



HAL
open science

Notice de présentation des projections et incertitudes pour Explore2

Alix Reverdy, Guillaume Evin, Benoît Hingray

► **To cite this version:**

Alix Reverdy, Guillaume Evin, Benoît Hingray. Notice de présentation des projections et incertitudes pour Explore2. INRAE; CNRS. 2023. hal-04258382v1

HAL Id: hal-04258382

<https://hal.inrae.fr/hal-04258382v1>

Submitted on 25 Oct 2023 (v1), last revised 19 Dec 2023 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**NOTICE DE PRESENTATION
DES PROJECTIONS ET INCERTITUDES
POUR EXPLORE2**

**Alix REVERDY, IGE
Guillaume EVIN, IGE
Benoit HINGRAY, IGE**

16/10/2022

Avec le soutien financier de :



Le projet Explore2, porté par INRAE et l'Office International de l'eau (OiEau), s'inscrit dans la suite de l'étude Explore 2070 (2010-2012) grâce à laquelle les acteurs de la recherche, autour du Ministère de l'écologie, avaient établi des premiers scénarios prospectifs de disponibilités des ressources en eau à l'échelle de la France à horizon 2070. Officiellement lancé en juillet 2021, co-financé par les partenaires du projet, le Ministère de la transition écologique (MTE) et l'Office français de la biodiversité (OFB), le projet Explore2 a pour objectif, d'ici 2024, d'actualiser les connaissances sur l'impact du changement climatique sur l'hydrologie à partir des publications du GIEC (CMIP5), mais aussi d'accompagner les acteurs des territoires dans la compréhension et l'utilisation de ces résultats pour adapter leurs stratégies de gestion de la ressource en eau.

Nom du projet	Explore2 : Anticiper les évolutions climatiques et hydrologiques en France
Nom du rapport	Notice de présentation des projections et incertitudes pour Explore2
Auteur(s)	Alix REVERDY, IGE Guillaume EVIN, IGE Benoit HINGRAY, IGE
Numéro de version	1
Date contractuelle de remise du livrable	01/07/2023
Date effective de remise du livrable	01/10/2023
Statut du document	version provisoire /version finale
Accès en ligne	libre/ restreint /confidentiel
Mots-clés (5 maximum)	

Table des matières

1.	Introduction	10
1.1	Objectif du document.....	10
1.2	Préambule : ensemble de projections et incertitudes	10
1.2.1	Incertitudes associées aux projections climatiques	10
1.2.2	Chaines de modélisation utilisées pour les projections d'Explore2.....	11
1.2.3	L'ensemble de projections climatiques d'Explore2.....	11
1.3	Analyses et graphiques pour caractériser l'ensemble de projections	11
1.3.1	Représentation des incertitudes Explore2 et incertitudes réelles.....	11
1.3.2	Représentations graphiques pour Explore2.....	12
1.3.3	Variable considérée pour les illustrations de la notice	12
1.3.4	Projections chiffrées, narratifs de futurs plausibles.....	12
2	Représentations chronologiques par point de grille	13
2.1	Projections brutes et réponses climatiques d'un indicateur hydroclimatique.....	13
2.1.1	Projections brutes	13
2.1.2	Réponses en changement climatique	14
2.2	Changements projetés : moyenne d'ensemble et incertitudes.....	17
2.3	Réponses individuelles des modèles : Effets principaux.....	22
3	Représentations cartographiques à l'échelle nationale	24
3.1	Réponses en changement : moyenne d'ensemble et incertitudes.....	24
3.2	Variabilité interne.....	25
3.3	Répartition des sources d'incertitude	26
3.4	Effets principaux de chaque modèle : exemple des GCMs.....	28
4	Annexe : Modèles utilisés dans Explore2	30
5	Références	31

Résumé

Ce document a pour objectif d'exposer les concepts des analyses d'incertitudes faites avec l'ensemble de projections hydroclimatiques d'Explore2 et d'illustrer les représentations graphiques qui seront produites pour caractériser l'évolution future de différents indicateurs hydroclimatiques telle que projetée dans cet ensemble.

La méthode d'analyse fait appel à des méthodes statistiques avancées, qui permettent de produire différents types de résultats et de représentations graphiques. Le présent document en propose un niveau de lecture approfondi.

Acronymes

BC : *Bias Correction*, modèle de correction des biais systématiques produits par un couple GCM/RCM, voir rapport « Climat » d'Explore2.

GCM : *General Circulation Model*, modèle physique de représentation du climat à l'échelle planétaire.

HM : *Hydrological Model*, modèle hydrologique du fonctionnement d'un ou plusieurs bassins versants.

RCM : *Regional Climate Model*, modèle physique de représentation du climat à l'échelle régionale.

RCP : *Representative Concentration Pathways*, scénario d'émissions de gaz à effet de serre et aérosols.

Glossaire

Chaîne de modélisation/simulation : Série de scénarios et/ou modèles dont les sorties de l'un servent d'entrée pour l'autre. Par exemple : RCP8.5/CNRM-CM5/ALADIN63/ADAMONT/SIM2 (RCP/GCM/RCM/BC/HM).

Effet principal : Effet marginal d'un modèle/scénario/traitement caractérisé par la différence entre la moyenne de l'ensemble de toutes les chaînes spécifiques à ce modèle/scénario/traitement et la moyenne de tout l'ensemble. Ces moyennes sont calculées à partir de l'ensemble reconstitué.

Ensemble de projections (ou ensemble) : Un ensemble de projections obtenu avec plusieurs chaînes de modélisation différentes pour une même variable.

Ensemble de projections incomplet : Ensemble de projections pour lequel toutes les combinaisons de modèles possibles ne sont pas disponibles. Par exemple un ensemble où les projections ont été produites avec des chaînes GCM/RCM comprenant 3 GCMs (GCMa, GCMb, GCMc) et 2 RCMs (RCM1, RCM2) serait incomplet si l'expérience GCMb/RCM2 n'était pas disponible.

Ensemble reconstitué/complété équivalent : Ensemble de projections reconstitué par QUALYPSO à partir d'un ensemble incomplet. Il est équivalent à l'ensemble que formeraient les projections issues de toutes les combinaisons de modèles possibles.

Expérience climatique : Réalisation d'une chaîne de modélisation pour la période future, sur la base d'un scénario d'émission de gaz à effet de serre et aérosols. L'expérience climatique couvre typiquement une période de temps longue (par ex. 2010-2100 pour les expériences climatiques futures).

Indicateur (hydroclimatique) : Attribut ou grandeur permettant de caractériser d'un point de vue statistique une variable hydroclimatique donnée ; il est donc issu d'un calcul statistique sur une variable (moyenne annuelle de la température atmosphérique journalière, quantile 90% annuel du débit journalier...). Un indicateur est calculé sur une période de temps donnée (par exemple annuelle avec donc une valeur par an de cet indicateur ; pluriannuelle comme le module de débit sur 30 ans) ; un indicateur évolue donc aussi a priori dans le temps. Pour un indicateur donné, on en estimera la série chronologique sur la base de la variable climatique correspondante.

Membre (d'un ensemble d'expériences) : Pour certains modèles, plusieurs expériences climatiques ont été produites avec ce modèle pour un même scénario de forçage (par exemple plusieurs expériences d'un même GCM ont été produites pour un scénario d'émission RCP donné). Ces différentes expériences (ou ces différents membres) sont obtenues avec ce modèle en faisant varier les conditions initiales de la simulation ou la physique du modèle. Dans Explore2, un seul membre par modèle est considéré.

Période/horizon de référence : Période utilisée comme référence pour le calcul de changements relatifs futurs. Dans Explore2, il s'agit de la période 1976-2005, avec comme année centrale 1990.

Périodes/horizons futurs : Périodes utilisées pour produire des graphiques et analyses sur le climat projeté. Dans Explore2, il s'agit généralement des périodes 2016-2045, 2036-2065 et 2071-2100, avec comme années centrales 2030, 2050 et 2085.

Prévisions (ne pas confondre projection et prévision, cf. projection ci-dessous) : De même que les projections, les prévisions peuvent concerner de nombreuses variables liées au fonctionnement du système Terre. Une prévision météorologique (ou hydrologique ou...) veut donner la meilleure estimation possible des variations des conditions météorologiques (ou hydrologiques ou ...) que l'on verra se réaliser sur la région d'intérêt dans les heures, jours, ... mois qui arrivent (ici la température, l'humidité de l'atmosphère, la température de l'océan...). Cette estimation dépend beaucoup de l'état et de la dynamique actuels du système considéré (par exemple, température de surface des océans, localisation et

évolution récente et en court des systèmes dépressionnaires et anticyclonique, etc.). L'état courant du système est estimé avec un réseau dense d'observations de nature multiples (par exemple, réseaux d'observations locales au sol, radars météorologiques, satellites d'observation de la Terre, ...). Une prévision est mise à jour régulièrement au fur et à mesure que le temps avance (par exemple, toutes les 12 ou 24 heures pour les prévisions hebdomadaires) Du fait de la nature chaotique et complexe du système climatique, une prévision fiable n'est pas possible au-delà de quelques semaines environ et une prévision d'une tendance générale n'est pas possible au-delà de la saison (cf. les prévisions saisonnières basées sur les éléments inertiels du système climatique : glace de mer, modes atmosphériques...).

Projections climatiques (ne pas confondre projection et prévision, cf. prévision ci-dessus) : Une projection climatique fait référence au résultat d'une expérience climatique pour une période de temps future donnée. Cette période de temps est souvent limitée en durée. Par exemple : on peut parler de projection pour le milieu de siècle (2040-2070). Une projection s'appuie sur une chaîne de modélisation donnée et un scénario d'émission (de gaz à effets de serre et aérosols) donné. Elle vise à donner une simulation des climats régionaux à attendre pour ce scénario, c'est-à-dire l'ensemble des situations météorologiques possibles régionalement pour ce scénario (situations courantes, exceptionnelles et extrêmes, pluies fortes, sécheresses, vagues de chaleurs...). Les projections sont mises à jour tous les 6-10 ans, à l'occasion de grands plans d'expériences internationaux (les exercices « CMIP » de l'IPCC), pour bénéficier des avancées sur la modélisation du climat et de la mise à jour qui est faite par ailleurs, au regard de la trajectoire d'émission que l'on a observée jusqu'aux années récentes, des scénarios d'émission possibles pour les décennies à venir. Au sens large, une projection climatique peut faire référence à l'une ou l'autre des nombreuses variables liées au climat (par exemple, sur l'hydrologie, la cryosphère, les écosystèmes...)

