



**Diplôme d'ingénieur à l'Institut National des Sciences Appliquées de  
Toulouse**

# **Variabilités climatiques et leurs impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest et Centrale**

**Rapport de stage**

**Delphine ROUBINET**

**Responsable : Sandra ARDOIN  
Février - Juin 2006**



## **REMERCIEMENTS**

Je tiens tout d'abord à remercier M. Eric Servat qui m'a permis de découvrir le domaine de la recherche en hydrologie, en me proposant ce stage, bien que mon cursus n'était pas directement lié au domaine d'étude. Je souhaite aussi le remercier de m'offrir aujourd'hui la possibilité d'orienter mes études dans ce domaine à travers les cours du parcours Eau et Environnement de l'Université Montpellier 2.

Je voudrais aussi remercier Claudine Dieulin pour l'aide qu'elle m'a apportée à différents niveaux sur le logiciel SIG ArcView. Elle m'a d'abord permis de me familiariser avec le logiciel ArcView en m'expliquant son fonctionnement et l'utilisation que je pouvais en faire. Ces informations m'ont été très utiles pour comprendre comment avaient été élaborées certaines des données que j'ai eu à utiliser mais m'ont aussi aidé pour le travail d'interprétation mise en œuvre. Ensuite, Claudine m'a aidé dans la compréhension de la modélisation des différents modèles climatiques utilisés et a élaboré les données nécessaires à la poursuite de mon travail.

Pour l'aide qu'ils m'ont apporté en informatique, je souhaite remercier Gaël et Bastien ainsi que Jean François Boyer. Je voudrais en plus remercier Gaël pour son amitié et sa bonne humeur et surtout pour m'avoir supporté dans le même bureau pendant presque cinq mois.

Comme tous les stagiaires buveurs de café qui ont travaillé dans cette équipe, je remercie Sandra Ardoin pour sa bonne humeur, ses encouragements et... son café, bien sûr !

Mais plus particulièrement, en tant que tutrice de stage, je lui suis reconnaissante pour sa grande disponibilité et sa patience face à mes nombreuses questions sur différents aspects de l'hydrologie (aussi bien au niveau théorique que modélisation) et pour ses conseils précieux au niveau de l'interprétation des résultats et de la rédaction de mon rapport. J'ai aussi beaucoup apprécié sa manière de m'encadrer. D'un côté, la confiance qu'elle m'a accordée a instauré une ambiance de travail souple propice aux prises d'initiatives et à une valorisation personnelle. D'un autre côté, l'intérêt qu'elle a porté à l'évolution de mon travail et à l'organisation des différentes étapes de mon stage m'ont apporté le soutien et l'encadrement nécessaire au bon déroulement de celui-ci.

Sa disponibilité s'applique aussi bien au plan professionnel que personnel. En effet, je tiens aussi à la remercier pour son écoute et ses conseils aussi bien sur les difficultés personnelles que j'ai eu pendant mon stage que sur mes choix futurs.

Je remercie aussi Etienne pour sa compréhension et son soutien tout au long de ce stage.

Enfin, je remercie l'ensemble de l'équipe VAHYNE pour son accueil chaleureux et convivial durant ces cinq mois de stage.



## **TABLE DES MATIERES :**

<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>3</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>9</b>
<b>I. ENVIRONNEMENT DE TRAVAIL .....</b>	<b>11</b>
1. Présentation de la MSE et de HSM .....	11
a. La Maison des Sciences de l'Eau.....	11
b. L'Unité Mixte de Recherche HydroSciences Montpellier .....	12
2. Contexte scientifique.....	13
3. Description de la zone d'étude et des données utilisées .....	15
a. La fenêtre d'étude.....	15
b. Les données utilisées .....	15
<b>II. LA MODELISATION : UN OUTIL POUR EVALUER LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE .....</b>	<b>17</b>
1. Les modèles climatiques .....	17
a. Présentation des modèles climatiques .....	17
i. Méthode d'élaboration .....	17
ii. Les scénarii d'émission de gaz à effet de serre.....	17
iii. Les données simulées.....	17
b. Application des scénarii de correction .....	18
i. Scénario Anomalie .....	19
ii. Scénario Horizon.....	19
c. Les difficultés de l'application des scénarii de correction .....	20
i. La période de référence .....	20
ii. Les problèmes d'échelle .....	20
2. Le modèle hydrologique.....	21
a. Fonctionnement général du modèle hydrologique GR2M .....	21
b. Détermination des paramètres du modèle GR2M.....	23
<b>III. ACQUISITION ET MANIPULATION DES PREVISIONS CLIMATIQUES ET HYDROLOGIQUES POUR L'AFRIQUE DE L'OUEST ET CENTRALE .....</b>	<b>24</b>
1. Lecture des données observées au demi degré .....	24
2. Agrégation des données observées à l'échelle du modèle climatique utilisé .....	25
3. Lecture des données simulées par le modèle climatique .....	25
4. Application des scénarii de correction à l'échelle du modèle climatique.....	26
5. Désagrégation des prévisions au demi degré carré.....	26
6. Sélection spatiale des prévisions à étudier .....	27
7. Prévisions hydrologiques .....	27
<b>IV. INTERPRETATION DES PREVISIONS D'EVOLUTION CLIMATIQUE EN AFRIQUE DE L'OUEST ET CENTRALE .....</b>	<b>28</b>
1. Représentation cartographique des prévisions .....	28
a. Découpage temporel des prévisions.....	28
b. Motivation du découpage spatial .....	29
c. Validité de la représentation choisie .....	31
i. Les termes caractéristiques de la représentativité du taux de variation moyen.....	31
ii. Justification de la zone « ignorée » .....	32
d. Evolution de la représentation cartographique suivant le découpage spatial .....	33
2. Evolution des précipitations avec le scénario Anomalie .....	36
a. HadCM3 .....	37
i. Au Nord Ouest de la fenêtre d'étude .....	37
ii. Au Sud Est de la fenêtre d'étude .....	37
b. CSIRO_Mk2.....	38
i. Au Sud de l'isohyète 700mm .....	38
ii. Au Nord de l'isohyète 700mm .....	39
c. NCAR_PCM.....	42
i. Importance de la diminution des précipitations suivant les zones .....	42
ii. Evolution des taux de variation moyens dans le temps .....	42
iii. Représentativité des taux moyens de variation par zone .....	43
d. ECHAM4.....	45
i. Importance de l'augmentation des précipitations suivant les zones.....	45
ii. Evolution des taux de variation moyens dans le temps .....	45
iii. Représentativité des taux de variation moyens.....	46
e. Comparaisons inter modèles climatiques.....	48

i.	Evolution des prévisions avec HadCM3 – ECHAM4 .....	48
ii.	Ordre de grandeur avec CSIRO_Mk2 – NCAR_PCM.....	49
iii.	Stabilité de NCAR_PCM et ECHAM4 .....	50
f.	Conclusions sur les prévisions possibles.....	50
i.	Au Sud Est de la fenêtre d'étude .....	50
ii.	Au Sud Ouest de la fenêtre d'étude.....	51
iii.	Au Nord de la fenêtre d'étude .....	51
iv.	Cartes synthétiques des prévisions .....	52
3.	Les différences de prévisions avec le scénario Horizon.....	54
a.	HadCM3 .....	55
i.	Différences de prévisions suivant le scénario.....	55
ii.	Représentativité des taux de variation moyens.....	55
b.	CSIRO_Mk2.....	56
i.	Différences de prévisions suivant le scénario.....	56
ii.	Représentativité des taux de variation moyens.....	56
c.	NCAR_PCM.....	58
i.	Au Nord de l'isohyète 700mm .....	58
ii.	Au Sud de l'isohyète 700mm .....	58
iii.	Représentativité des taux moyens de variation.....	59
d.	ECHAM4.....	60
i.	Importance de l'augmentation des précipitations suivant les zones.....	61
ii.	Evolution des taux de variation moyens .....	61
iii.	Représentativité des taux moyens .....	61
e.	Comparaisons inter modèles climatiques.....	63
i.	Les différences par rapport à Anomalie.....	63
ii.	Comparaisons propres au scénario Horizon .....	65
f.	Conclusions sur les prévisions possibles.....	66
i.	Au Sud Est de la fenêtre d'étude .....	66
ii.	A l'Ouest de la fenêtre d'étude.....	67
iii.	Au Nord Est de la fenêtre d'étude .....	68
iv.	Cartes synthétiques des prévisions .....	68
4.	Prévisions du comportement de l'évapotranspiration potentielle.....	70
<b>V.</b>	<b>LES PREVISIONS D'EVOLUTION DES ECOULEMENTS DE FLEUVES EN AFRIQUE DE L'OUEST ET CENTRALE.....</b>	<b>72</b>
1.	Représentation choisie .....	72
2.	Evolution des débits avec le scénario Anomalie .....	73
a.	HadCM3 .....	73
i.	Prévisions pour chaque bassin par les taux moyens de variation.....	74
ii.	Liens entre précipitations et débits .....	74
iii.	Représentativité des taux moyens de variation.....	74
iv.	Etude plus approfondie des bassins du Sénégal et du Sassandra .....	75
b.	CSIRO_Mk2.....	78
i.	Prévisions pour chaque bassin par les taux moyens de variation.....	78
ii.	Liens entre précipitations et débits .....	78
iii.	Représentativité des taux moyens de variation.....	79
iv.	Etude plus approfondie des bassins du Sénégal.....	81
c.	NCAR_PCM.....	82
i.	Prévisions pour chaque bassin par les taux moyens de variation.....	82
ii.	Liens entre précipitations et débits .....	82
iii.	Représentativité des taux moyens de variation.....	84
d.	ECHAM4.....	87
i.	Prévisions pour chaque bassin par les taux moyens de variation.....	87
ii.	Liens entre précipitations et débits .....	88
iii.	Représentativité des taux moyens de variation.....	88
e.	Comparaisons inter modèles climatiques.....	89
i.	Evolution du taux moyen de variation.....	90
ii.	Tendance des prévisions.....	90
f.	Cartes synthétiques des prévisions avec le scénario Anomalie.....	91
2.	Les différences de prévisions avec le scénario Horizon.....	94
a.	HadCM3 .....	95
i.	Différences de prévisions suivant le scénario.....	95
ii.	Représentativité des taux de variation moyens.....	95
b.	CSIRO_Mk2.....	96
i.	Différences de prévisions suivant le scénario.....	96
ii.	Représentativité des taux de variation moyens.....	97
c.	NCAR_PCM.....	100

i.	Différences de prévisions suivant le scénario.....	100
ii.	Liens entre précipitations et débits.....	100
iii.	Représentativité des taux moyens de variation.....	103
iv.	Etude plus approfondie des bassins du Sénégal et du Chari.....	105
d.	ECHAM4.....	109
i.	Différences de prévisions suivant le scénario.....	109
ii.	Représentativité des taux de variation moyens.....	110
e.	Comparaisons inter modèles climatiques pour chaque bassin.....	111
i.	Le bassin du Sénégal.....	111
ii.	Le bassin de la Gambie.....	111
iii.	Le bassin du Sassandra.....	112
iv.	Le bassin du Chari.....	112
f.	Cartes synthétiques des prévisions avec le scénario Horizon.....	112
<b>VI.</b>	<b>TRAVAIL D'AUTOMATISATION.....</b>	<b>115</b>
1.	Détermination des cellules de la fenêtre choisie.....	115
a.	Détermination des cellules GCM constituant cette fenêtre.....	118
b.	Détermination, pour chaque cellule GCM, des cellules au demi degré la constituant.....	119
c.	Pour chaque cellule au demi degré carré, détermination de son coefficient d'occupation dans la cellule GCM.....	121
d.	Détermination de la nouvelle fenêtre finale de travail au demi degré carré.....	121
2.	Elaboration des prévisions climatiques.....	121
3.	Possibilités offertes par le logiciel.....	123
a.	Utilisation d'autres scénarios GES.....	123
b.	Choix des données observées pour les précipitations.....	123
c.	Choix de l'unité des prévisions des ETP.....	124
4.	Limites du logiciel et améliorations possibles.....	124
a.	Les limites dans le choix de l'utilisateur et dans le fonctionnement du logiciel.....	124
i.	Limitation en latitude dans le choix de la fenêtre.....	124
ii.	Limitation en longitude dans le choix de la fenêtre.....	124
iii.	Limitation dans le choix des dates des périodes de travail (fonction des disponibilités des données).....	124
iv.	Limitation dans le choix du modèle climatique.....	125
v.	Limitation au niveau des données observées fournies par l'utilisateur.....	125
	Le modèle hydrologique utilisé impose de travailler avec des grilles mensuelles de précipitations et d'ETP complètes ; c'est-à-dire qu'il ne gère pas les lacunes des données. C'est pourquoi nous imposons à l'utilisateur voulant utiliser ses propres données de n'avoir aucune lacune sur celles-ci.....	125
vi.	Les limites de la désagrégation.....	125
b.	Points à améliorer.....	126
i.	Séries de tests de vérification à effectuer.....	126
ii.	Différents tests pour gérer les erreurs de manipulation.....	126
iii.	Ajout des données observées permettant à l'utilisateur d'utiliser un type d'ETP par défaut.....	126
	126	
	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>129</b>
	<b>RÉFÉRENCES.....</b>	<b>131</b>
	<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>135</b>
	<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>141</b>



## **INTRODUCTION**

Dans le cadre de ma cinquième année à l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse en Génie Mathématique et Modélisation, j'ai effectué mon stage de fin d'étude d'une durée de cinq mois à la Maison des Sciences de l'Eau (MSE) à Montpellier. Plus précisément, j'ai été accueillie au sein de l'Unité Mixte de Recherche HydroSciences Montpellier (HSM) dans l'axe d'étude « Variabilité hydrologique : Analyses, mécanismes et impacts sur les ressources en eau ».

Durant ce stage, intitulé « Variabilités climatiques et leurs impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest et Centrale », j'ai été encadrée par Mme Sandra Ardoin, docteur de l'université Montpellier II en hydrologie, et M. Eric Servat, docteur en hydrologie, directeur de recherche de l'IRD et directeur d'HydroSciences Montpellier. Cette thématique s'inscrit dans la continuité de la thèse de Sandra Ardoin-Bardin et a pour but d'effectuer des prévisions de l'évolution des ressources en eau en Afrique de l'Ouest et Centrale à partir de différents outils de prévisions climatiques.



## **I. Environnement de travail**

### **1. Présentation de la MSE et de HSM**

#### **a. La Maison des Sciences de l'Eau**

La MSE, dont le directeur est M. Pierre Chevallier, est un institut de recherche regroupant des équipes issues de l'Université Montpellier 2 (UM2), du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD).

La MSE accueille actuellement, dans un bâtiment de 3000 m<sup>2</sup>, plus de 130 personnes dont une trentaine de doctorants et de stagiaires.

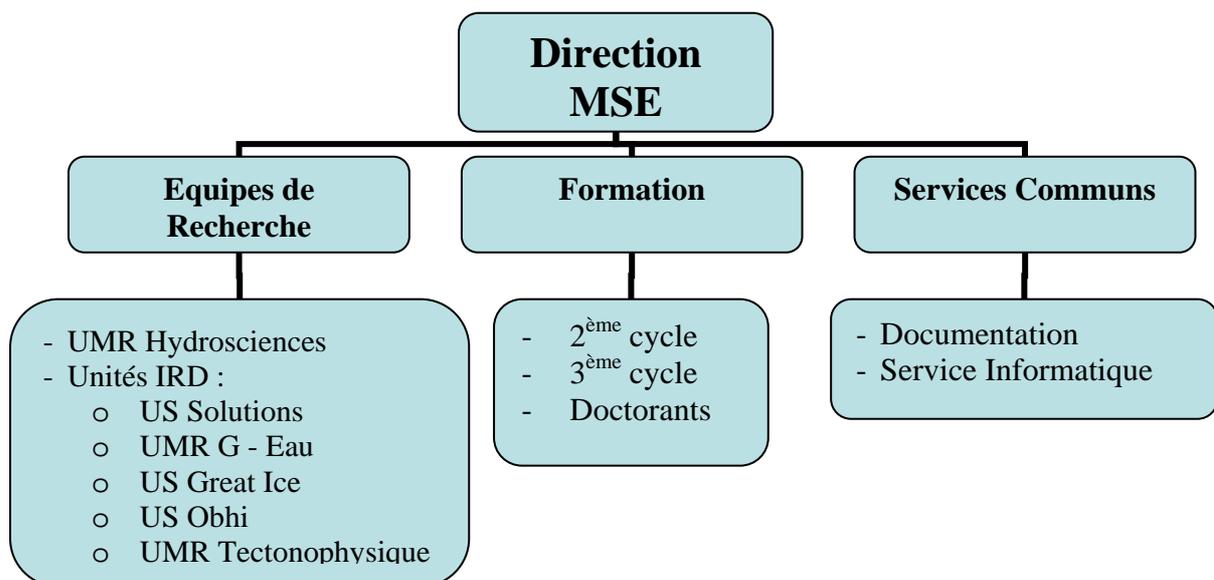
La MSE se compose (figure 1.1):

- de l'UMR HydroSciences Montpellier (environ 100 personnes) ;
- d'une unité de recherche et de service de l'IRD ;
- de son propre personnel (6 personnes : la direction, la secrétaire, la documentation et l'accueil).

Les différentes missions de la MSE sont les suivantes:

- effectuer des recherches de haut niveau, à la fois fondamentales et appliquées sur les Eaux Continentales ;
- être le point focal d'un réseau d'organismes de recherche régionaux travaillant dans le domaine de l'eau ;
- assurer la formation de doctorants et de stagiaires provenant d'établissements d'enseignement supérieur et d'organismes nationaux et internationaux ;
- diffuser, valoriser, transférer les résultats de ses travaux, et fournir aux décideurs une expertise pertinente.

Les principaux objectifs de la MSE sont d'établir des scénarios permettant d'anticiper les problèmes de pénurie et de qualité de l'eau, et de proposer des stratégies adaptées en vue d'une meilleure gestion des ressources en réponse à une pression accrue liée à l'exploitation des ressources dans les zones urbaines et rurales, l'augmentation des rejets de polluants dans l'environnement, aux changements climatiques ou événements climatiques exceptionnels.



**Figure 1.1 – Organisation de la MSE**

## b. L'Unité Mixte de Recherche HydroSciences Montpellier

Cette Unité Mixte de Recherche, dont le directeur est M. Eric Servat, compte environ une soixante de permanents et une trentaine de doctorants pouvant être issus de l'Université Montpellier 1 (UM1), de l'UM2, du CNRS et de l'IRD. Les travaux développés au sein de l'UMR HydroSciences Montpellier portent sur les impacts climatiques et anthropiques sur les ressources en eau en milieu méditerranéen et tropical.

Trois thèmes clés sont alors développés :

- l'eau dans l'environnement et les risques associés ;
- l'eau ressource mobilisable et exploitable ;
- l'eau et la variabilité climatique.

Pour atteindre ses objectifs, HydroSciences Montpellier est organisé en quatre axes de recherche (figure 1.2) :

- axe 1 : Processus biogéochimiques, risque écologique et remédiation ;
- axe 2 : Karsts et milieux fissurés ;
- axe 3 : Variabilité hydrologique : Analyses, mécanismes et impacts sur les ressources en eau ;
- axe 4 : Risques hydrologiques liés aux aléas extrêmes.

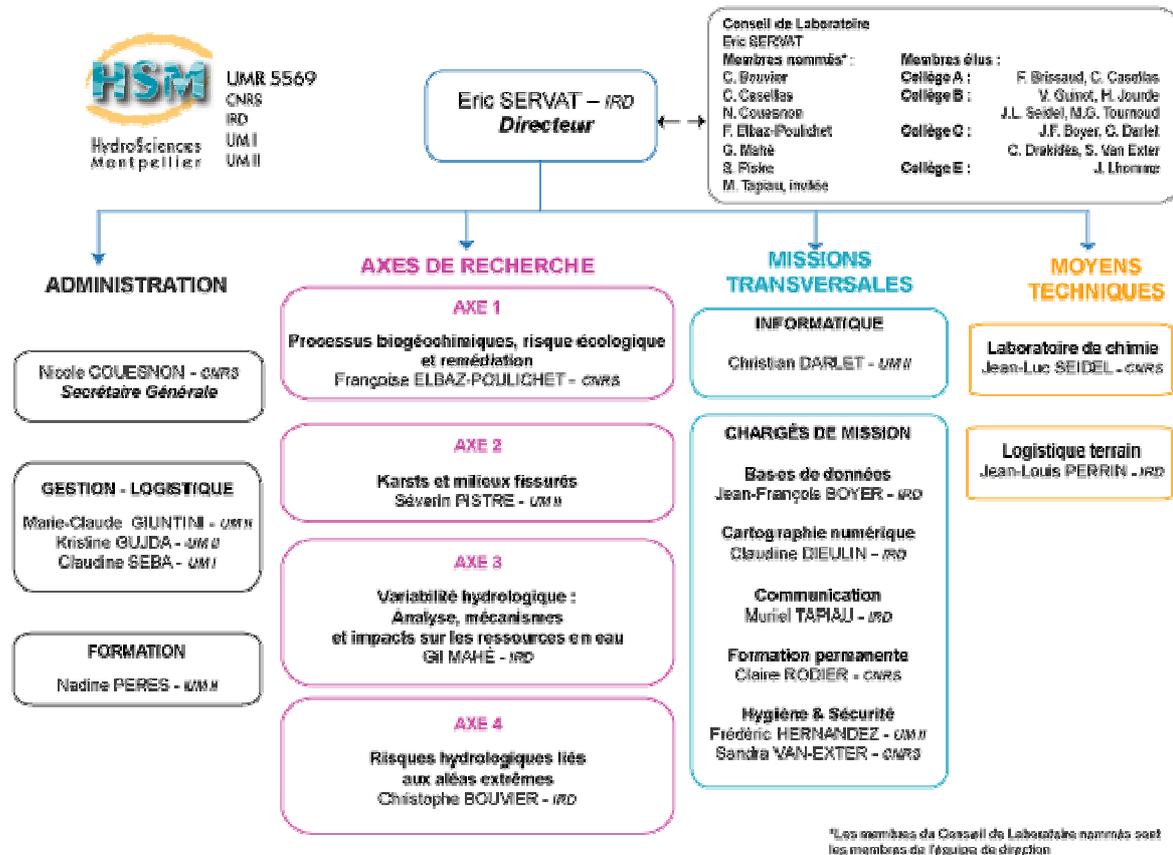


Figure 1.2 – Organigramme HydroSciences Montpellier

Mon stage s'est déroulé au sein de l'équipe VAHYNE de l'axe de recherche intitulé « Variabilité hydrologique : Analyses, mécanismes et impacts sur les ressources en eau » et dont le responsable est M. Gil Mahé. Cet axe de recherche a pour objectif d'étudier les changements climatiques et leurs impacts sur l'environnement et la société. Plus particulièrement, les inquiétudes actuelles des hydrologues se portent sur les conséquences de ces changements climatiques sur la quantité et la qualité des ressources en eau. Les études de cet axe de recherche s'orientent sur les changements hydrologiques, d'origine climatique et anthropique, dans les zones tropicales et semi-arides dans un objectif de développement des pays du Sud.

Pour répondre à ces problématiques, l'axe 3 de recherche est formé de trois équipes :

- MEVHYSA (MEcanismes de la Variabilité HYdrologique en zone Semi-Aride) : travaille sur l'étude de l'impact du climat et des activités humaines sur le cycle hydrologique dans la région de Niamey avec la récolte de mesures sur le terrain et leur utilisation pour des modélisations physiques à différentes échelles ;

- VAHYNE (analyse de la VARIabilité HYdrologique et impacts sur les ressources en Eau) : exploite les données régionales de l'Afrique de l'Ouest et Centrale et étudie la variabilité spatiale et temporelle des régimes pluviométriques et hydrologiques. L'objectif est de lier la variabilité du climat et la relation pluie-débit pour tester différents scénarios et permettre l'estimation et la gestion durable des ressources en eau ;

- PALHYSADE (PALéoHYdrologie et SALinité De l'Eau continentale) : travaille, principalement sur l'Altiplano (bassin endoréique des Andes), sur les changements hydrologiques face aux modifications du climat et à l'anthropisation des milieux depuis l'ère glaciaire jusqu'à nos jours.

## 2. Contexte scientifique

La sécheresse, qui touche l'Afrique de l'Ouest et Centrale depuis le début des années 1970, semble s'installer durablement (Ardoin-Bardin *et al*, 2003 ; L'Hôte *et al*, 2002). L'importance des conséquences de ce climat extrême sur les populations des régions touchées amène la communauté scientifique et les Etats Africains à étudier ce problème plus particulièrement. Ainsi, la recherche scientifique sur les changements climatiques et leurs impacts sur les ressources en eau est au cœur des préoccupations actuelles.

Le but de ce stage est de compléter la thèse effectuée par Sandra Ardoin-Bardin intitulée « Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne ». Cette thèse, portant sur quatre grands bassins versants de l'Afrique de l'Ouest et Centrale, est composée de trois axes de recherche :

- étudier la variabilité spatiale et temporelle des régimes pluviométriques et hydrologiques ;
- évaluer quelle modélisation hydrologique des ressources en eau pouvait être mise en œuvre pour cette région ;
- déterminer les impacts du changement climatique sur l'évolution des ressources en eau.

L'objectif final est alors d'être en mesure d'effectuer des prévisions sur l'évolution des ressources en eau, en fonction des changements climatiques, en Afrique de l'Ouest et Centrale pour les cents prochaines années.

Les changements climatiques possibles à venir ont été obtenus en utilisant les prévisions du modèle climatique HadCM3 appliqué au scénario d'évolution A2 avec des méthodes de correction des données.

Ensuite, la sélection du modèle hydrologique à utiliser s'est d'abord faite par une sélection du type de modèles à utiliser. En effet, les modèles hydrologiques disponibles à ce jour sont nombreux et sont de deux types : conceptuel (à base d'équations de bilan) ou physique (à base des lois physique devant être vérifiées). L'échelle de travail ne permettant pas d'obtenir toutes les données nécessaires au deuxième type de modèle, le choix s'est porté sur les modèles hydrologiques conceptuels. La détermination du modèle à utiliser s'est ensuite fait grâce à une comparaison précise des modèles hydrologiques Génie Rural 2 paramètres Mensuel (GR2M) et Water Balance Model (WBM), qui a permis de mettre en évidence la fiabilité de GR2M pour la modélisation des bassins versants étudiés.

L'utilisation des prévisions climatiques dans le modèle hydrologique retenu a permis d'obtenir des prévisions de l'évolution des ressources en eau en Afrique de l'Ouest et Centrale pour un modèle climatique.

Sandra Ardoin-Bardin a donc mis en place la méthodologie nécessaire à la prévision des changements climatiques et de leurs impacts sur les ressources en eau en utilisant le modèle climatique HadCM3 assorti du scénario d'évolution A2. Cependant, les outils de modélisation des changements climatiques étant nombreux, il est intéressant de compléter l'étude précédente pour d'autres modèles climatiques et scénarii d'évolution afin de comparer les résultats obtenus avec chaque modèle climatique et d'obtenir une fourchette des possibilités d'évolution des ressources en eau à partir des prévisions climatiques possibles.

Le sujet de ce stage est alors de déterminer les évolutions des ressources en eau en Afrique de l'Ouest et Centrale en utilisant différents modèles climatiques et en s'appuyant sur la méthode déjà mise au point dans les précédents travaux de l'équipe VAHYNE (Foz Iguaçu).

Il faut tout de même avoir à l'esprit que l'intention n'est pas ici d'obtenir des prévisions précises et fiables du climat et des ressources en eau, car on éprouve déjà des difficultés à modéliser les phénomènes observés aussi bien au niveau climatique qu'hydrologique. L'intérêt des prévisions sera plutôt de déterminer des tendances d'évolution ; ce ne sera pas les chiffres précis qui nous intéresseront, mais l'augmentation, la diminution ou la stagnation des critères climatiques et hydrologiques, de manière large, par rapport à la période observée de sécheresse.

Ces tentatives d'estimation de l'évolution des ressources en eau en Afrique de l'Ouest permettraient d'aider à la gestion durable de ces ressources, dont la pénurie a des conséquences désastreuses pour la population.

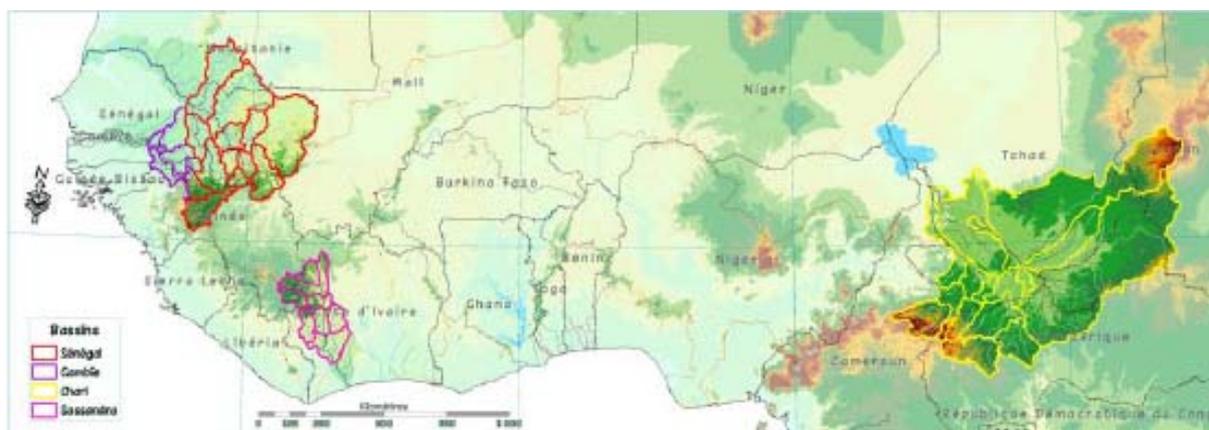
### 3. Description de la zone d'étude et des données utilisées

#### a. La fenêtre d'étude

La modélisation des ressources en eau de l'Afrique de l'Ouest et Centrale est effectuée sur quatre unités hydrographiques découpés en bassins versants, un bassin versant étant l'ensemble d'une région ayant un exutoire commun pour ses écoulements de surface. Ces quatre unités hydrologiques sont les bassins du Sénégal, de la Gambie, et du Sassandra en Afrique de l'Ouest et le bassin du Logone-Chari en Afrique Centrale (figure 1.3). Plus précisément, le fleuve Sénégal prend sa source dans le massif du Fouta Djallon en Guinée, traverse le Mali, puis marque la frontière entre le Sénégal et la Mauritanie. Le fleuve de la Gambie prend aussi sa source en Guinée dans la région du Fouta Djallon central, ensuite il traverse le Sénégal et la Gambie ; son bassin versant s'étend jusqu'à la Guinée Bissau. Ensuite, le fleuve Sassandra, un des principaux fleuves de la Côte d'Ivoire, a son bassin versant qui s'étend jusqu'en Guinée. Et enfin, le fleuve Chari, dont l'origine est la rencontre de trois rivières au Nord de la République Centrafricaine, traverse le Tchad pour se jeter dans son lac ; son principal affluent, le Logone, prend sa source au Cameroun et ses autres affluents s'étendent jusqu'au Soudan.

La disposition de ces bassins versants nous amène à considérer la fenêtre de travail suivante :

- latitude :  $3.75^{\circ}$  N –  $18.75^{\circ}$  N
- longitude :  $17.25^{\circ}$  W –  $27.25^{\circ}$  E



**Figure 1.3 – Localisation des unités hydrographiques étudiées**

#### b. Les données utilisées

Les données qui décrivent les évolutions climatiques et hydrologiques sont les précipitations et l'EvapoTranspiration Potentielle (ETP) pour le climat et les débits pour les fleuves.

La détermination des prévisions climatiques nécessite des données observées de précipitations et d'ETP. Ces données observées sur une période passée caractéristique du climat de la région d'étude sont nécessaires pour effectuer la correction des prévisions fournies par les modèles climatiques.

Pour obtenir les prévisions d'évolution des ressources en eau, le modèle hydrologique prend en entrée les données climatiques (précipitations et ETP) et la capacité en eau du sol (WHC).

Ces données peuvent être obtenues par différents organismes nationaux qui utilisent les mesures effectuées sur place et qui complètent les données manquantes à partir de méthodes d'interpolation des mesures existantes. Généralement, ces données sont disponibles au demi degré carré, c'est-à-dire sur une grille mondiale de 360 lignes et 720 colonnes dont les centres des cellules vont de  $-89.75^\circ$  à  $89.75^\circ$  en latitude et de  $-179.75^\circ$  à  $179.75^\circ$  en longitude, chacun espacé d'un demi degré.

Un des objets de la thèse de Sandra Ardoin-Bardin a été de déterminer quelle combinaison des données observées (pluie  $\times$  ETP  $\times$  WHC), utilisée sur une période passé en entrée du modèle hydrologique, permet d'obtenir les débits calculés les plus proches des débits observés.

La source de données observées retenue pour les précipitations est celle du Climatic Reseach Unit. Ces données sont disponibles sur la période 1950-2000, à une échelle de temps mensuelle et à une échelle spatiale du demi degré carré.

L'ETP, correspondant à la quantité d'eau évaporée par le sol et transpirée par les plantes, peut être calculée de différentes façons. Dans notre cas, l'ETP Penman (Penman, 1956) permet d'obtenir les résultats les plus satisfaisants. L'ETP mensuelle observée est obtenue au demi degré carré par la relation suivante :

$$ETP_{pen} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \times (R_n + A_h) + \frac{\gamma}{\gamma + \Delta} \times \frac{6.43 \times (1 + 0.536 \times U_2) \times D}{\lambda}$$

avec  $\Delta$  étant le gradient de pression de vapeur saturée (kPa),

$\gamma$  constante psychrométrique (kPa),

$R_n$  radiation nette (mm/jour),

$A_h$  énergie advectée (mm/jour),

$U_2$  vitesse du vent à 2 m (m/s),

$D$  déficit de pression de vapeur (kPa),

$\lambda$  chaleur latente de vaporisation de l'eau (M.J/kg).

Les capacités en eau du sol permettant d'obtenir la meilleure combinaison de données sont les FAOmax issue de la Digital Soil Map of the World (FAO, Dieulin, 2005) ; les grilles au demi degré de teneur en eau maximale du sol ont donc été construites à partir de ces données.

Ainsi, la combinaison de données pluieCRU  $\times$  ETPPenman  $\times$  WHCFAOmax utilisée en entrée du modèle hydrologique GR2M est la plus satisfaisante car c'est celle qui permet d'obtenir les débits calculés les plus proches des débits observés.

Les données observées des débits des rivières et des fleuves, servant à la comparaison avec les débits calculés, proviennent de plusieurs stations hydrométriques sélectionnées sur des critères de quantité des données disponibles (sur une base de 20 ans) et de fiabilité de ces données. Ainsi, à partir de 111 stations au total, 42 ont été retenues pour effectuer l'étude (Ardoin-Bardin, 2004). Les quatre bassins versants sélectionnés sont alors découpés en 42 sous bassins versants pour permettre une étude plus précise.

Tout le travail d'obtention de l'évolution des ressources en eau suivant les différents modèles climatiques sera fait en conservant la combinaison optimale des données puisque c'est celle qui nous permettra d'obtenir les meilleurs résultats lors de l'utilisation du modèle hydrologique.

## **II. La modélisation : un outil pour évaluer les impacts du changement climatique**

### **1. Les modèles climatiques**

#### **a. Présentation des modèles climatiques**

##### **i. Méthode d'élaboration**

Les modèles climatiques, appelés Modèles de Circulation Générale (GCM), fournissent des prévisions des caractéristiques climatiques (précipitations, températures et radiations solaires) en résolvant les équations mathématiques représentatives des lois physiques du système climatique. Ces modèles ont alors pour but de caractériser au mieux les échanges entre les différents éléments du système climatique (atmosphère, biosphère, hydrosphère et cryosphère). Les différents modèles climatiques mis au point (une quinzaine à ce jour) prennent en compte les éléments du système climatique suivants : les échanges d'énergie (plus particulièrement sous forme de rayonnement électromagnétique entre la Terre, les océans, l'atmosphère et l'espace), les effets des rayonnements solaire et terrestre (traversée de l'atmosphère et absorption par les gaz à effet de serre), les circulations atmosphériques et océaniques et les échanges de carbone entre l'atmosphère et la Terre.

##### **ii. Les scénarii d'émission de gaz à effet de serre**

A ces modèles climatiques sont appliqués des scénarii d'émission de Gaz à Effet de Serre (GES) qui ont pour but de représenter l'influence anthropique sur les prévisions climatiques. Ces scénarii rendent compte alors des évolutions possibles de certaines données climatiques ayant un caractère anthropique tels que les Gaz à Effet de Serre et les aérosols (dont la quantité, et donc l'effet de réchauffement de la planète, sont augmentés par les activités humaines). Il existe quatre grandes familles de scénarii climatiques, nommés A1, A2, B1 et B2, dépendant chacune des hypothèses faites sur l'évolution démographique, sociale, économique, technologique et environnementale de notre société. Les scénarii correspondent alors à une représentation d'un état futur possible du monde.

Le scénario retenu ici est le A2 qui décrit l'évolution du monde par l'augmentation de la population mondiale (jusqu'à 15 milliards d'individus en 2100) et un développement économique plus régional tel que la croissance économique par habitant et l'évolution technologique soient plus faibles que pour les autres types de scénarii. Ce scénario a été choisi car il est l'un des seuls à être accessible (avec le scénario B2), sur le site de l'IPCC (<http://www.ipcc.ch/>), pour les quatre modèles climatiques sélectionnés. Mais la justification principale de ce choix est que, ce scénario décrivant un monde où aucune initiative significative n'est prise par l'homme pour diminuer les effets de son activité sur le climat (contrairement aux familles B1 et B2), il semble, dans le contexte actuel, le plus probable.

##### **iii. Les données simulées**

Ainsi, chaque modèle climatique appliqué à un scénario particulier d'évolution des GES permet d'obtenir les prévisions des données climatiques (températures, précipitations et radiations solaires mensuelles) pour les cents prochaines années sur une grille de données. Ces données sont disponibles sur le site de l'IPCC pour des périodes différentes suivant le

modèle climatique et le scénario GES choisi. De plus, la résolution spatiale, c'est-à-dire la précision de la grille représentant le monde, varie d'un modèle à l'autre (tableau 2.1).

**Tableau 1.1 – Disponibilités et critères des données fournies par les modèles climatiques choisis appliqué au scénario de correction A2**

Modèle et scénario	Dates des données	Résolution	Discrétisation
HadCM3-A2	1950-2099	2.5° × 3.75°	73 × 96
CSIRO_Mk2-A2	1961-2100	3.2° × 5.6°	56 × 64
NCAR_PCM-A2	1980-2099	2.8° × 2.8°	64 × 128
ECHAM4-A2	1990-2100	2.8° × 2.8°	64 × 128

Pour calculer les ETP simulées, nous ne pouvons pas utiliser la formule de Penman comme précédemment car nous ne connaissons pas tous les types de données simulées nécessaires. Les radiations solaires et les températures simulées nous permettent d'obtenir des prévisions d'ETP en utilisant la formule de Turc (Turc):

$$ETP_{sim} = 0.4 \times (rad + 50) \times \frac{T}{T + 15}$$

avec *rad* étant les radiations en cal/cm<sup>2</sup>/jour

*T* la température en degré Celsius

On obtient ainsi des données simulées mensuelles de précipitations et d'ETP en mm pour le XXI<sup>ème</sup> siècle à l'échelle du modèle climatique utilisé.

#### b. Application des scénarii de correction

La comparaison entre les précipitations observées issues du CRU et les données simulées par les modèles climatiques sur les périodes communes montre que ces modèles sont loin de rendre compte de la réalité du climat. En effet, les précipitations issues des quatre modèles climatiques retenus sont incapables de reproduire correctement de la dynamique du climat de cette zone (alternance des saisons sèche et humide) et ont tendance à surestimer ou sous estimer, suivant le modèle utilisé, les quantités de précipitations (Casenave, 2001). Il a été alors utilisé une méthode de correction des données dont le but est de simuler des données qui auront pour base la période de référence des données observées (période de référence qui permet d'assurer une dynamique climatique cohérente) et sur lesquelles on applique les variations décrites par les modèles climatiques par rapport à cette même période de référence. La correction des données, mise en place particulièrement pour les précipitations, sera aussi appliquée aux ETP simulées pour que le traitement de toutes les données issues des modèles climatiques soit identique.

Deux méthodes de correction des données simulées issues de cette idée sont utilisées : la méthode anomalie et la méthode horizon (Ardoin-Bardin, 2004).

i. Scénario Anomalie

Cette méthode consiste à calculer les anomalies mensuelles des données issues du modèle climatique par rapport à la période de référence, puis d'appliquer ces anomalies (caractéristiques de l'évolution des prévisions brutes du modèle) aux données observées sur la période de référence. Les calculs sont les suivants, pour chaque cellule j et chaque mois i (à faire pour chaque année de prévision):

$$ANO_{i,j}^{gcm} = \frac{X_{i,j}^{gcm} - \overline{X}_{i,j}^{gcm}}{\sigma_{i,j}^{gcm}}$$

$$X_{i,j}^{scen} = \overline{X}_{i,j}^{obs} + ANO_{i,j}^{gcm} \times \sigma_{i,j}^{obs}$$

avec  $X_{i,j}^{gcm}$  étant la valeur mensuelle simulée par le modèle pour la cellule j au mois i

$\overline{X}_{i,j}^{gcm}$  la valeur moyenne du mois i sur la période de référence

$\sigma_{i,j}^{gcm}$  l'écart type de la série des valeurs simulées au mois i sur la période de référence

$\sigma_{i,j}^{obs}$  l'écart type des valeurs observées au mois i sur la période de référence

$\overline{X}_{i,j}^{obs}$  la moyenne des valeurs observées au mois i sur la période de référence

ii. Scénario Horizon

Cette seconde méthode est basée sur le découpage de la période de prévisions en trois horizons ; ces horizons devant être de trente ans. Les périodes choisies sont 2006-2035, nommée 2020, 2036-2065, nommée 2050 et 2066-2095, nommée 2080 (Ardoin-Bardin, 2004). La correction des valeurs simulées par le modèle climatique se fait en utilisant la variation de la moyenne des données simulées sur l'horizon correspondant par rapport à la période de référence. On applique cette variation caractéristique du modèle climatique à une valeur représentative du comportement passé observé, notée  $X_{i,j}^{fict}$ . Pour déterminer  $X_{i,j}^{fict}$ , on effectue trois tirages aléatoires de trente années sur la période de référence ;  $X_{i,j}^{fict}$  sera la valeur observée de l'année tirée au hasard. La prévision corrigée à la date i et pour la cellule j correspond alors à appliquer, à une valeur observée, les variations des données simulées par le modèle climatique par les calculs suivants :

$$\Delta_{i,j}^{hor} = \left( \frac{\overline{X}_{i,j}^{hor} - \overline{X}_{i,j}^{ref}}{\overline{X}_{i,j}^{ref}} \right)$$

$$X_{i,j}^{scen} = X_{i,j}^{fict} + \Delta_{i,j}^{hor} \times X_{i,j}^{fict}$$

avec  $\overline{X}_{i,j}^{ref}$  la valeur moyenne mensuelle simulée sur la période de référence du mois i et sur la cellule j

$\overline{X}_{i,j}^{hor}$  la valeur moyenne mensuelle simulée sur l'horizon étudié du mois i

$X_{i,j}^{fict}$  la valeur mensuelle observée du mois i de l'année tirée aléatoirement (sur la période de référence)

### c. Les difficultés de l'application des scénarii de correction

#### i. La période de référence

Les formules de correction précédentes montrent que la réévaluation des données simulées s'appuie sur les données observées sur une certaine période de référence. Le choix de cette période de référence parmi la période des observations est alors très important et doit répondre à certains critères. D'après l'IPCC, il est conseillé de choisir une période assez longue (environ trente ans) et significative du comportement global ; de plus, les données observées et simulées doivent être disponibles sur cette période choisie.

Dans notre cas, le comportement significatif est la sécheresse depuis 1970. La période de référence pour les précipitations a alors été fixé à 1969-1998 pour le modèle climatique HadCM3 (Ardoin Bardin, 2004). Cependant, la disponibilité des données simulées des trois autres modèles climatiques utilisés maintenant (tableau 1) nous oblige à restreindre cette période de 1980 à 1998 pour NCAR\_PCM et de 1990 à 1998 pour ECHAM4. Il faudra alors bien garder à l'esprit tout au long de l'interprétation des résultats que les prévisions climatiques obtenues avec ces deux derniers modèles climatiques sont construites en omettant certaines indications pour le choix de la période de référence.

La variation des ETP est très faible de 1966 à 2000 et de plus cette donnée n'a que peu d'influence dans le modèle hydrologique GR2M. Ainsi, pour la correction des ETP simulées, la période de référence choisie n'est fonction que de la disponibilité des ETP Penman. Dans notre cas, ces données observées étant connues jusqu'en 1995, la période de référence est alors de 1966 à 1995 (Ardoin-Bardin, 2004).

#### ii. Les problèmes d'échelle

La correction des données simulées en utilisant les données observées nécessite une correspondance entre les deux types de données. Un problème d'échelle se pose puisque les données observées sont connues au demi degré alors que les données simulées, suivant le modèle climatique utilisé (tableau 1), ont une résolution de l'ordre de  $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ .

L'application des scénarios de correction se fera alors à l'échelle du modèle climatique utilisé. Il est donc nécessaire de connaître la correspondance entre les cellules du demi degré et celles du modèle climatique. C'est-à-dire que pour chaque cellule du modèle climatique, nous devons connaître quelles sont les cellules au demi degré la constituant et le coefficient d'occupation de la cellule au demi degré dans la cellule du modèle climatique. Pour chaque modèle climatique, cette correspondance a été effectuée pour toutes les cellules de la fenêtre d'étude en utilisant le logiciel de SIG ArcView (Casenave, 2001).

Prenons pour exemple la cellule du modèle climatique HadCM3 numérotée 32LAT78LON qui correspond à la cellule d'indice 32 en latitude et 78 en longitude selon la résolution

d'HadCM3. Cette cellule est composée de 54 cellules au demi degré carré, leurs centroïdes étant compris entre 11.25°N et 13.75°N en latitude et entre 73.25°W et 69.25°W en longitude (figure 2.1). Le coefficient d'occupation, dans la cellule GCM, de la cellule de centre (12.75° ; -72.75°) est de 1 puisqu'elle est entièrement incluse dans la cellule 32LAT78LON. Il est de 0.5 pour la cellule de centre (13.75° ; -71.75°) puisque l'intersection entre la cellule GCM et celle au demi degré correspond à la moitié de cette dernière.

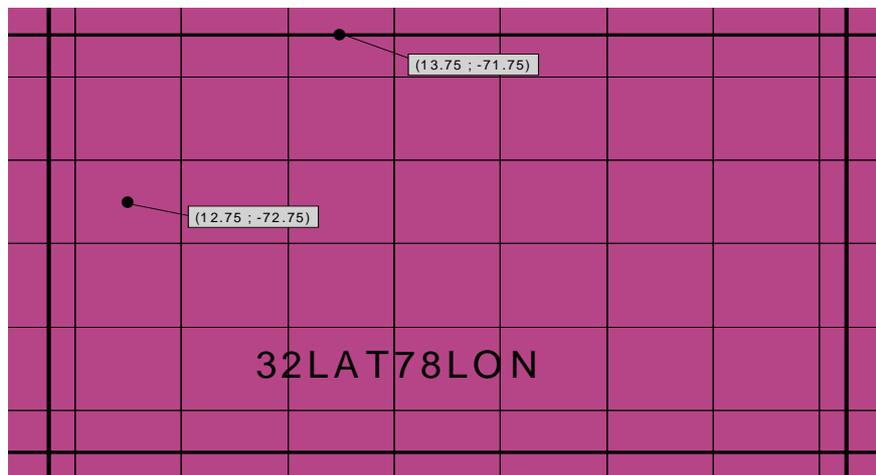


Figure 2.1 – Correspondance entre une cellule GCM et les cellules au demi degré carré

## 2. Le modèle hydrologique

En utilisant en entrée les données de précipitation, d'ETP et de capacité en eau des sols, les modèles hydrologiques permettent d'obtenir les variations de l'humidité des sols, de l'EvapoTranspiration Réelle (ETR) et de l'écoulement pour la zone et la période étudiée. Le modèle hydrologique utilisé ici est le modèle GR2M.

### a. Fonctionnement général du modèle hydrologique GR2M

Le modèle hydrologique GR2M a été développé au CEMAGREF (Edijatno et Michel, 1989 ; Kabouya, 1990) et fonctionne au pas de temps mensuel. Les données nécessaires en entrée sont la capacité en eau du sol (WHC), les précipitations (P) et l'ETP mensuelle et au demi degré carré de la zone d'étude. De plus, son fonctionnement est basé sur le calage de deux paramètres (figure 2.2). On obtient en sortie la prévision des débits des sous bassins versants étudiés au pas de temps mensuels et au demi degré.

Le premier paramètre de calage ( $0 < X_1 < 1$ ) permet de moduler les valeurs de précipitations et d'ETP. La quantité  $U$  de pluies et d'ETP correspond à l'interception de ces données afin d'obtenir les quantités nettes de pluies et d'ETP participant à l'écoulement (notées alors  $E_n$  et  $P_n$ ).

Au début du pas de temps, le niveau du réservoir sol est  $H$ . Cette quantité est modifiée par les pluies et l'ETP. Les pluies vont remplir ce réservoir sol jusqu'à atteindre sa capacité en eau maximale (notée  $A$  avec  $A = \text{WHC}$ ) alors que l'ETP va diminuer cette capacité en eau

d'autant que possible (c'est-à-dire, de la quantité  $E_n$  si le réservoir en eau est assez important et de la quantité  $A$  sinon, donnant ainsi l'ETR).

La quantité  $P_n$  ne contribuant pas à la teneur en eau du sol est notée  $P_e$  qui correspond aux précipitations participant directement à l'écoulement, nommées les précipitations efficaces. Une partie de  $P_e$  (notée  $\alpha P_e$ ) s'écoule directement alors que  $(1-\alpha)P_e$  alimente le réservoir eau gravitaire, de quantité  $S$  au début du mois et  $S_1$  après la contribution de  $P_e$ .

Ce second réservoir a un débit  $Q_g = X_2 S_1$ ,  $X_2$  étant le second paramètre du modèle ( $0 < X_2 < 1$ ). A la fin du pas de temps, le réservoir d'eau gravitaire est alors de  $S_2 = S_1 - Q_g$  et l'écoulement total, noté  $Q$ , vaut  $Q = Q_g + \alpha P_e$ .

Dans notre cas, la valeur du coefficient d'écoulement direct  $\alpha$  sera fixée à zéro puisque les travaux de Lubès *et al.* (2003) montre que  $\alpha$  prend cette valeur pour 16 bassins versants d'Afrique de l'Ouest et Centrale. Ceci revient à considérer que l'écoulement direct est si faible qu'il n'ait pas modélisé au pas de temps mensuel.

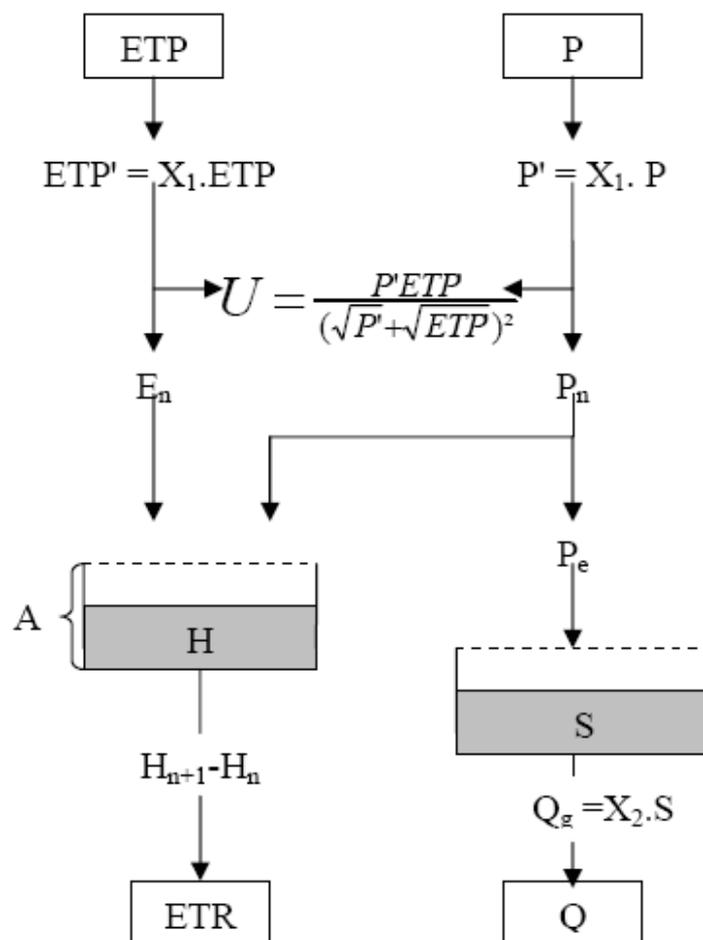


Figure 2.2 – Schéma de fonctionnement du modèle hydrologique GR2M

## b. Détermination des paramètres du modèle GR2M

L'utilisation du modèle GR2M nécessite alors le calage des deux paramètres  $X_1$  et  $X_2$  pour chaque sous bassin. Ces derniers ont été optimisés en utilisant le critère de Nash pour comparer les débits mensuels observés à ceux calculés par le modèle hydrologique. Le critère de Nash correspondant à la formule suivante :

$$Nash = \left( 1 - \frac{\sum_i (Q_0^i - Q_c^i)^2}{\sum_i (Q_0^i - Q_m)^2} \right) \times 100$$

avec  $Q_0^i$  le débit mensuel observé à la date  $i$   
 $Q_c^i$  le débit mensuel calculé par le modèle à la date  $i$   
 $Q_m$  le débit moyen mensuel observé sur la période étudiée  
 $i$  prenant la valeur de chaque mois et année de la période étudiée

La procédure a été alors d'utiliser le modèle GR2M sur une période de débits connus en deux étapes : une première étape de calage permettant de choisir, par des méthodes d'optimisation, les deux paramètres maximisant le critère de Nash et une seconde étape de validation permettant de vérifier, toujours avec le même critère, le taux de similitude entre les débits observés et ceux calculés par le modèle hydrologique. On dit alors que le modèle est « calé », c'est-à-dire que les paramètres retenus optimisent le critère de Nash sur la période de calage et qu'ils vérifient cette optimisation sur la période de validation. Ainsi, pour chacun des 42 sous bassins étudiés, les paramètres permettant une correspondance optimale entre les débits observés et ceux calculés par le modèle hydrologique ont été déterminés grâce au critère de Nash (Ardoin-Bardin, 2004).

