.1.1 Définition des prédicteurs

La figure 5.17 présente les composites (pluvieux – sec) des champs thermodynamiques de l'atmosphère en mai associées au prédicteur du nord Vietnam en juin-août. Par rapport aux années les plus sèches, les années les plus humides se caractérisent par une haute température (valeur positive) sur la région Inde-Malaisie, un excédent d'énergie au nord du golfe du Bengale, une anomalie du gradient de pression méridien orientée au sud et un vent méridien fort sur le sud du golfe du Bengale en mai.

En nous basant sur ces signaux précurseurs, nous avons sélectionné dix prédicteurs potentiels :

- (1) SST dans le centre de l'océan Pacifique (160°E-180°E, 5°S-10°N),
- (2) T1000 sur la région Inde-Myanmar (80°E-90°E, 17.5°N-27.5°N),
- (3) T1000 sur l'est de la Chine (110°E-120°E, 27.5°N-37.5°N),
- (4) ESH sur le nord du golfe du Bengale (85°E-95°E, 7.5°N-17.5°N),
- (5) ESH sur l'est de la Chine (105°E-120°E, 35°N-40°N),
- (6) PNM sur la région de Sumatra (90°E-100°E, 10°S-0°),
- (7) PNM sur la région Chine-Japon (120°E-140°E, 35°N-40°N),
- (8) Vent1000 sur le sud du golfe du Bengale (85°E-95°E, 0°-10°N),
- (9) Vent1000 sur le sud du Vietnam (105°E-115°E, 5°N-15°N),
- (10) Vent200 sur la région est des Philippines (130°E-150°E, 5°N-15°N).

5.2.1.2 L'équation de prévision

Quatre prédicteurs (numéros 2, 4, 5 et 6) parmi les dix ont été sélectionnés (tableau 5.9) par la méthode de régression linéaire multiple pas à pas. Le nuage de points entre les valeurs d'observation et de prévision est présenté en figure 5.18. Elle montre que le coefficient de corrélation est important et significatif au niveau 99 % ($R_{cv} = 0.59^{***}$), bien que les cumuls de pluies prévues en quelques années particulières puissent être éloignés de la réalité : il en est ainsi pour les prévisions des années 1980, 1985 (1988) inférieures (supérieures) aux observations. L'équation de prévision montre qu'une année anormalement pluvieuse est précédée en mai par :

(1) des températures élevées sur la région Inde-Mianmar qui creusent plus profondément les basses pressions, cause des orages de l'après-midi en juin-juillet,

(2) un excédent d'énergie au nord du golfe du Bengale qui renforce le gradient d'ESH entre le golfe du Bengale et le nord Vietnam et l'est de la Chine,

(3) un gradient de pressions sud-ouest/nord-est accentué qui favorise le vent de sud-ouest transportant la vapeur d'eau du golfe du Bengale au nord Vietnam.

Tableau 5.9 : Les prédicteurs et les coefficients de régression associés au modèle de prévision des cumuls de pluie au nord Vietnam. Le RMSE = 0.67, le coefficient de corrélation $R_{cv} = 0.59$, le score de mvif = 1.2 .

Prédicteurs	T1000 80°-90°E, 17.5°-27.5°E	ESH 85°-90°E, 7.5°-17.5°N	ESH 105°-120°E, 35°-40°E	MSLP 90°-100°E, 10°S-0
Coefficients	+0.2836	+0.2328	-0.3398	+0.4432

Figure 5.17 : Cartes composite (pluvieux – sec) des champs standardisés de TSM, température à 1 000 hPa (T1000), température à 200 hPa (T200), d'ESH, de pression (PNM), vent à 1 000 hPa (Vent1000) et vent à 200 hPa (Vent200) en mai, associées au prédicteur nord Vietnam en juin-août. Les aplats gris indiquent les points de grille significatifs à 95 % au regard du test en *t* de Student. Les carrés délimitent les prédicteurs potentiels. La couleur rouge (bleu) indique les prédicteurs retenus (écartés) dans le modèle de prévision.

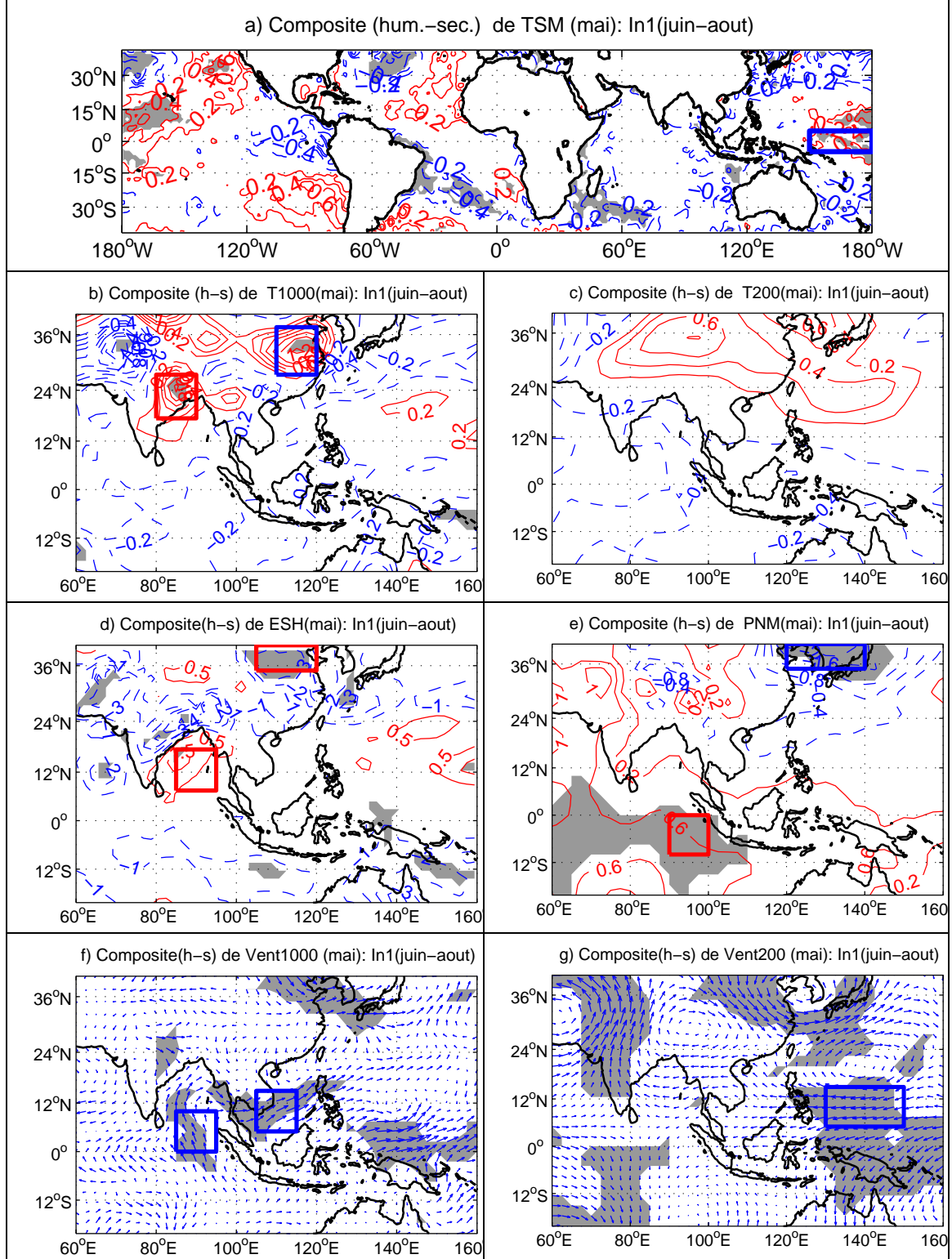
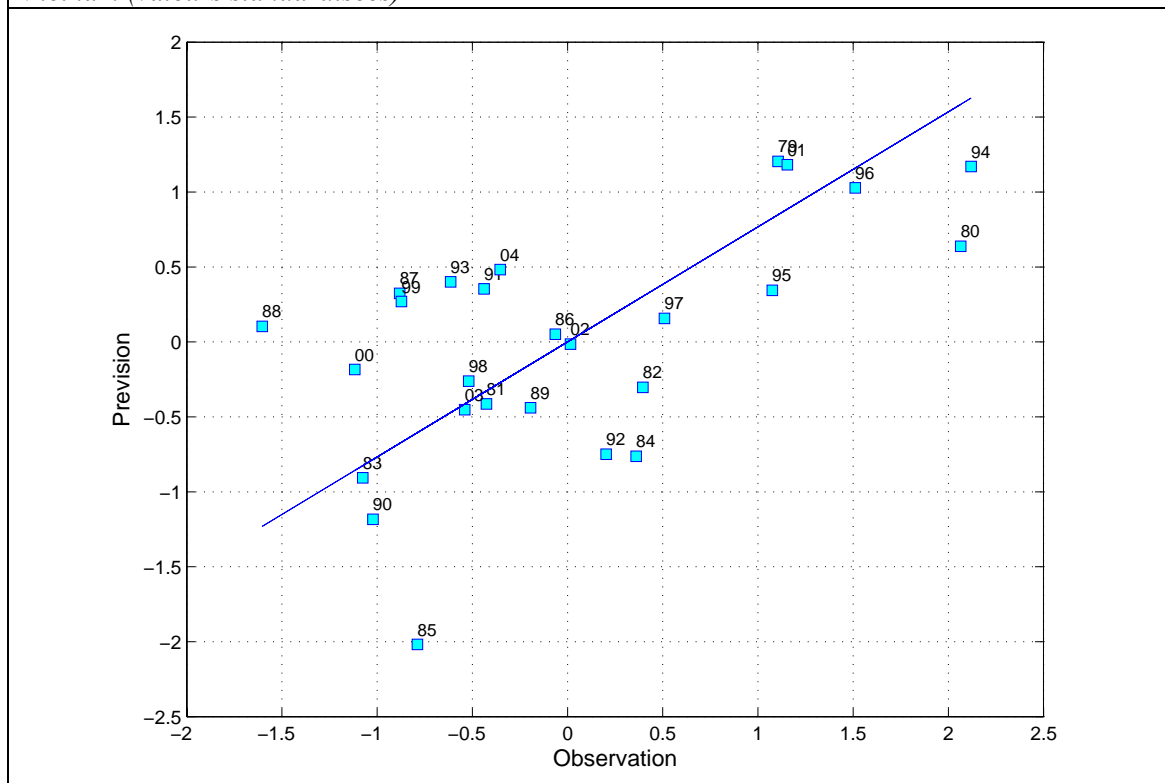