QUALYPSO : Méthode d'analyse de variance (ANOVA) permettant de caractériser un ensemble de projections climatiques. QUALYPSO permet de déterminer la moyenne d'ensemble, l'incertitude totale associée et sa partition, les effets principaux des modèles utilisés pour les projections, ainsi que l'évolution temporelle - sur la période future considérée - de toutes ces grandeurs. Une qualité importante de QUALYPSO est qu'elle peut être appliquée pour un ensemble de projections incomplet (ensemble pour lequel certaines combinaisons de modèles sont manquantes), voir rapport « Incertitudes » du projet Explore2.

Réponse climatique : Evolution long terme et progressive d'une variable ou d'un indicateur en réponse aux changements projetés du climat. Dans QUALYPSO, elle est estimée à partir de l'ajustement d'un modèle de tendance, en l'occurrence une fonction de lissage forte (type spline) qui supprime les variations interannuelles à décennales de la variable ou de l'indicateur considéré (qui supprime la variabilité interne).

Réponse climatique en changement : On parle de réponse climatique en changement si la réponse climatique est exprimée en changement relatif/absolu par rapport à une période de référence.

Série/chronique « brute » : Chronique d'une variable climatique ou d'un indicateur sans traitement supplémentaire.

Variabilité interne : Variabilité (fluctuation) de la variable ou de l'indicateur considéré autour de la réponse climatique ; l'importance de la variabilité interne dépend de la variable considérée. La variabilité interne d'un débit annuel comprend la variabilité interannuelle à décennale. La variabilité interne d'un débit interannuel moyen (moyenne sur 30 ans) comprend seulement la variabilité décennale.

Variable (hydroclimatique) : Grandeur physique ou assimilée (température atmosphérique journalière, débit journalier, humidité des sols...) issue directement d'une chaîne de modélisation et dont la valeur varie dans le temps et l'espace.

Liste des figures

Figure 2.1 : Projections brutes du cumul des précipitations estivales (mm) pour le territoire du bassin Rhône-Méditerranée et le scénario RCP8.5. Chaque graphique montre les projections obtenues avec les différents RCMs disponibles pour un même couple GCM/BC. Dans cet ensemble de projection sont considérés : 2 méthodes de corrections de biais : (graphiques de gauche : ADAMONT et de droite : R2D2) ; six GCMs (un GCM par ligne) ; neuf RCMs (une couleur par RCM ; noms à droite). Période de simulation : 1951-2100 (période la plus longue disponible). 13

Figure 2.2 : Réponses climatiques en CHANGEMENT RELATIF correspondantes (toutes les lignes épaisses démarrant à 0, référence 1990) pour le cumul des précipitations estivales sur le territoire du bassin Rhône-Méditerranée (%) pour le RCP8.5 entre 1951 et 2100. Également projections brutes (traits fins). Chaque graphique montre les réponses en changement climatique obtenues avec les différents RCMs disponibles pour un même couple GCM/BC. Une couleur par RCM. 15

Figure 2.3 : a) Changement relatif moyen et incertitudes associées, b) accord entre les modèles sur le signe de la tendance et c) partition de la variance. 17

Figure 2.4 : Effets principaux (%) des différents a) GCMs (modèles climatiques globaux), b) RCMs (modèles climatiques régionaux), c) BCs (corrections de biais). Cumul des précipitations estivales sur le territoire du bassin Rhône-Méditerranée. Tous les RCPs sont considérés. Période : 1990-2098..... 22

Figure 3.1 : Carte du changement relatif du cumul des précipitations estivales pour la France métropolitaine en RCP8.5 (%), par rapport à la référence 1990, à 3 horizons temporels : 2030, 2050 et 2085 (en lignes). En colonnes sont donnés 1) le quantile 5% (projections basses), 2) la moyenne d'ensemble et 3) le quantile 95% (projections hautes) de l'ensemble Explore2 tel qu'estimés avec QUALYPSO (donc la moyenne d'ensemble et les bornes de l'intervalle d'incertitude à 90%). Cet intervalle d'incertitude prend en compte la dispersion entre les GCMs, les RCMs, les BCs et la variabilité résiduelle. Il ne prend pas en compte la variabilité interne. Pour la moyenne d'ensemble (colonne du milieu), le niveau d'accord entre chaînes de modélisation sur le signe du changement est donné par le figuré sous forme de hachures. Les zones présentant le figuré ont un niveau d'accord sur le signe du changement entre les chaînes de modélisation inférieur à 80%. Maillage 8x8km (SAFRAN). 24

Figure 3.2 : Carte de la variabilité interne (interannuelle et basse fréquence) du cumul des précipitations estivales pour la France métropolitaine (%). Valeur de l'écart-type. Horizon futur 2085. Maillage 8x8km (SAFRAN). 25

Figure 3.3 : Partition entre les différentes sources de dispersion entre les projections (%) pour le cumul des précipitations estivales. 5 carte du haut : dispersion liée aux différents maillons de la modélisation (somme à 100%). Carte du bas : pourcentage de la dispersion totale liée à la modélisation. Horizon 2085. Maillage 8x8km (SAFRAN). 26

Figure 3.4 : Carte des effets principaux des GCMs pour le cumul des précipitations estivales sur la France métropolitaine en 2050 (%), par rapport à la référence 1990. Maillage 8x8km (SAFRAN). 28

Liste des tableaux

Aucune entrée de table d'illustration n'a été trouvée.

1. Introduction

1.1 Objectif du document

Cette notice détaillée a pour objectif d'exposer les concepts des analyses d'incertitudes faites avec l'ensemble de projections hydroclimatiques d'Explore2 et d'illustrer les représentations graphiques qui seront produites pour caractériser l'évolution future de différents indicateurs hydroclimatiques telle que projetée dans cet ensemble.

La méthode d'analyse fait appel à des méthodes statistiques avancées, qui permettent de produire différents types de résultats et de représentations graphiques. Cette notice détaillée présente les principaux résultats obtenus avec la méthode ainsi que certains résultats auxiliaires (accord sur le signe du changement, réponses climatiques individuelles des modèles, partition des incertitudes, variabilité interne...). **Une notice courte vise les seuls résultats principaux de la méthode.**

Les graphiques présentés ici et les interprétations qui en sont faites sont utilisés uniquement pour illustration. **Ils/elles ne correspondent pas aux résultats finaux du projet.**

Différents termes techniques sont utilisés pour nommer les concepts ou variables considérés ici. Ces termes sont ceux utilisés dans les rapports du GIEC par la communauté des sciences du climat. Ils sont explicités dans un **glossaire en début de document.**

1.2 Préambule : ensemble de projections et incertitudes

1.2.1 Incertitudes associées aux projections climatiques

Les projections climatiques pour la majeure partie des variables météorologiques sont fortement incertaines. Par commodité, ou parce qu'il est difficile de les considérer pour nos choix d'adaptation aux changements à venir, les incertitudes associées aux projections ont souvent été ignorées ou partiellement traitées dans les études d'impact. Pour réduire les risques de mal-adaptations, elles devraient l'être systématiquement. Différentes approches ont été proposées à cet effet. Cette question est hors sujet ici. Elle sera abordée dans d'autres productions du projet Explore2.

De façon générale, les incertitudes associées aux projections climatiques sont dues :

- **Aux incertitudes sur le scénario d'émission** de gaz à effet de serre et aérosols (RCP),
- **Aux incertitudes « modèle »** (modèles de climat global (GCMs), modèles de climat régional (RCMs), méthodes de correction de biais (BCs), modèles hydrologiques (HMs)),
- **Aux incertitudes liées à la « variabilité interne »** du climat.

Grâce aux progrès de modélisation réalisés continûment par la communauté scientifique, les incertitudes « modèle » diminuent en principe d'un exercice de modélisation au suivant. Les incertitudes liées à la variabilité interne du climat sont à l'inverse irréductibles. Elles sont liées à la nature du climat qui a une part de variabilité propre (variabilité naturelle qui est indépendante des changements actuels et futurs induits par les activités humaines). Les fluctuations du climat liées à sa variabilité interne sont de nature à réduire ou à amplifier, de façon temporaire (par exemple, pendant une ou plusieurs années successives) les changements moyens attendus sur le long terme du fait des activités humaines. Parce qu'elles sont aussi importantes à connaître en sus des changements moyens simulés, les incertitudes liées à la variabilité interne sont aussi souvent indiquées par la suite.

Pour estimer les différentes incertitudes mentionnées plus haut, on utilise typiquement un ensemble de projections produit pour différents scénarios d'émission et constitué pour chacun de ces scénarios, par les sorties de différentes chaînes de modélisation.

1.2.2 Chaines de modélisation utilisées pour les projections d'Explore2

Une **chaîne de modélisation** est une chaîne de modèles permettant de simuler l'évolution temporelle, sur une période de temps future donnée, de différentes variables hydroclimatiques (par exemple : les précipitations). Dans Explore2, une chaîne de modélisation comprend typiquement :

1. Un modèle de climat global (GCM), qui simule l'évolution du climat global pour le scénario d'émission retenu,
2. Un modèle de climat régional (RCM), qui simule l'évolution du climat de la région d'intérêt (par exemple, l'Europe) qui pourrait résulter de l'évolution du climat global simulée par le GCM,
3. Un modèle de correction des biais (BC) systématiques produits par la combinaison GCMxRCM considérée et
4. Un modèle hydrologique (HM), qui simule l'évolution de l'hydrologie du bassin versant choisi (par exemple, la Loire) qui pourrait résulter de l'évolution du climat régional simulée par le RCM.

Pour chaque type de modèle, on a généralement à disposition plusieurs modèles pour effectuer les simulations. Pour le GCM par exemple, on utilise dans Explore2 l'un ou l'autre des GCMs suivants : CNRM-CM5-LR de Météo France, IPSL-CM5A-MR de l'IPSL, le modèle communautaire européen EC-EARTH, etc. (cf. Annexe).

1.2.3 L'ensemble de projections climatiques d'Explore2

L'ensemble de projections climatiques d'Explore2 a été obtenu avec trois scénarios d'émission (RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5) et une vingtaine de chaines de modélisation. Ces chaines utilisent six GCMs (voir Annexe), neuf RCMs (voir Annexe), deux méthodes de corrections de biais (ADAMONT et R2D2) et 4 à 8 HMs selon les bassins versants.

1.3 Analyses et graphiques pour caractériser l'ensemble de projections

Pour caractériser l'ensemble des projections effectuées pour une variable ou un indicateur donné, différentes analyses et représentations graphiques peuvent être réalisées.

Dans Explore2, nous estimons principalement

1. L'évolution **de la moyenne d'ensemble des projections disponibles** (correspondant à l'ensemble des chaînes de simulation disponibles pour Explore2), et
2. Différentes informations sur les **incertitudes associées à ces projections**, en particulier celles associées a/ **aux choix de simulation retenus** (scénarios d'émission, modèles de simulation retenus et horizon temporel futur considéré) et b/ **à la variabilité interne du climat**.

Les analyses ont été obtenues avec la **méthode QUALYPSO** (Evin *et al.*, 2019 et 2021).

