



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

TRAVAIL DE MASTER 2010

Impact du changement climatique sur les précipitations:
Application d'une méthodologie de simulation de séries de
pluies sous un climat altéré

Responsable: Marc Soutter
Encadrement : Xavier Beuchat



Maite Ramos Plaza

Étudiante en échange à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Sciences et Ingénierie de l'Environnement

Laboratoire d'Eco Hydrologie (ECHO)

Étudiante à l'Universidad Politécnica de Madrid

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION ET CONTEXTE DU TRAVAIL. LE PROJET SWITCH.....	3
2. OBJECTIF DU PROJET DE MASTER.	5
3. DESCRIPTION DE LA PROBLEMATIQUE. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	6
4. MODELISATION DU CLIMAT ET LE PROBLEME D'ECHELLE.....	9
4.1 MODÉLISATION DU CLIMAT	9
4.2 RÉDUCTION D'ÉCHELLE	11
1. Réduction d'échelle statistique.....	11
2. Réduction d'échelle dynamique : Modèles Régionaux du Climat (RCM).....	11
5. DEMARCHE.....	13
6. REDUCTION D'ECHELLE DES PLUIES AU NIVEAU JOURNALIER.....	14
6.1 LES MODÈLES LINÉAIRES GÉNÉRALISÉS	14
6.2 CONSTRUCTION DE MODÈLE.....	15
6.2.1. Principe de la modélisation.....	15
6.2.2. Les composants du modèle.	15
6.2.3. Calibration	16
6.2.4. Validation.....	17
6.2.5. Simulation	17
6.3 DOUBLE VALIDATION	17
7. REDUCTION D'ECHELLE DES PLUIES AU NIVEAU HORAIRE.	19
7.1 PRINCIPE THÉORIQUE: MODÈLE DE NEYMAN-SCOTT À PULSES RECTANGULAIRES	19
7.2 CONSTRUCTION DU MODÈLE AVEC RAINSIM	20
7.3 LE PROBLÈME DES DONNÉES HORAIRES.....	21
7.4 SIMULATION DES PLUIES HORAIRES	21
8. DONNEES	23
9. CAS D'ETUDE	25
9.1 SCÉNARIOS TRAITÉS	25
9.2 LES CAS D'ÉTUDE	26
9.2.1. Lugano (LUG): Simulation journalière et horaire pour un seul site.....	26
9.2.2. Madrid: Simulation journalière et horaire pour un seul site.	43
9.2.3. Tessin: Calibration et Validation d'un modèle de pluies journalières pour le cas multi-site.	52
10. CONCLUSION	58
12. ANNEXES	60
13. BIBLIOGRAPHIE.....	79

1. Introduction et contexte du travail. Le projet Switch.

Mon projet de Master s'inscrit dans le contexte d'un projet européen appelé Switch, un programme de recherche qui englobe trente trois organismes de quinze pays différents, et qui est voué à l'étude des systèmes de gestion d'eau urbaine.

L'objectif est l'amélioration de la qualité de ces systèmes, leur gestion efficace et durable, ainsi que la garantie de l'approvisionnement de l'eau pour la population. Cette vision du projet Switch pour la gestion de l'eau urbaine est recueillie dedans le concept appelé 'la ville du futur'.

Tout le travail développé au sein de Switch est véhiculé aux décideurs et la société civile grâce aux 'Learning Alliances', qui sont présentes dans dix villes pilotes avec la participation de chercheurs et divers organismes, mais aussi, en grande partie de représentants de la société civile¹.

Devant les changements qui affectent actuellement notre planète et notre société, le projet Switch vise à identifier et étudier les pressions qui affectent les systèmes de gestion de l'eau urbaine.

Quand nous parlons de pressions nous nous rapportons aux variables qui affectent son fonctionnement, et qu'en conséquence nous devons être capables de contrôler pour s'assurer que le système évolue bien. Actuellement ces pressions occasionnent l'augmentation des coûts et des risques, ainsi qu'une gestion de l'eau urbaine plus difficile et une diminution de la qualité de l'eau² (Figure 1).

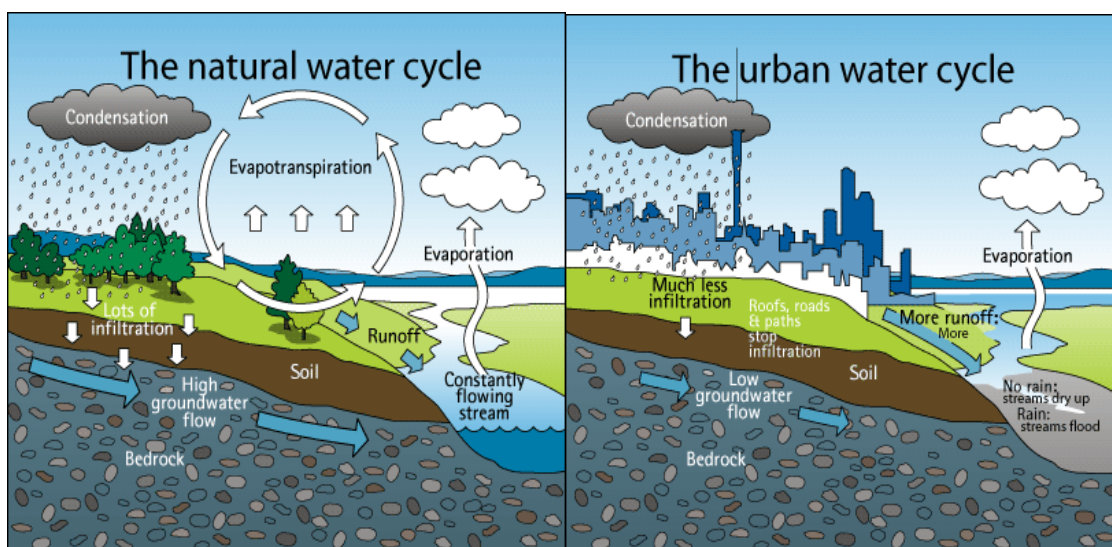


Figure 1. Comparaison entre le cycle naturel et le cycle urbaine de l'eau. Source: Auckland city Council. www.aucklandcity.govt.nz/council/services/stormwater/about.asp

L'eau de pluie est un aspect fondamental dans la gestion des eaux urbaines.

Pendant beaucoup d'années la pratique habituelle pour le drainage urbain de l'eau de pluie a été son déplacement en dehors de la ville. Comme conséquence de ces pratiques les rivières ont perdu leur richesse naturelle et leur capacité de réponse face aux les crues. En même temps, les systèmes d'égouts ne sont pas capables de répondre d'une manière appropriée à l'augmentation du développement urbain, et peuvent occasionner des

¹ www.switchurbanwater.eu

² Stormwater Management. Project documents 2006. www.switchurbanwater.ch/outputs/results.php

inondations [Castro Fresno, D., Rodriguez Bayon, J., Rodriguez Hernandez, Jorge *et al.*, (2005)].

Un autre problème ajouté est la qualité de l'eau des ruissellements et ses impacts: actuellement l'eau de pluie est une importante source de contamination.

Les problèmes de qualité de l'eau sont occasionnés fondamentalement par la contamination des récepteurs des ruissellements urbains. L'origine de cette contamination a des sources diffuses: en général, des rejets en provenance des stations d'épuration débordées ou des déchargements des systèmes unitaires. L'imperméabilisation du sol urbain modifie les flux naturels du cycle hydrologique (infiltration des eaux), en même temps que la réduction de la végétation réduit l'évapotranspiration. Comme conséquence des volumes plus grands de ruissellements sont générés et les temps de réponse sont plus rapides, donc le risque d'inondations augmente [Perales Momparler, S., Andrés-Doménech I. (2007)].



Comme réponse à ces problèmes les Systèmes Durables de Drainage Urbain ('Sustainable Urban Drainage systems', SUDs), aussi appelés BMP's (Best Management Practices), émergent avec l'objectif de protéger et d'améliorer la qualité de l'eau, d'éviter des inondations, de permettre le rechargement d'aquifères et le développement urbain de nouvelles zones dans la ville.

La philosophie des SUDs est de reproduire le cycle hydrologique naturel. Son objectif est de minimiser les impacts du développement urbain en ce qui concerne la quantité et la qualité des ruissellements, et aussi maximiser

l'intégration paysagère [Perales Momparler, S., Andrés-Doménech I. (2007)].

Figure 2. Cycle durable de l'eau en milieu urbaine. Source: Auckland city Council. www.aucklandcity.govt.nz/council/services/stormwater/about.asp

Quelques unes de ces techniques sont l'utilisation de mesures préventives (réduction du ruissellement superficiel et le drainage vers des zones vertes et des espaces ouverts), l'utilisation de pavés perméables qui permettent le passage de l'eau et la filtration des substances polluantes, des puits, des fossés, des bassins d'infiltration etc. (Figure 3). [Perales Momparler, S., Andrés-Doménech I. (2007)].

Nous voyons donc que l'étude des eaux de pluies est cruciale lorsque l'on s'intéresse à la gestion des eaux urbaines, raison par laquelle ce sujet est traité par le projet Switch.

Dans ce projet de Master on traitera l'influence du changement climatique comme facteur potentiel d'altération des événements pluvieux, et en conséquence comme possible pression sur les systèmes de gestion de l'eau urbaine. Connaissant les impacts du changement climatique sur les pluies, il est alors possible d'évaluer les conséquences sur les systèmes de drainage urbain.

2. Objectif du projet de Master.

Mon travail de Master consiste à appliquer les concepts et les outils développés dans la thèse de doctorat de Xavier Beuchat, qui a comme objectif trouver et évaluer l'impact potentiel du changement climatique sur les systèmes de gestion de l'eau de pluie en milieu urbain, ainsi que la recherche d'alternatives qui diminuent ces impacts.

Mon projet s'inscrit dans la première partie de ce travail, où le but est le développement d'une méthodologie pour la production de séries de pluies à haute résolution temporelle dans une situation de changement climatique et pour une localisation définie.

Le travail qu'on traite ici consiste en la création de scénarii probabilistes de pluies avec l'échelle de temps et d'espace nécessaire pour l'application des données obtenues pour l'étude des systèmes hydrologiques urbains.

Les objectifs fixés pour mon travail de Master sont :

- La compréhension et l'appropriation de la méthodologie de production de séries de pluies futures,
- Son application à différents cas d'étude,
- Analyser de manière critique les résultats.

3. Description de la problématique. Le changement climatique.

Pendant les dernières années le changement climatique est devenu un sujet d'actualité continu. Les controverses créées n'ont pas été peu nombreuses.

Le Panel Intergouvernemental sur le Changement Climatique (IPCC) est l'organisation principale chargée de l'évaluation du changement climatique, établi selon le Programme d'Environnement des Nations Unies (UNEP) et l'Organisation Mondiale Météorologique (WMO) pour offrir au monde une vue scientifique et claire sur l'état du changement climatique et de ses potentielles conséquences environnementales et socio-économiques³.

L'IPCC définit le changement climatique comme tout changement produit à cause, ou bien de la variabilité de la nature, ou bien comme résultat de l'activité humaine.

Dans son rapport 'Climate Change 2007: The Physical Science Basis' [IPCC, WG I, 2007], l'IPCC établit qu'actuellement le changement climatique est manifeste, si l'on se base sur les observations directes de l'augmentation de la température de l'air et des océans, de l'augmentation de la fonte de la glace et de la neige et de l'élévation du niveau de la mer (Figure 3). Aussi il associe tous ces changements, avec *une haute probabilité*, à l'augmentation de la concentration du CO₂ anthropogénique qui a eu lieu depuis la deuxième partie du XX^{ème} siècle.

Pourtant, il indique aussi que quelques aspects du climat ne présentent pas de changement. Par exemple, l'augmentation de l'activité de cyclones dans quelques régions de la planète est associée à l'amélioration de la technologie qui permet l'enregistrement de ces phénomènes et pour le moment l'IPCC considère qu'il n'y a pas une claire tendance pour la quantité de cyclones annuels. L'étendue de la glace en l'Antarctique présente des variations annuelles et des changements ponctuels localisés, mais ils ne sont pas significatifs statistiquement. D'autres exemples sont des phénomènes de petite échelle comme des tornades, des éclairs, de la grêle ou des tempêtes de sable.

Selon ce même rapport les effets possibles du changement climatique sont multiples. L'augmentation de la température de surface n'est pas la seule altération attendue; la modification des températures extrêmes (plus chaud mais aussi plus froid), la modification de la fréquence de phénomènes comme les ouragans, les cyclones, des vents et des pluies extrêmes, la réduction de la couverture de glace, sont quelques exemples des conséquences possibles.

L'altération du cycle de l'eau sera un des effets les plus prononcés qui est attendu, et comme résultat des impacts hydrologiques doivent être attendus. Les phénomènes de pluies forment une partie fondamentale de ce cycle et, en conséquence, on attend que son comportement soit aussi altéré.

La question centrale est donc de savoir comment étudier les effets du changement du climat si l'on ne connaît pas encore la magnitude qu'aura ce changement dans le futur.

Avec la finalité de permettre cette étude, l'IPCC a créé différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (GHG) qui essaient de représenter un grand éventail de situations futures probables.

³ www.ipcc.ch

Ces scénarii sont présentés dans le ‘Special Report on Emissions Scenarios’ (SRES) de l’année 2000 [IPCC, WG III, 2000]. Dans chaque scénario on peut trouver différentes suppositions d’émissions de gaz d’effet de serre associés à différentes situations du développement démographique, socio-économique et technologique.

Face à la grosse incertitude de la évolution du climat, l’objectif est d’utiliser ces scénarios d’émissions pour la représentation de plusieurs ‘situations climatiques futures’ qui permettent modéliser l’impact, l’adaptation et la atténuation du changement climatique.

C’est important de dire que, dans ce rapport, les scénarios créés n’incluent pas la possibilité de désastres naturels ou d’événements surprises⁴. Il n’y pas, non plus, de considérations sur les initiatives environnementales pour réduire l’effet de serre, comme par exemple le ‘Protocole de Kioto’.

Le résultat est quatre familles de scénarios développés par l’IPCC. Chacune de ces familles montre un type de relation entre les émissions de gaz d’effet de serre et les différentes situations démographiques, sociales, économiques, technologiques et environnementales. (Figure 4).

Dans chaque famille il y a aussi différents scénarios traités avec l’objectif de faire la représentation du futur plus étendue. Au total, quarante scénarios apparaissent dans ce rapport.

Une fois ces scénarios d’émissions de gaz à effet de serre en main, l’aspect suivant est d’en estimer les impacts potentiels sur notre climat futur.

L’outil principal pour prédire l’évolution du climat est une classe de modèles que l’on nomme modèles de circulation générale (GCM). Il s’agit de modèles numériques qui décrivent principalement la dynamique de l’atmosphère et des océans.

Ainsi, en conditionnant les GCM selon les scénarios d’émissions de gaz à effet de serre, nous pouvons modéliser l’impact de ces émissions sur le climat futur.

⁴ Quelques phénomènes surprises qui pourraient arriver à cause du changement climatique sont, par exemple, le refroidissement de l’Europe à cause de l’altération des courants marins, ou le dégel de la Toundra de l’Arctique que libérerait une grande quantité de tonnes de dioxyde de carbone stocké pendant milliers d’années.

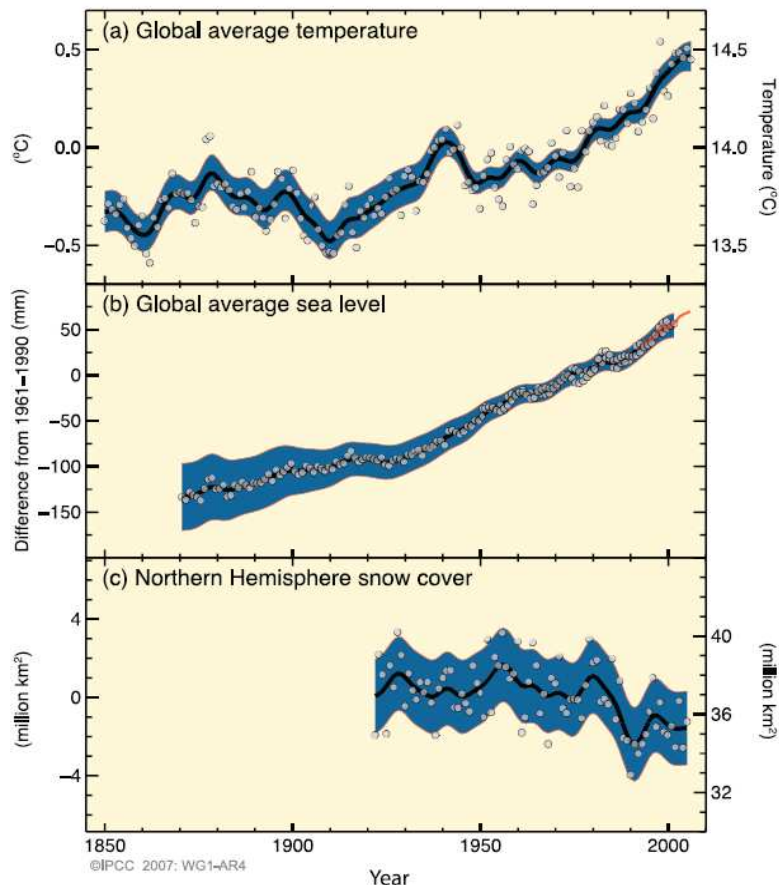


Figure 3. Changements observés de la température (a), niveau global de la mer (b) et couche de neige dans l'hémisphère nord, pour la période 1961-1990. Source: IPCC, WG I. Climate Change 2007: The Physical Science Basis.

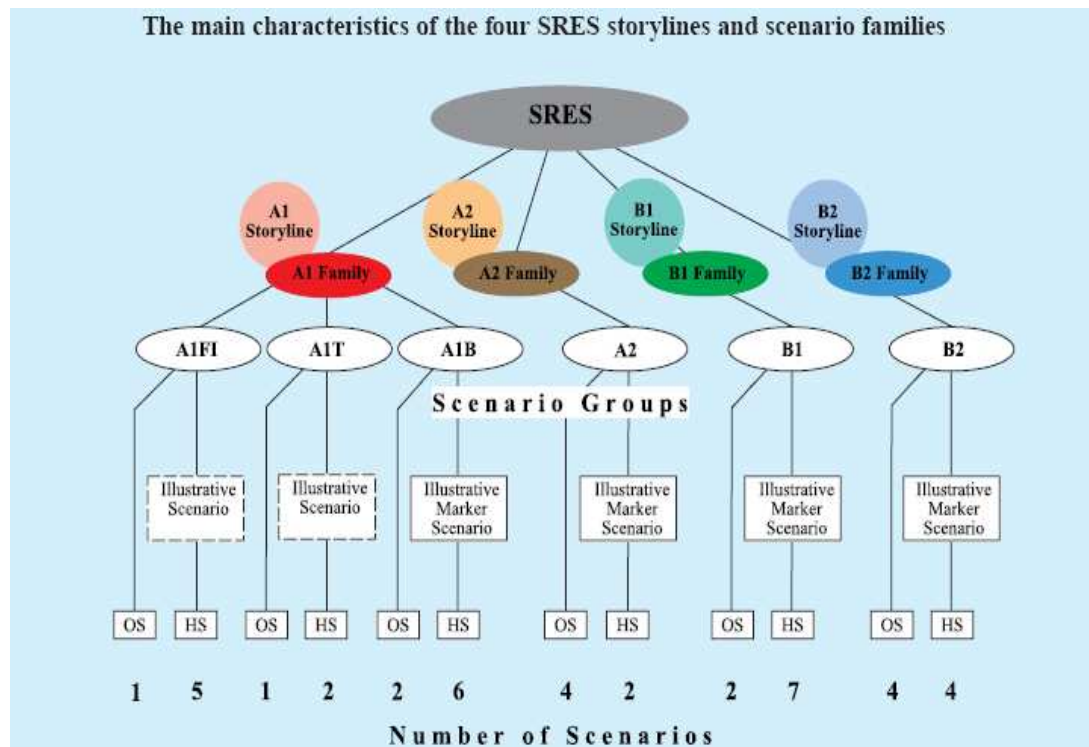


Figure 4. Illustration des différents scenario de l'IPCC. Source: IPCC, WG III, 2000 Emissions Scenarios.

4. Modélisation du Climat et le problème d'échelle

4.1 MODÉLISATION DU CLIMAT

La modélisation du climat est accomplie avec des modèles mathématiques déterministes des processus atmosphériques et océaniques qui déterminent l'évolution du climat dans chaque zone géographique de la planète.

Les modèles climatiques ont l'objectif de décrire le comportement du climat grâce à un certain nombre d'équations gouvernantes (par exemple: équations dynamiques, thermodynamiques, conservation de la masse...)

De plus en plus on parle de modèles couplés car on ne traite plus les compartiments de manières séparée, au contraire ceux-ci interagissent entre eux (Figure 5).

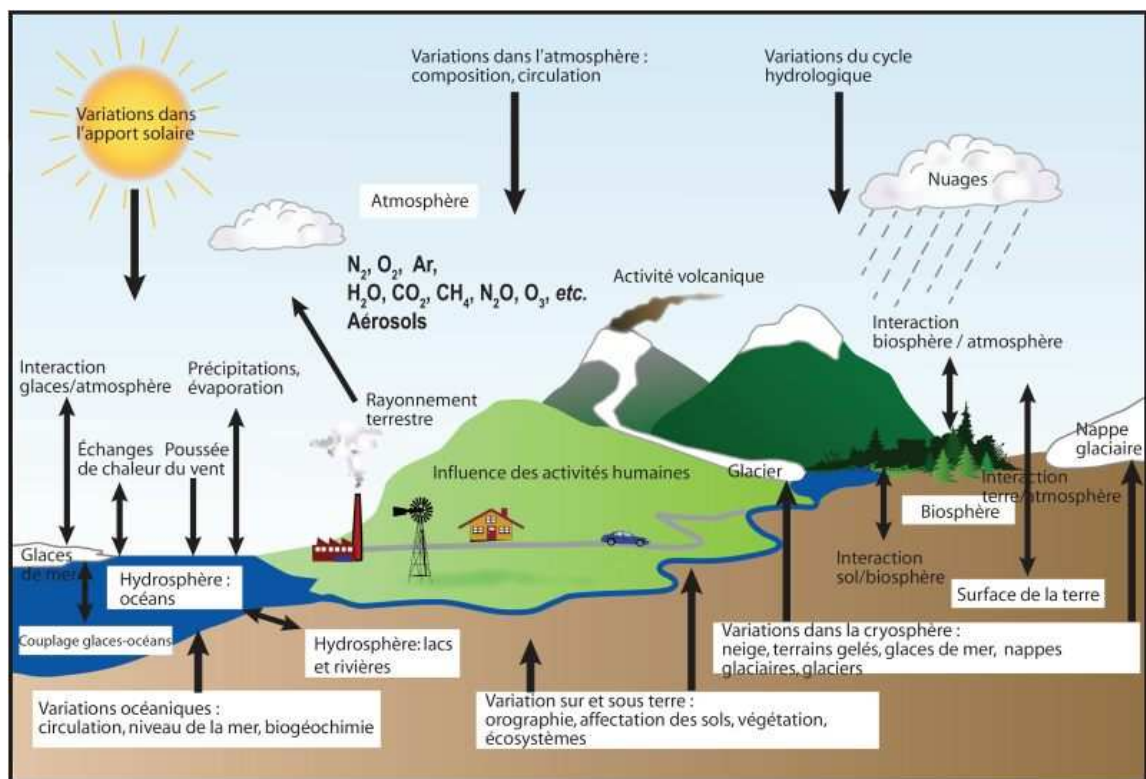


Figure 5: Représentation simplifiée des composantes du système climatique, de leurs processus et des interactions à partir desquels les GCM sont construits. Source: IPCC, 2007b.

<http://sciences.e-noria.fr/CLIMAT-DU-PASSE-QUELS,199.html>

Pour obtenir les valeurs des variables climatiques à partir de ces équations associées aux modèles climatiques il est nécessaire de résoudre des équations différentielles non linéaires. Pour pouvoir affronter ce problème des méthodes numériques sont nécessaires pour convertir le problème continu en un problème discret dont nous pouvons obtenir des solutions explicites [Lezaun, M. (2006)].

Le problème associé aux GCM est que le temps du calcul nécessaire pour résoudre les équations est très grand. Pour cette raison la division de l'atmosphère en mailles assez grossières est nécessaire. Plus la taille de la maille est petite, plus de résolution aura le modèle climatique, mais aussi plus haute sera le temps nécessaire pour le calcul.

Les GCM ont en général une résolution d'environ 150-300 Km (2.5° latitude x 3.5° longitude⁵).

L'idée est donc la discrétisation de l'atmosphère en petits volumes (figure 6). Dans ces volumes les variables d'intérêt prennent la même valeur, en conséquence la solution du système dépendra des interactions et relations entre les cellules adjacentes et de son évolution en cours du temps [Lezaun, M. (2006)].

Pour quelques processus, l'échelle des cellules choisie peut-être trop petite pour bien les représenter.

En particulier, les équations numériques de chaque modèle sont seulement capables de résoudre de manière adéquate les processus météorologiques qui ont lieu à une échelle spatiale comparable à la taille de cellule qui caractérise notre modèle. Les effets des processus atmosphériques qui agissent à une résolution plus petite que l'échelle du modèle sont déduits à partir de schéma paramétriques [de Castro, M. (2007)]

Les sources d'incertitudes et la qualité des modèles actuels sont étroitement liées à ces représentations paramétriques.

Nous devons souligner que pour l'échelle typique des GCM plusieurs processus importants pour le cycle hydrologique ne peuvent pas être résolus explicitement parce qu'ils agissent à des échelles spatiales plus fines⁶.

Il serait dangereux donc d'utiliser les prévisions des précipitations que les GCM donnent quand on traite les études d'impact hydrologique.

C'est important aussi ajouter que les GCM ne produisent des résultats plausibles qu'à des échelles de temps mensuelles ou supérieures.

Pour les études d'hydrologie urbaine ils sont nécessaires des séquences de pluies à niveau horaire ou inférieur [Beuchat, X (2010)]. Dès lors, un problème d'échelle existe: c'est le problème du 'downscaling' ou de la mise à échelle.

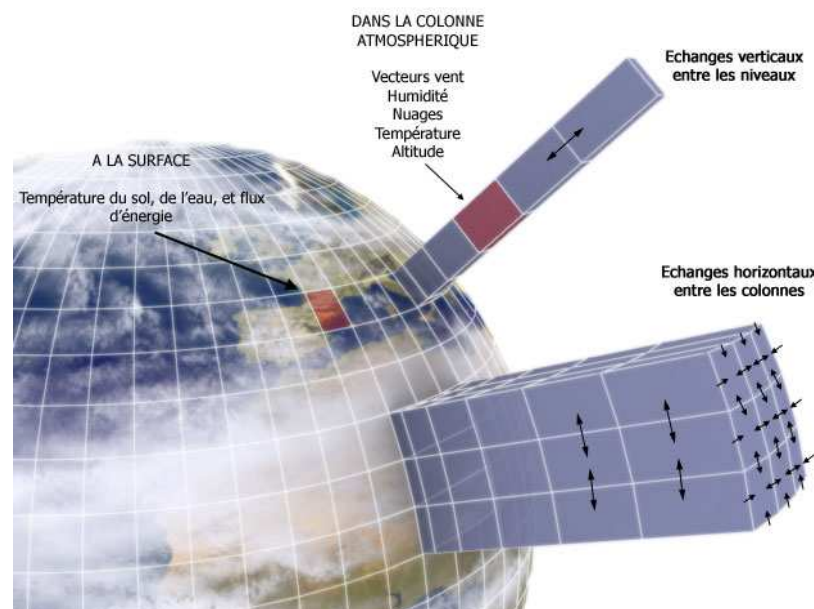


Figure 6. Construction d'un modèle climatique. Source: <http://climatevolution.free.fr/i2.html>

⁵ <http://climateprediction.net/content/regional-climate-models>

⁶ Par exemple, formation des nuages, orographie, précipitations...

4.2 RÉDUCTION D'ÉCHELLE

Pour la réalisation d'une étude des pluies au niveau hydrologique il est nécessaire d'appliquer une méthodologie de réduction d'échelle. C'est important de s'assurer que la méthodologie utilisée soit robuste et ne soit pas sensible aux différents types de climats; et flexible, c'est-à-dire extrapolable à différents localisations sans la perte de qualité. Dans le domaine d'étude des pluies, il y a deux méthodologies qui peuvent être utilisées :

1. Réduction d'échelle statistique

La méthodologie statistique consiste à déterminer les relations statistiques qui existent entre une certaine quantité des données connues de la variable à modéliser, la pluie; et certains variables atmosphériques, à partir desquels nous pourrions faire l'étude des effets du changement climatique [Wheater et al. (2005)].

En conséquence l'objectif de cette méthodologie est d définir quelles sont les variables qui représentent le mieux les événements pluvieux à un niveau temporel et spatial donné, et pour un modèle statistique donné, en vérifiant le bon accord entre les caractéristiques statistiques des simulations du modèle et celles des données utilisés pour la construction du modèle.

2. Réduction d'échelle dynamique : Modèles Régionaux du Climat (RCM)

Les modèles climatiques régionaux sont similaires aux GCM, mais avec une résolution temporelle plus haute et concentrés en une partie spatial plus petite de la planète. Les RCM sont capables de représenter l'information climatique avec une résolution d'environ 25-50 Km⁷. Avec eux c'est possible résoudre certains processus atmosphériques qui sont paramétrisés dans un modèle climatique global, en même temps que la topographie est aussi mieux représentée.

Les RCM et les GCM sont typiquement couplés, en raison de la nécessité d'obtenir des conditions frontières pour les RCM (les conditions proviennent du GCM vers le RCM, l'information est seulement unidirectionnelle). Pour la réalisation de ce couplage entre les GCM et les RCM, c'est important que le modèle global soit réaliste dans la région d'intérêt (bon accord entre les données observées et les prévisions du modèle).

De cette manière, les prédictions des précipitations des RCM sont beaucoup plus réalistes, par rapport aux GCM et, en général, les événements extrêmes sont aussi beaucoup mieux représentés. Toutefois, il y a un certain nombre de problèmes⁸ associés aux RCM :

- Leurs besoins informatiques sont hauts en termes de temps de calcul ce qui limite drastiquement les expériences réalisables.
- La relation unidirectionnelle de l'information entre GCM et RCM fait que les GCM ne profitent pas du développement des RCM.
- Sa résolution n'est pas illimitée, donc leur utilisation pour les études d'impact hydrologie a aussi des limitations.
- Ils sont très sensibles aux erreurs systématiques en provenance des modèles globaux qui déterminent ses conditions frontières.

⁷ Source: <http://climateprediction.net/content/regional-climate-models>

⁸ Source: http://www.cccsn.ca/Help_and_Contact/Regional_Climate_Models-f.html

Les modèles statistiques quant à eux sont moins coûteux en ressources informatiques que les dynamiques. Mais aussi ils présentent également quelques inconvénients [Beuchat, X., (2010)]:

- Leurs besoins d'une grande quantité de données pour effectuer la calibration.
- La supposition d'une relation stationnaire au cours du temps entre les variables du modèle atmosphérique et les pluies, une supposition difficilement vérifiable dans le contexte du changement climatique.

5. Démarche

Notre stratégie de travail sera l'obtention de séries de pluies au niveau journalier et horaire à partir de la méthodologie de réduction d'échelle statistique. Nous avons choisi cette méthode car elle est facile à mettre en œuvre et nécessite peu de ressources informatiques. Il convient souligner que plusieurs villes du monde participent au projet Switch, c'est pourquoi une méthodologie applicable à toute la planète est nécessaire pour ce projet. Les expériences avec RCM sont seulement disponibles pour quelques régions, autre raison par laquelle les méthodes statistiques sont choisies.

Dans ce projet le premier pas sera la réalisation du modèle de pluies qui définit le comportement des précipitations à échelle journalière. Nous utilisons les Modèles Linéaires Généralisés.

Le pas suivant est la réalisation de la réduction d'échelle à niveau horaire. Néanmoins, à cause de la structure complexe des pluies horaires les modèles linéaires généralisés ne sont pas adaptés à la production des séries horaires.

Dès lors, nous utilisons les modèles de Neyman-Scott à pulses rectangulaires, avec lesquels nous serons capables d'obtenir séries de pluies à niveau horaire (mais qui sont mal adaptés à la production de séries sub-horaires).