Figure 5.18 : Nuage de points entre les cumuls de pluies observés et prévus pour l'indice nord Vietnam (valeurs standardisées)



Enfin, la méthode d'analyse discriminante linéaire est appliquée avec les quatre même prédicteurs pour prévoir les années sèches, normales et pluvieuses. Sur les vingt-six ans d'observation, dix années sont sèches, neuf sont normales et sept sont humides. Le résultat des prévisions (tableau 10) montre qu'il y a dix années correctement prévues et une année avec une erreur grossière (prévision : humide, observation : sec) ; le score de LEPS = 0.31.

Tableau 5.10 : Le résultat de prévision de la pluie du nord Vietnam par analyse discriminante linéaire, le score de LEPS = 0.31.

		Observations		
		Sec	Normal	Humide
Simulations	Sec	4	3	0
	Normal	5	2	3
	Humide	1	4	4

5.2.2 Prévisibilité des cumuls de pluies au sud Vietnam

5.2.2.1 Définition des prédicteurs

La figure 5.19 présente les cartes composite (pluvieux – sec) des champs thermodynamiques de l’atmosphère en mai associées au prédictant du sud Vietnam en juin-août. En se basant sur ces cartes, dix prédicteurs potentiels pour le prédictant du sud Vietnam sont sélectionnés :

- (1) TSM dans la région centrale de l’océan Pacifique (170°W - 120°W , 5°S - 5°N),
- (2) TSM dans la mer est des Philippines (130°E - 150°E , 0° - 15°N),
- (3) T1000 sur la région centrale de l’océan Indien (80°E - 90°E , 15°S - 5°S),
- (4) T1000 sur la région du plateau tibétain (90°E - 100°E , 25°N - 35°N),
- (5) ESH sur la région du sud-est de l’océan Indien (80°E - 100°E , 15°S - 10°S),
- (6) ESH sur la région du plateau tibétain (90°E - 100°E , 25°N - 35°N),
- (7) PNM sur la région du sud-est de l’océan Indien (80°E - 100°E , 17.5°S - 7.5°S),
- (8) PNM sur la mer Chine-Japon (120°E - 140°E , 32.5°N - 40°N),
- (9) Vent1000 sur la région de Sumatra (90°E - 100°E , 10°S - 0°) et
- (10) Vent200 sur la région équatoriale de l’Indonésie (130°E - 150°E , 5°S - 5°N) .

On observera que, dans cette liste, le prédicteur de température sur la région Inde-Myanmar (un prédicteur important pour les pluies au nord Vietnam) est absent. En revanche, un prédicteur important apparaît : les TSM dans la mer est des Philippines. Ceci peut s’expliquer par les facteurs qui influencent la pluviogenèse : les cumuls de pluie au nord Vietnam sont souvent associés à la convection diurne, c’est-à-dire aux orages qui se forment en général pendant l’après-midi dans le talweg de basses pressions Inde-Mianmar, tandis que les cumuls de pluies au sud Vietnam sont associés principalement aux entrées humides de la mousson, donc au flux de sud-ouest dont la charge en humidité dépend du prédicteur global (températures de surface de la mer).

5.2.2.2 L’équation de prévision

Parmi les dix prédicteurs potentiels, les quatre prédicteurs les plus importants pour la pluie du sud Vietnam sont les quatre premiers (1), (2), (3) et (4). L’équation de régression linéaire multiple pour prévoir le cumul saisonnier des pluies du sud Vietnam est présentée

dans le tableau 11. La figure 5.20 présente le nuage de points entre les cumuls de pluies observées et celles prévues pour chaque année. Elle montre que le coefficient de corrélation est élevé et significatif au niveau 99 % ($R_{cv} = 0.64^{***}$), bien que les cumuls de pluies prévues en 1983, 1991, 2000 (1987, 1993, 1998) soient inférieurs (supérieurs) à ceux observés. La relation entre le prédicteur et les prédicteurs montre qu'une année anormalement pluvieuse est précédée en mai par :

- (1) des températures de surface de la mer dans la région centrale de l'océan Pacifique plus élevées, mais plus basses que la normale dans la mer des Philippines. Cette observation s'accorde bien avec l'étude de Kanae *et al.* (2006), qui ont constaté que la variabilité des précipitations sur l'Indochine est contrôlée à distance par la variabilité de TSM autour de l'Asie du Sud-Est et dans l'ouest du Pacifique.
- (2) des températures au niveau 1 000 hPa sur la région centrale de l'océan Indien et sur la région du plateau tibétain plus basses que normalement, amenant une augmentation du gradient de pression entre l'océan Indien et la région Chine-Japon qui favorise le développement de la mousson.

Tableau 5.11 : Identique au tableau 5.9 mais pour le sud Vietnam. Le $RMSE = 0.61$, coefficient de corrélation $R_{cv} = 0.64$, le score de $mvif = 1.26$.

Prédicteurs	SST 170°-120°W, 5°S-5°N	SST 130°-150°E, 0-15°N	T1000hPa 80°-90°E, 15°S-5°S	T1000hPa 90°-100°E, 25°-35°N
Coefficients	+0.1282	-0.4679	-0.4335	-0.3128

Figure 5.19 : Identique à la figure 5.17 mais pour le prédicteur sud Vietnam en juin-août.

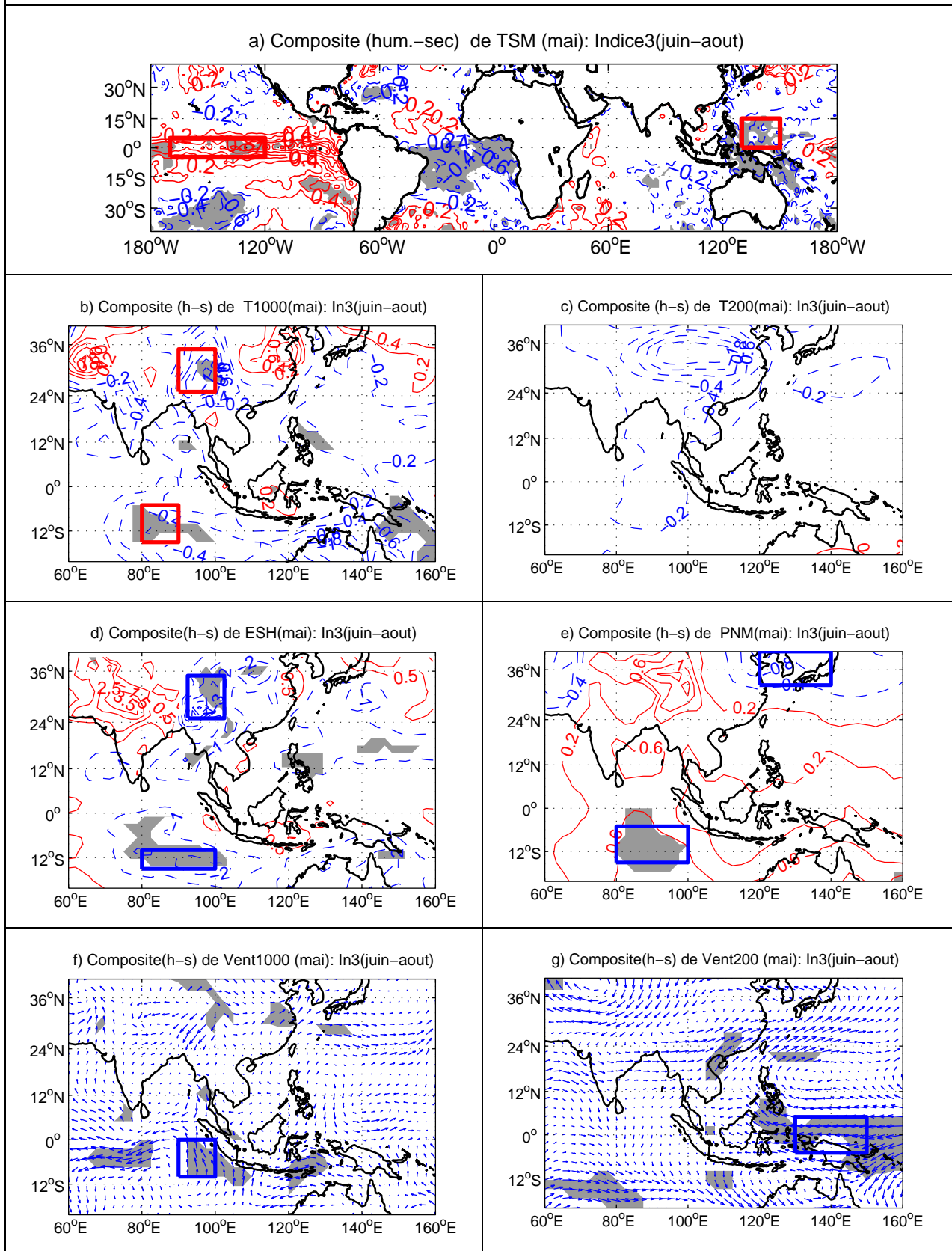
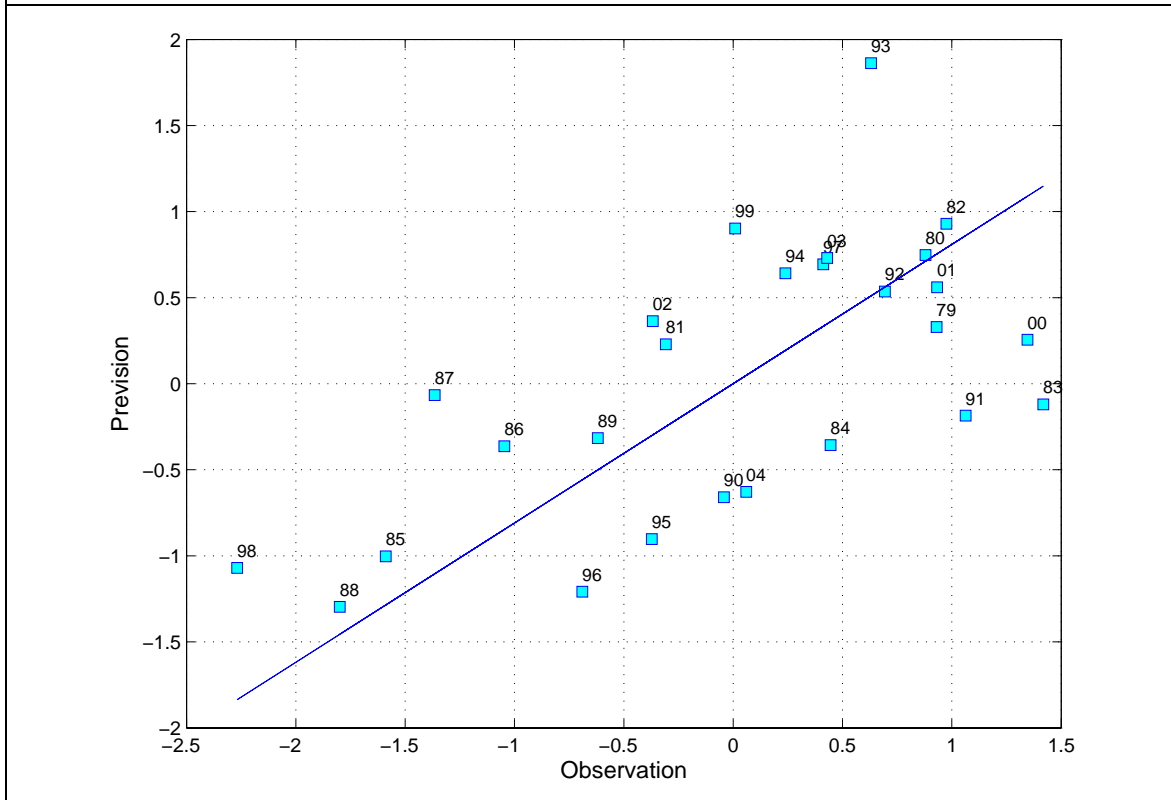