1.3.1 Représentation des incertitudes Explore2 et incertitudes réelles

Dans la suite, la plage d'incertitude couverte par les projections est souvent caractérisée par la limite basse et la limite haute des projections disponibles. En première approximation, ces limites correspondent aux percentiles 5 et 95% des réponses climatiques obtenues avec les différentes chaines de simulation considérées dans l'ensemble de projections choisi pour l'analyse (ici l'ensemble de projection Explore2).

Du fait qu'elle est conditionnelle à l'ensemble choisi, cette plage d'incertitude NE PEUT PAS être interprétée de façon probabiliste et il N'EST PAS pertinent de parler d'intervalle de confiance.

Il faut garder toujours à l'esprit que les moyennes d'ensemble et les incertitudes fournies sont conditionnelles à l'ensemble des expériences climatiques utilisées et aux hypothèses choisies pour les produire. En particulier, elles sont conditionnelles aux scénarios d'émission retenus. Or, aucun d'entre eux n'a une chance de se réaliser exactement.

Même si elle peut en donner une idée, la plage d'incertitude estimée à partir des projections d'un ensemble donné NE CORRESPOND PAS à la plage d'incertitude réelle sur les futurs possibles (voir le rapport « incertitudes » du projet Explore2 pour plus de détails à ce sujet).

1.3.2 Représentations graphiques pour Explore2

Dans Explore2, pour chaque variable / indicateur considéré (par exemple, le débit annuel moyen), deux types de représentations graphiques sont proposés :

- Des représentations de l'évolution chronologique estimée pour le siècle à venir et une unité spatiale choisie (par exemple, un bassin versant particulier),
- Des représentations cartographiques évaluées pour un horizon futur donné et un ensemble de sites d'une région donnée (par exemple, réseau de stations de mesure de débits disponibles sur la France).

L'horizon futur considéré peut être un horizon temporel (par exemple, période 2050-2070) ou un horizon de réchauffement planétaire (par exemple, projection pour un réchauffement de +1.5°C).

1.3.3 Variable considérée pour les illustrations de la notice

Les illustrations qui suivent ont été obtenues pour les projections du « cumul des précipitations estivales ». Des analyses et représentations similaires seront proposées dans Explore2 pour des indicateurs sur les débits ou pour d'autres indicateurs climatologiques, tels que ceux présentés dans des « fiches résultats par bassins versants ».

Tous les graphes de cette notice concernent des valeurs moyennes sur l'ensemble du bassin Rhône-Méditerranée, mais les représentations graphiques pourront être disponibles pour tout point de la grille 8x8 km utilisée (identique à la grille de la réanalyse SAFRAN) ou pour la moyenne de ces points de grille sur un territoire choisi, plus grand.

1.3.4 Projections chiffrées, narratifs de futurs plausibles

Les représentations graphiques permettent de caractériser de façon synthétique l'ensemble de projections climatiques disponible. Pour Explore2, l'accès à des projections chiffrées ne se fait pas par lecture graphique, mais par utilisation de tables ou fichiers de données (accessible via le portail DRIAS-Eau par exemple).

De même, l'analyse d'ensemble conduite ici a vocation à être utilisée conjointement à une approche par « narratifs », au vu de nos connaissances actuelles. Cette approche par narratifs sera construite sur les simulations de quelques chaînes de projections, proposant différents « récits » de futurs plausibles et contrastés.

2 Représentations chronologiques par point de grille

2.1 Projections brutes et réponses climatiques d'un indicateur hydroclimatique

2.1.1 Projections brutes

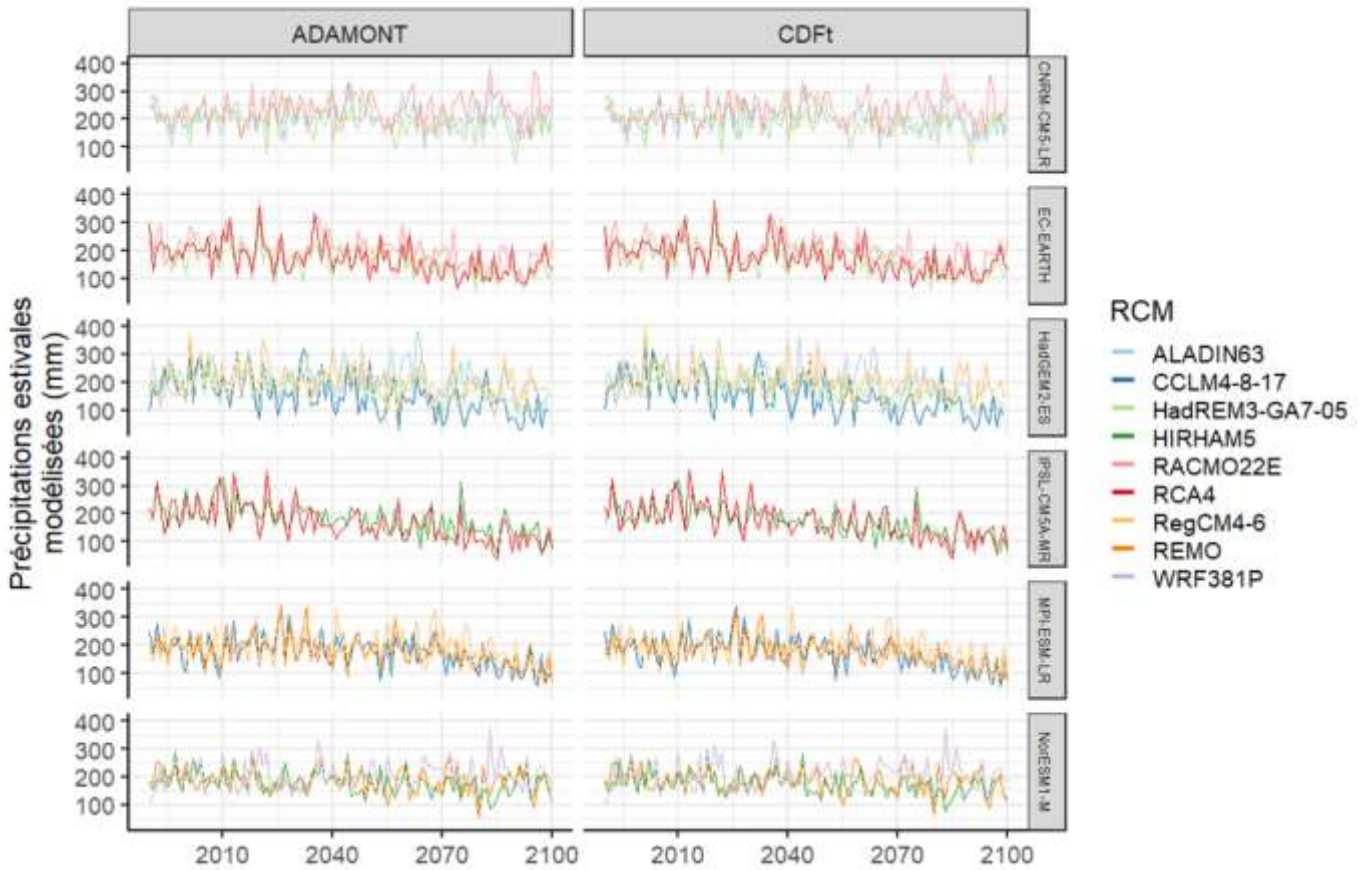


Figure 2.1 : Projections brutes du cumul des précipitations estivales (mm) pour le territoire du bassin Rhône-Méditerranée et le scénario RCP8.5. Chaque graphique montre les projections obtenues avec les différents RCMs disponibles pour un même couple GCM/BC. Dans cet ensemble de projection sont considérés : 2 méthodes de corrections de biais : (graphiques de gauche : ADAMONT et de droite : R2D2) ; six GCMs (un GCM par ligne) ; neuf RCMs (une couleur par RCM ; noms à droite). Période de simulation : 1951-2100 (période la plus longue disponible).

Utilité de ces figures pour l'utilisateur :

1. Visualiser l'indicateur « brut » avant analyse d'incertitude et pour chaque chaîne individuellement. Repérer d'éventuels artefacts (« bugs ») de modélisation.
2. Se représenter la difficulté d'analyse d'un ensemble de projections aussi fourni. Comprendre les concepts de « réponse climatique » (le signal tendanciel ou la tendance), de « fluctuations » autour de la tendance et de variabilité interne du climat. Pour une chaîne de modélisation donnée :
 1. Sa « réponse climatique » pour le scénario d'émission considéré, est l'évolution tendancielle simulée sur la période considérée, de la variable d'intérêt.
 2. Les « fluctuations » autour de la tendance résultent de la « variabilité interne » du climat. Elles peuvent temporairement atténuer ou amplifier la réponse climatique de la chaîne.

Eclairages sur les résultats présentés :

1. Le cumul des précipitations estivales projeté avec la chaîne RCP8.5/IPSL-CM5A-MR/RCA4/R2D2 a tendance à diminuer sur le XXI^e siècle, mais les fluctuations interannuelles importantes peuvent toujours conduire à des alternances d'années sèches et humides, bien qu'un peu plus sèches et un peu moins humides en fin de siècle.

A noter :

1. **Les projections d'une chaîne de** modélisation pour une variable correspondent aux données de simulation obtenues directement en sortie de cette chaîne de modélisation (elles sont disponibles sous forme de séries temporelles, par exemple la précipitation totale en un point de grille). Elles permettent de calculer les chroniques des **projections brutes d'indicateurs** par réduction statistique (débit moyen mensuel, cumul des précipitations estivales...).
2. Chaque panel de la Figure 2.1 montre les chroniques du cumul des précipitations estivales sur le territoire du bassin Rhône-Méditerranée, pour différentes chaînes de modélisation comprenant les mêmes GCMs et BCs et plusieurs RCMs différents (ensemble présenté dans l'Annexe).
3. Quelle que soit la chaîne de simulation considérée, la variabilité temporelle (interannuelle) des projections est importante. Pour le cas présent des projections de cumul des précipitations estivales, elle « bruite » de façon importante les tendances.
4. Pour un même GCM, les différentes projections obtenues avec les différents RCMs présentent des chronologies (fluctuations) similaires, ce qui est cohérent car les RCMs sont forcés par la même chronologie des conditions atmosphériques « grande échelle » (GCM).