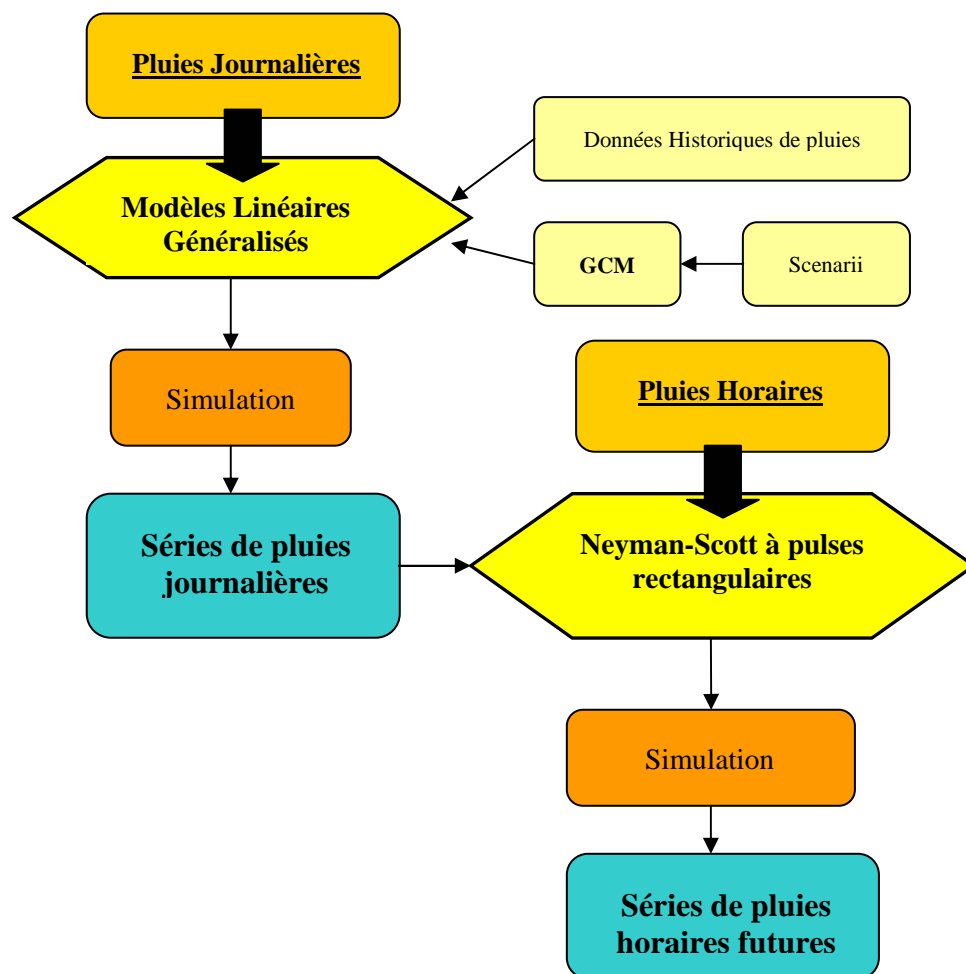


Figure 7. Schéma de la marche à suivre.

6. Réduction d'échelle des pluies au niveau journalier

La première partie du travail consiste en la réalisation de la réduction d'échelle pour les pluies au niveau journalier en utilisant la méthodologie statistique.

Pour atteindre cet objectif notre stratégie choisie est l'utilisation du logiciel GLIMCLIM, développé par Chandler et Wheeler [Chandler, R.E. (2002)]. Cette méthodologie est basée sur des Modèles Linéaires Généralisés (Generalized Linear Models, GLM), avec l'objectif de modéliser et simuler des pluies journalières.

6.1 LES MODÈLES LINÉAIRES GÉNÉRALISÉS

Les modèles linéaires généralisés (GLM) sont des modèles statistiques qui peuvent simuler de façon réaliste des séries de variables climatiques et météorologiques.

Les modèles linéaires généralisés sont spécialement appropriés pour la modélisation de pluies à cause de leur nature non linéaire. Par ailleurs, leur interprétation demeure assez facile et aussi leur besoin en ressources informatiques est assez bas [Yang, C., (2005)].

Les modèles linéaires généralisés permettent étudier la liaison entre une variable dépendante ou variable à expliquer 'Y' et quelques variables explicatives ou prédicteurs 'X₁.... X_K'. Ils ont la forme suivante:

$$E(Y) = \mu = g(\beta X)$$

Les modèles linéaires généralisés ont donc trois composants [Causeur, D. (2010)] :

1. La variable réponse (Y), qui est la variable à modéliser;
2. Les variables explicatives ou des prédicteurs (X₁....X_K), qui sont les variables avec lesquelles nous essayons d'expliquer le comportement de la variable réponse;
3. Le lien, g, qui décrit la relation mathématique entre la variable réponse et les prédicteurs.

Le logiciel utilisé, GLIMCLIM, utilise deux modèles linéaires généralisés différents: un modèle pour l'occurrence des pluies et un second modèle qui représente la distribution des pluies pour les jours pluvieux [Chandler, R. (2002)].

I. Modèle d'occurrence.

Le modèle d'occurrence est représenté par un modèle de Régression Logistique. Ce type de modèle a la forme suivante :

$$\text{logit}(p_i) = \ln \left\{ \frac{p_i}{1-p_i} \right\} = \beta_0 + \beta_1 X_{1,i} + \dots + \beta_k X_{k,i}$$

La variable réponse, la pluie, prend dans ce modèle une distribution de probabilité binomiale (Annexe 1).

La variable p_i représente la probabilité de qu'un événement pluvieux ait lieu pendant le jour i. Les x_i sont les différents prédicteurs du modèle, et β_i les coefficients estimés pour ces prédicteurs. La fonction logit (p_i) représente la fonction lien [Chandler, R., (2002)].

II. Modèle de régression gamma

Pour la modélisation de la quantité de pluie, le logiciel GLIMCLIM utilise une distribution Gamma.

$$\ln \mu_i = \xi_i' \gamma_i$$

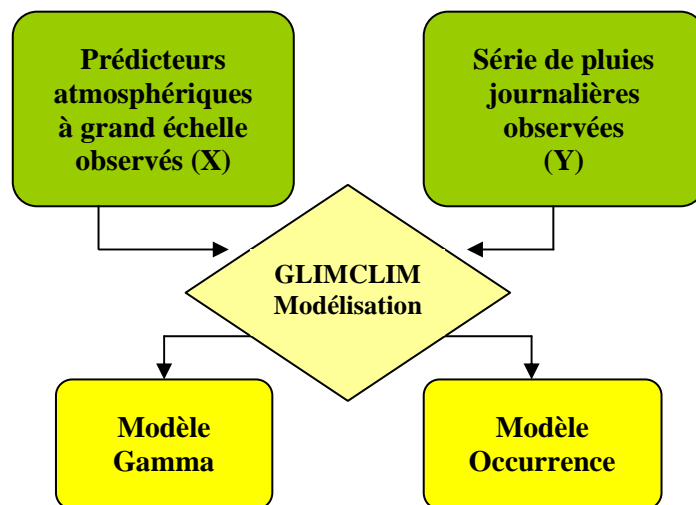
Dans ce cas, la distribution de probabilité associée à la quantité de pluie de chaque jour humide i est une distribution gamma de moyenne μ (Annexe 1).

Les paramètres ξ_i représentent les variables explicatives, et γ_i sont les coefficients estimés de la relation linéaire [Chandler, R., (2002)].

6.2 CONSTRUCTION DE MODÈLE

6.2.1. Principe de la modélisation

La construction du modèle des pluies est réalisée à partir une série de données historiques des pluies (variable réponse Y) et des prédicteurs atmosphériques (prédicteurs X). Nous cherchons à travers d'un Modèle Linéaire Généralisé la relation entre les deux.



6.2.2. Les composants du modèle.

- **Variable réponse:** La série de pluies observées doit avoir au moins 20 ans de longueur pour s'assurer que le modèle est valide pour un période de temps suffisamment représentative. Aussi c'est important que la série soit de qualité, ça veut dire, que les valeurs manquantes représentent moins de 10% des données de la série [Beuchat, X., (2010)].
- **Prédicteurs:** Les prédicteurs atmosphériques que nous utiliserons dans ce projet sont la température de l'air à la surface terrestre (TAS), la pression au niveau de la mer (PSL), l'humidité relative à 850 hPa (HUR 850), le vent zonale et le méridional à 500 hPa. (UWND 500 et VWND 500, respectivement)

La température et la pression sont deux variables choisies pour son robustesse. L'humidité relative est une variable très importante dans le processus de formation d'événements pluvieux. Le choix de 850 hPa (environ 1500m) a été pris à partir des études qui ont montré son bon fonctionnement. Le vent a été pris en compte pendant la partie finale de ce projet. Pour quelques stations où la modélisation de la pluie fonctionnait mal l'ajout du vent a donné des résultats positifs, raison par laquelle nous avons décidé inclure le vent à 500 hPa (environ 5000 m) dans la modélisation.

Les modèles statistiques supposent généralement de que les variables réponse sont indépendantes. Cette hypothèse ne paraît pas très plausible quand on traite des événements pluvieux. Pour cette raison, nous utiliserons aussi des prédictors qui permettent de décrire la structure temporelle de la pluie (par exemple, les indicateurs d'occurrence de pluie des jours précédents).

Les précipitations sont des phénomènes hautement non stationnaires. Au lieu de considérer un modèle différent pour chaque mois de l'année le logiciel GLIMCLIM permet prendre en compte dans ses modèles la saisonnalité à travers de fonctions harmoniques⁹.

La seconde manière d'introduire de la non-stationnarité dans le modèle est de permettre aux prédictors atmosphériques d'interagir entre eux et avec les autres prédictors. Par exemple, une interaction entre la saisonnalité et l'autocorrélation indique que l'influence sur les pluies des jours préalables est différente selon la saison de l'année.

GLIMCLIM est aussi capable de prendre en compte les valeurs traces de pluies, c'est-à-dire, les très petites valeurs de pluies qui sont à la limite de sensibilité du pluviomètre. Ces valeurs limites du pluviomètre représentent une grande quantité de données dans la série de pluies considérée, normalement environ un 11% des données pour les jours humides [Chandler, R. (2002)].

6.2.3. Calibration

Les GLM sont calibrés à partir des données historiques en provenance de:

- Des séries journalières observées
- Des prédictors atmosphériques observés issus de réanalyses climatiques globales (données NCEP¹⁰).

L'annexe 2 recueille les détails sur la méthodologie utilisée dans le processus de calibration.

L'objectif pour notre modèle est atteindre un équilibre entre un modèle très simple et un modèle trop spécifique pour les données avec lesquelles nous faisons la calibration. Nous ne devons pas oublier que le but final est la simulation de pluies futures et en conséquence notre modèle doit représenter des périodes différents à celle-ci de la calibration.

⁹ Une fonction harmonique est une fonction définie comme un rapport entre des sinus et des cosinus.

¹⁰ NCEP (National Centers for Environmental Prediction) a créé une base de données pour les variables atmosphériques enregistrées dans le monde entier à partir de réanalyses qui ont comme objectif de réduire les différences entre les données à cause de leurs différentes origines.

6.2.4. Validation

Une fois le modèle correctement calibré, il est important de procéder à une étape de validation pour s'assurer qu'il fonctionne également pour une période hors de la période de calibration.

Le groupe de données historiques nécessaire pour la validation doit être d'une longueur similaire à la série utilisée pour la calibration.

Une bonne concordance entre les données simulées et les données réelles nous permet de conclure que le modèle statistique de réduction d'échelle est capable de reconstruire la climatologie à partir des données observées et en utilisant variables atmosphériques liées au modèle

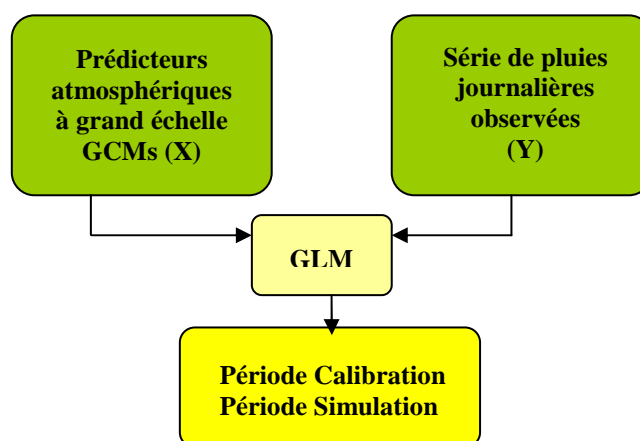
6.2.5. Simulation

L'étape suivante est la simulation des pluies futures. Pour ce faire, il suffit de remplacer les données observées NCEP par les prédictors atmosphériques à large échelle simulés par les GCM [Beuchat, X., (2010)].

Dans un premier temps il convient de vérifier que le changement des données NCEP par les données GCM n'inclus pas de perturbations dans nos résultats pour la période de calibration.

Le principe est exactement le même: il s'agit de comparer si le comportement entre les données réelles et celles qui sont simulées sont concordent.

Une fois ceci vérifié, nous pouvons utiliser les données simulées par les GCMs pour le futur avec notre modèle GLM, et simuler ainsi des pluies pour le futur selon les différences du changement climatique.



6.3 DOUBLE VALIDATION

La décision de choisir les modèles statistiques comme la méthodologie pour la création des pluies futures entraîne d'admettre l'hypothèse de stationnarité entre les prédictors atmosphériques et la série de pluie.

Une étape supplémentaire permet de savoir s'il est ou non plausible que les relations que nous trouvons dans la période de calibration sont toujours correctes dans un climat futur perturbé.

Pour tester cette hypothèse, on se base sur une méthodologie trouvée dans Vrac et al. 2007 et appelé 'double validation'¹¹. Le procédé est le suivant:

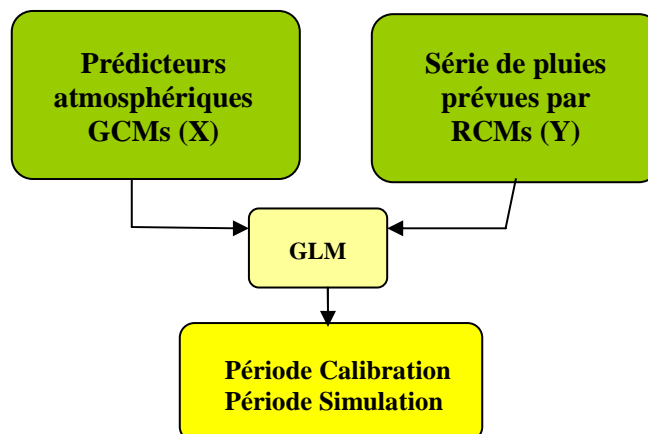
¹¹ Il considère une première validation pour la vérification d'un bon comportement du modèle pour une période historique différent à celle de la calibration, et la deuxième calibration l'ici décrit.

- Calibration de nos GLMs avec une série de pluie journalière issue d'un RCM [Beuchat, X. (2010)], et des prédicteurs atmosphériques issus du GCM couplé avec le RCM utilisé.
- Simulation pour le futur avec les GLM en utilisant les prédicteurs en provenance du GCM correspondant.
- Comparaison des simulations obtenues avec les GLMs et les prévisions du RCM, pour le futur.

Si on obtient des résultats qui vont dans le même sens que ceux des RCMs on peut considérer que notre modèle statistique est correcte.

C'est très important faire ressortir qu'avec cette validation nous pourrions évaluer seulement si ces méthodes statistiques sont capables de représenter les projections futures aussi bien que les méthodes dynamiques, c'est-à-dire, si la méthode statistique utilisée est capable de refléter la variabilité dynamique entre les précipitations et les variables atmosphériques au cours du temps.

La réalisation de cette validation implique qu'on doit disposer de données issues d'un RCM. Nous savons que cette disponibilité est limitée. Pour cette raison cette 'deuxième' calibration sera un outil que nous utiliserons pour vérifier que la méthodologie développée dans ce projet a un bon fonctionnement.



7. Réduction d'échelle des pluies au niveau horaire.

Les modèles linéaires généralisés sont un outil très fort pour la simulation des pluies journalières. Néanmoins, leur utilisation au niveau horaire n'est pas recommandable à cause de la grande quantité de paramètres qui seraient nécessaires pour la définition d'un modèle tellement complexe.

Par contre, les modèles basés sur des processus de Poisson sont une alternative à considérer (Annexe 7).

Avec cette méthode nous sommes capables de modéliser les pluies à partir des événements ponctuels, en générant séries de pluies spatiales et temporellement continues.

Les modèles de Neyman-Scott à pulses à rectangulaires sont basés sur ce type de méthode et ils sont utilisés dans ce projet pour la génération des pluies horaires grâce au logiciel RainSim [Burton (2008)].

7.1 PRINCIPE THÉORIQUE: MODÈLE DE NEYMAN-SCOTT À PULSES RECTANGULAIRES

Le principe théorique avec lequel RainSim travaille est le modèle de Neyman-Scott à pulses rectangulaires (Neyman-Scott Rectangular Pulses, NSRP).

C'est un modèle stochastique avec lequel nous pouvons générer des pluies continues dans le domaine temporel et spatial. Le principe du modèle est que chaque événement pluvieux est associé à un nombre de cellules de pluie, de façon à ce que la série temporelle de pluie soit égale à l'addition de la contribution de chacune de ces cellules.

Chaque cellule contribue de manière uniforme à l'événement pluvieux tout au long de sa vie. Le rayon, l'intensité, la durée et l'intervalle avec lequel chacune de ces cellules apparaît et produit des pluies sont aléatoires [Burton, A., (2008)].

Les paramètres qui définissent ce modèle sont :

- λ [1/h]: La fréquence avec laquelle le phénomène pluvieux a lieu, est représenté avec un processus de Poisson (annexe 1).
- v [-]: Il représente la quantité de cellules de pluie qui sont générés après l'origine de la pluie (numéro aléatoire de Poisson généré pour chaque origine d'un orage).
- β [1/h]: La fréquence d'apparition des cellules pluvieuses (distribution exponentielle, annexe 1).
- η [1/h]: Durée de vie de la cellule (distribution exponentielle).
- ζ [mm/h]: Intensité de pluie de la cellule (distribution exponentielle).

La pluie totale pour chaque instant du temps sera égale à la somme des pluies générées par chaque une des cellules actives dans ce moment (figure 8).

Une des avantages que cette méthodologie présente est que le modèle dépend de paramètres avec une signification physique. Les résultats sont, en conséquence, plus faciles d'interpréter.

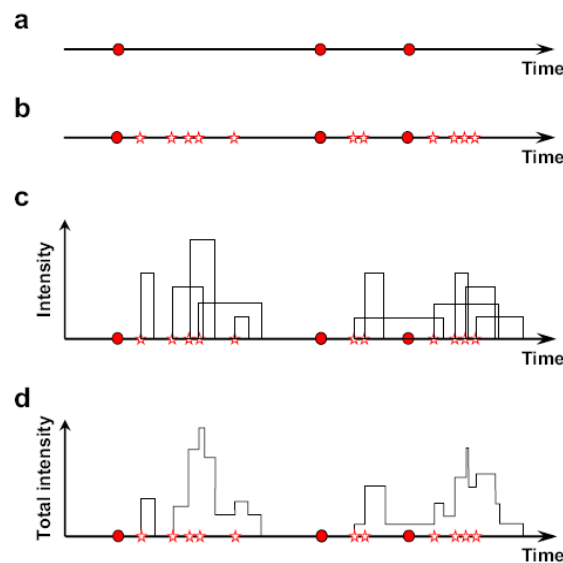


Figure 8. Schéma pour le Neyman-Scott Rectangular Pulses model. Source: RainSim: A spatial-temporal stochastic rainfall modelling system, 2008. Burton, A; Kilsby, C.G; Fowler, H.J; Cowpertwait, P.E; O'Connell, P.E.

a) Les origines des orages ont lieu selon un processus de Poisson; b) chaque origine génère un nombre aléatoire de cellules; c) chaque cellule est associée à un pulse rectangulaire; d) la pluie totale est égale à l'addition de la intensité de chaque cellule activé pour chaque instant.

7.2 CONSTRUCTION DU MODÈLE AVEC RAINSIM

L'objectif pendant la construction du modèle est identifier la valeur des paramètres du modèle NSRP (λ , β , ξ , ν , η) qui représentent le mieux la série de pluies à modéliser.

Le modèle RainSim est calibré pour chaque mois pour introduire de la non-stationnarité des pluies.

Le premier pas est donc le choix des propriétés statistique qu'on utilisera pour calibrer le modèle. Il y a cinq paramètres à estimer dans le cas simple site, pour cette raison au moins cinq propriétés statistiques doivent être utilisées pour la calibration. Dans ce travail les statistiques choisies sont la moyenne (24 heures), la variance (1 heure, 6 heures et 24 heures), l'autocorrélation¹² (24 heures), la probabilité d'intervalles secs (1 heures et 24 heures) et la asymétrie (1 heure et 24 heures) [Wheater et al, (2005), DEFRA]. Chaque statistique a un poids sur la calibration du modèle qui nous pouvons changer. L'objectif de la calibration est trouver les poids qui nous donnent l'erreur de calibration la plus faible¹³.

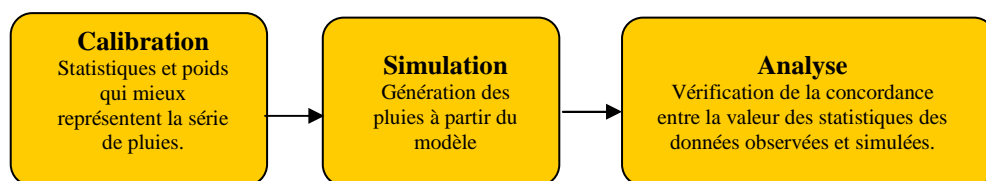


Figure 9. Schéma de démarche avec RainSim.

¹² En statistique, l'autocorrélation d'une série temporelle discrète est la corrélation du processus par rapport à une version décalée dans le temps de lui-même.

¹³ La méthode de calibration utilisée par RainSim est basée sur l'algorithme 'Shuffled Complex Evolution' [Burton, A. et al, (2008)].

7.3 LE PROBLÈME DES DONNÉES HORAIRES

Pour la calibration de RainSim des statistiques au niveau horaire et journalier sont utilisées. Ce fait suppose donc disposer des données horaires et journalières.

Le problème est que les données horaires sont difficiles à obtenir, tandis que les données journalières sont, en général, beaucoup plus disponibles.

Le problème est le même quand nous tentons de faire des simulations pour le futur. En effet, pour le futur, des séries journalières de pluies peuvent être obtenues via GLM. Mais, nous ne disposons pas des données horaires.

En conséquence, Beuchat a développé une méthodologie qui permette la création de ces fonctions statistiques horaires à partir des données journalières. Cette méthodologie est basée sur la méthode MARS ('Multivariate Adaptive Regression Splines' [Friedman 1991]).

Dans ce projet nous ferons la vérification du bon fonctionnement de cette méthodologie à partir de la comparaison de résultats pour les stations où des données horaires sont disponibles.

7.4 SIMULATION DES PLUIES HORAIRES

La marche à suivre pour la génération des séries de pluies au niveau horaire est la suivante:

- Calibration du modèle avec les données NCEP
A partir des simulations journalières obtenues pour la période de calibration avec nos GLMs et les données atmosphériques NCEP, nous pouvons obtenir les statistiques journalières. Grâce à la méthode MARS, les statistiques horaires correspondantes seront aussi obtenues à partir de ces simulations.
Les statistiques nécessaires pour la calibration du modèle RainSim ont été décrites dans la section 7.2. L'objectif est la bonne correspondance entre les statistiques calculées à partir des données journalières simulées et les statistiques que calcule le modèle RainSim, donc nous cherchons les poids qui nous donnent le meilleur ajustement entre elles.
- Aptitude de la méthodologie à reproduire les pluies horaires observées
Les résultats des simulations horaires obtenues dans le point (1) sont comparés avec les résultats obtenus quand les statistiques horaires sont obtenues à partir des données horaires historiques.
Le but est évaluer la capacité de la méthode pour représenter avec fiabilité des données horaire pour les cas où les données historiques ne sont pas disponibles.
- Détermination des fluctuations des pluies horaires entre la période de calibration et de validation des GLMs quand ils sont liés aux données NCEP
Nous regardons la différence des pluies horaires simulées avec notre modèle RainSim pour la période de calibration et de validation (typiquement 1980-2007 et 1952-1979).
- Détermination de la fluctuation des pluies entre le présent et le futur (GCM)
Nous regardons la différence des pluies horaires simulées avec nos GLMs liés aux données atmosphériques GCM, pour la période de calibration et la période future.

Le but est comparer la différence de pluie horaire entre les deux périodes du XX^{ème} siècle (validation et calibration) par rapport à la différence attendue entre le présent (calibration) et le futur (fin du XXI^{ème} siècle).

Si les différences ont la même magnitude entre les périodes présent-passé proche et présent-fin du XXI^{ème} siècle, alors elles peuvent être attribuées à une variabilité naturelle du climat. Dans le cas contraire, ces différences peuvent être associées au changement climatique d'origine anthropologique.

8. Données

Pour le développement de cette méthodologie il est nécessaire disposer d'une grande quantité de données. Dans ce travail les données utilisées sont :

I. Données de pluies

Les données de pluies sont la base fondamentale de la méthodologie. A partir des données historiques de pluies journalières nous construirons les modèles de pluie journalière et horaire.

Aussi les données historiques horaires seront utilisées pour la validation de la méthode de réduction d'échelle horaire.

Dans ce travail de Master, nous avons utilisée plusieurs sources des données en fonction des stations étudiées.

Base des données utilisées pour les pluies journalières sont [Beuchat, X., (2010)]:

- Météo Suisse (MS)
- British Atmospheric Data Center (BADC)
- European Climate Assessment Dataset (ECAD)
- Global Historical Climatology Network (GHCND)
- United States Historical Climatology Network (USHCN)

Base de données utilisées pour les pluies horaires [Beuchat, X., (2010)]:

- Météo Suisse (MS)
- United States Dataset (UCAR)
- British Atmospheric Data Center (BADC)

II. Données atmosphériques historiques : NCEP

Le NCEP (National Centers for Environmental Prediction¹⁴) est la source des données historiques des variables atmosphériques.

Cette institution a créé une base de données pour les variables atmosphériques enregistrées dans le monde entier à partir de réanalyses qui ont comme objectif de réduire les différences entre les données à cause de leurs différentes origines.

Les variables enregistrées dans cette base de données sont:

- la température de l'air dans la surface (TAS)
- la pression au niveau de la mer (PSL)
- l'humidité relative (HUR) pour l'intervalle de pressions 1000 hPa - 400hPa
- l'humidité spécifique (HUS) pour l'intervalle de pressions 1000 hPa - 400hPa
- le vent zonale (UWND) pour l'intervalle de pressions 1000 hPa - 400hPa
- le vent méridional (VWND) pour l'intervalle de pressions 1000 hPa - 400hPa
- l'altitude géopotential (HGT) pour l'intervalle pressions 1000 hPa - 400hPa
- la vorticité verticale (OMEGA) pour l'intervalle de pressions 1000 hPa - 400hPa

¹⁴ <http://www.ncep.noaa.gov/>

III. Données issues de modèles climatiques générales (GCM)

Dans ce travail nous utilisons vingt cinq GCM différents. Toutefois, tous les modèles ne sont pas disponibles pour tous les scénarii.

Aussi c'est important souligner que quand des différentes conditions initiales sont utilisées pour une même GCM. Les prévisions qu'ils nous fournissent peuvent être assez différentes. Pour cette raison pour certains modèles il y a plus d'un 'run' (ou prévision) disponible (annexe 3).

Dans ce projet, la taille correspondante au modèle HadCM3¹⁵ est prise comme la taille de référence (2.5° x 3.75°). Chaque modèle GCM a une taille de cellule différente, donc des interpolations sont réalisé sur la taille des autres modèles [Beuchat, X. (2010)].

IV. Données issues de modèles climatiques régionaux: RCM

Douce base de données RCM sont utilisées dans ce travail (annexe 4). Leur origine est le projet européen ENSEMBLES¹⁶ et ses données englobent le territoire européen.

Tous les modèles ont une taille de 25 km et une résolution temporelle journalière. Les données issues des modèles climatiques régionaux sont disponibles pour la période 1950-2100.

¹⁵ Modèle général de circulation atmosphérique et océanique développé dans le 'Hadley Centre', Royaume Uni.

¹⁶ <http://ensembles-eu.metoffice.com>

9. Cas d'étude

Pendant le semestre, la méthodologie, précédemment décrite pour la simulation de pluies futures, a été appliquée à certaines stations avec l'objectif de connaître et de s'approprier ses fondements théoriques et pratiques.

9.1 SCÉNARIOS TRAITÉS

L'IPCC a créé quarante scénarii différents pour les futures émissions de gaz à effet de serre qui sont rangés en quatre familles différents. L'année à partir de laquelle chaque scénario commence à développer son comportement caractéristique est l'année 2000. Dans ce projet trois des quatre familles sont traitées:

Scénario A1 - Scénario moyen	
Economie	Croissance économique importante.
Technologie	Développement rapide de nouvelles technologies efficaces.
Démographie	Croissance de la population jusqu'à les 9 milliards de personnes en 2050. Ensuite une baisse graduelle.

Table 1. *Caractéristiques famille A1 des scénarios de l'IPCC.* Source: Emissions Scenarios, IPCC, WG III.

Il considère un monde futur convergeant: il y aura de grandes interactions sociales et culturelles entre les pays du monde et les différences entre le produit intérieur brut (PIB) des pays diminueront.

Dans la famille A1 il y a trois groupes différenciés par le type de système énergétique. Le scénario A1F considère un système énergétique basé sur les combustibles fossiles et l'A1NF sur les combustibles non-fossiles. Le scénario A1B assume qu'aucune des options prévaut sur l'autre.

Scénario A2 – Scénario fort	
Economie	Développement économique régional.
Technologie	Changement de la technologie plus fragmentée et de croissance lente.
Démographie	Croissance continue de la population.

Table 2. *Caractéristiques famille A2 des scénarios de l'IPCC.* Source: Emissions Scenarios, IPCC, WG III.

Ce scénario caractérise un monde hétérogène et indépendant. Il reflète un monde de préservation de différentes identités.

Scénario B1 – Scénario faible	
Economie	Changements économiques importants vers l'économie de service et information. Réduction de la consommation de ressources.
Technologie	Technologies propres et efficaces.
Démographie	Croissance de la population jusqu'à les 9 milliards de personnes en 2050. Ensuite une baisse graduelle.

Table 3. *Caractéristiques famille B1 des scénarios de l'IPCC.* Source: Emissions Scenarios, IPCC, WG III.

Ce modèle reflète le même comportement démographique que le scénario A1, mais dans ce cas la structure économique et technologique est complètement différente.

Dans ce scénario l'emphasis il est situé sur des solutions globales durables pour l'économie, l'environnement et la société. Mais il ne considère pas des initiatives climatiques supplémentaires.

9.2 LES CAS D'ÉTUDE

9.2.1. Lugano (LUG): Simulation journalière et horaire pour un seul site.

Le premier cas d'étude est pour la station de Lugano, dans le canton du Tessin en Suisse.

I. Pluies journalières

Calibration du modèle (NCEP)

L'étude des pluies journalières commence avec la calibration du modèle à partir des données historiques et les données atmosphériques du NCEP.

Les données journalières de précipitations utilisées pour la modélisation sont prises de la base de données de Météo Suisse. Néanmoins les données NCEP avec lesquelles nous réalisons la calibration du modèle journalier ne sont que disponibles pour la période 1950-2007. Ainsi, malgré la disponibilité de données de pluies pour une période plus longue, nous pourrions modéliser seulement dans cet intervalle.

La période utilisée pour la calibration est donc 1980-2007, tandis que la période 1952-1979 est considérée pour la validation.

Dans le modèle *gamma* et *logistique* nous utilisons tous les variables atmosphériques que nous avons décrit dans notre méthodologie¹⁷ au niveau mensuel. Pour le modèle *logistique* l'humidité relative annuelle est aussi considérée.

Dans cette occasion nous réalisons deux cents simulations pour les périodes de calibration et validation. Les données manquantes sont représentées avec dix simulations.

Les graphiques 10 et 11 nous montrent la reproduction des totaux de pluie annuels et saisonniers, pour la période de calibration et validation respectivement.

En rouge nous trouvons la variation des données historiques au cours des années. En noir, les déciles des deux cents simulations obtenues à partir de notre modèle sont représentés.

C'est important souligner que ces statistiques n'ont pas été utilisées pour la calibration. De cette façon une bonne représentation d'elles implique que notre modèle a pris correctement la tendance annuelle des pluies.

Le différent comportement de la pluie en fonction des années et la saison est bien représenté pour la période de calibration, où nous pouvons observer une reproduction bonne de la variabilité annuelle des pluies. Pour la période de validation nous voyons que le modèle surestime un peu la pluie, surtout dans l'intervalle 1960-1970. Si on regarde les graphiques saisonniers, nous pouvons vérifier que cette déviation est plus grande pour les mois d'été.