Figure 5.20 : Identique à la figure 5.18 mais pour l'indice sud Vietnam.



Le tableau 5.12 présente le résultat de la prévision du cumul saisonnier de pluies au sud Vietnam en trois classes (sec, normal, pluvieux) par la méthode d'analyse discriminante linéaire avec les quatre prédicteurs sélectionnés. Dix années sont correctement prévues et deux ont une erreur grossière (prévision : humide, observation : sec), le score de LEPS = 0.24.

Tableau 5.12 : Identique au tableau 5.10 mais pour le sud Vietnam ; le score de LEPS = 0.24.

		Observations		
		Sec	Normal	Humide
Simulations	Sec	3	4	0
	Normal	2	3	5
	Humide	2	3	4

Synthèse de chapitre

Le but de ce chapitre était d'étudier la prévisibilité des cumuls saisonniers de pluies au Vietnam. À cette fin, les sorties des modèles couplés du projet européen ENSEMBLES sont utilisées pour définir la prévisibilité saisonnière sur la période 1991-2001, et les données réanalysées des NCEP/DOE2 sont utilisées pour déterminer la prévisibilité des cumuls saisonniers de pluies sur la période 1979-2004. Les résultats principaux de ce travail sont les suivants :

1) la performance directe des modèles pour prévoir les cumuls saisonniers de pluies au Vietnam est faible, que cela concerne les champs moyens ou la variabilité interannuelle. Ainsi, les biais (modèle moins observation) sur les champs saisonniers moyens varient entre -20 % et +20 % avec des valeurs minimales de -40 % et maximales de +40 %. Les configurations spatiales moyennes sont très mal reproduites, le maximum de pluie sur le sud du Vietnam étant rarement capturé par les modèles. Excepté MTFCE pour le mode 2, aucun modèle ne montre de corrélation positive significative avec les modes observés correspondants.

2) Les champs moyens de la dynamique atmosphérique simulée (modèles) sont en bonne concordance avec ceux des données d'observation (NCEP/DOE2). De même, un bon accord en termes de configurations spatiales entre simulation et observation est à noter pour les premiers modes du vent à 10 m, à 850 hPa et à 200 hPa. L'évolution interannuelle de ces modes est également assez bien capturée par les modèles : les corrélations entre les premiers modes simulés et observés sont significatives au seuil de 99 % pour les trois paramètres $UV_{10m} = 0.76^{***}$, $UV_{850} = 0.77^{***}$, et $U_{200} = 0.42^{***}$;

3) les résultats de prévision statistique des cumuls de pluies au Vietnam à partir des champs de la dynamique atmosphérique simulée représentent précisément les relations entre les conditions de l'atmosphère et les cumuls de pluie au Vietnam avec un coefficient de corrélation en validation croisée : $R_{cv} = 0.53$ pour le nord Vietnam et $R_{cv} = 0.49$ pour le sud Vietnam ;

4) les résultats de prévision des cumuls de pluies au nord Vietnam à partir des données réanalysées du NCEP/DOE2 par la méthode de régression linéaire multiple pas à pas (RLM) sont significatifs (le coefficient de corrélation en validation croisée : $R_{cv} = 0.59$). Selon ces résultats, une année pluvieuse est précédée en mai par : (1) une température élevée sur la région Inde-Mianmar, (2) un excédent d'énergie au nord du golfe du Bengale, (3) un gradient

de pression accentué entre le golfe du Bengale et l'est de la Chine. Les résultats de prévision par la méthode d'analyse discriminante linéaire sont également robustes : parmi les vingt-six années, il y a dix années correctement prévues et seulement une année avec une erreur grossière (prévision : humide, observation : sec) avec un score de LEPS = 0.31 ;

5) pour les cumuls de pluies au sud Vietnam, une année anormalement pluvieuse est précédée en mai par : (1) des températures de surface de la mer plus élevées dans la région centrale de l'océan Pacifique, alors que celles de la mer des Philippines sont plus basses que la normale, et (2) des températures à 1 000 hPa sur la région centrale de l'océan Indien et sur la région du plateau tibétain plus basses que normalement. Le résultat de prévision par méthode RLM est significatif ($R_{cv} = 0.64$), mais la méthode d'ADL est moins performante que pour la région nord Vietnam (LEPS = 0.24).

Conclusion et perspectives

1. Rappel des objectifs

L'objectif de ce travail était d'étudier le climat de la mousson vietnamienne et de définir sa prévisibilité saisonnière.

* Sur le premier point, les données mensuelles de pluies et de températures sur quarante-quatre stations (période 1960-2000) ont été utilisées pour décrire les climats sur les sept régions climatiques du Vietnam ; ensuite, les réanalyses du NCEP/DOE2, les données pluviométriques CMAP et les données de températures de surface de la mer d'UKMO ont été traitées pour étudier les conditions de l'atmosphère associées à la mousson et aux pluies.

* Sur le second point, les dates d'onset de mousson ont été définies au travers des données journalières de pluies aux stations et le vent à 1 000 hPa (données NCEP/DOE2) sur la période 1979-2004. La prévisibilité des dates d'onset a été définie au regard de l'évolution de conditions atmosphériques pendant l'onset. La prévisibilité saisonnière des cumuls de pluies a été regardée à l'aide : (1) de l'utilisation de la méthode de prévision statistique sur la corrélation entre les cumuls de pluie et les champs thermodynamiques de l'atmosphère à partir de données de réanalyses NCEP/DOE2 ; (2) de l'utilisation des modèles couplés du projet européen ENSEMBLES.

2. Synthèse des résultats

Les principaux résultats de ce travail concernent trois aspects :

► *Les climats du Vietnam obéissent à trois contraintes : la très forte extension en latitude, le compartimentage du relief et bien sûr l'alternance des moussons (régimes de SO et de NE).*

Ainsi, le régime thermique de la partie nord du Vietnam (au nord de 16°N) diffère profondément de celui de la partie sud. Au nord, les températures sont fortement influencées par la mousson de nord-est d'hiver boréal. Si l'on compare, par exemple, Cantho, à 10°03 N, à Hanoi, à 21°03 N, la température moyenne annuelle passe de 26,7°C à Cantho et de 23,7°C à Hanoi, où la variation annuelle est plus importante (3,1°C à Cantho et 12,8°C à Hanoi).

