



HAL
open science

Ensemble de projections Explore2: Changements moyens et incertitudes associées

Guillaume Evin, Benoît Hingray, Alix Reverdy, Agnès Ducharne, Eric Sauquet

► **To cite this version:**

Guillaume Evin, Benoît Hingray, Alix Reverdy, Agnès Ducharne, Eric Sauquet. Ensemble de projections Explore2: Changements moyens et incertitudes associées. INRAE - IGE; CNRS - IGE; CNRS - IPSL; INRAE. 2024. hal-04609542v2

HAL Id: hal-04609542

<https://hal.science/hal-04609542v2>

Submitted on 19 Jun 2024

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.



**ENSEMBLE DE PROJECTIONS EXPLORE2 :
CHANGEMENTS MOYENS ET INCERTITUDES
ASSOCIÉES**

**Guillaume EVIN, INRAE-IGE
Benoît HINGRAY, CNRS-IGE
Alix REVERDY, CNRS-IGE
Agnès DUCARNE, CNRS-IPSL
Eric SAUQUET, INRAE**

15/06/2024

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 de 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	Ensemble de projections Explore2 : Changements moyens et incertitudes associées	
Auteur(s)	Guillaume EVIN Benoit HINGRAY Alix REVERDY Agnès DUCARNE Eric SAUQUET	INRAE-IGE CNRS-IGE CNRS-IGE CNRS-IPSL INRAE
Numéro de version	1	
Date contractuelle de remise du livrable	31/05/2024	
Date effective de remise du livrable	07/06/2024	
Statut du document	Version provisoire / finale	
Accès en ligne	libre / restreint / confidentiel	
Mots-clés (5 maximum)	Incertitudes, Projections, Climat, Hydrologie	

Table des matières

1	Introduction	11
1.1	Projections Climatiques, Chaînes de Modélisation	11
1.2	Projections hydroclimatiques et incertitudes	11
1.3	Cascade d'incertitudes, Ensembles de Projections et Estimation	12
1.4	Avertissements importants	15
1.4.1	Une étape clé des analyses : séparer réponse climatique et variabilité interne des chaînes	15
1.4.2	Attention à l'illusion de certitude sur les estimations des incertitudes	15
1.4.3	Avoir en tête les limitations des modélisations	16
2	Ensemble Explore2 et indicateurs considérés	18
2.1	Modèles considérés	18
2.1.1	Chaînes GCM/RCM	18
2.1.2	Méthodes de correction de biais	18
2.1.3	Modèles hydrologiques	18
2.2	Choix des indicateurs	19
3	Méthodologie d'analyse	21
3.1	La méthode QUALYPSO	21
3.2	Analyses et représentations graphiques proposées dans ce rapport	23
3.2.1	Période de référence	23
3.2.2	Représentations chronologique et cartographique des changements	23
3.2.3	Références et horizons chronologiques	24
3.3	Intervalle d'incertitude présenté dans les représentations graphiques	25
3.4	Narratifs	25
4	Climats projetés en fin de siècle	26
4.1	Température estivale moyenne	27
4.2	Température hivernale moyenne	30
4.3	Cumul des précipitations estivales	33
4.4	Cumul des précipitations hivernales	36
4.5	Evapotranspiration de référence estivale	39
4.6	Evapotranspiration de référence hivernale	42
4.7	Précipitation quotidienne maximale annuelle	45
4.8	Précipitations solides de novembre à avril	48
4.9	Focus chronologique sur deux régions contrastées	51
4.9.1	Bassin Artois-Picardie	51
4.9.2	Bassin Adour-Garonne	52
5	Résultats hydrologie	55
5.1	France	55
5.1.1	Débit annuel - QA	55
5.1.2	Débit journalier maximal annuel - QJXA	59
5.1.3	Débit mensuel minimal de chaque année - QMNA	62
5.2	Focus sur la Loire : effets principaux des modèles hydrologiques	65
5.3	Focus sur une incertitude de modélisation : les effets physiologiques du CO ₂	68
5.4	Focus chronologique sur un bassin versant	70
6	Fiche incertitudes	72
7	Conclusions	74

Remerciements	75
Glossaire	79
A La méthode QUALYPSO	82
A.1 Hypothèses de la méthode	82
A.2 Étapes de l'analyse QUALYPSO	82
A.3 Ensembles de projection incomplets	84
A.4 Forces de la méthode QUALYPSO	85
A.5 Précautions d'usage de QUALYPSO	85
A.6 Estimation des projections "basses" et "hautes"	86
B Reconstruction des réponses climatiques moyennes	89

Résumé

Le projet Explore2 a produit un large **ensemble** de projections hydroclimatiques multi-scénarios et multi-modèles pour la France métropolitaine (appelé par la suite ensemble Explore2) sur la base des projections climatiques régionales du programme international EURO-CORDEX. Cet ensemble a été obtenu avec 3 scénarios d'émission de gaz à effet de serre (scénarios **RCP2.6**, **RCP4.5** et **RCP8.5**), 17 chaînes de modélisation climatiques, 2 modèles de correction de biais et 4 à 9 modèles hydrologiques (jusqu'à 648 projections).