¹⁷ Comme nous avons décrit et justifié dans la section 4.2.2 de ce projet les variables atmosphériques considérés avec cette méthodologie sont l'humidité relative à 850hPa, la température superficielle, la pression sur le niveau de la mer et le vent méridional et zonale.

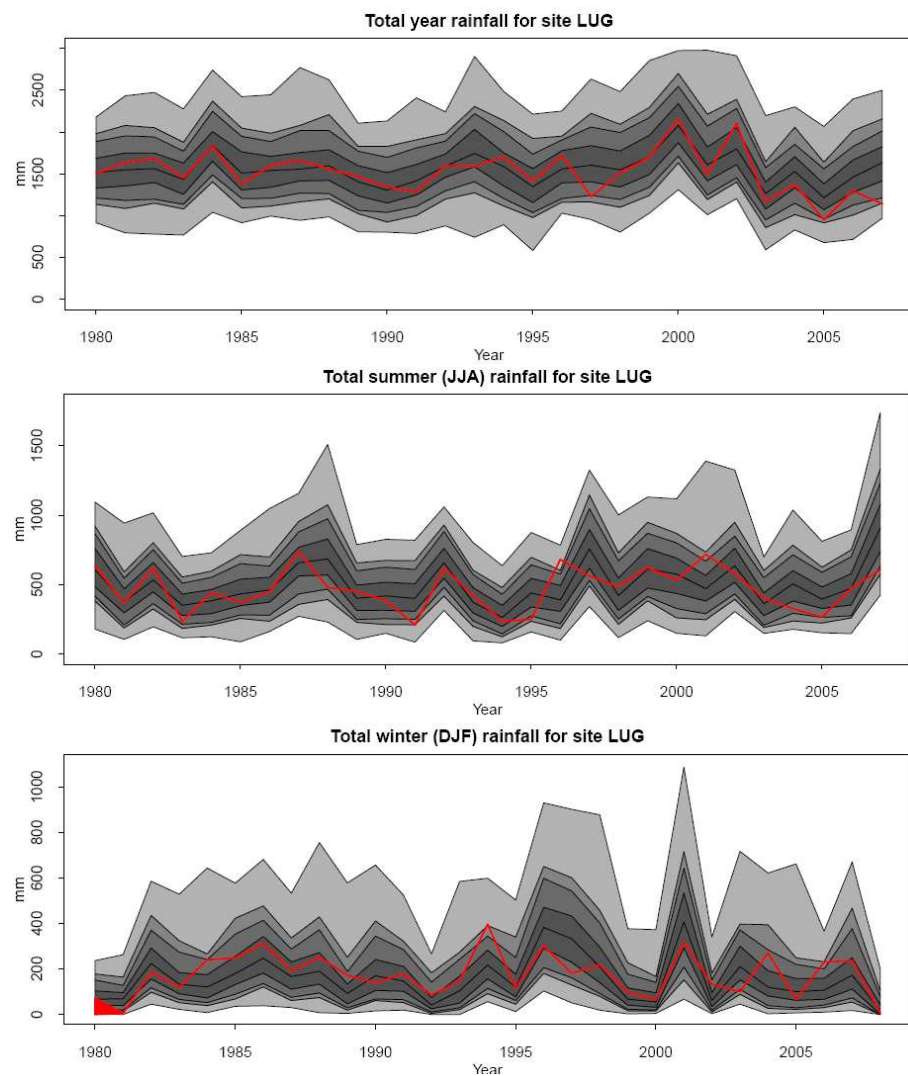


Figure 10. Période de calibration (1980-2007). Comparaison des données observées et simulées pour Lugano. Variation annuelle et variation saisonnière.

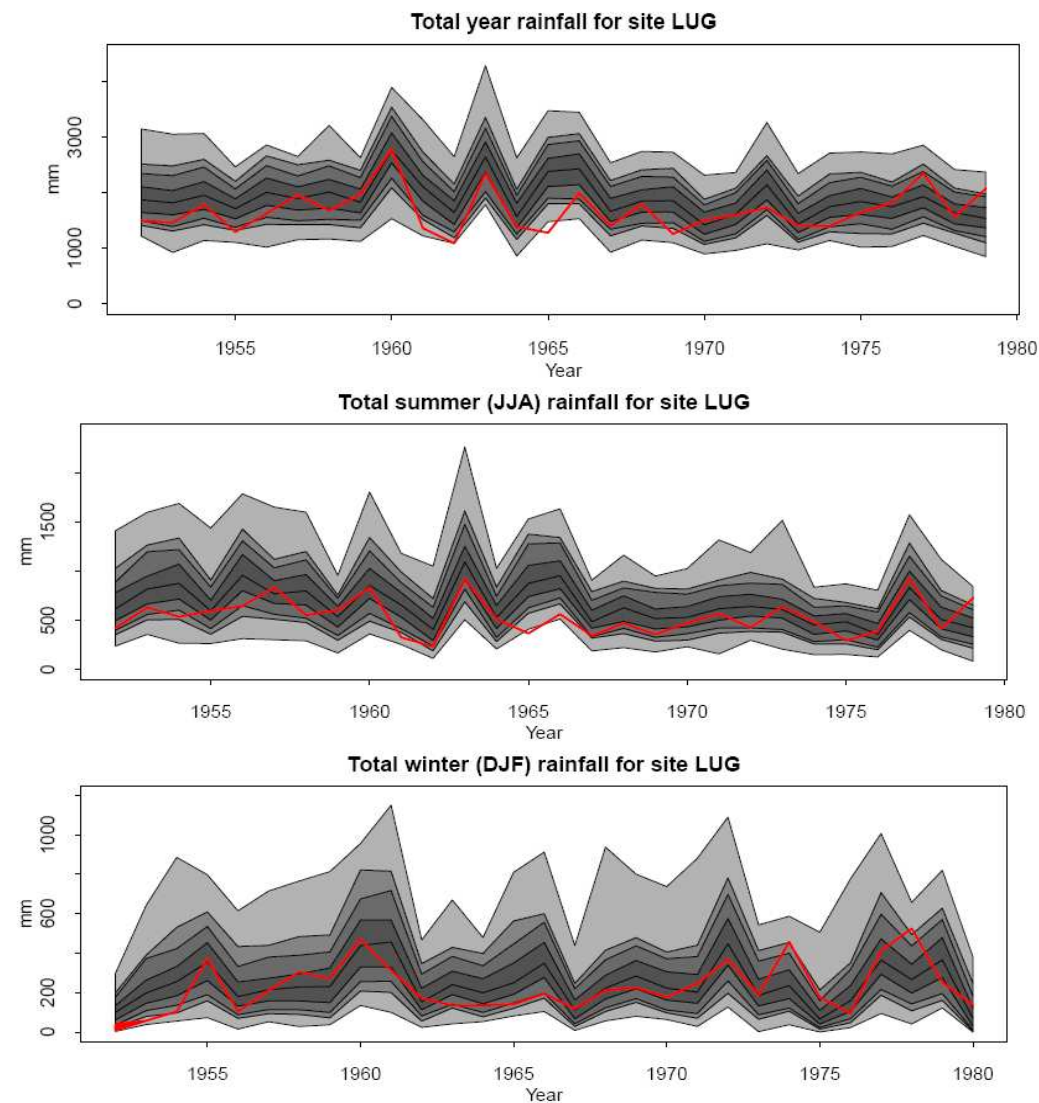


Figure 11. Période de validation (1952-1979). Comparaison des données observées et simulées pour Lugano. Variation annuelle et variation saisonnière.

sumstats_LUG

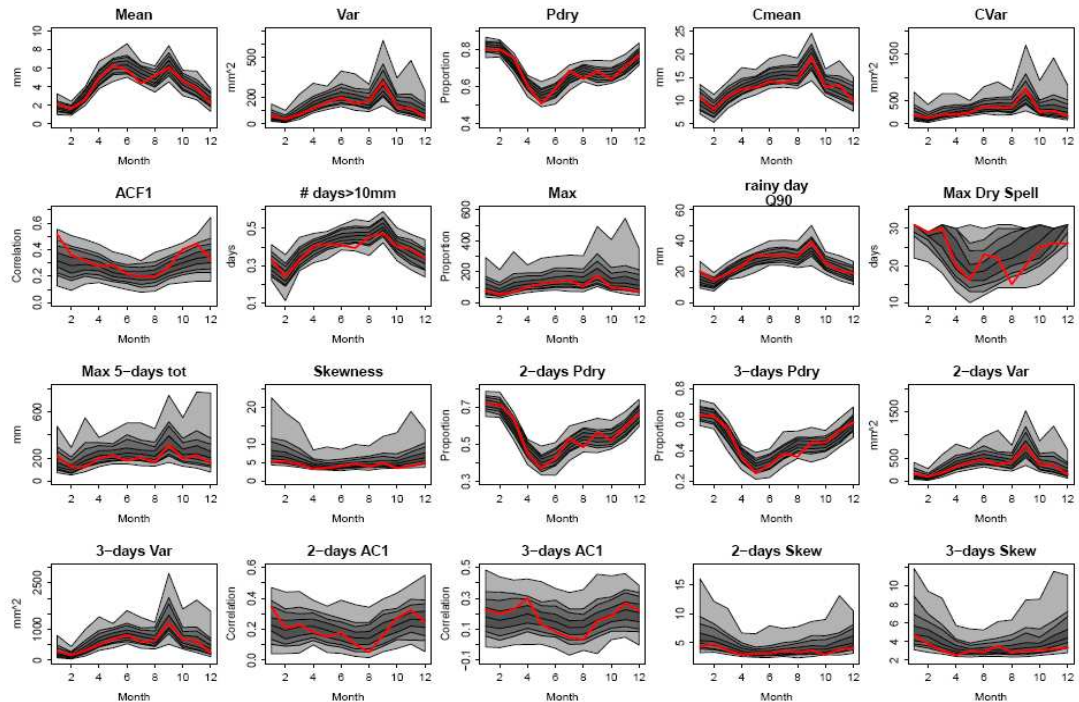


Figure 12. Période de Calibration (1980-2007). Comparaison des statistiques des données observées et simulées. Statistiques traités: la moyenne des pluies et leur variance, la proportion des jours secs, la moyenne des pluies et leur variance pour les jours humides, l'autocorrélation d'un jour, la proportion des jours où la quantité de pluie est plus haute que 10 mm par rapport aux jours humides, la pluie maximale, le 90^{ème} décile des jours pluvieux, la longueur maximale des jours secs, les pluies maximales pendant cinq jours et l'asymétrie. La proportion des jours humides, la variance, l'asymétrie et l'autocorrélation jours par groupes de deux et par groupes de trois sont considérés.

sumstats_LUG

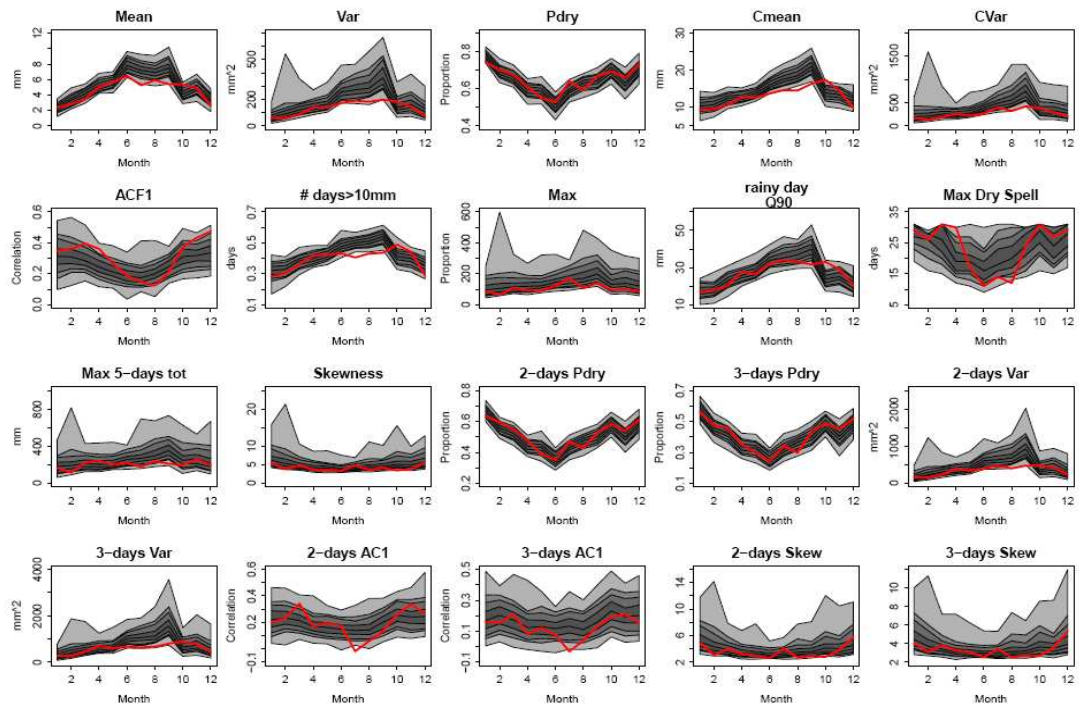


Figure 13. Période de Validation (1952-1979). Comparaison des statistiques des données observées et simulées. Statistiques traités: la moyenne des pluies et leur variance, la proportion des jours secs, la moyenne des pluies et leur variance pour les jours humides, l'autocorrélation d'un jour, la proportion des jours où la quantité de pluie est plus haute que 10 mm par rapport aux jours humides, la pluie maximale, le 90^{ème} décile des jours pluvieux, la longueur maximale des jours secs, les pluies maximales pendant cinq jours et l'asymétrie. La proportion des jours humides, la variance, l'asymétrie et l'autocorrélation jours par groupes de deux et par groupes de trois sont considérés.

Un autre outil utilisé pour la création du modèle est la comparaison de certaines statistiques mensuelles obtenues des données observées et des données simulées.

Les statistiques utilisées dans cette méthodologie sont la moyenne des pluies et leur variance, la proportion des jours secs, la moyenne des pluies et leur variance pour les jours humides, l'autocorrélation¹⁸ d'un jour, la proportion des jours où la quantité de pluie est plus haute que 10 mm par rapport aux jours humides¹⁹, la pluie maximale²⁰, le 90^{ème} décile des jours pluvieux, la longueur maximale des jours secs, les pluies maximales pendant cinq jours et l'asymétrie²¹.

Aussi la proportion des jours humides, la variance, l'asymétrie et l'autocorrélation quand nous prenons les jours par groupes de deux et par groupes de trois sont considérés. Ces statistiques ont l'objectif de assurer un bon fonctionnement de la méthode MARS avec laquelle nous obtenons les statistiques horaires à partir des données journalières.

Les figures 12 et 13 nous montrent la valeur de ces statistiques mensuelles obtenues. Pour la période de calibration la concordance entre données observées et simulées est bonne. Pour toutes les statistiques les données observées se trouvent dans les déciles plus noirs, c'est-à-dire, où sont représentés la plus grande partie des données qui ont été simulées.

Dans la période de validation les résultats obtenus sont assez semblables aux obtenus dans la période de calibration (figure 12). La représentation est assez bonne pour la proportion des jours humides, mais, les autres statistiques liées à la quantité de pluie (modèle gamma) sont en général surestimées pour la période estival.

Simulation pour le futur (GCM)

Une fois le modèle est calibré et validé, nous pouvons faire les simulations pour le futur à partir des prévisions pour les différents scénarios issus par les GCM. La simulation est réalisée par la période de calibration et la période future.

L'objectif quand nous reproduisons le comportement de notre modèle avec les données GCM dans la période de calibration est vérifier s'il y a de concordance entre les données observées et les simulées. Si pour un GCM donné, il n'y a pas cet ajustement pour 'le présent' (la période de calibration) nous ne pourrions pas confier en ses simulations pour le futur.

Les études du projet Switch sont centrées autour l'année 2050. Dans ce projet la période de futur choisie pour la simulation est l'intervalle 2060-2088. Cette décision est justifiée à cause de la nécessité d'un période de temps éloigné pour pouvoir observer les effets du changement climatique sur les pluies.

Pour la période de calibration nous obtenons les graphiques déjà décrites: les totaux de pluie annuels et saisonniers, et les statistiques mensuelles; mais maintenant nous aurons ces graphiques par rapport à chaque modèle GCM qui est disponible pour les différents scénarii.

Dans l'annexe 5 nous pouvons trouver les totaux de pluie annuelle et saisonnière obtenues pour deux GCMs. Nous pouvons vérifier dans cet annexe que l'ajustement entre les données observées et les simulées par notre modèle est assez bon. En conséquence nous

¹⁸ Relation d'une série avec une version de soi même déplacé dans le temps.

¹⁹ Erreur dans les unités de cette graphique. Il devrait être 'proportion' en lieu de 'days'.

²⁰ Erreur dans les unités de cette graphique. Il devrait être 'mm' en lieu de 'proportion'.

²¹ L'asymétrie statistique est une mesure du degré de symétrie d'une distribution statistique. Elle nous permet savoir comment sont réparties les données par rapport à la moyenne de la distribution.

pourrons confier en ses prévisions pour le futur. La figure 14 représente les prévisions pour le modèle CNRM CM3_run1, aussi traité dans cette annexe 5.

Si nous étudions le comportement de la moyenne de pluie par rapport à le scénario, la période et la saison²², nous voyons que pour l'été et l'hiver un changement significatif (figures 15 et 16).

Pendant l'été la moyenne de la pluie diminue, tandis que pour l'hiver cette moyenne augmente. Nous vérifions que l'effet est plus intense pour les scénarii plus forts. Nous pouvons aussi remarquer que la dispersion des données est plus grande pour le scénario a1b. Ce fait est à cause de la plus grande quantité des GCMs disponibles pour ce scénario. Pour les saisons de printemps et d'automne aucun changement significatif n'est observé par rapport à la moyenne des pluies.

Si nous regardons les mêmes graphiques pour la moyenne de pluie pendant les jours humides (figures 17 et 18), nous voyons une diminution de cette moyenne pour l'été et une augmentation pour l'hiver. C'est-à-dire dans chaque événement pluvieux futur la quantité de pluie sera plus grande pour la saison d'hiver, mais plus petite pour l'été.

Les figures 19 et 20 nous montrent la variation de la proportion des jours secs pour l'hiver et l'été. Pour l'été la variation du nombre des jours secs est significative. L'augmentation de cette quantité est plus grande pour les scénarii plus forts. Pour l'hiver nous pouvons observer que la moyenne ne présente pas une variation très significative, mais par contre les valeurs simulées pour le futur sont beaucoup plus dispersées.

Selon ces prévisions nous pouvons dire que dans le futur les hivers auront des événements pluvieux avec une quantité plus grande de pluie. Nous devons remarquer que la dispersion des données pendant l'hiver est assez grande, surtout pour le scénario a2. Il faudra étudier si cette dispersion est due à un seul GCM en particulier. Dans ce cas, ce modèle et nous n'arrivons pas à voir le vrai comportement des modèles qui ont un bon fonctionnement pour Lugano. Dans ce cas le modèle modifie les résultats et il serait recommandable faire de nouveau une analyse sans lui.

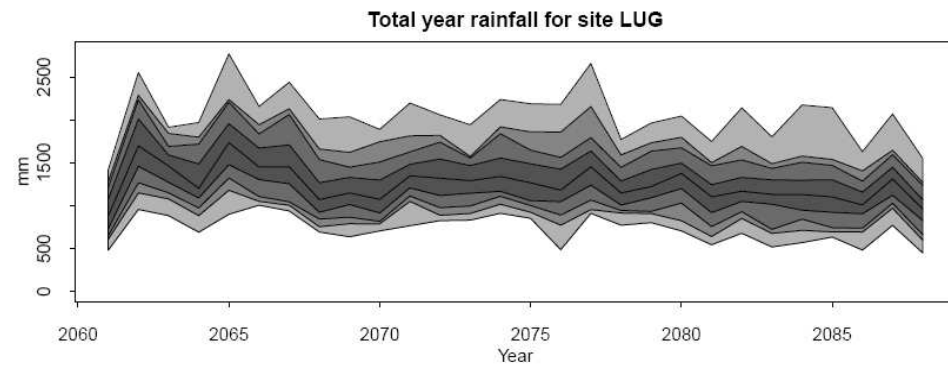
Pour les étés du futur le nombre et la quantité de pluie d'événements pluvieux diminueront. Les saisons de printemps et d'automne n'ont pas de variations très significatives. La figure 21 représente le comportement de la moyenne mensuelle par rapport à chaque GCM, le scénario, la saison et la période.

Pour l'été nous voyons que tous les modèles prévoient une diminution de la moyenne des pluies. Pour l'hiver le comportement général est l'augmentation de la moyenne mensuelle des pluies. Nous voyons aussi que pour deux modèles, le '*ncar ccs3*' et le '*mri cgcm2_3_2a*', il y a une dispersion grande vers les valeurs positives de la moyenne.

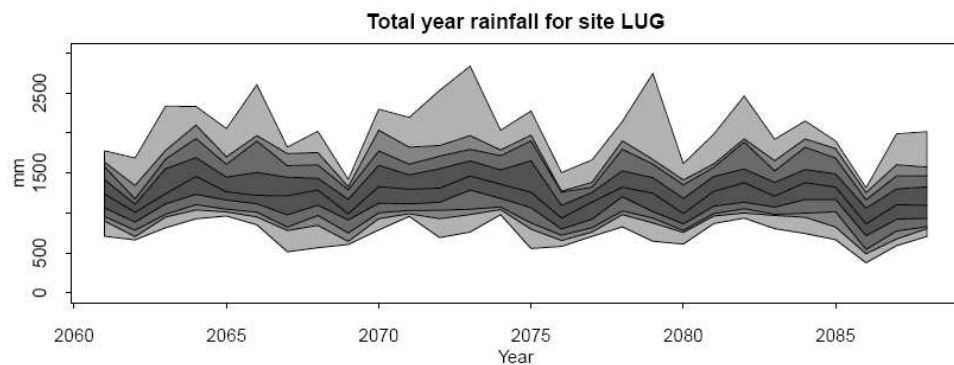
Néanmoins, ces valeurs ne sont pas trop différents à la moyenne de la distribution. Nous voyons aussi que la dispersion est plus intense pour les scénarii a2 et a1b.

A priori nous pouvons donc penser que la dispersion de ces modèles peut être due la représentation des événements extrêmes. Elle est spécialement importante pour la saison d'hiver et le scénario fort, donc, selon ce raisonnement, nous pouvons penser que les hivers du futur auront une quantité de phénomènes extrêmes plus grande. Ils seront dirigés vers l'augmentation des jours humides et de la quantité de pluie dans chaque événement pluvieux. Toutefois, cette conclusion doit être vérifiée avec une étude précise des phénomènes extrêmes.

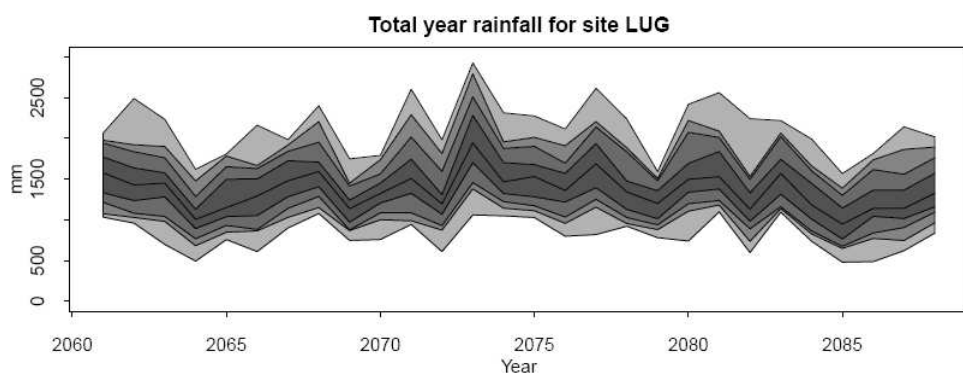
²² Les saisons sont ici décrites comme: l'hiver : décembre, janvier, février ; le printemps: mars, avril et mai ; été: juin, juillet et août ; automne: septembre, octobre et novembre.



Scénario a1b. CNRM CM3 run1



Scénario a2. CNRM CM3 run1



Scénario b1. CNRM CM3 run1

Figure 14. *Prévision des pluies futures pour la période 2060-2088 selon les modèles CNRM_CM3_run1*

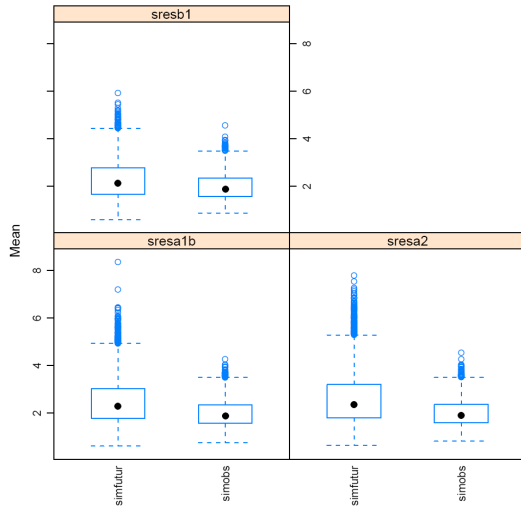


Figure 15. Saison d'hiver. Moyenne mensuelle des pluies par rapport à le scénario et la période.

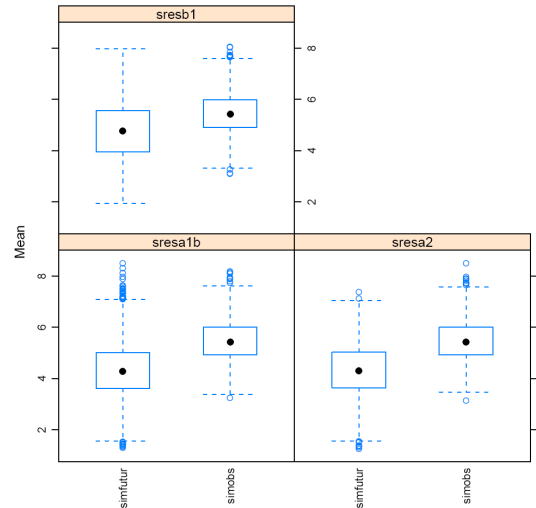


Figure 16. Saison d'été. Moyenne mensuelle des pluies par rapport à le scénario et la période.

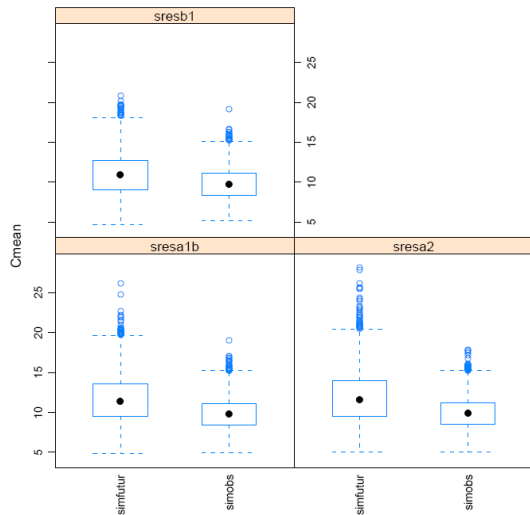


Figure 17. Saison d'hiver. Moyenne mensuelle des pluies pour les jours humides, par rapport à le scénario et la période.

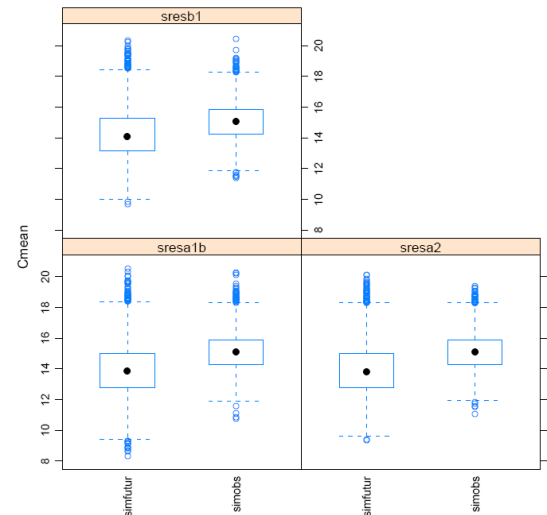


Figure 18. Saison d'été. Moyenne mensuelle des pluies pour les jours humides, par rapport à le scénario et la période.

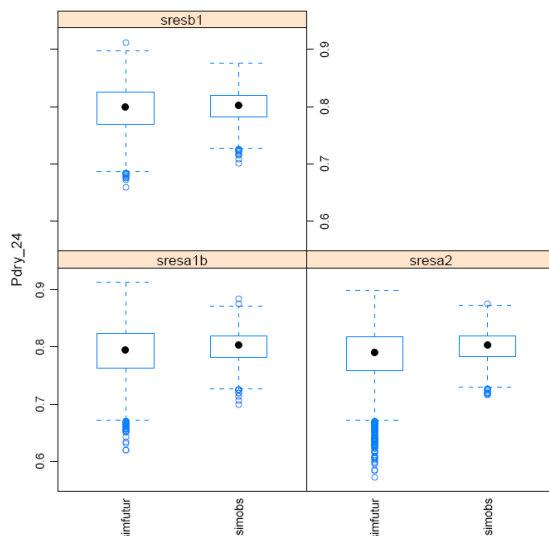


Figure 19. Saison d'hiver. Proportion des jours secs, par rapport à le scénario et la période.

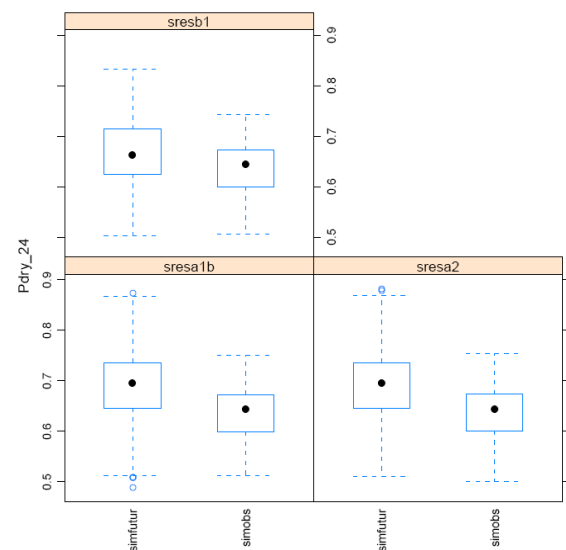


Figure 20. Saison d'été. Proportion des jours secs, par rapport à le scénario et la période.

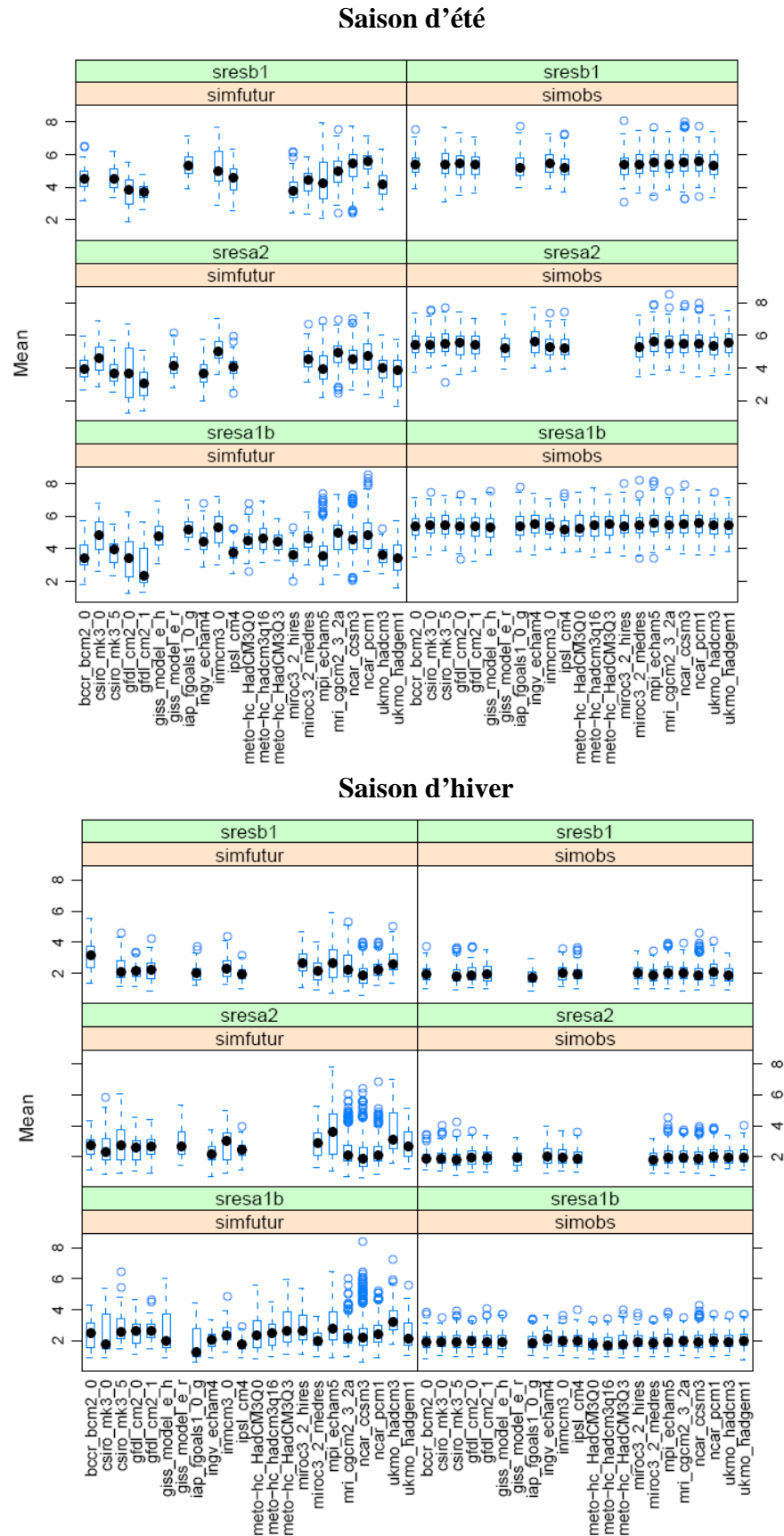


Figure 21. Moyenne mensuelle par rapport à chaque GCM, le scénario, la saison et la période. Saison d'été au dessus. Saison d'hiver au dessous.