2.1.2 Réponses en changement climatique

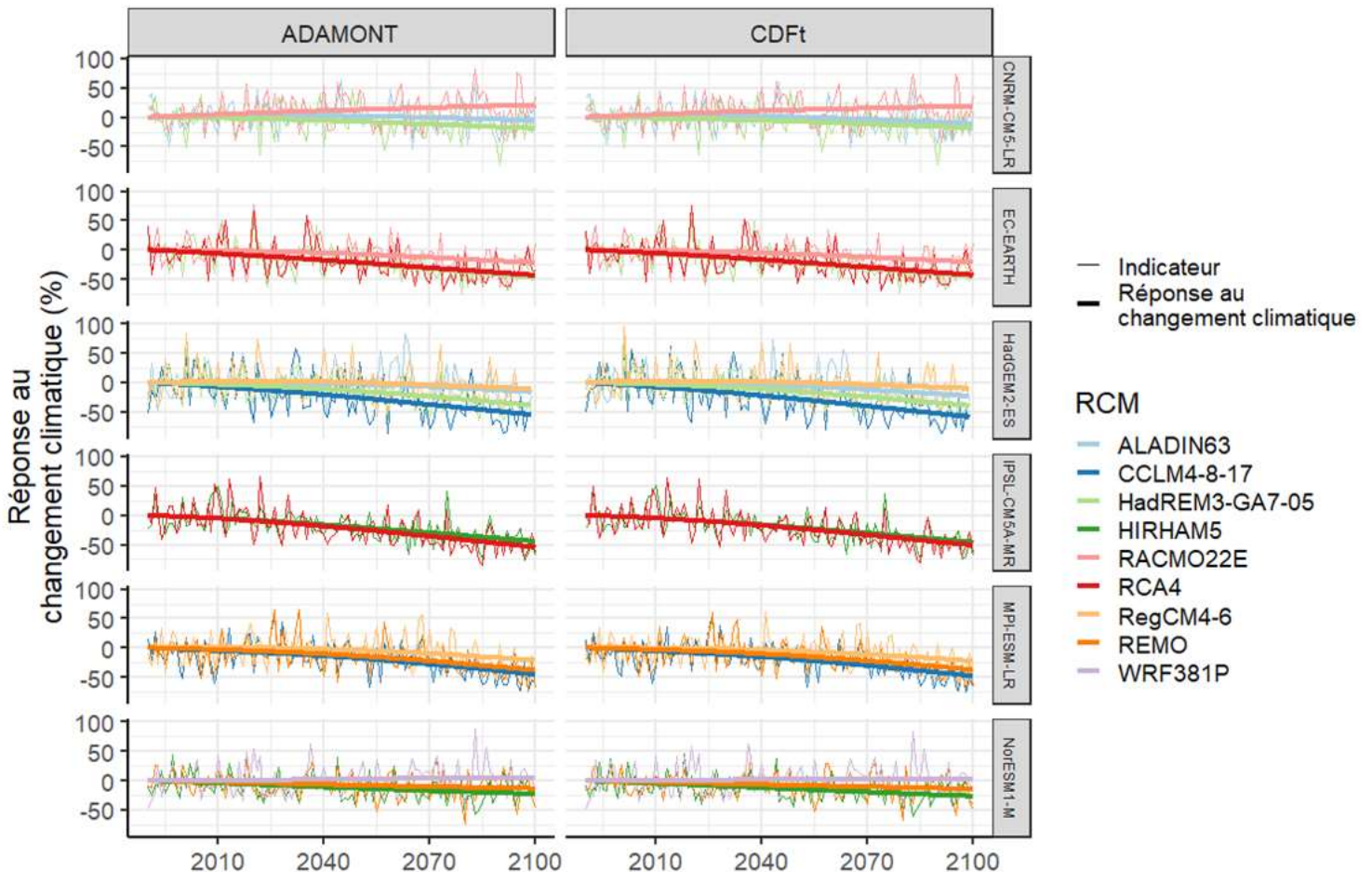


Figure 2.2 : Réponses climatiques en CHANGEMENT RELATIF correspondantes (toutes les lignes épaisses démarrant à 0, référence 1990) pour le cumul des précipitations estivales sur le territoire du bassin Rhône-Méditerranée (%) pour le RCP8.5 entre 1951 et 2100. Également projections brutes (traits fins). Chaque graphique montre les réponses en changement climatique obtenues avec les différents RCMs disponibles pour un même couple GCM/BC. Une couleur par RCM.

Utilité pour l'utilisateur :

1. Comprendre le nécessité de l'extraction d'un signal en changement à partir des chroniques brutes, à l'aide d'une fonction de lissage.
2. Visualiser les réponses climatiques en changement et la qualité de leur ajustement sur la chronique brute.
3. Illustrer la variabilité interne du climat autour de ces réponses en changement.
4. Comprendre le concept de changement relatif.

Eclairages :

1. Pour la chaîne de modélisation RCP8.5/CNRM-CM5-LR/RACMO22E, le changement relatif du cumul des précipitations estivales en 2100 par rapport à 1990 est de l'ordre de +25% en réponse climatique. Pour cette même chaîne, la chronique brute des changements relatifs varie entre environ -50% et +75% sur le XXI^e siècle.
2. Pour RCP8.5/IPSL-CM5A-MR/WRF381P, le changement relatif est de -50% en 2100 avec une gamme de variations au cours du siècle de -75% à +75%.

A noter :

1. **La réponse climatique d'une chaîne de simulation** pour une période future donnée est la réponse moyenne attendue du système considéré pour ce scénario d'émission de gaz à effet de serre. C'est la partie basse fréquence de la chronique des projections brutes. Elle présente donc nécessairement une évolution lente.
2. Ici, la réponse climatique de chaque chaîne de simulation est estimée à partir des projections brutes à l'aide d'un modèle de tendance (spline) qui permet un lissage très fort de la chronique brute considérée (plus fort que l'habituelle moyenne glissante 30 ans qui conserve la variation naturelle du climat à l'échelle décennale, voir rapport « Incertitudes » du projet Explore2).
3. L'écart des projections brutes à la réponse climatique résulte de la variabilité interannuelle et des variabilités à plus basse fréquence du système climatique (appelée communément **variabilité « naturelle » ou « interne »**). La variabilité interne simulée par les chaînes de modélisation est sensée correspondre à la variabilité naturelle telle que présente dans les séries observées. Du fait de l'imperfection des modèles, la variabilité interne simulée peut fortement sur ou sous-estimer la variabilité interne naturelle.
4. Il est fondamental de séparer ces deux composantes (réponse climatique en changement / fluctuations autour de cette réponse climatique) pour avoir une estimation robuste des changements projetés (en tendance et en variabilité) par la chaîne considérée.
5. Pour caractériser les changements, on utilise soit des CHANGEMENTS RELATIFS, soit des CHANGEMENTS ABSOLUS. Par exemple, dans Explore2 (en accord avec la pratique scientifique commune) on utilise des **changements absolus pour les températures et relatifs pour la plupart des autres variables**.

6. Dans le cas de changements relatifs, le changement s'exprime de façon adimensionnelle ou en pourcentage (comme dans la Figure 2.2). Dans le cas d'un changement absolu, il s'exprime dans l'unité de l'indicateur considéré.
7. **Le changement** est calculé sur la chronique de la réponse climatique extraite des projections brutes (la courbe obtenue avec le modèle spline). Pour une période future donnée, le changement est la différence entre la valeur de la réponse climatique obtenue pour cette période et celle obtenue pour la période de référence. Ainsi, ici en 1990 (centre de la période de référence) toutes les réponses en changement climatique valent 0%.
8. Dans ce rapport, la période de référence est 1976-2005 (parfois appelée 1990 par simplification).
9. L'utilisation d'un changement relatif pour décrire les changements permet si besoin d'intercomparer les changements obtenus pour des zones avec un cumul de précipitations estivales initial différent (ce qui ne serait pas le cas avec un changement absolu en mm).

2.2 Changements projetés : moyenne d'ensemble et incertitudes

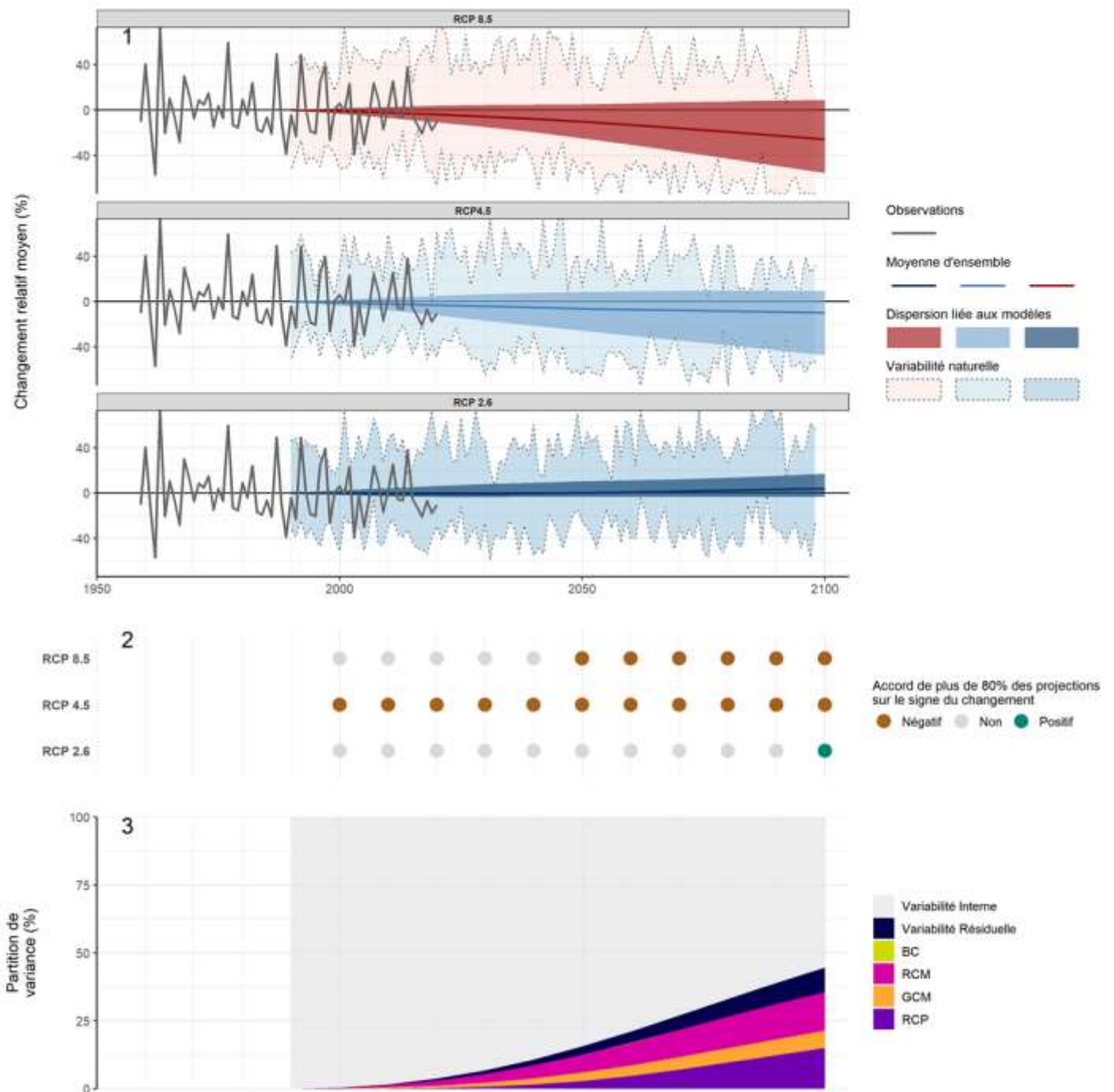


Figure 2.3 : a) Changement relatif moyen et incertitudes associées, b) accord entre les modèles sur le signe de la tendance et c) partition de la variance.