Dans notre cas, on obtiendra différents types de prévisions hydrologiques suivant les modèles climatiques et les scénarii de correction utilisés pour l'obtention des données climatiques. Il sera alors intéressant d'interpréter ces résultats et de les comparer afin de déterminer un éventail de prévisions possibles des évolutions des ressources en eau en Afrique de l'Ouest et Centrale.

### III. Acquisition et manipulation des prévisions climatiques et hydrologiques pour l'Afrique de l'Ouest et Centrale

#### 1. Lecture des données observées au demi degré

La première étape consiste à sélectionner les données observées (précipitations du CRU et ETPPenman).

La disposition des bassins versants étudiés nous a amené à considérer la fenêtre de travail suivante :

- longitude : 17.25° W – 27.25° E
- latitude : 3.75° N – 18.75° N

Cependant, cette fenêtre est déterminée sur une grille au demi degré carré alors qu'il est nécessaire de travailler à l'échelle des modèles climatiques pour appliquer les scénarii de correction. La fenêtre d'étude, et donc la sélection spatiale des données observées, dépendent alors de la résolution de chaque modèle climatique. On élargit alors la fenêtre initiale à la fenêtre contenant les cellules GCM (cellules à la discrétisation du modèle climatique utilisé) entières. Cette nouvelle fenêtre sera notre fenêtre de travail correspondant à la sélection spatiale des données observées nécessaires.

Par exemple, pour le modèle climatique NCAR\_PCM, la fenêtre initiale (déterminée au demi degré carré pour encadrer les bassins versants étudiés) est élargie afin de contenir que des cellules GCM entières (figure 3.1).

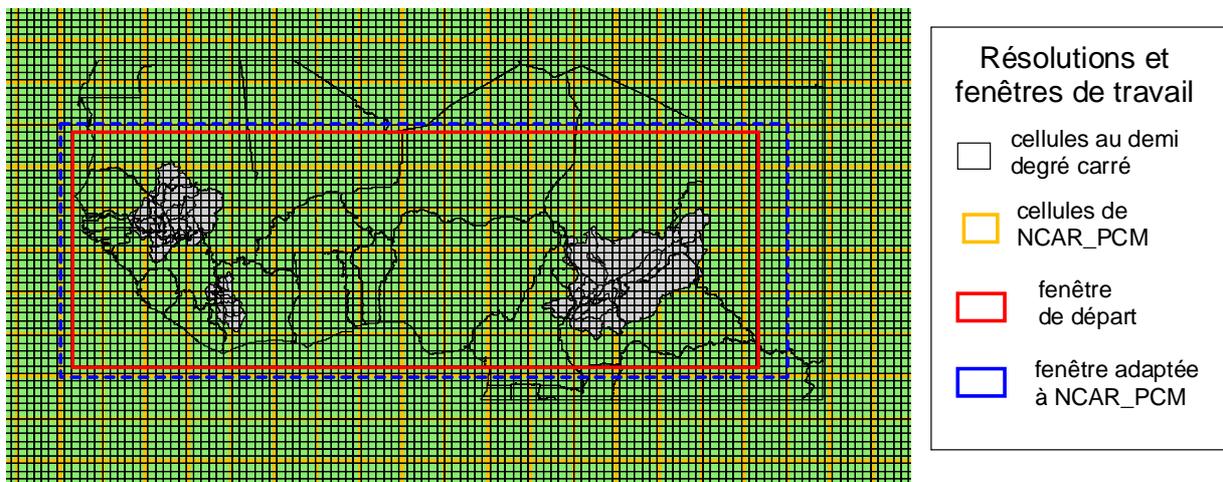


Figure 3.1 – Adaptation de la fenêtre d'étude au modèle climatique utilisé

La sélection temporelle dépendra de la disponibilité des données simulées par les modèles climatiques pour déterminer la période de référence.

Ainsi, les données observées sont sélectionnées sur la fenêtre et sur la période de référence déterminées par le modèle climatique choisi (tableau 3.1).

On remarque que pour les modèles climatiques NCAR\_PCM et ECHAM4, ayant la même résolution, la fenêtre d'étude est identique.

Ainsi, par exemple, lors de l'élaboration des prévisions à partir du modèle climatique HadCM3, la première étape sera de lire les données observées de 1969 à 1998 sur les cellules

au demi degré de la fenêtre allant de 1.25°N à 23.75°N en latitude et de 20.25°W à 31.75°E en longitude.

**Tableau 3.1 – Sélection temporelle et spatiale des données observées**

Modèle et scénario	Dates des données observées nécessaires	Latitudes définissant la fenêtre de travail	Longitudes définissant la fenêtre de travail
HadCM3-A2	1969-1998	1.25° N – 23.75° N	20.25° W – 31.75° E
CSIRO_Mk2-A2	1969-1998	2.75° N – 21.25° N	19.75° W – 30.75° E
NCAR_PCM-A2	1980-1998	2.75° N – 21.75° N	18.25° W – 29.25° E
ECHAM4-A2	1990-1998	2.75° N – 21.75° N	18.25° W – 29.25° E

## 2. Agrégation des données observées à l'échelle du modèle climatique utilisé

Pour effectuer la correction des données simulées, il faut agréger les données observées à l'échelle du modèle. Nous avons vu précédemment qu'il était possible de connaître, grâce au logiciel ArcView, pour chaque cellule du modèle climatique, les cellules au demi degré la composant et leur coefficient d'occupation. Il s'agit alors, pour chaque cellule GCM, de prendre en compte les valeurs de chaque cellule au demi degré carré la composant, en sommant les contributions pondérées de chacune, c'est-à-dire la valeur ramenée au pourcentage d'occupation correspondant. La formule suivante permet d'obtenir les valeurs de la cellule GCM  $i$  en fonction des  $n$  cellules au demi degré carré qui la composent :

$$X_i^{ag} = \sum_{j=1}^n X_j \times \frac{coeff_j^i \times surf_j}{surf_i}$$

avec  $X_j$  la valeur observée de la cellule au demi degré carré  $j$

$coeff_j^i$  le coefficient d'occupation de la cellule au demi degré carré  $j$  dans la cellule GCM  $i$

$surf_j$  la surface de la cellule au demi degré carré  $j$  (dans notre cas ce sera toujours 0.25°)

$surf_i$  la surface de la cellule GCM  $i$  en degré carré

## 3. Lecture des données simulées par le modèle climatique

Les données simulées par chaque modèle climatique associé à chaque scénario d'émission de GES se présentent sous la forme de fichiers téléchargeables depuis le site de l'IPCC (<http://www.ipcc.ch/>). Chacun de ces fichiers contient les précipitations, les températures et les radiations solaires moyennes mensuelles mondiales et à l'échelle du modèle climatique. Il faut pour chaque modèle climatique, extraire les données simulées pour les cellules GCM présentes sur la fenêtre d'étude et sur les périodes de référence et de prévisions choisies (tableau 3.2).

**Tableau 3.2 – Sélection temporelle et spatiale des données simulées par les modèles climatiques**

Modèle et scénario	Dates des données simulées nécessaires	Latitudes définissant la fenêtre de travail	Longitudes définissant la fenêtre de travail
HadCM3-A2	1969-2099	28LAT à 36LAT	92LON à 09LON
CSIRO_Mk2-A2	1969-2100	30LAT à 35LAT	62LON à 06LON
NCAR_PCM-A2	1980-2099	34LAT à 40LAT	123LON à 011LON
ECHAM4-A2	1990-2100	25LAT à 31LAT	123LON à 011LON

Pour les ETP, il faut ajouter l'étape de calcul par la formule de Turc à partir des données de températures et de radiations simulées par le modèle. A part cette étape, la démarche est identique au traitement des précipitations.

#### 4. Application des scénarii de correction à l'échelle du modèle climatique

A cette étape, nous disposons donc sur la fenêtre d'étude des données mensuelles suivantes : les précipitations et ETP observées sur la période de référence (CRU et Penman) et simulées sur les périodes de référence et de prévisions (données GCM). Il est alors possible d'appliquer les scénarii de correction Anomalie et Horizon.

On obtient ainsi, pour chaque modèle, deux types de prévisions qui se différencient par le scénario de correction appliqué. Les prévisions obtenues sont à l'échelle du modèle climatique utilisé et sont connues sur la période commune de 2006 à 2095.

#### 5. Désagrégation des prévisions au demi degré carré

Les données simulées corrigées ainsi obtenues sont à la résolution du modèle climatique alors que le modèle hydrologique utilise des grilles de données au demi degré carré. Il est alors nécessaire de désagréger les données prévisionnelles obtenues. De la même manière que nous connaissons les coefficients correspondant à la proportion de cellules au demi degré incluses dans une cellule GCM, il est possible de déterminer le coefficient inverse (proportion d'une cellule GCM dans les cellules au demi degré). La formule suivante nous permet d'obtenir les prévisions simulées de la cellule au demi degré  $j$  à partir des prévisions calculées pour les  $m$  cellules GCM qui la composent :

$$X_j^{desag} = \sum_{i=1}^m X_i \times coeff_j^i$$

avec  $X_i$  la valeur calculée de la cellule GCM  $i$

$coeff_j^i$  le coefficient d'occupation de la cellule au demi degré carré  $j$  dans la cellule GCM  $i$

## 6. Sélection spatiale des prévisions à étudier

Par souci de clarté et de simplification, l'interprétation des résultats obtenus, en termes de changements climatiques, s'effectue à l'échelle des cellules GCM. Cette interprétation aurait pu être faite à la résolution du demi degré, puisque nous disposons des résultats après désagrégation, mais cela n'apporterait pas de précisions supplémentaires et ne ferait qu'augmenter le nombre de cellules à interpréter.

Pour l'évolution des ressources en eau, seules les prévisions climatiques des cellules composant les bassins versants seront utilisées par le modèle hydrologique.

Ainsi, toutes les étapes précédentes nous permettent d'obtenir huit prévisions climatiques (quatre modèles et deux scénarii de correction) que nous utilisons en entrée du modèle hydrologique GR2M afin d'obtenir les prévisions hydrologiques correspondantes pour chaque bassin versant.

## 7. Prévisions hydrologiques

L'utilisation des huit prévisions climatiques précédemment élaborées nous permette d'obtenir les prévisions hydrologiques décrites de 2006 à 2095 par les débits mensuels de chaque sous bassin aux stations hydrologiques sélectionnées.

Ces prévisions vont nous permettre d'étudier l'évolution des ressources en eau au cours du XXIème siècle en ayant mis en œuvre plusieurs des outils de modélisation à notre disposition. L'intérêt est d'évaluer les évolutions climatiques puis hydrologiques possibles au cours du XXIème mais aussi de comparer les résultats afin d'obtenir un éventail de prévisions représentatif des possibilités à considérer.

Cet éventail d'évolution des ressources en eau nous permettra d'en déduire les conséquences pour les populations d'Afrique de l'Ouest et Centrale et d'essayer de prévenir les problèmes qui peuvent en découler.

#### IV. Interprétation des prévisions d'évolution climatique en Afrique de l'Ouest et centrale

##### 1. Représentation cartographique des prévisions

Les prévisions sont obtenues sous forme de précipitations mensuelles en mm de 2006 à 2095 et à l'échelle des modèles climatiques. On dispose, pour chacun de ces modèles, d'une grille d'espace pour laquelle on connaît, en chaque cellule, les prévisions de précipitations.

Par souci de lisibilité et pour simplifier l'interprétation, la représentation des prévisions des précipitations a subi deux étapes : une première étape qui résume l'information temporellement, en assimilant la période 2006 – 2095 à trois horizons d'étude, et une seconde étape qui résume l'information spatialement, en découpant les cartes de prévisions par zone.

##### a. Découpage temporel des prévisions

Afin de faciliter l'étude de l'évolution temporelle des précipitations, celles-ci sont représentées sous forme de taux de variation des précipitations pour un horizon donné par rapport à une période de référence (Ardoin-Bardin, 2004). La formule suivante correspond au taux de variation des précipitations à l'horizon  $i$  et en la cellule  $j$  :

$$\Delta_{hor_i,j} = \frac{\overline{X}_{hor_i,j} - \overline{X}_{ref,j}}{\overline{X}_{ref,j}} \times 100$$

avec  $\overline{X}_{hor_i,j}$  la moyenne interannuelle des précipitations simulées sur l'horizon  $i$  pour la cellule  $j$ ,

$\overline{X}_{ref,j}$  la moyenne interannuelle des précipitations observées sur la période de référence pour la cellule  $j$

On obtient alors, en chaque cellule, le pourcentage de la variation des précipitations pour un horizon donné par rapport à une période de référence.

Les trois horizons utilisés sont :

- horizon 2020 : de 2006 à 2035
- horizon 2050 : de 2036 à 2065
- horizon 2080 : de 2066 à 2095

Le choix de la période de référence se fait suivant certaines contraintes, tels qu'une durée d'environ 30 ans et un comportement des précipitations homogène sur cette durée. C'est ainsi que la période de référence 1969 – 1998 a été choisie pour le modèle climatique HadCM3 (Ardoin-Bardin, 2004). Le choix de cette période est conservé autant que possible pour les autres modèles climatiques suivant les disponibilités des données (Tableau 4.1). La période de 30 ans n'est pas respectée pour NCAR\_PCM et ECHAM4 ; en effet, la période de référence de NCAR\_PCM dure 18 ans et celle d'ECHAM4 8 ans. Ces périodes de référence écourtées peuvent poser quelques problèmes de cohérence des précipitations simulées avec application des scénarii climatiques en s'appuyant sur des périodes trop courtes pour être bien représentatives.

**Tableau 4.1 – Périodes des données disponibles et périodes de référence**

	HadCM3	CSIRO_Mk2	NCAR_PCM	ECHAM4
Données disponibles	1950 - 2099	1961 - 2100	1980 - 2099	1990 - 2100
Période de référence choisie	1969 - 1998	1969 - 1998	1980 - 1998	1990 - 1998

Ainsi, pour chaque modèle climatique, toutes les prévisions de précipitations sont résumées par trois cartes de taux de variation d'un horizon étudié par rapport à la période de référence propre à chaque modèle climatique et en chaque cellule de la grille.

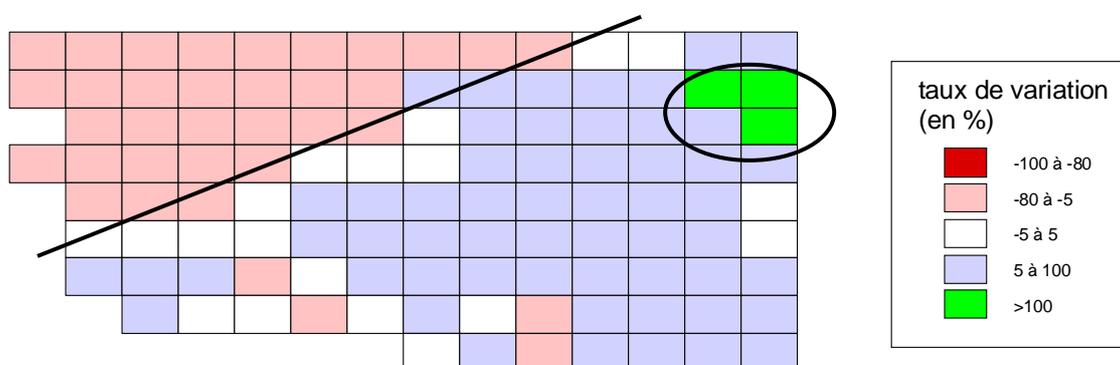
Il faut bien remarquer, pour la suite de l'interprétation, que le taux de variation est relatif à la période de référence propre à chaque modèle climatique.

Ensuite, afin de faciliter les comparaisons entre les modèles climatiques, la fenêtre d'étude a été divisée en plusieurs zones pour lesquelles nous avons calculé le taux de variation moyen des cellules incluses dans chaque zone.

#### b. Motivation du découpage spatial

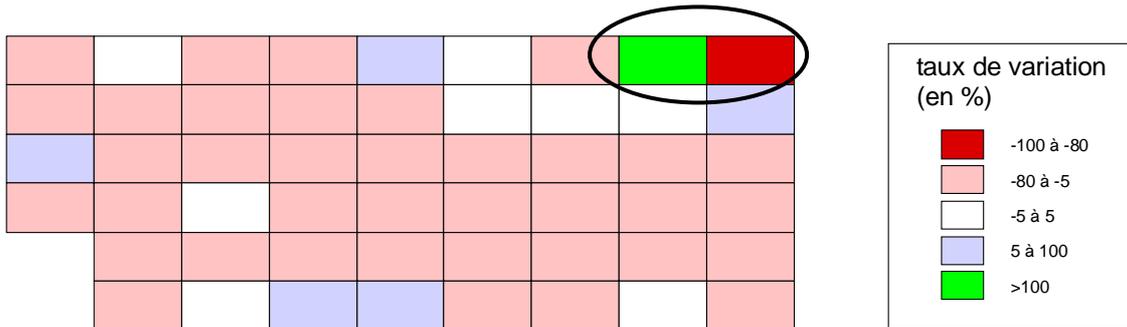
Le découpage en zones a été motivé par la volonté de synthétiser les prévisions pluviométriques. Le but est alors d'améliorer la lisibilité et de faciliter l'interprétation, sans que cela implique la perte d'information.

La première division correspond à la répartition latitudinale des précipitations en utilisant les isohyètes 700 mm et 1500 mm. Ceci permet de distinguer les zones de climat sahélien, soudanien (tropical sec) et guinéen (tropical humide). La seconde division a été déterminée selon les prévisions du modèle climatique HadCM3, présentant un comportement plus particulier que les autres modèles (Ardoin-Bardin, 2004). En effet, HadCM3 prévoit une diminution des précipitations au Nord Ouest de la fenêtre d'étude et une augmentation au Sud Est (figure 4.1).

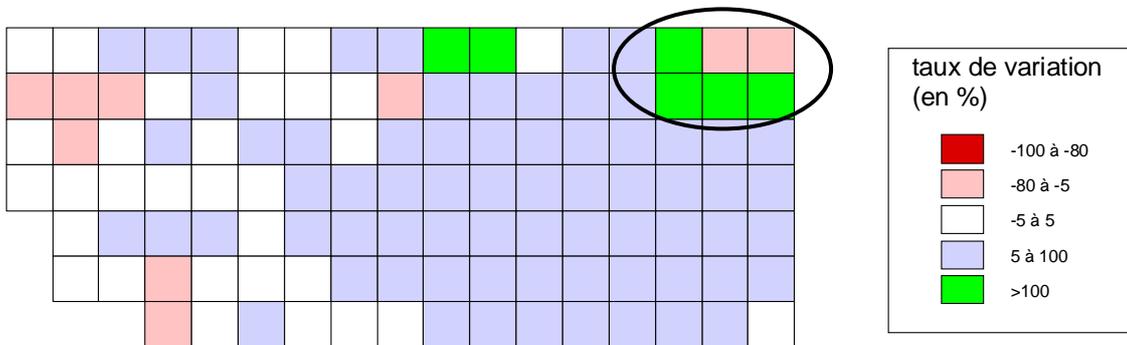


**Figure 4.1 – Taux de variation des précipitations annuelles avec HadCM3 à l'horizon 2080 avec le scénario Anomalie**

De plus, nous pouvons observer que tous les modèles climatiques utilisés (excepté NCAR\_PCM) ont des difficultés à représenter le climat en zone sahélienne et plus particulièrement au Nord Est. Ceci se manifeste par des valeurs incohérentes, des taux de variation très élevés ou des cellules proches présentant des prévisions opposées (figure 4.2, 4.3 et 4.4), que nous avons isolé dans une zone particulière. Cette zone sera ignorée dans la suite de l'interprétation.

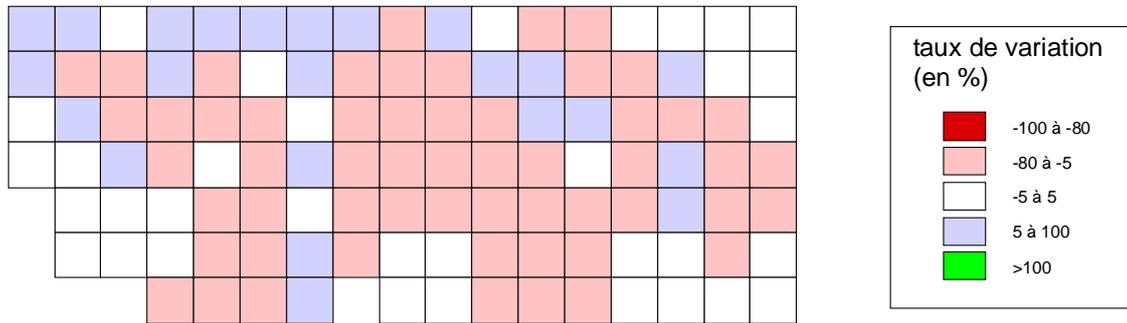


**Figure 4.2 – Taux de variation des précipitations annuelles avec CSIRO\_Mk2 à l'horizon 2080 avec le scénario Anomalie**



**Figure 4.3 – Taux de variation des précipitations annuelles avec ECHAM4 à l'horizon 2080 avec le scénario Anomalie**

Les résultats obtenus avec le modèle climatique NCAR\_PCM ne présente pas de particularités influençant le choix des zones (figure 4).



**Figure 4.4 – Taux de variation des précipitations annuelles avec NCAR\_PCM à l'horizon 2080 avec le scénario Anomalie**

Ces différentes observations nous amène à découper notre fenêtre d'étude en sept zones, dont l'évolution est détaillée par la suite.

c. Validité de la représentation choisie

Pour chaque zone, on peut calculer, à chaque horizon et pour chaque modèle climatique, un taux de variation moyen des zones. On peut alors, pour chaque horizon, réunir en une carte les résultats obtenus pour les quatre modèles climatiques à l'aide de quatre carrés dont la couleur indique s'il s'agit d'une augmentation ou d'une diminution des précipitations par rapport à la période de référence, c'est-à-dire si le taux moyen est positif ou négatif.

i. Les termes caractéristiques de la représentativité du taux de variation moyen

Pour chaque modèle et chaque zone, nous précisons l'écart moyen de la série par rapport à sa valeur moyenne et l'intervalle des taux de variation de la série pour pouvoir juger de la représentativité du taux de variation moyen de chaque série.

L'écart moyen se calcule de la manière suivante pour chaque modèle climatique:

$$\sigma_j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |\Delta_k - \bar{\Delta}_j|$$

avec  $\sigma_j$  étant l'écart moyen dans la zone  $j$ ,

$n$  le nombre de cellules présentes dans la zone  $j$ ,

$\Delta_k$  le taux de variation obtenu en la cellule  $k$ ,

$\bar{\Delta}_j$  la moyenne des taux de variation des cellules de la zone  $j$  ( $\bar{\Delta}_j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \Delta_k$ )

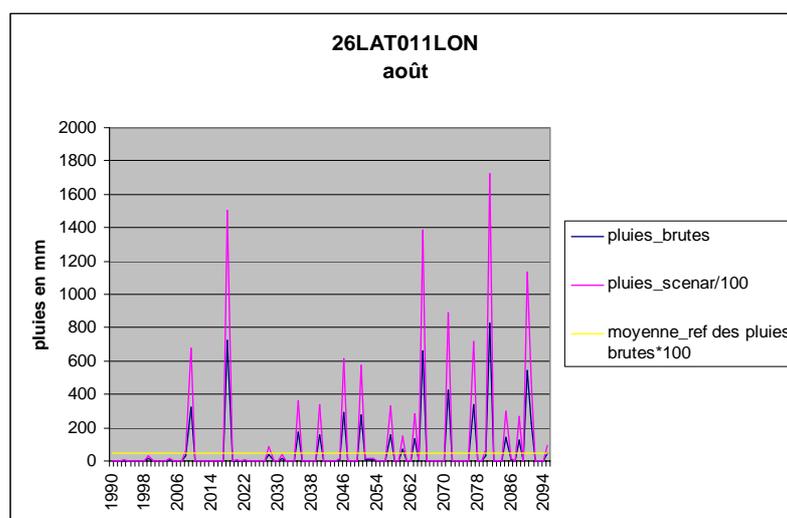
Cette valeur permet d'évaluer la représentativité du taux de variation moyen. En effet, si l'écart moyen est important, de l'ordre de 40% par exemple, cela signifie que, en moyenne, les cellules de la zone étudiée présenteront un taux de variation éloigné de 40% du taux de variation moyen. Il est clair que, dans ce cas, le taux de variation moyen est très peu représentatif de ce qui se passe réellement dans la zone étudiée.

Par contre, l'écart moyen peut être acceptable, de l'ordre de 10% par exemple, même si le comportement des cellules de la zone n'est pas bien représenté par le taux de variation moyen. En effet, si la zone comporte beaucoup de cellules avec des taux de variation très proches du taux de variation moyen et quelques cellules avec, au contraire, des taux de variation très éloignés du taux moyen, le fait d'effectuer une moyenne va uniformiser les écarts et donner l'impression, à tort, d'un taux de variation moyen représentatif. C'est pour cela que nous avons introduit un second terme pour évaluer la représentativité du taux moyen : les intervalles. Pour chaque zone, nous indiquerons l'intervalle des taux de variation de la zone :  $[\Delta_{\min}; \Delta_{\max}]$  avec  $\Delta_{\min}$  ( $\Delta_{\max}$ ) étant le taux de variation minimal (maximal) des cellules présentes dans la zone.

Ainsi, l'écart moyen et l'intervalle des taux de variation nous permettront de juger de la représentativité du taux de variation moyen en chaque zone de la fenêtre étudiée.

## ii. Justification de la zone « ignorée »

Etudions par exemple la cellule 26LAT011LON du modèle climatique ECHAM4, qui présente les taux de variation les plus importants avec 1747,2% à l'horizon 2020, 2411,2% à l'horizon 2050 et 3627,8% à l'horizon 2080 et qui se situe dans la zone à ignorer. Ces taux élevés sont dus à des pics des valeurs brutes (avant l'application de scénarii de « correction ») du modèle climatique au mois d'août et pour certaines années. Ces pics sont amplifiés par l'application du scénario Anomalie qui prend en considération la variation des précipitations brutes par rapport à la valeur moyenne de la période de référence (figure 4.5). On obtient ainsi, pour le mois d'août 2081, une précipitation de 172326,2 mm pour cette cellule alors qu'elle est située au-dessus de l'isohyète 700 mm.



**Figure 4.5 – Evolution des précipitations brutes, de leur moyenne sur la période de référence (multipliée par 100) et des précipitations après application du scénario Anomalie (divisées par 100) pour ECHAM4**

Le cas d'ECHAM4 présenté ici est amplifié par le fait que la période de référence utilisée, pour ce modèle climatique, est de huit années durant lesquelles on n'observe aucun pic de valeurs. Ce problème de prédiction en zone sahélienne se reproduit tout de même, mais avec moins d'ampleur, pour les modèles climatiques HadCM3 et CSIRO\_Mk2.

d. Evolution de la représentation cartographique suivant le découpage spatial

- Division climatique :

Le premier découpage consiste à mettre en évidence les différents types de climat de la fenêtre d'étude (sahélien, soudanien et guinéen) en utilisant les isohyètes 700mm et 1500mm (figure 4.6).

On observe, qu'avec cette division, le comportement de HadCM3 est limité à une augmentation des précipitations sur l'ensemble de la fenêtre d'étude, contrairement à ce que montrait la figure 1.

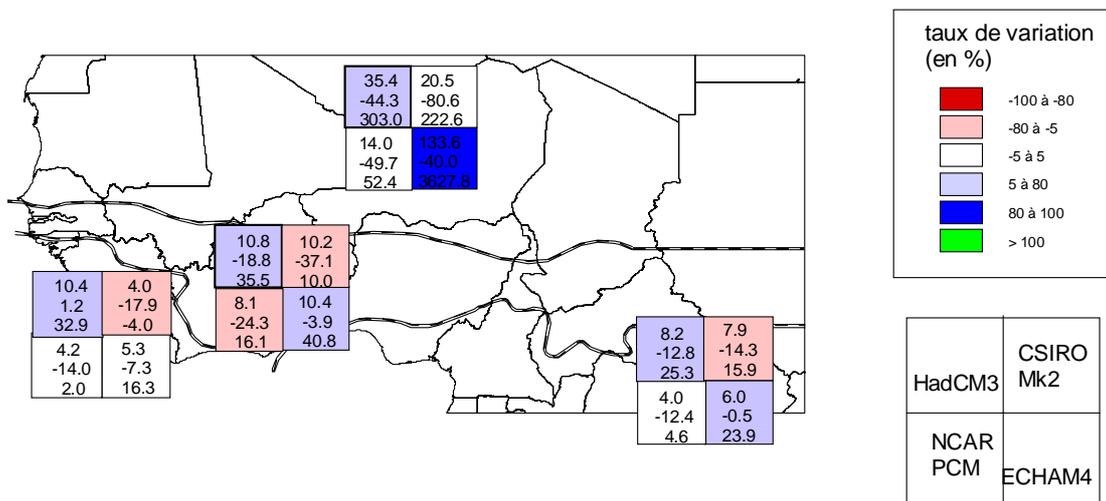


Figure 4.6 – Carte de prévisions à 4 zones pour l’horizon 2080 avec le scénario Anomalie

- Division suivant HadCM3 :

Pour rendre visible le comportement particulier des prévisions de HadCM3, nous séparons en deux les zones de climat sahélien et soudanien par deux traits verticaux situés aux longitudes 6,75°E et -1,75°W (figure 4.7).

Les deux zones ainsi ajoutées mettent bien en évidence la diminution des précipitations au Nord Ouest et l'augmentation au Sud Est avec le modèle climatique HadCM3 (figure 7).

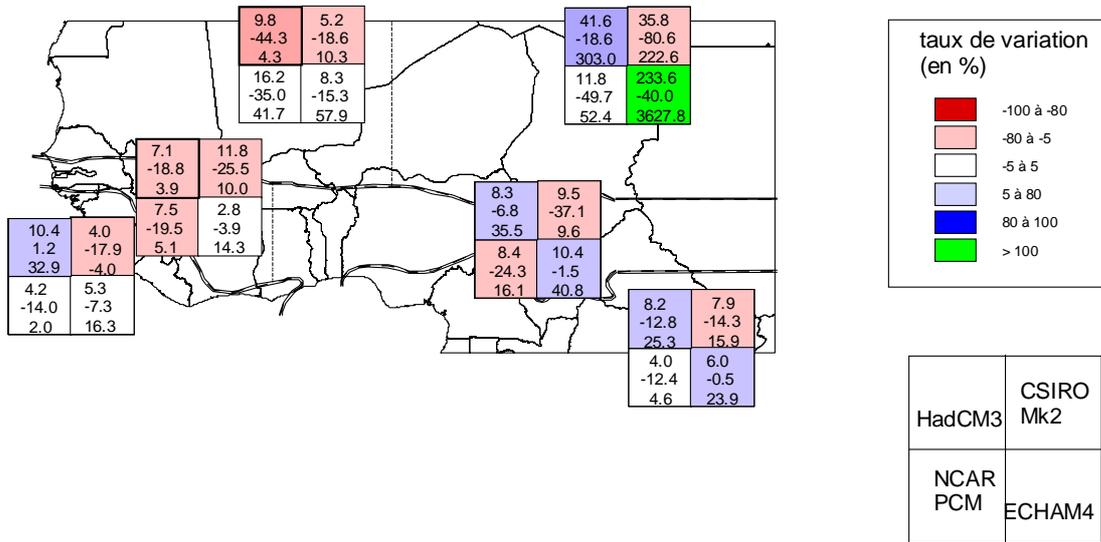


Figure 4.7 – Carte de prévisions à 6 zones pour l'horizon 2080 avec le scénario Anomalie

- Division avec la zone à « ignorer » :

La dernière division, en isolant les cellules à problèmes, permet d'obtenir des valeurs acceptables sur les autres zones du climat sahélien et de limiter la superficie de la zone à valeurs incohérentes (figure 4.8).

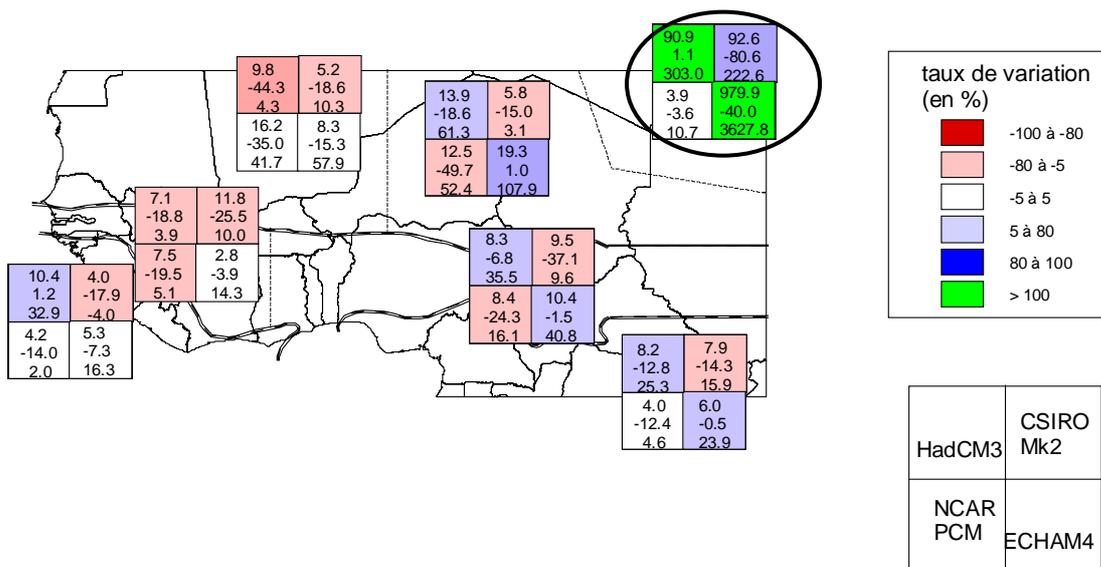


Figure 4.8 – Carte de prévisions à 7 zones pour l'horizon 2080 avec le scénario Anomalie

Cette zone ne sera pas prise en compte dans la suite de cette étude car, comme nous l'avons expliqué précédemment, les valeurs incohérentes observées sont dues aux limites des modèles climatiques à représenter le climat sahélien.

La prise en compte de la répartition des climats, des particularités des prévisions de HadCM3 et de l'incohérence des valeurs en zone sahélienne nous a conduit à un découpage final en sept zones. La numérotation de ces zones (figure 4.9), correspondant à l'ordre de leur création, sera utilisée durant l'interprétation suivante.

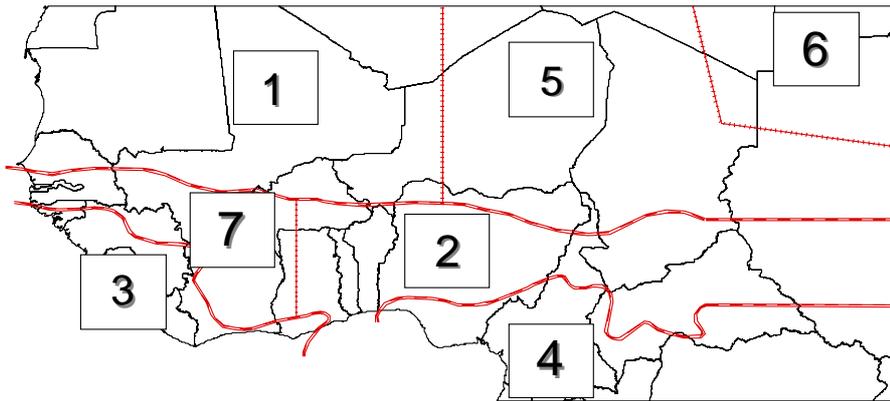


Figure 4.9 – Numérotation des zones sur la fenêtre d'étude

De plus, nous précisons, qu'au niveau de l'interprétation, le terme diminution (augmentation) significative équivaudra à des taux de variation inférieurs (supérieurs) à -5% (5%) ; par opposition, une faible évolution correspondra à un taux de variation compris entre -5% et 5%.

## 2. Evolution des précipitations avec le scénario Anomalie

La figure 4.10 représente les taux de variation et indique les écarts moyens et les intervalles pour chaque modèle, à chaque horizon et par zone.

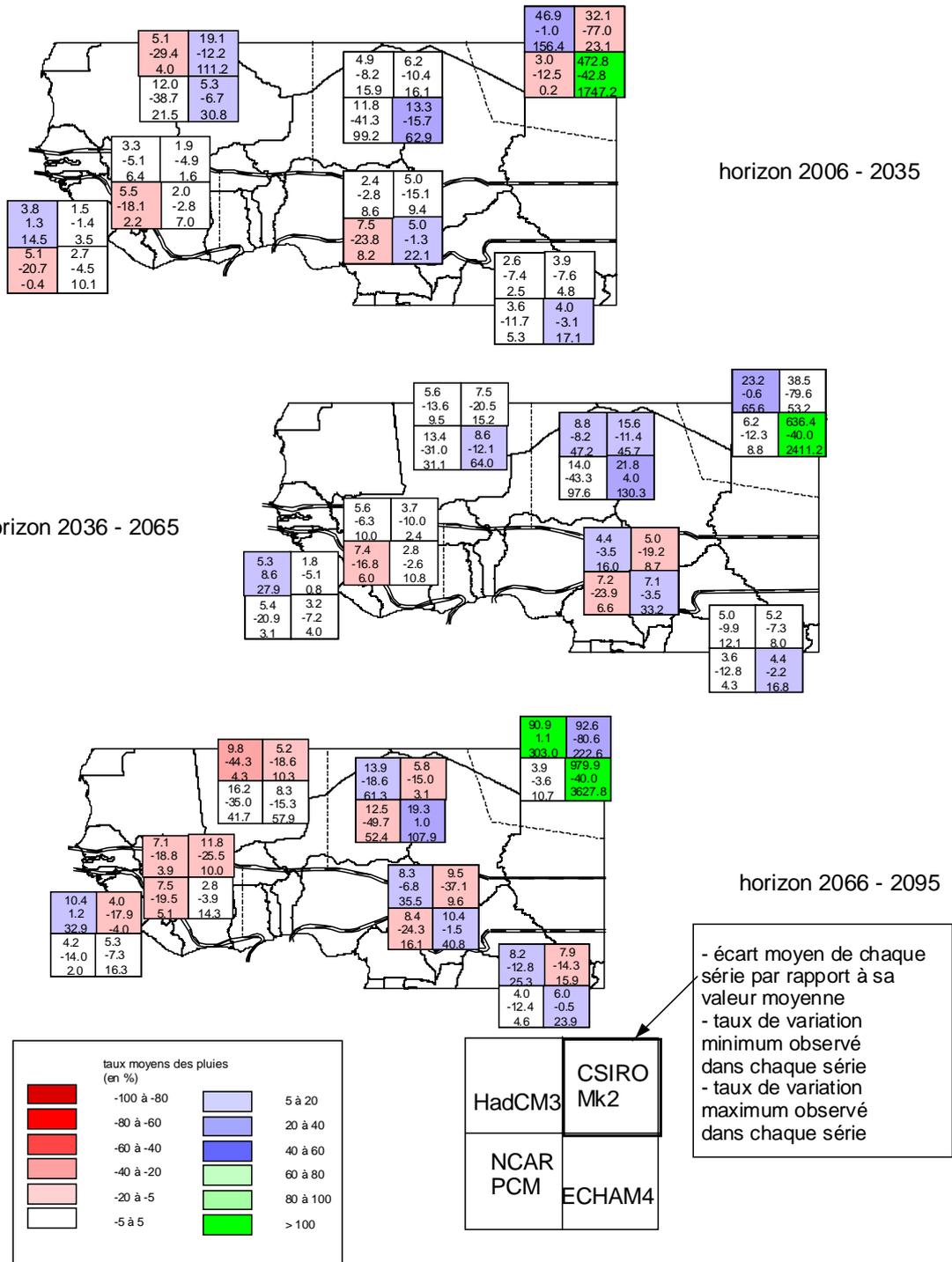


Figure 4.10 – Prévisions des taux de variation des précipitations aux trois horizons avec le scénario Anomalie

a. HadCM3

La tendance générale de l'évolution des précipitations avec le modèle climatique HadCM3 est celle décrite précédemment avec deux comportements distincts : diminution des précipitations au Nord Ouest de la fenêtre d'étude (zones 1 et 7) et augmentation au Sud Est de la fenêtre d'étude (zones 2, 3, 4 et 5).

i. Au Nord Ouest de la fenêtre d'étude

Dans cette partie de la fenêtre, pour les deux premiers horizons, les taux de variation moyens sont faibles ou négatifs ; on observe ensuite, à l'horizon 2080, des taux moyens significativement négatifs.

Les précipitations présentent d'abord une faible augmentation, puis une diminution, jusqu'à -26% pour la zone 1 (tableau 4.2).

**Tableau 4.2 – Taux de variation moyens des précipitations par horizon**

	Zone 1	Zone 7
2020	-5,1	1,6
2050	-3,2	3,9
2080	<b>-26,0</b>	<b>-7,3</b>

Les écarts moyens, d'au maximum 9,8%, sont acceptables. De plus, les bornes supérieures des intervalles ne dépassent jamais les 10% ; ceci signifie qu'aucune cellule ne présente d'augmentation importante dans ces deux zones.

La tendance générale à la stabilité puis à la diminution est alors bien représentative des zones 1 et 7.

ii. Au Sud Est de la fenêtre d'étude

Les zones situées au Sud Est de la fenêtre ne présentent que des taux de variation moyens positifs, excepté dans la zone 4 à l'horizon 2020. Ces taux augmentent progressivement au cours du XXIème siècle, excepté pour la zone 3 dont le taux augmente au début du siècle, puis diminue faiblement (tableau 4.3).

**Tableau 4.3 – Taux de variation moyens des précipitations par horizon**

	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5
2020	3,1	6,3	<b>-1,1</b>	2,6
2050	9,0	14,9	2,9	11,6
2080	13,9	11,3	7,0	14,5

Etudions plus précisément la représentativité des taux de variation moyens de ces zones :

- zone 3 : augmentation nette des précipitations avec des taux de variation toujours supérieures à 1,2% sur toutes les cellules et allant jusqu'à 32,9%
- zones 2, 4 et 5 : tendance à l'augmentation moins nette avec des cellules à valeurs négatives ; les bornes inférieures les plus faibles sont observées à l'horizon 2080 avec -18,6% pour la zone 5. Cependant, la proportion de cellules présentant des diminutions va de 5% dans la zone 2 à 13,3% dans la zone 4, alors que celles présentant une augmentation est de 66,7% dans la zone 4 à 85% dans la zone 2 (figure 4.11). La tendance de ces trois zones est donc bien à l'augmentation des précipitations de plus en plus marquée au cours des horizons. De ce fait, les taux de variation moyens sont bien représentatifs du comportement de ces zones.

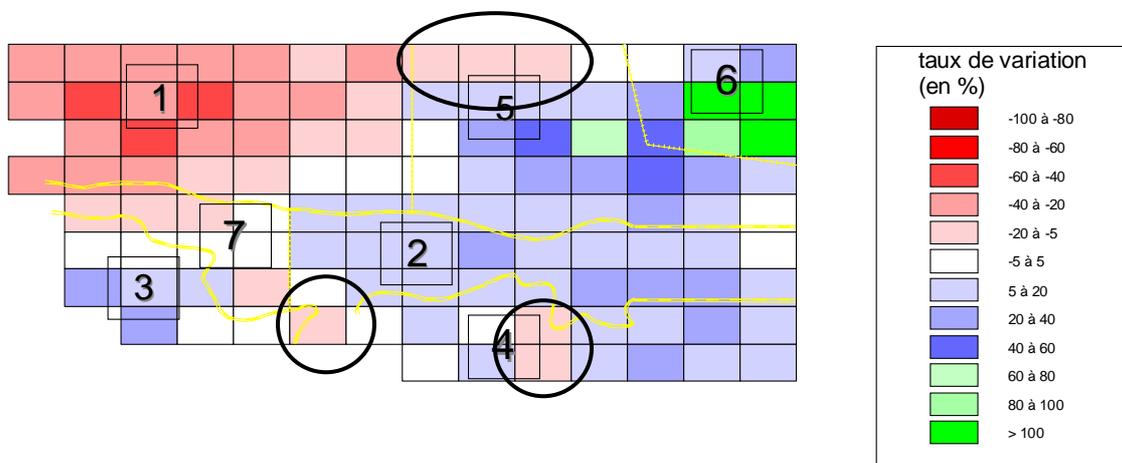


Figure 4.11 – Taux de variation des précipitations annuelles avec HadCM3 à l'horizon 2080

Le modèle climatique HadCM3 ne pose aucun problème de représentation par des taux moyens de variation par zone. Ses prévisions correspondent à une diminution des précipitations au Nord Ouest et une augmentation au Sud Est.

#### b. CSIRO\_Mk2

##### i. Au Sud de l'isohyète 700mm

Pour la partie de la fenêtre située au Sud de l'isohyète 700mm (zones 2, 3, 4 et 7), les taux de variation des précipitations sont négatifs à tous les horizons, excepté à l'horizon 2020 pour la zone 3. Ces taux présentent une diminution d'un horizon à l'autre, excepté pour la zone 4 où l'on observe une faible augmentation de l'horizon 2020 à 2050 (tableau 4.4). On a alors clairement une tendance à la diminution des précipitations qui s'accroît au cours des horizons.

**Tableau 4.4 – Taux de variation moyens des précipitations par horizon**

	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 7
2020	-4,8	<b>0,9</b>	-1,5	-1,5
2050	-6,8	-2,3	-0,4	-3,5
2080	-15,9	-9,6	-5,3	-8,7

Etudions la représentativité des taux moyens de variation :

- zone 3 : tendance à la diminution claire avec des écarts moyens ne dépassant pas 4% et des cellules de taux de variation toujours inférieurs à 3,5%
- zone 7 : les taux de variation des cellules ne dépassent pas 2,4% aux horizons 2020 et 2050. A l'horizon 2080, l'intervalle de valeurs atteint 10% mais cela est dû à une seule cellule (figure 14)
- zone 4 : au premier horizon, l'intervalle va jusqu'à 4,8% ; par contre, pour les horizons 2050 et 2080, les bornes supérieures sont 8% et 15,9%. Pour l'horizon 2050, les différentes prévisions possibles (augmentation, diminution et faible évolution) sont présentes en égale proportion (figure 13) ; l'intervalle de valeur étant tout de même relativement faible, de -7,3% à 8%, on peut considérer que le comportement général de cette zone correspond à de faibles évolutions, comme l'indique le taux de variation moyen. Pour la fin du XXI ème siècle, 66,7% des cellules présentent une augmentation significative (figure 14) ; le taux de variation moyen est alors bien représentatif de la tendance globale.
- zone 2 : tendance à la diminution avec, pour les trois horizons, une seule valeur positive due à la cellule 30LAT01LON, dont le taux maximal est de 9,6% à l'horizon 2080 (figure 14).

Etant donné que seulement trois cellules présentent un comportement différent de la tendance générale, le modèle climatique CSIRO\_Mk2 prévoit bien une diminution des précipitations dans cette partie de la fenêtre d'étude (climat soudanien et guinéen).

#### ii. Au Nord de l'isohyète 700mm

Pour la partie Nord de la fenêtre (zones 1 et 5), l'évolution des précipitations n'est pas aussi clairement défini. En effet, on observe autant de taux de variation positifs que négatifs (tableau 5) et les comportements sont différents pour chacune des deux zones :

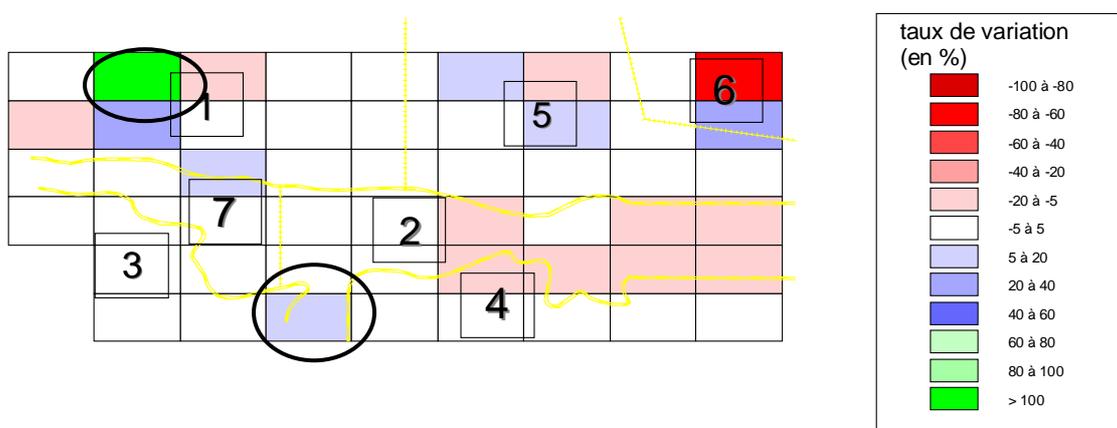
- zone 1 : le taux de variation moyen est d'abord positif, puis diminue progressivement jusqu'à -10,6% à l'horizon 2080.
- zone 5 : le taux de variation moyen est faible à l'horizon 2020, devient significativement positif à l'horizon 2050, avec un taux moyen de 7,4%, et significativement négatif à l'horizon 2080, avec un taux moyen de -7,2% (tableau 4.5).

**Tableau 4.5 – Taux de variation moyens des précipitations par horizon**

	Zone 1	Zone 5
2020	<b>9,2</b>	<b>0,9</b>
2050	-2,6	<b>7,4</b>
2080	-10,6	-7,2

Etudions maintenant la cohérence des taux de variation moyens de ces deux zones :

- zone 1 : à l’horizon 2020, le taux moyen de variation est de 9,2% alors que la proportion de cellule présentant une augmentation significative des précipitations est de 23,1%. Ce problème de représentation est dû à la cellule 35LAT63LON, dont le taux de variation est de 111,2%. En effet, en retirant cette cellule, le taux de variation moyen n’est plus que de 0,6% et la proportion de cellule prévoyant une évolution faible des précipitations en 2020 est de 61,5% (figure 11). Pour l’horizon 2050, 30,8% des cellules présentent une faible variation des précipitations et 53,8% une diminution de celles-ci (figure 12) ; il est alors difficile de dégager une tendance générale qui devrait être représentée par le taux de variation moyen. Pour le dernier horizon, bien que l’intervalle des taux de variation atteigne 10,3%, la représentativité du taux de variation moyen n’est pas remise en question puisque 84,6% des cellules présentent une diminution des précipitations (figure 13).
- zone 5 : l’intervalle des taux de variation à l’horizon 2020 s’étend de -10,4% à 16,1%, et 77,8% des cellules présentent une évolution faible des précipitations (figure 11) ; le taux de variation moyen, de 0,9%, est donc bien représentatif du comportement de la majorité des cellules. Pour l’horizon suivant, résumer le comportement de cette zone à une augmentation significative des précipitations est discutable. En effet, l’intervalle des taux de variation débute à -11,4% et la tendance à l’augmentation correspond à seulement 44,4% des cellules (figure 4.12). Enfin, pour 2080, les taux de variation ne dépassant pas 3,1%, la tendance générale est bien à la diminution (figure 4.13).