Deuxième validation (RCM)

Nous avons déjà parlé de la limitation d'expériences pour les RCM. Pour les sites situés en Europe, ce problème n'existe pas parce que des modèles régionaux ont été développés pour cette zone de la planète par le projet ENSEMBLES. En effet, douze modèles sont disponibles pour Lugano. Nous devons souligner que les RCMs sont tous développés sous l'hypothèse du scénario a1b.

La deuxième validation est le processus avec lequel nous vérifions que le comportement de la méthodologie développée est en accord avec les prévisions des RCM, et en conséquence les petites variations dynamiques que pour sa nature les méthodes statistiques ne prennent pas en compte sont bien représentés.

Dans la figure suivante nous montrons le comportement de chaque un des modèles régionaux pour deux périodes. La première période en noir représente la moyenne mensuelle des pluies pour la période 1981-2008 et en rouge pour la période 2062-2089. Avec cette graphique nous pouvons voir quel type de comportement prévoit chaque modèle pour le futur.

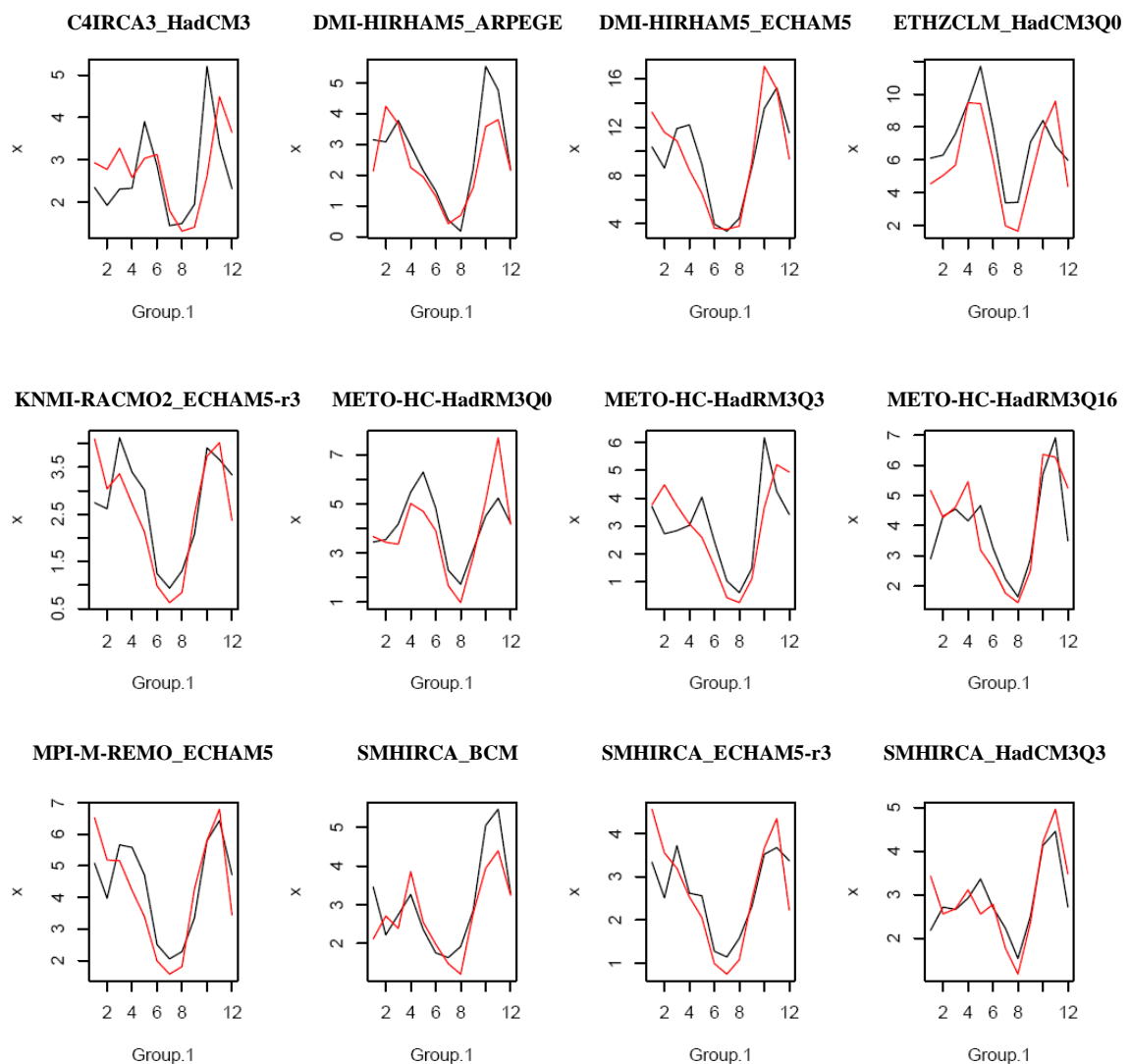
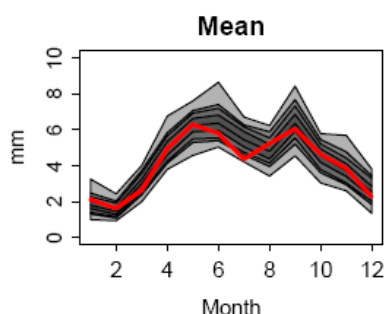


Figure 22. Moyenne de la pluie issue des différents RCMs. En noir, la période 1981-2008, en rouge, la période 2062-2089.

L'utilité de ce graphique est aussi faire une comparaison entre la moyenne mensuelle qui pour le présente prévoient les RCM et celle des données observées (figure 12, première statistique).



Les modèles régionaux avec une représentation de la moyenne des événements pluvieux très différents à la réelle donnèrent avec une haute probabilité des prévisions futures aussi très différents à les prévisions de notre modèle.

Dans notre cas d'étude, tous les modèles présentent la tendance à avoir deux périodes de pluies maximales vers les mois de mai et septembre avec une diminution pendant l'été et l'hiver.

Figure 23. Moyenne des données observées pendant la période 1980-2007.

Pour la période de calibration, les données observées ont une valeur de pluie maximale d'environ 6-8 mm, (figure 23).

Toutefois, les modèles DMI-HIRHAM5_ECHAM5 et KNMI-RACMO2_ECHAM5-r3 ont, respectivement, une quantité beaucoup plus haute (d'environ 14 mm) et beaucoup plus bas (d'environ 4 mm) que la valeur observée. A priori nous pouvons conclure pour réaliser la double validation ces deux modèles ne seront pas très fiables.

Pour le cas de Lugano, le modèle SMHIRCA_BCM a une des meilleures concordances avec les prévisions de notre modèle statistique lié aux données GCM (figures 24 et 25).

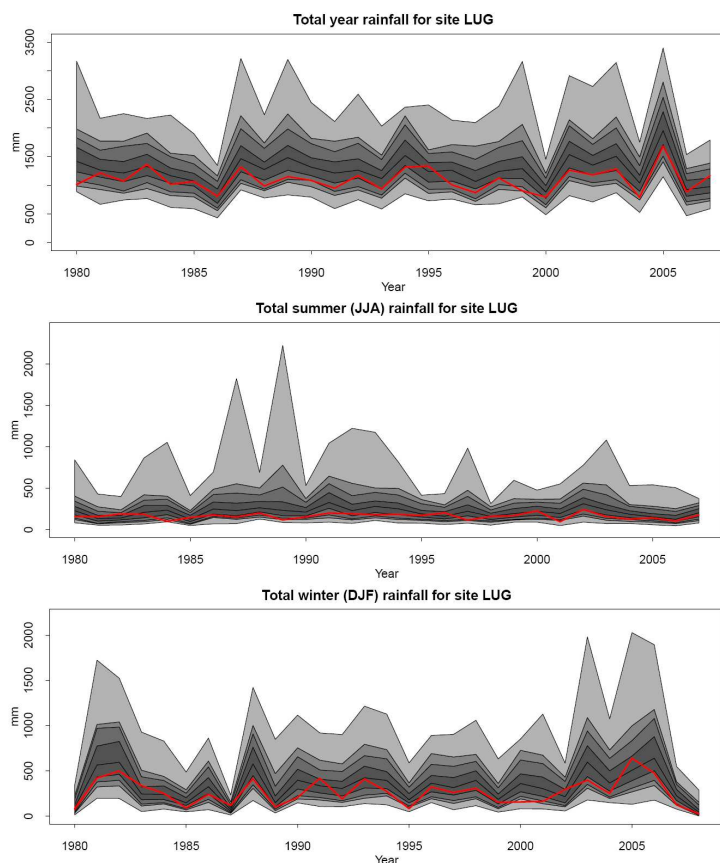


Figure 24. Période de calibration (1980-2007). Double validation avec le modèle régional SMHIRCA_BCM.

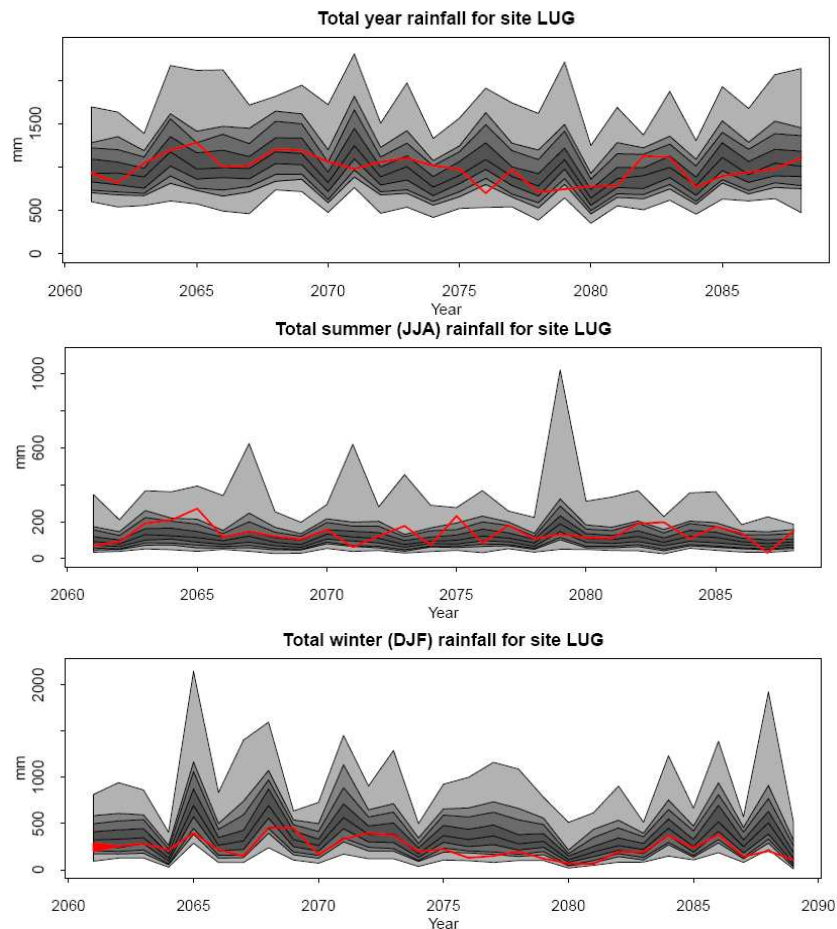


Figure 25. Simulation pour le futur (2060-2088). Double validation avec le modèle régional SMHIRCA_BCM.

Extrêmes:

Une des problématiques plus importante du changement climatique est son influence sur les phénomènes extrêmes. Pour cette raison quand nous modélisons la pluie est spécialement importante faire attention à la capacité de notre modèle de reproduire les potentiels événements extrêmes.

Les données de pluies futures obtenues dans notre simulation sont analyses en fonction des différents périodes de retour²³. Nous pouvons voir le comportement de ces extrêmes représentés avec les box-plots de la figure 26. Pour cette analyse nous prenons les simulations obtenues à partir de notre modèle lié au GCM dans la période de calibration et simulation.

Les résultats nous montrent que les périodes extrêmes seront plus intenses dans le futur pour les trois hypothèses de changement climatique et pour les trois périodes de retour traités: 10 ans, 100 ans et 1000 ans.

Selon ces résultats, le changement climatique causera (pour le même temps de retour) des phénomènes potentiels de pluie extrême d'une magnitude plus grande.

²³ La période de retour (t) est la quantité de pluie que l'on s'attend à dépasser, en moyenne, une fois toutes les t années. www.l.montpellier.inra.fr/umr_asb/Resumes/Ribereau.pdf.

Nous pouvons observer aussi que l'effet du changement climatique sur les extrêmes est plus grande d'accord à son magnitude. C'est-à-dire, le scénario fort (B2) aura l'augmentation plus grande des phénomènes extrêmes.

La plus grande quantité de modèles disponibles pour le scénario a1b est la cause de la dispersion plus intense des données dans ce scénario.

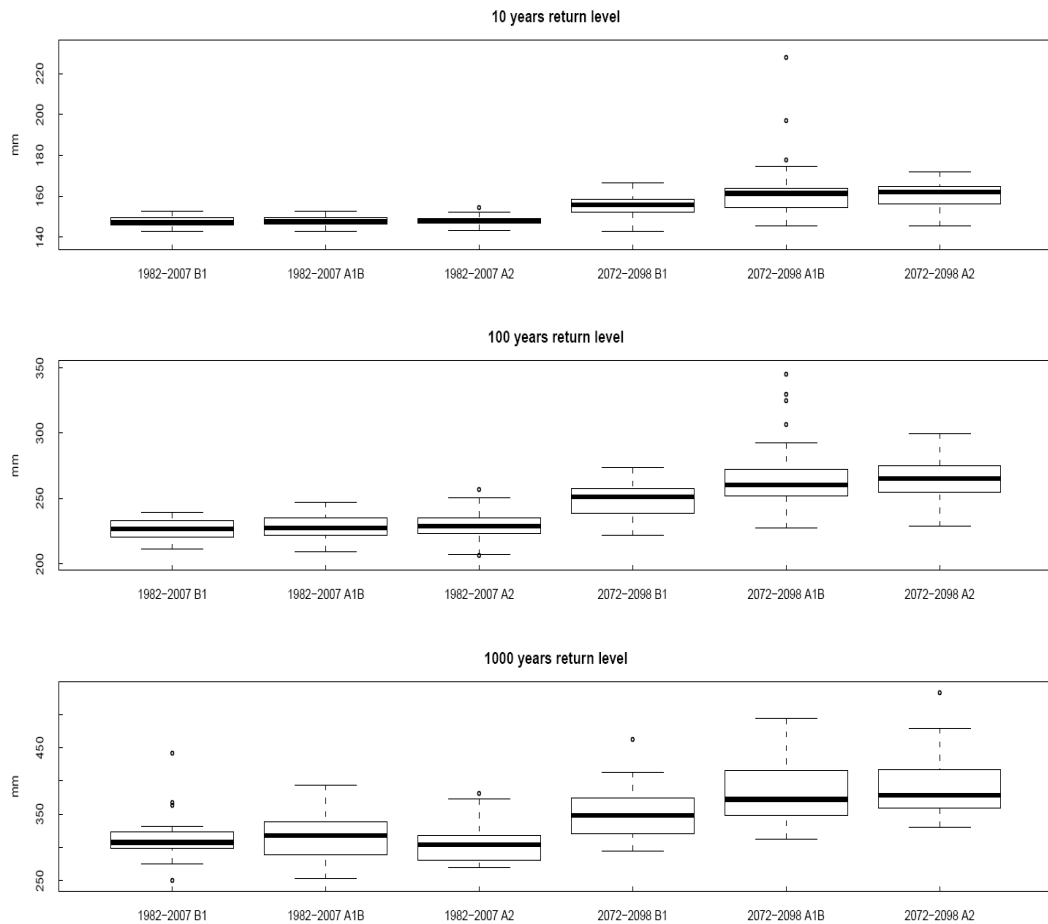


Figure 26. Phénomènes extrêmes de pluie pour les différentes considérations de la période de retour: 10, 100 et 1000 ans, à Lugano.

II. Pluies horaires

La réduction d'échelle au niveau horaire est modélisée à travers des modèles NSRP. Nous avons déjà décrit (section 7.2) que pour la calibration du modèle NSRP neuf statistiques, horaires et journalières, sont pris en compte: la moyenne (24 heures), la variance (1 heure, 6 heures et 24 heures), l'autocorrélation²⁴ (24 heures), la probabilité d'intervalles secs (1 heures et 24 heures) et la asymétrie (1 heure et 24 heures).

Calibration du modèle.

Pour la calibration du modèle de réduction d'échelle horaire est nécessaire l'obtention ces statistiques. Les statistiques journalières sont obtenues à partir des pluies simulées avec les données atmosphériques NCEP pour la période de calibration. Les statistiques horaires sont obtenues aussi à partir de ces données avec la méthode MARS.

Nous devons vérifier que le modèle est juste, c'est-à-dire, un bon ajustement entre les statistiques que notre modèle simule et les statistiques qui sont calculées à partir des simulations journalières NCEP. Quand la concordance entre statistiques n'est pas très juste, nous pouvons changer les poids que chacune des statistiques a sur la calibration du modèle, jusqu'à obtenir une meilleur concordance.

D'autre côté, il faut faire attention pendant le processus à la valeur que les paramètres du modèle NSRP (λ , β , ξ , ν , η) prennent quand nous réalisons la calibration. Il est nécessaire que leur valeur soit réaliste et aussi qu'elle ne soit pas limitée par les valeurs frontières. Dans le cas de Lugano, la calibration du modèle avec les conditions frontières qui RainSim utilise par défaut limite la valeur des paramètres, donc il est nécessaire la variation des ces conditions (annexe 6).

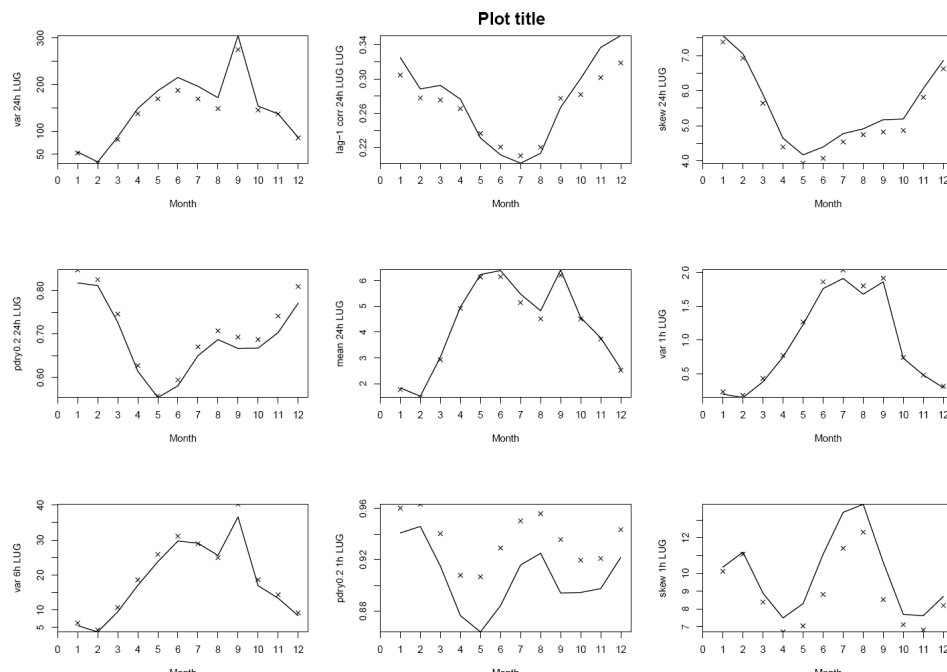


Figure 27. Période de calibration (1980-2007). Valeur des statistiques pour les données simulées NCEP, et celles qui sont simulées par le modèle.

²⁴ En statistique, l'autocorrélation d'une série temporelle discrète est la corrélation du processus par rapport à une version décalée dans le temps de lui-même.

La figure 27 nous montre les résultats obtenus pour Lugano avec les poids utilisés par défaut en RainSim (annexe 7). Nous pouvons voir que l'ajustement entre statistiques est assez bon, sauf pour la probabilité d'intervalles secs au niveau horaire (PDRY_1h) et l'asymétrie au niveau horaire (SKEW_1h).

Nous essayons de trouver des poids qui améliorent les résultats mais les résultats obtenus ne sont pas bons donc finalement nous prenons le rapport de poids initial.

Comparaison avec les données horaires.

Dans le cas de Lugano, les données de pluies horaires sont disponibles pour la période 1981-2005²⁵. Il est donc possible d'évaluer le bon fonctionnement de la méthodologie proposée dans ce travail pour la réduction d'échelle horaire.

Maintenant les statistiques horaires sont obtenues des données historiques horaires, et les statistiques journalières des données journalières.

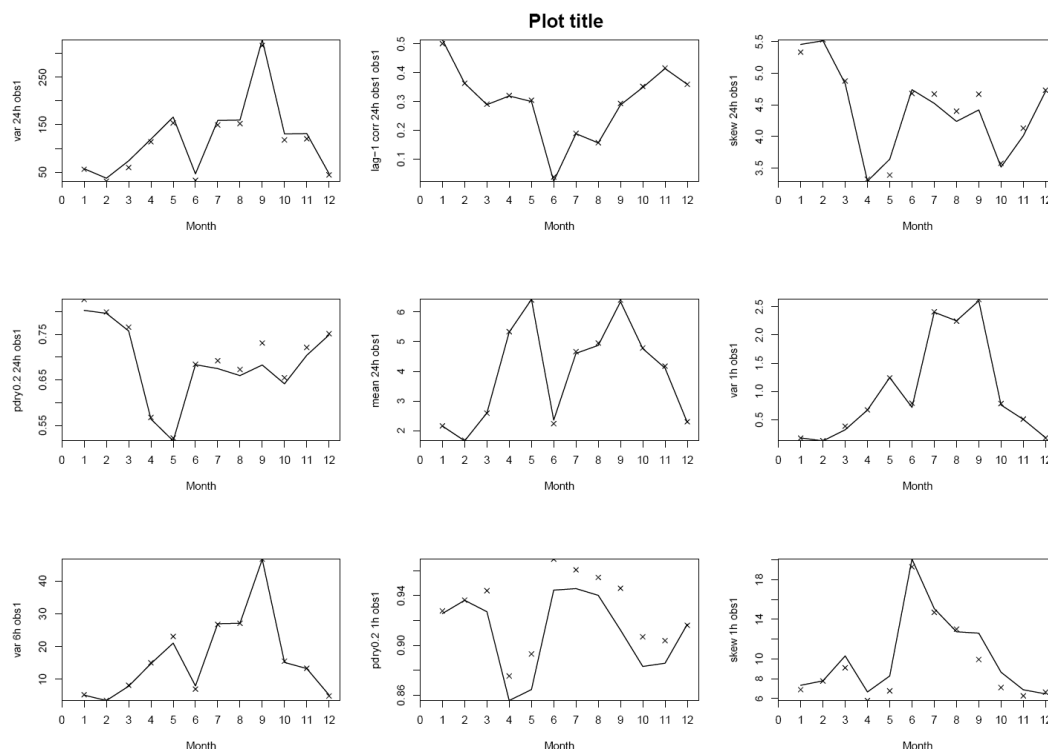


Figure 28. Période 1981-2005. Statistiques obtenues à partir des données historiques et celles qui sont simulées par le modèle.

Si nous comparons les figures 27 et 28 nous pouvons déduire la capacité de la méthodologie à reproduire des statistiques horaires à partir de données journalières.

Comparaison de résultats pour le XX siècle.

Une fois que la méthodologie est vérifiée, l'objectif est la comparaison des valeurs qui prennent les paramètres pour la période de calibration et validation.

Cette comparaison est réalisée avec les données en provenance des simulations journalières NCEP pour les deux périodes. La figure 29 nous montre les résultats.

²⁵ Base de données Météo Suisse.

De cette façon cette analyse nous permettra d'identifier les changements dans le comportement des pluies pendant la deuxième partie du XX^{ème} siècle.

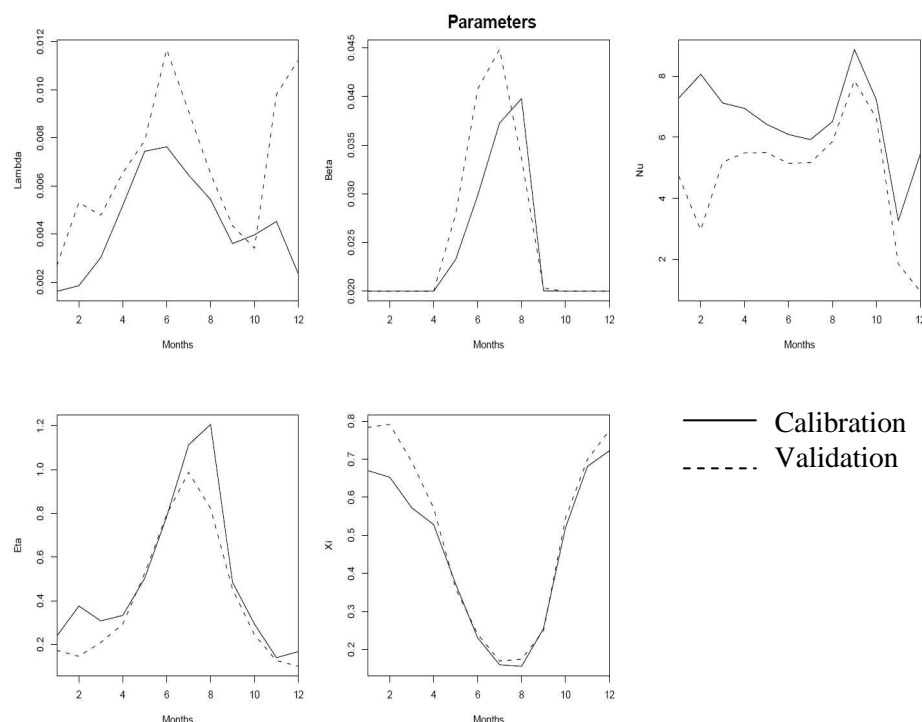


Figure 29. Comparaison entre les paramètres obtenus pour la période de calibration 1980-2007 et la période de validation 1956-1979, à partir des données journalières simulées NCEP.

Les paramètres Eta, Xi et Beta (représentatifs de la durée de vie de la cellule, son intensité et la fréquence d'apparition des cellules respectivement) n'ont pas de changements très significatifs.

Par contre pour le paramètre Lambda nous voyons une diminution assez grande pendant le mois de décembre. Lambda représente la fréquence des événements pluvieux, donc la figure nous montre qu'il y a une diminution brusque de la quantité d'origines d'orages pour la période 1980-2007.

Le paramètre Nu, représentatif de la quantité de cellules générées après l'origine de la pluie, augmente un peu pour les mois de décembre et février.

Effet du changement climatique sur les pluies horaires. XXI^{ème} siècle.

Les données simulées avec les GCMs nous permettent de faire la comparaison entre le comportement des pluies horaires actuelles et les pluies futures selon les différents scénarios de changement climatique.

Pour le cas de Lugano certains GCM ont été utilisés pour l'étude des scénarios futurs. Nous analysons ici le comportement du modèle '*mpi_echam5_run1*' par rapport au scénario a2. Nous voyons des changements très significatifs pour les paramètres Lambda et Beta pendant le mois d'octobre. Pour le futur les deux paramètres diminuent jusqu'à des valeurs très proches de zéro. Beta représente la fréquence d'apparition des cellules et Lambda la fréquence d'origine d'orages. Pour le futur ce modèle prévoit une diminution des événements pluvieux pendant l'automne.

Par contre le paramètre Nu augmente assez significativement pour ce mois. Il représente le nombre de cellules après l'orage, donc cette augmentation nous indique que l'intensité des pluies sera plus grande.

Xi diminue pour tous les mois de l'année, donc une intensité de pluie plus petite est attendue.

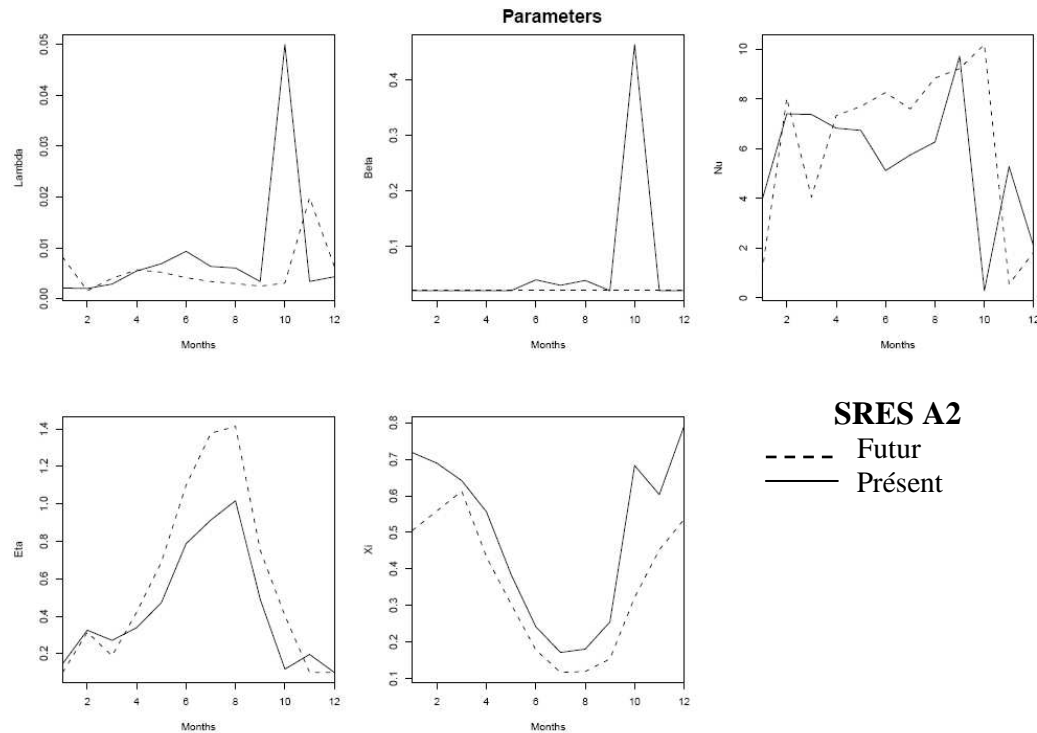


Figure 30. Comparaison des paramètres du modèle NSRP entre les prévisions pour la fin du XXI^{ème} siècle (2060-2088) et le présent (période de calibration 1980-2007).
Modèle '*mpi_echam5_run1*'.

Nous réalisons un dernier processus pour étudier le modèle '*mpi_echam5_run1*' par rapport au scénario a2.

Une seule simulation n'est pas très représentative du comportement du modèle, donc nous réalisons maintenant l'étude du modèle pour trente simulations.

Notre modèle des pluies horaires est calibre avec les données horaires reconstruites avec de la technique MARS à partir des données journalières simulées avec GLIMCLIM et les données atmosphériques du NCEP. Nous réalisons ce processus pour la période de calibration 1980-2007 et la période de validation 1956-1979.

Dans l'annexe 7, nous pouvons regarder les résultats obtenues.

Pour la période de calibration il y a une bon concordance entre les statistiques pour les 30 simulations et la ligne rouge que correspond aux statistiques des données horaires observées à Lugano durant la période de calibration. C'est-à-dire, pour la calibration les modèles de GLIMCLIM, Rainsim et MARS sont capables de représenter des données horaires observées.