- Changement relatif moyen (traits plein) et incertitude sur les réponses climatiques (plage colorée foncée) pour les différents scénarios RCP considérés (%). Également plage minimum-maximum de réponse relative en changement des chaînes disponibles en entrée de QUALYPSO (plage colorée claire). Pour référence, les « observations » (issues de la réanalyse SAFRAN) sont données sur la période passée. L'incertitude sur les réponses climatiques est issue des quantiles 5% et 95% des réponses estimées par QUALYPSO. Il s'agit donc de l'incertitude modèle (ici : GCM, RCM et BC).
- Accord sur le signe de la tendance chaque 10 ans et pour chaque RCP correspondant à la fraction de projections (réponses climatiques) montrant un même signe. Seuil à 80% d'accord. Un accord sur un changement négatif exprime ici que 80% des chaînes de modélisation simulent un changement négatif.
- Pourcentage (en variance) de l'incertitude totale expliquée par chaque source d'incertitude (%). Gris : incertitude associée à la variabilité interne du climat. [Bleu marine + Violet + Rose + Orange + Jaune] : incertitude associée à la dispersion entre les réponses climatiques des

différentes chaînes de simulation. Violet : incertitude RCP (variance des effets principaux des différents RCPs) ; Orange : incertitude GCM (variance des effets principaux des différents GCMs) ; Rose : incertitude RCM (variance des effets principaux des différents RCMs) ; Jaune : incertitude BC (variance des effets principaux des différentes BCs) ; Bleu foncé: incertitude liée à la variabilité résiduelle.

Indicateur : cumul des précipitations estivales sur le territoire du bassin Rhône-Méditerranée; référence : 1990.

Utilité pour l'utilisateur :

1. Visualiser rapidement les tendances d'évolution d'un indicateur pour chaque RCP, ainsi que leur incertitude et la gamme de variabilité interne telles qu'estimées dans l'ensemble de projection considéré (Figure 2.3a).
2. Faire une première estimation de l'accord sur le signe des tendances observées (Figure 2.3b).
3. Mettre en évidence les maillons de la chaîne de modélisation pour lesquels le désaccord est le plus important entre les modèles (Figure 2.3c).

Eclairages :

1. Si les RCPs 8.5 et 4.5 sont plutôt en accord sur une diminution du cumul des précipitations estivales jusqu'en 2085, avec le scénario RCP2.6, on voit plutôt une stagnation, voire une légère augmentation. (Figure 2.3a).
2. L'incertitude entre les réponses des chaînes de modélisation (enveloppes foncées) est plus importante que la dispersion entre les scénarios RCPs. Les projections obtenues avec les 3 RCPs, incertitudes comprises, se recoupent donc fortement (Figure 2.3a).
3. L'incertitude totale sur la réponse en changement augmente au cours du temps car les chaînes de modélisation proposent des réponses climatiques de plus en plus divergentes en fonction du temps (Figure 2.3a). Elles sont par contre de plus en plus en accord sur le signe du changement (Figure 2.3b). Ainsi, on peut observer un accord sur un changement positif du cumul de précipitations estivales pour le RCP2.6, seulement à la toute fin du XXI^e siècle. Avant les projections sont plus ou moins partagées sur la direction de la tendance pour ce RCP.

4. La variabilité interne est aussi importante. En début de siècle, c'est la seule source de dispersion car la variabilité liée aux différents modèles de climat a été gommée par le calcul de changements relatifs. On note qu'en plus des changements sur la moyenne d'ensemble (traits pointillés) et l'incertitude sur la réponse des modèles (plage colorée foncée), la variabilité interne (plage colorée claire) induit une dispersion supplémentaire si l'on considère non plus la tendance moyenne, mais la gamme de futurs projetés autour de cette moyenne (Figure 2.3a).
5. Dans tous les cas : la variabilité interne est l'unique source de dispersion au début du XXI^e siècle (par construction, il n'y a pas d'incertitude liée aux modèles, ni aux scénarios sur les changements car les changements relatifs ou absolus sont égaux à 0 pour la période de référence). Sa contribution relative à la dispersion totale se réduit avec le temps, étant donné qu'elle est estimée, par hypothèse, constante au cours du temps. A l'inverse, la part d'incertitude liée aux modèles et aux scénarios augmente avec le temps (Figure 2.3c).
6. Dans le cas présent, la principale source d'incertitude en fin de siècle est l'incertitude liée aux RCMs (après la variabilité interannuelle) et aux RCPs. L'incertitude liée aux GCMs est faible en comparaison. Étant donné que l'on travaille en relatif l'incertitude liée aux BCs est très faible et non visible sur le graphique. Ce genre d'illustration permet de mettre en évidence les maillons de la chaîne de modélisation pour lesquels le désaccord est le plus important entre les modèles (Figure 2.3c). Par exemple, une incertitude importante liée aux RCMs en fin de siècle signifie qu'un jeu de projections basé sur un seul RCM ne rendrait pas compte de cette source d'incertitude importante et serait donc sous-dispersif.
7. La variabilité résiduelle est non négligeable en fin de siècle (Figure 2.3c).
8. En 2050, environ 10% de la dispersion totale provient de la dispersion entre les effets principaux des différents RCMs, alors que cette valeur est d'approximativement 15% en fin de siècle (Figure 2.3c).

A noter :

1. La représentation de la Figure 2.3a est inspirée d'une représentation classique du rapport du GIEC. La moyenne du changement relatif estimé pour l'ensemble de projections considéré, ainsi que l'incertitude (sans la variabilité interne) sur les réponses climatiques obtenues avec les différentes chaînes de modélisation possibles pour l'ensemble, sont représentées en fonction du temps pour les 3 RCPs sélectionnés (Figure 2.3a).
2. La Figure 2.3a présente les changements moyens simulés et les incertitudes associées tels qu'estimés avec la méthode QUALYPSO. Les estimations QUALYPSO correspondent aux estimations qui auraient été obtenues si l'ensemble de projection considéré avait été complet (cad si toutes les combinaisons de modèles avaient été disponibles). QUALYPSO permet d'estimer par des méthodes statistiques avancées cet ensemble équivalent. On évite ainsi de donner trop de poids à des modèles sur-représentés par rapport aux autres dans l'ensemble.
3. QUALYPSO est appliquée aux fonctions de réponses présentées précédemment. La méthode se base sur l'estimation d'effets principaux additifs pour chaque composante de la chaîne de simulation (principe de l'ANOVA), comme présenté par la suite (Figure 2.4), voir rapport « Incertitudes » du projet Explore2.
4. Variabilité interne : la variabilité interne (interannuelle jusqu'à décennale) est illustrée à l'aide des valeurs minimales et maximales de l'ensemble de chaînes en entrée à chaque pas de temps (Figure

2.3a plage colorée claire). Elle donne une idée de la variabilité interannuelle qui fournit la gamme de variations totales modélisées.

5. Les valeurs observées pour les années passées sont fournies à titre de référence et s'intersectent pour quelques années avec les projections. Comme attendu, durant cette période (1990-2005) la superposition entre observations directes et modélisation issues de projections n'est pas parfaite (elle n'a d'ailleurs aucune raison de l'être du fait de la variabilité interne du climat) (Figure 2.3a).
6. Dans la Figure 2.3a, on présente les effets de trois sources de dispersion différentes :
 - Celles associées au scénario d'émission : ce sont les trois figures correspondant respectivement aux scénarios RCP2.6, 4.5 et 8.5.
 - Celles associées aux modèles considérés dans la chaîne de modélisation. Ce sont les incertitudes sur les réponses climatiques simulées par ces chaînes. Elles sont représentées par la bande colorée foncée sur chacune des figures précédentes.
 - Celles associées à la variabilité interne du climat. Elles se traduisent pour chaque chaîne par des fluctuations interannuelles et décennales autour de sa réponse climatique. L'enveloppe des fluctuations obtenues pour toutes les chaînes de simulations est représentée ici par la bande colorée claire et d'extension variable selon l'année. L'extension variable correspond au fait que les limites de cette bande sont déterminées par les réalisations particulières, obtenues pour chaque année, de la variable considérée. Un autre ensemble de projections climatiques produit avec les mêmes chaînes de modélisations conduirait à des réalisations particulières différentes et donc des fluctuations interannuelles différentes. En revanche, cet autre ensemble de projections montrerait des réponses climatiques estimées très similaires à celles du premier ensemble.
7. Les bornes supérieures et inférieure de la bande « variabilité interne » correspondent aux déviations maximales et minimales obtenues dans les expériences climatiques des chaînes de simulation considérées.
8. Les bornes supérieures et inférieures de la bande « incertitude modèle » (bande foncée) correspondent, en première approximation, aux quantiles 5% et 95% de l'ensemble fourni par QUALYPSO (voir rapport « Incertitudes » du projet Explore2). Plusieurs remarques à ce sujet :
 - a. La borne supérieure (quantile 95%) (et respectivement la borne inférieure = quantile 5%) correspond à la valeur prise par une des chaînes de modélisation considérée. La chaîne en question peut différer d'une année à l'autre. La trajectoire temporelle du quantile 95% (respectivement du quantile 5%) ne correspond donc *a priori* pas à la trajectoire d'une chaîne de modélisation particulière.
 - b. L'**intervalle (5-95%)** est l'intervalle comprenant 90% des réponses en changement simulées disponibles. C'est un **intervalle d'incertitude** conditionnel à l'ensemble de modèles et au(x) scénario(s) considéré(s) pour l'analyse. Ce n'est **pas un intervalle de confiance** (il ne porte aucune information de probabilité).
9. Le **pourcentage d'accord entre les chaînes de modélisation**, sur le signe du changement simulé, est donné chaque année et pour chaque RCP dans la Figure 2.3b. Il donne une idée de la « significativité » de la moyenne d'ensemble du changement. **Cette « significativité » n'a pas de valeur statistique.**