Les projections climatiques au sens large sont, pour la majeure partie des **variables** hydrométéorologiques, fortement incertaines. Ces incertitudes résultent de différents types d'incertitudes qui se propagent et s'amplifient dans la **chaîne de modélisation** : les incertitudes liées au choix du scénario d'émission, les incertitudes liées aux modélisations (au Modèle de Climat Global **GCM**, au Modèle de Climat Régional **RCM**, au Modèle de Correction de biais **BC**, au Modèle Hydrologique **HM**) et les incertitudes liées à la **variabilité interne** du climat.

Les objectifs du présent rapport sont :

- de présenter les différentes sources d'incertitude associées à l'ensemble Explore2,
- de présenter **QUALYPSO**, la méthode d'analyse développée pour caractériser ce type d'ensemble et,
- de présenter les résultats des analyses réalisées avec l'ensemble Explore2 pour les projections du climat régional et de débits des rivières françaises.

Différents **variables** et **indicateurs** sont considérés : température moyenne, cumul de précipitation et évapotranspiration, en moyenne à l'échelle des saisons estivales et hivernales ; débit annuel, débit journalier maximum annuel, débit mensuel minimal de chaque année pour différents bassins versants.

Pour caractériser l'ensemble de projections produit pour la variable ou l'indicateur considéré, nous estimons :

- la moyenne d'ensemble,
- l'incertitude totale associée à cet ensemble, ainsi que les projections basses et hautes,
- la contribution des différentes sources d'incertitude à cette incertitude totale, en particulier les incertitudes dues à la chaîne de modélisation et les incertitudes dues à la variabilité interne du climat,
- les effets principaux de chaque modèle individuel et leur contribution à l'incertitude totale.

Les analyses pour les variables climatiques couvrent le territoire français métropolitain. Elles sont réalisées en tout point de grille de la grille SAFRAN (8 km x 8 km). Les analyses pour les indicateurs hydrologiques sont produites pour un large nombre de bassins versants.

Les résultats sont présentés sous forme cartographique pour différents horizons temporels (futur proche, milieu de siècle, fin de siècle) et sous forme chronologique pour différents bassins versants illustratifs. Les premières représentations permettent d'apprécier la variabilité spatiale des estimations sur le territoire français, les secondes permettent d'apprécier leur évolution temporelle sur le siècle à venir.

Ces analyses fournissent une appréciation approfondie des évolutions projetées dans l'ensemble Explore2. Il est cependant important de mentionner que les résultats présentés sont conditionnels à cet ensemble, et donc au choix des scénarios et des modèles utilisés. Aucun des scénarios RCP ne se réalisera à l'identique et les modèles sont tous des représentations simplifiées et imparfaites des systèmes physiques réels (climat, cycle hydrologique).

De ce fait, et ceci est valable quel que soit l'ensemble considéré, il ne faut pas donner à la moyenne d'ensemble et à la plage d'incertitude estimées une valeur qu'elles n'ont pas. En particulier, la plage d'incertitude ne correspond pas à la plage des incertitudes réelles. Même si elle peut en donner une idée, elle ne couvre pas nécessairement le futur qui se réalisera dans les décennies à venir. Malgré tout, la connaissance de ces incertitudes devrait permettre d'imaginer des adaptations plus robustes aux changements à venir.