Le régime pluviométrique du Vietnam met bien en lumière l'influence des reliefs sur le climat des différentes régions. Ainsi, la saison des pluies, au nord et au sud du Vietnam, dure de mai à octobre, tandis qu'au centre celle-ci a lieu d'août à décembre. Le cycle moyen annuel et la variabilité des champs pluviométriques au Vietnam permettent de retenir trois régions à forte cohérence spatiale : le nord, le centre et le sud du Vietnam, avec des frontières assez franches vers 12°N et 19°N. Cette délimitation semble plus efficace au regard de la pluie que la division traditionnelle qui tend à plus morceler l'information.

L'Indochine péninsulaire en général et le Vietnam en particulier sont des régions de mousson dites de transition parce que positionnées entre les deux systèmes régionaux principaux de la mousson d'Asie : mousson d'Asie du Sud et mousson d'Asie de l'Est (Pham N.T., Phan T.D., 1993 ; Zhang *et al*, 2002). Le territoire du Vietnam est donc sous l'influence permanente de flux d'origines et de caractères différents dont l'influence alternée et les fréquences différentes expliquent la forte variabilité climatique sur le pays.

Toutefois la mousson vietnamienne n'est pas seulement une circulation moyenne appréhendable à l'échelle mensuelle et sa saisonnalité ne dépend pas seulement des flux. Les caractères climatiques régionaux sont aussi sous l'influence des perturbations synoptiques et intra-saisonniers souvent associées à l'activité des fronts en hiver, de la ZCIT et des typhons en été. Ces perturbations ont un rôle important dans le climat du Vietnam. De façon pédagogique, on peut distinguer les deux aspects suivants.

► *La saison des pluies au nord Vietnam et au sud Vietnam est associée à la circulation de mousson de sud-ouest d'été boréal.*

La date moyenne de l'onset au sud Vietnam est le 12 mai avec un écart-type de 11.6 jours ; au nord Vietnam, elle se situe le 13 mai avec un écart-type de 11.5 jours. Ceci s'accorde avec de nombreux auteurs qui ont travaillé au niveau régional sur l'Indochine (Matsumoto, 1997 ; Qian et Lee, 2000 ; Wang et LinHo, 2002 ; Zhang *et al.*, 2002 pour l'Indochine) ou plus spécifiquement sur le Vietnam (Pham T.T.H., Tran T.T., 1999 ; Nguyen

T.H.T, 2001 ; Pham N.T., Phan T.D., 1993 ; Nguyen D.N., Nguyen T.H., 2004). Les résultats des prévisions annuelles d'onset peuvent être jugés satisfaisants sur les deux régions. Ainsi, la méthode RLM donne un coefficient de corrélation en validation croisée entre données observées et prévues de 0.75***(au sud Vietnam) et de 0.66*** (au nord Vietnam). La méthode ADL a montré aussi de bons résultats avec un score de LEPS de 52 % pour le sud, et de 70 % pour le nord. Les onsets de saison des pluies sur ces deux régions sont associés à plusieurs signaux cohérents repérables avec la dynamique atmosphérique. Ils concernent essentiellement la pression au niveau de la mer sur l'est de la Chine, les vents de sud-est sur le sud du Vietnam et la convection profonde sur le golfe du Bengale de début avril à mi-avril.

► *La prévisibilité des cumuls saisonniers des pluies issues directement des modèles est faible. On doit donc utiliser les champs dynamiques des modèles pour prévoir les cumuls saisonniers. Les résultats des prévisions statistiques des cumuls de pluies à partir des données NCEP/DOE2 sont significatifs.*

La performance directe des modèles pour prévoir les cumuls saisonniers de pluies au Vietnam est faible, que cela concerne les champs moyens ou la variabilité interannuelle. Ainsi, les biais (modèle moins observation) sur les champs saisonniers moyens varient entre -20 % et +20 % avec des valeurs minimales de -40 % et maximales de +40 %. Les configurations spatiales moyennes sont très mal reproduites, le maximum de pluies sur le sud du Vietnam étant rarement capturé par les modèles. Excepté le modèle de Météo France pour le mode 2, aucun modèle ne montre de corrélation positive significative avec les modes observés correspondants.

Les champs moyens de la dynamique atmosphérique simulée (modèles) sont en bonne concordance avec ceux des données d'observation (NCEP/DOE2). Les prévisions statistiques des cumuls de pluies au Vietnam à partir des champs de la dynamique atmosphérique simulée donnent un coefficient de corrélation en validation croisée de 0.53 pour le nord Vietnam et 0.49 pour le sud Vietnam.

Les résultats de prévision des cumuls de pluies au nord Vietnam à partir des données réanalysées du NCEP/DOE2 par la méthode de régression linéaire multiple pas à pas sont significatifs avec le coefficient de corrélation en validation croisée de 0.59. Les résultats de prévision par la méthode d'analyse discriminante linéaire sont également robustes : parmi les vingt-six années observées, il y a dix années correctement prévues et seulement une année

avec une erreur grossière (prévision : humide, observation : sec) avec un score de LEPS = 0.31. Une année pluvieuse est précédée en mai par : (1) une température élevée sur la région Inde-Myanmar, (2) un excédent d'énergie au nord du golfe du Bengale, (3) un gradient de pression accentué entre le golfe du Bengale et l'est de la Chine.

Pour les cumuls de pluies au sud Vietnam, une année anormalement pluvieuse est précédée en mai par : (1) des températures de surface de la mer dans la région centrale de l'océan Pacifique plus élevées, alors que celles de la mer des Philippines sont plus basses que la normale, et (2) des températures à 1 000 hPa sur la région centrale de l'océan Indien et sur la région du plateau tibétain plus basses que normalement. Le résultat de prévision par la méthode RLM est significatif ($R_{cv} = 0.64$), mais la méthode ADL est moins performante que pour la région du nord Vietnam (LEPS = 0.24).

3. Limites et perspectives pour de futures études

Comme annoncé dans l'introduction, la prévision des précipitations saisonnières intéresse de nombreux domaines liés aux activités humaines et en tout premier lieu le développement économique et social du Vietnam. La qualité et la fiabilité des prévisions saisonnières permettent en effet de déceler les régions et périodes de risques potentiels, et donc de déterminer les activités les mieux adaptées aux conditions climatiques prévues. De ce côté-là l'avenir est certainement aux techniques de réduction d'échelle pour les modèles de prévision saisonnière ainsi qu'à la modélisation intégrée, regroupant prévisions climatiques et modèles hydrologique et économique, pour proposer les modes d'affectation de l'eau les plus efficaces. Toutefois, les capacités de prévision présentes ne peuvent atteindre le niveau de détail requis par les utilisateurs finaux et les aménageurs et la politique gouvernementale du Vietnam.

Les résultats obtenus dans cette thèse ne sont bien entendu qu'un premier effort en ce sens. Il est toutefois possible de lister quelques grands domaines susceptibles d'en bénéficier.

L'agriculture est la première concernée au travers de la prévision de l'onset qui marque le démarrage de la saison des pluies. La connaissance à l'avance des dates d'onset peut en effet aider les agriculteurs à améliorer les plans d'irrigation via la gestion des lacs en laissant l'eau s'accumuler dans les derniers mois de la saison sèche (mars-avril). De même toute information donnée à l'avance sur les quantités prévues ou le type de saison attendue (sèche, normale ou pluvieuse) ne peut qu'aider les gestionnaires à prendre une part active

dans le plan et limiter les conséquences liées aux inondations ou sécheresses : on peut ainsi intervenir sur les barrages, les lacs et les étangs d'aquaculture.

L'industrie est également concernée puisqu'il est possible d'ajuster au mieux les capacités de production des usines, l'eau pour la saison sèche et donc la production d'hydroélectricité. En cas de saison des pluies excédentaires il faut contrôler le niveau des eaux dans les lacs de retenue pour sécuriser les barrages. Enfin la prévision saisonnière touche les aspects santé et les questions sociales. Au Vietnam de nombreuses régions à haut risque environnemental sont peuplées. Les personnes qui y vivent sont menacées par les glissements de terrain, les inondations, sans parler des maladies à vecteurs (dengue, paludisme) pendant la saison des pluies.

Ce travail montre que l'utilisation de méthodes composites pour définir des prédicteurs et les méthodes statistiques utilisées pour prévoir les cumuls de pluies sont bien adaptées au Vietnam. Il confirme aussi les difficultés de la prévision numérique à l'échelle de la saison en raison des biais systématiques des modèles couplés liés en large partie à la simulation océanique et au couplage océan atmosphère, mais aussi à la qualité et à la représentativité de l'état initial. Ces problèmes sont évidemment accentués quand ces modèles sont utilisés en mode prévisionnel pour des simulations longues, avec un état initial de printemps. Ceci explique que, si l'on vise un retour d'expérience en direction des utilisateurs potentiels des prévisions saisonnières, il y a la nécessité de recourir à la voie statistique pour un certain temps encore. La prévision des cumuls de pluies pour le Vietnam en temps réel sera un des thèmes de notre prochain travail.

Les perturbations de l'atmosphère, particulièrement les typhons et les tempêtes tropicales, jouent un rôle important bien qu'elles n'aient pas été considérées dans ce travail. Donc, l'étude de l'activité des typhons au Bien Dong et sur le nord-ouest du Pacifique est aussi un but dans le futur. Cette étude utilisera les données de l'activité des typhons au Bien Dong et sur le nord-ouest du Pacifique, les réanalyses du NCEP/DOE2 (températures de surface de la mer ainsi que les géopotentiels, températures et humidités spécifiques sur plusieurs niveaux). Le nombre de typhons frappant annuellement chaque région du Vietnam (nord, centre et sud) sera croisé avec les données d'activité des typhons (archives historiques). Ensuite, la corrélation entre le nombre, les trajectoires des typhons et les champs thermodynamiques sera définie par la méthode composite. Enfin, le nombre annuel de typhons sera prévu par approche statistique.