**Figure 4.12 – Taux de variation des précipitations annuelles avec CSIRO\_Mk2 à l’horizon 2020**

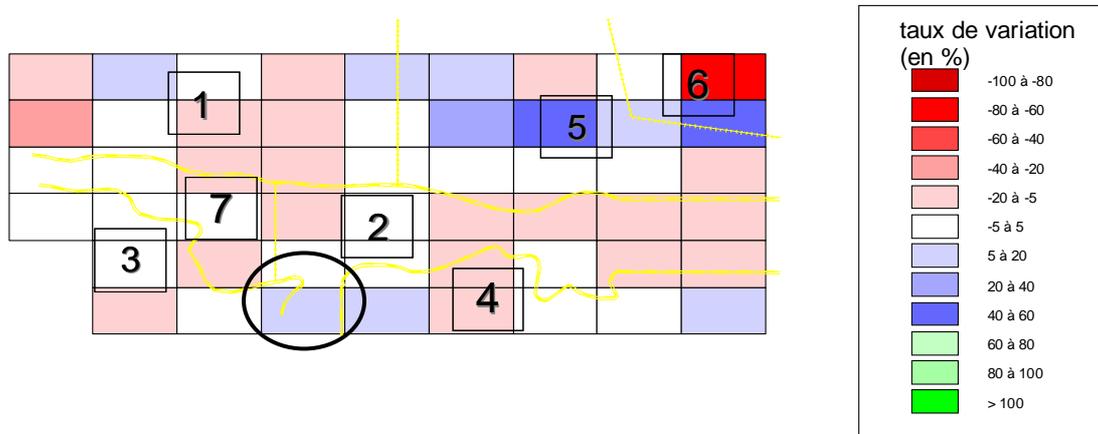


Figure 4.13 – Taux de variation des précipitations annuelles avec CSIRO\_Mk2 à l’horizon 2050

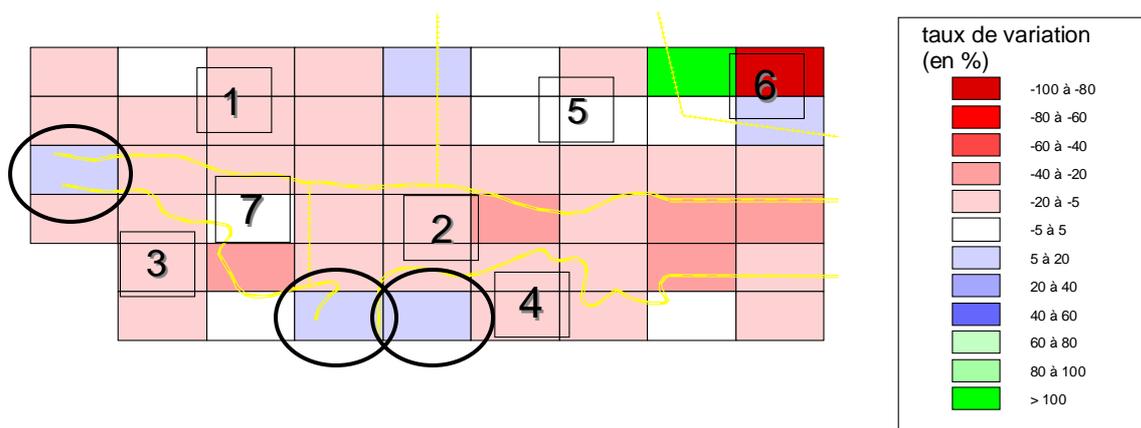


Figure 4.14 – Taux de variation des précipitations annuelles avec CSIRO\_Mk2 à l’horizon 2080

On en déduit alors que, au Sud de l’isohyète 700mm, la tendance générale à la diminution est bien représentative du comportement de ces zones. Par contre, la représentativité des taux de variation moyen est plus problématique en zones 1 et 5.

c. NCAR\_PCM

On observe ici une tendance générale à la diminution des précipitations avec des taux moyens de variation négatifs pour toutes les zones et tous les horizons, à l'exception de la zone 1 à l'horizon 2080 (tableau 6).

i. Importance de la diminution des précipitations suivant les zones

Bien que toute la fenêtre d'étude présente une diminution des précipitations, ce comportement est plus au moins significative suivant les zones (tableau 4.6) :

- zones 2 et 7 : les diminutions des précipitations sont relativement importantes avec des taux de variation allant jusqu'à -9,9%
- zones 3 et 5 : la diminution des prévisions prévues est significative sur au moins un des trois horizons (l'horizon 2020 pour la zone 3 et l'horizon 2080 pour la zone 5) et assez faible sur les deux autres
- zones 1 et 4 : les taux de variation des précipitations sont faibles, allant de -3,9% à 0,5%

**Tableau 4.6 – Tableau des taux de variation moyens des précipitations**

	Zone 2	Zone 7	Zone 3	Zone 5	Zone 1	Zone 4
2020	-7,7	-9,6	-6,0	-3,3	-3,2	-3,6
2050	-7,8	-8,1	-4,8	-2,3	-0,1	-2,8
2080	-8,4	-9,9	-4,5	-6,7	<b>0,5</b>	-3,9

ii. Evolution des taux de variation moyens dans le temps

On peut noter trois types d'évolution des taux de variation moyens (tableau 4.7):

- zones 1 et 3 : augmentation progressive mais faible (progression d'au maximum 3,1%)
- zone 2 : diminution progressive mais faible (progression d'au maximum 0,6%)
- zones 4, 5 et 7 : augmentation puis diminution avec des variations toujours faibles (progression d'au maximum 4,3%)

A travers ces types d'évolution, il apparaît que les taux de variation moyens sont assez stables d'un horizon à l'autre car les variations observées sont toujours faibles.

**Tableau 4.7 – Tableau des taux de variation moyens des précipitations**

	Zone 1	Zone 3	Zone 2	Zone 4	Zone 5	Zone 7
2020	-3,2	-6,0	-7,7	-3,6	-3,3	-9,6
2050	-0,1	-4,8	-7,8	-2,8	-2,3	-8,1
2080	<b>0,5</b>	-4,5	-8,4	-3,9	-6,7	-9,9

### iii. Représentativité des taux moyens de variation par zone

- au Sud de l'isohyète 700mm (zones 2, 3, 4 et 7) :
  - o zone 3, 4 et 7 : les taux de variation des cellules ne dépassent pas 6% et les écarts moyens sont toujours inférieurs à 7,4%
  - o zone 2 : les taux de variation des cellules vont jusqu'à 8,2% à l'horizon 2020 et 16,1% à l'horizon 2080. Cela dit, la proportion de cellules présentant une diminution des précipitations est de 60% en 2020 (figure 15) et 75% en 2080 (figure 17). La tendance de la zone 2 est alors bien représentée par son taux de variation moyen.
  
- partie au Nord de l'isohyète 700mm (zones 1 et 5) :
  - o zone 1 : à tous les horizons, les intervalles des taux de variation sont grands, avec un écart minimum de 60,2%. De plus, la proportion des cellules ne permet pas de dégager un comportement général de la zone. En effet, l'horizon 2080 est celui qui présente les plus grandes différences entre les proportions, et pourtant, la quantité de cellules présentant une diminution (augmentation) significative des précipitations est de 44,4% (40,7%) (figure 4.17). Dans ces conditions, les taux de variation moyens faibles correspondent juste à la compensation des taux des cellules de la zone
  - o zone 5 : les intervalles, aussi très larges dans cette zone, s'étendent au minimum sur 93,7%. La représentativité de cette zone est assez difficile à évaluer. En effet, pour les deux premiers horizons, les taux de variation moyens sont faibles et négatifs alors que seulement 30,8% des cellules en 2020, et 19,2% en 2050, prévoient une évolution faible. De plus, 53,8% des cellules en 2020, et 57,7% en 2050, présentent une diminution significative. De ce fait, les taux de variation moyens, de faible évolution, sont le résultat de comportements trop différents des cellules de cette zone (figure 4.15 et 4.16). Pour l'horizon 2080, 57,7% des cellules prévoient une diminution significative des précipitations ; le taux de variation moyen, étant à -6,7%, est alors représentatif d'une faible majorité des cellules

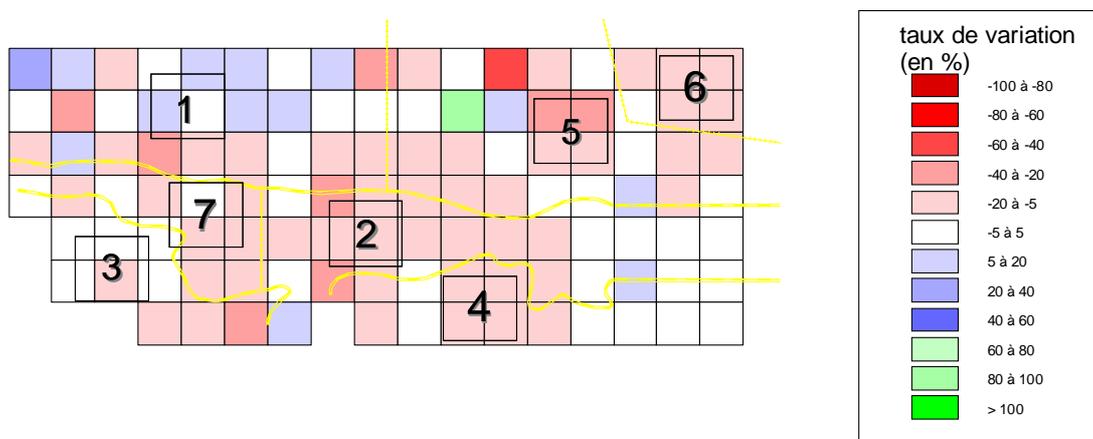


Figure 4.15 – Taux de variation des précipitations annuelles avec NCAR\_PCM à l'horizon 2020

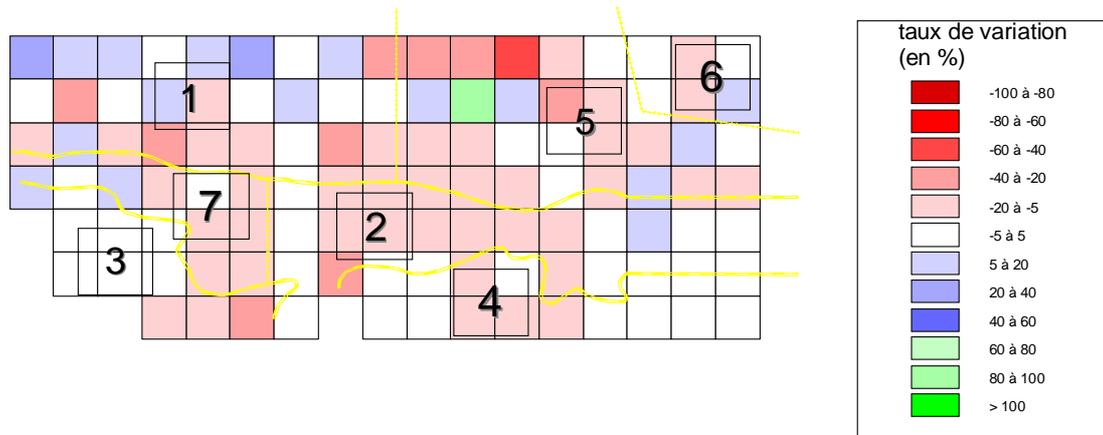


Figure 4.16 – Taux de variation des précipitations annuelles avec NCAR\_PCM à l’horizon 2050

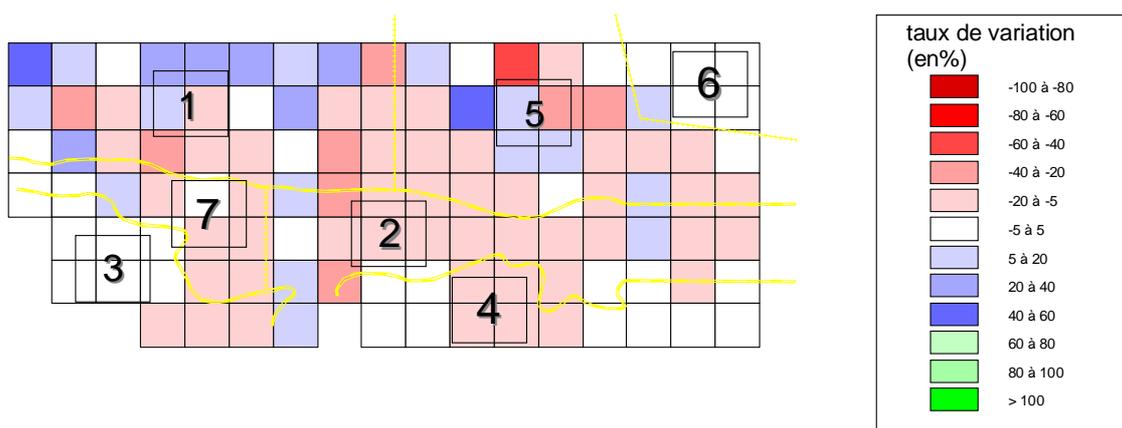


Figure 4.17 – Taux de variation des précipitations annuelles avec NCAR\_PCM à l’horizon 2080

On peut ainsi en déduire que la représentation par zone avec des taux de variation moyens est cohérente au Sud de l’isohyète 700mm avec une claire tendance à la diminution des précipitations qui s’intensifie pour les zones 2 et 7. Par contre, cette représentation n’est pas acceptable pour les zones 1 et 5 pour lesquelles les cellules ont des comportements trop contradictoires.

d. ECHAM4

Pour toutes les zones et tous les horizons, on observe une augmentation des précipitations par rapport à la période de référence avec des taux de variation moyens supérieurs à 0,9%, excepté en zone 3 à l'horizon 2050 (tableau 4.8).

**Tableau 4.8 – Tableau des taux de variation moyens des précipitations**

	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 7
2020	6,1	10,5	0,9	6,0	20,3	1,3
2050	9,8	14,7	<b>-2,1</b>	6,7	33,7	3,2
2080	4,3	18,4	1,8	13,0	30,9	3,2

i. Importance de l'augmentation des précipitations suivant les zones

Les augmentations des précipitations sont significatives pour les zones 1, 2, 4 et 5 avec des taux atteignant plus de 13% à l'horizon 2080 pour les zones 2, 4 et 5. Par contre au Sud Ouest de la fenêtre étudiée (zones 3 et 7), les taux de variation sont plus faibles allant de -2,1% à 3,2% (tableau 4.9).

**Tableau 4.9 – Tableau des taux de variation moyens des précipitations**

	Zone 1	Zone 2	Zone 4	Zone 5	Zone 3	Zone 7
2020	6,1	10,5	6,0	20,3	0,9	1,3
2050	9,8	14,7	6,7	33,7	<b>-2,1</b>	3,2
2080	4,3	18,4	13,0	30,9	1,8	3,2

ii. Evolution des taux de variation moyens dans le temps

On observe trois comportements différents d'évolution d'un horizon à l'autre suivant les zones (tableau 4.10):

- au Nord de l'isohyète 700mm (zones 1 et 5) : augmentation puis diminution des taux de variation avec des évolutions de l'ordre de 3 à 4% pour atteindre finalement 4,3% en zone 1 et 30,9% en zone 5
- au Sud Est (zones 2 et 4) : augmentation progressive des taux moyens au cours des horizons pour atteindre 18,4% à l'horizon 2080 en zone 2 et 13% en zone 4
- au Sud Ouest (zones 3 et 7) : taux de variation assez stables d'un horizon à l'autre avec des variations de 1 à 3%

**Tableau 4.10 – Tableau des taux de variation moyens des précipitations**

	Zone 1	Zone 5	Zone 2	Zone 4	Zone 3	Zone 7
2020	6,1	20,3	10,5	6,0	0,9	1,3
2050	9,8	33,7	14,7	6,7	<b>-2,1</b>	3,2
2080	4,3	30,9	18,4	13,0	1,8	3,2

### iii. Représentativité des taux de variation moyens

- zone 1 : les bornes inférieures des intervalles des taux de variation sont de -6,7% à l'horizon 2020, -12,1% à l'horizon 2050 et -15,3% à l'horizon 2080. Pour le premier horizon, la tendance est à l'augmentation des précipitations avec une borne inférieure faible et un écart moyen de 5,3%. Pour le second horizon, une seule cellule, soit une proportion de 3,7% (figure 4.19), est responsable du taux significativement négatif. Par contre, pour l'horizon 2080, 18,5% des cellules présente un taux de variation significativement négatif, 37% un taux de variation significativement positif et 44,4% une évolution faible (figure 20). Ces proportions sont trop faibles pour permettre de dégager clairement une tendance générale. Si on oublie la notion d'évolution faible et que l'on détermine seulement deux comportements (augmentation et diminution), les proportions sont de 59,2% des cellules qui présentent une augmentation des précipitations et 40,7% une diminution (figure 21). Dans ce cas aussi, les proportions ne sont pas assez importantes pour déterminer une tendance générale et le taux de variation moyen faible (4,3%) est le résultat de la compensation entre taux positifs et négatifs
- zone 3 : les deux premiers horizons sont représentés, à raison, par des taux de variation de faible évolution, avec 88,9% en 2020 et 66,7% en 2050 des cellules prévoyant une faible évolution (figure 4.18 et 4.19). Par contre, à l'horizon 2080, on observe 44,4% des cellules à faible évolution, 22,2% présentant une diminution significative et 33% une augmentation (figure 4.20). En se limitant à deux types de comportements, 55,5% des cellules prévoient une augmentation des précipitations et 44,4% une diminution (figure 4.21). Cette zone a alors, dans tous les cas, un comportement difficilement représentable.
- zone 5 : l'horizon 2020 est le seul à présenter des cellules à taux de variation négatifs avec un intervalle commençant à -15,7%. Une seule cellule, soit 4% des cellules de la zone, se distingue de la tendance générale à l'augmentation sans pour autant remettre en cause l'augmentation des précipitations dans cette zone (figure 4.18).
- zones 2, 4 et 7 : toutes les valeurs sont supérieures à -3,9%. Les cellules de ces zones ont alors une tendance nette à l'augmentation qui est bien représentée par les taux de variation moyens.
- Remarque :
  - o zones 3 et 7 : les intervalles ne dépassant pas 16,3% correspondent aux augmentations faibles observées précédemment
  - o zones 2 et 4 : les intervalles atteignant respectivement 40,8% et 23,9% à l'horizon 2080 correspondent à des augmentations plus marquées

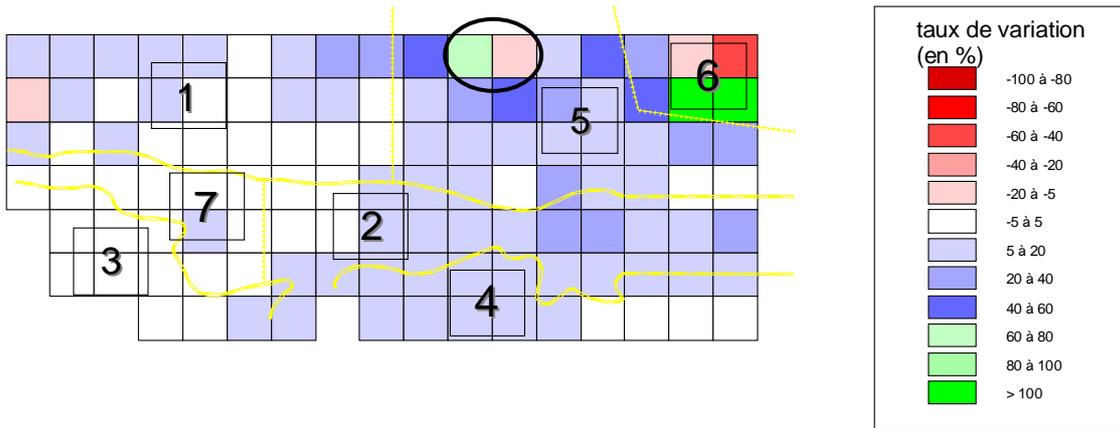


Figure 4.18 – Taux de variation des précipitations annuelles avec ECHAM4 à l’horizon 2020

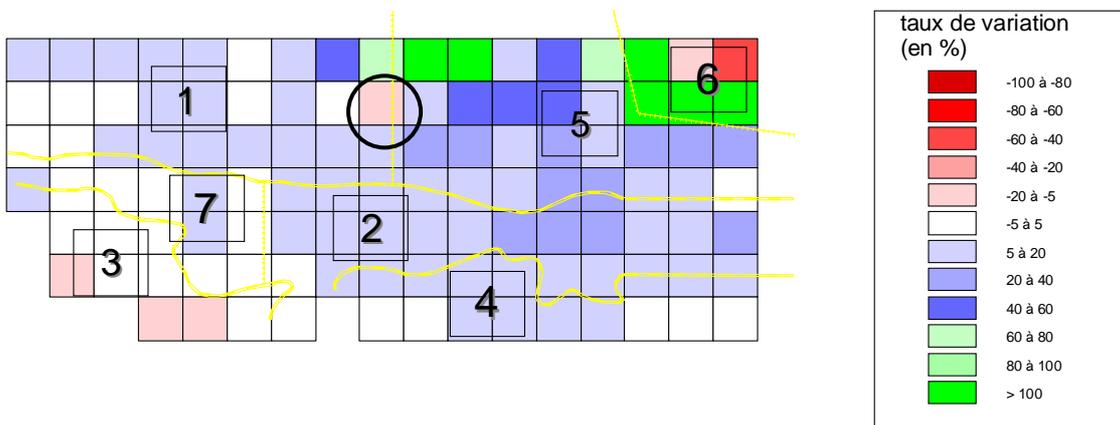


Figure 4.19 – Taux de variation des précipitations annuelles avec ECHAM4 à l’horizon 2050

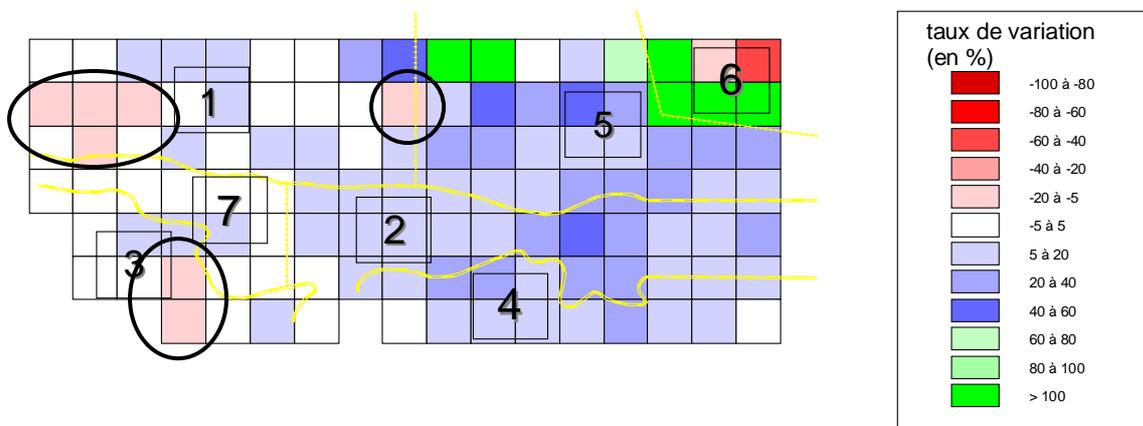
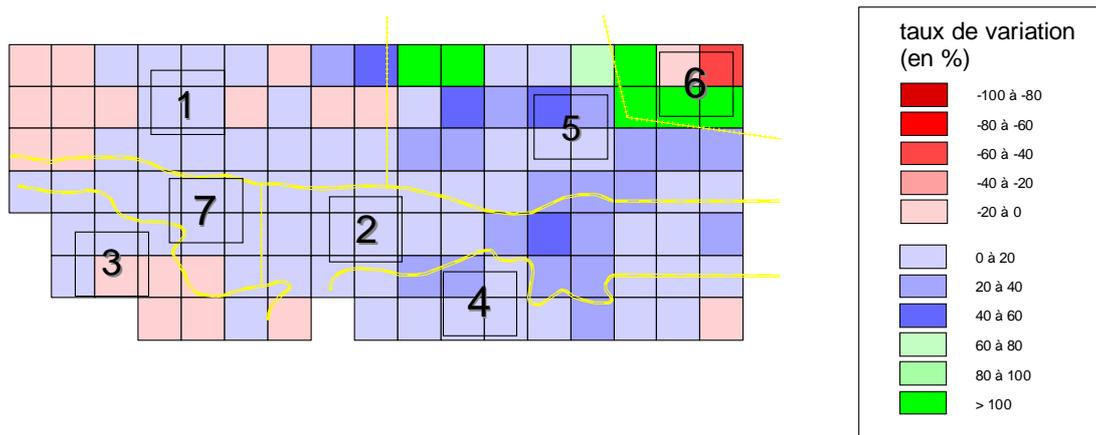


Figure 4.20 – Taux de variation des précipitations annuelles avec ECHAM4 à l’horizon 2080



**Figure 4.21 – Taux de variation des précipitations annuelles avec ECHAM4 à l’horizon 2080 (avec une nouvelle légende)**

Le modèle climatique ECHAM4 est caractérisé par une tendance générale à l’augmentation, le plus souvent de manière significative. Il faut noter que, à l’horizon 2080, les zones 1 et 3 posent quelques problèmes de représentation par les taux de variation moyen car il est difficile pour ces zones de déterminer une tendance générale.

#### e. Comparaisons inter modèles climatiques

Pour les quatre modèles climatiques étudiés et sur les zones situées au Sud de l’isohyète 700mm, la méthode de représentation par des taux de variation moyens par zone est acceptable, excepté pour la zone 3 avec ECHAM4. Pour les zones au Nord de la fenêtre (zones 1 et 5), la représentation choisie n’est pas adaptée pour les modèles CSIRO\_Mk2 et NCAR\_PCM car, dans ces cas, le comportement des cellules est trop contradictoire d’une cellule à l’autre pour être représenté par un taux moyen de variation.

#### i. Evolution des prévisions avec HadCM3 – ECHAM4

Sur la fenêtre étudiée, excepté la partie Sud Ouest (zones 3 et 7), le comportement des taux de variation moyens par zone des modèles HadCM3 et ECHAM4 d’un horizon à l’autre est similaire (figure 4.22). En effet, pour la zone 1, on observe dans les deux cas une augmentation puis une diminution du taux de variation. Ensuite, pour les zones 2 et 4, les deux modèles présentent une augmentation progressive des taux de variation moyens. Et enfin, on observe, pour la zone 5, une augmentation suivie d’une stabilisation du taux de variation moyen.

Ainsi, bien que les ordres de grandeur soient différents, ces modèles climatiques prévoient des directions d’évolution similaires par rapport à leur période de référence.

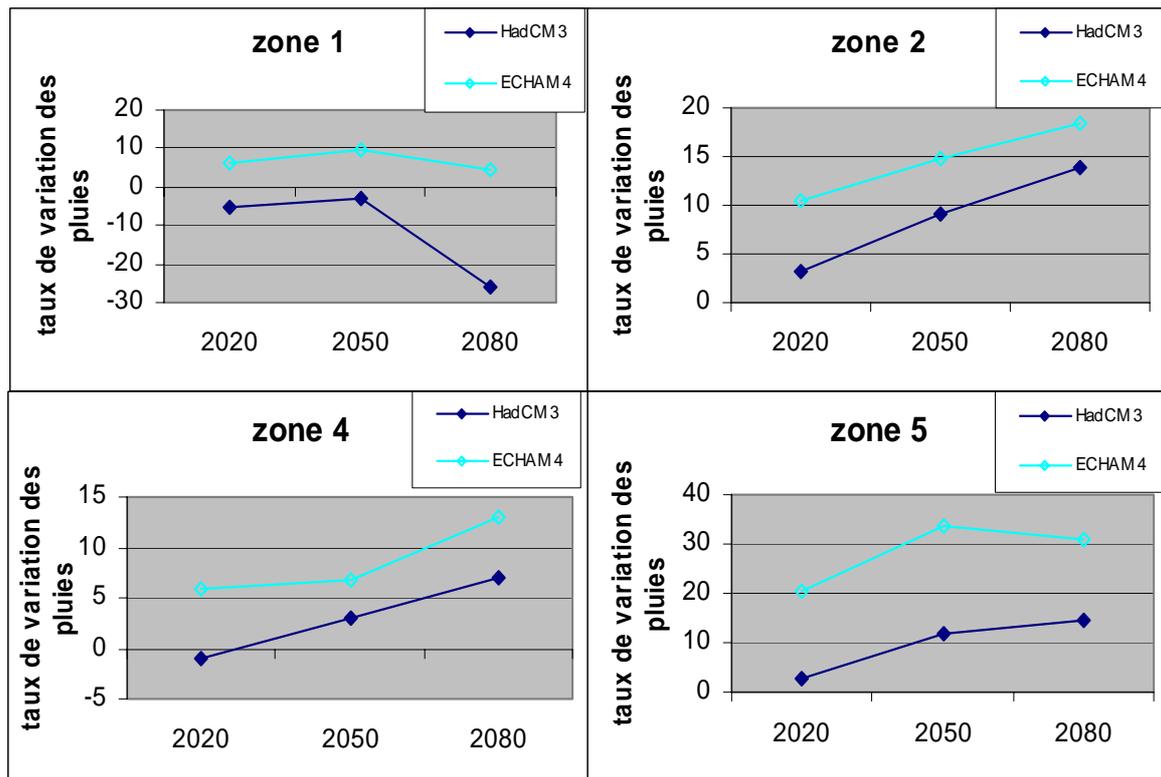


Figure 4.22 – Evolution des taux de variation moyens par zone pour HadCM3 et ECHAM4

ii. Ordre de grandeur avec CSIRO\_Mk2 – NCAR\_PCM

Pour les zones au Sud de l'isohyète 700mm (zones 2, 3, 4 et 7), les modèles climatiques CSIRO\_Mk2 et NCAR\_PCM ont des résultats relativement proches avec des valeurs toujours négatives ou proches de zéro et un écart qui ne dépasse jamais 7,5% de différence entre les deux modèles (tableau 4.11). Les zones 1 et 5 ne sont pas prises en compte ici puisque nous avons signalé précédemment la non validité de leur représentation par un taux de variation moyen.

Tableau 4.11 – Taux de variation moyens des précipitations avec CSIRO\_Mk2 (colonne blanche) et NCAR\_PCM (colonne grisée)

	Zone 2		Zone 3		Zone 4		Zone 7	
2020	-4,8	-7,7	0,9	-6,0	-1,5	-3,6	-1,5	-9,6
2050	-6,8	-7,8	-2,3	-4,8	-0,4	-2,8	-3,5	-8,1
2080	-15,9	-8,4	-9,6	-4,5	-5,3	-3,9	-8,7	-9,9

iii. Stabilité de NCAR\_PCM et ECHAM4

Les taux de variation moyens obtenus avec les modèles climatiques NCAR\_PCM et ECHAM4 varient peu d'un horizon à l'autre (tableau 4.12). En effet, les évolutions maximums observées pour NCAR\_PCM sont de 4,4% en zone 5 et de 3,1% en zone 1, sachant que ces zones sont mal représentées par leur taux de variation moyen dans ce cas. Pour ECHAM4, l'évolution maximum est de 6,3% en zone 4. Ceci montre que ces deux modèles climatiques sont relativement stables d'un horizon à l'autre et ne prévoient pas de grands changements des quantités de précipitations par rapport à leur période de référence.

**Tableau 4.12 – Taux de variation moyens des précipitations avec NCAR\_PCM (colonne blanche) et ECHAM4 (colonne grise)**

	Zone 1		Zone 2		Zone 3		Zone 4		Zone 5		Zone 7	
2020	-3,2	6,1	-7,7	10,5	-6,0	0,9	-3,6	6,0	-3,3	20,3	-9,6	1,3
2050	-0,1	9,8	-7,8	14,7	-4,8	-2,1	-2,8	6,7	-2,3	33,7	-8,1	3,2
2080	0,5	4,3	-8,4	18,4	-4,5	1,8	-3,9	13,0	-6,7	30,9	-9,9	3,2

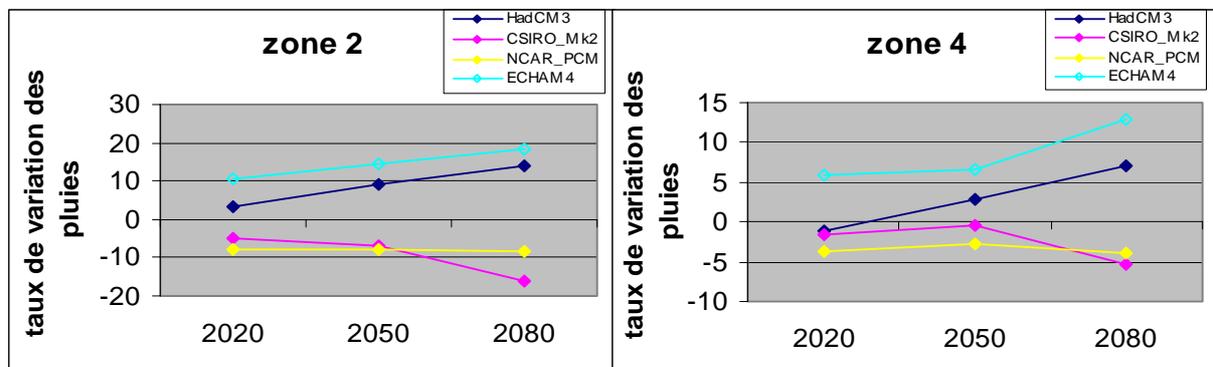
f. Conclusions sur les prévisions possibles

Les prévisions par zone sont déterminées en prenant en compte tous les modèles climatiques au Sud de l'isohyète 700mm, excepté pour la zone 3 avec ECHAM4. Par contre, pour la partie Au Nord de cet isohyète, nous ne tiendrons compte que des résultats de HadCM3 et ECHAM4.

i. Au Sud Est de la fenêtre d'étude

Pour les zones 2 et 4, on peut distinguer deux types de prévisions (figure 4.23) :

- HadCM3 et ECHAM4 : les taux de variation moyens sont positifs (ou proche de zéro pour HadCM3 en zone 4 à l'horizon 2020) et augmentent au cours du temps
- CSIRO\_Mk2 et NCAR\_PCM : les taux de variation sont négatifs et relativement stables avec tout de même des diminutions pour CSIRO\_Mk2 de l'horizon 2050 à l'horizon 2080.



**Figure 4.23 – Taux de variation moyens des précipitations au Sud Est**

ii. Au Sud Ouest de la fenêtre d'étude

En zone 3, tous les modèles présentent une diminution des précipitations avec des taux de variation négatifs ou proches de zéro, excepté pour HadCM3 qui prévoit au contraire une augmentation significative des précipitations (figure 4.24).

Pour la zone 7, les quatre modèles utilisés prévoient des taux de variation des précipitations négatifs ou faiblement positifs. En effet, le taux de variation maximum, parmi les quatre modèles climatiques, est de 3,9% avec HadCM3 à l'horizon 2050. De plus, tous les modèles s'accordent pour une diminution significative à l'horizon 2080 avec des taux allant de -7,3% à -9,9%, excepté le modèle ECHAM4 qui prévoit une augmentation des précipitations de 3,2%.

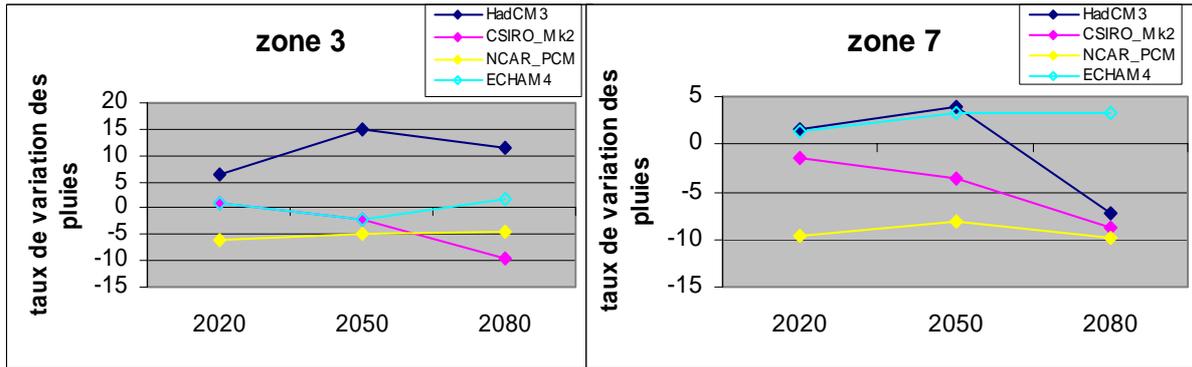


Figure 4.24 – Taux de variation moyens des précipitations au Sud Ouest

iii. Au Nord de la fenêtre d'étude

Pour les zones 1 et 5, les modèles climatiques HadCM3 et ECHAM4 prévoient une augmentation de 2020 à 2050, puis une diminution de 2050 à 2080 (figure 4.25).

La zone 1 présente une diminution des précipitations avec HadCM3 alors que l'on observe une augmentation avec ECHAM4 pour les trois horizons. Cela dit, les augmentations prévues ne dépassent jamais 9,8% alors les diminutions peuvent atteindre -26% à l'horizon 2080.

Pour la zone 5, les deux modèles climatiques utilisés prévoient une augmentation des précipitations

Il faut noter que la représentation du comportement de la zone 1 par un taux de variation moyen pour ECHAM4 à l'horizon 2080 n'était pas satisfaisante.

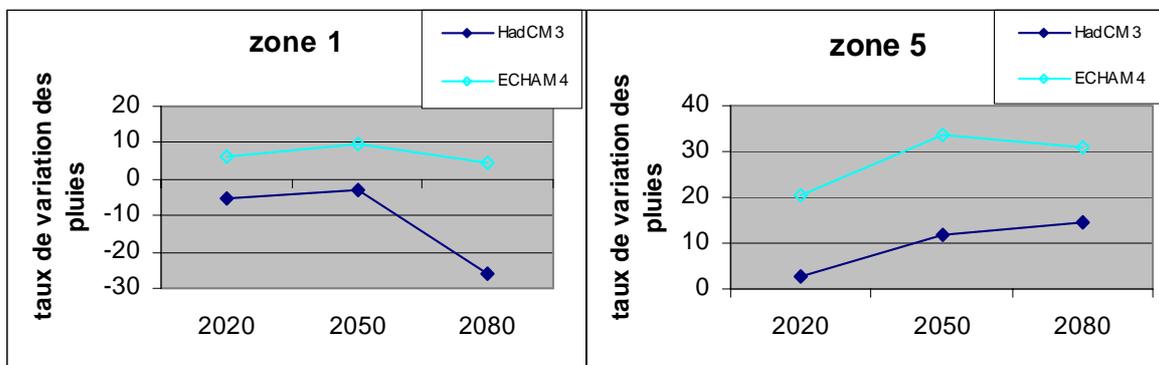


Figure 4.25 – Evolution des taux de variation moyens pour HadCM3 et ECHAM4 au Nord

#### iv. Cartes synthétiques des prévisions

La figure 4.26 permet de résumer les évolutions des taux de variation moyens dans le temps et la tendance à l'augmentation (diminution) faible ou importante des précipitations en représentant la moyenne des taux moyens suivant les trois horizons. Seules les représentations définies précédemment comme acceptables sont reportées. La figure 4.27 représente les prévisions les plus optimistes et les pessimistes que l'on obtient pour les modèles climatiques dont la représentation par taux de variation moyen a été validée.

Il apparaît clairement qu'il est difficile de tirer des conclusions quand aux prévisions d'évolution des précipitations pour les zones 1 et 5. En effet, pour ces deux zones, seul un ou deux modèles climatiques sont pris en compte. Pour la zone 1, le modèle climatique HadCM3 prévoit une diminution des précipitations par rapport à l'année de référence 1969 – 1998 qui s'intensifie au cours du temps jusqu'à -26%. Pour la zone 5, les deux modèles utilisés s'accordent pour prédire une augmentation des précipitations sur les trois horizons. Il faut tout de même noter que les taux de variation prévus avec ECHAM4 sont de 16,4% à 21,1% plus forts que ceux prévus par HadCM3. Ceci peut s'expliquer par la différence de période de référence utilisée, 1969 – 1998 pour HadCM3 et 1990 – 1998 pour ECHAM4, pour calculer les prévisions et les taux de variation. En gardant à l'esprit que ceci ne représente les prévisions que de deux modèles climatiques, il est important de remarquer que la prévision la plus pessimiste pour cette zone est une augmentation des précipitations allant de 2,6% à 14,5% par rapport à la période 1969 – 1998.

Au Sud Est (zones 2 et 4), les modèles climatiques HadCM3 et ECHAM4 s'opposent aux modèles CSIRO\_Mk2 et NCAR\_PCM ; les deux premiers prédisent une augmentation des précipitations, toujours dans des proportions plus importantes pour ECHAM4, et les deux derniers une diminution. La tendance à la diminution ou à l'augmentation est plus marquée et s'intensifie au cours des horizons en zone 2. Dans le cas le plus pessimiste, la diminution va de -7,7% en 2020 à -15,9% en 2080. Les prévisions de la zone 4 sont moins alarmantes avec une diminution des précipitations qui ne descend jamais en dessous de -5,3%.

En zone 7, en tenant compte des quatre modèles climatiques, la tendance est à la diminution ou à une augmentation faible des précipitations. Seul ECHAM4 prévoit une augmentation, au cours des trois horizons, qui ne dépasse pas 3,2%. Les trois autres modèles s'accordent à tendre vers une diminution pour l'horizon 2080 allant de -9,9% à -7,3%. Les prévisions pour cette zone sont alors pessimistes avec, au mieux, une augmentation des précipitations de 3,9%.

Pour la zone 3, le modèle climatique ECHAM4 n'est pas utilisé. Les deux modèles CSIRO\_Mk2 et NCAR\_PCM s'accordent pour prédire une diminution des précipitations, même si l'évolution en est différente, alors qu'HadCM3 prévoit une augmentation significative pour les trois horizons. D'après les prévisions les plus pessimistes, les précipitations diminueraient de -6% à -9,6% de 2020 à 2080, alors que pour les plus optimistes, ce serait une augmentation de 6,3% à 11,3%.

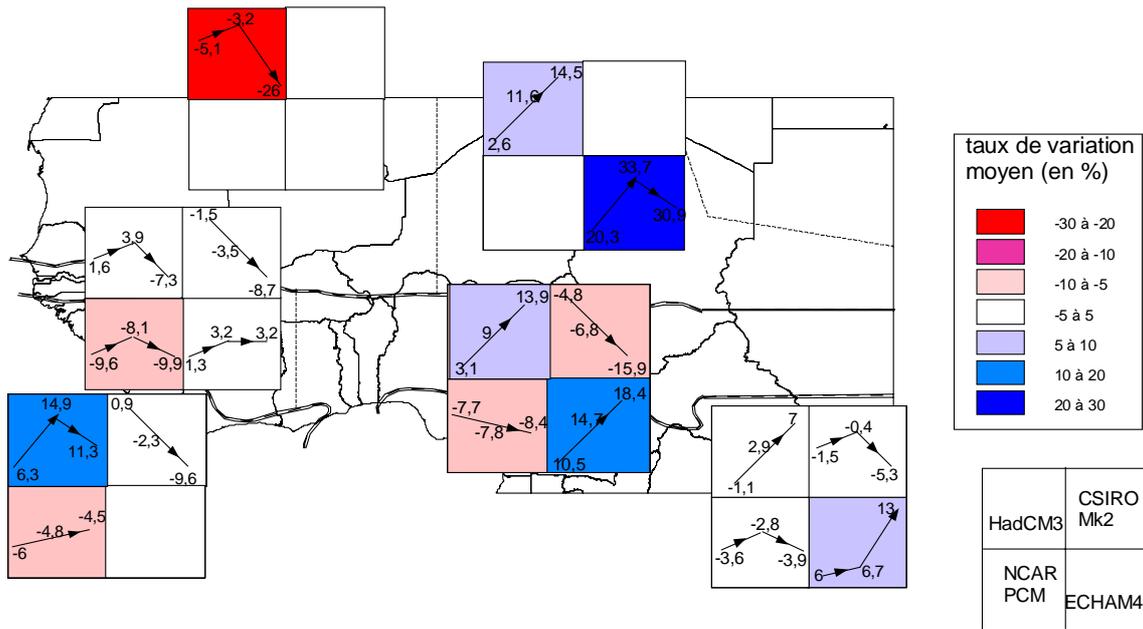


Figure 4.26 – Carte des prévisions des précipitations pour le XXIème siècle

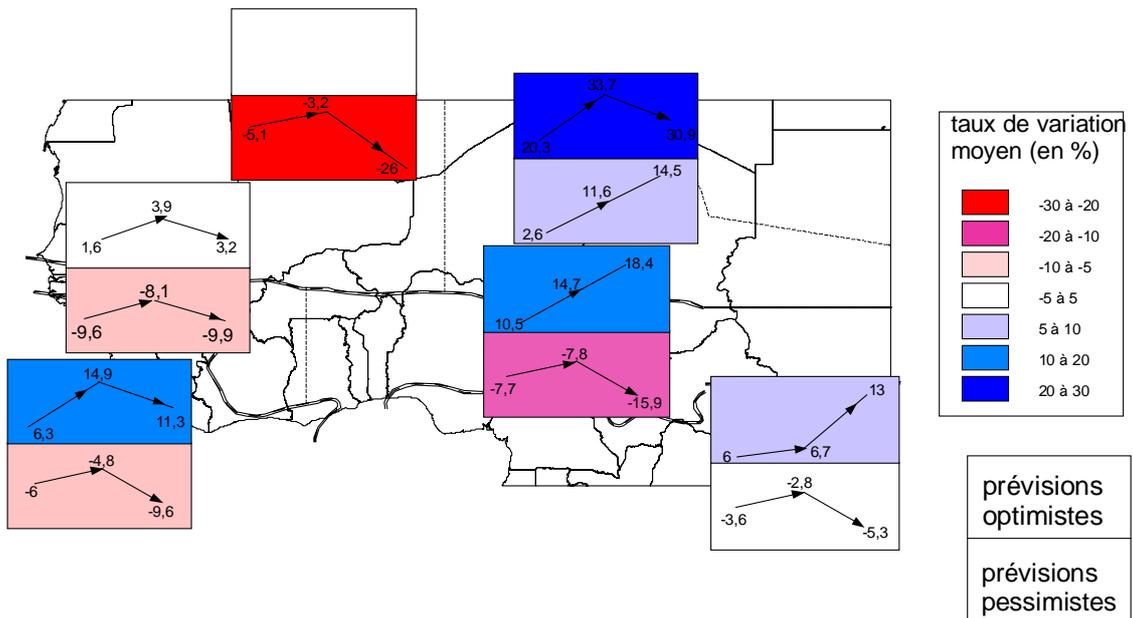


Figure 4.27 – Prévisions des précipitations les plus optimistes et les plus pessimistes

L'interprétation précédente montre que chaque modèle climatique donne des prévisions différentes et qu'il est alors impossible de déterminer une prévision commune à tous. Il serait intéressant de rechercher dans quel but chaque modèle a été créé afin de déterminer quels facteurs, pris en compte ou pas suivant le modèle climatique, peuvent expliquer de telles différences entre eux.

### 3. Les différences de prévisions avec le scénario Horizon

La figure 4.28 résume les prévisions de précipitations obtenues à chaque horizon en chaque zone avec le scénario Horizon.

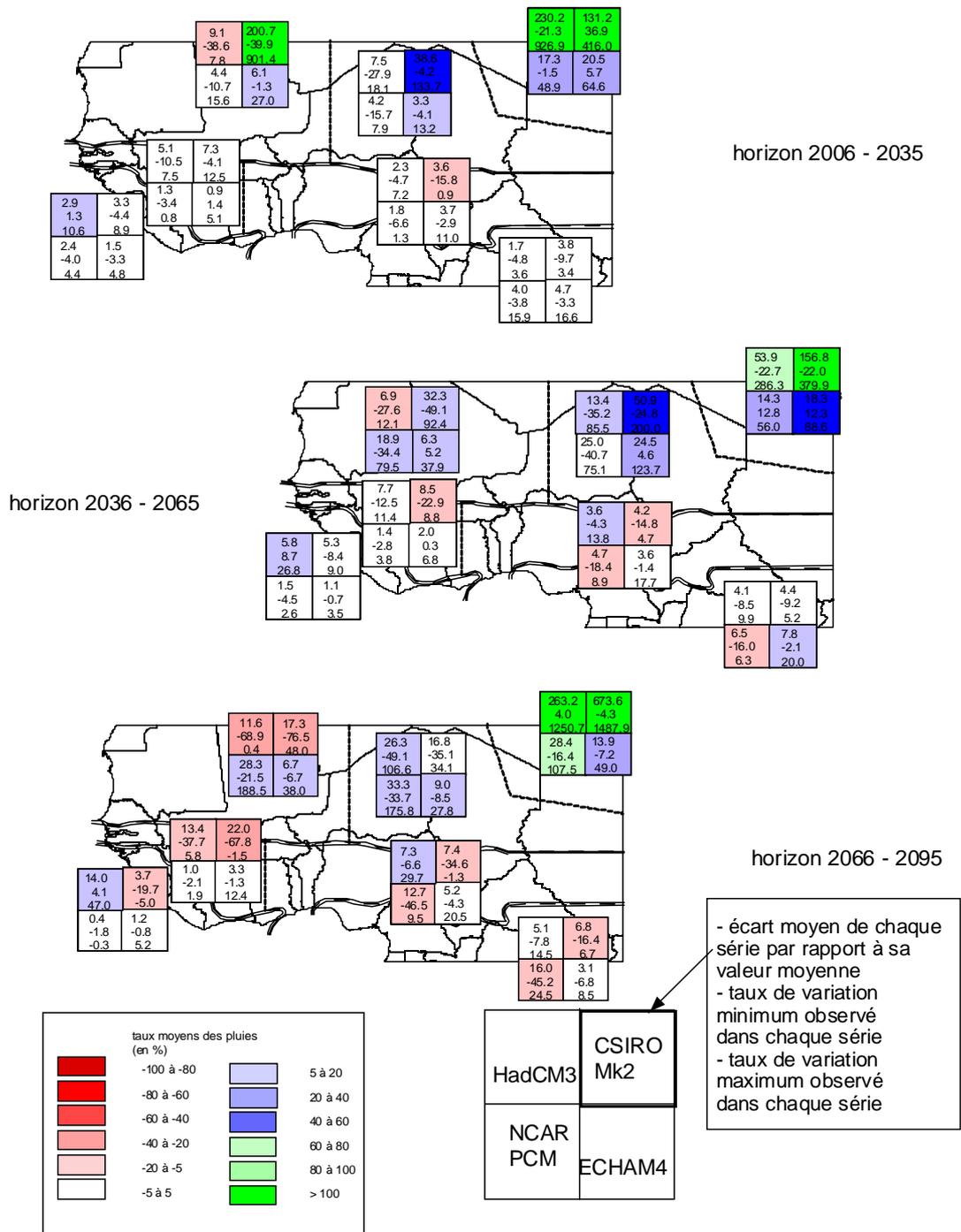


Figure 4.28 – Résumé des taux moyens de variation des précipitations par zone par rapport à la période de référence de chaque modèle avec le scénario Horizon

a. HadCM3

i. Différences de prévisions suivant le scénario

Les prévisions obtenues avec le modèle climatique HadCM3 et le scénario Horizon sont similaires à celles obtenues précédemment avec le scénario Anomalie. En effet, on observe toujours la distinction de comportement Nord Ouest et Sud Est et les taux de variation sont généralement de même ordre de grandeur (tableau 4.13).

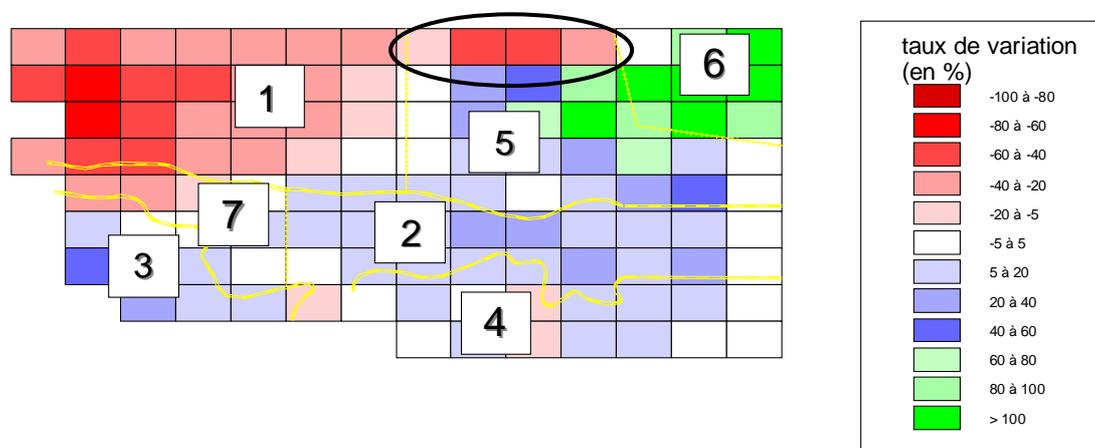
La seule différence importante à noter est en zone 1 car la tendance à la diminution est plus marquée avec des taux de variation significativement négatifs dès le premier horizon et un taux plus bas de 8,6% en 2080.

**Tableau 4.13 – Taux de variation des précipitations annuelles par horizon et par zone pour le modèle climatique HadCM3 avec les scénarii Anomalie (colonne blanche) et Horizon (colonne grise)**

	Zone 1		Zone 2		Zone 3		Zone 4		Zone 5		Zone 7	
2020	-5,1	-6,8	3,1	2,3	6,3	5,5	-1,1	-0,5	2,6	0,8	1,6	0,4
2050	-3,2	-7,9	9,0	7,2	14,9	16,1	2,9	2,9	11,6	8,0	3,9	2,7
2080	-26,0	-34,6	13,9	12,1	11,3	17,6	7,0	4,3	14,5	17,0	-7,3	-11,4

ii. Représentativité des taux de variation moyens

L'étude de la représentativité des taux de variation moyens amène à noter une différence en zone 5 : les intervalles de cette zone sont plus étendus avec le scénario Horizon. L'horizon 2080 est le plus problématique, avec des cellules à taux de variation fortement opposés. Seulement 15% des cellules présentent une diminution des précipitations en 2080 mais leurs taux vont jusqu'à -49,1% et les cellules présentant une augmentation ont des taux allant jusqu'à 106,6% (figure 4.29). Dans ce cas, le taux de variation moyen, de 17%, n'est pas représentatif du comportement de cette zone mais seulement de la compensation des différents taux de variation.



**Figure 4.29 – Taux de variation des précipitations annuelles avec HadCM3 à l'horizon 2080**

Le modèle climatique HadCM3, avec le scénario de correction Horizon, a alors les mêmes prévisions qu'avec le scénario Anomalie ; les seules différences sont une diminution plus forte des précipitations en zone 1 et des problèmes de représentation en zone 5.

## b. CSIRO\_Mk2

### i. Différences de prévisions suivant le scénario

Les prévisions avec le modèle climatique CSIRO\_Mk2 et le scénario Horizon diffèrent de celles avec le scénario Anomalie en zones 1, 5 et 7 (tableau 4.14).

En zone 1 et 5, les prévisions aux horizons 2020 et 2050 sont marquées par une augmentation significative des précipitations alors que cette tendance était moins nette avec le scénario Anomalie. En 2080, les comportements sont les mêmes qu'avec Anomalie mais de manière plus ou moins marquée :

- zone 1 : diminution des précipitations plus nette avec le scénario Horizon qui atteint un taux de variation de 17,2% plus faible qu'Anomalie
- zone 5 : diminution moins marquée qu'Anomalie avec un taux de variation correspondant à une faible évolution

En zone 7, la différence entre les deux prévisions est importante en 2080, avec une diminution plus marquée en utilisant le scénario Horizon, qui prévoit une diminution de 15,1% plus basse qu'Anomalie.