Pour la validation, l'écart entre les simulations et la ligne rouge indique les différences de statistiques de pluies entre la période calibration et validation.

Nous répétons le processus pour la période de calibration et le futur avec les données simulées avec GLIMCLIM et les variables atmosphériques du '*mpi_echam5_run1*'.

Pour le présent la ligne rouge est au centre des simulations. Le bon comportement de notre modèle quand nous utilisons des données en provenance de GCM est donc vérifiée (annexe 8).

Pour le futur la ligne rouge et les simulations nous indiquent les changements dus au climat (figure 31). La variance et l'asymétrie est plus grande en hiver, ce qui laisse penser à des pluies plus intenses. Le PDRY est plus grande aussi pour les mois d'automne: dans les futurs automnes les jours pluvieux diminueront.

Ces conclusions sont accordées avec les conclusions faites à partir des paramètres, c'est-à-dire des saisons d'automne-hiver avec moins quantité des jours pluvieux, mais avec des précipitations plus intenses.

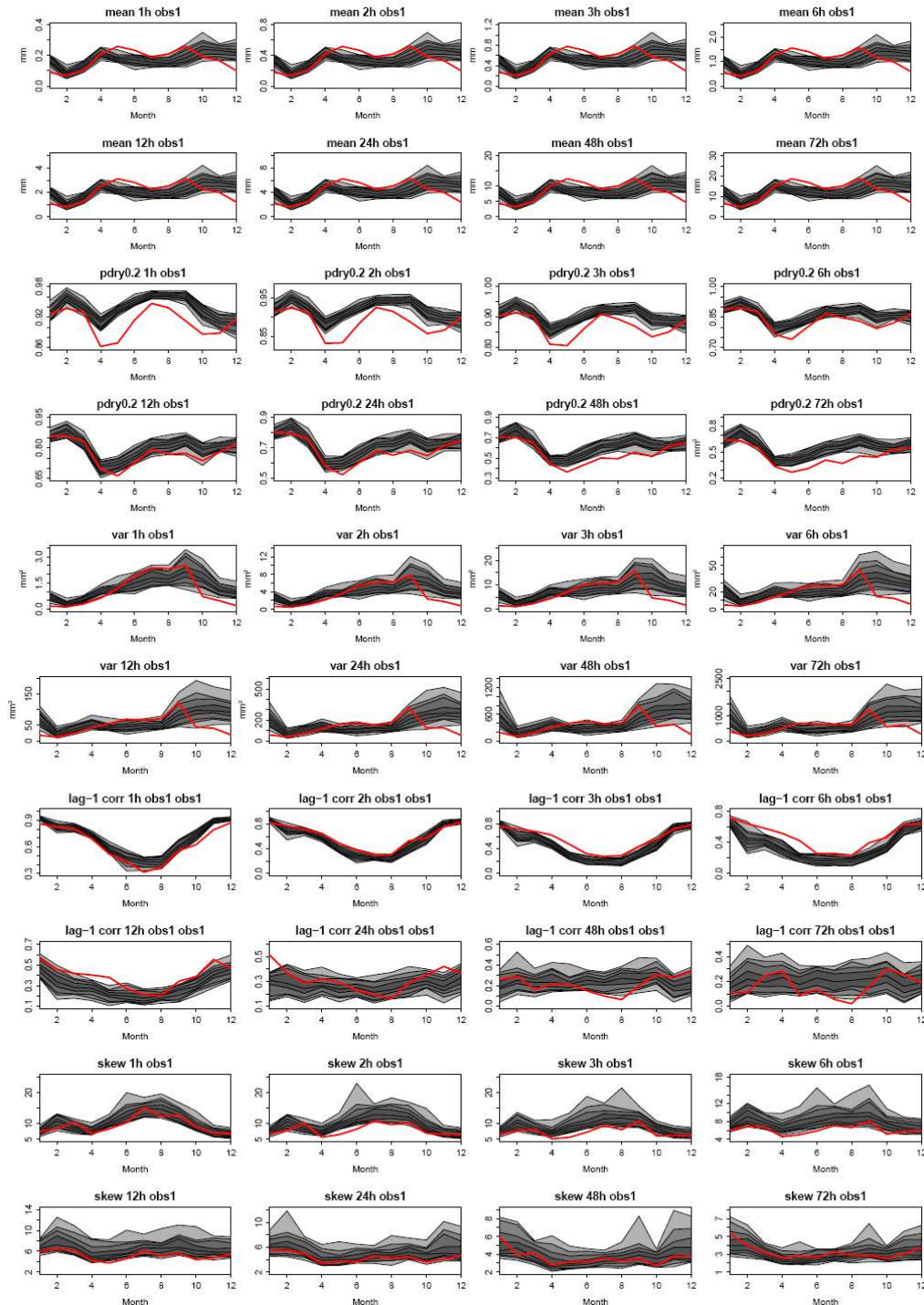


Figure 31. Période future 2060-2098. Simulations obtenues avec le modèle 'mpi_echam5_run1' pour la période a2, par rapport aux statistiques des données horaires observées pour la période de calibration (1980-2007).

9.2.2. Madrid: Simulation journalière et horaire pour un seul site.

Le suivant exemple ici décrit est la simulation des pluies pour la ville de Madrid. Cette station a quelques caractéristiques qui font son étude spécialement intéressante. Nous pourrions vérifier la flexibilité de la méthodologie ici décrite en face à autres climatologies, et aussi il sera un exemple de modélisation de pluies où les données horaires ne sont pas disponibles, donc la réalisation de la réduction d'échelle au niveau horaire n'aura pas un processus de control.

I. Pluies journalières

Calibration du modèle (NCEP)

Pour l'étude précipitations dans la station de Madrid (Espagne) il y a deux sources des données des pluies journalières disponibles: les données ECAD²⁶ et les données GHCN²⁷. Dans ce travail nous avons utilisé les données ECAD parce qu'elles sont plus fiables que celles de GHCN.

Les données disponibles dans cette base pour Madrid²⁸ sont enregistrés depuis l'an 1939 jusqu'à l'actualité, mais les périodes de calibration et validation choisies seront 1979-2007 et 1950-1978 respectivement, à cause de la disponibilité des données issus des GCM.

Dans le cas de Madrid la modélisation sans les données du vent a eu des bons résultats. En fait, dans les modèles *gamma* et *logistique* seulement l'humidité relative et la pression au niveau de la mer ont été utilisés.

Les résultats obtenus des totaux de pluie annuels, ainsi que les statistiques avec lesquelles nous étudions le comportement du modèle (section 6.2.1, Lugano), pour la période de calibration et validation sont les suivantes:

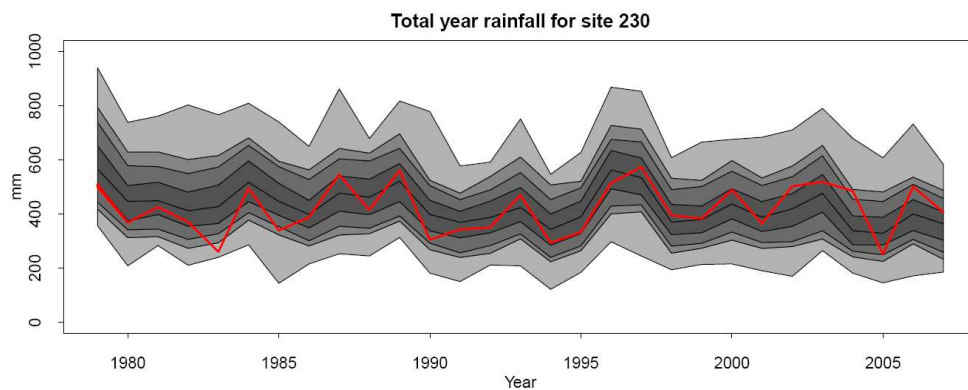


Figure 32. Période de calibration (1979-2007). Comparaison des données observées et simulées pour Madrid. Totaux de pluie annuels.

²⁶ European Climate Assessment Dataset (<http://eca.knmi.nl/>)

²⁷ Global Historical Climatology Network (<http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/ghcn-daily/>)

²⁸ Madrid correspondre à la station numéro 230 de la base de données ECAD.

Impact du changement climatique sur les précipitations

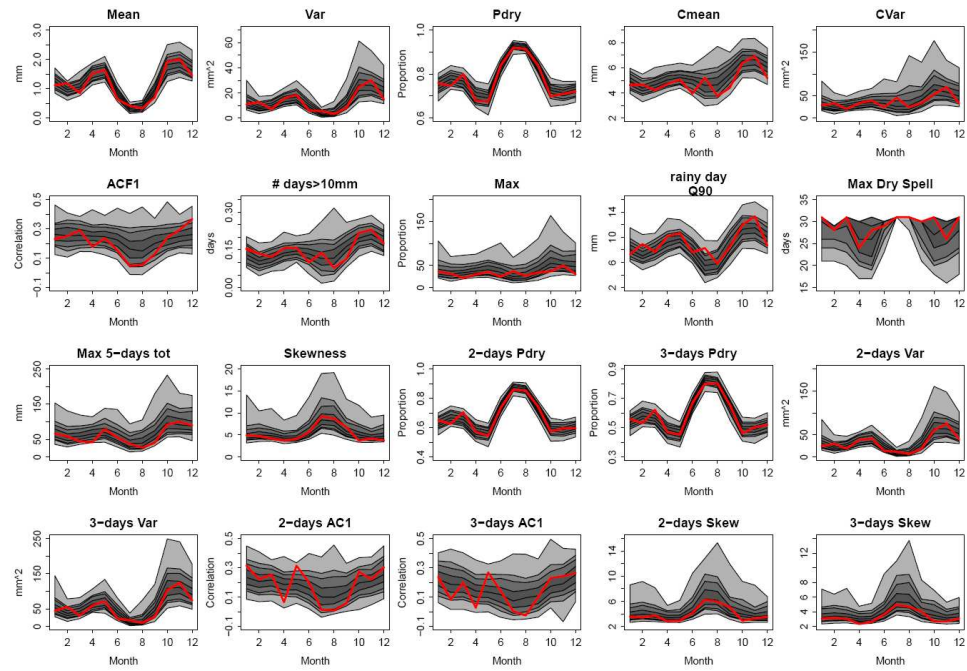


Figure 33. Période de calibration (1979-2007). Comparaison des données observées et simulées pour Madrid. Totaux de pluie annuels. Statistiques mensuelles des données.

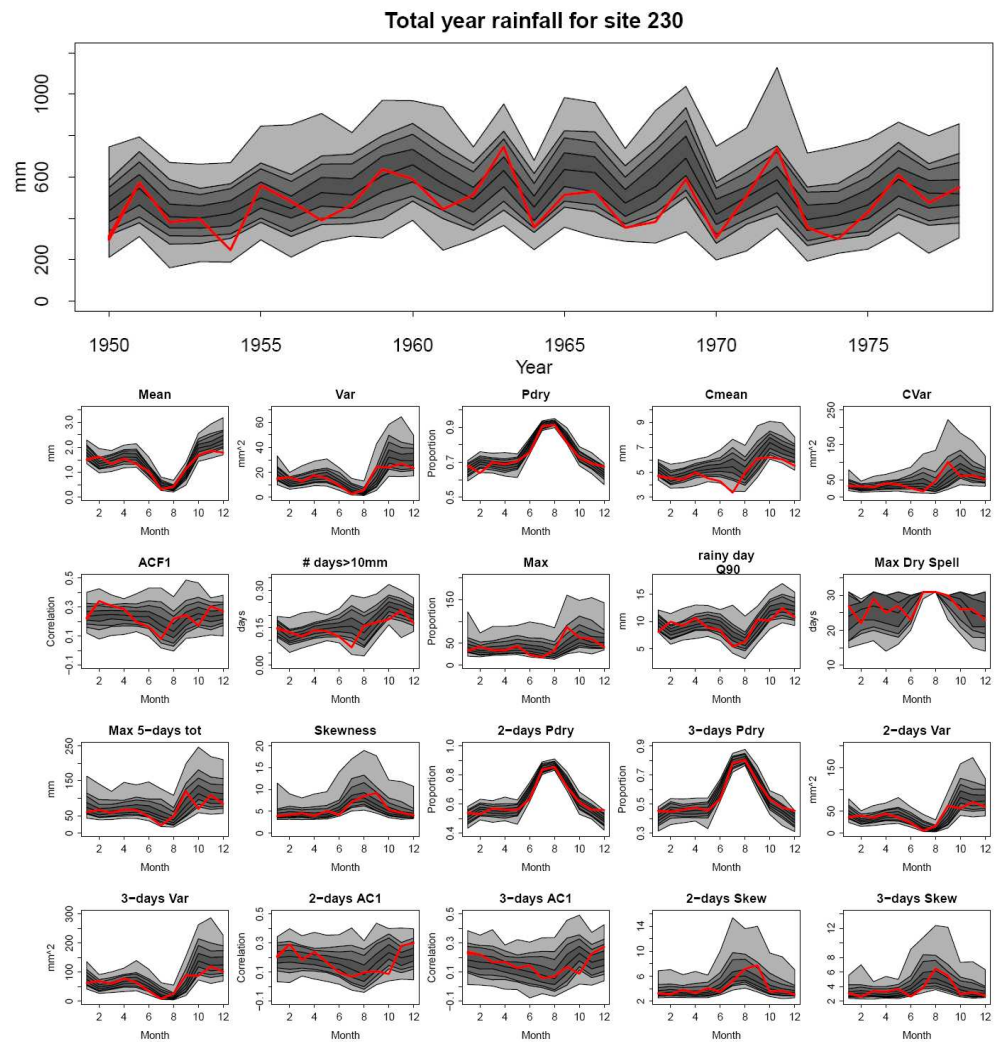


Figure 34. Période de validation (1950-1978). Comparaison des données observées et simulées pour Madrid. Totaux de pluie annuels. Statistiques mensuelles des données.

Nous pouvons observer que les pluies annuelles ont un comportement très variable, autant pour la calibration que pour la validation. Cette variabilité est bien représentée pour les deux périodes. Le modèle est capable de prendre en compte la variation qui a lieu aussi pour les statistiques, même si la variabilité que ces valeurs prennent n'est pas trop grande entre les deux périodes.

Dans l'annexe 9 un exemple des résultats des résidus Pearson pour les deux modèles, *logistique et gamma* est inclus. Cette analyse est une des méthodes utilisées pendant la calibration du modèle qui sont décrit dans l'annexe 4.

Simulation avec les données atmosphériques du GCM

Pour Madrid la vérification des résultats obtenus pour la période de calibration est en général très bonne pour tous les modèles climatiques générales utilisés dans ce projet.

Dans l'annexe 10 nous pouvons voir le comportement du modèle CSIRO_mk3.

Les simulations obtenues pour ce même modèle avec les différentes hypothèses de changement climatique sont les suivantes :

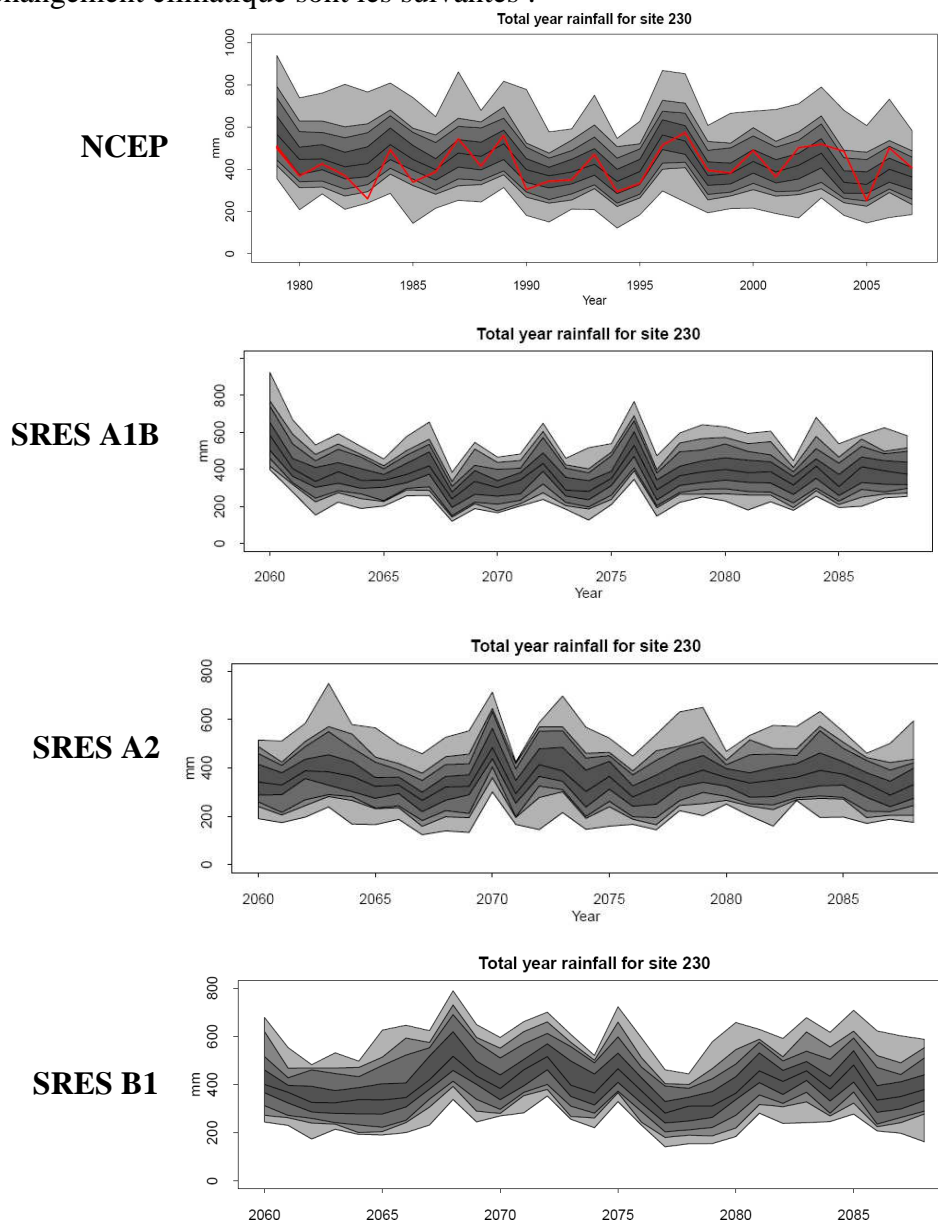


Figure 35. Pluies annuelles simulées pour la période 2060-2088 selon le modèle CSIRO_mk3_5, pour les scénarios A1B, A2, B1. Comparaison avec les pluies des derniers ans utilisées pour la calibration avec données atmosphériques issus des GCM.

Si nous comparons ces résultats nous pouvons conclure que pour le scénario faible (B1) la quantité de pluies sera plus haute que pour le scénario fort (A2) et le scénario moyen (A1B), cette première comparaison nous indique que l'effet du changement climatique à Madrid sera, selon la prévision de ce modèle, la diminution des pluies.

Si nous étudions les graphiques de la moyenne obtenue à partir de tous les GCM par rapport à la période et les scénarios, nous observons une légère réduction de la pluie pour le futur se produit. Dans cette occasion ce phénomène se produit aussi quand nous étudions le comportement selon la saison. Dès lors, nous pouvons dire que pour Madrid le phénomène du changement climatique provoque un effet dans le même sens pendant toute l'année: la diminution des précipitations.

Si nous regardons ce même graphique pour la moyenne seulement des jours humides nous pouvons vérifier que la tendance est la même, donc nous pouvons dire que cette diminution des pluies sera aussi à cause d'une diminution de la quantité d'eau dans un événement pluvieux.

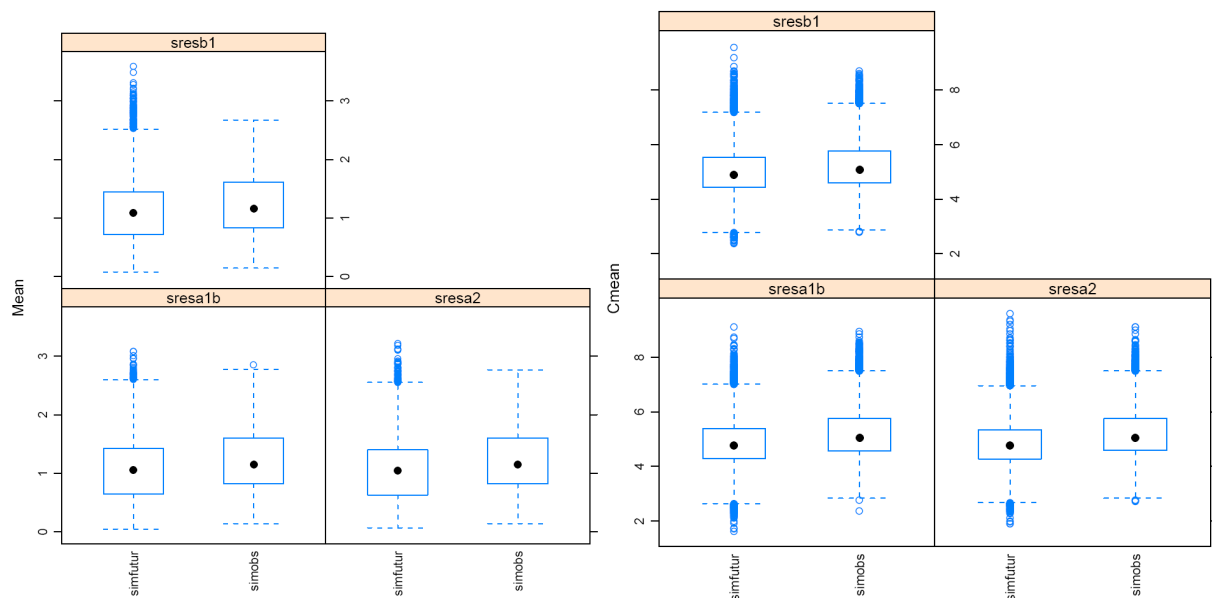


Figure 36. Box plots de la moyenne des pluies (gauche) et la moyenne pour les jours humides (droite), par rapport aux scénarii et la période.

Deuxième validation (RCM)

L'objectif est la vérification de l'ajustement entre le comportement des RCMs et notre modèle de pluies journalières, pour le présent et pour les simulations de futur.

Dans la figure 37 nous pouvons voir la représentation des données issues des RCM pour la période de calibration et la période future. En effet en regardant ces résultats pour les douze RCMs disponibles nous déduisons que les meilleurs modèles sont le C4IRCA3 (HadCM3)²⁹, le SMHIRCA (BCM), le SMHIRCA (HadCM3Q3) et l'ETHZCLM (HadCM3Q0).

²⁹ Entre parenthèses le modèle GCM couplé à chaque RCM.

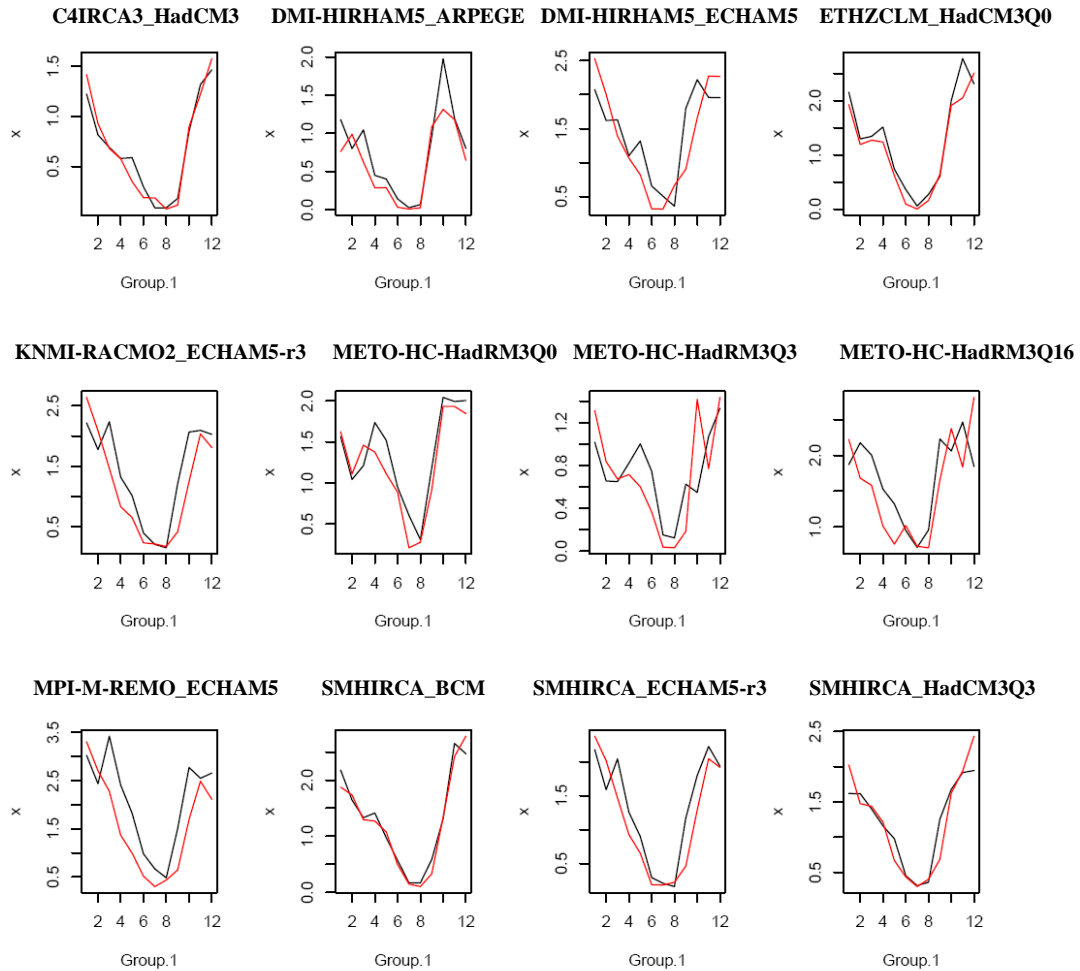


Figure 37. Moyenne de la pluie issue des différents RCMs (couplés avec ses correspondantes GCMs). En noir, la période 1981-2008; en rouge, la période 2062-2089).

Les résultats pour le modèle SMHIRCA sont ici représentés. Si nous regardons les résultats pour les pluies annuelles, nous voyons un ajustement bon pour la période de calibration, mais un ajustement un peu plus faible pour la simulation. La pluie dans le futur que ce RCM prévu est plus haute que celle de notre modèle.

Dans les figures 38, 39, 40 et 41, nous pouvons observer les résultats des statistiques pour le modèle. Nous pouvons vérifier que la concordance entre les données simulées avec notre modèle et les données prédites par le RCM est très bonne pour les deux périodes. Le modèle est capable de prendre en compte les petites variations dynamiques entre les périodes, par exemple pour la proportion des jours humides (figures 40 et 41).

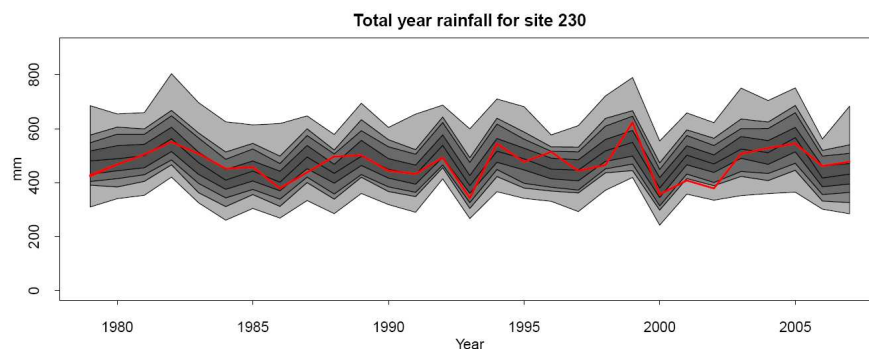


Figure 38. Prévisions annuelles du SMHIRCA pour la période (1979-2007) par rapport à les simulations de notre modèle pour des données de calibration issues de ce RCM.

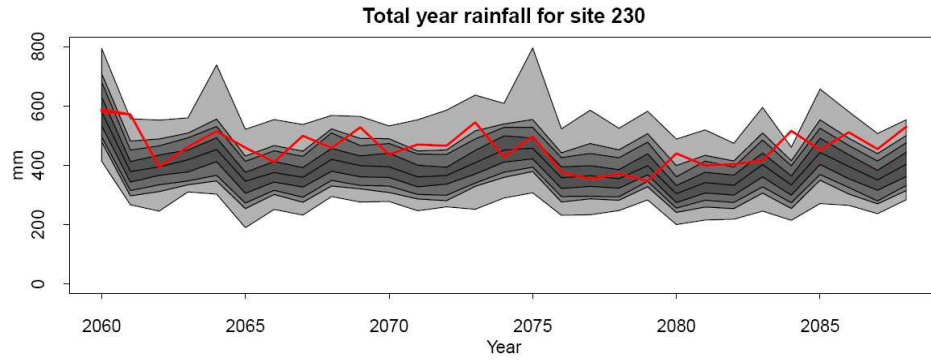


Figure 39. Prévisions annuelles du SMHIRCA pour la période future (2060-2088) par rapport à les simulations de notre modèle pour des données de calibration issues de ce RCM.

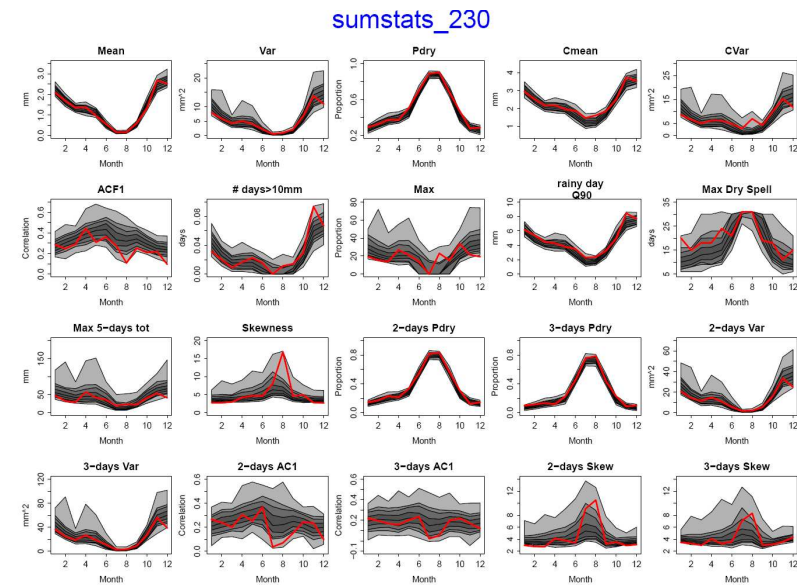


Figure 40. Statistiques pour la période de calibration (1979-2007) dans la deuxième calibration pour le modèle SMHIRCA (BCM).

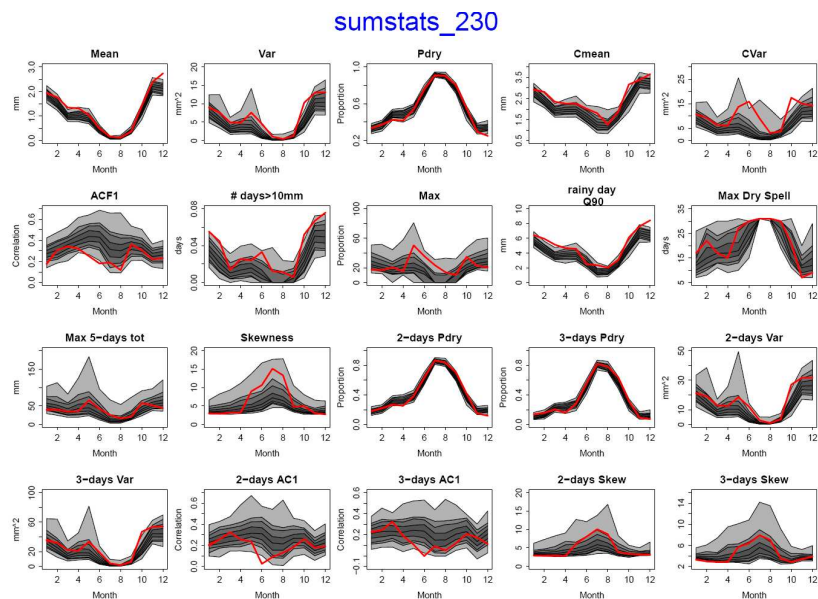


Figure 41. Statistiques pour la période future (2060-2088) dans la deuxième calibration pour le modèle SMHIRCA (BCM).

Extrêmes:

Le comportement des extrêmes dans le cas de Madrid est inverse au cas de Lugano. Egalement dans ce cas, la distribution des extrêmes a été calculée pour les simulations en provenance du GCMs.