Bibliographie

Adv. Atmos. Sci. : *Advances in Atmospheric Sciences*

Ann. Geophys. : *Annales Geophysicae*

BAMS : *Bulletin of the American Meteorological Society*

Geophys. Res. Lett. : *Geophysical Research Letters*

Int. J. Climatol. : *International Journal of Climatology*

J. Climate : *Journal of Climate*

J. Clim. Appl. Met. : *Journal of Climatology and Applied Meteorology*

J. Geophys. Res. : *Journal of Geophysical Research*

J. Meteor. Soc. J. : *Journal of the Meteorological Society of Japan*

J. Sci. Ear. : *Journal of Sciences of the Earth, Vietnam*

Mon. Wea. Rev. : *Monthly Weather Review*

Sci. Tec. Hyd. Met. J. : *Scientific and Technical Hydro-Meteorological Journal, Vietnam*

Theor. Appl. Climatol. : *Theoretical and Applied Climatology*

Amory-Mazaudier, C.¹, **M. Le Huy**², **Y. Cohen**³, **V. Doumbia**^{4*}, **A. Bourdillon**⁵, **R. Fleury**⁶, **B. Fontaine**⁷, **C. Ha Duyen**², **A. Koba**⁴, **P. Laroche**⁸, **P. Lassudrie-Duchesne**⁶, **H. Le Viet**², **T. Le Truong**², **H. Luu Viet**², **M. Menvielle**¹, **T. Nguyen Chien**², **A. Nguyen Xuan**², **F. Ouattara**⁹, **M. Petitdidier**¹, **H. Pham Thi Thu**², **T. Pham Xuan**², **N. Philippon**, **L. Tran Thi**², **H. Vu Thien**¹⁰, **P. Vila**¹ (2006) Sun-Earth System Interactions studies over Vietnam : an international cooperative project. *Ann. Geophys.*, **24**, 3313-3327.

Barnston A.G., and Van Den Dool H.M. (1993), A degeneracy in cross-validated skill in regression-based forecasts. *J. Climate*, **6**, 963-977.

Bruzon E, et Carton P. (1930), *Le climat de l'Indochine et les typhons de la mer de Chine*. Édition de la Société de Géographie Hanoi, 310 p

Camberlin P. and Philippon N. (2002), The East African March-May rainy season : associated atmospheric dynamics and predictability over the 1968-1997 period. *J. Climate*, **15**, 1102-1019.

Chang C.-P. and George T.-J. Chen (1995), Tropical Circulations Associated with Southwest Monsoon Onset and Westerly Surges over the South China Sea. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 3254-3267.

- Chen T.C. and Chang C.P. (1980)**, The structure and vorticity budget of early summer monsoon trough (Mei-Yi) over southeastern China and Japon. *Mon. Wea. Rev.*, **108**, 942-953.
- Dao T.L. and Nguyen T.T.T. (2004)**, Evaluating the role of weather situations, generating heavy and wide spread rainfall in the central and south regions for now casting weather using weather radar information. *Sci. Tec. Hyd. Met. J.*, **7**, 33-41.
- Ding Y. and Sikka D.R. (2006)**, Synoptic systems and weather. *The Asian Monsoon*. B. Wang. Praxis, Springer Berlin Heidelberg, 131-201.
- Fontaine B., Philippon N. and Camberlin P. (1998)**, An improvement of June-September rainfall forecasting in the Sahel based upon region April-May moist static energy content (1968-1997). *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 2041-2044.
- Fontaine B. and Philippon N. (2000)**, Seasonal evolution of boundary layer heat content in the West African monsoon from the NCEP/NCAR reanalysis (1968-1998). *Int. J. Climatol.*, **20**, 1777-1790. (N-5, 26)
- Fontaine B. and Louvet S. (2006)**, Sudan-Sahel rainfall onset : Definition of an objective index, types of years, and experimental hindcasts. *J. Geophys. Res.*, **111**, 1029/2005JD007019.
- Hoang P.H. and Nguyen D.Q. (2007)**, The structure of upper air wind fields over the Viet Nam territory. *Scientific and Technical Hydro-Meteorological Journal, Vietnam*, **1**, 7-13.
- Holland G.J. (1986)**, Interannual Variability of the Australian Summer Monsoon at Darwin: 1952-82. *Mon. Wea. Rev.*, **114**, 594-604.
- Hewitt, C.D. (2005)**, The ENSEMBLES Project: Providing ensemble-based predictions of climate changes and their impacts. Published article appears in the EGGS newsletter, **13**, 22-25. <http://www.the-eggs.org/?issueSel=24>
- Joseph P.V., Liebman B. and Hendon H.H. (1991)**, Interannual Variability of the Australian Summer Monsoon Onset: Possible Influence of Indian Summer Monsoon and El Niño. *J. Climate*, **4**, 529-538.
- Joseph P.V., Eischeid J.K. and Pyle R.J. (1994)**, Interannual Variability of the Onset of the Indian Summer Monsoon and Its Association with Atmospheric Features, El nino, and Sea Surface Temperature Anomalies. *J. Climate*, **7**, 81-105.
- Kalnay E., Kanamistu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Dandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynold R., JenneR., and Joseph D. (1996)**, The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *BAMS*, **77**, 437-462.

- Kanae S., Hirabayashi Y., Yamada T., Oki T. (2006)**, Impact of Soil Moisture on Predictability of Precipitation at Seasonal Scale, *Vietnam-Japan joint workshop on Asian monsoon*, August 18-20, Ha Long, Vietnam, 47-56.
- Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S.-K., Hnilo J.J., Fiorino M. and Potter G.L. (2002)**, NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *BAMS*, **83**, 1631-1643.
- Keenan T.D. (1986)**, Forecasting Tropical Cyclone Motion Using a Discriminant Analysis Procedure. *Mon. Wea. Rev.* , **114**, 434-441.
- Kidd C. (2001)**, Satellite rainfall climatology a review. *Int. J. Climatol.*, **21**, 1041-1066.
- Lau K.-M. and Song Yang, (1997)**, Climatology and Interannual Variability of the Southeast Asian Summer Monsoon. *Adv. Atmos. Sci.* , **14**, 231-245.
- Le B.H. (1997)**, Features of catastrophic rains, typhoons, flood in the Middle region and the hydrometeorological work in the service of prevention, mitigation of losses. *Sci. Tec. Hyd. Met. J.*, **8** , 30-41.
- Le B.H. and Duong T.L. (1992)**, Generation on rain-producing weather characteristics leading to the formation of high flood in the Red-Thai Binh river system. *Sci. Tec. Hyd. Met. J.*, **10**, 5-14.
- Le D.Q. and Nguyen N.T. (2006)**, Hard rain in the Middle of Vietnam caused of the influence of cold air mass on ITCZ (the intertropical convergence zone). *Sci. Tec. Hyd. Met. J.*, **8** , 1-9.
- Le H.M., Pham X.T., Nguyen C.T., Tran T.L., Fleury R., Lassudrie-Duchesne P., Bourdillon A., Amory-Mazaudier C., Tran N.N. and Hoang T.L. (2008)**, Estimation of the relation between the total tropospheric water vapour and the precision of the absolute positioning by GPS in Vietnam. *J. Sci. Ear.*, **30** , 161-169.
- Li C. and Yanai M. (1996)**, The Onset and Interannual Variability of the Asian Summer Monsoon in Relation to Land-Sea Thermal Contrast. *J. Climate.*, **9**, 358-375.
- Liebmann B. and Smith C.A., (1996)**, Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset. *BAMS*, **77**, 1275-1277.
- Mao J., Chan J.C.L. and Wu G. (2004)**, Relationship between the Onset of the South China Sea Summer Monsoon and Structure of the Asian Subtropical Anticyclone. *J. Meteor. Soc. J.*, **82**, 845-859.
- Matsumoto J. (1997)** Seasonal Transition of Summer Rainy Season over Indochina and Adjacent Monsoon Region. *Adv. Atmos. Sci.* , **14**, 231-245.
- Maurer E.P., O'Donnell G.M., Lettenmaier D.P., and Roads J.O. (2001)**, Evaluation of the land surface water budget in NCEP/NCAR and NCEP/DOE Reanalyses using an off-line hydrologic model. *J. Geophys. Res.*, **106 (D16)**, 17841-17862.
- Michaelsen J. (1987)**, Cross-validation in statistical climate forecast model. *J. Clim. Appl. Met.*, **26**, 1589-1600