Abréviations

Acronyme	Description
ADAMONT	"ADaptation en territoire de MONTagne" : méthode statistique de correction de biais
ANOVA	ANalysis Of VAriance (Analyse de Variance)
BC	Bias Correction (Correction de Biais)
CDF- <i>t</i>	"Cumulative Density Function transfert" : méthode statistique de correction de biais
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project phase 5 (5ème programme d'intercomparaison de modèles couplés)
DJF	Saison hivernale (décembre - janvier - février)
ET0	Evapotranspiration de référence
EURO-CORDEX	European Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment
GCM	Global Climate Model (Modèle de Climat Global)
GES	Gaz à Effet de Serre
IPCC	GIEC en français : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
HM	Hydrological Model (Modèle Hydrologique)
IV	Internal Variability (Variabilité Interne du Climat)
JJA	Saison estivale (juin - juillet - août)
QA	Débit journalier moyen annuel
QJXA	Débit journalier maximal annuel
QMNA	Débit (Q) mensuel (M) minimal (N) de chaque année civile (A)
QUALYPSO	Quasi-Ergodic Analysis of Climate Projections Using Data Augmentation
RCM	Regional Climate Model (Modèle de Climat Régional)
RCP	Representative Concentration Pathway (Trajectoire Représentative de Concentration en GES)
RV	Residual Variability (Variabilité Résiduelle)
SAFRAN	Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige

Table des figures

1	La cascade d'incertitudes	14
2	Schéma de principe de l'extraction de la réponse climatique et de la variabilité interne	15
3	Ensemble RCP/GCM/RCM d'Explore2	19
4	Extraction de la réponse climatique d'une chaîne de modélisation : de l'intérêt d'un modèle de tendance contraint	24
5	Carte des changements projetés pour la température moyenne estivale, incertitude totale, variabilité interne et contribution des sources d'incertitude	28
6	Cartes des effets principaux des modèles pour la température moyenne estivale	29
7	Carte des changements projetés pour la température moyenne hivernale, incertitude totale, variabilité interne et contribution des sources d'incertitude	31
8	Cartes des effets principaux des modèles pour la température moyenne hivernale	32
9	Cartes des changements projetés pour le cumul des précipitations estivales, incertitude totale, variabilité interne et contribution des sources d'incertitude	34
10	Cartes des effets principaux des modèles pour le cumul de précipitations total estival	35
11	Cartes des changements projetés pour le cumul des précipitations hivernales, incertitude totale, variabilité interne et contribution des sources d'incertitude	37
12	Cartes des effets principaux des modèles pour le cumul de précipitations total hivernal	38
13	Cartes des changements projetés pour le cumul d'ET0 estival, incertitude totale, variabilité interne et contribution des sources d'incertitude	40
14	Cartes des effets principaux des modèles pour le cumul d'ET0 estivale	41
15	Cartes des changements projetés pour le cumul d'ET0 hivernale, incertitude totale, variabilité interne et contribution des sources d'incertitude	43
16	Cartes des effets principaux des modèles pour le cumul d'ET0 hivernale	44
17	Cartes des changements projetés pour la précipitation quotidienne maximale annuelle, incertitude totale, variabilité interne et contribution des sources d'incertitude	46
18	Cartes des effets principaux des modèles pour la précipitation quotidienne maximale annuelle	47
19	Cartes des changements projetés pour le cumul de précipitations solides de novembre à avril, incertitude totale, variabilité interne et contribution des sources d'incertitude	49
20	Cartes des effets principaux des modèles pour le cumul de précipitations solides de novembre à avril	50
21	Exemple de chronique des changements projetés, leur incertitude, sa répartition et les effets principaux des modèles pour le bassin Artois-Picardie	53
22	Changements projetés, incertitude totale, sources d'incertitude et effets principaux des modèles pour le territoire de l'agence de bassin Adour-Garonne	54
23	Cartes des changements projetés pour le QA, incertitude totale, variabilité interne et contribution des sources d'incertitude	57
24	Cartes des effets principaux des modèles pour le QA	58
25	Cartes des changements projetés pour le QJXA, incertitude totale, variabilité interne et contribution des sources d'incertitude	60
26	Cartes des effets principaux des modèles pour le QJXA	61
27	Cartes des changements projetés pour le QMNA, incertitude totale, variabilité interne et contribution des sources d'incertitude	63
28	Cartes des effets principaux des modèles pour le QMNA	64
29	Cartes des effets principaux des modèles hydrologiques pour le QA sur la Loire	66
30	Cartes des effets principaux des modèles hydrologiques pour le QJXA sur la Loire	66
31	Cartes des effets principaux des modèles hydrologiques pour le QMNA sur la Loire	67
32	Effets physiologiques du CO ₂ sur l'évolution des bilans d'eau simulés par le modèle hydrologique ORCHIDEE	69

33	Exemple de chronique des changements projetés, leur incertitude, sa répartition et les effets principaux des GCMs et HMs pour le bassin versant de la Loire à Digoin	71
34	Exemple de fiche incertitude pour le bassin de l'Erve à Auvers-Le-Hamon	73
35	Ensemble complété	84
36	Comparaison des changements projetés estimés avec QUALYPSO et avec la méthode "conventionnelle"	88