A Madrid les prévisions à partir des simulations du futur diagnostiquent une diminution assez intense de la quantité de pluie, comme nous pouvons vérifier dans la figure 42. C'est-à-dire, à Madrid des phénomènes de sécheresse peuvent être attendus comme conséquence du changement climatique.

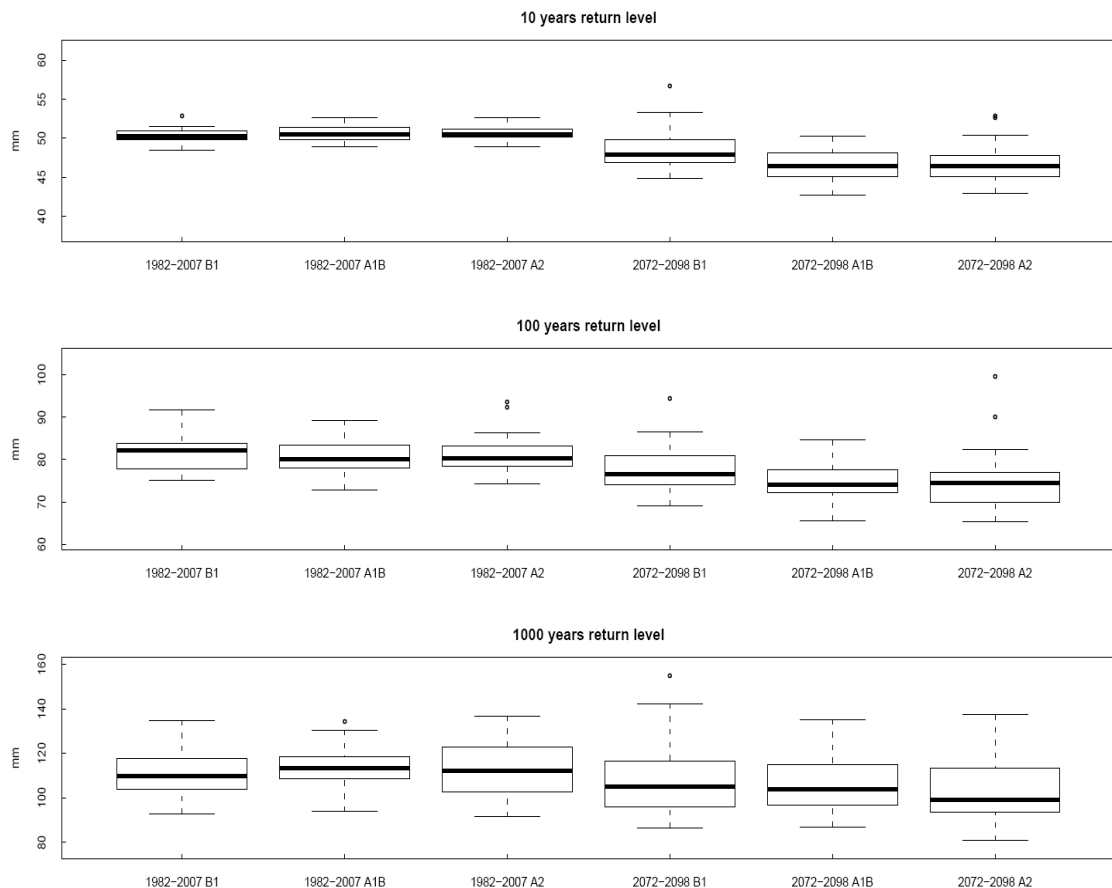


Figure 42. Phénomènes extrêmes de pluie pour les différentes considérations de la période de retour: 10, 100 et 1000 ans, à Madrid.

II. Pluies Horaires

Calibration du modèle (NCEP)

Dans les cas de Madrid la calibration du modèle a donné des bons résultats. Il n'y a pas été nécessaire le changement des valeurs frontières du paramètres et non plus les valeurs par défaut des poids du modèle. Dans la figure 43 nous voyons la concordance du modèle quand les statistiques horaires et journalières sont obtenues à partir des données simulées avec GLIMCLIM avec les données NCEP.

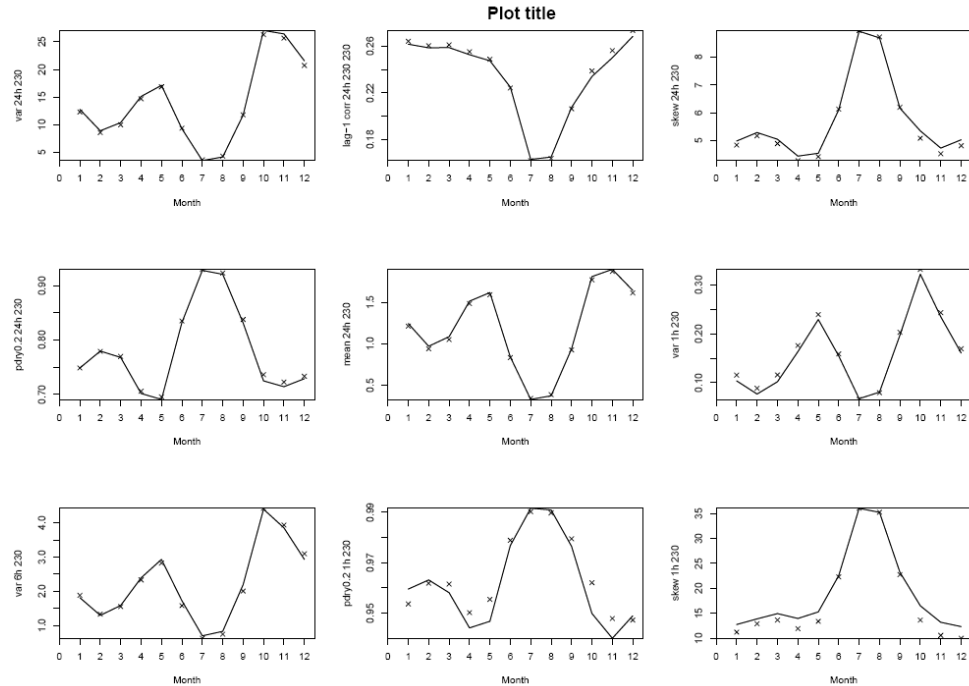


Figure 43. Période de calibration (1979-2007). Valeur des statistiques pour les données simulées NCEP, et celles qui sont simulées par le modèle.

Comparaison de résultats pour le XX siècle

Pour la station de Madrid les données horaires de pluie ne sont pas disponibles, donc le pas suivant est faire la comparaison entre les périodes de calibration et validation, pour observer la variation du comportement des pluies pour le XX^{ème} siècle.

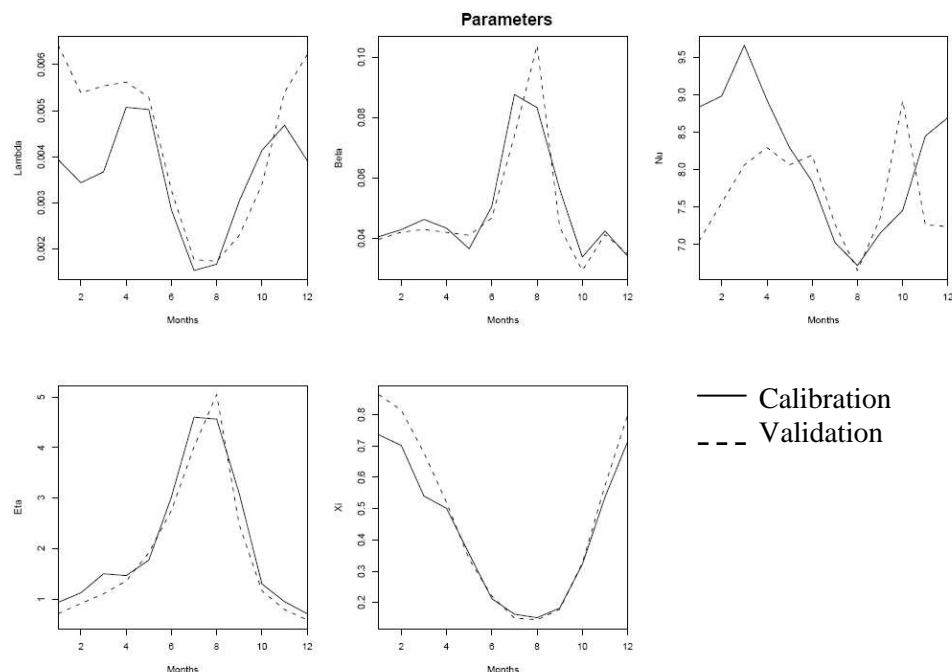


Figure 44. Comparaison entre les paramètres obtenus pour la période de calibration 1980-2007 et la période de validation 1950-1978, à partir des données journalières simulées NCEP.

Si nous regardons la figure 44 nous pouvons dire que les différences entre périodes ne sont pas trop grandes. Le nombre de cellules (Nu) et la fréquence des origines des pluies (Lambda) augmentent pendant les mois d'hiver pour la période de calibration. Ceci peut être due à un changement dans le comportement des pluies pour ces mois, de façon que la fréquence des événements pluvieux augmente, mais avec une quantité de pluie plus petite.

Effet du changement climatique sur les pluies horaires. XXI^{ème} siècle

Dans le cas de Madrid, nous avons choisi le scénario a1b pour la comparaison entre les pluies présentes et futures. Le modèle utilisé est le 'meto_hc_HadCM3Q3.run1'. La comparaison pour les paramètres est représentée dans la figure 45.

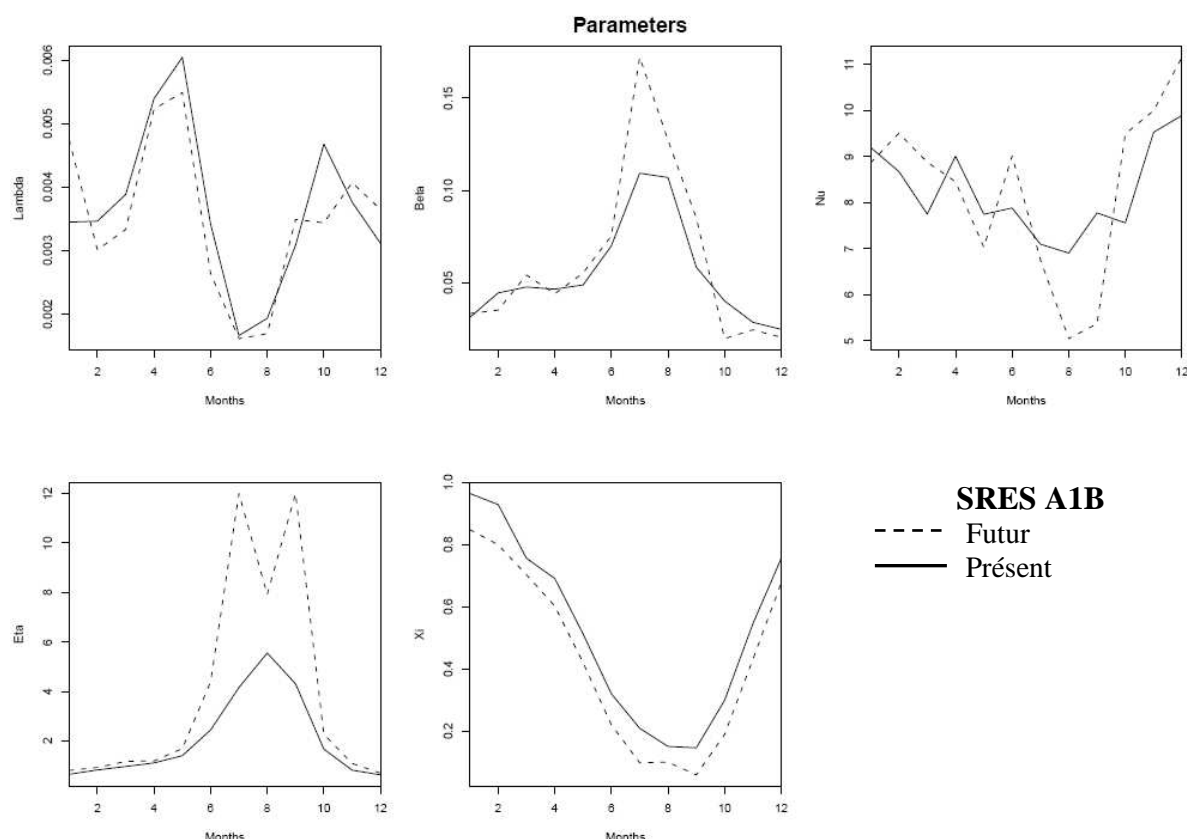


Figure 45. Comparaison des paramètres du modèle NSRP entre les prévisions pour la fin du XXI^{ème} siècle (2060-2088) et le présent (période de calibration 1979-2007). Modèle 'meto_hc_HadCM3Q3.run1'.

Nous voyons que dans le futur le paramètre Beta augmente pour l'été. Beta est la fréquence des cellules qui suivent à une origine des précipitations.

Le paramètre Eta représente l'intensité moyenne de pluie pour chaque cellule (à l'inverse [h/mm]). Pour les étés du futur ce paramètre augmente, c'est-à-dire, l'intensité donc diminue.

Le Nu (nombre de cellules qui apparaissent ensuite l'origine de l'orage) expérimente aussi une diminution pour l'été. Pour ce scénario et ce modèle une diminution très grande des pluies pendant l'été est prévue. Le paramètre Xi diminue pour tous les mois de l'année (inverse de l'intensité de pluie) qui nous indique que les événements pluvieux seront plus intenses.

9.2.3. Tessin: Calibration et Validation d'un modèle de pluies journalières pour le cas multi-site.

Le premier cas traité dans ce projet est la modélisation des pluies journalières pour le cas multi site du canton Suisse du Tessin. Huit stations ont été considérées pour cette étude: Coldrerio (COL), Fescoggia (FES), Lugano(LUG), Monte Bre s.Lugano (MBR), Morbio Superiore (MOS), Ponte Tresa (POT), Stabio (SBO) et Scudelatte (SCD) (annexe 9).

Les données journalières utilisées pour la modélisation sont prises de la base de données de Météo Suisse. Ils englobent la période 1950-2008, toutefois à cause de la limitation de disponibilité des variables atmosphériques du NCEP, la période choisi pour la calibration est 1982-2007, et 1956-1981 pour la validation.

Les cas multi-site du Tessin a été mon premier travail avec GLIMCLIM, pour cette raison, nous avons commencé par considérer toutes les variables NCEP comme des variables potentiels. Dans les modèles *gamma* et *logistique* nous avons donc étudié l'influence de plusieurs prédicteurs atmosphériques.

Pour le modèle *logistique et gamma* la pression au niveau de la mer, l'humidité relative et le vent méridional à différents altitudes; la pression au niveau de la mer et la variable Omega³⁰ ont été trouvés significatives. Nous pouvons voir les détails de ces modèles dans l'annexe 10.

Un aspect important à prendre en compte est que dans le cas multi-site prédicteurs liés au contexte spatial peuvent être utilisés:

- Les prédicteurs pour la représentation de la variabilité régionale des sites.
Les modèles en GLIMCLIM assument stationnarité spatial. Par exemple, avec ces prédicteurs c'est possible d'inclure des effets topographiques sur les précipitations [Segond, M-L. et al (2006)]. Dans le cas du Tessin l'altitude et les coordonnées nord et est sont considérées.
- La dépendance entre sites.
Dans le cas multi-site il y a une relation de dépendance entre les sites, car ceux qui sont proches géographiquement sont influencés par les mêmes phénomènes climatiques [Segond, M-L. et al (2006)].

Une fois que le modèle est calibré, nous faisons deux cents simulations pour la période de calibration. Les simulations sont faites simultanément pour les huit stations. Avec GLIMCLIM, les données manquantes sont aussi simulées avec le modèle. Dans ce cas, elles ont été aussi simulées deux cents fois, pourtant en général pour les données manquantes il est suffisant avec un nombre plus petit de simulations (par exemple, comme nous avons fait dans les cas d'étude précédents elles seront simulées dix fois).

Quand le modèle est créé l'objectif est de vérifier s'il est capable de bien reproduire les données observées dans la période de calibration et de ce fait être sûr d'avoir bien choisi les prédicteurs du modèle.

³⁰ La variable Omega (Pa/s) est une mesure de la composante verticale de la vitesse en coordonnées de pression (dP/dt).

Dans la figure 46, nous pouvons observer que le comportement de la pluie totale annuelle pour les périodes d'été (juin, juillet, août) et hiver (décembre, janvier, février). La ligne noire représente les données observées et les différents couleurs des franges représentent les données simulées par déciles³¹.

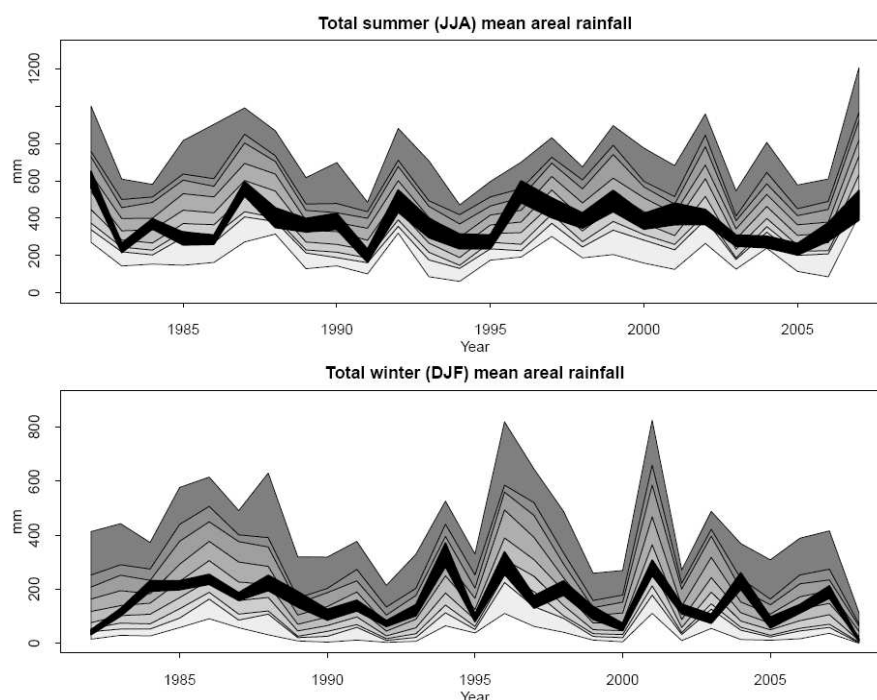


Figure 46. Période de calibration 1982-2007. Comparaison de données observées et données simulées pour les mois d'été et hiver.

Si nous regardons cette figure nous voyons que la variation du comportement de la pluie tout au long des années, est bien représentée pour l'été et l'hiver. Celle ci est importante parce que nous indique que notre modèle est capable de bien reproduire des comportements de la pluie qui n'ont pas été spécifiquement utilisés dans le processus de calibration.

La performance du modèle pour cette période est aussi évaluée par la comparaison du comportement de certaines statistiques mensuelles des données historiques et des données simulées par notre modèle.

Ces statistiques considérées sont la moyenne des pluies et l'écart type, la proportion de jours humides, la moyenne et l'écart type de la pluie quand nous considérons seulement les jours humides, la pluie maximale, l'autocorrélation de trois jours, la longueur maximale d'une période sèche, la pluie maximale accumulé en cinq jours et l'asymétrie.

La figure 47 représente cette comparaison pour toute la zone d'étude (les huit stations). Les lignes plus grosses dans les figures sont à cause de la simulation des données manquantes.

La figure 48 représente ces statistiques pour deux des stations particulières: Lugano et Ponte Tresa.

³¹ En statistique, un décile est chacune des 9 valeurs qui divisent un jeu de données en 10 parts égales, de sorte que chaque partie représente 1/10 de l'échantillon de population (Source: <http://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9cile>).

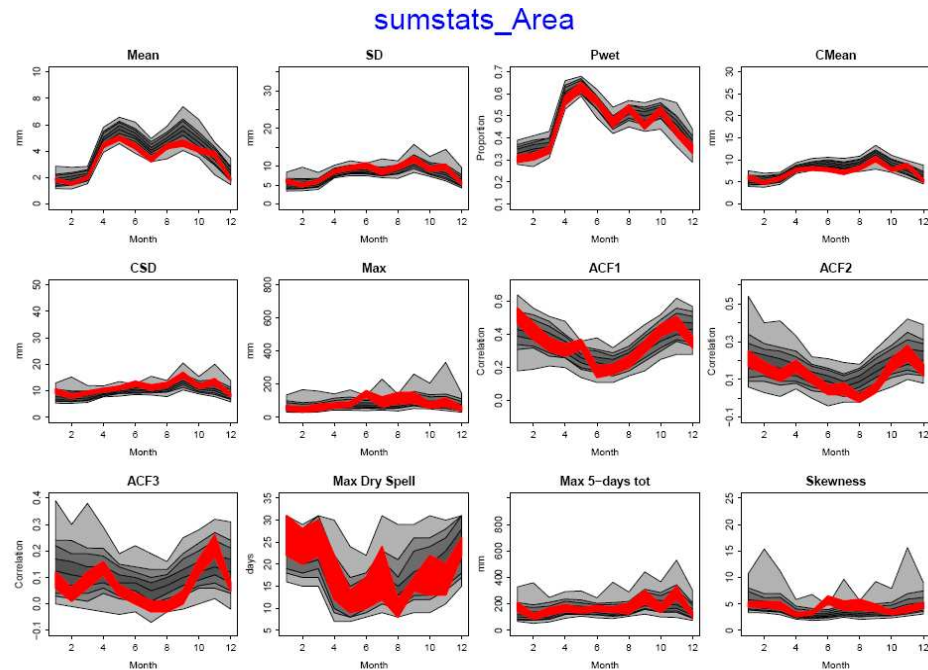


Figure 47. Période de calibration 1982-2007. Comparaison des statistiques des données observés et les simulés. (1982-2007). Statistiques traités: la moyenne, l'écart type, la moyenne et l'écart type des jours humides, la pluie maximale, l'autocorrélation de trois jours, la longueur maximale d'une période sèche, la pluie maximale accumulée en cinq jours et l'asymétrie.

Nous pouvons aussi observer une bonne concordance entre les statistiques des données simulées et observées, mais l'analyse des résultats avec la présence des données manquantes doit être faite avec précaution si la quantité d'eux est trop grande.

Pour cette raison nous regardons les graphiques obtenues à partir de notre modèle pour chaque station. En effet, nous constatons que la majorité des données manquantes proviennent des stations de Fescoggia et Monte Bre s.Lugano. Dans les stations de Lugano et Ponte Tresa la quantité des données manquantes est faible (à raison des résultats graphiques). Quelques statistiques, comme la moyenne ou la moyenne des jours humides, sont mieux représentées pour la station de Lugano. Pour autres statistiques, comme l'autocorrélation du premier jour, la station Ponte Tresa est mieux représentée. Nous pouvons donc observer que en général l'ajustement entre les statistiques est bien représenté. Ce comportement est également observé dans l'étude individuelle des autres stations.

Ensuite nous réalisons la validation du modèle pour la période 1956-1981. Les figures 49 et 50 représentent cette analyse.

Pour la validation, le problème des données manquantes est encore plus grand. Ceci est facilement vérifié en regardant la graphique des pluies annuelles, surtout pour les premières années de la période. Ce graphique nous montre aussi que la concordance entre données simulées et observées est meilleure pour les dernières années de la période, tandis que pour les années centrales le modèle surestime les pluies.

La figure 48 montre les statistiques de pluies mensuelles pour Lugano et Stabio durant la période de validation. Nous voyons que l'occurrence des pluies est bien représentée, mais que le modèle simule trop de pluie pour les jours humides (Cmean, ou moyenne de pluie des jours humides).

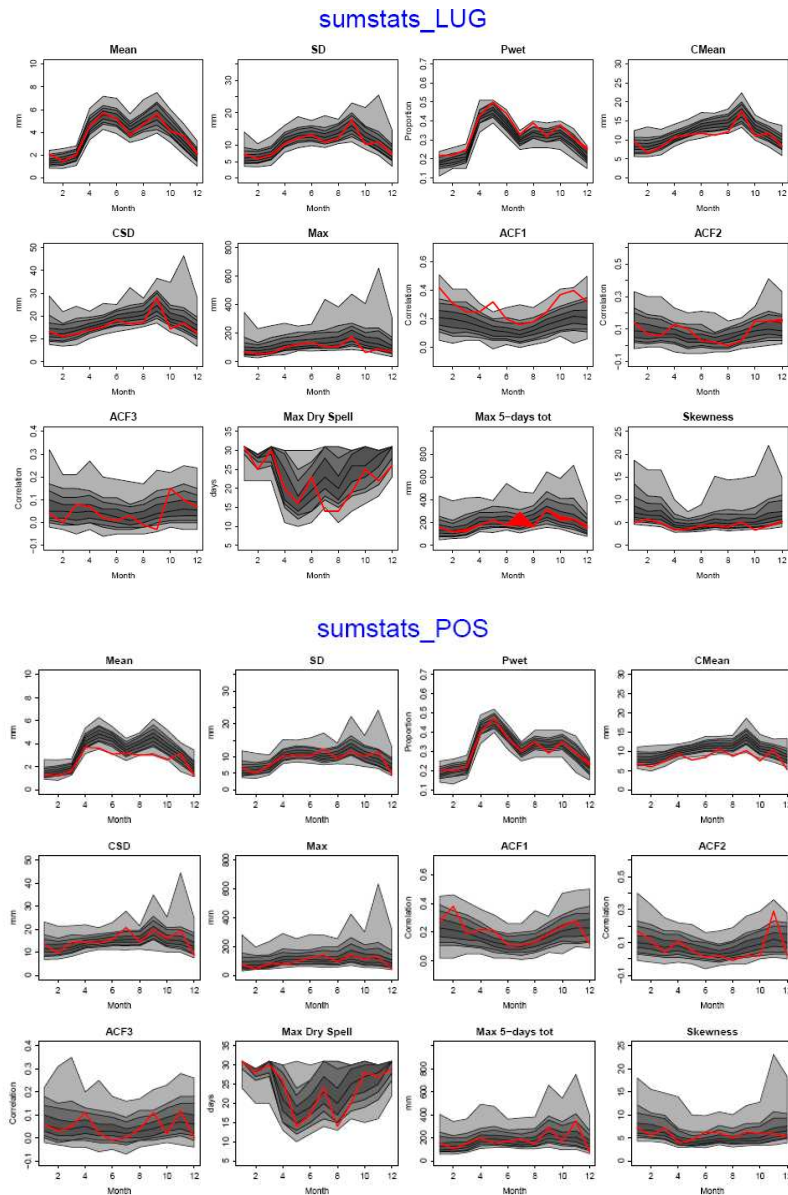


Figure 48. Période de calibration (1982-2007). Comparaison des statistiques des données observées et simulées. Stabio et Lugano.

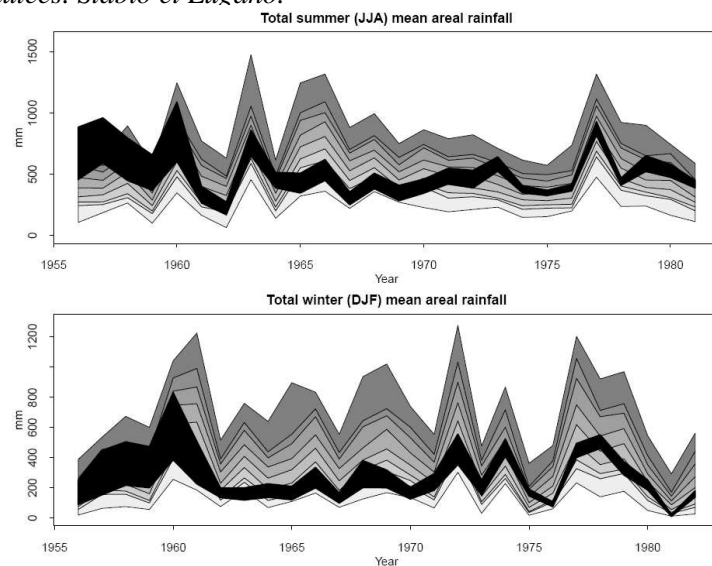


Figure 49. Période de validation 1956-1981. Données observées et données simulées pour les mois d'été et hiver.

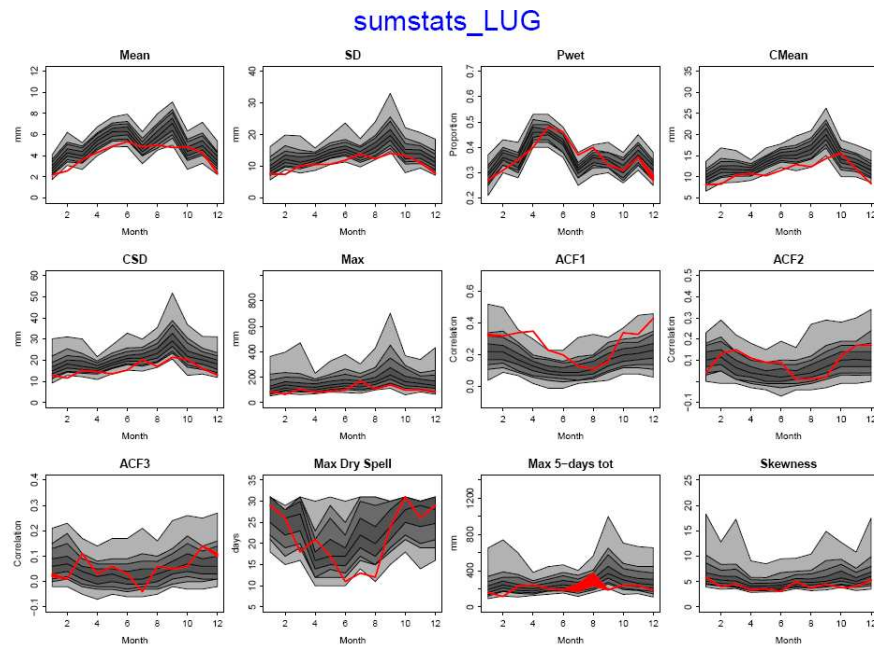


Figure 50. Période de validation (1956-1981). Comparaison des statistiques des données observées et simules. Lugano. Statistiques traités: la moyenne, l'écart type, la moyenne et l'écart type des jours humides, la pluie maximale, l'autocorrélation de trois jours, la longueur maximale d'une période sèche, la pluie maximale accumulée en cinq jours et l'asymétrie.

Les figures 51 et 52 représentent la proportion des jours humides par rapport aux sites pour deux mois: janvier et juillet.

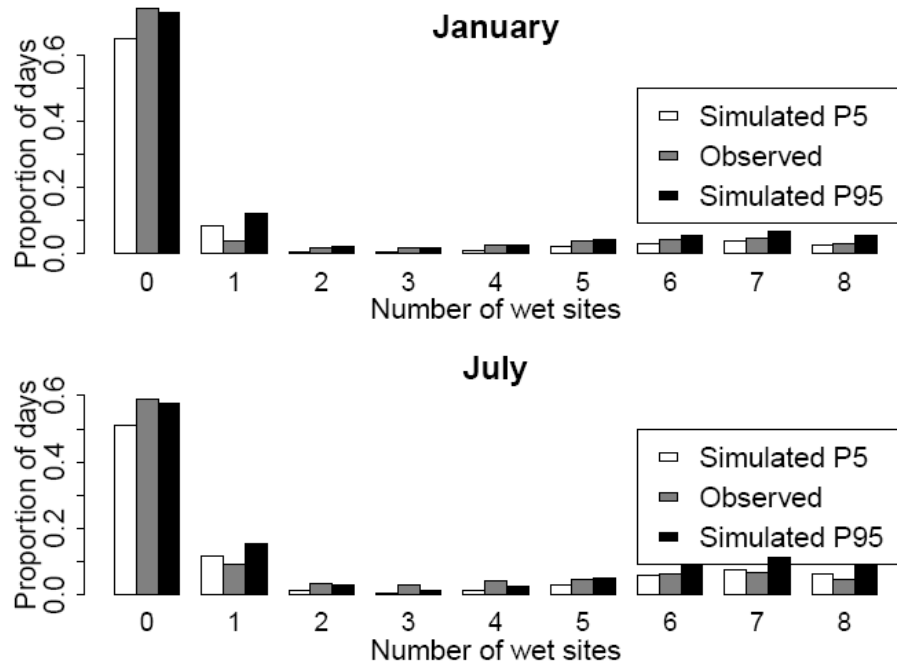


Figure 51. Période de calibration (1981-2007). Proportion de jours humides en fonction des sites. Légende: (0) Toutes les stations, (1) Coldrerio (COL), (2) Fescoggia (FES), (3) Lugano (LUG), (4) Monte Bre s.Lugano (MBR), (5) Morbio Superiore (MOS), (6) Ponte Tresa (POT), (7) Stabio (SBO), (8) Scudelatte (SCD).