**Tableau 4.14 – Taux de variation des précipitations annuelles par horizon et par zone pour le modèle climatique CSIRO\_Mk2 avec les scénarii Anomalie (colonne blanche) et Horizon (colonne grise)**

	Zone 1		Zone 5		Zone 7		Zone 2		Zone 3		Zone 4	
2020	9,2	122,1	0,9	40,3	-1,5	4,3	-4,8	-5,5	0,9	0,6	-1,5	-3,9
2050	-2,6	7,7	7,4	41,6	-3,5	-8,1	-6,8	-5,5	-2,3	-2,6	-0,4	-2,9
2080	-10,6	-27,8	-7,2	-2,9	-8,7	-23,8	-15,9	-16,1	-9,6	-11,5	-5,3	-7,0

### ii. Représentativité des taux de variation moyens

D'après les intervalles de chaque zone, la représentativité doit être étudiée plus en détails pour les zones 1 et 5.

La zone 1 présente les mêmes problèmes de représentativité qu'avec le scénario Anomalie. En effet, en 2020, seulement 30,8% des cellules prévoient une augmentation significative des précipitations (figure 4.30) alors que le taux de variation moyen est de 122,1%. En 2050, la même proportion de cellules (46,1%) présente une augmentation et une diminution des précipitations (figure 4.31). Dans le premier cas, les cellules présentent des taux incohérents, jusqu'à 901,4%, et dans le deuxième cas, il est impossible de dégager une tendance générale de cette zone. La zone 1 est alors difficilement représentable par un taux de variation moyen

pour les horizons 2020 et 2050. Par contre, la tendance à la diminution des précipitations en 2080 est clairement représentative du comportement des cellules (figure 4.32). La zone 5 présente un problème de représentation à l'horizon 2080 avec 44,4% des cellules prévoyant une augmentation significative des précipitations et 55,5% une diminution (figure 32). Les autres horizons présentent clairement une tendance à l'augmentation des précipitations.

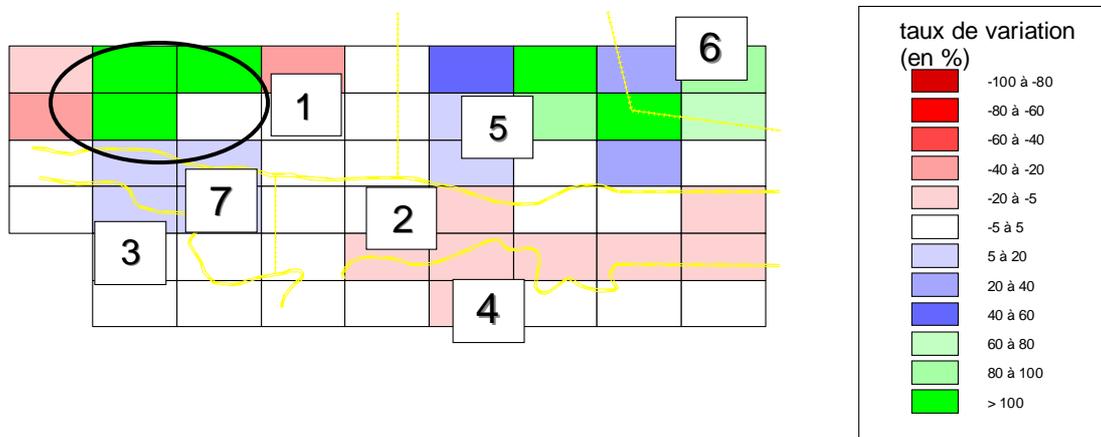


Figure 4.30 – Taux de variation des précipitations annuelles avec CSIRO\_Mk2 à l'horizon 2020

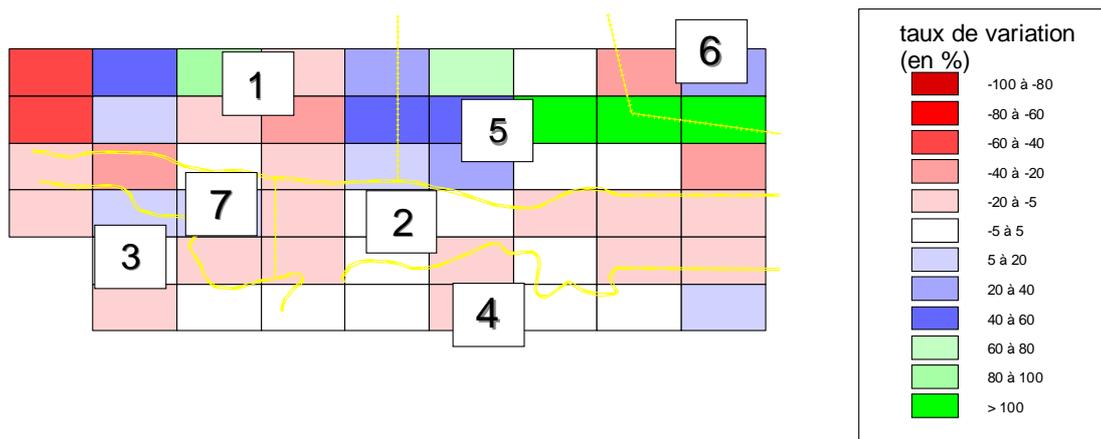


Figure 4.31 – Taux de variation des précipitations annuelles avec CSIRO\_Mk2 à l'horizon 2050

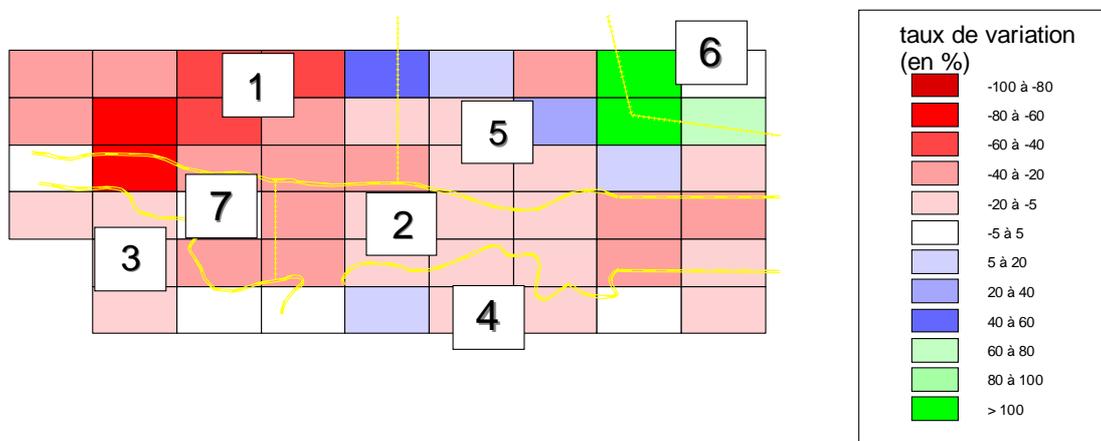


Figure 4.32 – Taux de variation des précipitations annuelles avec CSIRO\_Mk2 à l'horizon 2080

Les prévisions obtenues avec le scénario Horizon sont semblables à celles du scénario Anomalie avec des comportements plus marqués en zones 1, 5 et 7. Comme pour Anomalie, les problèmes de représentativité sont présents en zones 1 et 5.

### c. NCAR\_PCM

La tendance générale à la diminution des précipitations observées avec le scénario Anomalie n'est plus aussi nette avec Horizon. En effet, on observe ici six taux de variation moyens négatifs alors qu'il n'y en avait qu'un seul avec les prévisions précédentes, toutes zones confondues (tableau 4.15).

Les différences entre les deux types de prévisions étant importantes, il est nécessaire d'effectuer une étude complète des résultats obtenus avec le scénario Horizon.

**Tableau 4.15 – Taux de variation des précipitations annuelles par horizon et par zone pour le modèle climatique NCAR\_PCM avec les scénarii Anomalie (colonne blanche) et Horizon (colonne grise)**

	Zone 1		Zone 2		Zone 3		Zone 4		Zone 5		Zone 7	
2020	-3,2	-1,6	-7,7	-1,7	-6,0	-0,9	-3,6	<b>1,4</b>	-3,3	-4,2	-9,6	-1,3
2050	-0,1	<b>13,2</b>	-7,8	-10,6	-4,8	-0,7	-2,8	-8,1	-2,3	<b>2,8</b>	-8,1	<b>1,5</b>
2080	<b>0,5</b>	<b>15,0</b>	-8,4	-7,3	-4,5	-1,0	-3,9	-18,3	-6,7	<b>12,6</b>	-9,9	-0,1

#### i. Au Nord de l'isohyète 700mm

Pour les zones 1 et 5, les taux de variation moyens, faiblement négatifs au départ, deviennent, au cours du XXIème siècle, significativement positifs en atteignant 15% pour la zone 1 et 12,6% pour la zone 5. Cette évolution se fait par une forte augmentation du taux moyen de 2020 à 2050 pour la zone 1 et de 2050 à 2080 pour la zone 5 avec des variations de respectivement 14,8% et 15,4%.

Contrairement aux prévisions d'Anomalie, on a ici une tendance à l'augmentation des précipitations.

#### ii. Au Sud de l'isohyète 700mm

Cette partie de la fenêtre présente une tendance générale à la diminution des précipitations, comme pour le scénario Anomalie, avec seulement deux taux de variation moyens positifs. Par contre, l'importance de cette diminution et son évolution suivant les zones ne sont pas les mêmes que précédemment.

La diminution observée est plus ou moins significative suivant une séparation Sud Est – Sud Ouest :

- zones 2 et 4 : les taux de variation moyens sont d'abord faibles, puis significativement négatifs aux horizons 2050 et 2080

- zones 3 et 7 : les taux de variation moyens sont toujours faiblement négatifs, excepté en 2050 pour la zone 7 (alors faiblement positif)

L'évolution des taux de variation moyens diffère aussi :

- zone 2 : diminution forte puis augmentation du taux moyen
- zone 4 : diminution progressive
- zone 3 et 5 : augmentation puis diminution avec des variations faibles, ne dépassant pas 1,6%

### iii. Représentativité des taux moyens de variation

D'après les intervalles des taux de chaque zone, la représentativité du taux moyen de variation est à étudier particulièrement pour les zones 1 et 5 aux horizons 2050 et 2080 et pour la zone 4 à l'horizon 2080.

En 2080, l'intervalle de la zone 4 s'étend jusqu'à 24,5% alors que son taux de variation moyen présente une diminution significative des précipitations. Ces taux de variation positif, correspondant à 12,5% des cellules de la zone (figure 4.34), ne remettent pas en cause la représentativité du taux moyen.

Pour la zone 1, les intervalles débutent à -34,4% en 2050 et -21,5% en 2080 alors que les taux de variation moyens à ces horizons correspondent à une augmentation significative des précipitations. Les proportions de cellules présentant une diminution des précipitations sont de 11,1% en 2050 (figure 4.33) et de 14,8% en 2080 (figure 4.34) ; la tendance générale de cette zone est alors bien à l'augmentation des précipitations.

La zone 5 est plus problématique avec, à l'horizon 2050, 30,8% des cellules présentant une augmentation significative des précipitations et 42,3% une diminution significative (figure 4.33). A l'horizon 2080, 46,1% des cellules prévoient une augmentation significative des précipitations et 38,5% une diminution significative. Il est alors difficile, pour ces deux horizons, de déterminer une tendance générale et donc d'avoir un taux moyen de variation représentatif.

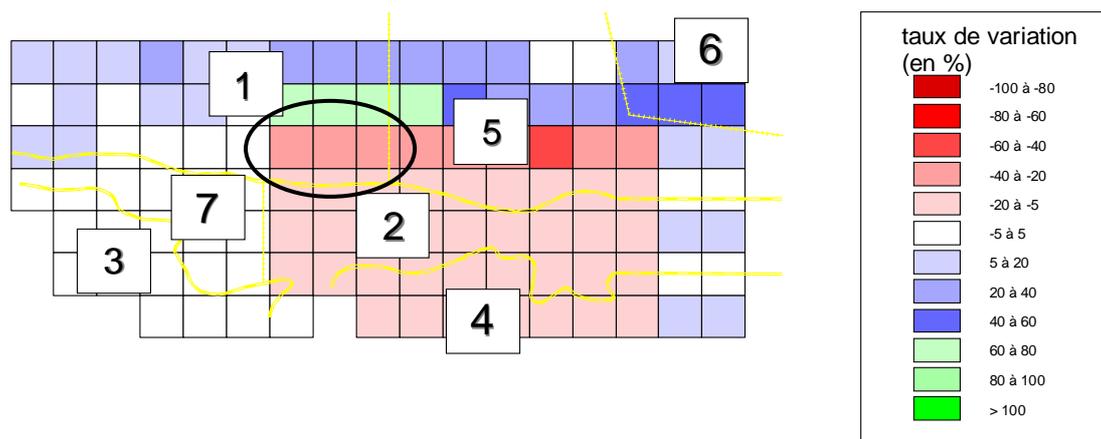


Figure 4.33 – Taux de variation des précipitations annuelles avec NCAR\_PCM à l'horizon 2050

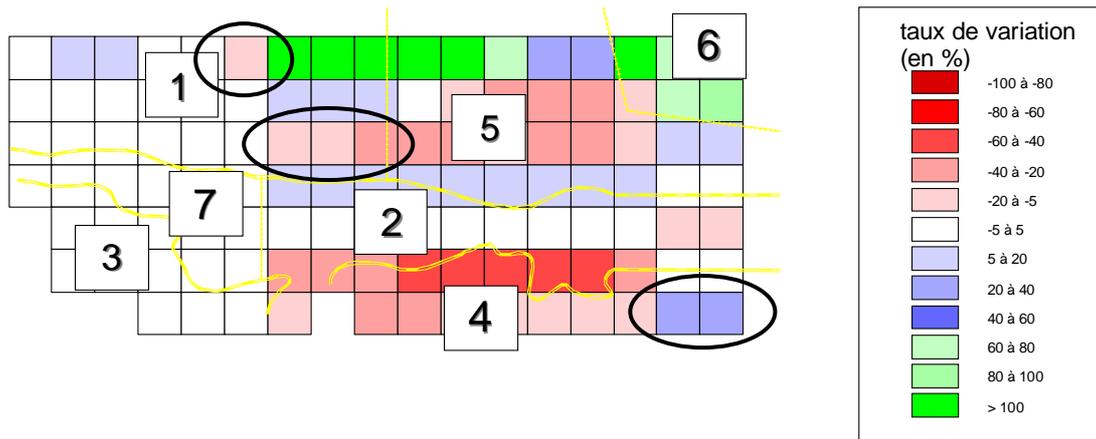


Figure 4.34 – Taux de variation des précipitations annuelles avec NCAR\_PCM à l'horizon 2080

Ainsi, la diminution générale des précipitations, prévue avec le scénario Anomalie, est ici remise en question avec, pour la partie Nord de la fenêtre, une augmentation et pour la partie Sud, un comportement différent (diminution des précipitations plus marquée au Sud Est). La validation de la représentation par taux de variation moyen est ici moins problématique avec des problèmes pour la zone 5 seulement.

#### d. ECHAM4

L'allure globale des prévisions est similaire pour les deux scénarii. En effet, dans chaque cas, on observe que tous les taux de variation moyens sont positifs, excepté en zone 3 (tableau 4.16).

Cela dit, on note des différences de comportements par rapport au scénario Anomalie au niveau des augmentations plus ou moins significatives et des évolutions des taux moyens.

Tableau 4.16 – Taux de variation moyens des précipitations annuelles par zone et par horizon pour ECHAM4 avec les scénarii Anomalie (colonne blanche) et Horizon (colonne grise)

	Zone 1		Zone 2		Zone 3		Zone 4		Zone 5		Zone 7	
2020	6,1	9,3	10,5	4,4	0,9	<b>-0,5</b>	6,0	3,2	20,3	6,0	1,3	2,9
2050	9,8	13,8	14,7	3,0	<b>-2,1</b>	1,4	6,7	8,1	33,7	30,2	3,2	3,3
2080	4,3	17,6	18,4	4,2	1,8	0,9	13,0	0,1	30,9	15,6	3,2	4,8

#### i. Importance de l'augmentation des précipitations suivant les zones

Avec le scénario Anomalie, on a obtenu des prévisions d'augmentation significative des précipitations, excepté dans la partie Sud Est de la fenêtre. Ici, on observe une distinction entre les parties au Nord et Sud de l'isohyète 700mm :

- zones 1 et 5 : augmentation des précipitations significative avec des taux moyens supérieurs à 6% et allant jusqu'à 17,6% en zone 1 et 15,6% en zone 5
- zone 4 : comportement mitigé avec un taux de variation moyen significativement positif en 2050
- zones 2, 3 et 7 : augmentation faible des précipitations avec des taux moyens ne dépassant pas 4,8%

#### ii. Evolution des taux de variation moyens

L'évolution des taux de variation moyens est différente de celle observée avec le scénario Anomalie. Avec ce dernier, on observait des évolutions distinctes pour les parties Nord, Sud Est et Sud Ouest de la fenêtre d'étude. L'évolution des taux moyens avec le scénario Horizon est la suivante :

- zones 1, 4 et 5 : augmentation puis diminution des taux moyens
- zones 2, 3 et 7 : variations faibles entre les horizons, ne dépassant pas 1,9%
  - o zone 2 : diminution puis augmentation
  - o zone 3 : augmentation puis diminution
  - o zone 7 : augmentation progressive

#### iii. Représentativité des taux moyens

Contrairement aux observations sur les prévisions Anomalie, les zones 1 et 3 ne posent pas de problèmes de représentation. En effet, les cellules de la zone 1 ont des taux de variation toujours supérieurs à -6,7%, avec des taux moyens significativement positifs, et les intervalles de la zone 3 correspondent bien à des taux de variation de faible évolution, comme ses taux moyens.

Par contre, il faut étudier plus particulièrement les zones 2, 4 et 7 qui ont des intervalles allant jusqu'à 20,5%, 16,6% et 12,4% alors que leurs taux de variation moyens sont représentatifs de faible évolution.

Pour la zone 2, à tous les horizons, la borne supérieure de l'intervalle correspond à une augmentation significative des précipitations, de 11% à 20,5%. En 2020, le taux de variation moyen est représentatif du comportement de la majorité des cellules car 60% de celles-ci prévoient une faible évolution alors que seulement 40% prévoient une augmentation significative (figure 4.35). Il en est de même en 2080, avec 65% des cellules présentant une faible évolution et 35% une augmentation significative (figure 4.36). A l'horizon 2050, la tendance aux faibles variations est plus nette avec 80% des cellules ayant ce comportement. Les prévisions de cette zone peuvent alors être représentées par les taux moyens.

Pour la zone 4, la borne supérieure de l'intervalle, à l'horizon 2020, est de 16,6% alors que son taux de variation moyen est de 3,2%. Ces valeurs significativement positives sont dues à 31,25% des cellules de la zone (figure 4.35) ; étant donnée que 68,75% des cellules présentent des faibles variations des précipitations, le taux de variation moyen est bien représentatif du comportement de cette zone. Les intervalles aux deux autres horizons sont cohérents avec les taux moyens.

Le dernier intervalle à remarquer est celui de la zone 7 à l'horizon 2080. Celui-ci va jusqu'à 12,4% alors que le taux de variation moyen est de 4,8%. La proportion de cellules prévoyant une augmentation significative des précipitations est de 60% (figure 4.37); la représentativité du taux moyen de variation est alors remise en cause.

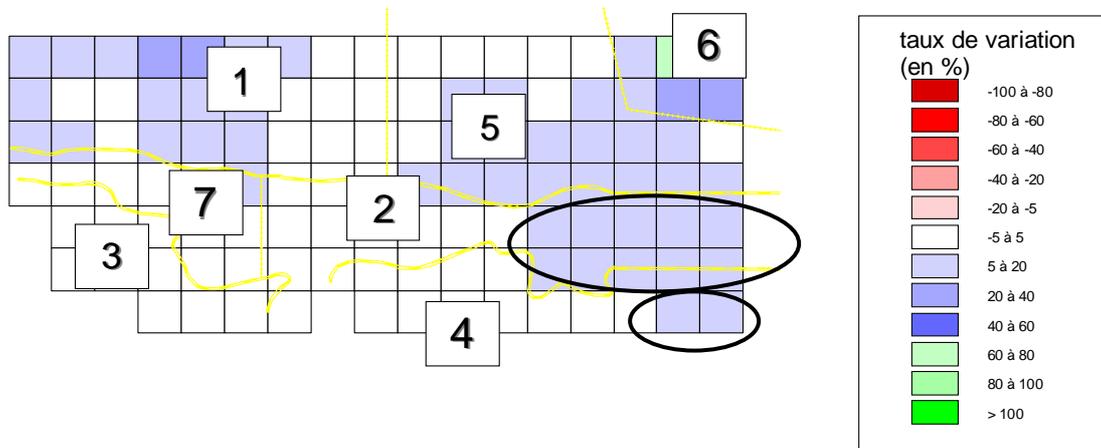


Figure 4.35 – Taux de variation des précipitations annuelles avec ECHAM4 à l'horizon 2020

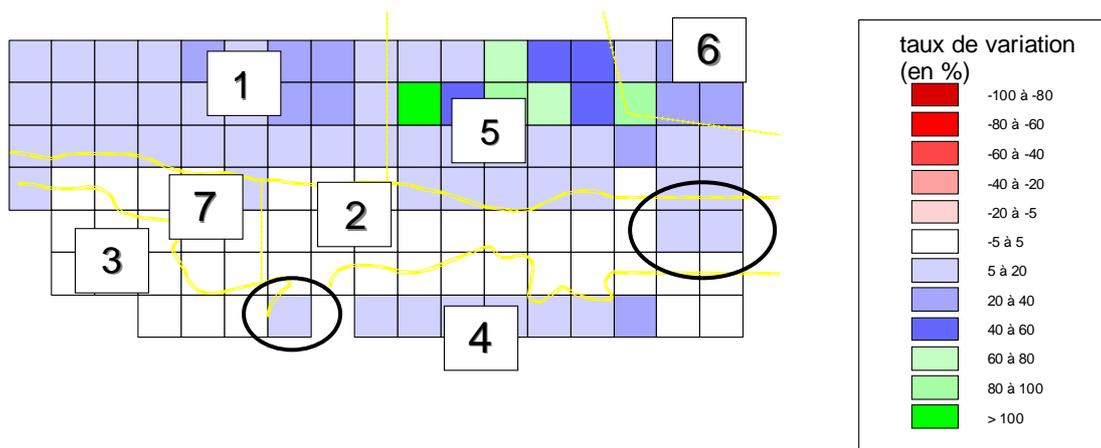


Figure 4.36 – Taux de variation des précipitations annuelles avec ECHAM4 à l'horizon 2050

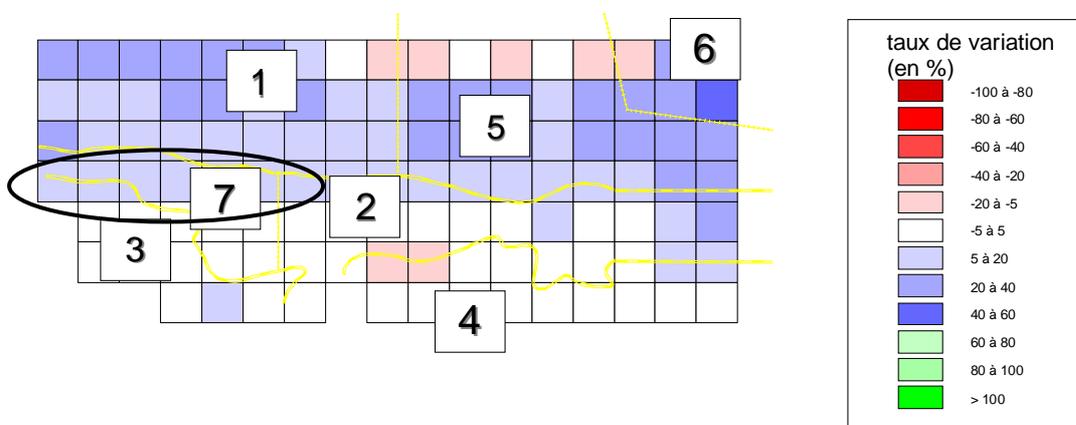


Figure 4.37 – Taux de variation des précipitations annuelles avec ECHAM4 à l'horizon 2080

Les prévisions du modèle climatique ECHAM4 ne diffèrent pas beaucoup d'un scénario de correction à l'autre. La tendance globale à l'augmentation est conservée même si l'on observe quelques différences de comportement d'une zone à l'autre. La représentation est ici problématique seulement pour la zone 7 alors qu'elle ne l'était que pour les zones 1 et 3 avec le scénario Anomalie.

e. Comparaisons inter modèles climatiques

Comme pour le scénario Anomalie, tous les modèles climatiques acceptent la représentation par taux de variation moyen par zone pour la partie Sud de la fenêtre, excepté ECHAM4 pour la zone 7. Pour la partie Nord, la représentation en zone 1 n'est pas acceptable pour CSIRO\_Mk2, et en zone 5, seul le modèle climatique ECHAM4 est utilisable.

i. Les différences par rapport à Anomalie

- Evolution des prévisions avec HadCM3 – ECHAM4 :

Contrairement aux observations faites avec Anomalie, le scénario Horizon donne des prévisions qui évoluent différemment pour les modèles climatiques HadCM3 et ECHAM4 (figure 4.38).

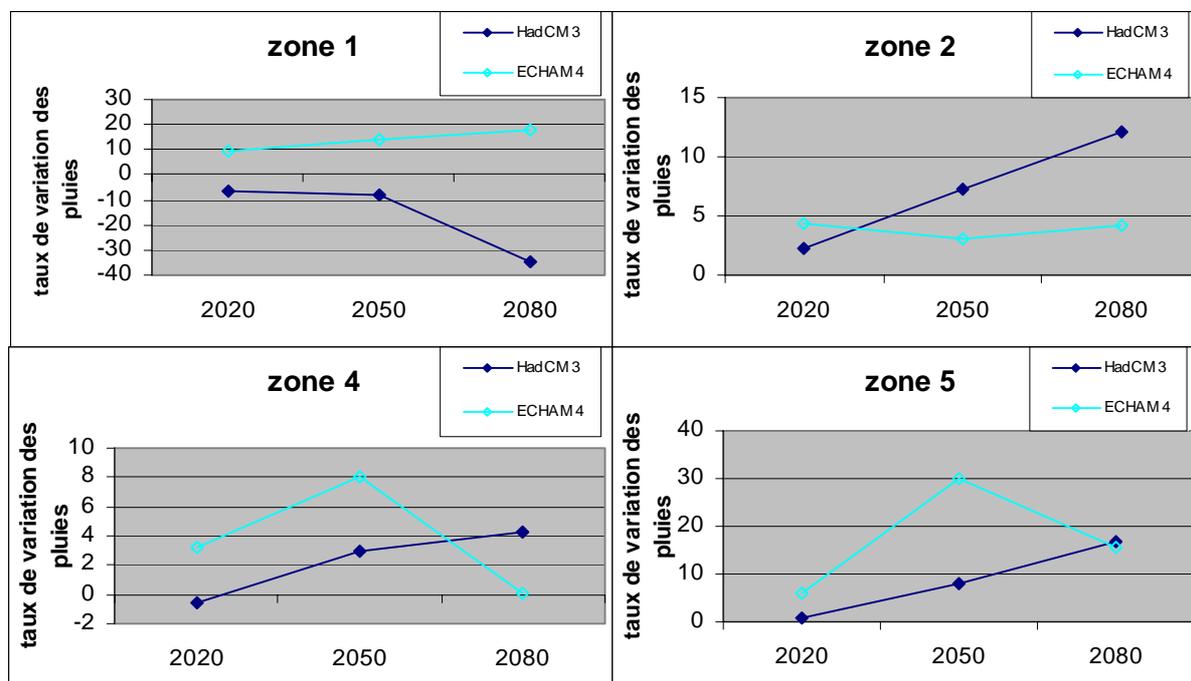


Figure 4.38 – Evolution des taux de variation moyens par zone pour HadCM3 et ECHAM4

- Ordre de grandeur avec CSIRO\_Mk2 – NCAR\_PCM :

Etant donnée que les prévisions avec le modèle climatique NCAR\_PCM sont différentes suivant le scénario appliqué, on ne retrouve pas les similitudes observées entre CSIRO\_Mk2 et NCAR\_PCM avec le scénario Anomalie. En effet, l'écart entre les taux moyens de ces deux modèles va maintenant jusqu'à 23,7%, pour la zone 7 en 2080 (tableau 4.17).

**Tableau 4.17 – Taux de variation moyens des précipitations avec CSIRO\_Mk2 (colonne blanche) et NCAR\_PCM (colonnes grise) avec le scénario Horizon**

	Zone 2		Zone 3		Zone 4		Zone 7	
2020	-5,5	-1,7	0,6	-0,9	-3,9	1,4	4,3	-1,3
2050	-5,5	-10,6	-2,6	-0,7	-2,9	-8,1	-8,1	1,5
2080	-16,1	-7,3	-11,5	-1,0	-7,0	-18,3	-23,8	-0,1

- Stabilité de NCAR\_PCM et ECHAM4 :

La stabilité des modèles climatiques NCAR\_PCM et ECHAM4, mise en évidence précédemment, n'a plus lieu d'être ici. En effet, les variations entre horizon vont jusqu'à 14,8% pour NCAR\_PCM et 14,6% pour ECHAM4 (tableau 4.18).

**Tableau 4.18 – Taux de variation moyens des précipitations avec NCAR\_PCM (colonne blanche) et ECHAM4 (colonne grise)**

	Zone 1		Zone 2		Zone 3		Zone 4		Zone 5		Zone 7	
2020	-1,6	9,3	-1,7	4,4	-0,9	-0,5	1,4	3,2	-4,2	6,0	-1,3	2,9
2050	13,2	13,8	-10,6	3,0	-0,7	1,4	-8,1	8,1	2,8	30,2	1,5	3,3
2080	15,0	17,6	-7,3	4,2	-1,0	0,9	-18,3	0,1	12,6	15,6	-0,1	4,8

Ainsi, les points communs entre les modèles climatiques observés pour le scénario Anomalie ne sont plus présents en utilisant Horizon.

ii. Comparaisons propres au scénario Horizon

- Ordre de grandeur avec NCAR\_PCM – ECHAM4 :

Sur la partie Ouest de la fenêtre d'étude (zones 1, 3 et 7), les prévisions d'évolution des précipitations sont du même ordre de grandeur, excepté en zone 1 à l'horizon 2020 (tableau 4.19). Sans cette exception, l'écart maximum observé entre les taux moyens des deux modèles climatiques est de 4,9%.

**Tableau 4.19 – Taux de variation moyens des précipitations avec NCAR\_PCM (colonne blanche) et ECHAM4 (colonne grise)**

	Zone 1		Zone 3		Zone 7	
2020	-1,6	9,3	-0,9	-0,5	-1,3	2,9
2050	13,2	13,8	-0,7	1,4	1,5	3,3
2080	15,0	17,6	-1,0	0,9	-0,1	4,8

- Tendance de CSIRO\_Mk2 – NCAR\_PCM :

Pour les zones 2, 3 et 4, les modèles climatiques CSIRO\_Mk2 et NCAR\_PCM, avec le scénario Horizon, ont des taux qui, même s'ils ne sont pas du même ordre de grandeur, présentent les mêmes tendances d'évolution. En effet, on observe, pour ces trois zones, des taux de variation négatifs, excepté en zone 3 pour CSIRO\_Mk2 et en zone 4 pour NCAR\_PCM en 2020 (tableau 4.20).

**Tableau 4.20 – Taux de variation moyens des précipitations avec CSIRO\_Mk2 (colonne blanche) et NCAR\_PCM (colonne grise)**

	Zone 2		Zone 3		Zone 4	
2020	-5,5	-1,7	0,6	-0,9	-3,9	1,4
2050	-5,5	-10,6	-2,6	-0,7	-2,9	-8,1
2080	-16,1	-7,3	-11,5	-1,0	-7,0	-18,3

- Tendance de HadCM3 – ECHAM4 :

A l’Est et au Sud Ouest de la fenêtre d’étude (zones 2, 3, 4 et 5), la tendance des prévisions, avec les modèles climatiques HadCM3 et ECHAM4, est à l’augmentation des précipitations mais dans des proportions différentes. En effet, les taux de variation sont positifs, excepté en zone 3 pour HadCM3 et en zone 4 pour ECHAM4 en 2020 (tableau 4.21).

**Tableau 4.21 – Taux de variation moyens des précipitations avec HadCM3 (colonne blanche) et ECHAM4 (colonne grise)**

	Zone 2		Zone 3		Zone 4		Zone 5	
2020	2,3	4,4	5,5	-0,5	-0,5	3,2	0,8	6,0
2050	7,2	3,0	16,1	1,4	2,9	8,1	8,0	30,2
2080	12,1	4,2	17,6	0,9	4,3	0,1	17,0	15,6

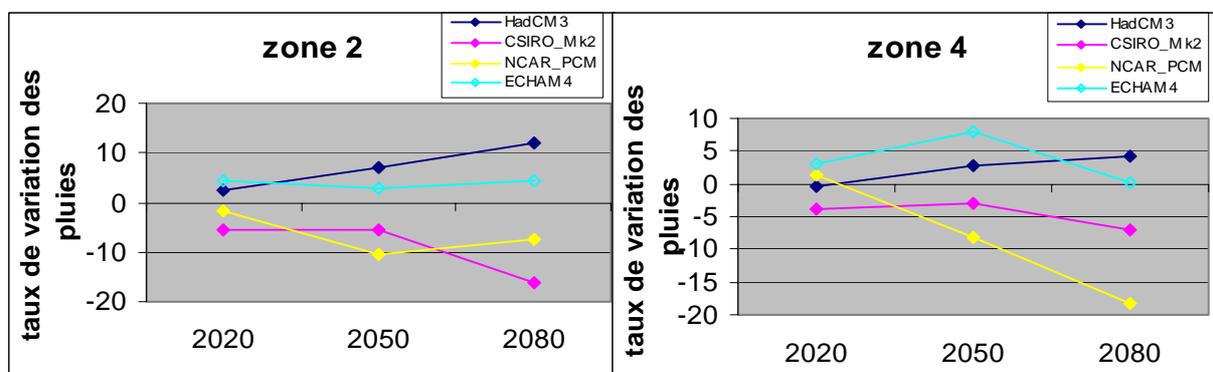
f. Conclusions sur les prévisions possibles

Le type de représentation choisi est acceptable pour les zones 1, 2, 3, 4 et 7, excepté pour la zone 1 avec CSIRO\_Mk2 et pour la zone 7 avec ECHAM4. Pour la zone 5, seules les prévisions de ECHAM4 seront prises en compte.

i. Au Sud Est de la fenêtre d’étude

Comme nous l’avons observé avec le scénario Anomalie, pour les zones 2 et 4, on peut distinguer deux types de prévisions (figure 4.39) :

- HadCM3 – ECHAM4 : les taux de variation moyens sont positifs (ou proche de zéro pour HadCM3 en zone 4 en 2020)
- CSIRO\_Mk2 – NCAR\_PCM : les taux de variation moyens sont négatifs (ou proche de zéro pour NCAR\_PCM en zone 4 en 2020)



**Figure 4.39 – Taux de variation moyens des précipitations au Sud Est**

ii. A l'Ouest de la fenêtre d'étude

Pour les zones 1, 3 et 7, les prévisions de NCAR\_PCM et ECHAM4 s'accordent, avec des taux de variation moyens proches. En chaque zone, les prévisions sont les suivantes (figure 4.40):

- zone 1 :
  - o NCAR\_PCM – ECHAM4 : augmentation significative à partir de 2050 jusqu'à 15% et 17,6% en 2080
  - o HadCM3 – CSIRO\_Mk2 : évolution différente des deux modèles pour atteindre, en 2080, des taux moyens significativement négatifs, -34,6% et -27,8% (en notant que la représentation de CSIRO\_Mk2 pour cette zone n'est acceptable qu'en 2080)

Pour la partie Sud Ouest de la fenêtre (zones 3 et 7), les modèles climatiques NCAR\_PCM et ECHAM4 prévoient une évolution faible des précipitations par rapport à la période de référence avec des taux de variation moyens compris entre -1,3% et 4,8%. Par contre, les modèles climatiques HadCM3 et CSIRO\_Mk2 ont des prévisions différentes :

- zone 3 : augmentation significative des précipitations pour le premier, jusqu'à 17,6%, et diminution significative pour le second, jusqu'à -11,5%
- zone 7 : évolution différente de 2020 à 2050, mais qui amène, dans les deux cas, à une diminution significative des précipitations avec des taux de variation moyens allant jusqu'à -11,4% pour HadCM3 et -23,8% pour CSIRO\_Mk2

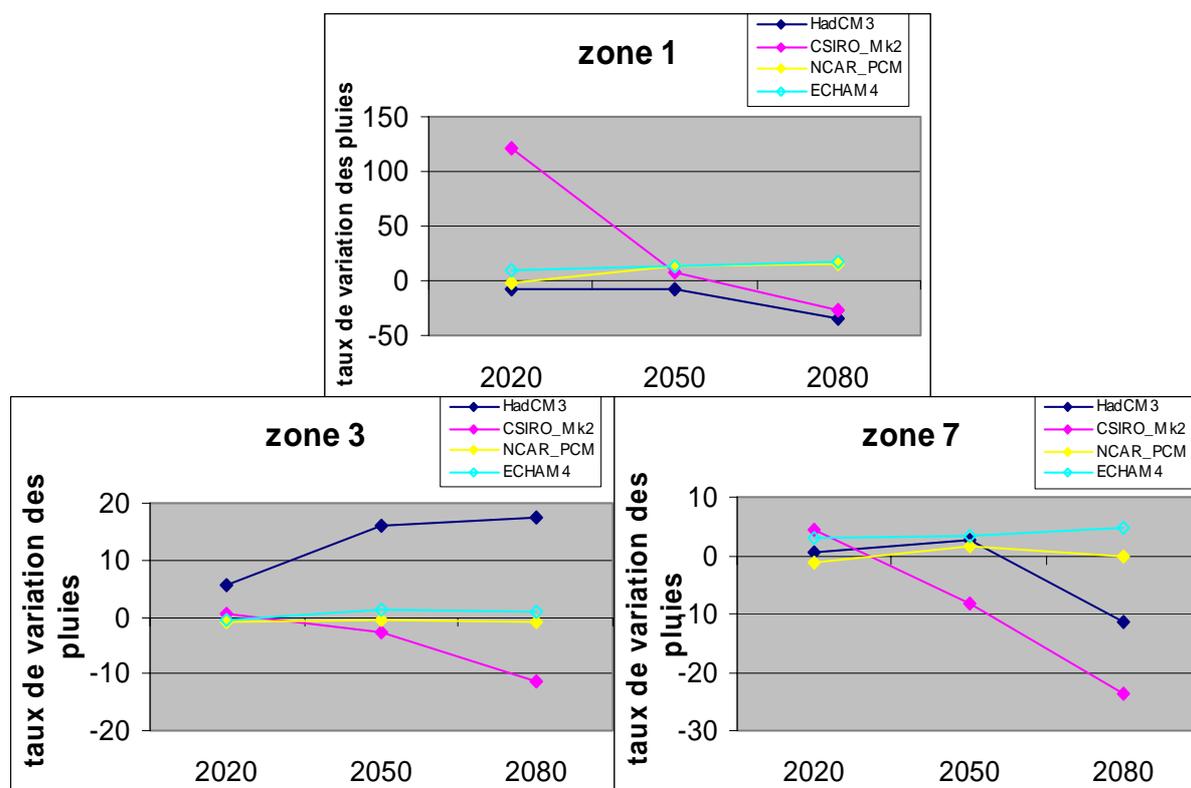


Figure 4.40 – Taux de variation moyens des précipitations au Sud Ouest

iii. Au Nord Est de la fenêtre d'étude

Les prévisions de cette zone doivent être considérées avec précaution car elles ne représentent que celles d'un seul modèle climatique. Ainsi, on aurait une augmentation des précipitations par rapport à la période de référence 1990 – 1998, à tous les horizons, allant jusqu'à 30,2% en 2050 (figure 4.41).

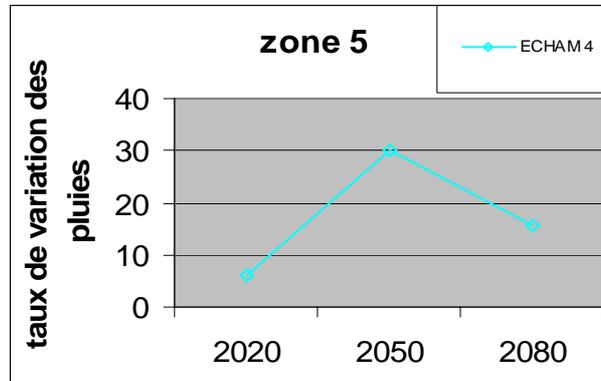


Figure 4.41 – Taux de variation moyens des précipitations au Nord Est

iv. Cartes synthétiques des prévisions

La figure 4.42 permet de résumer les prévisions des différents modèles climatiques utilisés pour lesquels la représentation par taux de variation moyen est acceptable.

Au Sud Est de la fenêtre, on observe deux prévisions distinctes : une augmentation des précipitations pour les modèles climatiques HadCM3 et ECHAM4 et une diminution pour CSIRO\_Mk2 et NCAR\_PCM. Remarquons que ces tendances sont généralement plus marquées pour la zone 2.

Pour la zone 3, tous les types de comportements sont prédits. En effet, d'après NCAR\_PCM et ECHAM4, les précipitations au XXIème siècle seraient du même ordre de grandeur que celles sur la période de référence car les taux de variation moyens sont faibles. Avec HadCM3, on observerait une augmentation des précipitations, alors qu'avec CSIRO\_Mk2, ce serait une diminution. En zone 7, CSIRO\_Mk2 prévoit une diminution importante et progressive des précipitations et NCAR\_PCM une évolution faible. Les prévisions de HadCM3 se situent entre les deux avec, d'abord une stabilisation, puis une diminution des précipitations par rapport à la période de référence.

Pour la zone 1, une forte diminution des précipitations est prévue par HadCM3 alors que les modèles climatiques NCAR\_PCM et ECHAM4 s'accordent pour prédire une augmentation.

Enfin, en zone 5, seule la prévision suivant ECHAM4 est prise en compte ; celle-ci correspond à une augmentation importante des précipitations.

La figure 4.43 met en évidence les prévisions les plus optimistes et les plus pessimistes pour chaque zone.

Pour l'horizon 2020, les prévisions sont assez optimistes avec un taux de variation moyen toujours supérieur à -6,8%.

En 2050, le champ des prévisions s'élargit avec, pour toutes les zones excepté la zone 3, des taux moyens pessimistes autour de -8%.

Enfin, pour le dernier horizon, les prévisions les plus pessimistes sont inquiétantes car elles correspondent au minimum à une diminution des précipitations de -11,5% par rapport à la période de référence. Les zones 4 et 7 sont particulièrement préoccupantes car, même en considérant les prévisions les plus optimistes, les taux de variation sont généralement faibles. Pour les zones 1, 2 et 3, la considération des prévisions optimistes et pessimistes donne un éventail trop large de possibilités pour pouvoir conclure.

Dans l'ensemble, les prévisions obtenues avec le scénario Horizon sont de plus en plus inquiétantes au cours du XXIème siècle. Ainsi, même si les taux moyens prédits, au premier horizon, sont moins alarmants qu'avec Anomalie, la tendance s'inverse pour le dernier horizon.

En prenant en compte les deux types de prévisions (Anomalie et Horizon), il est difficile d'en tirer des conclusions car l'éventail des prévisions possibles est trop large, excepté pour la zone 7. En effet, quelque soit le scénario utilisé, les prévisions de précipitations sont inquiétantes car même les plus optimistes ne présentent pas de taux moyens supérieurs à 4,3%. Ces prévisions sont qualifiées d'inquiétantes puisqu'elles signifient que les précipitations auront un comportement proche de celui de la période de référence, correspondant à une période de sécheresse. De plus, les principaux fleuves de l'Afrique de l'Ouest, le Sénégal, le Gambie, le Niger, le Sassandra et le Bandama, prennent leur source en partie dans cette zone. Dans cette zone, la continuité de la sécheresse au cours du XXIème siècle aurait alors des conséquences inquiétantes sur l'hydrologie de ces grands fleuves dont dépendent fortement les populations. Les répercussions seraient alors alarmantes pour les populations de l'Ouest de l'Afrique

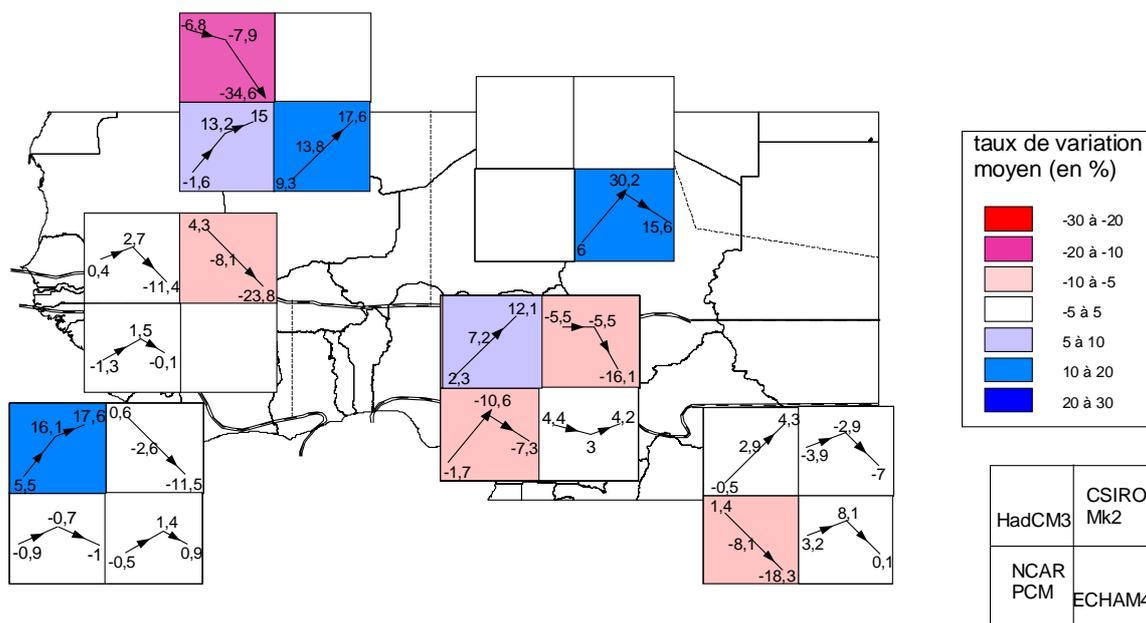


Figure 4.42 – Carte des prévisions des précipitations pour le XXIème siècle

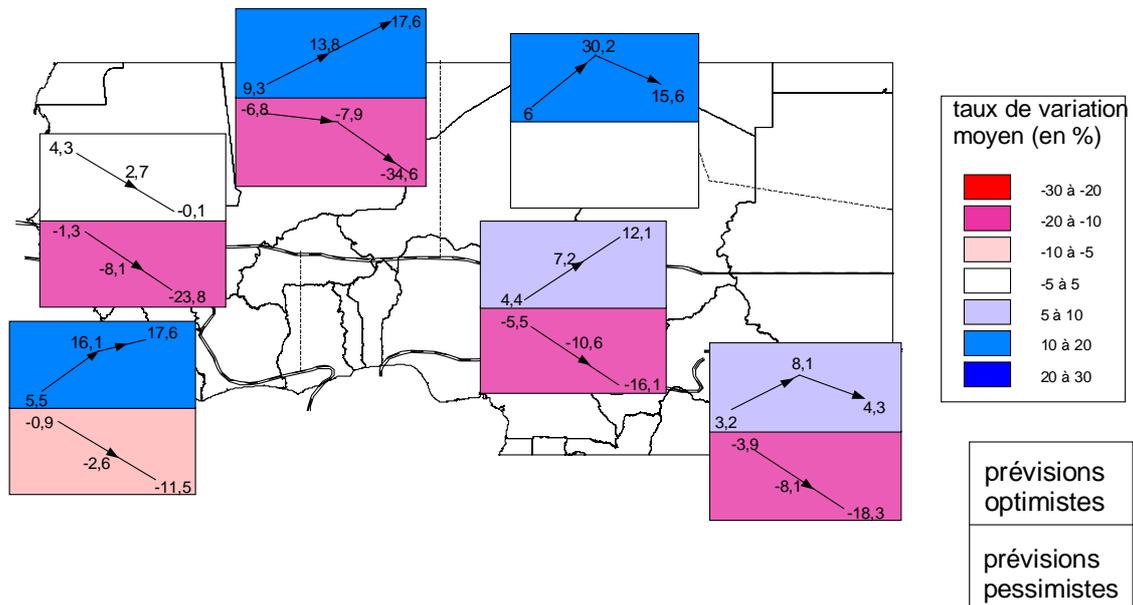


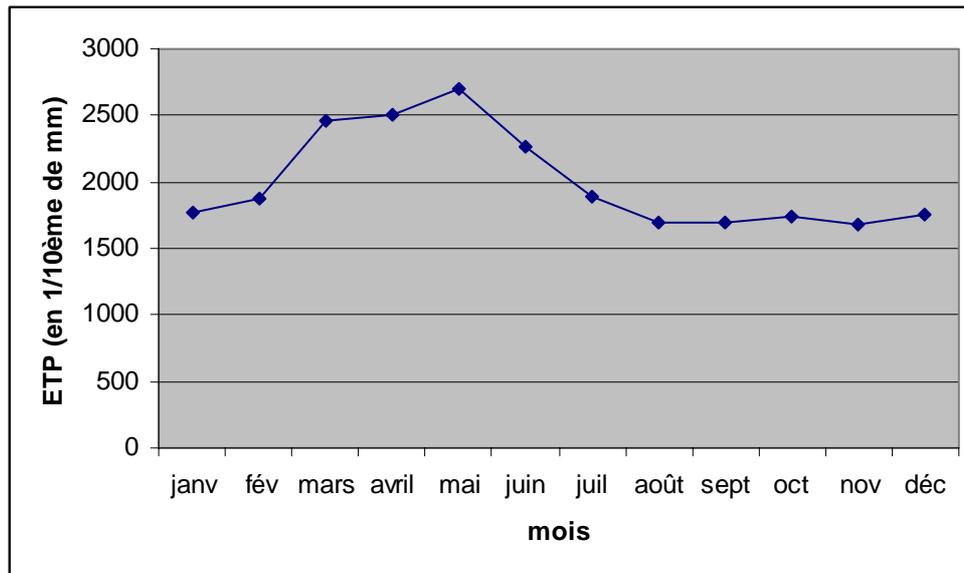
Figure 4.43 – Prévisions des précipitations les plus optimistes et les plus pessimistes

#### 4. Prévisions du comportement de l'évapotranspiration potentielle

La seconde donnée climatique nécessaire en modélisation hydrologique potentielle est l'ETP. Celle-ci est obtenue indirectement puisqu'elle dépend des prévisions de températures et de radiations prédites par les modèles climatiques.

L'ETP est calculée à l'aide de la formule de Penman (Penman, 1956) pour les données observées et de Turc (Turc, 1954) pour les prévisions, auxquelles sont appliquées les mêmes scénarii de correction (Anomalie et Horizon) qu'aux précipitations. Sur la fenêtre d'étude, les valeurs observées sont connues pour chaque cellule d'un demi degré et les valeurs prédites pour chaque cellule à l'échelle du modèle climatique utilisé.

Bien que cette donnée soit nécessaire au fonctionnement du modèle hydrologique, son importance est bien moins importante que celle des précipitations. Le modèle hydrologique est peu sensible aux variations de l'ETP (Paturel *et al.*, 1995 ; Ardoin *et al.*, 2001), qui sont en plus très faibles. En effet, la figure 4.44 montre que les variations annuelles sur les données observées sont peu importantes, l'ETP Penman allant de 1686 à 2703 10<sup>ème</sup> de mm. De plus, le tableau 4.22 montre que, quelque soit le modèle climatique utilisé, les variations des prévisions d'ETP par rapport à la période de référence sont peu conséquentes, allant de -5,98% à 9,41%. Ce tableau, obtenu en prenant en compte l'évolution de l'ETP prédite en chaque cellule et pour chaque horizon, résume l'éventail de variation de celle-ci au cours du XXIème siècle.



**Figure 4.44 – Evolution mensuelle de l’ETP Penman observée en 1990 sur la cellule 31LAT94LON (résolution du modèle climatique HadCM3)**

**Tableau 4.22 – Variation de l’ETP Turc sur les trois horizons par rapport à la période de référence propre à chaque modèle climatique**

	HadCM3	CSIRO_Mk2	NCAR_PCM	ECHAM4
Scénario Anomalie	-2,28% à 9,41%	0,23% à 8,46%	-1,22% à 5,98%	-1,75% à 3,24%
Scénario Horizon	-3,57% à 8,08%	0,20% à 7,35%	-1,06% à 6,31%	-5,98% à 3,77%

Ainsi, le modèle hydrologique étant peu influencé par les variations de l’ETP, qui sont de plus faibles à tous les niveaux, il n’est pas nécessaire d’étudier cette donnée et son comportement pour la suite de l’interprétation.

## V. Les prévisions d'évolution des écoulements de fleuves en Afrique de l'Ouest et centrale

### 1. Représentation choisie

La représentation utilisée pour l'interprétation de l'évolution des débits est la même que pour les précipitations : plusieurs taux de variation moyens sont calculés pour chaque horizon ainsi que les termes caractérisant leur représentativité (l'écart moyen et l'intervalle). La différence ici est que les prévisions d'évolution des débits sont obtenues pour chaque sous bassin versant qui compose les quatre unités hydrographiques étudiées. De plus, la période de référence utilisée pour le calcul des taux de variation est ici 1971 – 1995 (Ardoin-Bardin, 2004). Ainsi, les prévisions seront représentées par le taux moyen de variation de chaque unité hydrographique, c'est-à-dire la moyenne des taux de variation de chacun de ses sous bassins. L'écart moyen correspond alors à la moyenne des écarts absolus entre le taux de chaque sous bassin et le taux moyen de l'unité hydrographique. Et enfin, l'intervalle de chaque unité sera composé du taux minimal et maximal des sous bassins le composant. La représentation ainsi définie sera mise en place de la même façon que précédemment (système de carré de couleur pour chaque modèle et une carte par horizon).