- Montecinos A., Diaz A. and Aceituno P. (2000)**, Seasonal diagnostic and predictability of rainfall subtropical South America based on tropical Pacific SST. *J. Climate.*, **13**, 746-758.
- Nguyen D.C. (2002)**, Some results of implementing the project on “Invertigation and Experiment pf Climate Prediction in Vietnam”. *Sci. Tec. Hyd. Met. J.* , **2**, 7-12
- Nguyen D.H. (2000)**, Forecasting heavy rainfall with lead time of 3-5 days on system of Red and Thaibinh Rivers. *Sci. Tec. Hyd. Met. J.* , **12**, 27-34
- Nguyen D.N. et Nguyen T.H. (2004)**, Climatologie et ressources climatologiques du Vietnam, *Maison d’édition d’Agriculture*, 294 p.
- Nguyen N.T. (1992)**, Synoptic situations producing moderate and heavy rainfalls in Bac Bo from 26 to 28 July 1991. *Sci. Tec. Hyd. Met. J.* , **5**, 25-30
- Nguyen T.H.T. (2001)**, Summer monsoon in its onset in Central Highlands and South Vietnam. *Sci. Tec. Hyd. Met. J.* , **7**, 1-7
- Nguyen V.L. (2000)**, Some charateristics of thunderstorms caused by the Indian Heat Low over Red River Delta Area in the first half of summer. *Sci. Tec. Hyd. Met. J.* , **3**, 43-45
- Parker D.E., Jackson M. and Horton E.B. (1995)**, *The 1961-1990 GISST2.2 sea surface temperature and sea-ice climatology*, Hadley Center, Technical note, **63**, 28 p.
- Pham N.T. et Phan T.D. (1993)**, *Climatologie du Vietnam*. Maison d’édition des Sciences et Techniques, 312 p.
- Pham T.T.H. et Tran T.T. (1999)**, *Recherche de démarrage de la mousson d’été dans la région Taynguyen - Nambo et de sa relation avec l’ENSO*. Institut de Météorologie-Hydrologie, Vietnam, 80 p.
- Pham V.A. (1993)**, Heavy rain in Nghe Tinh – Binh Tri Thien provinces and forecasting possibility. *Sci. Tec. Hyd. Met. J.*, **10**, 8-14.
- Pham V.A. (1996)**, Inversion in light and mizzle rains in the delta and midlan of North Vietnam. *Sci. Tec. Hyd. Met. J.*, **2** , 2-10.
- Pham X.T., Fontaine B. and Philippon N. (2007)**, Onset of the Summer Monsoon over the Southern Vietnam and its Predictability. *Theor. Appl. Climatol. (submite)*.
- Pham X.T., Fontaine B. and Philippon N. (2008)**, Definition and predictability of the beginning of the rainy season over North Vietnam. *J. Sci. Ear.*, **30** , 39-48.
- Philippon N. (2002)**, *Une nouvelle approche pour la prévision statistique des précipitations saisonnières en Afrique de l’Ouest et de l’Est : méthodes, diagnostics (1968-1998) et applications (2000-2001)*. Mémoire de thèse, Université de Bourgogne, 241 p.

- Philippon N. and Fontaine B. (2002)**, The relationship between the Sahelian and previous 2nd Guinean rainy seasons : a monsoon regulation by soil wetness ?. *Ann. Geophys.*, **20**, 575-582.
- Potts J.M., Folland C.K., Jolliffe I.T., and Sexton D. (1996)**, Revised LEPS scores for assessing climate model simulations and long-range forecasts. *J. Climate*, **9**, 34-53.
- Qian W. and Lee D.-K. (2000)**, Seasonal march of Asian summer monsoon. *Int. J. Climatol.*, **20**, 1371-1386.
- Rayner N.A., Horton E.B., Parker D.E., Folland C.K. and Hackett R.B. (1996)**, *Version 2.2 of the global sea-ice and sea surface temperature data set, 1903-1994*, Hadley Center, Technical note, **74**, 21 p.
- Richman M. B. (1986)**, Rotation of Principal components. *Int. J. Climatol.* **6**, 285-335.
- Saporta G. (1990)**, *Probabilités, analyse des données et statistique*. Technip, Édition Technip, Paris, 493 p.
- Sun L., Semazzi F.H.M., Giorgi P. and Ogallo L.J. (1999)**, Application of the NCAR regional climate model to eastern Africa. Two simulation of interannual variability of short rains. *J. Geophys. Res.*, **104**, 6549-6562.
- Tran T.T. (1997)**, On the heavy rain spell in Central Highlands in early 1996. *Sci. Tec. Hyd. Met. J.*, **1**, 24-26.
- Tao S.Y. and Chen L.X. (1987)**, Review of recent research on the East Asian summer monsoon in China. *Monsoon Meteorology*, C.P. Chang and T.N. Krishnamurti Eds, Oxford University Press, 60-92.
- Von Storch H. and Zwiers F.W. (1999)**, *Statistical analysis in climate research*, Cambridge University Press, Cambridge, 484 p.
- Wang B. and LinHo (2002)**, Rainy Season of the Asian-Pacific Summer Monsoon. *J. Climate*, **15**, 386-398.
- Wang B., LinHo, Zhang Y. and Lu M.-M. (2004)**, Definition of South China Sea Monsoon and Commencement of the East Asia Summer Monsoon. *J. Climate*, **17**, 699.
- Ward M.N. (1992)**, Provisionally corrected surface wind data, worldwide ocean-atmosphere surface fields and sahelian rainfall variability. *J. Climate*, **5**, 454-475.
- Ward N.M. and Folland C.K. (1991)**, Prediction of seasonal rainfall in North Nordeste of Brasil using eigenvectors of sea-surface temperature. *Int. J. Climatol.*, **11**, 711-743.
- Wu G. and Zhang Y. (1998)**, Tibetan Plateau Forcing and the Timing of the Monsoon Onset over South Asia and the South China Sea. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 913.

Xie P. and Arkin P.A. (1997), Global precipitation: a 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellites estimates and numerical model outputs. *BAMS*, **78**, 2539-2558

Xu J. and Chan J.C.L. (2001), First Transition of the Asian Summer Monsoon in 1998 and the Effect of the Tibet-Tropical Indian Ocean Thermal Contrast. *J. Meteor. Soc. J.*, **79**, 241.

Yihui D. and Yanju L. (2001), Onset and the evolution of the Summer Monsoon over the South China Sea during SCSMEX Field Experiment in 1998. *J. Meteor. Soc. J.*, **79**, 255.

Zhang Y., Li T., Wang B. and Wu G. (2002), Onset of the Summer Monsoon over the Indochina Peninsula: climatology and interannual variations. *J. Climate*, **15**, 3206-3221.

Zhu Y. and Houghton D.D. (1996), The impact of Indian Ocean SST on the large-scal Asian summer monsoon and the hydrological cycle. *Int. J. Climatol.*, **16**, 617-632.

Liste des figures

AVANT-PROPOS ET INTRODUCTION

Figure 1 : La carte du relief du Vietnam.....	9
--	---

CHAPITRE 1

Figure 1.1 : Positions des stations pluviométriques sélectionnées (les stations en rouge sont considérées seulement sur la période 1979-2004).....	16
---	----

CHAPITRE 2

Figure 2.1 : Flux de basses couches (925 hPa) en mousson de NE en janvier (a) et SO en juillet (b), période 1979-2004.....	28
---	----

Figure 2.2 : Les moyennes mensuelles de trois stations représentatives du Vietnam (nord, centre et sud).....	29
---	----

Figure 2.3a (en haut) : Moyennes mensuelles des températures sur la région Taybac, moyenne d'ensemble 22°C et écart-type 3.9°C (en bas) : Variabilité interannuelle des températures en valeurs normalisées (unités d'écart-type) avec les courbes filtrées indiquant les évolutions sur huit ans (rose) et à long terme (> 40 ans en bleu) pour la tendance. Période 1960-2000.....	32
--	----

Figure 2.3b : Densité spectrale (power spectral density: PSD) des moyennes annuelles de températures sur la région Taybac. L'axe des x représente les périodes (harmoniques) calculées sur 1960-2000 (41 ans).....	32
---	----

Figure 2.4a (en haut) : Hauteurs moyennes mensuelles des précipitations sur la région Taybac, moyenne d'ensemble 1 830 mm et écart-type 136 mm. (en bas) : Variabilité interannuelle des cumuls mai-septembre en valeurs normalisées (unités d'écart-type) avec les courbes filtrées indiquant les évolutions sur 2.4 ans (rose). Période 1960-2000.....	33
--	----

Figure 2.4b : Densité spectrale (PSD) des cumuls mai-septembre à Taybac. L'axe des x représente les périodes (harmoniques) calculées sur 1960-2000 (41 ans).....	33
---	----

Figure 2.5a : Identique à la figure 2.3a mais pour la région Dongbac	35
---	----

Figure 2.5b : Identique à la figure 2.3b mais pour la région Dongbac	35
---	----

Figure 2.6a : Identique à la figure 2.4a mais pour la région Dongbac.....	36
--	----

Figure 2.6b : Identique à la figure 2.4b mais pour la région Dongbac.....	36
--	----

Figure 2.7a : Identique à la figure 2.3a mais pour la région DBBB.....	37
---	----

Figure 2.7b : Identique à la figure 2.3b mais pour la région DBBB.....	37
---	----

Figure 2.8a : Identique à la figure 2.4a mais pour la région DBBB.....	38
Figure 2.8b : Identique à la figure 2.4b mais pour la région DBBB.....	38
Figure 2.9a : Identique à la figure 2.3a mais pour la région BTB.....	40
Figure 2.9b : Identique à la figure 2.3b mais pour la région BTB.....	40
Figure 2.10a : Identique à la figure 2.4a mais pour la région BTB.....	41
Figure 2.10b : Identique à la figure 2.4b mais pour la région BTB.....	41
Figure 2.11a : Identique à la figure 2.3a mais pour la région NTB.....	42
Figure 2.11b : Identique à la figure 2.3b mais pour la région NTB.....	42
Figure 2.12a : Identique à la figure 2.4a mais pour la région NTB.....	43
Figure 2.12b : Identique à la figure 2.4b mais pour la région NTB.....	43
Figure 2.13a : Identique à la figure 2.3a mais pour la région Taynguyen.....	44
Figure 2.13b : Identique à la figure 2.3b mais pour la région Taynguyen.....	44
Figure 2.14a : Identique à la figure 2.4a mais pour la région Taynguyen.....	45
Figure 2.14b : Identique à la figure 2.4b mais pour la région Taynguyen.....	45
Figure 2.15a : Identique à la figure 2.3a mais pour la région Nambo.....	46
Figure 2.15b : Identique à la figure 2.3b mais pour la région Nambo.....	46
Figure 2.16a : Identique à la figure 2.4a mais pour la région Nambo.....	47
Figure 2.16b : Identique à la figure 2.4b mais pour la région Nambo.....	47
Figure 2.17a (haut) : Le série temporelle de température de Nambo. (bas) : le diagramme de test de Pettitt.....	48
Figure 2.17b (haut) : Le série temporelle de pluie de Nambo. (bas) : le diagramme de test de Pettitt.....	48
Figure 2.18 : Les six classes de stations	51
Figure 2.19 : Hauteurs moyennes mensuelles des précipitations sur les régions issues des classifications en nuées dynamiques sur le territoire du Viet Nam pour la période 1960-2000.....	52
Figure 2.20 : Cumuls annuels (barres) et signal filtré (courbe) sur les six classes.....	52
Figure 2.21 : Densités spectrales des cumuls annuels sur les six classes	53
Figure 2.22 : Rythmes moyens des trois régions pluviométriques du Vietnam, période 1960-2000.....	55