10. La Figure 2.3c illustre la **contribution RELATIVE à la variabilité totale des différents types d'incertitude de la chaîne de modélisation** (variabilité interne, variabilité résiduelle, incertitude RCP, incertitude GCM, incertitude RCM, incertitude BC). La contribution est un rapport de variance (variance de l'incertitude GCM / variance de l'incertitude totale), exprimé en pourcentage. Sur la Figure 2.3c, les différentes couleurs de la plage colorée représentent l'origine des incertitudes sur la réponse en changement. Ce sont :
- En violet : incertitude RCP ; relative à la dispersion entre les réponses climatiques moyennes obtenues respectivement pour les différents RCPs.
 - En orange : l'incertitude GCM ; relative à la dispersion entre les réponses climatiques moyennes obtenues respectivement pour les différents GCMs (en pratique, l'incertitude GCM pour une période future donnée est la variance des effets principaux des différents GCMs estimés pour cette période, comme illustré en Figure 2.4a).
 - En rose : l'incertitude RCM ; relative à la dispersion entre les réponses climatiques moyennes obtenues respectivement pour les différents RCMs (en pratique, variance des effets principaux des différents RCMs, comme illustré en Figure 2.4b).
 - En jaune : l'incertitude BC ; relative à la dispersion entre les réponses climatiques moyennes obtenues respectivement pour les différentes corrections de biais (en pratique, variance des effets principaux des différentes BCs, comme illustré en Figure 2.4c).
 - En bleu foncé : la variabilité résiduelle ; la part de l'incertitude qui n'est pas expliquée par le modèle d'incertitude (c'est-à-dire qui ne correspond pas à la dispersion entre les RCPs, ni la dispersion entre les GCMs...). La variabilité résiduelle informe principalement sur les interactions entre les différents types de modèles ou scénarios compris dans l'ensemble fourni à QUALYPSO : GCM-RCM, RCP-GCM... (une combinaison particulière GCM-RCM pourrait par exemple conduire à une baisse beaucoup plus importante des précipitations estivales que celle estimée par la somme de la baisse moyenne estimée pour ce GCM et de la baisse moyenne estimée pour ce RCM).
 - En gris : la variabilité interne : variance liée à la dispersion des signaux « bruts » autour des fonctions de réponses climatiques, soit la variabilité interannuelle à décennale. Il faut noter que la variabilité interne est une source d'incertitude particulière. Toutes les autres incertitudes sont réductibles, si l'on disposait de modèles parfaits, mais la variabilité interne est naturelle, fait partie du système climatique et sera donc toujours présente.
11. La Figure 2.1a peut également être enrichie des trajectoires individuelles (chronique de l'indicateur ou fonction de réponse en changement climatique) d'une ou plusieurs chaînes de modélisation.

2.3 Réponses individuelles des modèles : Effets principaux

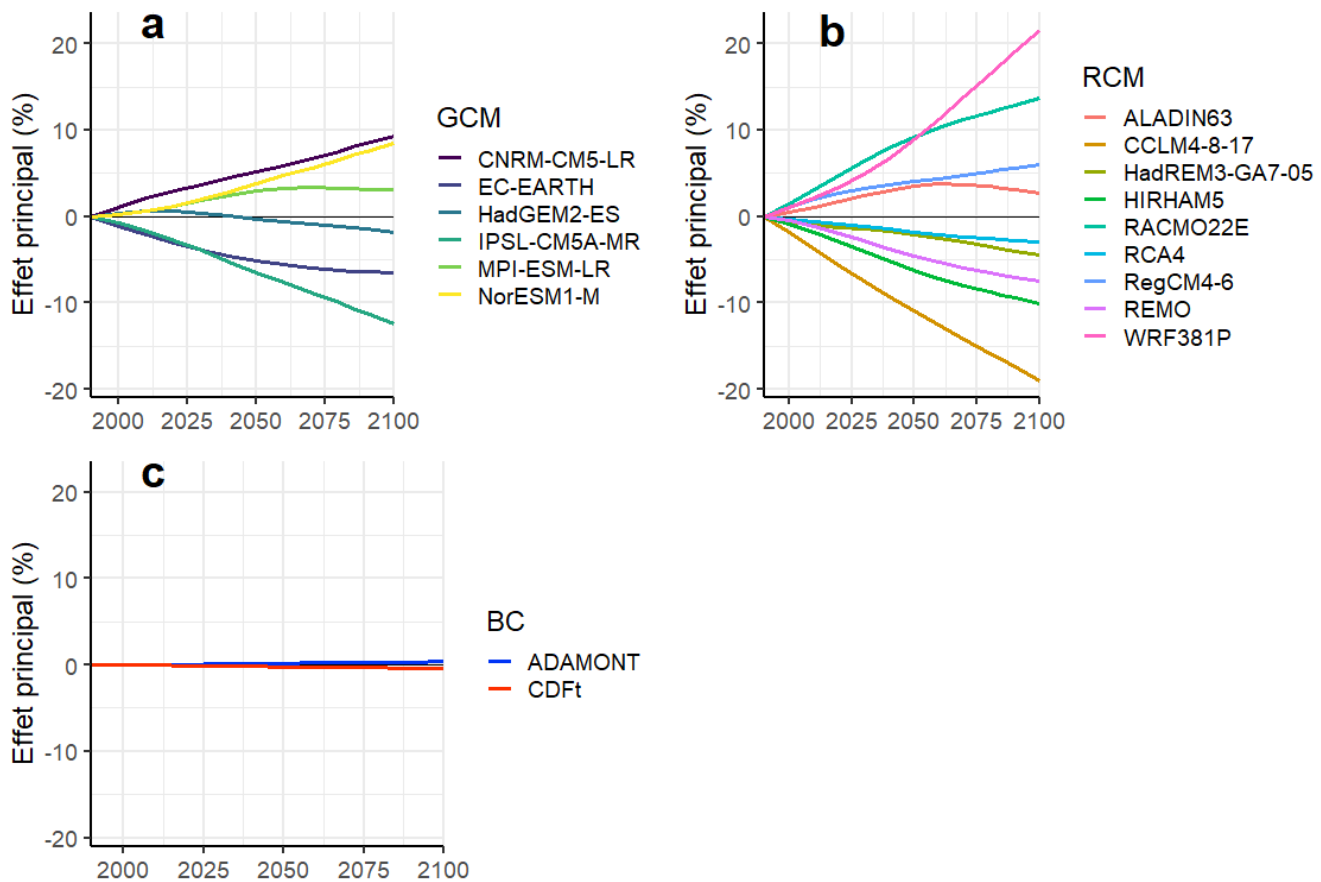


Figure 2.4 : Effets principaux (%) des différents a) GCMs (modèles climatiques globaux), b) RCMs (modèles climatiques régionaux), c) BCs (corrections de biais). Cumul des précipitations estivales sur le territoire du bassin Rhône-Méditerranée. Tous les RCPs sont considérés. Période : 1990-2098.

Utilité pour l'utilisateur :

1. La connaissance des effets principaux des différents modèles permet d'identifier les modèles proches de la moyenne d'ensemble, ainsi que les modèles les plus « déviants » par rapport à la moyenne d'ensemble estimée.
2. **Elle permet donc éventuellement par la suite d'orienter le choix de chaînes de modélisation spécifiques pour une étude d'impacts**, en donnant la possibilité par exemple de sélectionner des scénarios parmi les plus humides ou les plus secs suivant le besoin. Il faut néanmoins garder à l'esprit que ces **effets des modèles individuels ne prennent pas en compte les possibles interactions entre RCPs, GCMs, RCMs... spécifiques** et ne donnent **pas d'information sur la cause de la « déviance »** (bug/imperfection de modélisation ou réelle conséquence de l'incertitude liée à la représentation imparfaite du système planétaire dans les modèles de climat).

Eclairages :

1. Effets principaux des GCMs : A l'horizon 2050, le modèle CNRM-CM5-LR a un effet principal d'environ 5%, cela veut dire que les chaînes contenant ce modèle présenteront en moyenne une valeur de changement relatif du cumul des précipitations estivales de 5% de plus que la moyenne d'ensemble. A l'inverse, le modèle IPSL-CM5A-MR a tendance à produire des cumuls de précipitations estivales plus faibles que la moyenne dans le futur (car son effet principal est négatif).

Le modèle HadGEM2-ES est toujours relativement proche de la moyenne d'ensemble (son effet principal est proche de zéro quel que soit l'horizon de projection).

2. Effets principaux des RCMs : la réponse en changement du modèle WRF381P est 22% au-dessus de la réponse en changement moyenne de l'ensemble (effet principal) ; la réponse en changement de CCLM4-8-17 est -18% en-dessous de la réponse en changement moyenne de l'ensemble à l'horizon 2100.
3. Effets principaux des BCs : l'effet principal des corrections de biais est très faible face aux autres modèles. En effet, en changement relatif et pour ce territoire les deux corrections de biais fournissent des valeurs très similaires de cumul de précipitations estivales.

A noter :

1. **L'effet principal d'un modèle donné** est la différence entre la réponse moyenne en changement obtenue pour ce modèle par rapport à la réponse moyenne en changement obtenue pour tout l'ensemble (c'est-à-dire par rapport à la moyenne d'ensemble des réponses moyennes en changement).
2. Par construction, la somme des effets principaux pour les différents modèles d'un type donné est donc toujours nulle (par exemple, la somme des effets principaux obtenus pour les 6 GCMs est nulle...).
3. Par construction, l'effet principal d'un modèle donné est nul pour la période de référence (1990) (car la réponse en changement est nulle pour chacune des chaînes de modélisation, quelle que soit la chaîne).
4. Les effets principaux des différents types de modèles sont supposés additifs. Ainsi, la réponse climatique en changement de la chaîne RCP2.6/GCM3/RCM7/BC1 sera la somme 1/ de la moyenne d'ensemble de la réponse en changement et 2/ des effets principaux de chacune de ses composantes, c'est à dire ici, la somme de la moyenne d'ensemble en changement et de l'effet principal de RCP2.6, de l'effet principal du GCM = GCM3, de l'effet principal du RCM = RCM7 et de l'effet principal de BC = BC1.
5. La réponse en changement d'une chaîne de modélisation donnée (par ex. RCP2.6+GCM3+RCM7+BC2) peut être estimée même si les données brutes associées à cette chaîne ne sont pas disponibles dans l'ensemble considéré (par ex. si la combinaison de modèles considérée n'a pas été effectuée à ce jour), en additionnant les effets principaux des composantes de la chaîne et la moyenne d'ensemble.
6. Une valeur négative (resp. positive) d'effet principal obtenue pour un modèle donné ne correspond pas forcément à une baisse (resp. une hausse) de l'indicateur. Ce ne serait pas le cas par exemple si la réponse au changement moyen de l'ensemble considéré est un changement très positif (resp. très négatif).
7. Ces effets pourront également être obtenus pour l'ensemble des modèles hydrologiques de l'ensemble Explore2 pour un indicateur hydrologique (par exemple le débit annuel moyen).
8. Les effets principaux ne contiennent pas l'information de la variabilité naturelle du climat.

3 Représentations cartographiques à l'échelle nationale

En complément des représentations chronologiques ci-dessus, fournies pour un site ou un territoire donné, des représentations cartographiques peuvent également être proposées.