L'interprétation des prévisions du comportement des débits va nous amener à étudier la cohérence entre les prévisions pluviométriques, utilisées en entrée du modèle hydrologique, et les prévisions hydrologiques obtenues. Il est alors nécessaire de savoir sur quelles zones de l'étude pluviométrique se situe chaque bassin versant (figure 5.1).

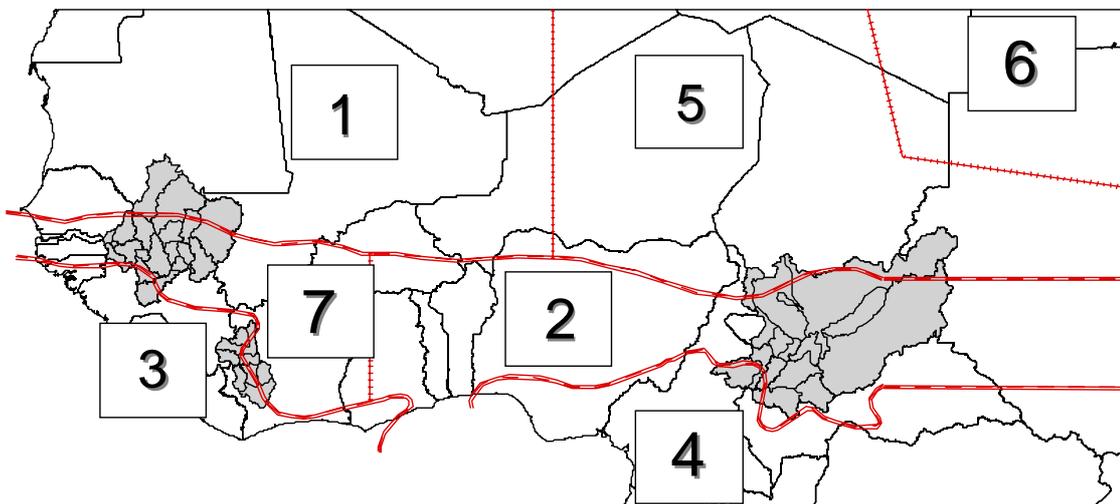


Figure 5.1 – Positionnement des bassins par rapport aux zones de l'étude pluviométrique

## 2. Evolution des débits avec le scénario Anomalie

La figure 5.2 représente les prévisions d'évolution des débits obtenues avec le scénario Anomalie.

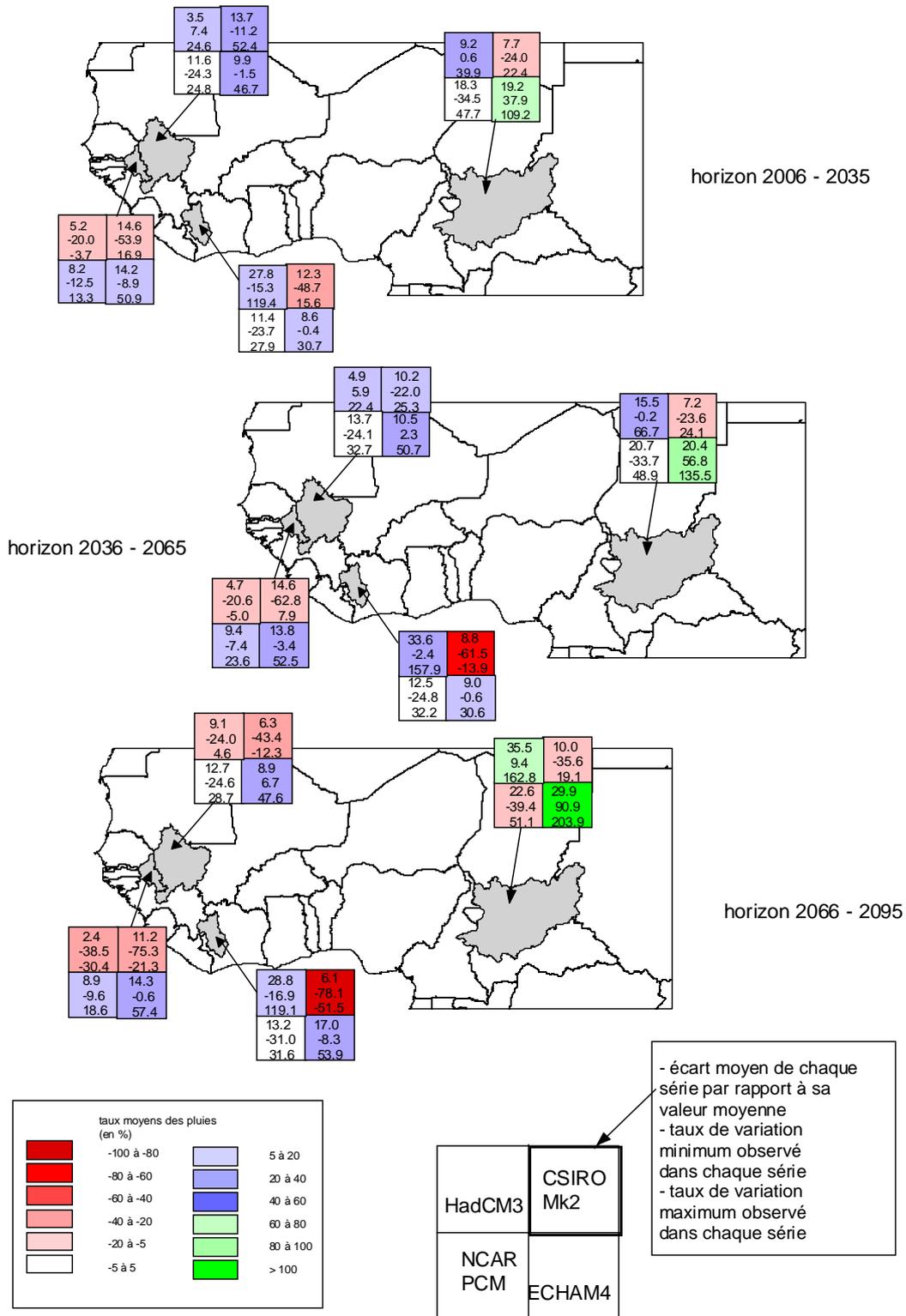


Figure 5.2 – Prévisions des taux de variation moyens des débits aux trois horizons avec le scénario Anomalie

a. HadCM3

i. Prévisions pour chaque bassin par les taux moyens de variation

D'après les taux moyens de variation (tableau 5.1), les bassins du Sassandra et du Chari présentent une augmentation significative de leur débit avec des taux moyens d'au minimum 13,1% pour le Sassandra et 20,9% pour le Chari. L'évolution des taux moyens de ces deux bassins est différente avec une augmentation puis une diminution pour le Sassandra alors que, pour le Chari, on observe une augmentation progressive du taux moyen.

Pour le bassin de la Gambie, le modèle climatique HadCM3 prévoit une diminution du débit avec des taux moyens inférieurs à -8,4%. Celui-ci évolue faiblement de 2020 à 2050 et diminue fortement, de -24,4%, de 2050 à 2080.

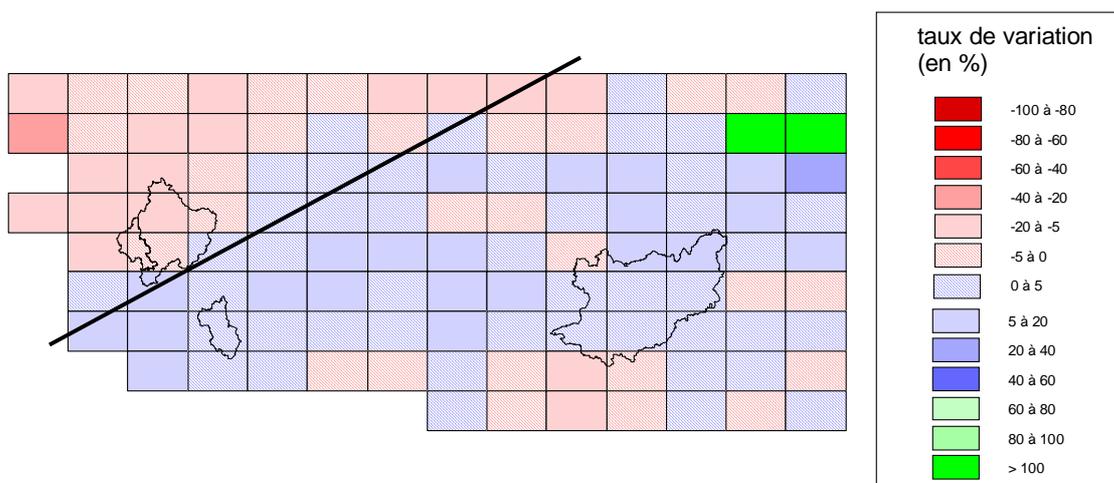
Enfin, le Sénégal a un comportement moins homogène avec un taux moyen constant et significativement positif aux horizons 2020 et 2050, qui devient brutalement négatif, avec une perte de -25,7%, en 2080.

**Tableau 5.1 – Taux de variation moyens des débits en chaque bassin**

	Sassandra	Chari	Gambie	Sénégal
2020	17,1	20,9	-8,4	13,9
2050	34,0	31,4	-9,9	13,6
2080	13,1	68,0	-34,3	-12,1

ii. Liens entre précipitations et débits

Le modèle climatique HadCM3 prévoit une augmentation des précipitations au Sud Est et une diminution au Nord Ouest. Les prévisions de débit suivent cette tendance, excepté pour le Sénégal. On observe une augmentation des débits pour les bassins du Sassandra et du Chari, situés au Sud Est, et une diminution des débits du bassin de la Gambie, situé à l'Ouest (figure 5.3). Par contre, le comportement du Sénégal pose problème car les prévisions de débit, aux horizons 2020 et 2050, ne sont pas cohérentes avec les prévisions de précipitations utilisées. Ce bassin fera alors l'objet d'une étude plus approfondie.



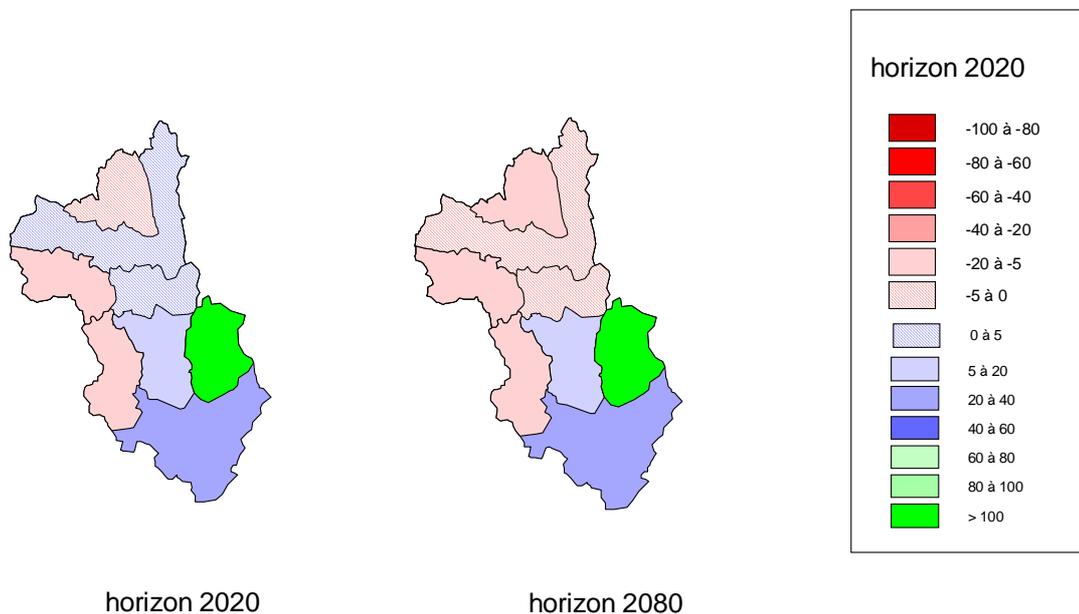
**Figure 5.3 – Disposition des bassins par rapport aux prévisions des précipitations pour l'horizon 2020**

iii. Représentativité des taux moyens de variation

L'étude des intervalles des taux de variation montre que la plupart des taux moyens sont clairement représentatifs du comportement de chaque sous bassin. Par contre, il faut étudier plus précisément la représentativité du taux moyen du Sassandra aux horizons 2020 et 2080. Dans le premier cas, l'intervalle débute à -15,3% et dans le second à -16,9%, alors que leur taux de variation moyen est de 17,1% et 13,1%.

A l'horizon 2020, seulement 37,5% des sous bassins du Sassandra présentent une augmentation significative des débits (figure 5.4). Par contre, en considérant aussi les sous bassins de faible taux de variation positif, la proportion de sous bassins présentant une augmentation est de 62,5%. On peut alors considérer que le taux de variation moyen est représentatif du comportement global du bassin.

Par contre, les prévisions pour l'horizon 2080 sont plus problématiques. En effet, seulement 37,5% des sous bassins présentent une augmentation des débits et 62,5% une diminution faible ou significative. Le comportement global du bassin est alors à la diminution des débits mais le taux moyen est faussé par la présence de sous bassins à taux positifs importants.



**Figure 5.4 – Prévisions des débits pour les sous bassins du Sassandra en 2020 et 2080**

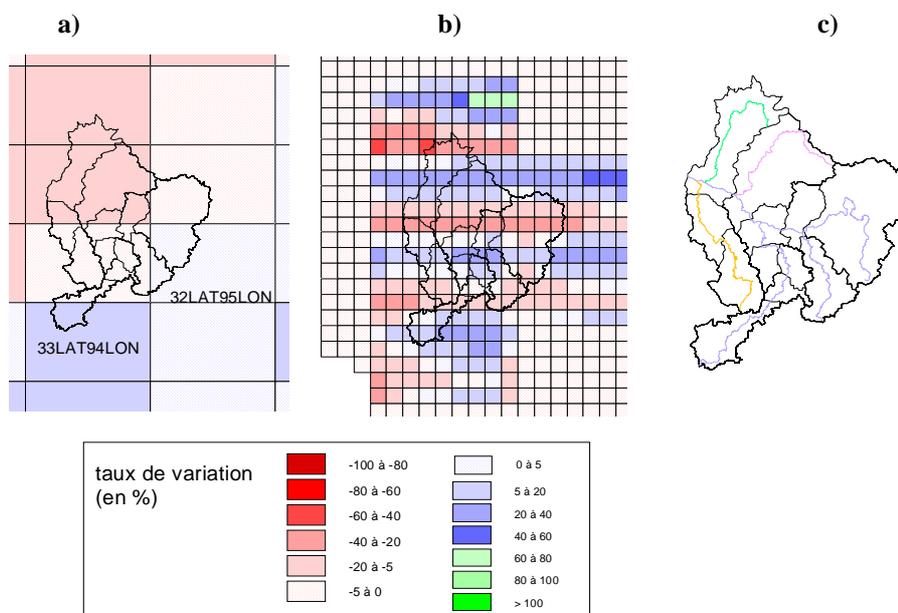
Ainsi, contrairement à ce que pouvait faire croire le taux moyen de variation, les prévisions des débits ne suivent pas celles des précipitations pour certains sous bassins du Sassandra. Nous allons alors étudier plus précisément le comportement de ce bassin.

Nous avons vu précédemment que les bassins du Sénégal et du Sassandra nécessitent une étude plus approfondie pour expliquer leurs prévisions hydrologiques par rapport aux prévisions pluviométriques.

L'interprétation précédente s'appuie sur les prévisions des précipitations à la résolution du modèle climatique HadCM3 alors que le modèle hydrologique fonctionne avec les données pluviométriques au demi degré. Nous allons alors étudier l'évolution des précipitations à l'échelle du demi degré. Cela ne change rien pour les prévisions puisqu'elles sont déterminées par le modèle climatique et donc à sa propre échelle ; par contre, les précipitations observées sont connues à l'échelle du demi degré. On peut alors déterminer des taux de variation plus précis en utilisant la résolution des précipitations observées sur la période de référence. Ce changement d'échelle nous permet d'obtenir les taux de variation des précipitations pour chaque cellule d'un demi degré.

Mais d'abord, étudions plus précisément la disposition du bassin du Sénégal par rapport à la grille de cellules de HadCM3. On observe que les cellules 33LAT94LON et 32LAT95LON, à taux de variation des précipitations positifs, alimentent les sous bassins Daka Saidou, Siramakana et Toukoto, situés en amont (figure 5.5a). Le fleuve et les rivières correspondantes, respectivement le Sénégal, le Bakoye et le Baoulé, influencent donc certains des sous bassins situés en aval (figure 5.5c). Ainsi, ces deux cellules, prévoyant une augmentation des précipitations, expliquent, pour la plupart des sous bassins, la tendance à l'augmentation des débits.

Les sous bassins traversés par le Falémé sont indépendants du comportement des précédents et les prévisions de débits en augmentation se justifient alors par une étude plus précise des prévisions pluviométriques. En effet, les taux de variation des précipitations, même si on a une diminution globale à l'échelle du modèle climatique, présentent, à l'échelle du demi degré et dans certaines zones, une augmentation (figure 5.5b). Ceci explique alors la tendance à l'augmentation des prévisions hydrologiques.



**Figure 5.5 – (a) Précipitations prévues en 2020 sur le bassin du Sénégal à l'échelle de HadCM3 et (b) au demi degré carré et (c) réseau hydrographique simplifiée du bassin du Sénégal (le Falémé en orange et le Sénégal, le Bakoye et le Baoulé en bleu)**

Pour le bassin du Sassandra, l'étude de la représentativité du taux moyen a mis en évidence des comportements différents de ses sous bassins, bien qu'ils soient situés dans une zone d'augmentation des précipitations. La description des précipitations, à l'échelle du demi degré, confirme les prévisions hydrologiques obtenues pour les horizons 2020 et 2080 (figures 5.6 et 5.7). En effet, les sous bassins présentant une diminution des débits sont situés sur des cellules prévoyant une diminution des précipitations, excepté pour le Siemen en 2080 pour lequel les prévisions s'expliquent par le comportement des sous bassins en amont.

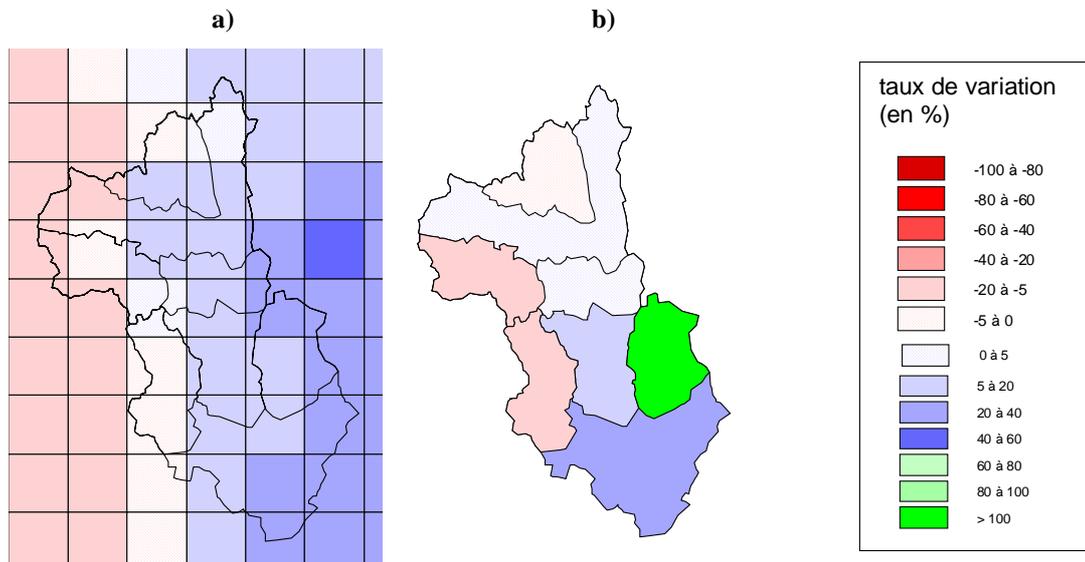


Figure 5.6 – (a) Prévisions des précipitations au demi degré carré et (b) des débits en chaque sous bassin du Sassandra en 2020

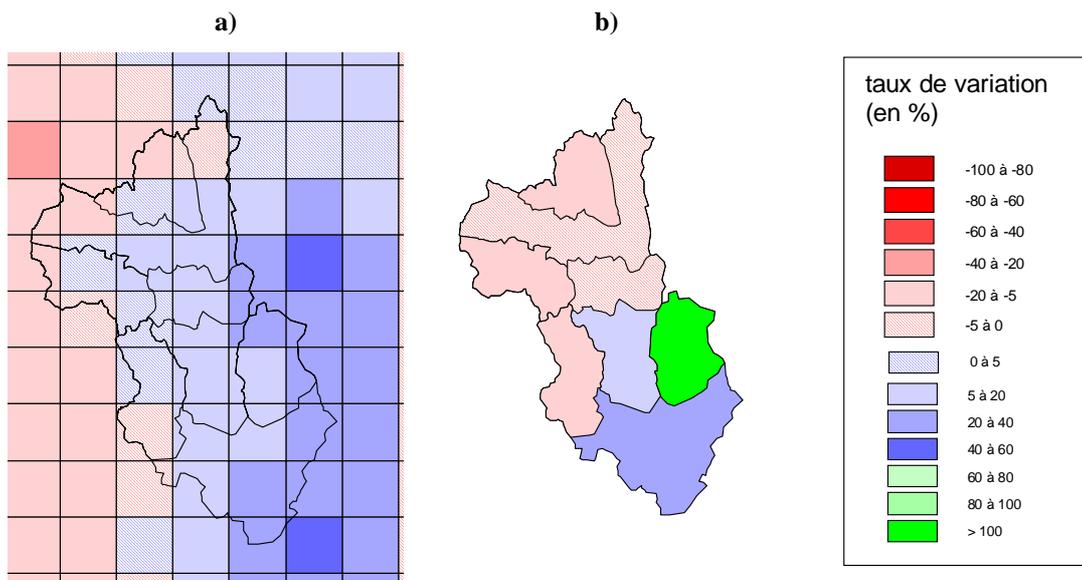


Figure 5.7 – (a) Prévisions des précipitations au demi degré et (b) des débits en chaque sous bassin du Sassandra en 2080

## b. CSIRO\_Mk2

### i. Prévisions pour chaque bassin par les taux moyens de variation

La tendance générale des prévisions, avec les précipitations issues du modèle climatique CSIRO\_Mk2, est à la diminution des débits, excepté pour le Sénégal (tableau 5.2). En effet, les bassins du Sassandra, de la Gambie et du Chari ont des taux de variation moyens négatifs qui diminuent au cours des horizons. Les diminutions de débit les plus importantes sont prévues pour le bassin du Sassandra, dont les taux moyens sont inférieurs à -26,9%. Le bassin de la Gambie, même si ses taux moyens sont moins faibles, présente, en 2080, une diminution de 42,8% des débits par rapport à la période de référence. Enfin, les baisses de débit prédites pour le bassin du Chari sont moins importantes et sont au plus bas de -17,3%.

Le comportement du Sénégal est particulier avec un taux moyen, d'abord significativement positif, qui devient significativement négatif au dernier horizon. Les diminutions du taux moyen d'un horizon à l'autre sont de l'ordre de 20%.

**Tableau 5.2 – Taux de variation moyens des débits en chaque bassin**

	Sassandra	Gambie	Chari	Sénégal
2020	-26,9	-9,4	-6,4	<b>23,3</b>
2050	-40,5	-19,7	-7,4	<b>5,5</b>
2080	-60,9	-42,8	-17,3	-24,8

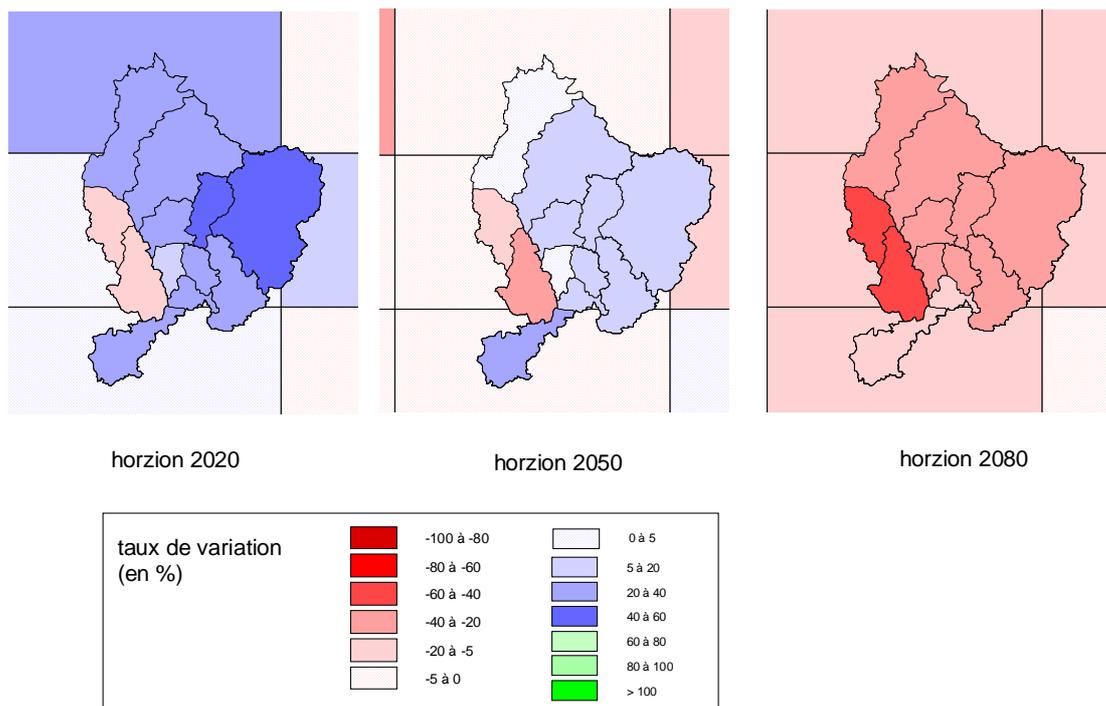
### ii. Liens entre précipitations et débits

L'étude pluviométrique montre que le modèle climatique CSIRO\_Mk2 prévoit une diminution des précipitations au Sud de l'isohyète 700 mm et que, au Nord de cette frontière, la représentation choisie n'est pas satisfaisante.

Les bassins de la Gambie, du Sassandra et du Chari, situés au Sud de l'isohyète 700 mm, ont des prévisions hydrologiques cohérentes avec les prévisions pluviométriques.

Par contre, pour le Sénégal, en partie situé sur la zone 1, nous ne pouvons nous référer à l'interprétation des taux de variation moyens des précipitations. Dans la zone du Sénégal, les prévisions pluviométriques correspondent à une augmentation des précipitations en 2020, une diminution faible en 2050 et une diminution significative en 2080 (figure 5.8). Les taux de variation moyens des débits correspondent bien à ces prévisions pluviométriques en 2020 et 2080 puisqu'ils sont de 23,3% et -24,8%. Par contre, pour l'horizon 2050, le taux moyen de variation hydrologique correspond à une augmentation faible du débit alors qu'on observe une diminution faible des précipitations.

Le comportement hydrologique de ce bassin, à l'horizon 2050, fera l'objet d'une étude plus approfondie.



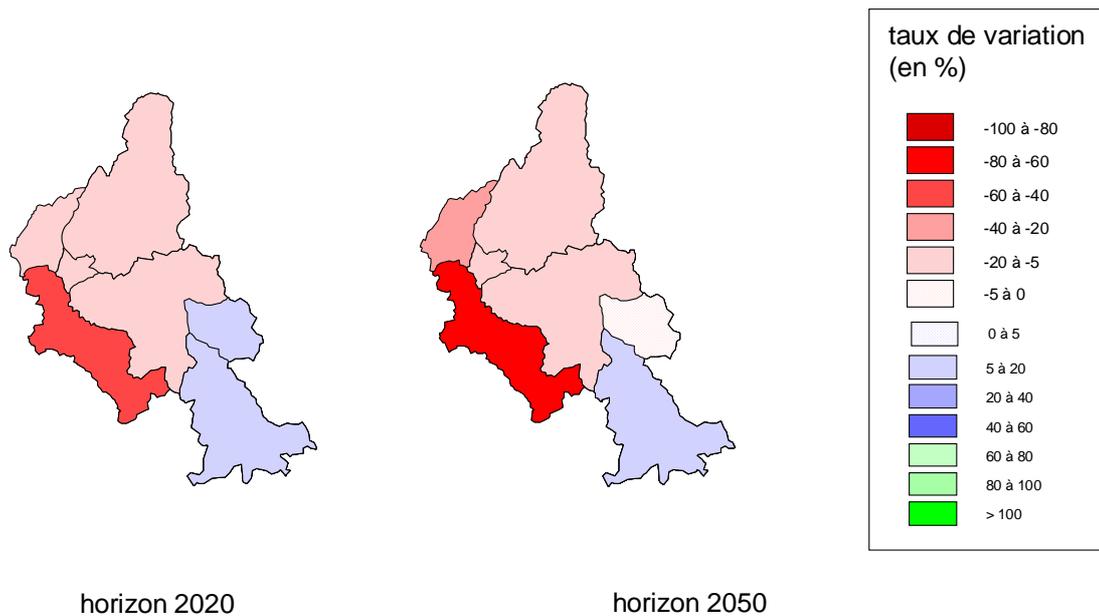
**Figure 5.8 – Superposition des prévisions pluviométriques (à l'échelle de CSIRO\_Mk2) et hydrologiques (en chaque sous bassin) pour le Sénégal**

### iii. Représentativité des taux moyens de variation

Les intervalles des taux de variation des débits de chaque bassin montre qu'il faut étudier la représentativité du taux moyen du Sénégal et de la Gambie aux horizons 2020 et 2050, du Sassandra en 2020 et du Chari à tous les horizons.

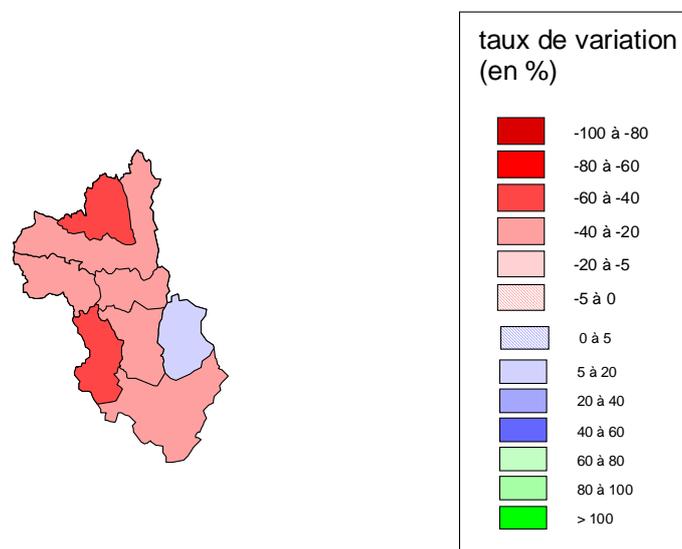
A l'horizon 2020, l'intervalle du Sénégal débute à -11,2% alors que son taux moyen est de 23,3%. Seuls deux sous bassins, le Gourbassy et le Kidira Uhea, sont responsables de ces taux négatifs ; le taux moyen est alors bien représentatif du comportement global du bassin (figure 49). En 2050, l'intervalle s'étend de -22% à 25,3% avec 66,7% des sous bassins présentant une augmentation significative des débits. Le taux moyen, de 5,5%, est acceptable, même si sa valeur est diminuée par les deux sous bassins à taux significativement négatifs.

La Gambie présente des taux de variation moyens significativement négatifs alors que ses intervalles de taux vont jusqu'à 16,9% en 2020 et 7,9% en 2050. Cela dit, dans les deux cas, 71,4% des sous bassins présentent une diminution significative de leur débit (figure 5.9). Les taux de variation moyens sont alors bien représentatifs de l'évolution hydrologique du bassin de la Gambie.



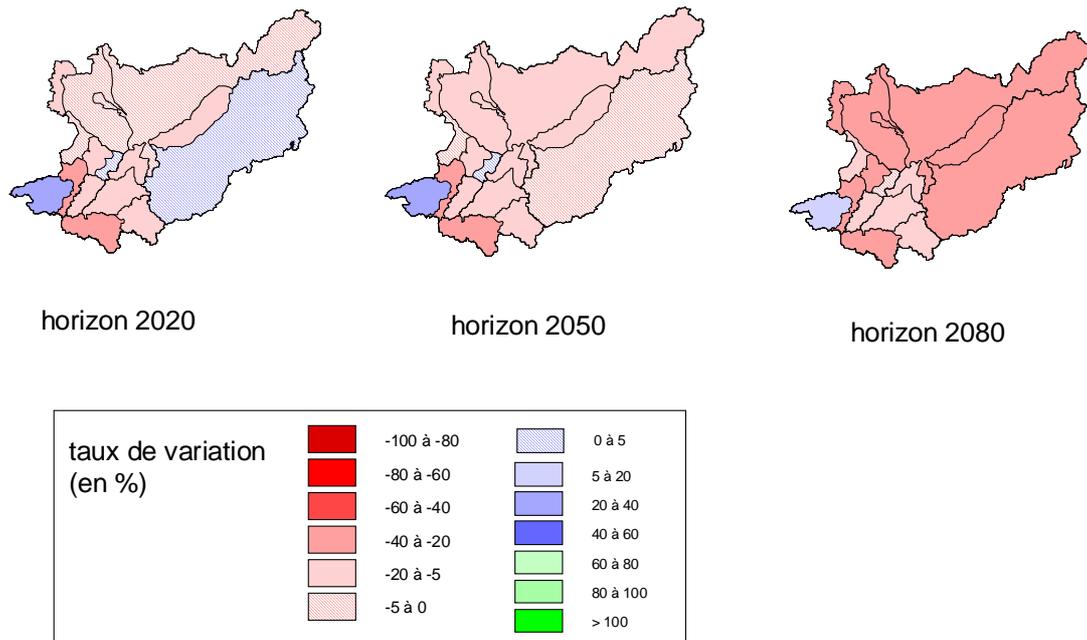
**Figure 5.9 – Prévisions des débits pour les sous bassins de la Gambie aux horizons 2020 et 2050**

La représentativité du taux moyen du Sassandra est à étudier à l’horizon 2020. En effet, son intervalle va jusqu’à 15,6%, alors que son taux moyen présente une diminution significative. Puisque seul le Nibehibe est responsable de ce taux positif (figure 5.10), la tendance de ce bassin est clairement à la diminution des débits pour l’horizon 2020.



**Figure 5.10 – Prévisions hydrologiques des sous bassins du Sassandra en 2020**

La représentativité du taux moyen est à vérifier pour le Chari à tous les horizons. Les taux moyens correspondent à une diminution significative du débit, de -6,4% à -17,3%, alors que les intervalles vont jusqu’à 22,4%, 24,1% et 19,1%. Malgré cela, les taux moyens sont cohérents avec la tendance du bassin puisque ces taux positifs ne sont dus qu’à 20% des sous bassins en 2020, à 13,3% en 2050 et à 6% en 2080 (figure 5.11).



**Figure 5.11 – Prévisions hydrologiques pour les sous bassins du Chari à chaque horizon**

Ainsi, les prévisions hydrologiques, avec les précipitations du modèle climatique CSIRO\_Mk2, sont bien représentées par les taux moyens de variation en chaque bassin.

#### iv. Etude plus approfondie des bassins du Sénégal

Les prévisions hydrologiques obtenues pour le Sénégal en 2050 sont très mitigées et ne correspondent pas aux prévisions pluviométriques à l'échelle du modèle climatique. En effet, on observait, à l'échelle de CSIRO\_Mk2, que le bassin du Sénégal était situé sur des cellules présentant toutes une diminution, pour la plupart faible, des précipitations. Mais en regardant plus précisément, à l'échelle du demi degré, on observe des cellules présentant une nette augmentation des précipitations (figure 5.12). Le sous bassin Daka Saidou, influant sur la plupart des autres sous bassins, est alimenté par des cellules prévoyant une augmentation des précipitations. De plus, une autre tranche de cellules, aux environs de la latitude 14°N, marque des précipitations en augmentation. Ainsi, le passage au demi degré explique la tendance à l'augmentation des débits du bassin du Sénégal pour l'horizon 2050.

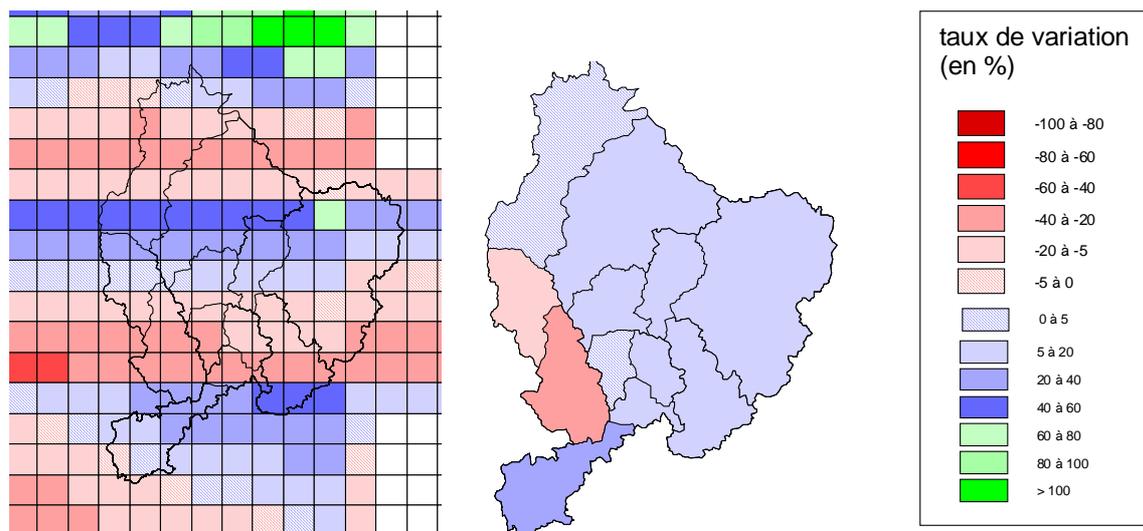


Figure 5.12 – Prévisions pluviométriques au demi degré et prévisions hydrologiques des sous bassins du Sénégal à l'horizon 2050

c. NCAR\_PCM

i. Prévisions pour chaque bassin par les taux moyens de variation

La tendance des prévisions hydrologiques avec les précipitations issues du modèle climatique NCAR\_PCM est à la stabilité des débits au cours du XXIème siècle. En effet, la plupart des bassins ont des taux de variation moyens de faible évolution, excepté pour la Gambie et le dernier horizon du Chari (tableau 5.3).

Ainsi, les débits prévus pour les bassins du Sénégal, du Sassandra et du Chari sont assez stables par rapport à la période de référence 1971 – 1995, avec des taux moyens allant de -6,1% à 1,5%. De plus, les évolutions d'un horizon à l'autre sont faibles avec une variation maximale de 4,7%.

Par contre, le bassin de la Gambie aurait une évolution différente, avec des taux moyens toujours significativement positifs. Le taux moyen, d'abord faible, augmente pour atteindre 12,7% en 2050, et diminue jusqu'à 9,6% en 2080.

Tableau 5.3 – Taux de variation moyens des débits en chaque bassin

	Sénégal	Sassandra	Chari	Gambie
2020	-3,5	0,3	-3,7	<b>5,3</b>
2050	0,3	1,5	-1,4	<b>12,7</b>
2080	-2,0	-1,6	<b>-6,1</b>	<b>9,6</b>

ii. Liens entre précipitations et débits

Pour le XXIème siècle, le modèle climatique NCAR\_PCM prévoient une diminution des précipitations au Sud de l'isohyète 700 mm, particulièrement pour les zones 2 et 7. Par contre, au Nord de cette frontière, la représentativité du taux moyen n'étant pas acceptable, les prévisions pluviométriques doivent être étudiées plus particulièrement.

De ce fait, les prévisions hydrologiques du bassin du Sénégal, et plus particulièrement celles du bassin de la Gambie, sont assez inattendues puisque ces deux bassins se situent dans une zone de diminution significative des précipitations (zone 7). De plus, le Chari, présente une diminution faible du débit alors qu'il est situé en zone 2, zone de diminution significative des précipitations. Par contre, le Sassandra, situé sur les zones 3 et 7, a des évolutions faibles qui correspondent au comportement de la zone 3 en pluviométrie.

La recherche de lien entre les prévisions pluviométriques et hydrologiques est plus satisfaisante en décrivant l'évolution des précipitations non plus par zone mais par cellule. Pour le Sénégal et la Gambie, les taux de variation moyens des débits, différents des prévisions pluviométriques, s'expliquent par les cellules 38LAT124LON et 37LAT125LON qui présentent une augmentation significative des précipitations (figure 5.13). Ainsi, même si la tendance de la zone est à la diminution des précipitations, la contribution de ces deux cellules particulières implique une augmentation des débits du bassin de la Gambie et une stabilisation de ceux du Sénégal. Il en est de même pour le Chari ; bien qu'il soit situé dans une zone d'augmentation des précipitations, la contribution des cellules 37LAT009LON et 36LAT009LON explique la tendance à la stabilisation des taux de variation moyens des débits.

De plus, on observe que la cellule 35LAT126LON est responsable du comportement peu homogène des sous bassins du Sassandra. En effet, cette cellule, présentant une augmentation des précipitations, semble à l'origine de l'augmentation des débits de trois sous bassins alors que les débits prévus diminuent pour les autres sous bassins.

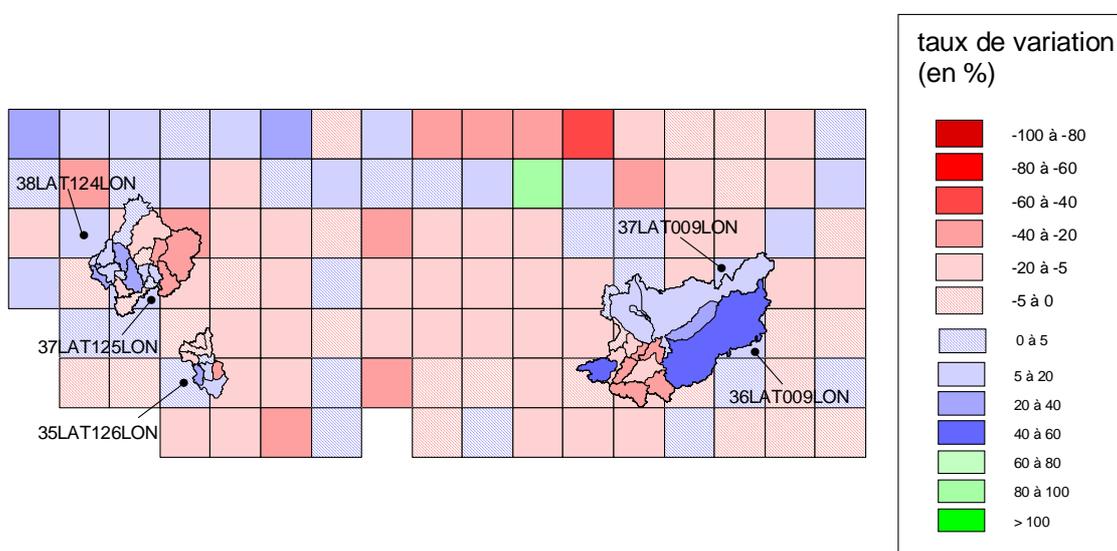


Figure 5.13 – Superposition des prévisions hydrologiques (en chaque sous bassin) et pluviométriques (à l'échelle de NAR\_PCM) pour l'horizon 2050

### iii. Représentativité des taux moyens de variation

Comme pouvait le laisser entendre la figure précédente, le comportement des sous bassins n'est pas homogène et la représentation des prévisions hydrologiques par un taux moyen de variation est alors remise en cause. Les intervalles, assez larges pour tous les bassins et à tous les horizons, confirment cette impression.

A chaque horizon, l'intervalle des taux de variation du Sénégal est important, allant d'environ -24% à 25%. En 2020, 50% des sous bassins prévoient une diminution significative du débit et 25% une augmentation (figure 5.14). En 2050, la diminution, l'augmentation et la faible évolution des débits touchent la même proportion de sous bassins, c'est-à-dire 33,3%. Enfin, en 2080, 50% des sous bassins présentent une diminution et 33,3% une augmentation des débits. Ainsi, aux trois horizons, il est difficile de dégager une tendance générale pour le bassin du Sénégal. On ne peut alors pas obtenir un taux moyen de variation des débits représentatif du comportement du bassin.

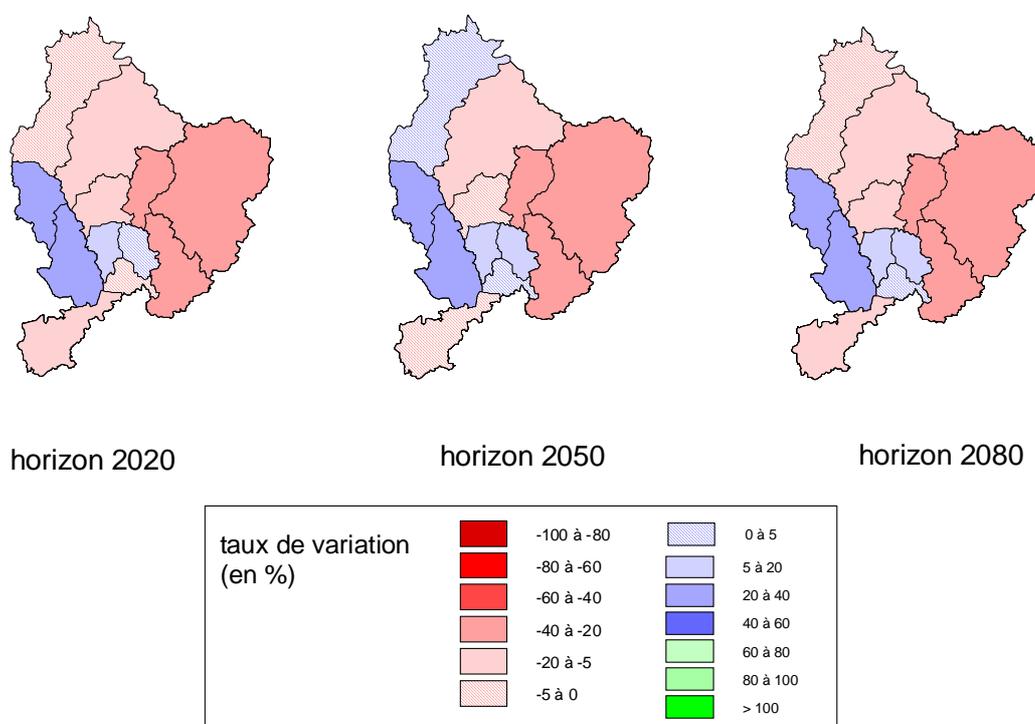


Figure 5.14 – Prévisions hydrologiques des sous bassins du Sénégal aux trois horizons

Les intervalles de taux observés pour le Sassandra vont d'environ -25% à 30% pour tous les horizons. Il est alors nécessaire d'étudier la représentativité des taux moyens, qui présentent ici des faibles évolutions.

Comme précédemment, il semble difficile de déterminer un comportement global du bassin. En effet, aux horizons 2020 et 2050, 37,5% des sous bassins présentent une augmentation significative de leur débit, 25% une diminution significative et 37,5% de faibles évolutions (figure 5.15). Pour l'horizon 2080, seulement 12,5% des sous bassins présentent une faible évolution des débits alors que le taux de variation moyen, de -1,6%, correspond à cette

tendance. Les débits augmenteraient significativement pour 50% des sous bassins et diminueraient pour 37,5% d'entre eux. Ainsi, il apparaît difficile, pour ce bassin et à tous les horizons, de déterminer une tendance générale auquel le taux moyen devrait correspondre. De ce fait, celui-ci n'est représentatif que du comportement mitigé des sous bassins qui composent le Sassandra.

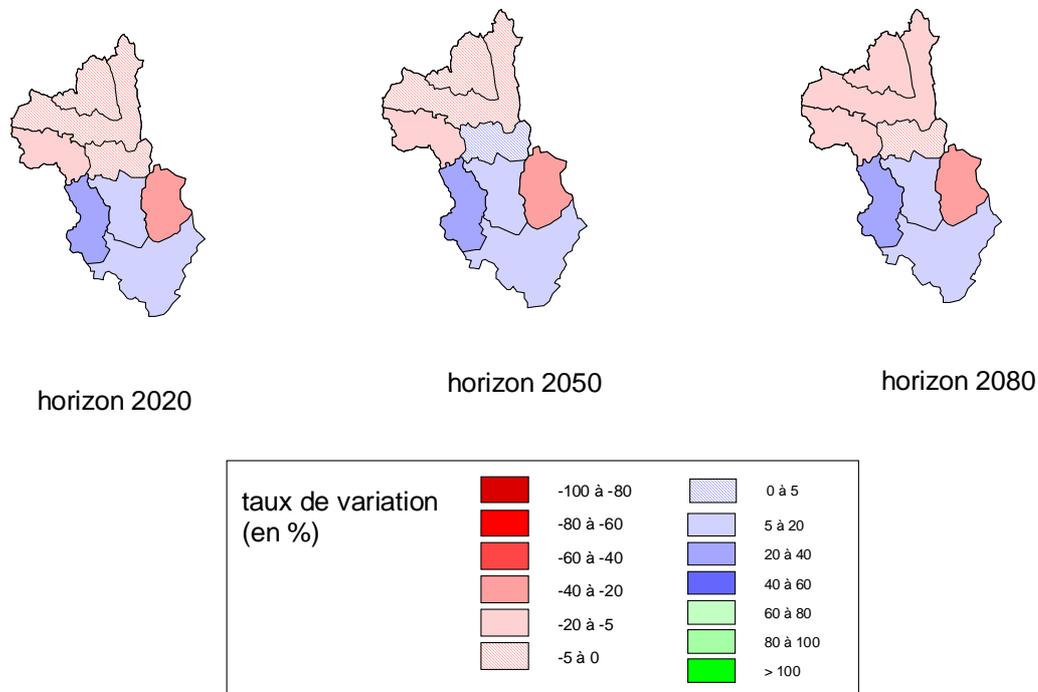
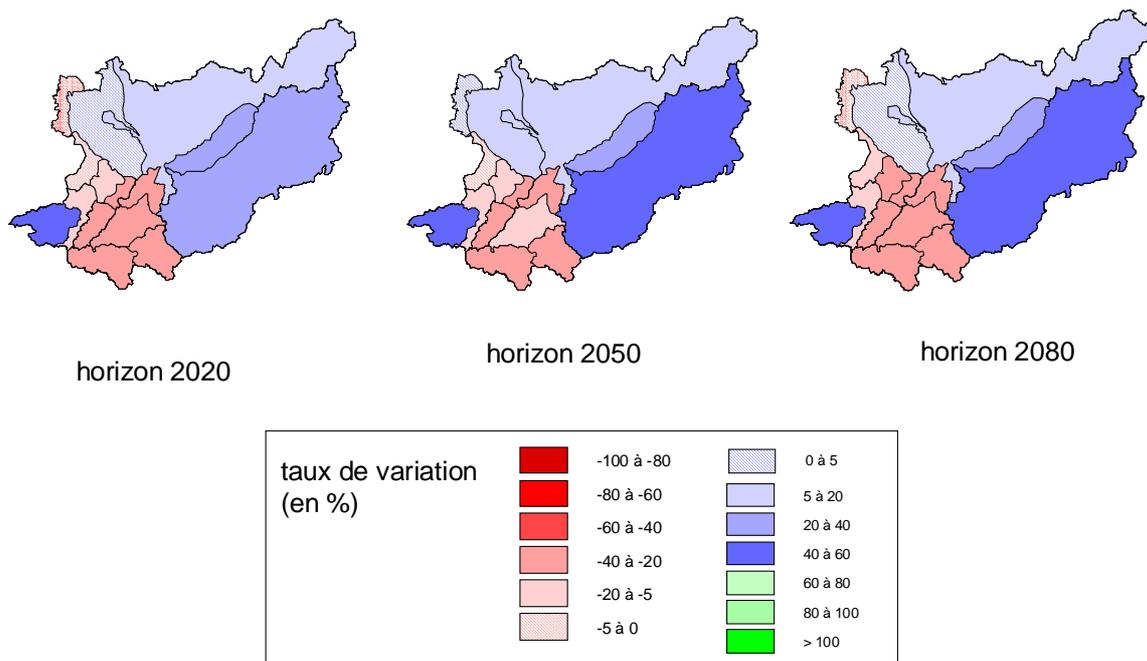


Figure 5.15 – Prévisions hydrologiques des sous bassins du Sassandra aux trois horizons

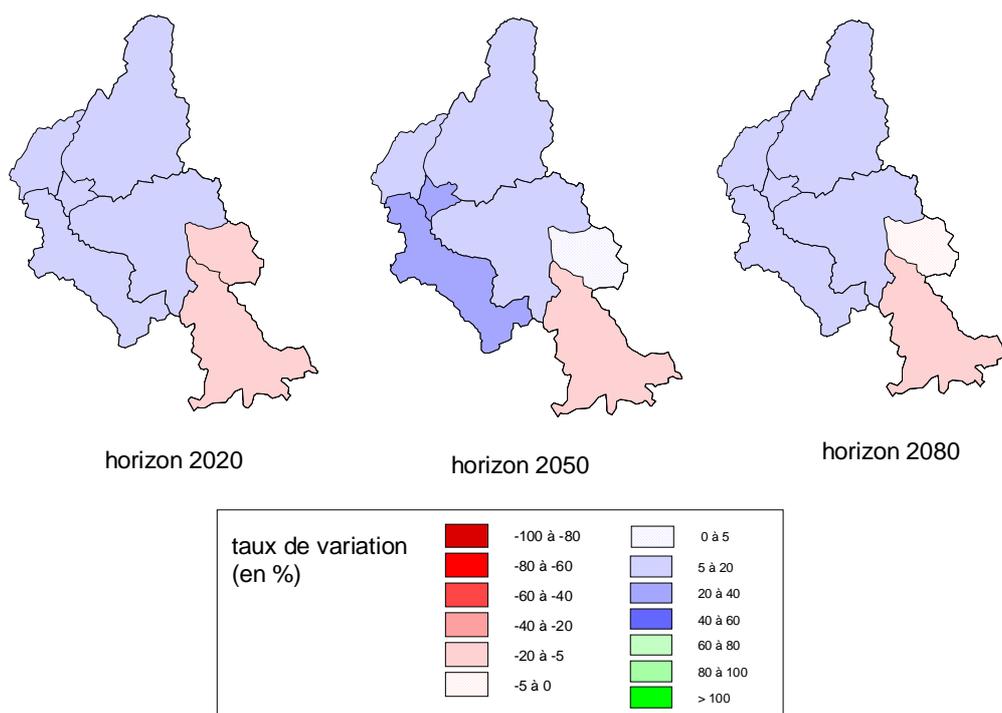
Les prévisions d'évolution des débits des sous bassins du Chari vont d'environ -35% à 50%, pour tous les horizons. Il est donc nécessaire d'étudier la représentativité de son taux moyen de variation. Aux horizons 2020 et 2050, une faible majorité des sous bassins, soit 53,3%, prévoient une diminution significative des débits alors que les taux moyens correspondent à de faibles évolutions, -3,7% et -1,4% (figure 5.16). Le taux moyen est alors peu représentatif du comportement du bassin pour les deux premiers horizons. Pour l'horizon 2080, le taux moyen, de -6,1%, correspond à la tendance de la majorité des sous bassins car 60% d'entre eux présentent une diminution significative des débits. Malgré cela, on peut remettre en question la représentativité du taux moyen car la superficie de ces derniers est seulement de 152540 km<sup>2</sup>, soit 25,3% de la superficie totale.