CHAPITRE 3

Figure 3.1 : La carte de pression au niveau de la mer en janvier (a) et en juillet (b). La région encadrée matérialise l'implantation des hautes pressions d'Asie en hiver.....	59
Figure 3.2 : Le vent au niveau 850 hPa : (a) en juillet, (b) en août, (c) en septembre et (d) en octobre. La ligne montre la position de la ZICT.....	63
Figure 3.3 : Les moyennes de température à la surface de la terre. Les isolignes bleues (rouges) indiquent la valeur supérieure (inférieure) de 300°K en janvier-mars (a), en avril-juin (b), en juillet-septembre(c) et octobre-décembre(d).....	67
Figure 3.4 : Les moyennes de pressions niveau de la mer. Les isolignes bleues (rouges) indiquent la valeur supérieure (inférieure) de 1 012 hPa en janvier-mars (a), en avril-juin (b), en juillet-septembre (c) et octobre-décembre (d).....	68

Figure 3.5 : Les moyennes de ESH. Les isolignes bleues (rouges) indiquent la valeur supérieure (inférieure) de 360 kJ/kg en janvier-mars (a), en avril-juin (b), en juillet-septembre (c) et octobre-décembre (d).....	68
Figure 3.6 : Les moyennes de l'eau précipitable. Les isolignes bleues (rouges) indiquent la valeur supérieure (inférieure) de 50 kg/m ² en janvier-mars (a), en avril-juin (b), en juillet-septembre (c) et octobre-décembre (d).....	69
Figure 3.7 : Cycles moyens saisonniers des variables sélectionnées sur le fuseau 102E-110E de : (a) température °C à 2 m, (b) pression au niveau de la mer (hPa), (c) l'énergie statique humide (kJ/kg) à 2 m, et (d) eau précipitable (kg/m ²).....	69
Figure 3.8 : Les moyennes du vent au niveau 925 hPa (vecteurs, m/s) en janvier-mars (a), en avril-juin (b), en juillet-septembre (c) et octobre-décembre (d).....	70
Figure 3.9 : Directions et intensité du vent horizontal sur les différents niveaux (vecteurs, m/s).....	73
Figure 3.10 : Profils verticaux dans les plans zonal (u, omega) et méridien (v, omega).....	74
Figure 3.11 : (a) Cumuls de pluies de mai-octobre au Vietnam établis à partir de la base de données CMAP 1979-2004 (unités en mm/jour) ; (b) Cycle moyen annuel de précipitations du CMAP ; (c) Cycle moyen annuel de pluies in situ. Dans les diagrammes (b, c) : nord Vietnam en bleu, centre Vietnam en vert et sud Vietnam en rouge.....	76
Figure 3.12 : La pluie sur le Vietnam et les régions environnantes (unités en mm/jour), période 1979-2004.....	77
Figure 3.13 : Diagrammes Hovmöller latitude/temps des pluies CMAP pentadaires en mm/jour sur la période 1979-2004 : a) fenêtre (0°N-30°N, 90°E-100°E) ; b) Vietnam (0°N-30°N, 100°E-110°E); c) fenêtre (0°N-30°N, 110°E-130°E).....	79
 CHAPITRE 4	
Figure 4.1 : Stations pluviométriques sélectionnées sur le sud Vietnam.....	83
Figure 4.2 : L'indice de pluies journalières (moyenne mobile de 5-jours) en mm/jour (bleu, ligne continue) et vent zonal en m/s (rouge, discontinue) pendant la période 1979-2004.....	85
Figure 4.3 : Précipitations moyennes des huit années à onset précoce (bleu, ligne continue) et des huit années à onset tardif (rouge, discontinue) au sud Vietnam, période 1979-2004. * si la différence est significative à p=0.1.....	86
Figure 4.4 : Schéma de prévision saisonnière (voir le texte).....	87
Figure 4.5 : Champs moyens de l'énergie statique humide en KJ/Kg : 15 jours avant l'onset (a) ; 15 jours après l'onset (b) ; et composite (après-avant) (c), période 1979-2004. Les aplats gris indiquent les différences significatives à 95 % au regard du test en t de Student. Les carrés localisent les prédicteurs (potentiels en bleu et retenus en rouge).....	90
Figure 4.6 : Identique à la figure 4.5, mais pour la pression au niveau de la mer en hPa.....	91
Figure 4.7 : Identique à la figure 4.5 mais pour le vent en surface en m/s.....	92
Figure 4.8 : Identique à la figure 4.5 mais pour la radiation sortante de grandes longueurs d'ondes en Wm ⁻²	93
Figure 4.9 : Nuage de points entre les dates d'onset observées (axe x) et prévues (axe y) en valeurs standardisées : valeurs positives/négatives pour l'onset tardif/précoce. Les années sont notées près du carré correspondant.....	95
Figure 4.10 : Stations pluviométriques sélectionnées sur le nord Vietnam.....	97
Figure 4.11 : Indices de pluies journalières (moyenne mobile de 5 jours) en mm/jour, période 1979-2004.....	99

Figure 4.12 : Précipitations moyennes des huit années à onset précoce (bleu, ligne continue) et des huit années à onset tardif (rouge, discontinue) au nord Vietnam, période 1979-2004. * si significatif à $p=0.1$	100
Figure 4.13 : Champs moyens d'énergie statique humide en KJ/Kg : 15 jours avant l'onset (a) ; 15 jours après l'onset (b); et composite (après-avant) (c), période 1979-2004. Les aplats gris indiquent les différences significatives à 95 % au regard d'un test en t de Student. Les carrés localisent les prédicteurs (potentiels en bleu et sélectionnés en rouge).....	102
Figure 4.14 : Identique à la figure 4.13 mais pour la pression au niveau de la mer en hPa.....	103
Figure 4.15 : Identique à la figure 4.13 mais pour le vent en surface en m/s.....	104
Figure 4.16 : Identique à la figure 4.13 mais pour la radiation sortante de grandes longueurs d'onde en Wm^{-2}	105
Figure 4.17 : Nuage de points entre les dates d'onset observées (axe x) et prévues (axe y) en valeurs standardisées : valeurs positives/négatives pour un onset tardif/précoce. Les années sont notées près du carré correspondant.....	107
 CHAPITRE 5	
Figure 5.1 : Champs moyens de pluie issus de CMAP, ENSEMBLES et de chaque modèle, pour les cumuls juin à août, en mm, période 1991-2001.....	114
Figure 5.2 : Biais (Modèle-CMAP) en juin-août, en %, période 1991-2001.....	115
Figure 5.3 : Histogrammes des biais (Modèle-CMAP) et prévisibilité en juin-août, en %, période 1991-2001.....	116
Figure 5.4a : Configurations spatiales des modes 1 (gauche), 2 (milieu), et 3 (droite) de variabilité des pluies issus de l'ACP appliquée sur les données CMAP (haut) et ENSEMBLES (bas) (juin à août, période 1991-2001), unité : coefficient de corrélation.....	116
Figure 5.4b : Identique à la figure 5.4 mais pour chaque modèle.....	117
Figure 5.5 : Variabilité interannuelle des composantes principales des pluies dans les modèles, CMAP et NCEP, période 1991-2001, anomalies standardisées.....	118
Figure 5.6 : Distribution des corrélations entre les runs et prévisibilité potentielle des modes de pluies.....	118
Figure 5.7 : Champs saisonniers moyens climatologiques du vent à 10 m de NCEP et des modèles, pour les mois de juin à août, en m/s, période 1991-2001.....	121
Figure 5.8 : Identique à la figure 5.7 mais pour le vent à 850 hPa, en m/s.....	122
Figure 5.9 : Identique à la figure 5.7 mais pour l'humidité spécifique au niveau 850 hPa, en g/kg... ..	122
Figure 5.10 : Identique à la figure 5.7 mais pour le vent U au niveau 200 hPa, en m/s.....	123
Figure 5.11 : Configurations spatiales des quatre premiers modes ACP sur le vent à 10 m de NCEP et ENSEMBLES.	123
Figure 5.12 : Identique à la figure 5.11 mais pour le vent au niveau 850 hPa.....	124
Figure 5.13 : Identique à la figure 5.11 mais pour l'humidité spécifique au niveau 850 hPa, unité : coefficient de corrélation.....	124
Figure 5.14 : Identique à la figure 5.11 mais pour le vent U au niveau 200 hPa, unité : coefficient de corrélation.....	125
Figure 5.15 : Configurations spatiales des modes 1 (gauche), 2 (milieu), et 3 (droite) de variabilité de la pluie CMAP, considérée pendant les mois de juin à août dans la période 1991-2001.....	126