3.1 Réponses en changement : moyenne d'ensemble et incertitudes

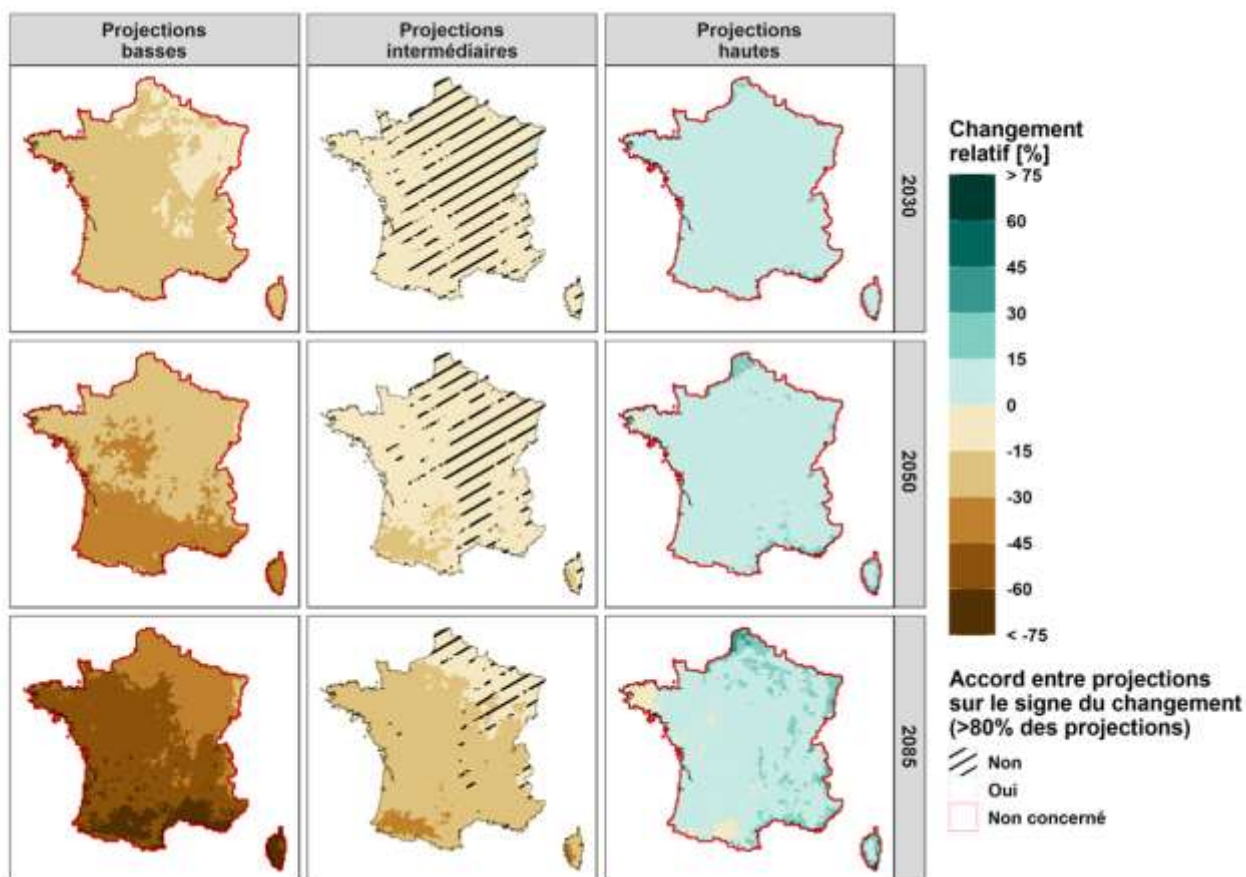


Figure 3.1 : Carte du changement relatif du cumul des précipitations estivales pour la France métropolitaine en RCP8.5 (%), par rapport à la référence 1990, à 3 horizons temporels : 2030, 2050 et 2085 (en lignes). En colonnes sont donnés 1) le quantile 5% (projections basses), 2) la moyenne d'ensemble et 3) le quantile 95% (projections hautes) de l'ensemble Explore2 tel qu'estimés avec QUALYPSO (donc la moyenne d'ensemble et les bornes de l'intervalle d'incertitude à 90%). Cet intervalle d'incertitude prend en compte la dispersion entre les GCMs, les RCMs, les BCs et la variabilité résiduelle. Il ne prend pas en compte la variabilité interne. Pour la moyenne d'ensemble (colonne du milieu), le niveau d'accord entre chaînes de modélisation sur le signe du changement est donné par le figuré sous forme de hachures. Les zones présentant le figuré ont un niveau d'accord sur le signe du changement entre les chaînes de modélisation inférieure à 80%. Maillage 8x8km (SAFRAN).

Utilité pour l'utilisateur :

1. Cette figure permet à l'utilisateur de replacer les tendances observées sur son point d'intérêt dans le contexte des changements simulés à l'échelle nationale.

Eclairages :

1. On observe une variation spatiale assez importante du changement relatif du cumul des précipitations estivales à l'échelle du territoire en 2085, avec des valeurs moyennes comprises entre environ 0% et -45% suivant la région, mais des transitions spatiales assez régulières. L'intervalle d'incertitude 5%/95% produit des valeurs dépassant -75% au Sud et +30% au Nord en 2085.

2. Plus l'horizon temporel est distant, plus le changement (positif ou négatif) est marqué et l'incertitude (intervalle 5%/95%) issue de la modélisation est grande. Plus le RCP est pessimiste (RCP8.5), plus l'assèchement est marqué, mais plus la dispersion augmente.

A noter :

1. La borne supérieure de l'intervalle d'incertitude (quantile 95%) correspond à la valeur prise par une des chaînes de modélisation de l'ensemble considéré. La chaîne en question peut différer d'une maille à l'autre. La carte du quantile 95% (et la carte du quantile 5%) ne correspond donc a priori pas à la carte d'une chaîne de modélisation particulière. Pour plus de détails sur l'estimation de ces bornes d'incertitude, voir rapport « Incertitudes » du projet Explore2.
2. Comme mentionné dans l'introduction, il ne faut pas donner d'interprétation probabiliste à ces quantiles.

3.2 Variabilité interne



Figure 3.2 : Carte de la variabilité interne (interannuelle et basse fréquence) du cumul des précipitations estivales pour la France métropolitaine (%). Valeur de l'écart-type. Horizon futur 2085. Maillage 8x8km (SAFRAN).

Utilité pour l'utilisateur :

1. La valeur de variabilité interne permet de replacer les valeurs de changements sur la moyenne d'ensemble dans le contexte de la variabilité climatique naturelle.
2. Elle permet aussi d'estimer les réalisations possibles, pour une année et une chaîne donnée (et donc pas en moyenne climatologique), de la variable d'intérêt, selon les résultats obtenus pour l'ensemble de projections considéré.

Eclairages :

1. L'incertitude liée à la variabilité interne est comprise entre 20 et 50% environ de la valeur de référence (fonction de réponse en 1990), avec un maximum sur le pourtour Méditerranéen (Figure 3.2).
2. Par exemple, pour la région de Bordeaux, la moyenne d'ensemble du changement de précipitations estivales projetée pour la période future 2071-2099 et pour le RCP8.5 est d'environ -22,5% (Figure 3.1). Selon les chaînes de simulation considérées, la réponse climatique en changement varie : l'intervalle à 90% est entre -52,5% et +7,5% (Figure 3.1, valeur des quantiles 5 et 95%). Pour une année donnée, la variabilité interne des précipitations conduit à une déviation par rapport à la réponse moyenne simulée, d'écart type 35% (Figure 3.2). En prenant en compte la variabilité

naturelle du climat on peut donc avoir des projections « brutes » distribuées majoritairement entre -87,5% et +42,5%.

A noter :

1. La Figure 3.1 montrait l'incertitude sur la réponse au changement climatique, sans prise en compte de la variabilité interne du système climatique. Pour comparaison, la
- 2.
- 3.

4. **Figure 3.2** présente la dispersion liée à cette variabilité interne. La
- 5.
- 6.

7. **Figure 3.2** permet donc de mettre en perspective les changements moyens (Figure 3.1) par rapport à la variabilité naturelle.
8. Du fait de la variabilité interne, la valeur de l'indicateur considéré peut sortir, pour une année donnée, de la plage d'incertitude modèle.