Ainsi, il est impossible d'obtenir un taux moyen représentatif du comportement du bassin du Chari pour tous les horizons.



**Figure 5.16 – Prévisions hydrologiques des sous bassins du Chari aux trois horizons**

Les prévisions hydrologiques pour le bassin de la Gambie correspondent à une augmentation significative du débit alors que les bornes inférieures des intervalles sont négatifs aux trois horizons. Cela dit, ces taux négatifs ne sont liés qu'à 28,6% des sous bassins en 2020 et 14,3% en 2050 et 2080 (figure 5.17). A chaque horizon, la proportion de sous bassins prévoyant une augmentation significative du débit est de 71,4%. La représentativité du taux moyen n'est donc pas remise en cause.



**Figure 5.17 – Prévisions hydrologiques des sous bassins de la Gambie aux trois horizons**

Ainsi, les prévisions hydrologiques obtenues en utilisant les prévisions pluviométriques du modèle climatique NCAR\_PCM posent des problèmes de représentation. Les taux moyens, censés représenter le comportement global des bassins, ne sont cohérents que pour le bassin de la Gambie à tous les horizons.

#### d. ECHAM4

##### i. Prévisions pour chaque bassin par les taux moyens de variation

La tendance générale pour tous les bassins et à tous les horizons est à l'augmentation significative des débits, avec des taux moyens supérieurs à 17,1% (tableau 5.4). Cette tendance est de plus en plus marquée au cours des horizons.

Le bassin du Chari est celui qui présente la plus forte augmentation avec un taux moyen de 146,8% en 2080. Le Sassandra a un comportement particulier avec un taux moyen stable aux deux premiers horizons mais qui atteint tout de même 30,6% en 2080.

**Tableau 5.4 – Taux de variation moyens des débits en chaque bassin**

	Sénégal	Gambie	Chari	Sassandra
2020	19,5	19,7	76,3	17,1
2050	24,6	24,9	98,5	17,7
2080	26,1	28,7	146,8	30,6

## ii. Liens entre précipitations et débits

Les prévisions hydrologiques obtenues correspondent bien aux prévisions pluviométriques du modèle climatique ECHAM4. En effet, la tendance prévue par ce modèle était clairement à l'augmentation des précipitations de plus en plus marquée au cours du XXIème siècle et pour toutes les zones.

## iii. Représentativité des taux moyens de variation

La cohérence du mode de représentation est à étudier pour seulement deux cas : le bassin de la Gambie en 2020 et du Sassandra en 2080.

A l'horizon 2020, le taux de variation minimum des sous bassins de la Gambie est de -8,9% alors que le taux moyen présente une augmentation significative. Cela dit, la proportion de sous bassins présentant une augmentation significative de leur débit étant de 71,4%, la représentativité du taux moyen est acceptable (figure 5.18).

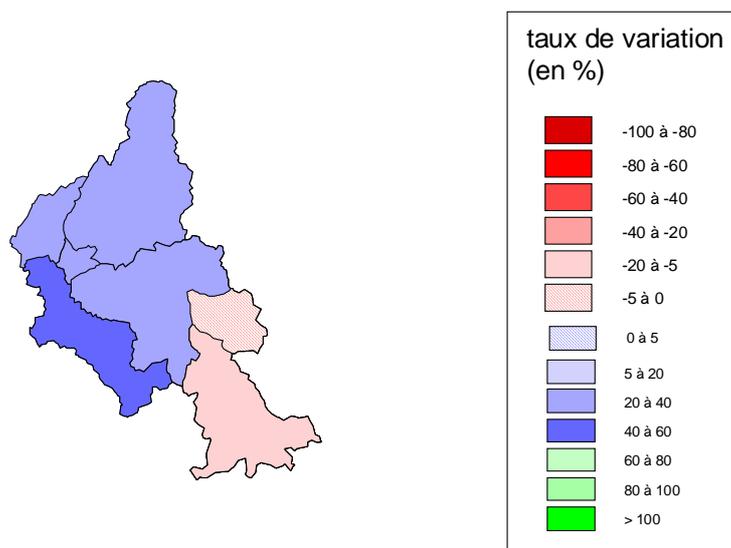


Figure 5.18 – Prévisions hydrologiques pour les sous bassins de la Gambie en 2020

A l'horizon 2080, l'intervalle des taux de variation des débits du bassin du Sassandra débute à -8,3%. Ce taux négatif étant dû seulement au Nibehibe, soit une proportion 12,5%, la tendance générale à l'augmentation n'est pas remise en cause (figure 5.19).

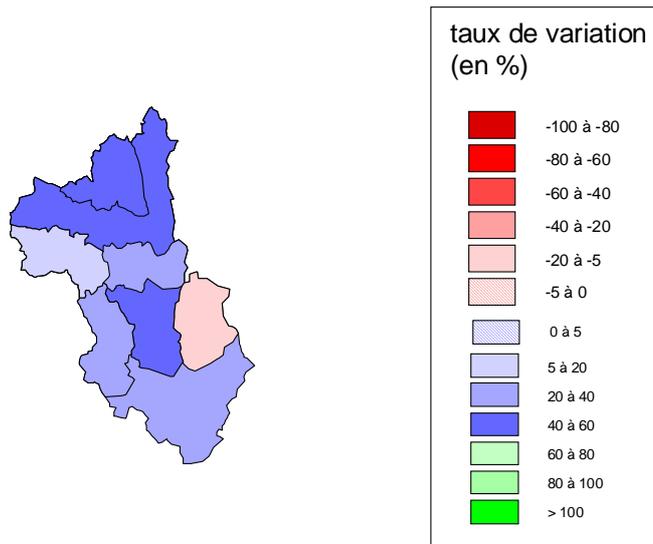


Figure 5.19 – Prévisions hydrologiques pour les sous bassins du Sassandra en 2080

Ainsi, les prévisions d'évolution des débits à partir des évolutions des précipitations d'ECHAM4 ne présente aucun problème de représentation par un taux moyen de variation.

e. Comparaisons inter modèles climatiques

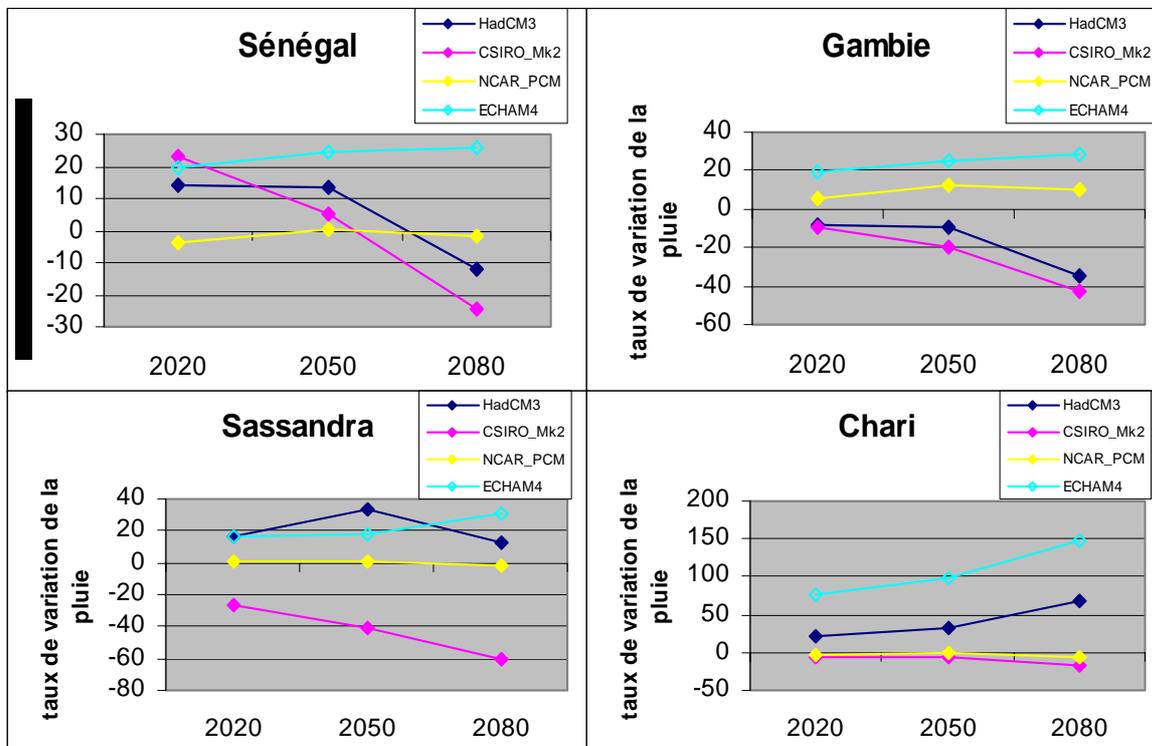


Figure 5.20 – Evolution des taux de variation moyens des débits de chaque bassin

Quelque soit le bassin étudié, la prise en compte des prévisions obtenues avec les quatre modèles climatiques amène à considérer un éventail large d'évolution. En effet, le plus faible panel de variation est celui du bassin du Sénégal, qui va de -24,8% à 26,1% et le plus large celui du Chari, de -17,3% à 146,8% (figure 5.20). On remarque tout de même quelques similarités de prévisions entre les modèles.

#### i. Evolution du taux moyen de variation

D'après la figure 58, nous pouvons remarquer, dans certains cas, que les taux moyens ont des évolutions d'un horizon à l'autre similaires. Ces derniers sont listés ci-dessous par regroupement de modèles climatiques possible avec le bassin pour lequel on observe ces similarités :

- NCAR\_PCM – ECHAM4 (Sénégal et Gambie): évolution des taux moyens au cours des horizons similaire avec une augmentation de 2020 à 2050, puis une faible évolution de 2050 à 2080
- HadCM3 – ECHAM4 (Chari): même évolution des prévisions pour le bassin du Chari, avec un taux moyen qui augmente de plus en plus fortement au cours des horizons
- CSIRO\_Mk2 – NCAR\_PCM (Chari) : taux moyen évolue de la même façon, avec une variation faible de 2020 à 2050, puis une diminution de 2050 à 2080
- HadCM3 – CSIRO\_Mk2 (Sénégal, Gambie et Sassandra) : évolution de 2050 à 2080 du taux moyen similaire avec une diminution plus ou moins forte de celui-ci, selon le bassin étudié

#### ii. Tendances des prévisions

Les prévisions obtenues à partir de certains modèles climatiques s'accordent pour obtenir une même tendance de prévisions du comportement des débits (augmentation, diminution ou stabilisation) au cours du XXI<sup>ème</sup> siècle par rapport à la période de référence. Etudions les cas que nous pouvons regrouper :

- NCAR\_PCM – ECHAM4 (Gambie) : tendance à l'augmentation des débits avec des taux de variation moyens toujours supérieurs à 5,3% pour le bassin de la Gambie et allant jusqu'à 28,7% avec ECHAM4
- HadCM3 – CSIRO\_Mk2 (Gambie) : prévisions d'une diminution des débits avec des taux de variation moyens inférieurs à -8,4% pour HadCM3 et -9,4% pour le CSIRO\_Mk2
- HadCM3 – ECHAM4 (Sassandra et Chari): augmentation significative des débits avec des taux moyens toujours supérieurs à 13,1% pour le Sassandra et 20,9% pour le Chari
- CSIRO\_Mk2 – NCAR\_PCM : diminution des débits avec des taux moyens inférieurs à -6,4% pour CSIRO\_Mk2 et -1,4% pour NCAR\_PCM

De plus, pour le bassin du Sénégal, on peut noter qu'aux horizons 2020 et 2050, les modèles climatiques, excepté NCAR\_PCM, s'accordent pour prévoir une augmentation du débit, avec des taux moyens toujours supérieurs à 5,5%. Pour l'horizon 2080 et pour ce même bassin, la tendance est à la diminution des débits, excepté pour ECHAM4, avec des taux moyens inférieurs à -2%.

Comme pour l'interprétation des prévisions des précipitations, l'éventail des prévisions est si large qu'il semble difficile d'en tirer des conclusions quand à l'évolution des débits.

#### f. Cartes synthétiques des prévisions avec le scénario Anomalie

La figure 5.21 synthétise les prévisions pouvant être représentées par un taux de variation moyen pour chaque bassin.

Pour le Sénégal, les prévisions d'évolution des débits issues des prévisions de précipitations des modèles climatiques HadCM3 et CSIRO\_Mk2 s'accordent pour une augmentation significative des débits aux deux premiers horizons qui évolue vers une diminution significative. Au contraire, d'après ECHAM4, les débits de ce bassin seront de plus en plus élevés avec des taux de variation en augmentation et toujours significativement positifs. Ces trois modèles climatiques s'accordent tout de même pour une augmentation significative des débits aux deux premiers horizons, avec un taux moyen supérieur à 5,5%.

L'évolution des débits du bassin de la Gambie est différente suivant les modèles climatiques utilisés. HadCM3 et CSIRO\_Mk2 prévoient une diminution significative des débits à tous les horizons et de plus en plus marquée au cours du XXIème siècle. Au contraire, NCAR\_PCM et ECHAM4 présentent une augmentation significative des débits à tous les horizons.

Pour le bassin du Sassandra, on a deux prévisions opposées : CSIRO\_Mk2 prévoit une forte diminution et ECHAM4 une augmentation significative, avec une accentuation de ces deux comportements au cours des horizons.

Enfin, le bassin du Chari présente aussi deux types d'évolution : augmentation importante avec HadCM3 et ECHAM4 et diminution significative avec CSIRO\_Mk2. Il faut noter que ces tendances s'intensifient au cours du XXIème siècle et que les prévisions d'ECHAM4 atteignent des valeurs très importantes avec un taux moyen allant jusqu'à 146,8%.

La figure 5.22 représente les prévisions les plus optimistes et les plus pessimistes en prenant en compte les possibilités d'évolution des débits selon les modèles climatiques pouvant être représentés par un taux moyen de variation.

Cette représentation montre que les prévisions obtenues par les différents modèles climatiques semblent s'accorder seulement pour le bassin du Sénégal. En effet, pour tous les autres bassins et à tous les horizons, l'écart entre les prévisions pessimistes et optimistes est d'au minimum 19,1%, en 2020 pour le bassin de la Gambie. Les écarts suivants vont de 44%, en 2080 pour le bassin du Sénégal, à 164,1%, en 2080 pour le bassin du Chari.

Les prévisions d'évolution des débits du bassin du Sénégal sont optimistes pour le premier horizon puisque les débits seraient, dans le pire des cas, 13,9% plus importants que pendant la période de référence. Pour 2050, les prévisions ne sont pas inquiétantes puisque le taux moyen de variation est toujours supérieur à 5,5%. Cependant, bien que significativement positive, cette prévision ne peut être considérée comme optimiste. En effet, une augmentation des débits de 5,5% par rapport à une période de sécheresse n'est probablement pas suffisante pour assurer les besoins en eau des populations qui dépendent de ce fleuve et de ses affluents.

Par contre, pour tous les autres cas, les prévisions pessimistes sont clairement inquiétantes avec des taux moyens inférieurs à -6,4%. Sachant que ces taux se réfèrent à une période de sécheresse, une diminution de 6,4% des débits pourrait être catastrophique. Le cas le plus inquiétant étant celui du bassin du Sassandra, avec des taux moyens pessimistes inférieurs à -26,9%.

Cela dit, la crédibilité des prévisions pessimistes précédentes est remise en question par les prévisions optimistes. Dans ce type de prévisions, les taux moyens sont toujours supérieurs à 17,1% et vont jusqu'à 146,8%. Il est alors difficile de conclure concrètement sur les prévisions d'évolution des débits des fleuves d'Afrique de l'Ouest, et donc sur les conséquences de ces évolutions pour les populations.

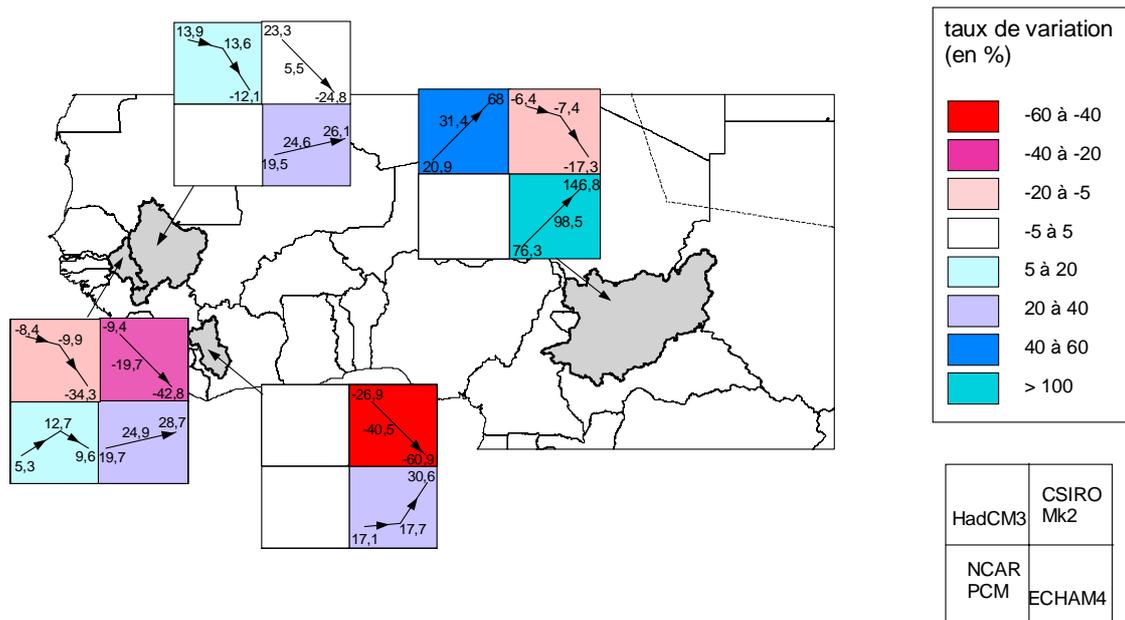
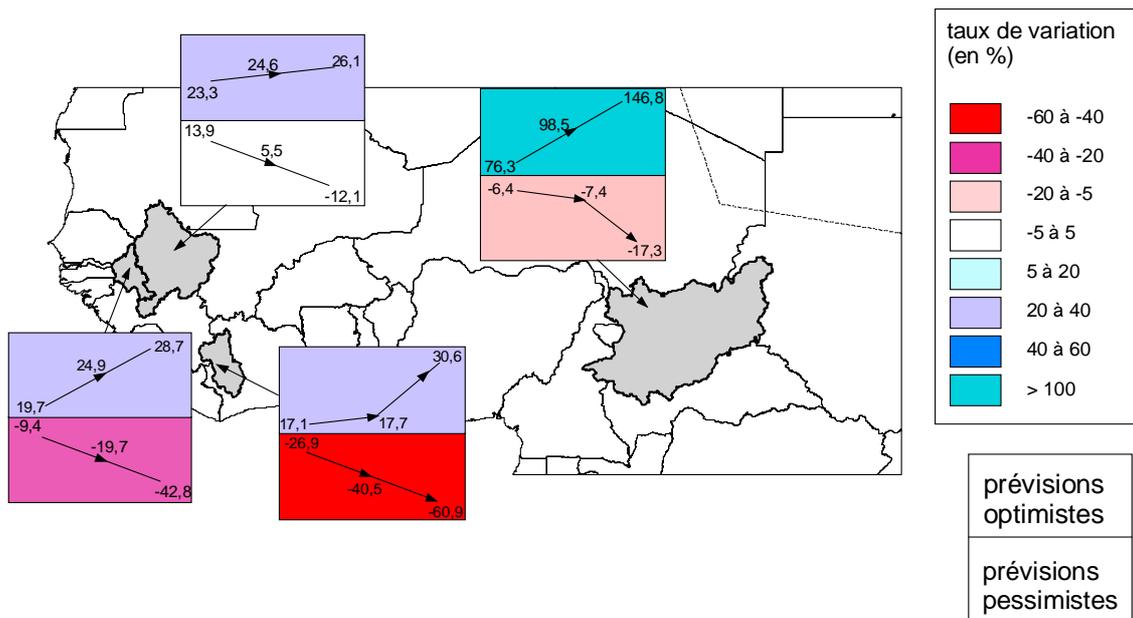


Figure 5.21 – Carte synthétique des prévisions hydrologiques avec la moyenne des taux moyens de variation et leur évolution pour les modèles de représentativité acceptable



**Figure 5.22 – Carte synthétique des prévisions les plus optimistes et les plus pessimistes parmi les prévisions de représentativité acceptable**

## 2. Les différences de prévisions avec le scénario Horizon

La figure 5.23 représente les prévisions hydrologiques obtenues en utilisant les prévisions pluviométriques du scénario Horizon pour chaque modèle climatique.

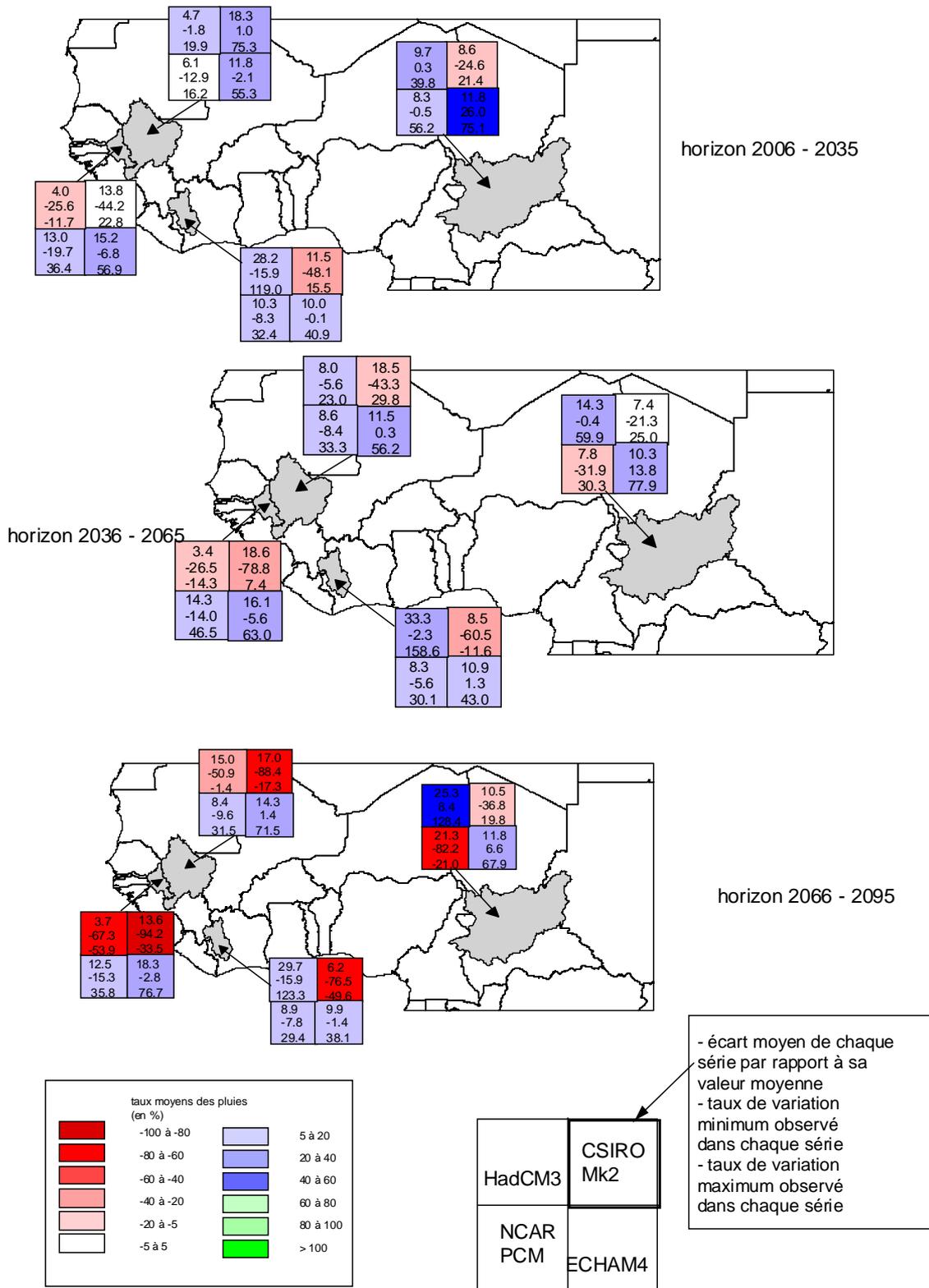


Figure 5.23 – Prévisions des taux moyens des débits aux trois horizons avec le scénario Horizon

a. HadCM3

i. Différences de prévisions suivant le scénario

Les taux moyens de variation obtenus avec le scénario Horizon sont, dans l'ensemble, semblables à ceux d'Anomalie (tableau 5.5). Les différences à noter sont pour les bassins du Sénégal et de la Gambie.

Pour les deux premiers horizons du bassin du Sénégal, la tendance à l'augmentation des débits est moins marquée avec le scénario Horizon, qui présente des taux moyens autour de 7% alors que ceux obtenus avec Anomalie étaient autour de 13%.

Ensuite, pour le dernier horizon du bassin du Sénégal et pour tous les horizons de la Gambie, la tendance à la diminution est plus forte en utilisant le scénario Horizon, avec des différences allant de 8% à 23,1%.

**Tableau 5.5 – Taux moyens de variation des débits pour chaque bassin avec les scénarii Anomalie (colonne blanche) et Horizon (colonne grise)**

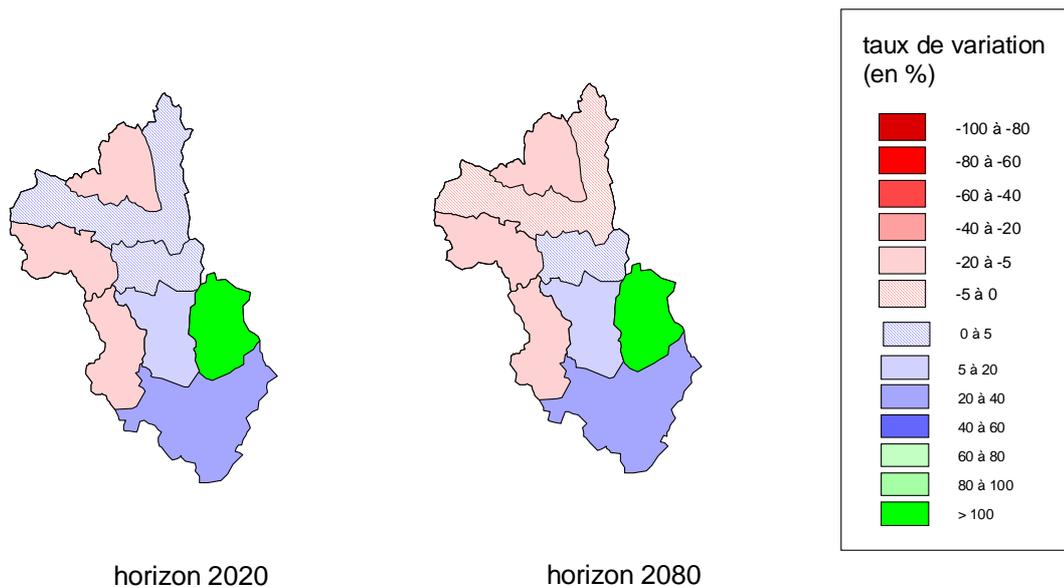
	Sénégal		Gambie		Sassandra		Chari	
2020	13,9	7,7	-8,4	-16,4	17,1	15,6	20,9	21,6
2050	13,6	7,3	-9,9	-19,3	34,0	35,1	31,4	29,3
2080	-12,1	-30,6	-34,3	-57,4	13,1	14,6	68,0	58,9

Ainsi, quelque soit le scénario utilisé, les tendances à la diminution et à l'augmentation sont identiques pour chaque bassin et à tous les horizons. L'interprétation effectuée pour les prévisions avec HadCM3 et le scénario Anomalie est alors valable ici.

ii. Représentativité des taux de variation moyens

La représentativité du taux moyen de variation, pour les prévisions d'HadCM3 avec le scénario Horizon, est à étudier pour le bassin du Sassandra en 2020 et 2080.

Les prévisions hydrologiques pour les sous bassins du Sassandra sont semblables à celles obtenues avec le scénario Anomalie (figure 5.24). La conclusion est alors la même : la représentativité du taux moyen pour le bassin du Sassandra est acceptable pour l'horizon 2020 mais pas pour l'horizon 2080.



**Figure 5.24 – Prévisions des taux de variation des débits pour les sous bassins du Sassandra en 2020 et 2080**

Les prévisions hydrologiques obtenues avec HadCM3 diffèrent peu d'un scénario à l'autre. Il en est de même pour la représentativité, qui pose problème seulement pour un horizon du bassin du Sassandra.

b. CSIRO\_Mk2

i. Différences de prévisions suivant le scénario

Comme précédemment, les différences de prévisions entre les deux types de scénarii sont observées pour les bassins du Sénégal et de la Gambie (tableau 5.6).

La tendance à l'augmentation des débits du bassin du Sénégal en 2020 est plus marquée avec le scénario Horizon. Il en est de même pour la tendance à la diminution en 2080, avec une différence de 29,1%. De plus, la diminution du taux moyen est plus rapide puisqu'il devient négatif dès le second horizon. Les variations du taux moyen d'un horizon à l'autre, d'environ 40%, sont alors plus fortes.

Le bassin de la Gambie conserve sa tendance à la diminution avec quelques changements. Le taux moyen est d'abord proche de zéro, alors qu'il était de -9,4% avec le scénario Anomalie, pour finalement présenter une diminution plus marquée qu'avec Anomalie aux horizons 2050 et 2080.

**Tableau 5.6 – Taux moyens de variation des débits pour chaque bassin avec les scénarii Anomalie (colonne blanche) et Horizon (colonne grise)**

	Sénégal		Gambie		Sassandra		Chari	
2020	23,3	37,6	-9,4	-0,3	-26,9	-25,4	-6,4	-5,8
2050	5,5	-13,2	-19,7	-30,3	-40,5	-39,4	-7,4	-3,4
2080	-24,8	-53,9	-42,8	-61,6	-60,9	-59,7	-17,3	-16,4

Comme précédemment, malgré quelques différences, les tendances d'évolution des débits de chaque bassin sont semblables à celles obtenues avec le scénario Anomalie. L'interprétation précédente est alors applicable à ces nouvelles prévisions. Il suffit alors de vérifier la représentativité des taux moyens, qui suivra sûrement les conclusions obtenues avec Anomalie.

ii. Représentativité des taux de variation moyens

La représentativité du taux moyen est ici à étudier pour les bassins du Sénégal en 2050, du Sassandra en 2020, ainsi que ceux de la Gambie en 2020 et 2050 et du Chari à tous les horizons.

Le taux moyen du bassin du Sénégal en 2050 est significativement négatif alors que l'intervalle des taux de variation atteint 29,8%. La proportion de sous bassins présentant une diminution significative de leur débit est de 58,3% (figure 5.25) ; le taux moyen est alors représentatif du comportement global du bassin.

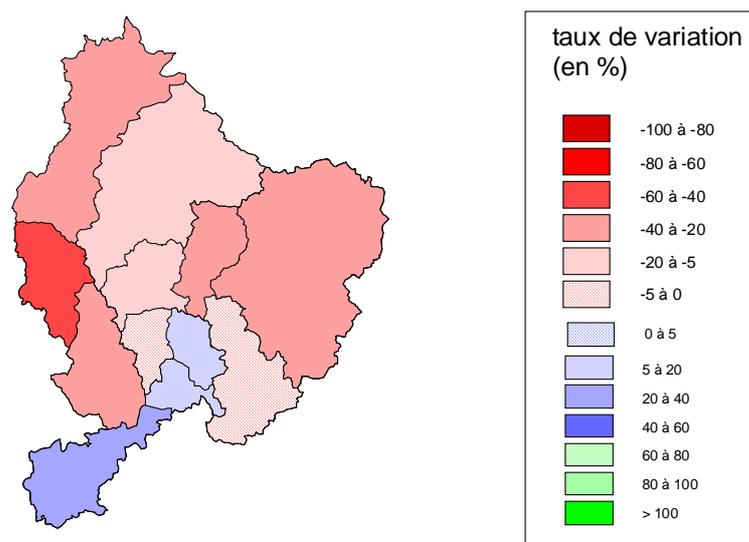


Figure 5.25 – Prévisions hydrologiques des sous bassins du Sénégal en 2050

A l'horizon 2020, l'intervalle des taux de variation des débits du bassin du Sassandra atteint 15,5% alors que son taux moyen est de -25,4%. Cela dit, de la même façon que pour le scénario Anomalie, seul le sous bassin Nibehibe est responsable de ce taux positif (figure 5.26). La représentativité du taux moyen n'est alors pas remise en cause.

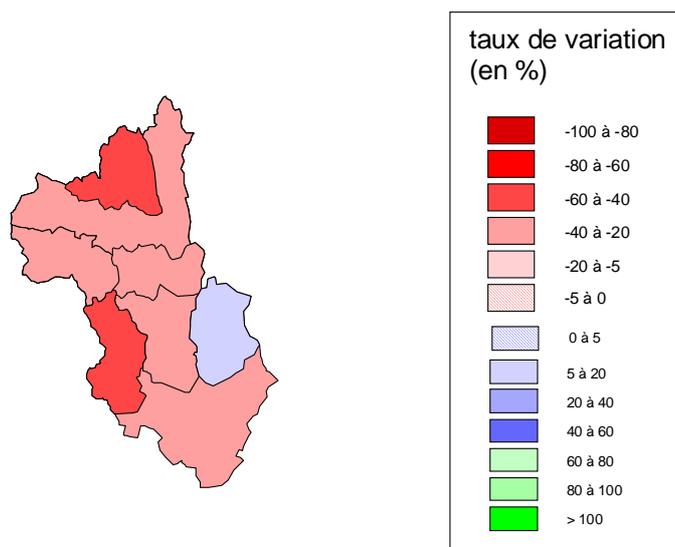


Figure 5.26 – Prévisions hydrologiques des sous bassins du Sassandra en 2020

L'intervalle des taux de variation des sous bassins de la Gambie, en 2020, va de -44,2% à 22,8% pour un taux moyen de -0,3%. Il est difficile de dégager la tendance générale de ce bassin qui présente une augmentation significative des débits et une faible évolution pour une même proportion de sous bassins, soit 42,8% (figure 5.27). Le taux moyen n'est que le résultat des opposition entre les sous bassins à taux significativement positif et le sous bassin à taux fortement négatif.

Pour l'horizon 2050, la tendance est clairement à la diminution des débits, avec 91,8% des sous bassins présentant cette prévision. Le taux moyen, de -30,3%, est alors représentatif du comportement global du bassin.

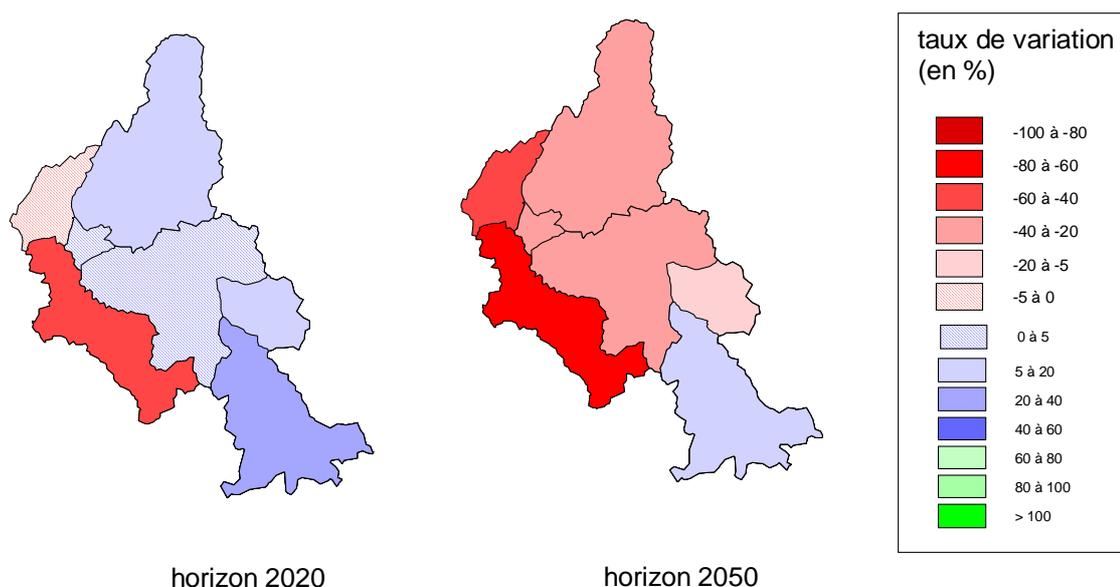


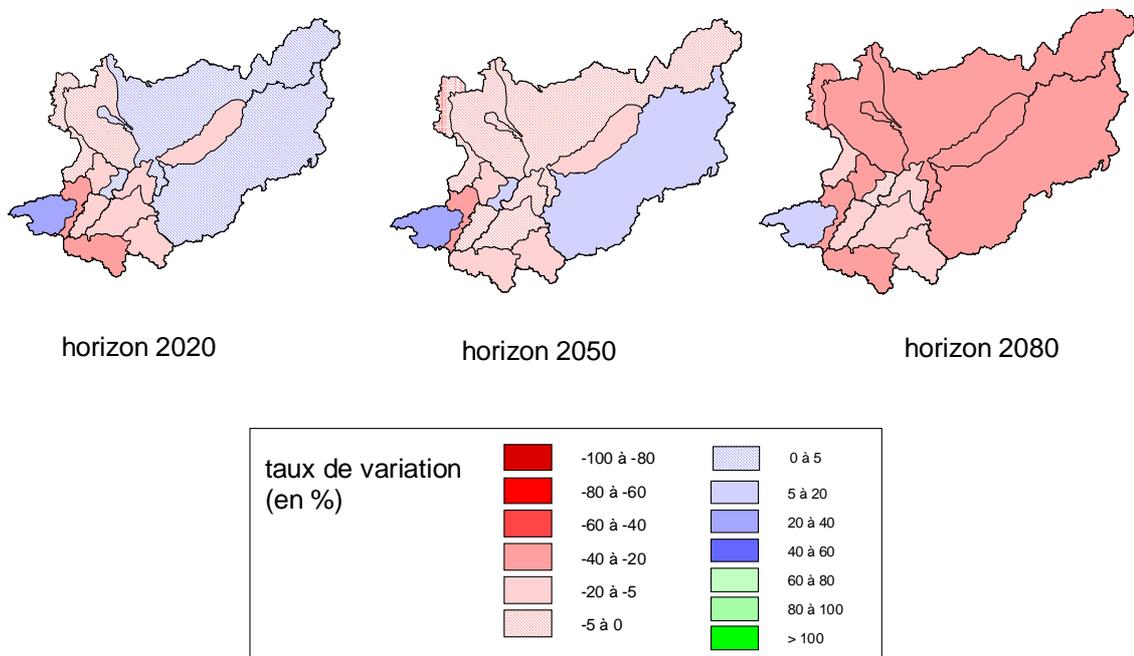
Figure 5.27 – Prévisions hydrologiques des sous bassins de la Gambie en 2020 et 2050

A tous les horizons, les taux de variation des sous bassins du Chari présentent un large intervalle avec un écart d'environ 40%.

En 2020, le taux moyen de variation est de -6,4%. Même si la majorité des sous bassins prévoit une augmentation significative de leur débit, cette tendance n'est pas si nette. D'abord, cette majorité, de seulement 53,3%, est faible ; de plus, la majorité n'est pas représentée si l'on prend en compte la superficie de ces sous bassins, qui est de seulement 23,7% (figure 5.28). Il est alors difficile d'obtenir un taux de variation moyen représentatif du comportement du bassin.

En 2050, le taux moyen représente une faible variation, ce qui correspond au comportement de 46,7% des sous bassins et de 47,8% de la superficie, soit 287937 km<sup>2</sup>. Ainsi, seul le comportement d'une faible majorité du bassin est représenté par le taux moyen.

A l'horizon 2080, 86,7% des sous bassins prévoient une diminution significative des débits. Le taux moyen étant de -16,4%, il n'y pas de problème de représentativité.



**Figure 5.28 – Prévisions hydrologiques des sous bassins du Chari à tous les horizons**

Ainsi, bien que les taux moyens soient proches, on peut noter quelques différences quand à leur représentativité suivant le scénario utilisé. Avec le scénario Anomalie, les prévisions hydrologiques du modèle climatique CSIRO\_Mk2 ne posaient aucun problème de représentativité par un taux moyen. Par contre, avec le scénario Horizon, les bassins de la Gambie en 2020 et du Chari en 2020 et 2050 pose problème.

c. NCAR\_PCM

i. Différences de prévisions suivant le scénario

Les prévisions hydrologiques obtenues avec le modèle climatique NCAR\_PCM sont semblables d'un scénario à l'autre seulement pour le bassin du Gambie (tableau 5.7). Pour les bassins du Sénégal, du Sassandra et du Chari, on observe, à tous les horizons, des différences entre les taux moyens de chaque prévision.

Pour les bassins du Sénégal et du Sassandra, le scénario Anomalie prévoyait des taux moyens faibles, qui laissait prévoir alors une reproduction du comportement des débits de la période de référence. Au contraire, le scénario Horizon prévoit une augmentation significative des débits, excepté pour le bassin du Sénégal en 2020. Ainsi, les taux moyens atteignent jusqu'à 10,9% pour le Sénégal et 12,4% pour le Sassandra en 2050, puis diminuent en 2080, en restant tout de même supérieurs à 8,9%.

Les prévisions hydrologiques du bassin du Chari sont aussi différentes suivant le scénario utilisé. Avec Anomalie, les taux moyens étaient d'abord faibles pour finalement atteindre -6,1%. Avec le scénario Horizon, la tendance est d'abord à l'augmentation significative des débits, puis à la diminution significative jusqu'à -53,2%.

**Tableau 5.7 – Taux moyens de variation des débits pour chaque bassin avec les scénarii Anomalie (colonne blanche) et Horizon (colonne grise)**

	Sénégal		Sassandra		Chari		Gambie	
2020	-3,5	1,6	0,3	7,4	-3,7	18,7	5,3	6,0
2050	0,3	10,9	1,5	12,4	-1,4	-15,0	12,7	14,3
2080	-2,0	9,4	-1,6	8,9	-6,1	-53,2	9,6	9,8

Etant donné que les prévisions obtenues avec le scénario Horizon sont très différentes des précédentes pour les bassins du Sénégal, du Sassandra et du Chari, il faut étudier à nouveau les liens entre précipitations et débits.

ii. Liens entre précipitations et débits

Les prévisions pluviométriques issues du modèle climatique NCAR\_PCM avec le scénario Horizon peuvent se résumer comme suit :

- zone 1 : taux moyen faible en 2020, puis significativement positif
- zones 3 et 7 : taux moyen faible compris entre -1,3% et 1,5%
- zones 2 et 4 : taux moyen faible en 2020, puis significativement négatif
- zone 5 : pas représentable par un taux moyen

L'augmentation des débits observée pour le bassin du Sénégal peut s'expliquer par le fait que ce bassin est situé en partie sur la zone 1, zone d'augmentation significative des précipitations.

La tendance à la diminution des débits du bassin du Chari aux deux derniers horizons est cohérente avec les prévisions pluviométriques puisqu'il est situé en zone 2, zone de diminution significative des précipitations.

Par contre, les comportements des bassins du Sassandra et de la Gambie, avec des taux moyens correspondant à une augmentation des débits, ne suivent pas les prévisions pluviométriques des zones 3 et 7, à faible évolution des précipitations.

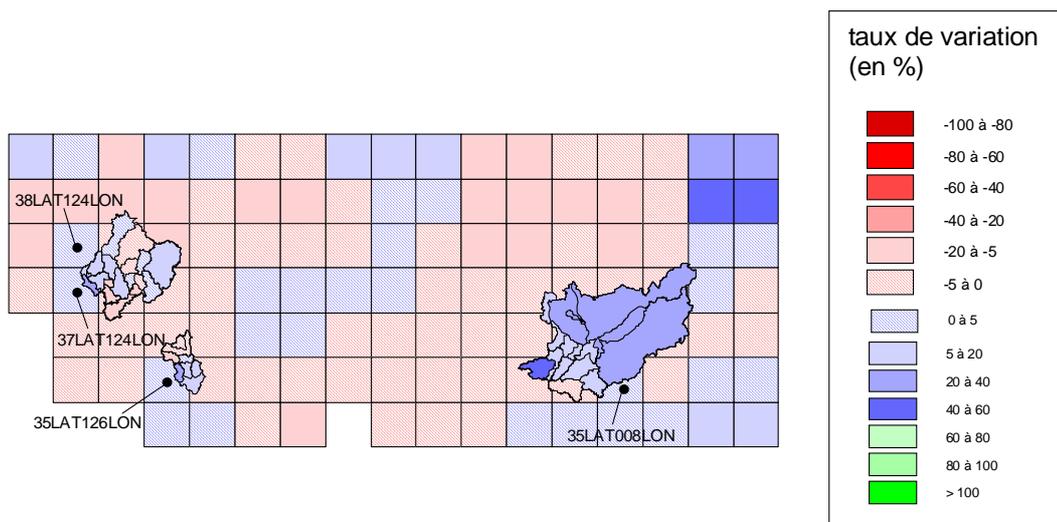
Etudions alors le lien entre les précipitations et les débits à l'échelle des cellules du modèle NCAR\_PCM.

On observe que les cellules 37LAT124LON et 38LAT124LON prévoient une faible augmentation des précipitations en 2020 (figure 5.29). Cette faible augmentation, amplifiée par le modèle hydrologique (Ardoin-Bardin, 2004), est alors à l'origine de l'augmentation des débits du bassin de la Gambie.

La cellule 35LAT126LON, aussi à faible augmentation des précipitations, est à l'origine de l'augmentation des débits observée pour le bassin du Sassandra.

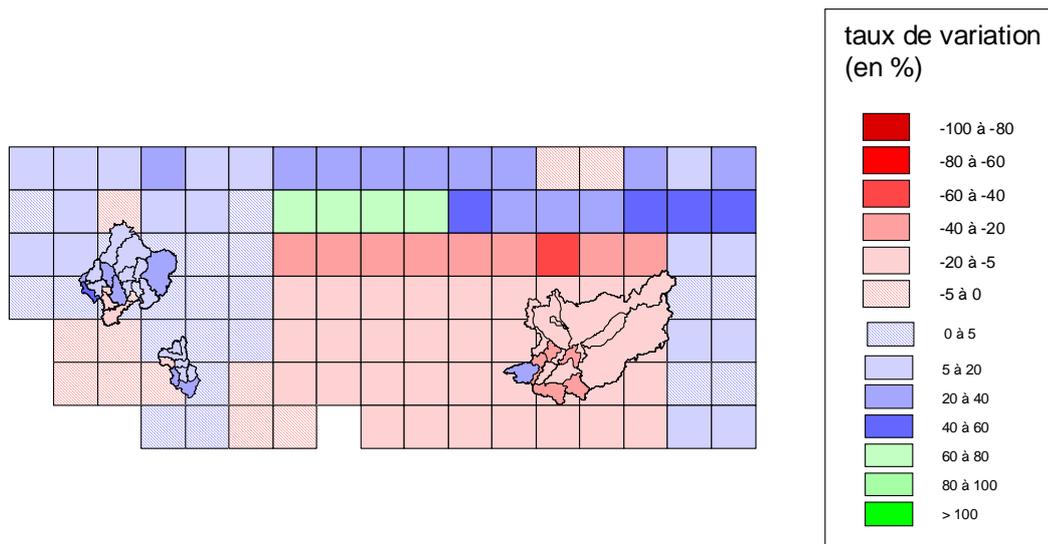
Pour le bassin du Chari, l'augmentation faible des précipitations pour la cellule 35LAT008LON explique en partie l'augmentation des débits. Ce bassin fera l'objet d'une étude plus approfondie pour expliquer complètement l'origine de l'augmentation significative des débits en 2020.

Enfin, les prévisions hydrologiques mitigées obtenues pour les sous bassins du Sénégal devront aussi être étudiées plus précisément pour faire apparaître le lien avec les prévisions pluviométriques. En effet, toutes les cellules liées à ce bassin présentent ici une diminution des précipitations alors que certains sous bassins prévoient une augmentation des débits.



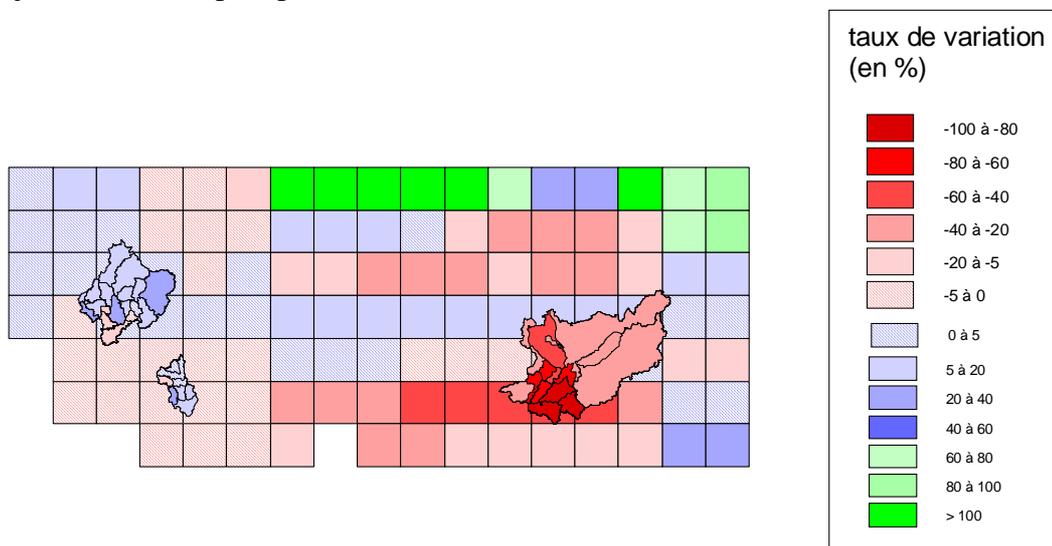
**Figure 5.29 – Superposition des prévisions pluviométriques (à l'échelle de NCAR\_PCM) et hydrologiques (en chaque sous bassin) en 2020**

A l'horizon 2050, les tendances à l'augmentation ou à la diminution des débits sont clairement liées aux prévisions pluviométriques à l'échelle des cellules (figure 5.30). Comme précédemment, les tendances, faibles au niveau des précipitations, sont amplifiées au niveau des prévisions des débits.



**Figure 5.30 – Superposition des prévisions pluviométriques (à l'échelle de NCAR\_PCM) et hydrologiques (en chaque sous bassin) en 2050**

La remarque précédente est valable pour l'horizon 2080 (figure 5.31), excepté pour les bassins du Sassandra et du Chari. En effet, la tendance à l'augmentation (diminution) des débits pour le bassin du Sassandra (Chari) ne s'explique pas clairement par l'étude des prévisions pluviométriques à l'échelle du modèle climatique NCAR\_PCM. Ces bassins feront alors l'objet d'une étude plus précise.



**Figure 5.31 – Superposition des prévisions pluviométriques (à l'échelle de NCAR\_PCM) et hydrologiques (en chaque sous bassin) en 2080**

Ainsi, la plupart des évolutions des débits prévues sont liées à l'amplification par le modèle hydrologique des faibles évolutions des précipitations.

### iii. Représentativité des taux moyens de variation

D'après les intervalles des taux de variation des débits, la représentativité du taux moyen est à vérifier pour les bassins du Sénégal et de la Gambie à tous les horizons, pour celui du Sassandra en 2020 et 2080 et pour le Chari en 2050.

L'intervalle des taux de variation, en 2020, du bassin du Sénégal s'étend de -12,9% à 16,2% avec un taux moyen de 1,6%. Aux horizons 2050 et 2080, l'intervalle débute à environ -8% alors que les taux moyens sont significativement positifs.

Malgré cela, les taux moyens aux trois horizons sont bien représentatifs du comportement global du bassin (figure 5.32). En effet, 58,3% des sous bassins prévoient une évolution faible des débits en 2020. Ensuite, pour les horizons 2050 et 2080, 75% des sous bassins prévoient une augmentation significative des débits. Ces tendances générales correspondent bien à celles exprimées par les taux moyens.