Figure 5.16 : Distribution des corrélations entre les simulations des modèles (PP= prévisibilité potentielle) pour les premiers modes de variabilité de la dynamique atmosphérique.....	127
Figure 5.17 : Cartes composite (pluvieux – sec) des champs standardisés de TSM, température à 1 000 hPa (T1000), température à 200 hPa (T200), d’ESH, de pression (PNM), vent à 1 000 hPa (Vent1000) et vent à 200 hPa (Vent200) en mai, associées au prédicant nord Vietnam en juin-août. Les aplats gris indiquent les points de grille significatifs à 95 % au regard du test en t de Student. Les carrés délimitent les prédicteurs potentiels. La couleur rouge (bleu) indique les prédicteurs retenus (écartés) dans le modèle de prévision.....	133
Figure 5.18 : Nuage de points entre les cumuls de pluies observés et prévus pour l'indice nord Vietnam (valeurs standardisées).....	134
Figure 5.19 : Identique à la figure 5.17 mais pour le prédicant sud Vietnam en juin-août.....	137
Figure 5.20 : Identique à la figure 5.18 mais pour l'indice sud Vietnam.....	138

Liste des tableaux

CHAPITRE 1

Tableau 1.1 : Pourcentage de données de pluies manquantes sur les sept régions du Vietnam pendant la période 1960-2000.....	13
Tableau 1.2 : Pourcentages de données manquantes sur vingt stations du Vietnam pendant la période 1979-2004.....	14
Tableau 1.3 : Pourcentages de données de températures manquantes sur les sept régions du Vietnam pendant la période 1960-2000.....	14
Tableau 1.4 : Les stations météorologiques du Vietnam utilisées dans cette étude.....	15
Tableau 1.5 : Récapitulatif des principales caractéristiques des champs mensuels et journaliers des réanalyses NCEP/DOE AMIP-II utilisées.....	18
Tableau 1.6 : Poids relatifs au test LEPS pour un tableau croisé 3x3	26

CHAPITRE 2

Tableau 2.1 : Les caractéristiques des sept stations de la région Taybac (période 1960-2000).....	31
Tableau 2.2 : Les caractéristiques des sept stations de la région Dongbac (période 1960-2000).....	35
Tableau 2.3 : Les caractéristiques des sept stations de la région DBBB (période 1960-2000).....	37
Tableau 2.4 : Les caractéristiques des huit stations de la région BTB (période 1960-2000).....	39
Tableau 2.5 : Les caractéristiques des cinq stations de la région NTB (période 1960-2000).....	42
Tableau 2.6 : Les caractéristiques des quatre stations de la région Taynguyen (période 1960-2000).....	43
Tableau 2.7 : Les caractéristiques des cinq stations de la région Nambo (période 1960-2000).....	45
Tableau 2.8 : Le cycle annuel de pluie avec deux maxima au Nambo.....	46
Tableau 2.9 : Coefficients de corrélation linéaire entre les séries pluviométriques de sept régions climatologiques traditionnelles. Les signes *, **, *** si significatif à p=0.1, 0.05 et 0.01 respectivement.....	48
Tableau 2.10 : Les stations et les moyennes annuelles de pluie des six classes.	53
Tableau 2.11 : Coefficients de corrélation entre les séries pluviométriques des dix sous-régions. Les signes *, **, *** si significatif à p=0.1, 0.05 et 0.01 respectivement.....	54

CHAPITRE 3

Tableau 3.1 : Fréquences du Front polaire sur le Vietnam (occurrences).....	61
Tableau 3.2 : Nombre de typhons atteignant les côtes du Vietnam sur une période de cinquante-cinq ans (de 1911 à 1965).....	64

Tableau 3.3 : Les températures de données du NCEP et d'observations, période 1979-2000 : températures NCEP (20.0°N-21.9°N, 105°E-106.9°E, 2^e colonne) et températures observées aux stations en région DBBB (3^e colonne) ; NCEP (18.0°N-20.0°N, 105°E-106.9°E, 4^e colonne) et région BTB (5^e colonne) ; NCEP (12.4°N-16.2°N, 108.75°E-110.6°E, 6^e colonne) et région NTB (7^e colonne) ; NCEP (8.6°N-10.52°N, 105°E-106.9°E, 8^e colonne) et région Nambo (9^e colonne). Unité : degrés Celsius.....65

Tableau 3.4 : Les vents de données du NCEP au point de grille 20°N-105°E sur la période 1979-2004 et le vent observé à la station de Hanoi (21.03°N-105.85°E) pour la période 1971-2000.....73

Tableau 3.5 : Précipitations in situ et estimations CMAP (en mm) pour la période mai-octobre 1979-2000, différences relatives in situ – CMAP exprimées en pourcentages et coefficients de corrélation testés par méthode de Monte Carlo(*, **, *** pour la significativité à p=0.10, 0.05 et 0.01). La 2^e colonne présente les cumuls de pluie de mai à octobre de région TAYBAC et la précipitation estimée CMAP de point 21.25°N-103.75°E ; la 3^e colonne : DONGBAC et deux points 21.25°N-103.75°E, 106.25°E ; la 4^e colonne : DBBB et le point 21.25°N-106.25°E ; la 5^e colonne : BTB et deux points 18.75°N-16.25°N, 106.25°E ; la 6^e colonne : NTB et trois points 16.25°N-13.75°N-11.25°N, 106.25°E ; la 7^e colonne : TAYNGUYEN et deux points 13.75°N-11.25°N, 106.25°E ; la 8^e colonne : NAMBO et quatre points 11.25°N-8.75°N, 106.25°E-108.75°E.....77

CHAPITRE 4

Tableau 4.1 : Caractéristiques des stations sélectionnées.....83

Tableau 4.2 : Les dates d'onset de la saison des pluies dans le sud Vietnam pendant la période 1979-2004.....85

Tableau 4.3 : Coefficients de régression en valeurs standardisées pour les quatre prédicteurs sélectionnés : PNMcn18, ventvn20, OLRbg18 et OLRid20. Le coefficient de corrélation $R^2_{cv} = 0.56^{***}$, le score de RMSE = 0.56, le score de mvif = 1.19.....95

Tableau 4.4 : Les dates d'onset prévues et observées après classification dans trois catégories (précoce normal et tardif).....96

Tableau 4.5 : Caractéristiques des stations sélectionnées.....97

Tableau 4.6 : Dates de démarrage de la saison des pluies au nord Vietnam, période 1979-2004.....99

Tableau 4.7 : Coefficients de régression en valeurs standardisées pour les quatre prédicteurs sélectionnés : PNMcn19, vntvn22, OLRar19 et OLRbg20. $R^2_{cv} = 0.43^{***}$, le score de RMSE = 0.60, le score de mvif = 1.32..... 107

Tableau 4.8 : Dates d'onset prévues et observées après classification en trois catégories (tôt, normal et tard) avec une ADL..... 108

CHAPITRE 5

Tableau 5.1 : Corrélations entre les composantes principales des modèles et celles de CMAP. Les signes *, **, *** indiquent une significativité à p=0.1, 0.05 et 0.01 respectivement en tenant compte de l'autocorrélation dans les séries..... 114

Tableau 5.2 : Corrélations entre les composantes principales de la dynamique atmosphérique d'ENSEMBLES et celles de NCEP. Les signes *, **, *** indiquent une significativité à p=0.1, 0.05 et 0.01 respectivement en tenant compte de l'autocorrélation dans les séries.....125

Tableau 5.3 : Coefficients de corrélation (x100) entre d'une part les composantes principales de pluies CMAP et d'autre part les composantes principales de la dynamique atmosphérique d'ENSEMBLES et de NCEP. Les signes *, **, *** indiquent la significativité à p=0.1, 0.05 et 0.01

respectivement en tenant compte de l'autocorrélation dans les séries. Seules les valeurs significatives à $P \leq 0.1$ sont reportées.....	126
Tableau 5.4 : Corrélations entre la pluie aux stations du nord Vietnam et les composantes principales des dynamiques d'ENSEMBLES. Les signes *, **, *** si significatif à $p=0.1$, 0.05 et 0.01 respectivement en tenant compte de l'autocorrélation dans les séries.....	128
Tableau 5.5 : Coefficients de régression, coefficients de corrélation, LEPS et VIF des quatre prédicteurs sélectionnés pour la prévision des cumuls de pluie au nord Vietnam sur la période 1991-2001. RMSE =0.62, R-square = 28 %, P = 0.049, Rcv = 0.53, mvif=1.324.....	128
Tableau 5.6 : Coefficients de corrélation (x100) entre la pluie des stations du sud Vietnam sur la période 1991-2001 et les composantes principales de la dynamique atmosphérique d'ENSEMBLES. Les signes *, **, *** indiquent la significativité à $p=0.1$, 0.05 et 0.01 respectivement, dans l'hypothèse de séries ayant 31 degrés de liberté.....	129
Tableau 5.7 : Identique au tableau 5.5 mais pour l'indice sud Vietnam.....	130
Tableau 5.8 : Années utilisées pour établir les composites sèches et pluvieuses pour chacun des deux prédicteurs du Vietnam et pour lesquelles ils présentent une anomalie pluviométrique supérieure à 0.5 écart-type en valeur absolue.....	131
Tableau 5.9 : Les prédicteurs et les coefficients de régression associés au modèle de prévision des cumuls de pluie au nord Vietnam. Le RMSE =0.67, le coefficient de corrélation $R_{cv} = 0.59$, le score de mvif = 1.2.....	132
Tableau 5.10 : Le résultat de prévision de la pluie du nord Vietnam par analyse discriminante linéaire, le score de LEPS = 0.31.....	134
Tableau 5.11 : Identique au tableau 5.9 mais pour le sud Vietnam. Le RMSE =0.61, coefficient de corrélation $R_{cv} = 0.64$, le score de mvif = 1.26.....	136
Tableau 5.12 : Identique au tableau 5.10 mais pour le sud Vietnam ; le score de LEPS = 0.24.....	138

Annexes