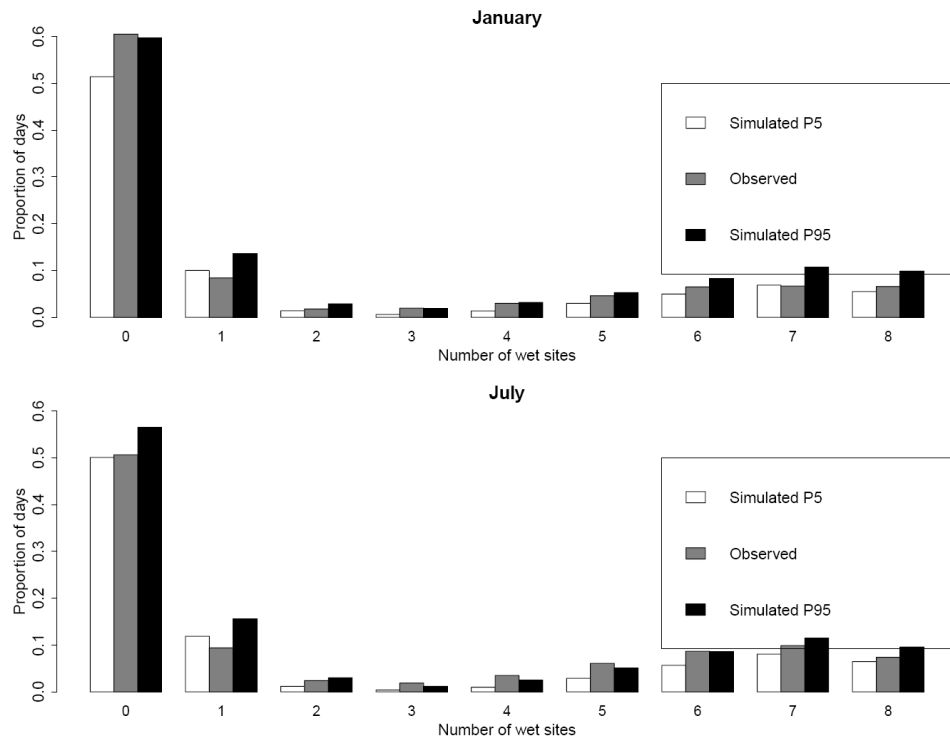


Figure 52. Période de validation (1956-1980). Proportion de jours humides en fonction des sites. Légende: (0) Toutes les stations, (1) Coldrerio (COL), (2) Fescoggia (FES), (3) Lugano (LUG), (4) Monte Bre s.Lugano (MBR), (5) Morbio Superiore (MOS), (6) Ponte Tresa (POT), (7) Stabio (SBO), (8) Scudelatte (SCD).

Avec la comparaison des sites qui sont simultanément humides, nous pourrions étudier si notre modèle est capable de bien représenter sa dépendance.

Ces figures représentent la variabilité des simulations. Pour chaque simulation la proportion mensuelle des jours humides est calculée. La colonne blanche et la colonne noire représentent le 5^{ème} et le 95^{ème} quantile, respectivement, de ces données. L'objectif est déduire si le modèle est capable de reproduire les histogrammes des données observés. [Yang, C. et al (2005)]

Dans ce cas la concordance entre les histogrammes est bonne pour les deux mois choisis et les deux périodes (calibration et simulation), donc nous pouvons conclure que la dépendance des sites est bien reproduite par le modèle.

10. Conclusion

Ce projet de Master a participé dans la thèse de Xavier Beuchat pour le développement d'une méthodologie de simulation de pluies sous différents hypothèses de changement climatique.

La compréhension, l'appropriation et l'application de cette méthodologie à différents cas d'étude a été le travail réalisé pendant le semestre.

L'objectif a été de travailler avec les cas où l'obtention des résultats positifs avec la méthodologie ici décrite est un peu plus critique, pour pouvoir ainsi déduire les points forts et faibles de la méthodologie.

De cette façon pendant le travail du semestre, les résultats obtenus pour certaines de ces stations 'problématiques' n'ont pas arrivé à être bons.

Pour cette raison quelques alternatives ont été réalisées.

Pour le cas de Lugano, traité dans ce rapport, l'introduction des données du vent dedans le modèle GLIMCLIM a été le facteur qui nous a permis obtenir des bons résultats.

Ce type de comportement a été le même pour les autres stations suisses comme Stabio, San Bernardino ou la Dôle.

Ceci est un des principaux soucis de la méthodologie, comment choisir les bons paramètres atmosphériques qui donnent un bon résultat général à toute la planète.

Pour RainSim, nous avons eu aussi des résultats de douteuse qualité.

Pour ces cas, nous avons essayé de trouver si en considérant autres statistiques pour la calibration du modèle RainSim, les résultats soient meilleures.

Les stations d'Hawaii (USA) ou 'elmdon' (Royaume Uni) sont deux exemples où nous avons appliqué cette étude. Nous avons introduit des fonctions statistiques comme l'autocorrélation horaire, ou des valeurs des statistiques chaque six heures (autocorrélation, proportion des jours humides, asymétrie...). Aussi nous avons essayé avec le retrait de quelques fonctions comme la variance chaque six heures ou l'horaire. Si nous définissons trop de paramètres le modèle sera trop compliqué pour pouvoir bien s'adapter à toutes les fonctions statistiques.

Toutefois l'amélioration de résultats a été minimale, sans trouver un autre jeu de statistiques avec une meilleure qualité des résultats.

Dans ce rapport nous avons décrit avec détail deux cas 'single site': Lugano et Madrid.

Pour les deux, la méthodologie a eu de bons résultats jusqu'à l'échelle traitée: l'échelle horaire. Les méthodes développées pour la réalisation de la validation des modèles ont été aussi positives. Elles sont deux villes avec une climatologie assez différente, donc nous pouvons conclure que cette méthodologie est assez flexible.

Aussi les résultats obtenus avec ces cas démontrent que le changement climatique aura effets sur les deux sites. Les effets seront aussi assez différents: la diminution généralisée des pluies pour Madrid au cours de toutes les saisons de l'année, tandis que, pour Lugano, le effet est une différenciation plus intense des saisons. Hivers plus pluvieux et étés plus secs.

Les perspectives à réaliser après ce travail sont en première lieu la continuation avec la réduction d'échelle.

Dans ce travail nous avons arrivé jusqu'à la simulation des pluies futures au niveau horaire. Cette échelle n'est pas encore suffisant pour les études hydrologiques, dès lors, il reste encore la phase de la réduction d'échelle sub-horaire.

Dans le cas du Tessin nous avons parlé du cas multi site au niveau journalier, mais le cas multi site au niveau horaire n'a pas été traité. Avec RainSim cet étude multi site est possible avec l'introduction de deux nouveaux paramètres dans le modèle NSRP :

- **ρ** : Densité spatial des cellules (un processus de Poisson qui définit la répartition spatiale des cellules).
- **Φm** : Facteur d'échelle proportionnel à la moyenne de la pluie qui caractérise chaque localisation m ³².

Pour finir nous devons parler de la raison par laquelle ces simulations sont réalisées : les résultats finalement obtenus avec ce travail de Master, c'est-à-dire, des séries de pluies futures sous des différentes hypothèses de changement climatique avec une échelle au niveau des études hydrologiques, fourniront les outils nécessaires pour l'évaluation des impacts du changement climatique sur les systèmes de gestion d'eau urbaine, et l'ultérieur développement de stratégies intelligentes qui fassent face aux événements provoqués par ce phénomène.

³² Ce paramètre est nécessaire pour représenter que la méthode NSRP est spatialement non stationnaire.

12. Annexes

Annexe 1: Distributions statistiques.

Distribution Binomial:

En statistique, la distribution binomiale est une distribution de probabilité discret qui mesure le nombre de succès dans une séquence de n essais de Bernoulli, où p est la probabilité de succès entre les essais.

Un essai de Bernoulli est caractérisé parce que seulement deux résultats sont possibles. Dans le modèle d'occurrence la variable réponse peut prendre deux valeurs. La valeur un, pour définir la occurrence d'un événement pluvieux, ou zéro, quand il n'y a pas de pluie.

Fonction de probabilité: La probabilité d'avoir k succès sur n essais est égal à :

$$f(k; n, p) = \Pr(K = k) = \binom{n}{k} p^k (1 - p)^{n-k}$$

Où $k = 1, 2 \dots n$

Distribution Gamma

En théorie des probabilités et en statistiques, une distribution Gamma est un type de loi de probabilité de variables aléatoires réelles positives. La famille des distributions Gamma inclut entre autres les lois exponentielles, les lois de sommes de variables aléatoires indépendantes suivant une même loi exponentielle, ainsi que la loi du χ^2 .

Une variable aléatoire X suit une loi Gamma de paramètres k et θ (strictement positifs), si la fonction de densité de probabilité peut se mettre sous la forme :

$$X \sim \Gamma(k, \theta) \quad f(x; k, \theta) = \frac{x^{k-1} e^{-\frac{x}{\theta}}}{\Gamma(k) \theta^k}$$

Processus de Poisson

Le processus de Poisson est composé d'un groupe de variables aléatoires $\{N(t) : t \geq 0\}$, où $N(t)$ c'est le nombre d'événements qui sont passé jusqu'à le moment t . Le nombre d'événements entre deux instants a et b est égal à $N(b) - N(a)$, et ils ont une distribution de Poisson.

Le processus de Poisson d'intensité λ (réel strictement positif) est un processus de comptage d'occurrences qui vérifie les conditions suivantes :

1. Les nombres d'occurrences dans des intervalles de temps disjoints sont indépendants
2. La probabilité d'une occurrence dans un petit intervalle de temps est proportionnelle à la longueur de cet intervalle, le coefficient de proportionnalité étant λ
3. La probabilité qu'il y ait plus d'une occurrence dans un petit intervalle de temps est négligeable

Il est possible démontrer que:

1. Les variables Nt ont une distribution de Poisson de paramètre λt .
2. T_k , le temps entre l'événement $k-1$ et l'événement k , est une variable aléatoire de distribution exponentiel et paramètre λ .
3. S_n , le temps écoulé entre l'instant initial et l'événement n , a une distribution gamma de paramètres (n, λ) .

Distribution de Poisson

La distribution de Poisson est une loi de probabilité discrète. Elle est composée d'une quantité de variables aléatoires N qui dénombrent le nombre d'occurrences qui prennent place pendant un laps de temps de longueur donnée. Si le nombre moyen d'occurrences dans cet intervalle est λ ($\lambda > 0$), alors la probabilité qu'il existe exactement k occurrences (k étant un entier naturel, $k = 0, 1, 2, \dots$) est :

$$p(k) = P(X = k) = e^{-\lambda} \cdot \frac{\lambda^k}{k!} \quad (\text{A.2.4.1})$$

Distribution exponentielle

La distribution exponentielle est souvent utilisée afin de modéliser le temps d'attente avant un événement spécifié.

La densité de probabilité de la distribution exponentielle prend la forme :

$$f(x; \lambda) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x} & , x \geq 0, \\ 0 & , x < 0. \end{cases}$$

Où le paramètre $\lambda > 0$.

Source: <http://fr.wikipedia.org>

Annexe 2. Calibration du modèle pour les pluies horaires

La réalisation de la calibration pour un modèle linéaire généralisé est le processus à travers duquel nous choisissons quels sont les prédicteurs appropriés pour la définition des modèles logistique et gamma.

Les stratégies utilisées pour prendre cette décision sont basées sur concepts statistiques. Pour la construction pratique du modèle nous étudierons les statistiques qui nous permettent apprécier l'adéquation du modèle aux données, les tests d'hypothèse pour les coefficients du modèle, les intervalles de confiance pour ces coefficients et l'analyse des résidus.

Fonction de vraisemblance et test de rapport de vraisemblance

La fonction de vraisemblance est une fonction qui nous permet de déduire les valeurs des paramètres d'un modèle statistique concret à partir des valeurs connues de la variable réponse de ce modèle.

Elle est une fonction de probabilité conditionnelle. Elle définit la probabilité de qu'un paramètre B prend une valeur déterminée b , quand le résultat de la variable à expliquer par le modèle est égal à une valeur connue A .

$$L(b / A) = P(A / B = b)$$

Avec la valeur que cette fonction prend dans notre modèle nous pouvons déduire si l'ajout d'un paramètre augmente l'explication du comportement des pluies ou non.

Si quand nous ajoutons un paramètre au modèle la valeur de cette fonction est plus haute, ça veut dire que la probabilité de que la valeur de la pluie (variable réponse) soit égale à la observée (variable connue) est plus haute. Cette analyse s'appelle méthode de Maximum de Vraisemblance.

En conséquence, quand nous modélisons avec GLIMCLIM, le but sera trouver les paramètres pour lesquels cette fonction est maximale.

Toutefois, quand un modèle est décrit en GLIMCLIM la valeur de la fonction de vraisemblance toujours va monter quand on ajoute des nouveaux paramètres. La raison c'est qu'un nouveau paramètre augmente toujours l'explication du modèle. Mais l'objectif est trouver les paramètres qui expliquent d'une manière plus réaliste et plus simple le comportement du phénomène d'étude.

En conséquence, nous n'ajouterons pas tous les paramètres qui nous donnent une valeur de la vraisemblance plus haute, parce que, en fait, tous les nouveaux paramètres augmentent cette valeur, sinon que nous seulement considérerons ceux qui augmentent cette fonction d'une manière significative.

Quand à cause des nouveaux paramètres introduits dans le modèle le nombre des observations considérées change, la méthode de maximum de vraisemblance ne peut pas être utilisée (Annexe 5).

Le rapport entre les vraisemblances de deux modèles est, quelque fois, une analyse plus utile.

Avec ce rapport nous pouvons faire la comparaison entre deux modèles.

Ce test de rapport entre vraisemblances c'est automatiquement réalisé par GLIMCLIM quand nous introduisons un ou plusieurs nouveaux paramètres dans le modèle. La valeur qui prend cette relation peut être analysée moyennant une distribution chi-carré de $q-p$

degrés de liberté, où q c'est le nombre de paramètres du nouveau modèle et p celui de l'ancienne [Chandler, R. GLIMCLIM User Guide. Annexe B]. Avec cette analyse nous serons capables de décider si le nouveau modèle est meilleur que l'ancienne.

Intervalles de confiance

Cette option d'évaluation du modèle est basée sur la réalisation d'un test d'hypothèse. En regardant les valeurs estimées pour les paramètres et la valeur de l'erreur standard, nous pouvons faire un test d'hypothèse pour savoir quels paramètres sont significatifs ou non.

Analyse des résidus

L'analyse des résidus nous permet de nous assurer que la variabilité est bien représentée dans le modèle.

Les résidus Pearson sont des résidus 'standardisés' définis comme :

$$r_{Pi} = \frac{y_i - \hat{\mu}_i}{\sqrt{V(\hat{\mu}_i)}} \quad \text{Où } y_i \text{ est la valeur observée et } \mu_i \text{ la valeur prédite, et } V(\mu_i) \text{ la variance.}$$

Si le modèle est correct, les résidus Pearson du modèle ont une distribution statistique de moyenne zéro avec la même déviation standard (normalement égal à un).

GLIMCLIM nous fournit la valeur des résidus Pearson pour les mois et les ans. De cette façon, nous serons capables d'évaluer pour les deux périodes du temps si les résidus Pearson accomplissent cette caractéristique ou non.

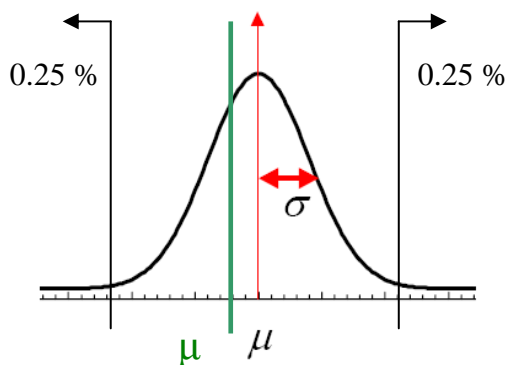
Pour une distribution Normale standard $X \sim N(0,1)$, l'intervalle de confiance à 95%, c'est-à-dire, la probabilité égale à 0,95 de contenir la valeur du paramètre que l'on cherche à estimer, est égal à : $P(-1.96 < z < 1.96) = 0.95$.

En conséquence, pour affirmer avec un 95% de confiance que les résidus Pearson sont égaux à zéro nous devons vérifier que :

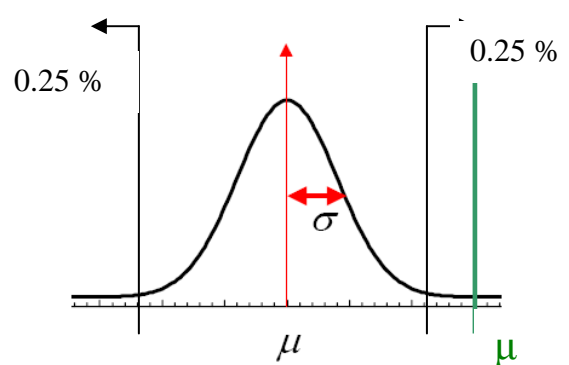
$$\bar{X} - 1.96 \times \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + 1.96 \times \frac{s}{\sqrt{n}}$$

GLIMCLIM nous donne la valeur de la moyenne des résidus (\bar{X}) et aussi la valeur de sa erreur standard ($\frac{s}{\sqrt{n}}$).

Du fait que ces résidus soient approximativement distribués selon une loi normale, avec ces deux valeurs nous pouvons vérifier si avec un 95% de confiance c'est possible affirmer si la moyenne des résidus Pearson est égale à zéro.



Statistiquement nous pouvons affirmer, avec un 95% de confiance, que la moyenne des résidus Pearson est égale à zéro.



Statistiquement nous ne pouvons pas affirmer, avec un 95% de confiance, que la moyenne des résidus Pearson soit égale à zéro.

Annexe 3. Données GCM

	sresa1b	sresa2	sresb1
bccr_bcm2_0	1	1	1
cccma_cgcm3_1_t47	1	1	1
cccma_cgcm3_1_t63	1	0	0
cnrm_cm3	1	1	1
csiro_mk3_0	1	1	1
csiro_mk3_5	1	1	1
gfdl_cm2_0	1	1	1
gfdl_cm2_1	1	1	1
giss_model_e_h	1	0	0
giss_model_e_r	0	1	0
iap_fgoals1_0_g	1	0	1
ingv_echam4	1	1	0
inmcm3_0	1	1	1
ipsLcm4	1	1	1
meto-hc_HadCM3Q0	1	0	0
meto-hc_hadcm3q16	1	0	0
meto-hc_HadCM3Q3	1	0	0
miroc3_2_hires	1	0	1
miroc3_2_medres	1	1	1
mpi_echam5	4	3	3
mri_cgcm2_3_2a	3	3	4
ncar_ccsm3	7	5	6
ncar_pcm1	4	3	1
ukmo_hadcm3	1	1	1
ukmo_hadgem1	1	1	0

Table B.1: Full dataset used in this work. Each row corresponds to a given model (see table B.2 on page 58 for more details). The headers *sresa1b*, *sresa2* and *sresab1* refer to the greenhouse gas (GHG) emission scenario of the same name (cf section 2.4.1 on page 16). The figures in the cells indicate how many runs of the given model for the specified GHG scenario are available.

Figure A.3.1. *Modèles Climatiques Générales utilisés dans ce travail. Nombre de modèles disponible pour chaque scénario.*

Annexe 4. Données RCM

Institute and model documentation	Model name	Acronym	Driving GCM
The Community Climate Change Consortium for Ireland (CCI)	RCA3	CCIRCA3	HadCM3Q16
http://sunshlaurt3.dai.de/metadata/ccl_25km.pdf			
Danish Meteorological Institute (DMI)	HIRHAM5	DMI-HIRHAM5	ECHAM5-r3
http://sunshlaurt3.dai.de/metadata/DMI_50km.pdf			
Danish Meteorological Institute (DMI)	HIRHAM5	DMI-HIRHAM5	cum-cm3 (ARPEGE)
http://sunshlaurt3.dai.de/metadata/DMI_50km.pdf			
Swiss Federal Institute of Technology of Zurich (ETHZ)	CLIM	ETHZ-CLIM	HadCM3Q0
http://sunshlaurt3.dai.de/metadata/ETHZ-ETHZ_50km.pdf			
The Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI)	RACMO	KNMI-RACMO2	ECHAM5-r3
http://sunshlaurt3.dai.de/metadata/KNMI_50km.pdf			
UK Met Office, Hadley Centre for Climate Prediction and Research (HC)	HadRM3Q0	METO-HC-HadRM3Q0	HadCM3Q0
http://sunshlaurt3.dai.de/metadata/METO-HC_25km.pdf			
UK Met Office, Hadley Centre for Climate Prediction and Research (HC)	HadRM3Q3	METO-HC-HadRM3Q3	HadCM3Q3
http://sunshlaurt3.dai.de/metadata/METO-HC_25km.pdf			
UK Met Office, Hadley Centre for Climate Prediction and Research (HC)	HadRM3Q16	METO-HC-HadRM3Q16	HadCM3Q16
http://sunshlaurt3.dai.de/metadata/METO-HC_25km.pdf			
Max-Planck-Institute for Meteorology (MPI)	REMO	MPI-M-REMO	ECHAM5-r3
http://sunshlaurt3.dai.de/metadata/MPI_50km.pdf			
Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)	RCA	SMHIRCA	BCM
http://sunshlaurt3.dai.de/metadata/SMHI_50km.pdf			
Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)	RCA	SMHIRCA	ECHAM5-r3
http://sunshlaurt3.dai.de/metadata/SMHI_50km.pdf			
Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)	RCA	SMHIRCA	HadCM3Q3
http://sunshlaurt3.dai.de/metadata/SMHI_50km.pdf			

Table C.1: Documentation on the regional circulation models used in this work. Driving GCM are described in table C.1.

Figure A.4.1. Modèles climatiques régionaux utilisés dans ce travail.

Annexe 5. Simulations à partir des GCM. Scénario a1b.
Période de calibration (1980-2007). Lugano.

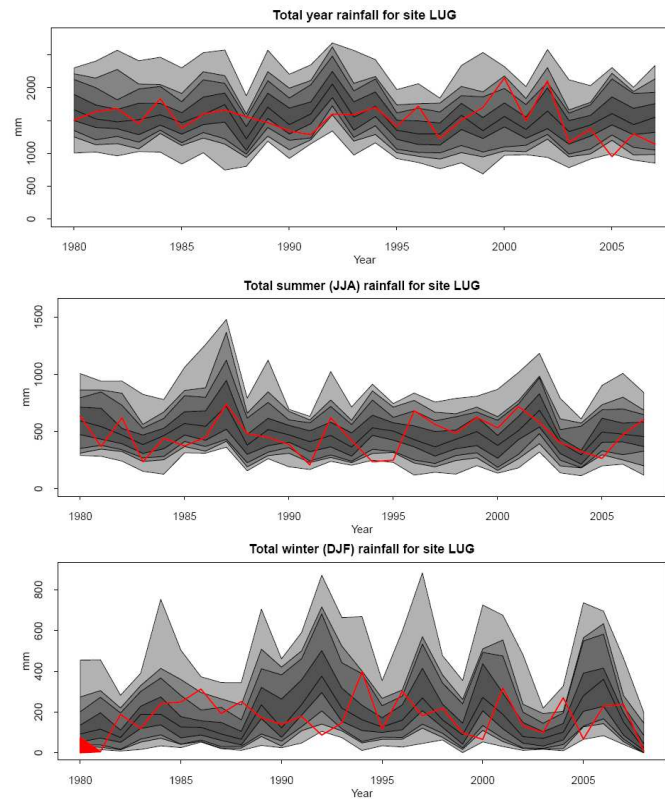


Figure A.5.1. *Modèle CMRM_CM3_RUN1*

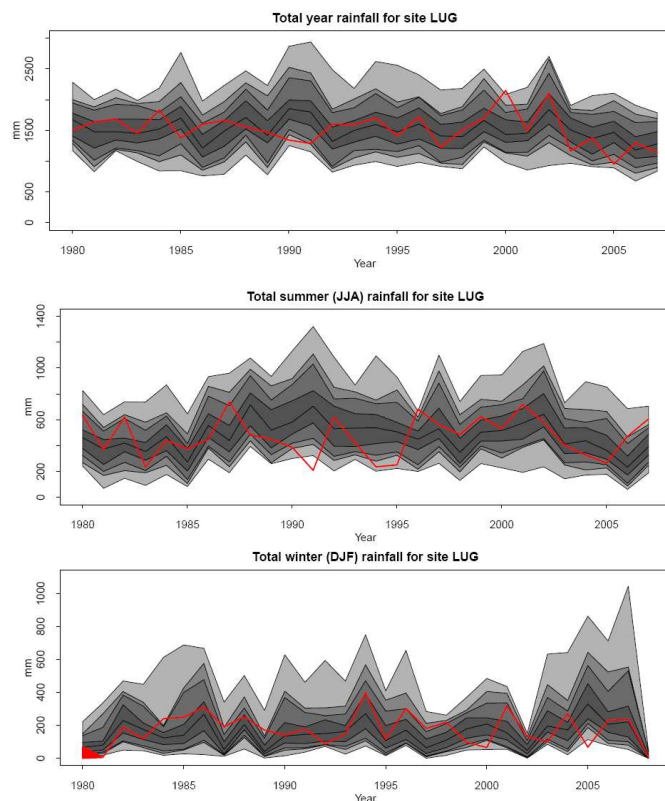


Figure A.5.2. *Modèle BCCR_BCM2_0.run1*

Annexe 6. Paramètres du modèle RainSim

Les valeurs frontières que par défaut utilise RainSim sont:

	Frontière inférieure	Frontière supérieure
λ	0.00001	0.02
β	0.02	1
ν	0.1	30
η	0.1	60
ζ	0.01	4

Pour ces valeurs les paramètres obtenus quand nous réalisons la calibration du modèle sont les suivantes.

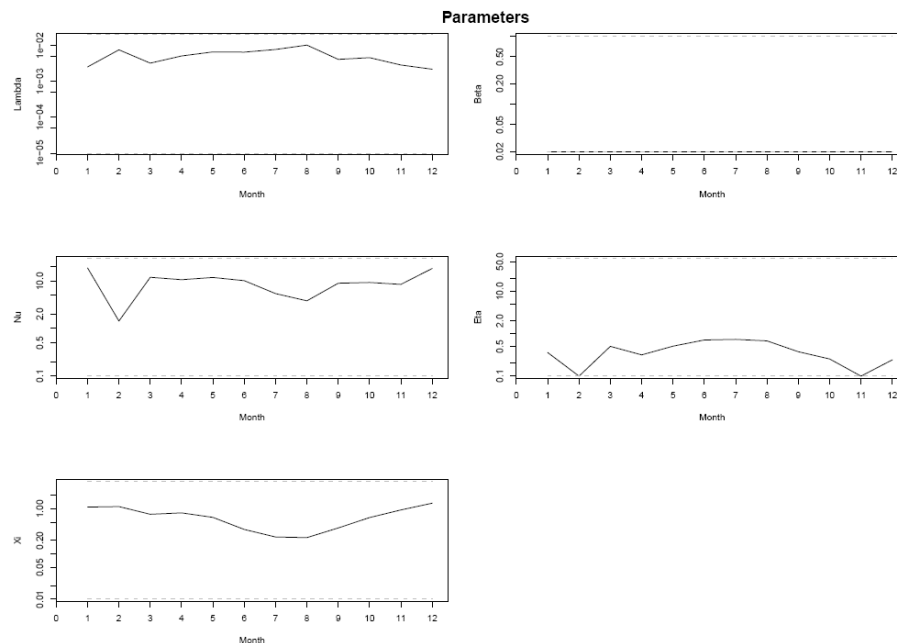


Figure A.6.1. Représentation de la variabilité mensuelle des paramètres qui définissent aux NSRP. Période de calibration 1956-2007. Lugano

Nous voyons que pour les paramètres Lambda, Nu et Eta, les paramètres sont limités par les conditions frontières.

Pour cette raison nous agrandissons ces conditions pour les paramètres problématiques:

	Frontière inférieure	Frontière supérieure
λ	0.00001	0.2
β	0.001	1
ν	0.1	100
η	0.01	60
ζ	0.01	4

Avec ces nouvelles valeurs nous obtenons déjà des valeurs appropriés, c'est-à-dire, qui ne sont pas conditionnés pour les valeurs frontières choisies.

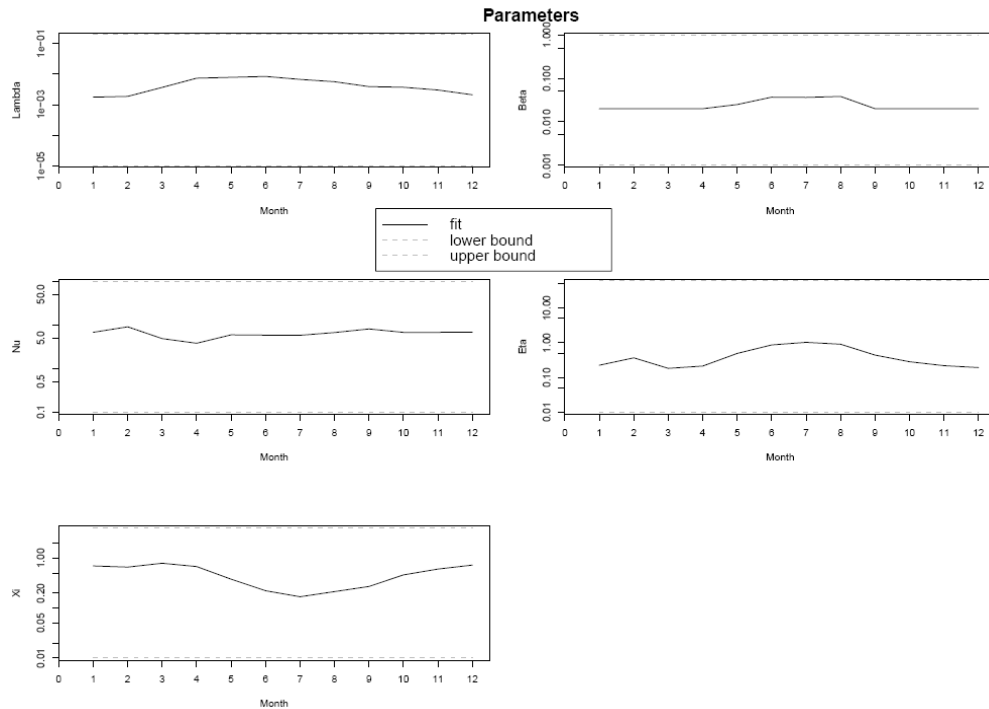


Figure A.6.2. Représentation de la variabilité mensuelle des paramètres qui définissent aux NSRP avec la modification des conditions frontières. Période de calibration 1956-2007. Lugano.

Annexe 7. Définition du modèle RainSim

```

Statistics
Comment Statistics derived from: Fitted to statistics:
NStats 9
Month -1

var LUG 24 2.000000 # # 54.269521 31.326186 85.283495 141.184367
173.867292 195.855610 179.060600 157.239832 281.846991 148.141997
140.057902 88.712516

corr LUG 24 6.000000 1 LUG 0.306541 0.278049 0.277083 0.265310
0.235375 0.218727 0.207667 0.217856 0.273631 0.282029 0.311706
0.331223

skew LUG 24 3.000000 # # 7.430403 6.935776 5.697785 4.422298
3.953089 4.074567 4.541269 4.767842 4.791729 4.885905 5.890264
6.773594

pdry0.2 LUG 24 7.500000 # # 0.844387 0.824663 0.743344 0.625683
0.555541 0.588034 0.659079 0.696013 0.685193 0.685509 0.729416
0.793888

mean LUG 24 6.000000 # # 1.796480 1.468075 2.988610 4.972706
6.211118 6.322335 5.365217 4.709228 6.360035 4.557999 3.787060
2.576987

var LUG 1 3.000000 # # 0.216471 0.177488 0.391287 0.732231
1.216707 1.776113 1.946347 1.719733 1.843721 0.708090 0.441548
0.275000

var LUG 6 2.000000 # # 6.098903 4.226303 10.411691 18.390664
25.994763 31.861524 30.359189 26.327334 40.384710 18.437316
13.668938 8.545147

pdry0.2 LUG 1 7.000000 # # 0.956564 0.961809 0.933798 0.902698
0.902511 0.924155 0.945869 0.952010 0.931352 0.915703 0.912912
0.934023

skew LUG 1 2.000000 # # 9.521736 10.776039 7.752755 6.420549
6.775664 8.269318 10.476637 11.266695 8.111556 6.854001 6.411435
7.427627

```

Figure A.7.1. Représentation d'une modèle en RainSim. Par colonnes est représenté : Fonction Statistique, échelle temporelle, le poids de cette fonction sur le modèle, deux paramètres utilisées pour les fonctions de corrélation et la valeur des statistiques pour les douze mois de l'année.