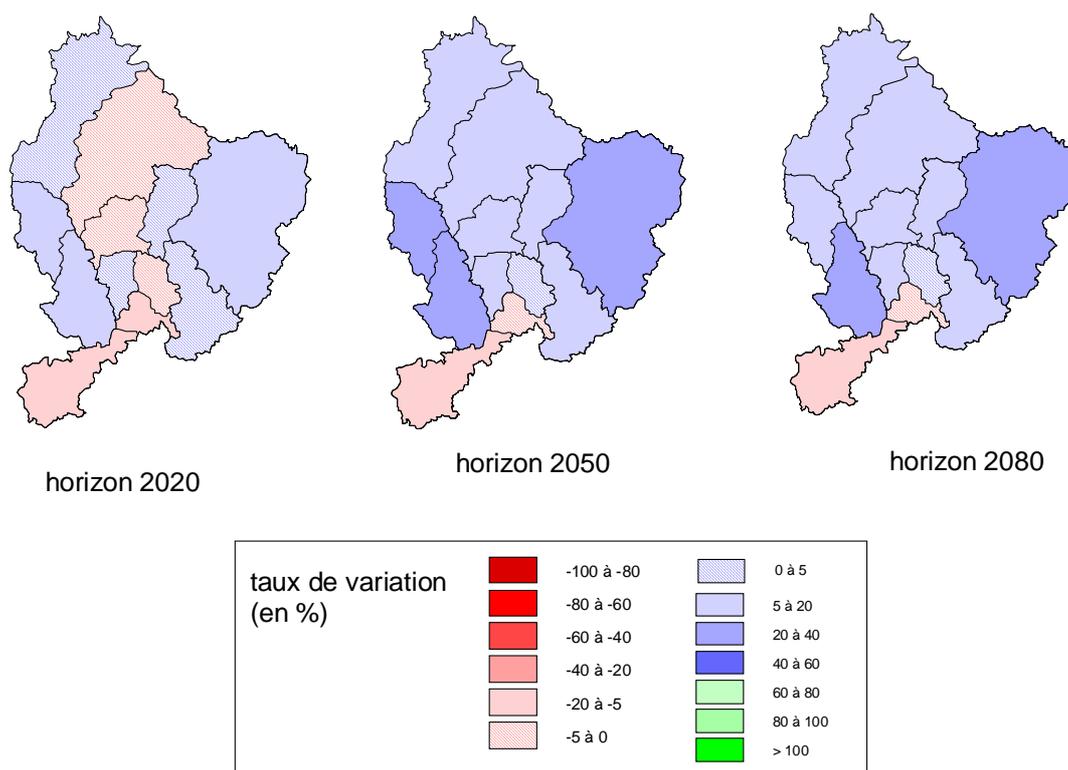
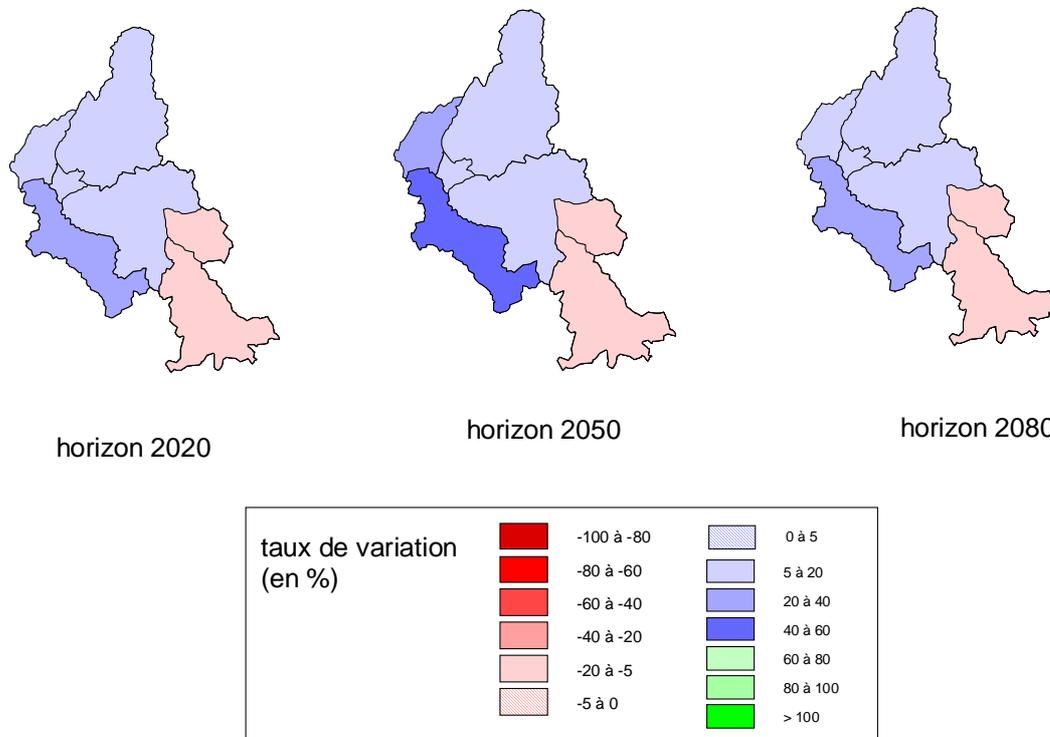


Figure 5.32 – Prévisions hydrologiques pour les sous bassins du Sénégal à tous les horizons

A tous les horizons, les taux moyens de variation des débits de la Gambie correspondent à des augmentations significatives alors que ses intervalles débutent aux alentours de -15%. Malgré cela, puisque la proportion de sous bassins prévoyant une augmentation significative des débits est de 71,4% (figure 5.33), les taux moyens sont bien représentatifs du comportement global du bassin.



**Figure 5.33 – Prévisions hydrologiques des sous bassins de la Gambie à tous les horizons**

Aux horizons 2020 et 2080, les intervalles des taux de variation des sous bassins du Sassandra débutent aux alentours de -8%, alors que les taux moyens sont significativement positifs. Pour ces deux horizons, la proportion de sous bassins présentant une augmentation significative des débits n'est que de 50% (figure 5.34). Les autres tendances observées sont la diminution significative pour 12,5% d'entre eux et une faible évolution pour 37,5%. Si l'on considère tous les sous bassins présentant une augmentation de débits, faible ou significative, la proportion est de 62,5% pour l'horizon 2020 et 87,5% pour l'horizon 2050. On peut alors considérer que les taux moyens sont représentatifs de la tendance globale à l'augmentation des débits.

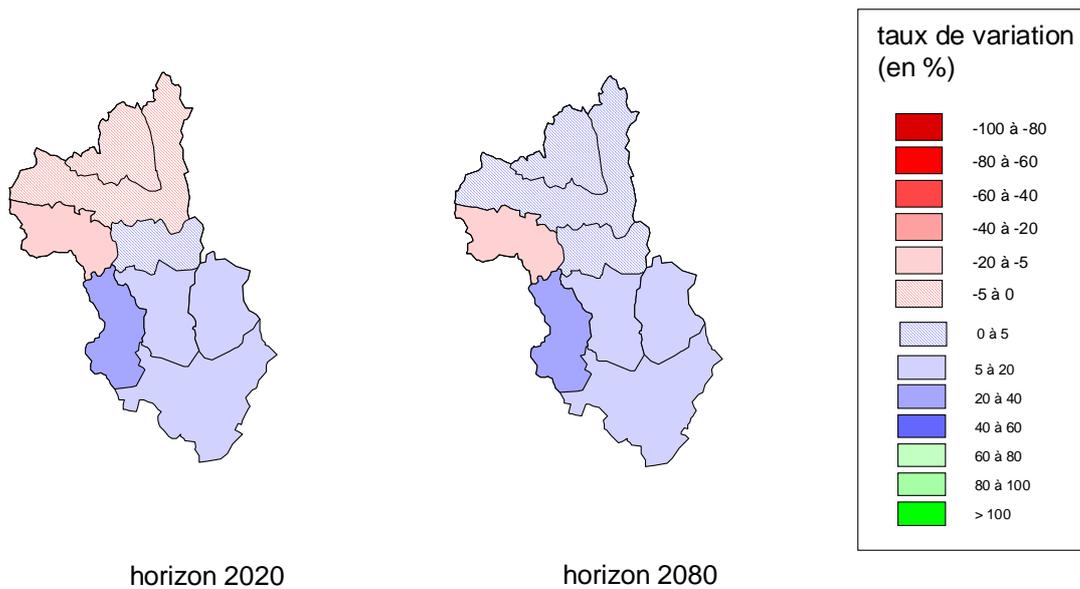


Figure 5.34 – Prévisions hydrologiques des sous bassins du Sassandra aux horizons 2020 et 2080

A l’horizon 2050, le bassin du Chari a un intervalle de taux de variation allant jusqu’à 30,3%, alors que son taux moyen est de -15%. Cela dit, l’augmentation des débits étant prévue seulement pour Baibokoum, la tendance générale, comme le taux moyen, est bien à la diminution significative (figure 5.35).

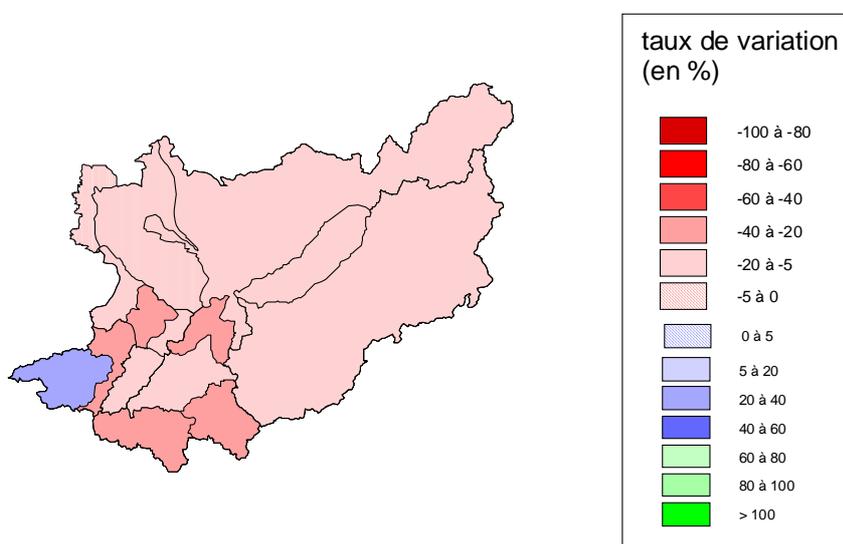


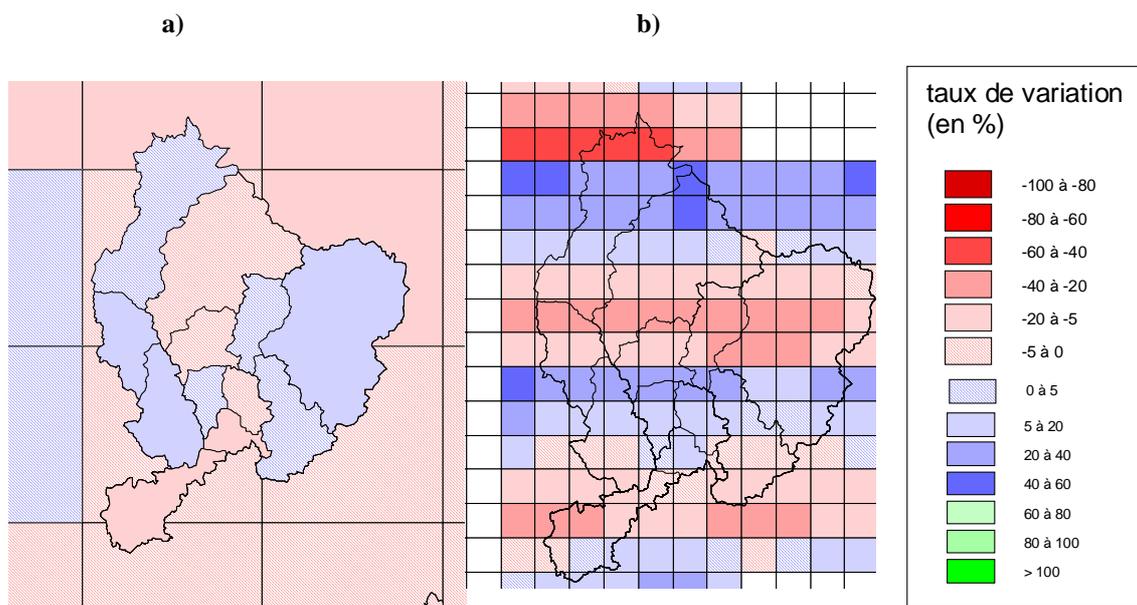
Figure 5.35 – Prévisions hydrologiques des sous bassins du Chari à l’horizon 2020

Ainsi, contrairement aux nombreux problèmes de représentativité rencontrés avec les prévisions d’Anomalie, celles obtenues en appliquant le scénario Horizon sont bien représentées par le taux moyen pour chaque bassin et à tous les horizons.

iv. Etude plus approfondie des bassins du Sénégal et du Chari

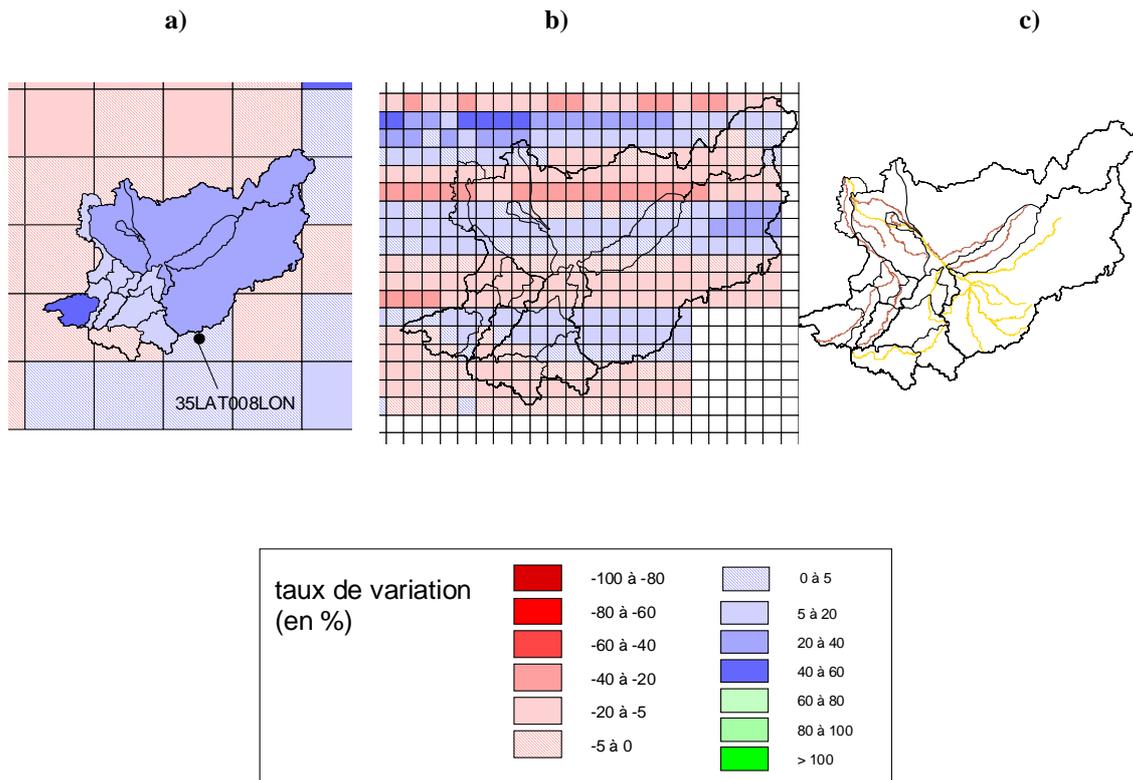
L'étude suivante a pour but de déterminer clairement les liens entre précipitations et débits. Pour la plupart des cas, il s'agit d'expliquer ce lien en s'appuyant sur des taux de variation des précipitations à échelle plus fine.

Le comportement de quelques sous bassins du Sénégal en 2020 ne correspond pas aux prévisions pluviométriques (figure 5.36a). En effet, à l'échelle du modèle climatique NCAR\_PCM, les précipitations diminuent faiblement ou fortement sur cette zone, alors que quelques sous bassins présentent une augmentation de leur débit. Cela dit, l'étude des prévisions des précipitations au demi degré justifie le comportement de ces sous bassins (figure 5.36b).



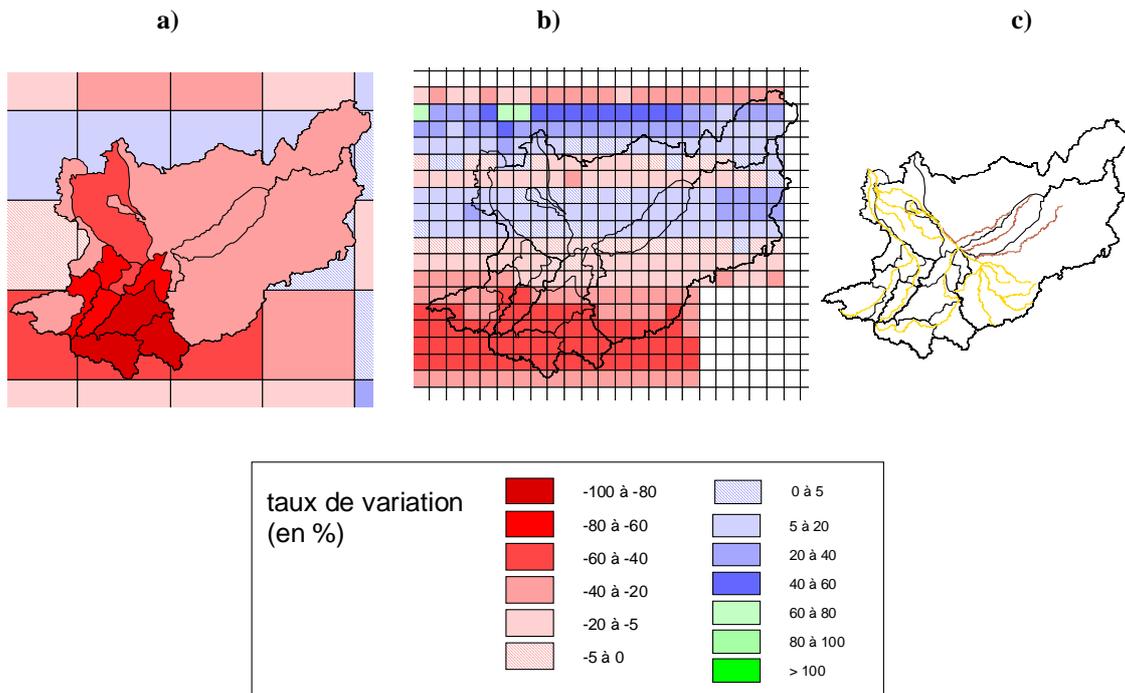
**Figure 5.36 – (a) Superposition des prévisions pluviométriques (à l'échelle du modèle climatique) et hydrologiques (en chaque sous bassin) et (b) prévisions pluviométriques (à l'échelle du demi degré) pour le bassin du Sénégal à l'horizon 2020**

Pour le bassin du Chari, à l'horizon 2020, les prévisions correspondent à une augmentation significative des débits alors qu'une seule cellule, dans cette zone, prévoit une augmentation des précipitations (figure 5.37a). Cette cellule, référencée 35LAT008LON, draine seulement les sous bassins Batafango et Sahr. Ces derniers étant situés en amont, l'influence de la cellule est finalement plus grande (figure 5.37c). Ceci explique la provenance des prévisions à l'augmentation des débits pour quelques sous bassins. Pour justifier ce comportement pour tous, il faut étudier les prévisions pluviométriques à l'échelle du demi degré carré (figure 5.37b). En effet, même si la tendance générale est à la faible diminution des précipitations, quelques rangées de cellules, à l'échelle du demi degré et situées aux latitudes 7°N et 10°N, prévoit une augmentation des précipitations. On explique ainsi la tendance à l'augmentation des débits de tous les sous bassins du Chari.



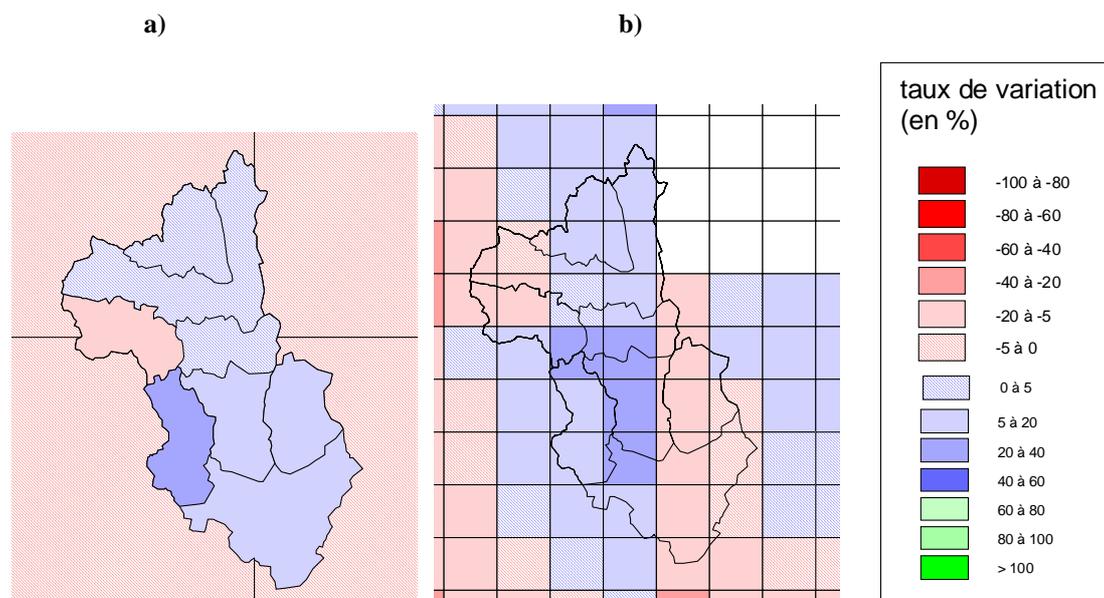
**Figure 5.37 – (a) Superposition des prévisions pluviométriques (à l'échelle du modèle climatique) et hydrologiques (en chaque sous bassin), (b) prévisions pluviométriques (au demi degré) et (c) réseau hydrologique simplifié (en jaune les sous bassins dépendant de l'irrigation de la cellule 35LAT008LON et en marron ceux qui en sont indépendants) pour le Chari en 2020**

Pour l'horizon 2080, la forte diminution des débits en chaque sous bassin est justifiée, pour la majorité d'entre eux, par les prévisions, à l'échelle du modèle climatique, de fortes diminutions des précipitations et le réseau hydrologique du bassin du Chari. En effet, ces cellules particulières drainent les sous bassins situés en amont (figure 5.38a), qui influencent ensuite les sous bassins en aval (figure 5.38c). La tendance à la forte diminution de tous les sous bassins est ainsi justifiée, excepté pour Hellibongo, dont les prévisions hydrologiques s'expliquent par les prévisions climatiques au demi degré (figure 5.38b).



**Figure 5.38 – (a) Superposition des prévisions pluviométriques (à l'échelle du modèle climatique) et hydrologiques (en chaque sous bassin), (b) prévisions pluviométriques (au demi degré) et (c) réseau hydrologique simplifié (en jaune les sous bassins dépendant des cellules à diminution des précipitations et en marron ceux qui en sont indépendant) pour le Chari en 2080**

Pour le bassin du Sassandra et à l'horizon 2080, le modèle hydrologique prévoit une augmentation des débits, alors que ce bassin est situé dans une zone de diminution des précipitations (figure 5.39a). Le passage des prévisions pluviométriques à l'échelle du demi degré montre que les évolutions des débits sont alors cohérentes avec les précipitations (figure 5.39b).



**Figure 5.39 – (a) Superposition des prévisions pluviométriques (à l'échelle du modèle climatique) et hydrologiques (en chaque sous bassin) et (b) prévisions pluviométriques au demi degré pour le bassin du Sassandra à l'horizon 2080**

#### d. ECHAM4

##### i. Différences de prévisions suivant le scénario

La tendance globale des prévisions est à l'augmentation des débits, comme pour le scénario Anomalie, puisque tous les taux de variation moyens sont supérieurs à 15,8% (tableau 5.8). Pour les bassins du Sénégal et de la Gambie, les prévisions obtenues avec le scénario Horizon sont semblables à celles obtenues avec Anomalie, avec des taux moyens du même ordre de grandeur. De plus, comme pour Anomalie, le taux moyen augmente progressivement au cours des horizons.

Par contre, on observe quelques différences pour les bassins du Sassandra et du Chari. Les débits du Sassandra sont ici constants d'un horizon à l'autre avec toujours un taux moyen autour de 17% par rapport à la période de référence. Au contraire, avec le scénario Anomalie, on observait un doublement du taux de variation de 2050 à 2080. Pour le bassin du Chari, les taux de variation très importants observés avec le scénario Anomalie sont de 25,1% à 114,5% plus faibles avec le scénario Horizon. Ainsi, le taux maximal, de 146,8%, atteint en 2080 avec Anomalie, n'est plus que de 51,2% et est atteint en 2020. De plus, l'évolution du taux moyen est différente, avec une baisse de celui-ci au cours du XXIème siècle alors que le scénario Anomalie prévoyait une hausse.

**Tableau 5.8 – Taux moyens de variation des débits pour chaque bassin avec les scénarii Anomalie (colonne blanche) et Horizon (colonne grise)**

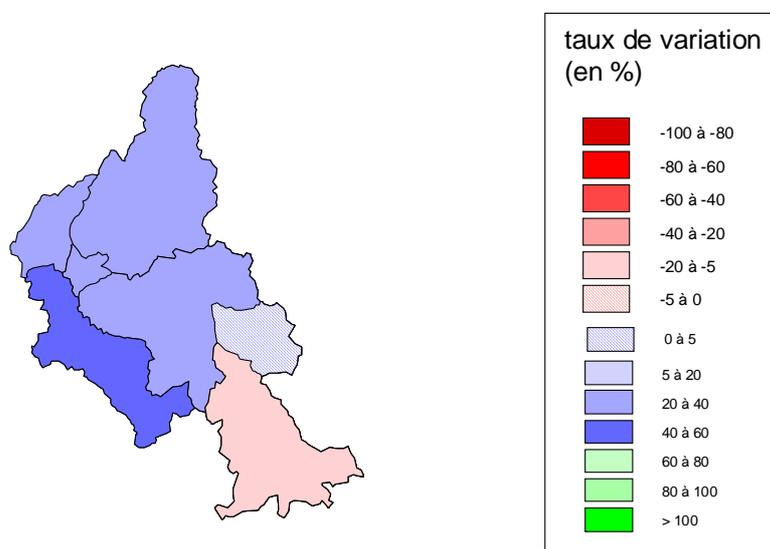
	Sénégal		Gambie		Sassandra		Chari	
2020	19,5	22,5	19,7	23,6	17,1	18,0	76,3	51,2
2050	24,6	24,1	24,9	26,4	17,7	17,9	98,5	38,2
2080	26,1	30,3	28,7	33,3	30,6	15,8	146,8	32,3

Les différences notées entre les prévisions des deux types de scénarii n’influent pas sur le comportement global des prévisions. Ainsi, les conclusions obtenues précédemment avec le scénario Anomalie sont applicables aux prévisions avec le scénario Horizon.

## ii. Représentativité des taux de variation moyens

Quand à la représentativité du taux moyen pour les prévisions hydrologiques obtenues avec les données du modèle climatique ECHAM4 avec le scénario Horizon, seul le bassin de la Gambie, à l’horizon 2020, doit être vérifié.

En effet, l’intervalle des taux du bassin de la Gambie, à l’horizon 2020, débute à -6,8%, alors que le taux moyen correspond à une augmentation significative. Ce taux négatif étant dû seulement au sous bassin Kedougou (figure 5.40), le taux moyen est bien représentatif du comportement global du bassin.



**Figure 5.40 – Prévisions hydrologiques des sous bassins de la Gambie à l’horizon 2020**

En conclusion, le taux moyen de variation des débits par bassin ne représente pas bien les prévisions du scénario Horizon pour le bassin du Sassandra en 2080 avec le modèle climatique HadCM3 et pour les bassins de la Gambie et du Chari en 2020 avec le modèle climatique CSIRO\_Mk2. Contrairement au cas du scénario Anomalie, il n’y a aucun problème de représentation pour les prévisions hydrologiques issues des données du modèle climatique NCAR\_PCM. Ceci peut être intéressant pour la suite de l’interprétation, puisque les conclusions ne seront pas faites sur exactement les mêmes modèles climatiques qu’avec le scénario Anomalie.

e. Comparaisons inter modèles climatiques pour chaque bassin

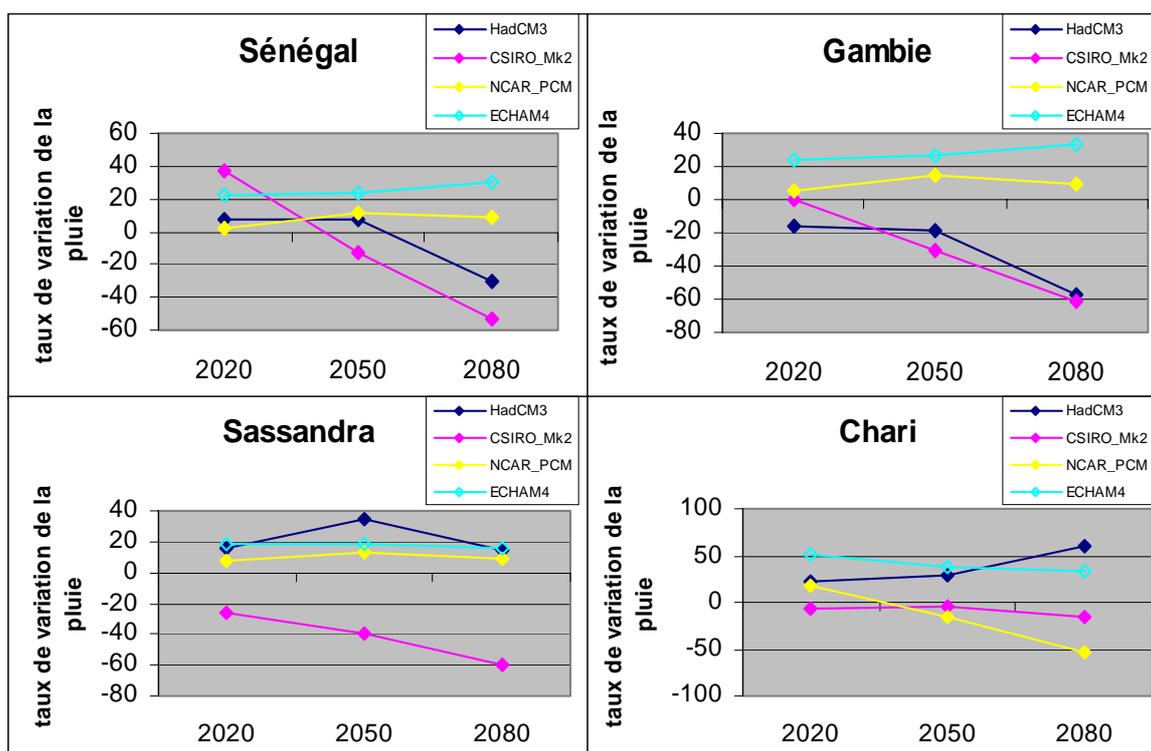


Figure 5.41 – Evolution des taux moyens de variation des débits pour chaque bassin

i. Le bassin du Sénégal

Les prévisions de comportement des débits des bassins du Sénégal ont deux tendances distinctes (figure 5.41) :

- HadCM3 – CSIRO\_Mk2 : taux moyen d'abord positif qui diminue vers des valeurs négatives (plus rapidement pour le second modèle climatique) atteignant -30,6% avec HadCM3 et -53,9% avec CSIRO\_Mk2
- NCAR\_PCM – ECHAM4 : tendance générale à l'augmentation des débits avec des taux moyens supérieurs à 1,6% puis à 9,4% et atteignant 10,9% pour NCAR\_PCM en 2050 et 30,3% pour ECHAM4 en 2080

De plus, on remarque que les prévisions issues des quatre modèles climatiques s'accordent pour une augmentation des débits au premier horizon avec des taux moyens positifs.

ii. Le bassin de la Gambie

Le regroupement des modèles climatiques est le même que précédemment, mais pour des prévisions clairement distinctes :

- HadCM3 – CSIRO\_Mk2 : tendance à la diminution des débits qui s'accroît au cours des horizons avec des taux moyens inférieurs à -0,3% et allant jusqu'à -57,4% pour HadCM3 et -61,6% pour CSIRO\_Mk2 en 2080

- NCAR\_PCM – ECHAM4 : tendance claire à l'augmentation des débits avec des taux moyens supérieurs à 6% et atteignant 14,3% en 2050 pour NCAR\_PCM et 33,3% en 2080 pour ECHAM4

L'évolution des taux moyens des deux derniers modèles climatiques au cours du XXIème siècle est différente avec une augmentation puis une diminution du taux moyen avec NCAR\_PCM, alors qu'on observe une augmentation progressive avec ECHAM4. De plus, bien que la tendance soit la même, l'augmentation des débits prévue en utilisant les données du modèle climatique ECHAM4 est plus forte que celle de NCAR\_PCM avec une différence de 12,1% à 23,5%.

### iii. Le bassin du Sassandra

Pour le bassin du Sassandra, trois modèles climatiques s'accordent, HadCM3, NCAR\_PCM et ECHAM4, pour prévoir une augmentation des débits, avec des taux moyens supérieurs à 7,4%. Au contraire, les prévisions hydrologiques issues de CSIRO\_Mk2 correspondent à une diminution significative des débits, qui s'intensifie au cours du XXIème siècle, allant de -26,9% à -60,9%.

Il faut tout de même noter que, pour la première tendance décrite, il y a des différences parmi les trois modèles climatiques. D'abord, l'importance de l'augmentation diffère d'un modèle à l'autre. En effet, avec HadCM3, le taux moyen atteint 35,1% alors que le maximum de NCAR\_PCM est 12,4% et celui de ECHAM4 est 18%. De plus, l'évolution du taux moyen diffère avec une augmentation puis une diminution pour les modèles HadCM3 et NCAR\_PCM alors qu'avec ECHAM4, le taux moyen diminue progressivement.

### iv. Le bassin du Chari

Pour les prévisions du bassin du Chari, deux tendances se démarquent :

- HadCM3 – ECHAM4 : tendance nette à l'augmentation des débits avec des taux moyens supérieurs à 21,6% et atteignant 58,9% pour HadCM3 en 2080 et 51,2% pour ECHAM4 en 2020
- CSIRO\_Mk2 – NCAR\_PCM : tendance à la diminution des débits avec des taux négatifs inférieurs à -3,4%, excepté pour le premier horizon avec NCAR\_PCM, et atteignant -16,4% avec CSIRO\_Mk2 et -53,2% avec NCAR\_PCM en 2080

Par contre, les évolutions du taux moyen sont différentes avec une augmentation progressive pour les prévisions de HadCM3 alors qu'ECHAM4 présente un taux moyen, important en 2020, mais qui diminue ensuite.

### f. Cartes synthétiques des prévisions avec le scénario Horizon

Les problèmes de représentation des résultats, moins nombreux qu'avec le scénario Anomalie, se posent pour le bassin du Sassandra avec HadCM3 et pour les bassins de la Gambie et du Chari avec CSIRO\_Mk2. Ces prévisions ne seront alors pas prises en compte pour les conclusions suivantes.

La figure 5.42 synthétise toutes les prévisions obtenues, de représentativité acceptable, avec le scénario Horizon.

Pour chaque bassin, on retrouve le même type de prévision : deux modèles climatiques qui s'accordent pour prédire une augmentation des débits et un troisième qui les contredit en prévoyant une diminution.

Pour les bassins de la Gambie et du Sassandra, ce sont, respectivement, les modèles climatiques HadCM3 et CSIRO\_Mk2 qui présentent une diminution des débits, alors que, dans les deux cas, les modèles NCAR\_PCM et ECHAM4 prédisent une augmentation des débits.

Il en est de même pour le bassin du Chari, avec NCAR\_PCM qui décrit la tendance à la diminution et HadCM3 et ECHAM4 la tendance à l'augmentation.

Pour le bassin du Sénégal, à ce schéma s'ajoute les prévisions mitigées du modèle climatique HadCM3, avec des augmentations de débits, puis une diminution. Ensuite, le modèle CSIRO\_Mk2 s'oriente vers une diminution et NCAR\_PCM et ECHAM4 s'accordent pour une tendance à l'augmentation.

Pour chaque bassin, la coexistence de prévisions opposées risque de rendre difficile les conclusions sur les prévisions possibles.

La figure 5.43 représente les prévisions les plus optimistes et les plus pessimistes obtenues en prenant en compte les résultats des modèles climatiques pouvant être représentés par un taux moyen.

Comme l'interprétation précédente le laissait deviner, l'éventail des prévisions est très large pour chaque bassin et à chaque horizon.

Nous pouvons tout de même dégager quelques conclusions au niveau du premier horizon de certains bassins. En effet, pour ceux du Sénégal et du Chari, les taux de variation les plus pessimistes des débits en 2020 sont positifs. Ainsi, ces deux bassins connaîtraient respectivement une augmentation des débits de 1,6% à 37,6% et de 18,7% à 51,2%. Pour le bassin du Sénégal, ces résultats ne sont pas forcément optimistes, puisque dans le pire des cas, ses débits n'évolueraient pratiquement pas par rapport à la période de référence 1971 – 1995 qui correspond à une période de sécheresse. Par contre, ces résultats sont clairement optimistes pour le bassin du Chari, puisqu'une augmentation d'au minimum 18,7% des débits serait sûrement assez conséquente pour avoir des répercussions positives sur les ressources en eau, et donc sur les populations de la région.

Les conclusions précédentes sont les seules que l'on puisse obtenir. En effet, dans tous les autres cas, les prévisions ayant le plus faible écart entre optimiste et pessimiste sont celles du Sénégal en 2050, avec un éventail de variation de 37,3%.

Excepté les deux cas étudiés précédemment, tous les taux moyens des prévisions pessimistes sont inférieurs à -13,2%, relativement à une période de sécheresse ; ces prévisions sont être alors très inquiétantes. Cela dit, les prévisions optimistes sont toutes supérieures à 15,8% ; celles-ci prévoient alors une évolution des ressources en eau qui permettrait de répondre aux besoins des populations en dépendant.

Au vu de ces résultats, il est alors impossible d'en tirer des conclusions concrètes pour orienter les choix des décideurs et des gestionnaires des ressources en eau de ces régions.

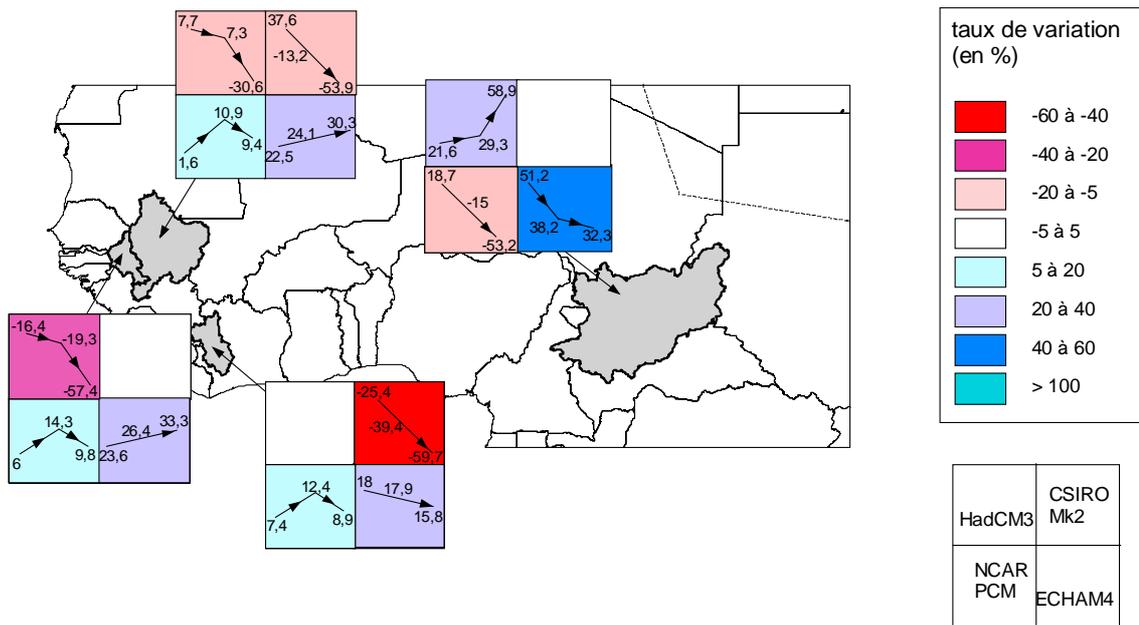


Figure 5.42 – Carte synthétique des prévisions hydrologiques avec la moyenne des taux moyens de variation et leur évolution pour les modèles de représentativité acceptable

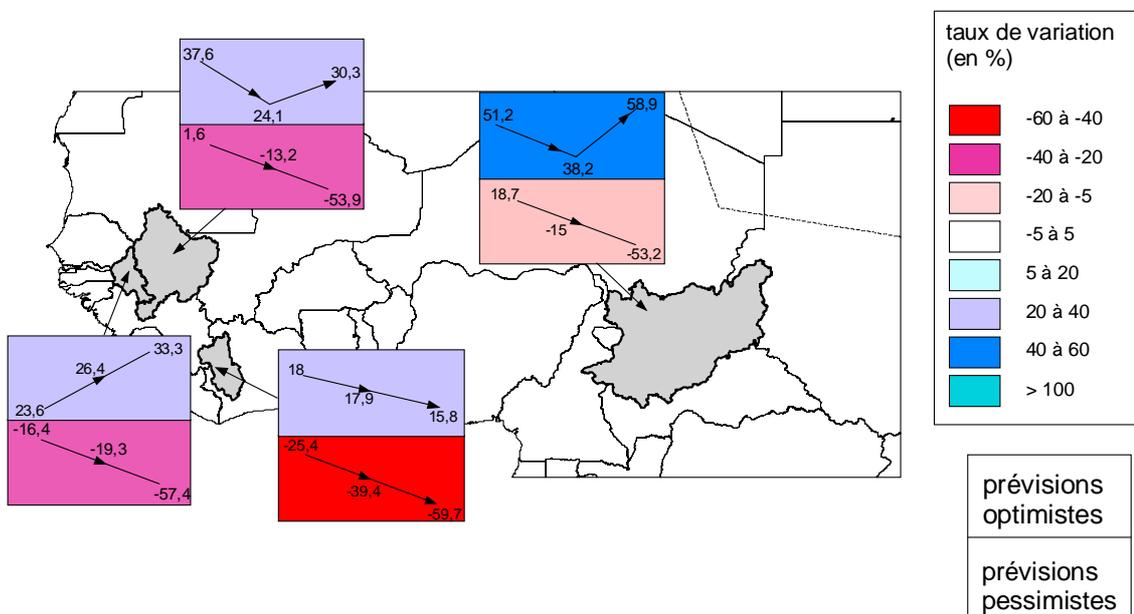


Figure 5.43 – Carte synthétique des prévisions les plus optimistes et les plus pessimistes parmi les prévisions de représentativité acceptable

## VI. Travail d'automatisation

Le travail d'automatisation n'était pas inclus dans le sujet initial du stage, mais la bonne avancée de mes travaux selon le calendrier fixé m'a permis de proposer ce second projet. Il a pour objectif de mettre en place un logiciel qui permet d'élaborer les prévisions climatiques selon la démarche adoptée précédemment. Ce logiciel a été conçu sous Delphi™ 6 (Teixeira et Pacheco, 2003). L'utilisateur n'a qu'à choisir sa fenêtre de travail, le modèle climatique et le scénario de correction à appliquer, ainsi que les périodes de référence et de prévisions qui l'intéressent (figure 6.1).

The screenshot shows a Windows-style dialog box titled 'Form1'. The main heading is 'Choisissez les paramètres :'. It contains five main sections:

- le modèle climatique :** Four radio buttons: HadCM3, CSIRO\_Mk2, NCAR\_PCM, and ECHAM4.
- le scénario :** Two radio buttons: Anomalie and Horizon.
- la fenêtre d'étude :** Four text input fields labeled: - latitude minimale, - latitude maximale, - longitude minimale, and - longitude maximale.
- les périodes de travail :** Four text input fields labeled: - date de début de la période de référence, - date de fin de la période de référence, - date de début de la période de prévision, and - date de fin de la période de prévision.
- type des données observées :** Two radio buttons: données du CRU and données personnelles.

An 'OK' button is positioned at the bottom center of the dialog.

Figure 6.1 – Interface de choix des paramètres de travail

### 1. Détermination des cellules de la fenêtre choisie

La définition et la caractérisation des cellules aux deux échelles utilisées étaient avant effectuées sous ArcView pour une fenêtre donnée. Ceci signifie qu'un individu voulant utiliser la méthode d'élaboration des prévisions climatiques devaient d'abord se familiariser avec le logiciel ArcView, définir la liste des cellules et leurs caractéristiques aux deux échelles et écrire ces informations sous un format particulier pour chaque modèle climatique à utiliser.

Le premier intérêt de l'automatisation est d'éviter cette étape qui peut amener plus facilement à des erreurs en étant effectuée « à la main » et permet de gagner un temps considérable sur la préparation des fichiers de données.

A partir des latitudes et longitudes minimales et maximales caractéristiques de la fenêtre choisie par l'utilisateur, différentes étapes, détaillées par la suite, permettent d'obtenir les cellules du modèle climatique et les cellules au demi degré qui nous intéresse. Nous pouvons résumer ces étapes de la manière suivante (figures de 6.2 à 6.6) :

- l'utilisateur choisit la fenêtre de travail (ici la République Démocratique du Congo) :

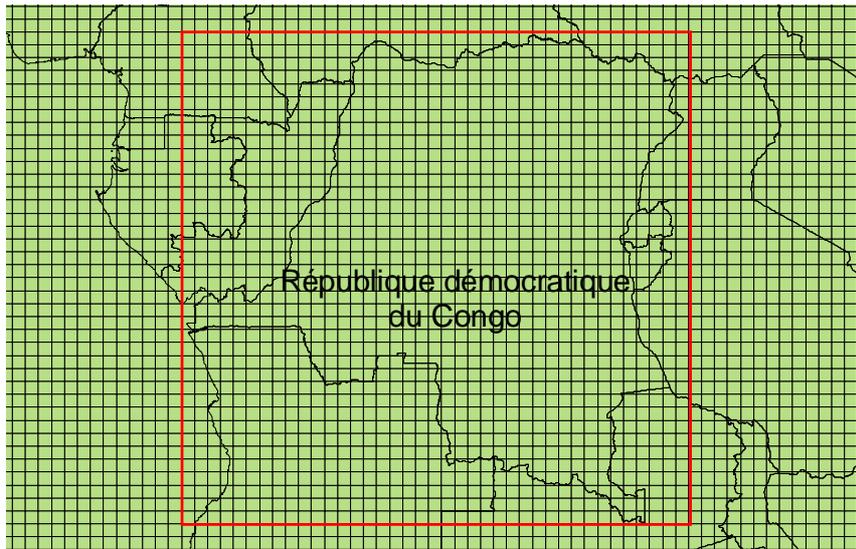
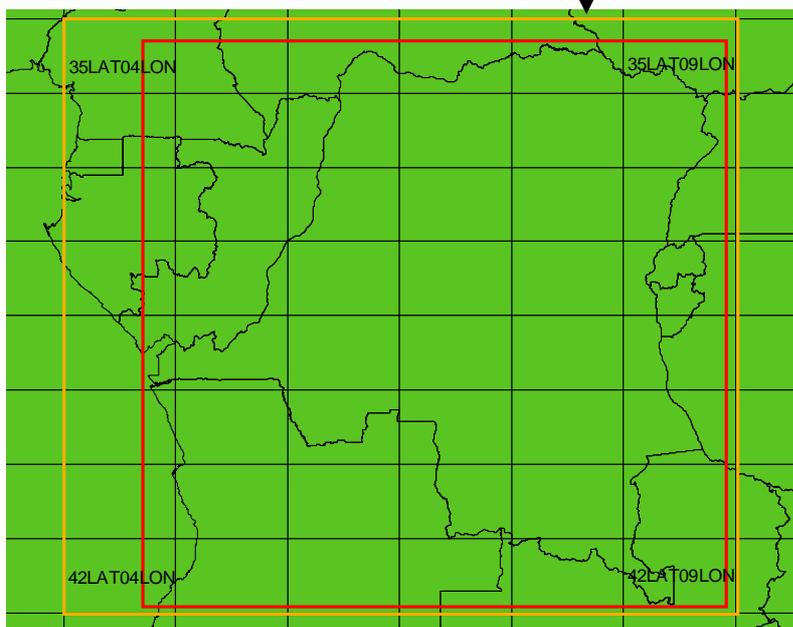


Figure 6.2 – Choix de la fenêtre de l'utilisateur



- étape a : sélection et listage des cellules GCM entières de la fenêtre (en élargissant la fenêtre initiale à la fenêtre de cellule GCM entières)

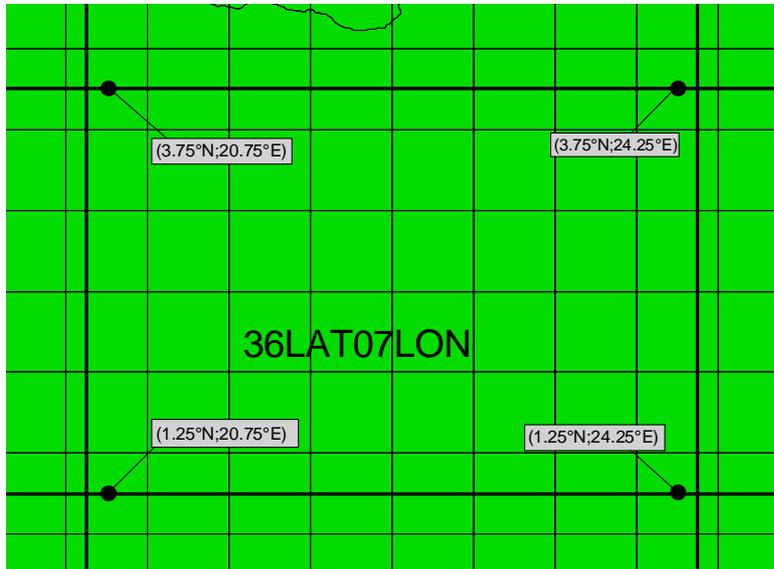


Avec le modèle HadCM3, la liste des cellules GCM à étudier est :

- les indices GCM des latitudes vont de 35 à 42
- les indices GCM des longitudes vont de 4 à 9

**Figure 6.3 – Détermination des cellules GCM (HadCM3) à étudier**

- étape b : pour chaque cellules GCM déterminée à l'étape précédente, listage des cellules au demi degré qui la constitue

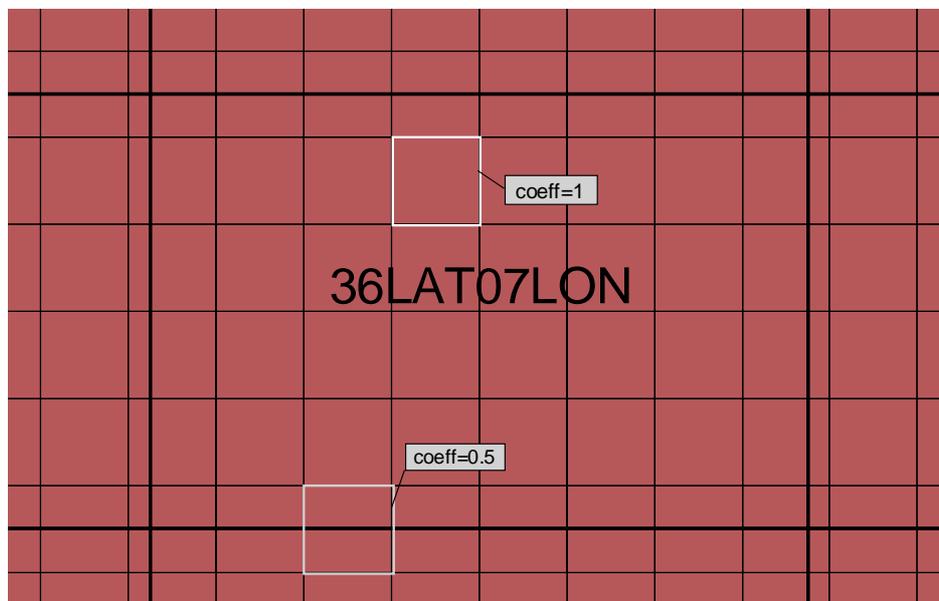


Pour la cellule GCM 36LAT07LON, la liste des cellules au demi degré qui la constitue est :

- les latitudes de 1.25°N à 3.75°N
- les longitudes de 20.75°E à 24.25°E

**Figure 6.4 – Exemple de listage des cellules pour la cellule GCM 36LAT07LON**

- étape c : pour chaque cellule au demi degré déterminée à l'étape précédente, détermination de son coefficient d'occupation dans la cellule GCM



**Figure 6.5 – Exemple de coefficient d'occupation de cellules au demi degré dans une cellule GCM**

- étape d : l'étape b étant effectuée pour chaque cellule GCM de la fenêtre de travail, on connaît toutes les cellules au demi degré qui constitue la nouvelle fenêtre d'étude

(contenant que des cellules GCM entières) et donc la sélection spatiale des données observées au demi degré à effectuer

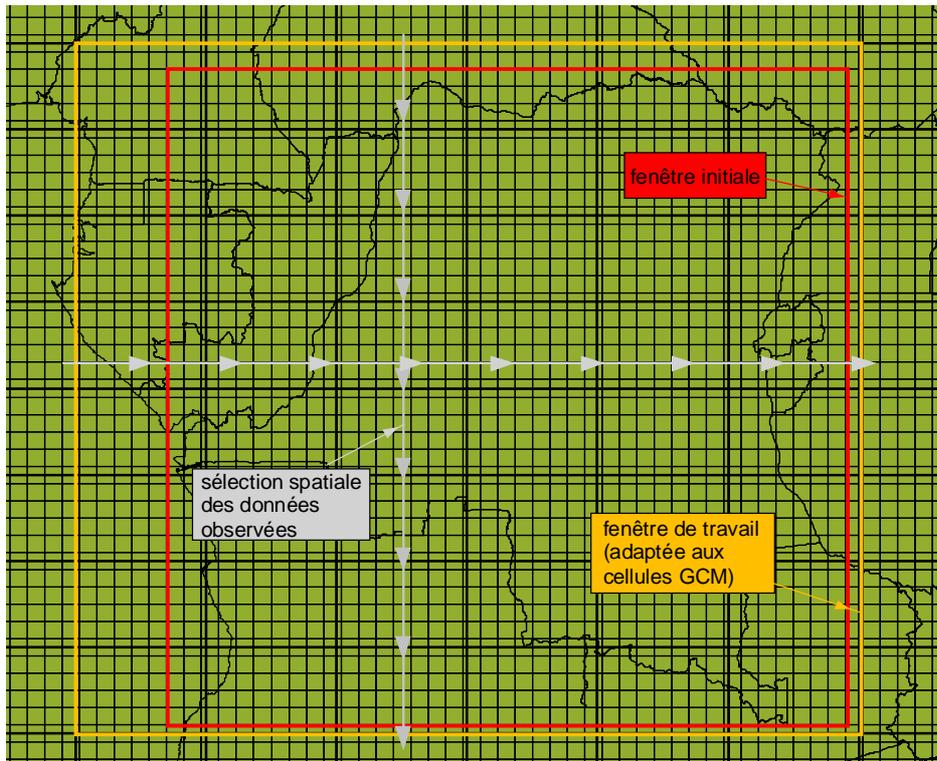


Figure 6.6 – Exemple de détermination de la sélection spatiale des données observées

a. Détermination des cellules GCM constituant cette fenêtre

La détermination des cellules GCM revient à connaître leur numérotation de type XLATYLON, X et Y représentant les indices en latitude et longitude suivant la résolution et l'orientation de la grille mondiale du modèle. Cet exercice n'est pas difficile en soit mais la prise en compte des numérotations différentes de chaque modèle alourdit le travail. En effet, chaque modèle climatique a d'abord sa propre résolution, donc des pas de discrétisation en latitude et longitude différents (pouvant être non constants), et les sens de définition de la grille varie d'un modèle à l'autre (tableau 6.1).