3.3 Répartition des sources d'incertitude

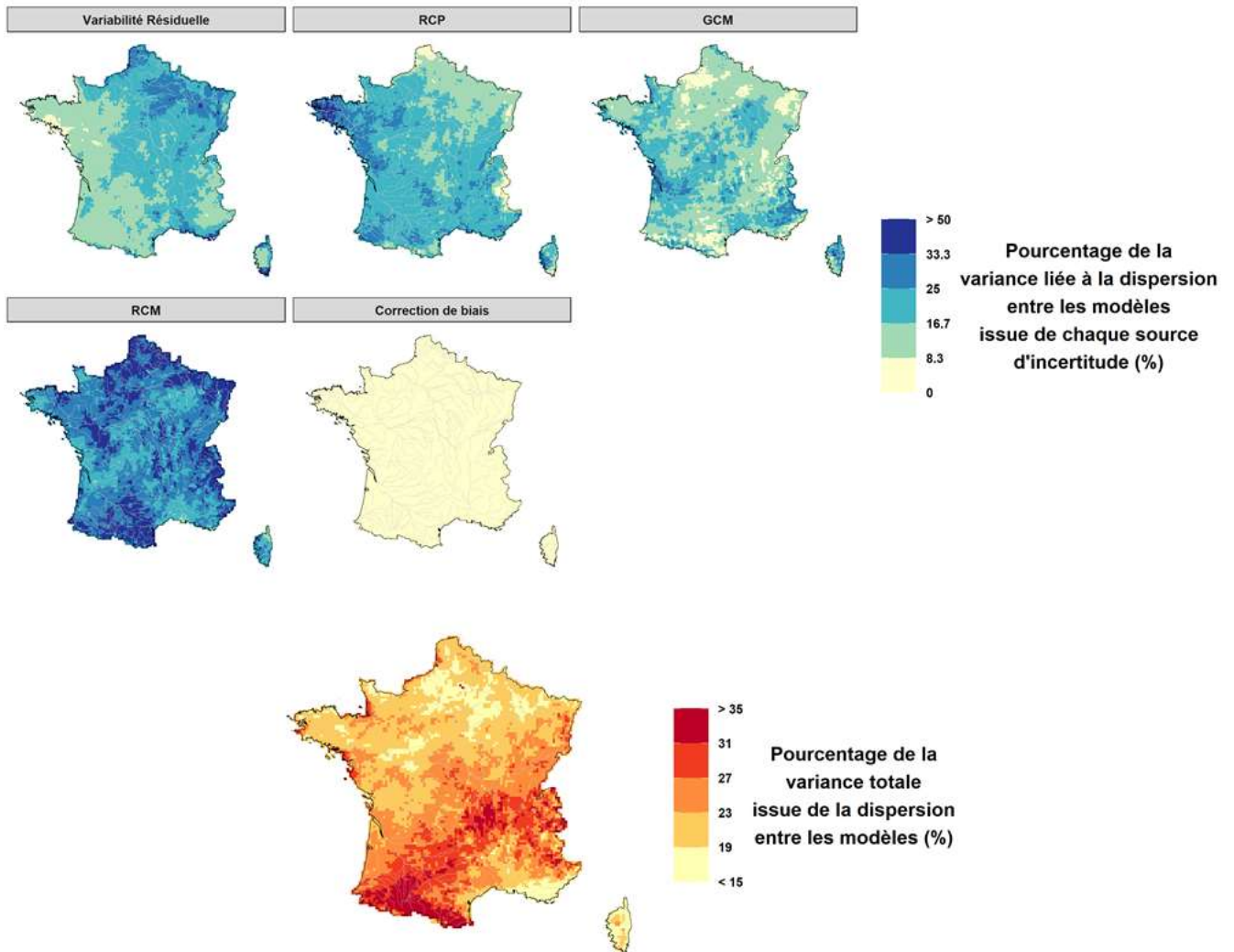


Figure 3.3 : Partition entre les différentes sources de dispersion entre les projections (%) pour le cumul des précipitations estivales. 5 carte du haut : dispersion liée aux différents maillons de la modélisation (somme à 100%). Carte du bas : pourcentage de la dispersion totale liée à la modélisation. Horizon 2085. Maillage 8x8km (SAFRAN).

Utilité pour l'utilisateur :

1. Mettre en évidence les maillons de la chaîne de modélisation qui contribuent le plus à la dispersion entre les projections sur la région d'intérêt de l'utilisateur.
2. Mettre en perspective la dispersion liée aux maillons de la chaîne de modélisation avec celle liée à la variabilité naturelle.

Eclairages :

1. La principale source de variance issue de la modélisation sur notre ensemble de projections de cumuls de précipitations estivales pour la période future 2071-2099 sont les RCMs pour généralement 25 à 50%.
2. Dans le cas du cumul des précipitations estivales, les RCPs contribuent moins à la dispersion (sauf en Bretagne) et les corrections de biais très marginalement (en changement relatif en tout cas).

3. Même si une forte dispersion est induite par les RCMs relativement aux scénarii d'émission de gaz à effet de serre, cela ne veut pas dire que le choix politique de la trajectoire d'émission est négligeable. En effet une forte incertitude liée aux modèles, n'empêche pas une différence marquée entre les tendances pour les différents RCPs et seule cette dernière persisterait dans le cas de modèles parfaits.
4. La contribution des composantes de la chaîne de projection ne dépasse pas une contribution de 35% environ à la dispersion totale entre les projections brutes. Le reste est lié à la variabilité interne. Encore une fois, une variabilité interne forte dans une région (par exemple le bassin méditerranéen) par rapport à la tendance sur le XXIe siècle n'empêche pas celle-ci d'avoir des implications sociétales et environnementales fortes. Pour caricaturer : perdre 10% de cumul de précipitations estivales de 100 mm face à une variabilité naturelle de 50%, veut tout de même dire que l'on passera d'une gamme de précipitations de 50-150 mm à une gamme de 40-140 mm. Ce qui est peu en moyenne peut s'avérer dramatique pour les années les plus sèches.

A noter :

1. On considère sur la carte du bas la contribution à la variance totale de l'ensemble des différentes sources de dispersion entre les chaînes de projection : RCP, GCM, RCM, BC et variabilité résiduelle. En soustrayant à 100% la valeur lue sur cette carte on retrouve donc la variabilité interne.
2. Sur les 5 cartes du haut, on détaille au sein de cette « contribution à la variance totale de l'ensemble des différentes sources de dispersion entre les chaînes de projection » la répartition entre les différentes composantes citées au paragraphe du dessus. La somme des 5 cartes vaut donc 100%.

3.4 Effets principaux de chaque modèle : exemple des GCMs

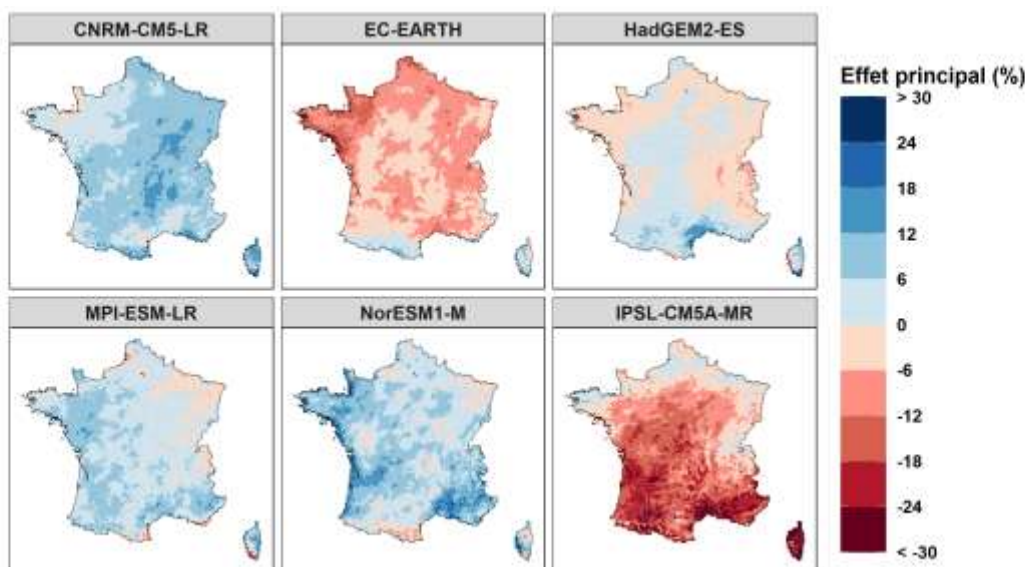


Figure 3.4 : Carte des effets principaux des GCMs pour le cumul des précipitations estivales sur la France métropolitaine en 2050 (%), par rapport à la référence 1990. Maillage 8x8km (SAFRAN).

Utilité pour l'utilisateur :

1. Cette figure permet éventuellement à l'utilisateur d'affiner la sélection de modèles à utiliser pour son analyse (en retenant de façon préférentielle par exemple un ou plusieurs modèles contrastés).

En fonction des impacts et des enjeux considérés, il pourra ainsi sélectionner des modèles plus ou moins secs.

2. La cartographie de l'effet principal des différents modèles permet parfois de mettre en évidence un maillon de la chaîne de modélisation présentant une réponse très spécifique et très contrastée au regard des autres modèles.

Eclairages :

1. Pour une localisation ou une région où l'ensemble simule en moyenne une diminution des précipitations (la moyenne d'ensemble des changements de précipitations est négative) un effet principal négatif obtenu pour un modèle particulier signifie que ce modèle simule une diminution des précipitations plus importante que la moyenne d'ensemble. Ici, le modèle IPSL-CM5A-MR produit des valeurs légèrement plus fortes que la moyenne d'ensemble dans le Nord et beaucoup plus faibles dans la vaste majorité du territoire. A l'inverse, le modèle HadGEM2-ES a un effet principal relativement faible et produit donc des valeurs de cumul des précipitations estivales relativement proches de la moyenne d'ensemble multi-modèles.
2. En chaque point de grille, la somme des effets principaux des différents GCMs est nulle par hypothèse de construction.
3. On présente ici les GCMs, mais ces cartes peuvent aussi être produites pour les RCMs, les BCs et les RCPs (et les HMs pour l'hydrologie).

A noter :

1. Attention : les effets principaux ne sont pas les réponses climatiques moyennes des modèles. Celles-ci peuvent être calculées en ajoutant l'effet principal d'un modèle (par exemple HadGEM2-ES) à la moyenne d'ensemble complétée. On obtient alors le changement moyen de toutes les chaînes possibles employant ce modèle (toutes les combinaisons possibles de HadGEM2-ES avec tous les RCPs, tous les RCMs et toutes les BCs).
2. Comme mentionné plus haut, l'effet principal d'un modèle donné est la déviation moyenne de ce modèle par rapport à la moyenne d'ensemble obtenue pour l'ensemble de projections considéré.
3. On peut s'attendre à ce que les variations spatiales de l'effet principal d'un modèle donné soient relativement lisses et progressives (hors relief). Il est possible pour certains modèles d'avoir des contrastes régionaux importants. Ce n'est pas incohérent.

4 Annexe : Modèles utilisés dans Explore2

Combinaisons RCP/GCM/RCM sélectionnées pour Explore2 à partir de l'ensemble EURO-CORDEX

× RCP 2.6 + RCP 4.5 ○ RCP 8.5	GCM	CNRM-CM5	EC-EARTH	HadGEM2-ES	IPSL-CM5A-MR	MPI-ESM-LR	NorESM1-M
RCM	Occurrence	2	3	4	2	3	3
REMO	2	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
CCLM4-8-17	2	⊕	⊗	⊕		⊗	
ALADIN63	2	⊗		○		○	○
RACMO22E	1	⊗	⊗	⊗	○	⊗	⊗
HIRHAM5	2	○	○	*	○	○	⊕
WRF381P	1	○	○	○	⊗	○	○
RCA4	2	⊕	⊗	⊗	⊕	⊗	⊗
RegCM4-6	2	○	○	⊗		⊗	⊗
HadREM3-GA7	3	○	⊗	⊗		○	○

DRIAS 2020
 Explore2
 Narratifs Explore2

5 Références

Evin, G., Hingray, B., Blanchet, J., Eckert, N., Morin, S., Verfaillie, D. 2019. Partitioning uncertainty components of an incomplete ensemble of climate projections using data augmentation. J. Climate. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0606.1>

Evin, G., Somot, S., Hingray, B., 2021. Balanced estimate and uncertainty assessment of European climate change using the large EURO-CORDEX regional climate model ensemble. Earth System Dynamics. <https://esd.copernicus.org/articles/12/1543/2021/>

Présentation de vulgarisation de la méthode QUALYPSO :

Hingray, B., Evin, G. 2020. Partitioning uncertainty components of an incomplete ensemble of climate projections using data augmentation. EGU2020: Sharing Geoscience Online, 3-8 Mai. https://presentations.copernicus.org/EGU2020/EGU2020-21864_presentation.pdf

Présentation de vulgarisation sur les incertitudes dans les scénarios de changement climatique :

Agence Vegas Deluxe, en partenariat avec Météo France, 2014. Les incertitudes dans les scénarios de changement climatique. <https://vimeo.com/85531294>