Annexe 8. Validation du modèle RainSim. Lugano.

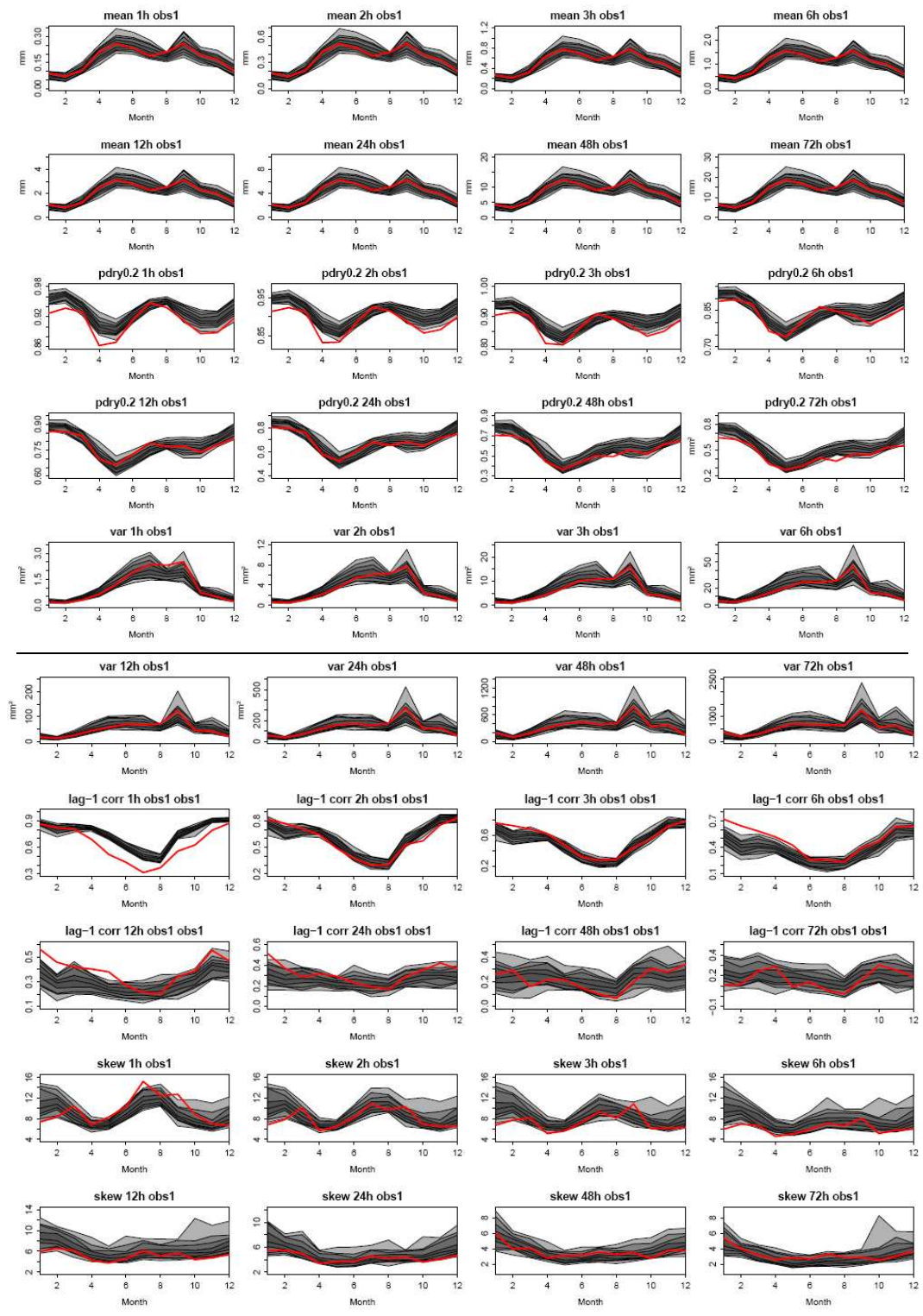


Figure A.8.1. Période de calibration 1980-2007. Lugano. Comparaison entre les statistiques obtenues à partir des données horaires historiques et les statistiques obtenues à partir des données journalières simulées avec GLIMCLIM et utilisant les variables atmosphériques NCEP.

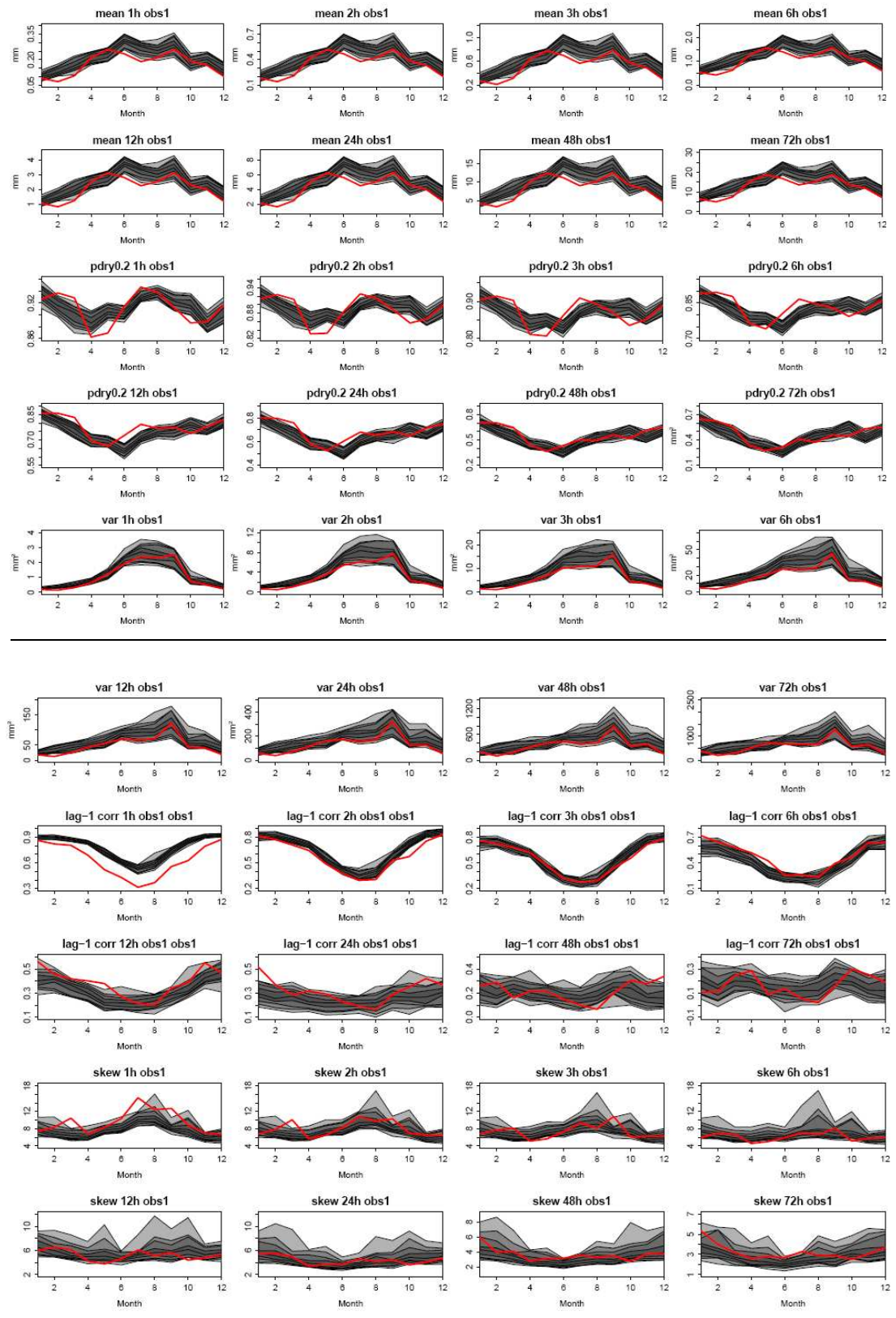


Figure A.8.2. Période de validation 1952-1979. Lugano. Comparaison entre les statistiques obtenues à partir des données horaires historiques et les statistiques obtenues à partir des données journalières simulées avec GLIMCLIM et utilisant les variables atmosphériques NCEP.

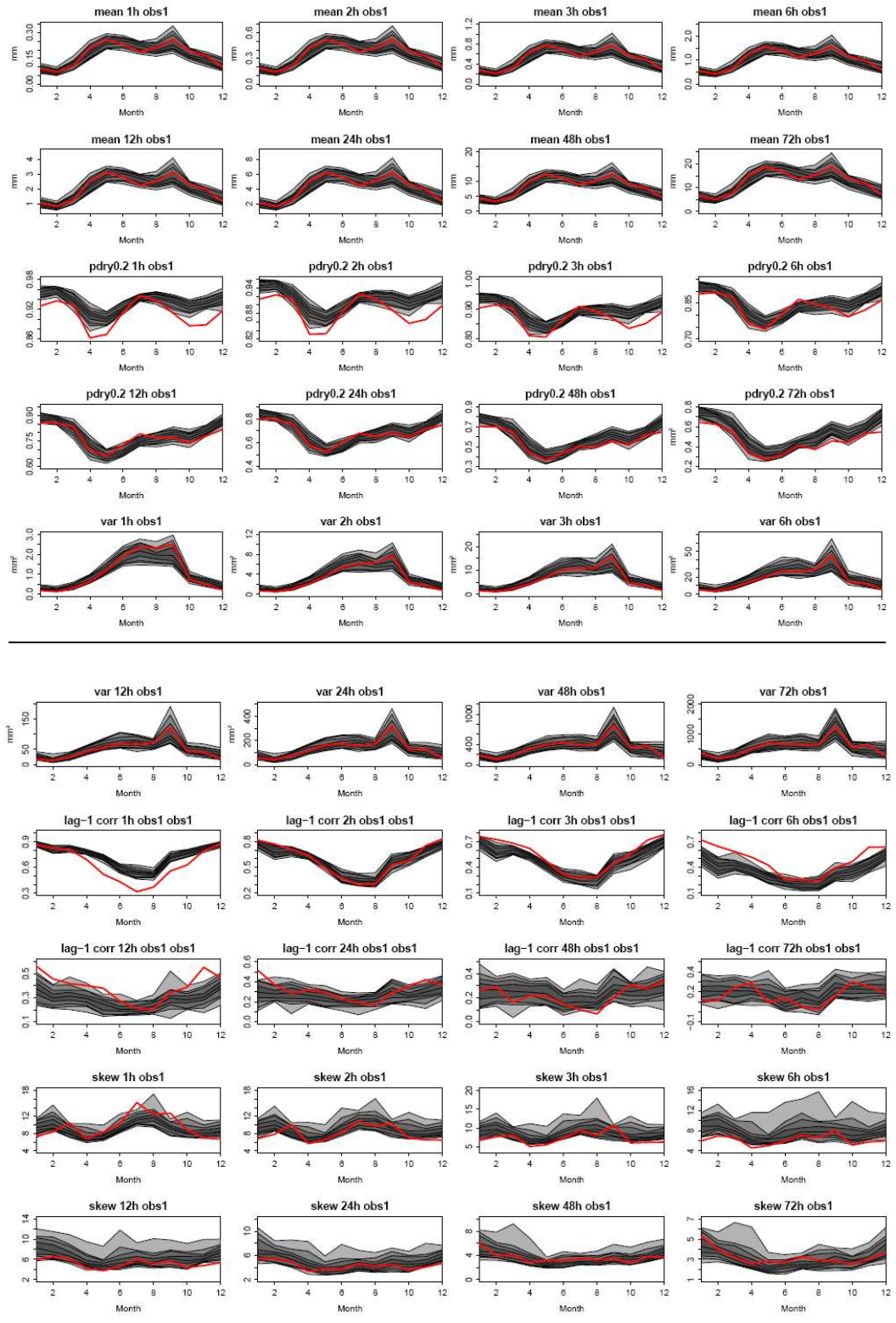


Figure A.8.3. Période de calibration 1980-2007. Lugano. Comparaison entre les statistiques obtenues à partir des données horaires historiques et les statistiques obtenues à partir des données journalières simulées avec GLIMCLIM et utilisant les variables atmosphériques des GCM.

Annexe 9. Résidus Pearson.

RESIDUAL ANALYSIS

=====

Mean of observations: 4.734
 Standard deviation of observations: 6.202

 Mean error (observed - predicted): -0.010
 Root mean squared error: 6.051
 Proportion of variance explained by model: 0.048

Mean Pearson residual: 0.000
 Standard deviation of Pearson residuals: 1.294
 Expected std dev of Pearson residuals: 1.229

Mean Anscombe residual: 0.8328 (expected: 0.8337)
 Std Dev of Anscombe residuals: 0.3968 (expected: 0.4100)

MODEL PERFORMANCE BY MONTH

Month	N days	Pearson residuals		
		Mean	Std Dev	S.E. mean
1	235	0.0210	1.2625	0.0802
2	228	0.0751	1.4460	0.0814
3	205	-0.0674	1.1455	0.0858
4	298	0.0116	1.3289	0.0712
5	308	0.0431	1.3461	0.0700
6	150	-0.1378	1.1711	0.1003
7	76	0.2869	1.8767	0.1409
8	84	-0.0981	1.2159	0.1341
9	152	-0.1398	1.2094	0.0997
10	281	0.0534	1.2876	0.0733
11	268	0.0632	1.3272	0.0751
12	272	-0.1048	1.0573	0.0744

Figure A.9.1. Résidus Pearson mensuels du modèle gamma crée pour Lugano pour la période de calibration 1956-2007.

MODEL PERFORMANCE BY SITE

Site	Name	N days	Pearson residuals		
			Mean	Std Dev	S.E. mean
230	MADRID_-_RETIRO	2557	0.0000	1.2920	0.0243

Figure A.9.2. Résidus Pearson par site du modèle gamma crée pour Lugano pour la période de calibration 1956-2007.

MODEL PERFORMANCE BY YEAR

Year	N days	Pearson residuals		
		Mean	Std Dev	S.E. mean
1979	112	-0.1030	1.2927	0.1161
1980	90	-0.1258	1.2148	0.1295
1981	84	0.0266	1.2956	0.1341
1982	73	0.0914	1.5360	0.1438
1983	63	-0.1971	0.9769	0.1548
1984	95	0.0379	1.3293	0.1261
1985	83	-0.1148	1.0554	0.1349
1986	83	0.0840	1.6031	0.1349
1987	105	0.0529	1.4398	0.1199
1988	98	-0.1250	1.1112	0.1241
1989	107	-0.0095	1.2966	0.1188
1990	81	-0.1430	1.0979	0.1365
1991	80	0.0266	1.3599	0.1374
1992	81	-0.0170	1.1398	0.1365
1993	91	-0.0711	1.3421	0.1288
1994	74	-0.0424	1.0430	0.1428
1995	85	-0.1703	1.1243	0.1333
1996	97	0.0499	1.1526	0.1248
1997	117	-0.1066	1.1151	0.1136
1998	79	0.1278	1.2553	0.1382
1999	86	-0.0646	1.0513	0.1325
2000	98	0.0776	1.2435	0.1241
2001	94	-0.1364	1.0300	0.1267
2002	104	0.0096	1.1822	0.1205
2003	91	0.1864	1.4117	0.1288
2004	84	0.3174	1.7412	0.1341
2005	57	-0.0447	1.2657	0.1627
2006	84	0.2341	1.5231	0.1341
2007	81	0.1792	1.8444	0.1357

NOTE: Standard errors computed for overall, monthly and yearly means above are inflated to compensate for spatial dependence.

Figure A.9.3. *Résidus Pearson annuels du modèle gamma crée pour Lugano pour la période de calibration 1956-2007.*

Dans cette analyse nous devons vérifier que la moyenne des résidus est égale à zéro pour assurer que notre modèle est correcte.

Aussi c'est important regarder si ces résidus nous montrent une structure que n'est pas pris en compte dans le modèle. Par exemple une saisonnalité mensuelle qui n'est pas considérée peut être identifiée avec les signes des résidus Pearson mensuelles.

Annexe 10. Simulations à partir des GCM (CSIRO mk3_5).
Période de calibration (1979-2007). Madrid.

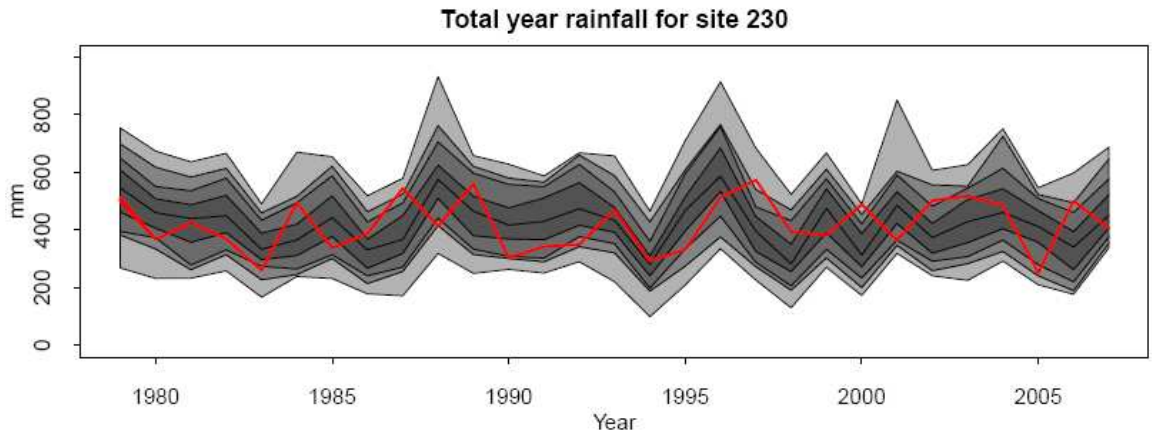


Figure A.10.1. *Période de calibration 1979-2007. SRES a2.*

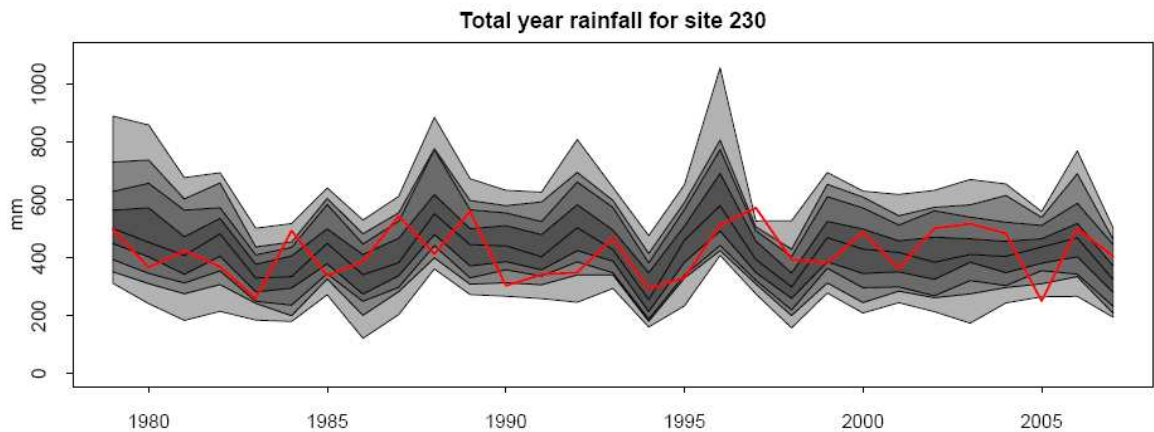


Figure A.10.2. *Période de calibration 1979-2007. SRES a1b.*

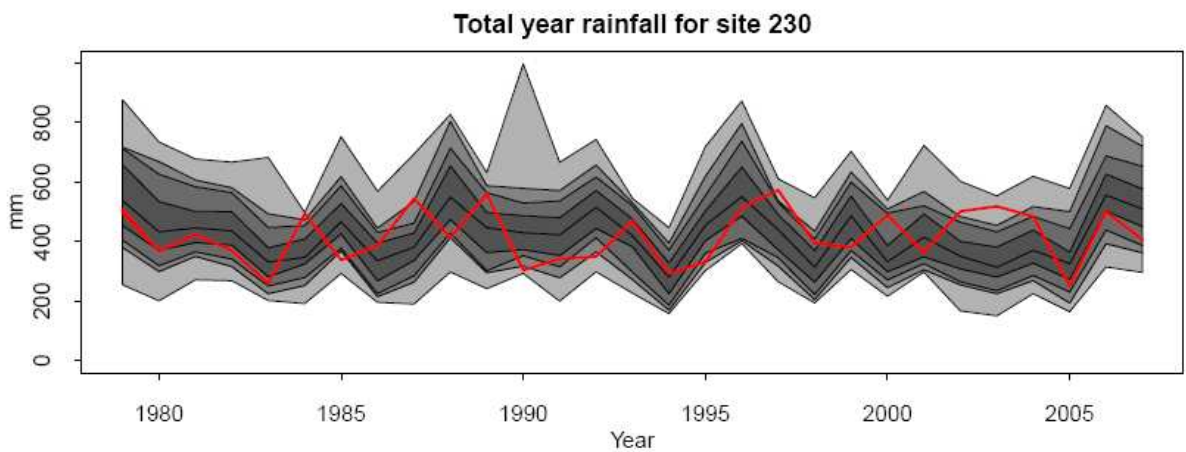


Figure A.10.3. *Période de calibration 1979-2007. SRES b1.*

Annexe 11. Stations considérées dans le cas multi site du Tessin



Figure A.11.1. *Canton de Tessin.* Source: <http://www.super-urlaub.de/unterkunft-tessin.html>



Figure A.11.2. *Localisation des stations. Cas multi-site Tessin.* Source: Base de données NASA.

Annexe 12. Modèles gamma et logistique pour le cas multi-site.

LINE NOT CURRENTLY USED					
EXAMPLE DEFINITION FILE: GAMMA DISTRIBUTIONS FOR RAINFALL AMOUNTS					
0	1.6714			Constant	
1	0.4166	1	3	Arctan-transformed Eastings	1
1	-0.0639	2	3	Arctan-transformed Northings	2
2	0.1243	74	0	Standardized VWND (1000) - Yearly mean	3
3	-0.0434	52	0	Standardized PSL (Pa)	4
3	-0.0338	54	0	Standardized HUR (925)	5
3	0.0412	58	0	Standardized HUR (500)	6
3	0.0733	77	0	Standardized VWND (700)	7
3	-0.0855	88	0	Standardized OMEGA (1000)	8
4	-0.2677	21		Daily seasonal effect, cosine component	9
4	0.0030	22		Daily seasonal effect, sine component	10
4	0.2298	1	13	2Mean of I(Y[t-1]>0)	11
4	0.0914	2	13	Mean of I(Y[t-2]>0)	12
4	0.2726	1	12	Mean of Ln(1+Y[t-1])	13
4	-0.3491	2	15	Mean of I(Y[t-k]>0: k=1 to 2)	14
4	0.3440	39		Smooth September effect	15
5	0.0013	2	4	2-way interaction: covariates 2 and 4	
5	-0.1245	1	9	2-way interaction: covariates 1 and 9	
5	-0.1599	1	10	2-way interaction: covariates 1 and 10	
5	0.4209	1	11	2-way interaction: covariates 1 and 11	
5	-0.1616	1	13	2-way interaction: covariates 1 and 13	
5	-0.2395	2	9	2-way interaction: covariates 2 and 9	
5	-0.1293	2	10	2-way interaction: covariates 2 and 10	
5	0.0353	4	11	2-way interaction: covariates 4 and 11	
5	0.1719	9	13	2-way interaction: covariates 9 and 13	
7	0.0000	1	1	0Parameter 1 in xfrmation of covariate	1
7	4.0000	1	2	0Parameter 2 in xfrmation of covariate	1
7	0.0000	2	1	0Parameter 1 in xfrmation of covariate	2
7	3.0000	2	2	0Parameter 2 in xfrmation of covariate	2
7	0.0000	3	1	0Parameter 1 in xfrmation of covariate	3
7	10.0000	3	2	0Parameter 2 in xfrmation of covariate	3
8	0.1000	1	1	Trace threshold	
9	0.4532			Dispersion parameter	
10	0.4134	2	1	Parameter 1 in spatial dependence model	

Table A.12.1. *Modèle gamma pour la quantité de pluie. La pression au niveau de la mer, l'humidité relative à 925 hPa et 500 hPa, le vent méridional à 700 hPa et l'Omega à 1000 hPa sont significatives dans le modèle au niveau mensuel. Le prédicteur 3, le vent méridional à 1000 hPa est significatif au niveau annuel.*

La situation géographique (coordonnées nord et est) est aussi un prédicteur significatif. C'est-à-dire le facteur régional influe dans la quantité de pluie des événements pluvieux.

%%%LINE NOT CURRENTLY USED%%%

REGRESSION MODEL: **LOGISTIC MODEL**

0	-1.5434			Constant	
1	-0.0353	1	3	Arctan-transformed Eastings	1
1	-0.1350	2	3	Arctan-transformed Northings	2
2	0.0414	52	0	Standardized PSL (Pa) - Yearly mean	3
2	-0.0422	53	0	Standardized HUR (1000) - Yearly mean	4
3	-0.0589	52	0	Standardized PSL (Pa)	5
3	0.1181	53	0	Standardized HUR (1000)	6
3	0.3344	56	0	Standardized HUR (700)	7
3	-0.0935	74	0	Standardized VWND (1000)	8
3	0.2076	76	0	Standardized VWND (850)	9
3	-0.3516	1		Monthly seasonal effect, cosine componen	10
3	-0.3047	2		Monthly seasonal effect, sine component	11
4	-0.1723	23		Daily half-year cycle, cosine component	12
4	-0.2397	24		Daily half-year cycle, sine component	13
4	2.2805	1	13	2Mean of I(Y[t-1]>0)	14
4	0.2015	2	13	Mean of I(Y[t-2]>0)	15
4	-0.5365	2	15	Mean of I(Y[t-k]>0: k=1 to 2)	16
4	-0.6022	33		Smooth March effect	17
4	0.3802	38		Smooth August effect	18
5	0.0686	10	12	2-way interaction: covariates 10 and 12	
5	0.2625	10	13	2-way interaction: covariates 10 and 13	
5	-0.2015	11	12	2-way interaction: covariates 11 and 12	
5	0.0313	11	13	2-way interaction: covariates 11 and 13	
5	0.6075	10	14	2-way interaction: covariates 10 and 14	
5	0.1436	11	14	2-way interaction: covariates 11 and 14	
5	-0.3165	1	3	2-way interaction: covariates 1 and 3	
5	-0.1673	1	4	2-way interaction: covariates 1 and 4	
5	-0.0541	1	7	2-way interaction: covariates 1 and 7	
5	0.0625	1	11	2-way interaction: covariates 1 and 11	
5	-0.2304	2	10	2-way interaction: covariates 2 and 10	
5	-0.3824	7	14	2-way interaction: covariates 7 and 14	
5	-0.2335	7	15	2-way interaction: covariates 7 and 15	
5	0.4937	7	16	2-way interaction: covariates 7 and 16	
7	0.0000	1	1	0Parameter 1 in xfrmation of covariate	1
7	4.0000	1	2	0Parameter 2 in xfrmation of covariate	1
7	0.0000	2	1	0Parameter 1 in xfrmation of covariate	2
7	3.0000	2	2	0Parameter 2 in xfrmation of covariate	2
8	0.1000	1	1	Trace threshold	
10	5.5293	21	1	Parameter 1 in spatial dependence model	

Table A.12.2. *Modèle logistique d'occurrence des pluies. L'humidité relative à 1000 hPa et la pression au niveau de la mer sont significatives au niveau annuel. Le vent méridional à 850 et 1000 hPa, la pression au niveau de la mer et l'humidité relative à 700 et 1000 hPa sont significatives à niveau mensuel.*

Les coordonnées nord et est sont aussi significatives pour l'occurrence de pluies, pourtant l'altitude n'a pas de l'influence selon le modèle.

La non-stationnarité est représentée maintenant avec des fonctions harmoniques pour les jours et les mois. Aussi les interactions entre prédicteurs, représentatifs aussi de la non-stationnarité, ont assez de présence dans le modèle.

L'indépendance de la pluie est modélisée à travers des prédicteurs.

13. Bibliographie

Beuchat, X., (2008), Predicting rainfall for the city of the future. Ecohydrology Laboratory (ECHO). Swiss Federal Institute of Technology (EPFL), Lausanne, Switzerland.

Beuchat, X., February, 2010. PhD Thesis. Working draft. Environnemental Engineering Institute. Ecohydrology Laboratory (ECHO). EPFL, Lausanne, Switzerland.

Burton, A., Fowler, H.J., Blenkinsop, S., and Kilsby, C.G. (2010), Downscaling transient climate change using a Neyman-Scott Rectangular Pulses stochastic rainfall model, *Journal of Hydrology*.

Burton, A. (2008) RainSim V3.1.1. User Documentation. University of Newcastle.

Burton A., Kilsby C.G., Fowler H.J., Cowpertwait P.S.P., O'Connell P.E. (2008), RainSim: A spatial-temporal stochastic rainfall modelling system *Environmental Modelling and Software*.

Burton, A., Kilsby, C.G., Moaven-Hashemi, A., O'Connell, P.E. (2004) Neyman-Scott Rectangular Pulses. Rainfall Simulation System. Water Resource Systems Research Laboratory, School of Civil Engineering and Geosciences. University of Newcastle.

Causeur, D. Introduction au modèle linéaire généralisé. Laboratoire de Mathématiques Appliquées. Pôle d'Enseignement Supérieur et de Recherche Agronomique de Rennes.

Chandler, R., V. Isham, H. Wheeler, C. Onof, N. Leith, A. Frost, M-L. Segond, (2007), Spatial Temporal Rainfall Modelling with Climate Change Scenarios, DEFRA (UK), TECHNICAL Report FD2113, Imperial College and University College London, London.

Chandler, R.E. (2002). GLIMCLIM: Generalised linear modelling for daily climate time series (software and user guide). *Res. Rpt. 227, Dept. Statistical Science, University College London* (<http://www.ucl.ac.uk/Stats/research/Resrpts/abs02.html#227>).

Chandler, R.E. and Wheeler, H.S. (2002). Analysis of rainfall variability using generalized linear models: a case study from the west of Ireland. *Water Resources Research*.

Castro Fresno, D., Rodriguez Bayon, J., Rodriguez Hernandez, J. *et al.* Sistemas urbanos de drenaje sostenible (Suds). *INCI*, mayo 2005, vol.30, no.5, p.255-260. ISSN 0378-1844.

De Castro, M. Los modelos climaticos Globales. ICAM-UCLM, Toledo. Proyeccion Regional de Escenarios de Cambio Climatico. Tecnicas y Proyectos en Curso. Julio 2007. Cursos de Verano de la Universidad de Cantabria.

Friedman, J., (1991) Multivariate Adaptive Regression Splines. Stanford University.

IPCC, WG I, 2007: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, WG III, 2000: Summary for Policymakers. In: *Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III*. [Based on a draft prepared by: Nebojsa Nakicenovic, Ogunlade Davidson, Gerald Davis, Arnulf Grubler, Tom Kram, Emilio Lebre La Rovere, Bert Metz, Tsuneyuki Morita, William Pepper, Hugh Pitcher, Alexei Sankovski, Priyadarshi Shukla, Robert Swart, Robert Watson, Zhou Dadi].

Lezaun, M. Matematicas de los fluidos. El clima y el tiempo. Matematica aplicada, estadistica e Investigacion Operativa. Universidad del País Vasco. Mayo-Agosto 2006.

Perales Momparler, Sara, Andrés-DoménechIgnacio. Los sistemas urbanos de drenaje sostenible. Una alternativa a la gestión de agua de lluvia. Dep. Ing. Hidraulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia.

Second, M-L., Onof, C., Wheeler, H.S., Spatial-temporal disaggregation of daily rainfall from a generalized linear model. (2006) Journal of Hydrology.

Vrac, M., M. L. Stein, K. Hayhoe, and X.-Z. Liang (2007), A general method for validating statistical downscaling methods under future climate change, *Geophys. Res. Lett.*, 34.

Wheater, H. S., Isham, V. S., Chandler, R. E., Onof, C. J., Stewart, E. J., Bellone, E., Yang, C., Lekkas,D., Lourmas, G., Segond, M-L, Frost, A. J., Prudhomme, C., Crooks, S. (2005) Improved methods for national spatial-temporal rainfall and evaporation modelling for BSM. R&D Technical Report F2105/TR. DEFRA.

Yang, C., Chandler, R.E., Isham, V. and Wheeler, H.S. (2005). Spatial-temporal rainfall simulation using Generalized Linear Models. *Water Resources Research*.