Tableau 6.1 – Type de discrétisation et de numérotation pour chaque modèle climatique

Modèle	Pas en longitude	Pas en latitude	Orientation en latitude
HadCM3	3.75°	2.5°	De 90°N à 90°S
CSIRO_Mk2	5.625°	~ 3.2°	De 90°S à 90°N
NCAR_PCM	2.8125°	~ 2.8°	De 90°S à 90°N
ECHAM4	2.8125°	~ 2.8°	De 90°N à 90°S

Les caractéristiques communes pour les quatre modèles climatiques utilisés sont :

- pas constant en longitude ;
- orientation de l'Ouest à l'Est, soit de 0° à 360° ;

- bordure gauche de la première cellule étant à 0° en longitude.

Par contre, les pas en latitude n'étant pas constants, il faut utiliser les coordonnées des centroïdes de chaque cellule GCM, disponible pour chaque modèle sur le site de l'IPCC (<http://www.ipcc.ch/>).

La détermination des indices des cellules GCM définissant la fenêtre en longitude est assez simple puisqu'elle ne nécessite que les étapes suivantes :

- redéfinition des longitudes minimale et maximale dans le référentiel de 0° à 360° ;
- détermination de l'indice GCM correspondant aux longitudes minimale et maximale suivant le pas du modèle utilisé ;
- listage des cellules comprises entre l'indice de la longitude minimale et l'indice de la longitude maximale en traitant le cas d'une fenêtre passant par 0°.

Pour la détermination des indices GCM en latitude, la non constance du pas ajoute des étapes de vérification par la lecture de la latitude exacte des centroïdes :

- redéfinition des latitudes minimale et maximale suivant le sens de définition du modèle (si orientation du Sud au Nord, attribution inchangées, sinon inversées) ;
- détermination approximative de l'indice GCM minimal en utilisant le pas approximatif ;
- vérification que cette cellule est bien la première de la fenêtre d'étude par lecture de la latitude de son centroïde ;
- avancement dans l'indice des latitudes GCM en lisant à chaque pas le centroïde jusqu'à la frontière de la fenêtre : on a atteint l'indice GCM maximal.

Les erreurs d'approximation ne s'accumulent pas puisqu'à chaque pas nous utilisons la valeur connue du centroïde. L'imprécision effectuée est tout à fait acceptable puisqu'elle est de l'ordre du 100<sup>ème</sup> de degré au maximum (c'est-à-dire sur les cellules aux extrémités en latitude de la fenêtre mondiale) et du 1000<sup>ème</sup> de degré ailleurs.

En ayant ainsi les indices en longitude et latitude minimal et maximal de la fenêtre, il est facile de déterminer la liste des indices des cellules GCM présentes dans la fenêtre d'étude.

#### b. Détermination, pour chaque cellule GCM, des cellules au demi degré la constituant

Pour cette étape, nous déterminons les coordonnées en latitude et longitude des bordures de la cellule GCM étudiée et cherchons les cellules au demi degré correspondantes (figure 6.7). Ces quatre cellules au demi degré sont nécessaires et suffisantes pour sélectionner et lister l'ensemble des cellules au demi degré composant la cellule GCM, puisqu'elles déterminent les coordonnées dites d'encadrement.

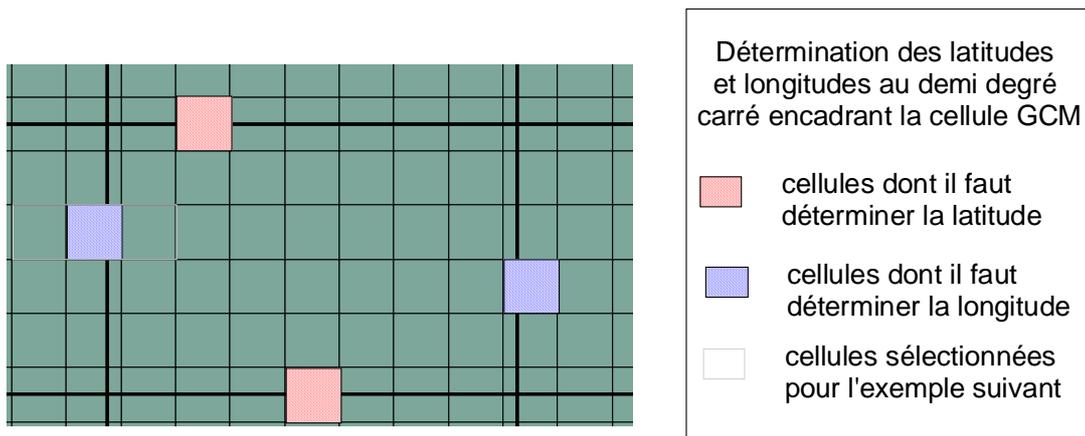


Figure 6.7 – Exemple des coordonnées des quatre cellules au demi degré à déterminer

Pour ce faire, on utilise le fait que la partie décimale des centroïdes des cellules au demi degré ne peut être que 25 ou 75. A partir de la valeur entière du bord de la cellule GCM étudiée, quelques tests suffisent à déterminer les coordonnées de la cellule au demi degré. D'autres méthodes plus générales auraient peut être pu être mises en place, mais celle-ci est simple et intuitive.

Prenons l'exemple d'une cellule GCM dont l'entier de la longitude de la bordure gauche est 10. Cela signifie que cette bordure est forcément située entre  $10^{\circ}$  et  $11^{\circ}$  (non compris). Les cellules au demi degré à étudier sont alors celles de longitude  $10.25^{\circ}\text{E}$  et  $10.75^{\circ}\text{E}$  (figure 6.8). Un seul test suffit pour savoir laquelle des deux correspond à la cellule à cheval sur la bordure de la cellule GCM.

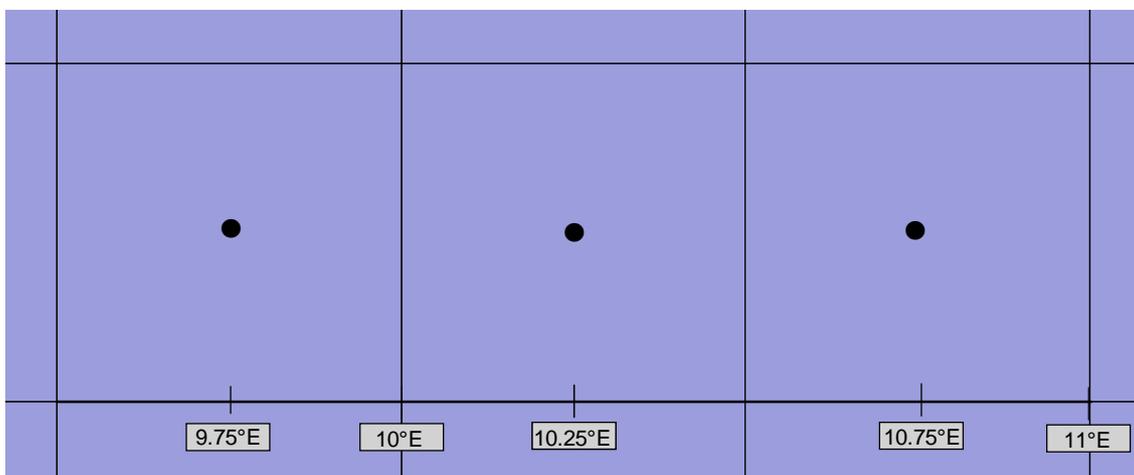


Figure 6.8 – Cellules au demi degré à prendre en compte lors de l'étude d'une cellule GCM dont l'entier de la longitude du bord gauche serait 10

Les méthodes appliquées pour obtenir les cellules au demi degré des trois autres bordures de la cellule GCM sont similaires, variant juste par quelques adaptations de référentiel.

Ayant toutes les coordonnées des cellules au demi degré correspondant aux bordures de la cellule GCM, il suffit de lister les cellules au demi degré composant la cellule GCM en question.

- c. Pour chaque cellule au demi degré carré, détermination de son coefficient d'occupation dans la cellule GCM

Pour chaque cellule GCM et chacune des cellules au demi degré qui la compose, la détermination du coefficient d'occupation correspond à deux cas possibles :

- la cellule au demi degré est entièrement incluse dans la cellule GCM : le coefficient d'occupation est de 1. Ce cas se vérifie par un test pour chaque bordure de la cellule au demi degré par rapport à la bordure correspondante de la cellule GCM ;
- la cellule au demi degré est partiellement incluse dans la cellule GCM. Il faut dans ce cas déterminer les coordonnées de la zone correspondant à l'intersection des deux cellules et le coefficient est alors le rapport entre l'aire de cette zone et l'aire de la cellule au demi degré.

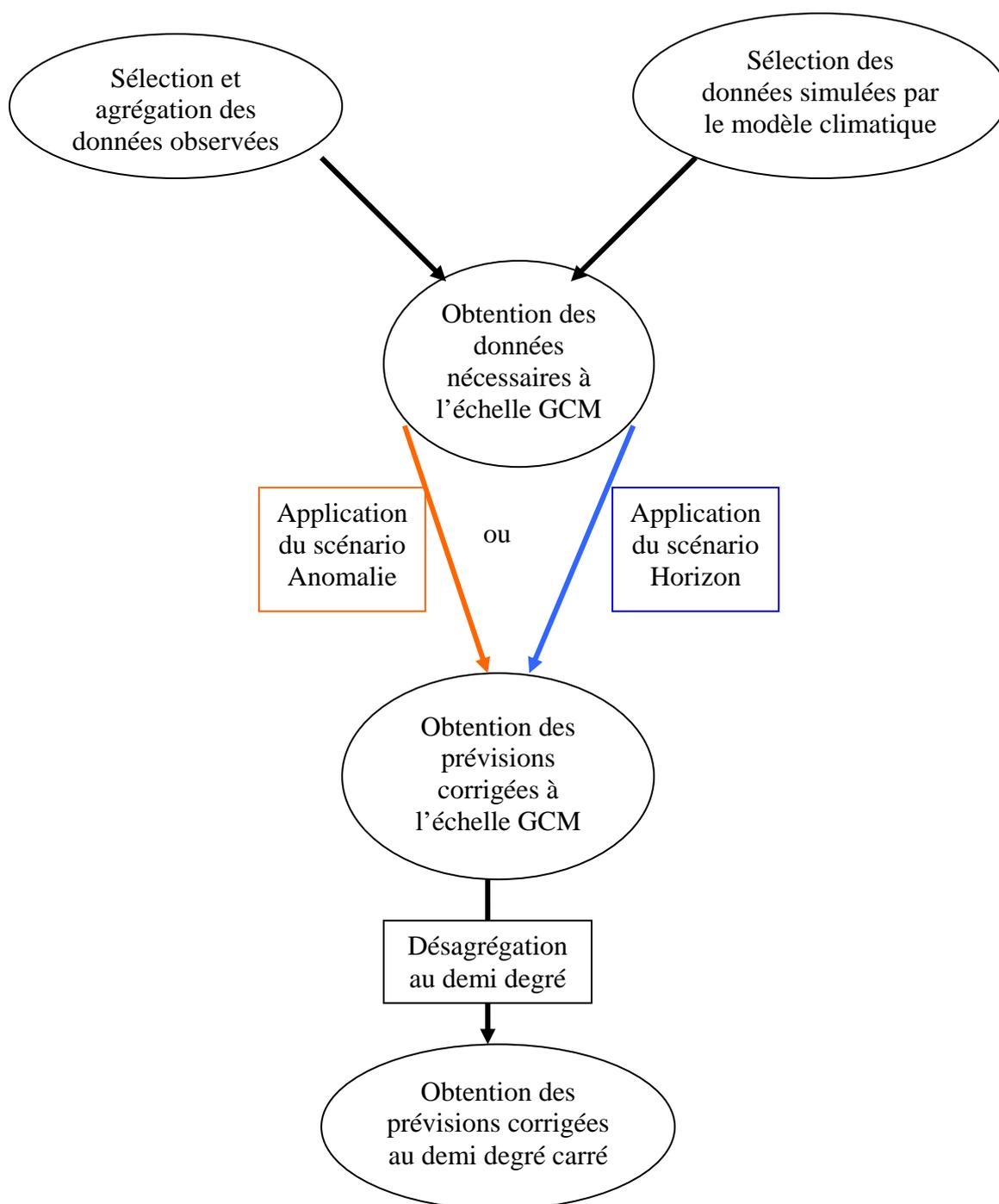
- d. Détermination de la nouvelle fenêtre finale de travail au demi degré carré

Cette étape est maintenant simple, puisque nous avons listé, en appliquant les étapes précédentes à chaque cellule GCM, les cellules au demi degré de leurs extrémités. Il suffit alors, à chaque exécution de l'étape b, de retenir les cellules au demi degré carré de coordonnées les plus extrêmes. On obtient ainsi de nouvelles latitudes et longitudes minimales et maximales qui correspondent à la fenêtre des cellules au demi degré carré pour lesquelles on aura besoin des données observées.

On obtient ainsi, par ces différentes étapes, la liste des cellules GCM composant la fenêtre d'étude choisie et la liste des cellules au demi degré liées à chaque cellule GCM ainsi que leur coefficient d'occupation dans cette dernière.

## 2. Elaboration des prévisions climatiques

Les étapes d'élaboration des prévisions climatiques sont celles explicitées précédemment (figure 6.9).



**Figure 6.9 – Etapes d’élaboration des prévisions climatiques**

Dans le cas de l’automatisation, il faut ajouter une première étape qui est la lecture des paramètres du modèle climatique choisi. En effet, l’obtention des prévisions nécessite des fichiers descriptifs des modèles climatiques pouvant être choisis :

- un fichier répertoriant les paramètres du modèle climatique (tel que son sens de numérotation, les coordonnées de ses extrémités en latitude, le nombre de fichiers contenant les données simulées par le modèle, etc.) ;
- un fichier listant les latitudes des centres des cellules GCM pour les modèles climatiques ayant un pas en latitude non constant.

### 3. Possibilités offertes par le logiciel

#### a. Utilisation d'autres scénarios GES

Le logiciel n'a actuellement été utilisé que pour les modèles climatiques appliqués au scénario d'émission de GES A2. Cela dit, il suffit de télécharger les données simulées par le modèle climatique appliqué aux autres scénarii d'émission de GES et de sélectionner ces fichiers lors de l'utilisation du logiciel (figure 6.10). Pour un modèle climatique donné, les formats de fichiers des données simulées étant identiques, ce chargement ne devrait poser aucun problème et permettrait à l'utilisateur d'obtenir des prévisions avec un autre scénario d'émission de GES.

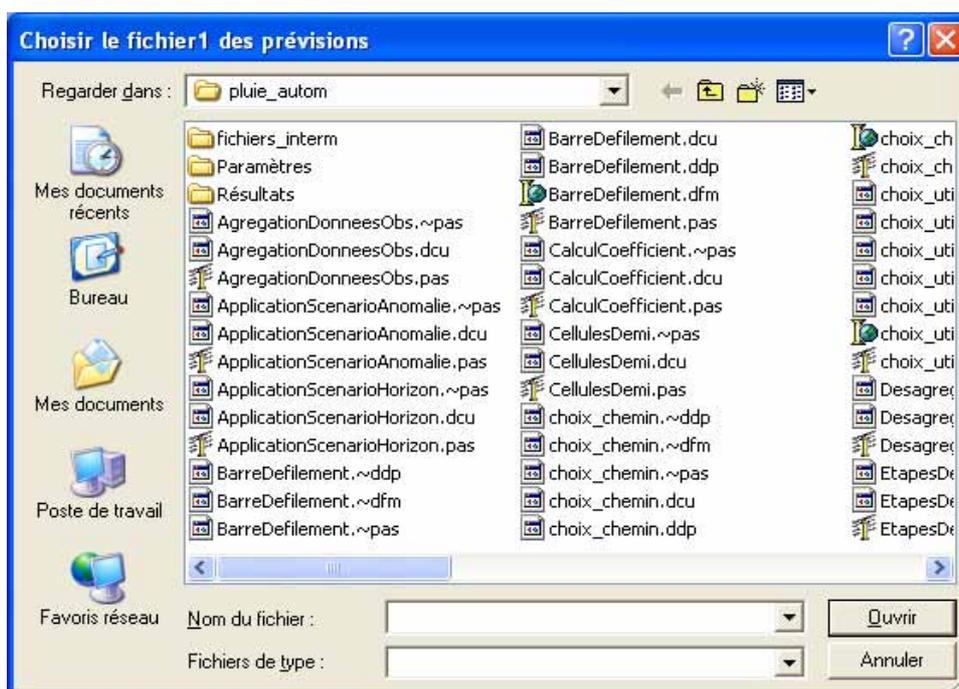


Figure 6.10 – Choix des fichiers de prévisions

#### b. Choix des données observées pour les précipitations

Pour l'élaboration des prévisions des précipitations, l'utilisateur a le choix au niveau des données observées à utiliser. Il peut se servir des données observées du CRU ou de ses propres données. Dans ce dernier cas, il doit respecter les conditions suivantes :

- il doit choisir la période de référence en tenant compte de la disponibilité de ses propres données et de celle des données simulées par le modèle choisi ;
- les données doivent être au demi degré carré, au pas de temps mensuelles et en mm ;
- les données observées doivent être sous la forme d'un fichier texte par année, de type aaaa.txt (figure 6.11) ;
- pour chaque fichier, à chaque ligne doit figurer les coordonnées du centroïde (latitude puis longitude) suivies des douze valeurs mensuelles ; ces éléments devant être séparés par des points virgules (et la ligne doit se terminer par un point virgule).

Fichier	Edition	Format	Affichage	?										
-1.25;	8.75;	159.4;	207.0;	207.6;	206.4;	108.0;	6.7;	2.4;	15.2;	81.9;	105.1;	331.6;	76.1;	
-1.25;	9.25;	175.7;	254.6;	253.3;	276.5;	85.5;	0.8;	1.3;	3.3;	74.8;	132.2;	341.7;	108.9;	
-1.25;	9.75;	164.6;	222.6;	286.1;	230.9;	77.5;	1.8;	1.7;	1.4;	90.0;	217.0;	384.6;	110.1;	
-1.25;	10.25;	167.0;	172.2;	320.0;	154.1;	76.8;	4.5;	2.6;	0.2;	102.5;	313.1;	449.8;	102.3;	
-1.25;	10.75;	203.9;	273.2;	262.3;	126.8;	98.2;	5.5;	2.5;	0.0;	124.0;	310.4;	508.9;	93.3;	
-1.25;	11.25;	220.9;	283.9;	228.6;	167.9;	109.5;	3.2;	3.6;	1.4;	140.4;	290.8;	518.0;	110.7;	
-1.25;	11.75;	208.3;	208.5;	221.9;	168.3;	117.2;	5.2;	4.6;	4.6;	136.7;	265.1;	476.4;	121.9;	
-1.25;	12.25;	195.1;	141.6;	215.1;	167.3;	126.2;	7.9;	7.8;	9.3;	129.9;	242.7;	433.8;	129.1;	
-1.25;	12.75;	188.5;	120.9;	199.1;	196.5;	147.6;	8.7;	15.1;	19.9;	123.1;	233.0;	400.4;	141.1;	
-1.25;	13.25;	190.1;	139.5;	195.6;	211.3;	170.5;	10.3;	22.8;	30.5;	143.2;	200.9;	362.8;	152.6;	
-1.25;	13.75;	197.7;	146.1;	179.7;	249.9;	201.0;	15.5;	25.1;	45.0;	163.0;	193.2;	342.4;	145.4;	
-1.25;	14.25;	206.3;	159.6;	178.9;	281.1;	224.8;	24.8;	23.6;	66.2;	173.2;	198.4;	316.7;	142.6;	
-1.25;	14.75;	196.4;	165.4;	178.4;	301.9;	233.9;	34.7;	20.8;	83.2;	187.1;	197.4;	294.2;	137.4;	
-1.25;	15.25;	176.0;	169.9;	174.4;	316.9;	240.6;	46.3;	17.1;	99.9;	196.8;	196.5;	268.5;	132.1;	

Figure 6.11 – Format d’écriture des données

c. Choix de l’unité des prévisions des ETP

Pour que les prévisions climatiques soient adaptées à leur utilisation par la suite dans le modèle hydrologique GR2M, l’utilisateur peut choisir l’unité des prévisions des ETP. En effet, bien que l’unité internationale soit le mm, le modèle hydrologique utilisé ici nécessite les ETP en entrée en 10<sup>ème</sup> de mm. Il est donc possible de choisir les ETP en mm ou en 10<sup>ème</sup> de mm.

4. Limites du logiciel et améliorations possibles

a. Les limites dans le choix de l’utilisateur et dans le fonctionnement du logiciel

i. Limitation en latitude dans le choix de la fenêtre

L’utilisateur est limité dans le choix de la fenêtre de prévisions puisque la détermination des prévisions climatiques peut être faite sur le monde entier excepté sur les pôles. Ce cas particulier pourrait être traité mais il présente peu d’intérêt car le modèle hydrologique utilisé par la suite n’est pas pour l’instant utilisable dans ces zones (comportement restreint aux zones arides et semi arides). Il faudrait compléter le modèle GR2M utilisé par les modules caractéristiques du comportement des glaciers. Pour l’instant, nous imposons à l’utilisateur de ne pas choisir une fenêtre contenant ces zones.

ii. Limitation en longitude dans le choix de la fenêtre

Une seconde limitation spatiale est imposée à l’utilisateur pour simplifier le travail : la fenêtre choisie ne doit pas contenir plus d’une frontière critique en longitude, c’est-à-dire les passages de 360° à 0° et de -180° à 180°. En effet, pour des questions de référentiel lors de la détermination des cellules au demi degré composant les cellules GCM étudiées, on ne peut traiter ce double cas de frontière sans alourdir fortement le programme. Il faut tout de même noter qu’il est très peu probable qu’un utilisateur ait besoin d’effectuer une étude sur une fenêtre aussi grande et que, si le cas se présente, il lui suffira de diviser sa fenêtre en deux.

iii. Limitation dans le choix des dates des périodes de travail (fonction des disponibilités des données)

Il faut être conscient des limites dans le choix des dates des périodes de référence et de prévisions. En effet, ces périodes sont fonction de la disponibilité des données simulées par les modèles climatiques. Cependant, l'utilisateur peut fournir les données simulées sur la période qui l'intéresse pour contourner cette limitation, à condition de respecter les formats des fichiers GCM.

#### iv. Limitation dans le choix du modèle climatique

Une restriction est aussi faite à l'utilisateur dans le choix du modèle climatique à utiliser. Il existe environ une dizaine de modèles climatiques à ce jour et certains centres de recherche développent actuellement d'autres modèles climatiques avec une résolution spatiale plus précise. Et pourtant, nous proposons ici que quatre modèles climatiques. Cependant, les étapes d'élaboration des scénarii climatiques étant identiques d'un modèle GCM à l'autre, et le logiciel fonctionnant à partir des caractéristiques des modèles précisées dans les fichiers d'initialisation, il est envisageable d'ajouter d'autres modèles climatiques sans trop modifier le code de programmation. Il faut tout de même que le type de numérotation en longitude soit le même qu'actuellement.

En effet, les quatre modèles climatiques utilisés ici ayant le même type de numérotation en longitude (c'est-à-dire avec des cellules allant de  $0^\circ$  à  $360^\circ$ , la bordure gauche de la première étant en  $0^\circ$ ), la détermination des cellules de la fenêtre a été déterminée sur cette base. Cela dit, il semble peu probable qu'une numérotation différente en longitude existe car elle serait peu naturelle ; dans le cas contraire, il faudra modifier certains points de la détermination des cellules GCM à étudier.

#### v. Limitation au niveau des données observées fournies par l'utilisateur

Le modèle hydrologique utilisé impose de travailler avec des grilles mensuelles de précipitations et d'ETP complètes ; c'est-à-dire qu'il ne gère pas les lacunes des données. C'est pourquoi nous imposons à l'utilisateur voulant utiliser ses propres données de n'avoir aucune lacune sur celles-ci.

Pour palier à des problèmes de données manquantes, l'utilisateur peut effectuer des interpolations de données en prenant des moyennes de cellules proches, ou de mois proches du mois manquant ou encore utiliser les données d'autres années plus complètes.

Malgré cela, cette version du logiciel tient compte des lacunes dans les données observées ; un simple test interdit l'écriture de la prévision si elle correspond à une lacune. Ainsi, si l'utilisateur souhaite utiliser un autre modèle hydrologique avec gestion des lacunes, il suffit de supprimer ce test du programme pour permettre l'affichage de prévisions non connues.

#### vi. Les limites de la désagrégation

Les prévisions corrigées sont d'abord obtenues à l'échelle du modèle climatique, puis sont désagrégées pour les obtenir à l'échelle du demi degré. Pour une cellule GCM à cheval entre continent et océan, l'agrégation des données observées à l'échelle du modèle climatique se fait en ne tenant compte que des cellules de valeur observée connue (c'est-à-dire située sur le continent). Par contre, lors de la désagrégation des prévisions, les valeurs sont attribuées à

toutes les cellules au demi degré composant la cellule GCM. Ainsi, il est possible d'obtenir des prévisions pour des cellules au demi degré située en mer. Ces prévisions n'ont pas de sens propre puisque la valeur observée n'était pas connue. Mais ceci ne pose aucun problème pour l'utilisation du modèle hydrologique GR2M puisque celui-ci ne prend en compte que les cellules qui composent les bassins versants à étudier : les cellules situées au dessus des océans sont donc ignorées.

#### b. Points à améliorer

##### i. Séries de tests de vérification à effectuer

Le premier problème rencontré dans la conception de ce logiciel a été le peu de temps disponible. Même si le fonctionnement général est satisfaisant, l'automatisation étant sensée être capable de traiter tous les cas possibles (ou de préciser les cas non traitables), il est nécessaire d'effectuer une série de test au travers de différentes simulations afin de s'assurer qu'aucun cas n'a été oublié. Cette étape n'a pas été effectuée de manière satisfaisante par manque de données mais surtout par manque de temps.

##### ii. Différents tests pour gérer les erreurs de manipulation

Différents tests sont à ajouter car, même s'ils ne semblent pas d'une grande importance, ils correspondent à la finalisation du projet :

- tester l'existence des fichiers des données observées suivant les dates de la période de référence choisies;
- permettre d'arrêter l'affichage de certains messages d'avertissement qui peuvent être gênants lors de l'utilisation.

##### iii. Ajout des données observées permettant à l'utilisateur d'utiliser un type d'ETP par défaut

L'obtention des prévisions en ETP n'est possible que si l'utilisateur fournit ses propres données observées d'ETP. En effet, les données climatiques observées nécessaires à la détermination de l'ETP n'étant pas disponibles sur le site du CRU, nous avons décidé d'imposer cette contrainte à l'utilisateur.

Au niveau du calcul des ETP, il serait intéressant d'essayer d'obtenir les données observées mondiales permettant de déterminer cette variable climatique par les différentes formules connues (Turc, Penman etc.) et d'en laisser le choix à l'utilisateur.

Bien que ce projet d'automatisation des programmes n'était pas prévu dans les objets du stage, l'idée s'impose d'elle-même en prenant conscience des étapes mises en œuvre pour l'élaboration des scénarii climatiques (surtout en termes de temps de travail). D'autant plus que les résultats obtenus n'étaient valables que sur une fenêtre prédéterminée. Par l'automatisation des différentes étapes d'élaboration des prévisions climatiques, on permet à n'importe quel utilisateur d'obtenir des prévisions climatiques rapidement alors qu'il aurait dû

auparavant comprendre toute la méthodologie mise en place et maîtriser les différents outils nécessaires sur sa propre fenêtre d'étude.

Il est tout de même nécessaire que l'utilisateur soit conscient de la démarche qui est à l'origine de ces prévisions. En effet, il faut garder à l'esprit que cette méthode est une correction des données simulées par les modèles climatiques en utilisant les données observées et que l'objectif n'est pas d'obtenir des prévisions précises mais une tendance d'évolution. Ainsi, il doit être conscient de l'importance des données qu'il utilise et du type d'interprétation que l'on peut en faire.



## CONCLUSION

L'objectif de l'étude précédente était de comparer, sur l'Afrique de l'Ouest et Centrale, les différents outils de modélisation des changements climatiques afin de déterminer leur fiabilité. Les prévisions climatiques obtenues, en utilisant les modèles climatiques HadCM3, CSIRO\_Mk2, NCAR\_PCM et ECHAM4 associés au scénario d'émission des GES A2, forment un éventail de possibilités d'évolutions trop large pour pouvoir en tirer des conclusions quand au changement climatique que pourrait connaître la zone d'étude. Ainsi, cette diversité des prévisions, en ayant à l'esprit que nous avons cherché à interpréter que des tendances de prévisions, montre que la modélisation des phénomènes climatiques est problématique. En effet, puisqu'il n'y a aucun moyen de savoir quel modèle est le plus représentatif du comportement possible et que chacun donne des prévisions différentes, il est impossible d'effectuer des tendances de prévisions fiables.

Le problème mis en évidence pour la prévision des changements climatiques se répercute pour les prévisions d'évolution des ressources en eau. En effet, les prévisions climatiques étant utilisées en entrée du modèle hydrologique, l'éventail d'évolution possible des ressources en eau sera tout aussi large, et donc peu propice à en tirer des conclusions.

Il serait intéressant d'étudier en détail les méthodes de constitution de chaque modèle climatique utilisé pour déterminer quels paramètres de la modélisation de chacun les différencient à ce point. Ainsi, il serait peut être possible de choisir le modèle climatique suivant la zone de travail en se basant sur les phénomènes climatiques qui ont été plus ou moins pris en compte.

Ce stage de longue durée m'a d'abord permis de me rendre compte de l'importance des relations dans une équipe. En effet, les stages effectués précédemment ne nous montraient pas cet aspect de l'environnement professionnel de par leur courte durée et par leur période (durant les vacances d'été). Ainsi, le stage de fin d'étude, en permettant de travailler cinq mois sur le même projet et avec la même équipe, met en évidence la nécessité d'une bonne entente entre les différents membres pour pouvoir travailler dans une ambiance agréable mais aussi pour effectuer un travail de qualité en mettant à profit les connaissances et compétences de chacun. Je tiens à souligner que mon stage a été particulièrement satisfaisant grâce à la disponibilité et la bonne humeur de l'équipe qui m'a accueillie.

Ensuite, d'un point de vue technique, durant ce stage, j'ai pu me familiariser avec l'interprétation scientifique des résultats. En effet, j'ai appris comment résumer l'information étudiée pour simplifier l'interprétation sans perdre d'éléments, comment utiliser les méthodes de représentation de données climatiques et hydrologiques (avec le logiciel ArcView) et comment rédiger les conclusions à en tirer. Etant donnée que la quantité de résultats à interpréter était importante et que l'on est assez peu préparé à ce genre de travail, cette étape a été très instructive.

Mais l'intérêt le plus important, à mon avis, a été de découvrir le domaine de la recherche sur les ressources en eau, appliqué à des objectifs de développement de pays en difficultés. Ce domaine m'intéressait déjà particulièrement mais je n'avais aucune idée du type de travail mis en œuvre et de la contribution que notre formation nous permettait d'y apporter. Cette

expérience m'a montré que nous pouvons nous intégrer dans ce domaine, à condition d'être encadré par des hydrologues pour la compréhension théorique de l'hydrologie. Grâce à ce stage, ma curiosité pour ce domaine s'est transformée en choix d'orientation professionnel et m'a alors décidée à effectuer un Master2 en hydrologie pour combler mes lacunes dans cette matière et m'orienter dans la recherche en modélisation hydrologique.

**RÉFÉRENCES**  
**BIBLIOGRAPHIQUES**



- Ardoin-Bardin S., 2004. Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, France.
- Ardoin-Bardin S., Dezetter A., Servat E., Mahé G., Paturel J.E., Dieulin C., et Casenave L., 2005. Evaluation des impacts du changement climatique sur les ressources en eau d'Afrique de l'Ouest et Centrale. Proc. AISH Conf. Int. Regional Hydrological Impacts of Climate Change – Hydroclimatological Variability. Foz do Iguaçu, Brésil, Frank S., Wagener T., Bøgh E., Gupta H.V., Bastida S L., Nobre C., et de Oliveira Galvão C. éd. sc., 296, 194-202.
- Casenave L., 2004. Hydro-climatic variability: comparison of different global circulation model in western Africa. Master thesis. University of Chalmers, Sweden. 52 p.
- Dieulin C., 2005. Calcul des capacités en eau des sols (Water Holding Capacity - WHC) à partir de la carte des sols de la FAO. Note technique. UMR HydroSciences Montpellier.
- Edijatno, Michel C., 1989. Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche* **2**, 113-122.
- FAO, 1974-1981. CD-ROM: Soil Map of the World, Ten volumes, UN Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
- Kabouya M., 1990. Modélisation pluie-débit au pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale. Thèse de doctorat. Université Paris XI.
- L'Hôte Y., Mahé G., Somé B., Triboulet J.P., 2002. Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues. *Hydrol. Sci. J.* 47(4), 563-572.
- Paturel J.E., Servat E., Vassiliadis A., 1995. Sensitivity of conceptual rainfall-runoff algorithms to errors in input data. Case of the GR2M model. *J. Hydrol.* **168**, 111-125.
- Penman H.L., 1956. Evaporation: an introduction survey. *J. Agric. Sci.* **1**, 9-29.
- Teixeira S., Pacheco X., 2003. *Delphi 6, Student Edition*. CampusPress, Paris. 847 p.
- Turc L., 1954. Le bilan d'eau des sols : relation entre les précipitations, l'évapotranspiration et l'écoulement. *Annales agronomiques Série A*: 491-595.



# **LISTE DES FIGURES**



## **Partie I : Environnement de travail**

Figure 1.1 – Organisation de la MSE.....	11
Figure 1.2 – Organigramme HydroSciences Montpellier .....	12
Figure 1.3 – Localisation des unités hydrographiques étudiées.....	15

## **Partie II : La modélisation : un outil pour évaluer les impacts du changement climatique**

Figure 2.1 – Correspondance entre une cellule GCM et les cellules au demi degré carré.....	21
Figure 2.2 – Schéma de fonctionnement du modèle hydrologique GR2M.....	22

## **Partie III : Acquisition et manipulation des prévisions climatiques et hydrologiques pour l’Afrique de l’Ouest et Centrale**

Figure 3.1 – Adaptation de la fenêtre d’étude au modèle climatique utilisé.....	24
---	----

## **Partie IV : Interprétation des prévisions d’évolution climatique en Afrique de l’Ouest et centrale**

Figure 4.1 – Taux de variation des précipitations annuelles avec HadCM3.....	29
à l’horizon 2080 avec le scénario Anomalie.....	29
Figure 4.2 – Taux de variation des précipitations annuelles avec CSIRO_Mk2 .....	30
à l’horizon 2080 avec le scénario Anomalie.....	30
Figure 4.3 – Taux de variation des précipitations annuelles avec ECHAM4 .....	30
à l’horizon 2080 avec le scénario Anomalie.....	30
Figure 4.4 – Taux de variation des précipitations annuelles avec NCAR_PCM.....	31
à l’horizon 2080 avec le scénario Anomalie.....	31
Figure 4.5 – Evolution des précipitations brutes, de leur moyenne sur la période de référence (multipliée par 100) et des précipitations après application du scénario Anomalie (divisées par 100) pour ECHAM4 .....	32
Figure 4.6 – Carte de prévisions à 4 zones pour l’horizon 2080 avec le scénario Anomalie ..	33
Figure 4.7 – Carte de prévisions à 6 zones pour l’horizon 2080 avec le scénario Anomalie ..	34
Figure 4.8 – Carte de prévisions à 7 zones pour l’horizon 2080 avec le scénario Anomalie ..	34
Figure 4.9 – Numérotation des zones sur la fenêtre d’étude.....	35
Figure 4.10 – Prévisions des taux de variation des précipitations aux trois horizons avec le scénario Anomalie.....	36
Figure 4.11 – Taux de variation des précipitations annuelles avec HadCM3 à l’horizon 2080 .....	38
Figure 4.12 – Taux de variation des précipitations annuelles avec CSIRO_Mk2 à l’horizon 2020.....	40
Figure 4.13 – Taux de variation des précipitations annuelles avec CSIRO_Mk2 à l’horizon 2050.....	41
Figure 4.14 – Taux de variation des précipitations annuelles avec CSIRO_Mk2 à l’horizon 2080.....	41

Figure 4.15 – Taux de variation des précipitations annuelles avec NCAR_PCM à l’horizon 2020.....	43
Figure 4.16 – Taux de variation des précipitations annuelles avec NCAR_PCM à l’horizon 2050.....	44
Figure 4.17 – Taux de variation des précipitations annuelles avec NCAR_PCM à l’horizon 2080.....	44
Figure 4.18 – Taux de variation des précipitations annuelles avec ECHAM4 à l’horizon 2020.....	47
Figure 4.19 – Taux de variation des précipitations annuelles avec ECHAM4 à l’horizon 2050.....	47
Figure 4.20 – Taux de variation des précipitations annuelles avec ECHAM4 à l’horizon 2080.....	47
Figure 4.21 – Taux de variation des précipitations annuelles avec ECHAM4 à l’horizon 2080.....	48
Figure 4.22 – Evolution des taux de variation moyens par zone pour HadCM3 et ECHAM4	49
Figure 4.23 – Taux de variation moyens des précipitations au Sud Est.....	50
Figure 4.24 – Taux de variation moyens des précipitations au Sud Ouest .....	51
Figure 4.25 – Evolution des taux de variation moyens pour HadCM3 et ECHAM4 au Nord	51
Figure 4.26 – Carte des prévisions des précipitations pour le XXIème siècle.....	53
Figure 4.27 – Prévisions des précipitations les plus optimistes et les plus pessimistes.....	53
Figure 4.28 – Résumé des taux moyens de variation des précipitations par zone par rapport à la période de référence de chaque modèle avec le scénario Horizon.....	54
Figure 4.29 – Taux de variation des précipitations annuelles avec HadCM3 à l'horizon 2080	55
Figure 4.30 – Taux de variation des précipitations annuelles avec CSIRO_Mk2 à l'horizon 2020.....	57
Figure 4.31 – Taux de variation des précipitations annuelles avec CSIRO_Mk2 à l'horizon 2050.....	57
Figure 4.32 – Taux de variation des précipitations annuelles avec CSIRO_Mk2 à l'horizon 2080.....	57
Figure 4.33 – Taux de variation des précipitations annuelles avec NCAR_PCM à l'horizon 2050.....	59
Figure 4.34 – Taux de variation des précipitations annuelles avec NCAR_PCM à l'horizon 2080.....	60
Figure 4.35 – Taux de variation des précipitations annuelles avec ECHAM4 à l'horizon 2020.....	62
Figure 4.36 – Taux de variation des précipitations annuelles avec ECHAM4 à l'horizon 2050.....	62
Figure 4.37 – Taux de variation des précipitations annuelles avec ECHAM4 à l'horizon 2080.....	62
Figure 4.38 – Evolution des taux de variation moyens par zone pour HadCM3 et ECHAM4	63
Figure 4.39 – Taux de variation moyens des précipitations au Sud Est.....	66
Figure 4.40 – Taux de variation moyens des précipitations au Sud Ouest .....	67
Figure 4.41 – Taux de variation moyens des précipitations au Nord Est.....	68
Figure 4.42 – Carte des prévisions des précipitations pour le XXIème siècle.....	69
Figure 4.43 – Prévisions des précipitations les plus optimistes et les plus pessimistes.....	70
Figure 4.44 – Evolution mensuelle de l’ETP Penman observée en 1990 sur la cellule 31LAT94LON (résolution du modèle climatique HadCM3 .....	71

## Partie V : Les prévisions d'évolution des écoulements de fleuves en Afrique de l'Ouest et centrale

Figure 5.1 – Positionnement des bassins par rapport aux zones de l'étude pluviométrique....	72
Figure 5.2 – Prévisions des taux de variation moyens des débits aux trois horizons avec le scénario Anomalie.....	73
Figure 5.3 – Disposition des bassins par rapport aux prévisions des précipitations pour l'horizon 2020 .....	74
Figure 5.4 – Prévisions des débits pour les sous bassins du Sassandra en 2020 et 2080.....	75
Figure 5.5 – (a) Précipitations prévues en 2020 sur le bassin du Sénégal à l'échelle de HadCM3 et (b) au demi degré carré et (c) réseau hydrographique simplifiée du bassin du Sénégal (le Falémé en orange et le Sénégal, le Bakoye et le Baoulé en bleu).....	76
Figure 5.6 – (a) Prévisions des précipitations au demi degré carré et (b) des débits en chaque sous bassin du Sassandra en 2020 .....	77
Figure 5.7 – (a) Prévisions des précipitations au demi degré et (b) des débits en chaque sous bassin du Sassandra en 2080 .....	77
Figure 5.8 – Superposition des prévisions pluviométriques (à l'échelle de CSIRO_Mk2) et hydrologiques (en chaque sous bassin) pour le Sénégal .....	79
Figure 5.9 – Prévisions des débits pour les sous bassins de la Gambie aux horizons 2020 et 2050.....	80
Figure 5.10 – Prévisions hydrologiques des sous bassins du Sassandra en 2020 .....	80
Figure 5.11 – Prévisions hydrologiques pour les sous bassins du Chari à chaque horizon .....	81
Figure 5.12 – Prévisions pluviométriques au demi degré et prévisions hydrologiques des sous bassins du Sénégal à l'horizon 2050 .....	82
Figure 5.13 – Superposition des prévisions hydrologiques (en chaque sous bassin) et pluviométriques (à l'échelle de NAR_PCM) pour l'horizon 2050 .....	83
Figure 5.14 – Prévisions hydrologiques des sous bassins du Sénégal aux trois horizons.....	84
Figure 5.15 – Prévisions hydrologiques des sous bassins du Sassandra aux trois horizons ....	85
Figure 5.16 – Prévisions hydrologiques des sous bassins du Chari aux trois horizons .....	86
Figure 5.17 – Prévisions hydrologiques des sous bassins de la Gambie aux trois horizons....	87
Figure 5.18 – Prévisions hydrologiques pour les sous bassins de la Gambie en 2020 .....	88
Figure 5.19 – Prévisions hydrologiques pour les sous bassins du Sassandra en 2080.....	89
Figure 5.20 – Evolution des taux de variation moyens des débits de chaque bassin.....	89
Figure 5.21 – Carte synthétique des prévisions hydrologiques avec la moyenne des taux moyens de variation et leur évolution pour les modèles de représentativité acceptable..	92
Figure 5.22 – Carte synthétique des prévisions les plus optimistes et les plus pessimistes parmi les prévisions de représentativité acceptable .....	93
Figure 5.23 – Prévisions des taux moyens des débits aux trois horizons avec le scénario Horizon.....	94
Figure 5.24 – Prévisions des taux de variation des débits pour les sous bassins du Sassandra en 2020 et 2080 .....	96
Figure 5.25 – Prévisions hydrologiques des sous bassins du Sénégal en 2050 .....	97
Figure 5.26 – Prévisions hydrologiques des sous bassins du Sassandra en 2020 .....	98
Figure 5.27 – Prévisions hydrologiques des sous bassins de la Gambie en 2020 et 2050.....	98
Figure 5.28 – Prévisions hydrologiques des sous bassins du Chari à tous les horizons .....	99
Figure 5.29 – Superposition des prévisions pluviométriques (à l'échelle de NCAR_PCM) et hydrologiques (en chaque sous bassin) en 2020 .....	101
Figure 5.30 – Superposition des prévisions pluviométriques (à l'échelle de NCAR_PCM) et hydrologiques (en chaque sous bassin) en 2050 .....	102

Figure 5.31 – Superposition des prévisions pluviométriques (à l'échelle de NCAR_PCM) et hydrologiques (en chaque sous bassin) en 2080 .....	102
Figure 5.32 – Prévisions hydrologiques pour les sous bassins du Sénégal à tous les horizons .....	103
Figure 5.33 – Prévisions hydrologiques des sous bassins de la Gambie à tous les horizons .	104
Figure 5.34 – Prévisions hydrologiques des sous bassins du Sassandra aux horizons 2020 et 2080.....	105
Figure 5.35 – Prévisions hydrologiques des sous bassins du Chari à l'horizon 2020.....	105
Figure 5.36 – (a) Superposition des prévisions pluviométriques (à l'échelle du modèle climatique) et hydrologiques (en chaque sous bassin) et (b) prévisions pluviométriques (à l'échelle du demi degré) pour le bassin du Sénégal à l'horizon 2020.....	106
Figure 5.37 – (a) Superposition des prévisions pluviométriques (à l'échelle du modèle climatique) et hydrologiques (en chaque sous bassin), (b) prévisions pluviométriques (au demi degré) et (c) réseau hydrologique simplifié (en jaune les sous bassins dépendant de l'irrigation de la cellule 35LAT008LON et en marron ceux qui en sont indépendants) pour le Chari en 2020 .....	107
Figure 5.38 – (a) Superposition des prévisions pluviométriques (à l'échelle du modèle climatique) et hydrologiques (en chaque sous bassin), (b) prévisions pluviométriques (au demi degré) et (c) réseau hydrologique simplifié (en jaune les sous bassins dépendant des cellules à diminution des précipitations et en marron ceux qui en sont indépendant) pour le Chari en 2080 .....	108
Figure 5.39 – (a) Superposition des prévisions pluviométriques (à l'échelle du modèle climatique) et hydrologiques (en chaque sous bassin) et (b) prévisions pluviométriques au demi degré pour le bassin du Sassandra à l'horizon 2080.....	109
Figure 5.40 – Prévisions hydrologiques des sous bassins de la Gambie à l'horizon 2020 ....	110
Figure 5.41 – Evolution des taux moyens de variation des débits pour chaque bassin .....	111
Figure 5.42 – Carte synthétique des prévisions hydrologiques avec la moyenne des taux moyens de variation et leur évolution pour les modèles de représentativité acceptable	114
Figure 5.43 – Carte synthétique des prévisions les plus optimistes et les plus pessimistes parmi les prévisions de représentativité acceptable .....	114

## **Partie VI : Travail d'automatisation**

Figure 6.1 – Interface de choix des paramètres de travail.....	115
Figure 6.2 – Choix de la fenêtre de l'utilisateur.....	116
Figure 6.3 – Détermination des cellules GCM (HadCM3) à étudier .....	117
Figure 6.4 – Exemple de listage des cellules pour la cellule GCM 36LAT07LON .....	117
Figure 6.5 – Exemple de coefficient d'occupation de cellules au demi degré dans une cellule GCM.....	117
Figure 6.6 – Exemple de détermination de la sélection spatiale des données observées.....	118
Figure 6.7 – Exemple des coordonnées des quatre cellules au demi degré à déterminer .....	120
Figure 6.8 – Cellules au demi degré à prendre en compte lors de l'étude d'une cellule GCM dont l'entier de la longitude du bord gauche serait 10 .....	120
Figure 6.9 – Etapes d'élaboration des prévisions climatiques .....	122
Figure 6.10 – Choix des fichiers de prévisions .....	123
Figure 6.11 – Format d'écriture des données .....	124

# **LISTE DES TABLEAUX**



## **Partie I : Environnement de travail**

Tableau 1.1 – Disponibilités et critères des données fournies par les modèles climatiques choisis appliqué au scénario de correction A2 .....	18
---	----

## **Partie III : Acquisition et manipulation des prévisions climatiques et hydrologiques pour l’Afrique de l’Ouest et Centrale**

Tableau 3.1 – Sélection temporelle et spatiale des données observées.....	25
Tableau 3.2 – Sélection temporelle et spatiale des données simulées par les modèles climatiques .....	26

## **Partie IV : Interprétation des prévisions d’évolution climatique en Afrique de l’Ouest et centrale**

Tableau 4.1 – Périodes des données disponibles et périodes de référence .....	29
Tableau 4.2 – Taux de variation moyens des précipitations par horizon.....	37
Tableau 4.3 – Taux de variation moyens des précipitations par horizon.....	37
Tableau 4.4 – Taux de variation moyens des précipitations par horizon.....	39
Tableau 4.5 – Taux de variation moyens des précipitations par horizon.....	40
Tableau 4.6 – Tableau des taux de variation moyens des précipitations .....	42
Tableau 4.7 – Tableau des taux de variation moyens des précipitations .....	42
Tableau 4.8 – Tableau des taux de variation moyens des précipitations .....	45
Tableau 4.9 – Tableau des taux de variation moyens des précipitations .....	45
Tableau 4.10 – Tableau des taux de variation moyens des précipitations .....	45
Tableau 4.11 – Taux de variation moyens des précipitations .....	49
Tableau 4.12 – Taux de variation moyens des précipitations .....	50
Tableau 4.13 – Taux de variation des précipitations annuelles par horizon et par zone pour le modèle climatique HadCM3 avec les scénarii Anomalie (colonne blanche) et Horizon (colonne grise).....	55
Tableau 4.14 – Taux de variation des précipitations annuelles par horizon et par zone pour le modèle climatique CSIRO_Mk2 avec les scénarii Anomalie (colonne blanche) et Horizon (colonne grise).....	56
Tableau 4.15 – Taux de variation des précipitations annuelles par horizon et par zone pour le modèle climatique NCAR_PCM avec les scénarii Anomalie (colonne blanche) et Horizon (colonne grise).....	58
Tableau 4.16 – Taux de variation moyens des précipitations annuelles par zone et par horizon pour ECHAM4 avec les scénarii Anomalie (colonne blanche) et Horizon (colonne grise) .....	60
Tableau 4.17 – Taux de variation moyens des précipitations avec CSIRO_Mk2 (colonne blanche) et NCAR_PCM (colonnes grise) avec le scénario Horizon .....	64
Tableau 4.18 – Taux de variation moyens des précipitations avec NCAR_PCM (colonne blanche) et ECHAM4 (colonne grise).....	64
Tableau 4.19 – Taux de variation moyens des précipitations avec NCAR_PCM (colonne blanche) et ECHAM4 (colonne grise).....	65
Tableau 4.20 – Taux de variation moyens des précipitations avec CSIRO_Mk2 (colonne blanche) et NCAR_PCM (colonne grise).....	65

Tableau 4.21 – Taux de variation moyens des précipitations avec HadCM3 (colonne blanche) et ECHAM4 (colonne grise) .....	66
Tableau 4.22 – Variation de l’ETP Turc sur les trois horizons par rapport à la période de référence propre à chaque modèle climatique .....	71

### **Partie V : Les prévisions d’évolution des écoulements de fleuves en Afrique de l’Ouest et centrale**

Tableau 5.1 – Taux de variation moyens des débits en chaque bassin .....	74
Tableau 5.2 – Taux de variation moyens des débits en chaque bassin .....	78
Tableau 5.3 – Taux de variation moyens des débits en chaque bassin .....	82
Tableau 5.4 – Taux de variation moyens des débits en chaque bassin .....	87
Tableau 5.5 – Taux moyens de variation des débits pour chaque bassin avec les scénarii Anomalie (colonne blanche) et Horizon (colonne grise) .....	95
Tableau 5.6 – Taux moyens de variation des débits pour chaque bassin avec les scénarii Anomalie (colonne blanche) et Horizon (colonne grise) .....	96
Tableau 5.7 – Taux moyens de variation des débits pour chaque bassin avec les scénarii Anomalie (colonne blanche) et Horizon (colonne grise) .....	100
Tableau 5.8 – Taux moyens de variation des débits pour chaque bassin avec les scénarii Anomalie (colonne blanche) et Horizon (colonne grise) .....	109

### **Partie VI : Travail d’automatisation**

Tableau 6.1 – Type de discrétisation et de numérotation pour chaque modèle climatique ...	118
---	-----