Liste des tableaux

1	Quelques caractéristiques des modèles d'hydrologie de surface utilisés dans le projet Explore2	19
2	Tableau des indicateurs hydro-climatiques considérés	20

1 Introduction

Le projet Explore2 a développé, sur la base des projections climatiques régionales du programme international EURO-CORDEX, un **ensemble** de projections climatiques pour la France métropolitaine comprenant différentes sources d'incertitude. Les objectifs du présent rapport sont de :

- présenter les différentes sources d'incertitude associées à l'ensemble de projections Explore2 (hors projections hydrogéologiques),
- présenter **QUALYPSO**, la méthode d'analyse développée pour caractériser ces ensembles (tendances générales et incertitudes),
- présenter les résultats des analyses réalisées avec l'ensemble Explore2 pour les projections du climat régional et de débits des rivières françaises.

Différents termes techniques sont utilisés pour nommer les concepts ou variables considérés ici. Ces termes (indiqués en bleu) sont ceux utilisés par la communauté des sciences du climat dans les rapports de l'**IPCC** (le groupe des experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). Ils sont explicités dans un glossaire à la fin de ce document.

1.1 Projections Climatiques, Chaînes de Modélisation

Une **projection climatique** est le résultat d'une simulation produite avec une **chaîne de modélisation** lorsqu'elle est soumise à un scénario de forçage radiatif donné, c'est-à-dire lorsqu'elle est soumise à un scénario d'émission de gaz à effet de serre et aérosols donné. Une projection climatique donne donc une trajectoire climatique future à long terme que l'on peut attendre pour un scénario d'émissions futures. Il est à ce titre important de souligner que ce n'est donc pas une **prévision** du climat futur. Une chaîne de modélisation permet de simuler le fonctionnement global du système Terre ainsi que son évolution dans le temps et de simuler ensuite les effets régionaux de cette évolution, que ce soit en termes de climat régional ou d'impacts sur différents systèmes régionaux (par exemple un agrosystème ou un hydrosystème).

Dans Explore2, une chaîne de modélisation comprend :

1. un modèle de climat global (**GCM**), qui simule l'évolution du climat à l'échelle planétaire 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 simulée par le GCM,
3. un modèle de correction de 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 et corrigée de ses biais. Ce rapport ne présente pas les incertitudes issues des simulations hydrogéologiques.

Pour chaque catégorie, les simulations peuvent être obtenues avec différents modèles. Dans l'ensemble Explore2, les GCMs CNRM-CM5-LR de Météo France, IPSL-CM5A-MR de l'IPSL ou EC-EARTH (modèle communautaire européen) ont par exemple été utilisés pour produire des projections climatiques (Section 2.1).

Une chaîne de modélisation est utilisée pour produire différentes expériences climatiques correspondant à différents scénarios d'émission pour le 21^e siècle. En pratique, les résultats de simulation d'un GCM sont utilisés en entrée du modèle RCM et ainsi de suite.

1.2 Projections hydroclimatiques et incertitudes

Des chaînes de modélisation différentes produisent des projections climatiques différentes. Les projections qui résultent des expériences produites avec ces chaînes de modélisation sont fortement incertaines, et ceci pour la majeure partie des variables d'intérêt (précipitations, débits ...). On distingue trois sources d'incertitude :

- les incertitudes sur les émissions futures,

- les incertitudes de modélisation,
- les incertitudes liées à la variabilité interne du climat.

Par commodité, ou parce qu'il est difficile de les considérer pour nos choix d'adaptation aux changements à venir, ces différentes incertitudes ont souvent été ignorées ou partiellement traitées dans les études d'impact. Prendre en compte les incertitudes dans les projections permet cependant :

- d'apprécier différentes évolutions possibles des climats futurs et de leurs impacts, et donc pour partie la confiance que l'on a dans les évolutions projetées,
- pour les acteurs des territoires : de chercher des scénarios d'adaptation qui soient robustes à ces évolutions, et, en particulier, aux évolutions qui se réaliseront vraiment dans les décennies à venir. Autrement dit, cela permet de réduire les risques de mal-adaptation que l'on prendrait forcément si l'on ignorait la variabilité des futurs possibles. Ce risque est par exemple potentiellement important lorsque l'on ne considère que les projections d'une seule chaîne de modélisation ou lorsqu'on ne considère que la moyenne des changements projetés par différentes chaînes de modèles,
- pour les scientifiques et les modélisateurs du climat ou des hydrosystèmes : d'identifier d'où viennent les sources d'incertitude principales. Cela permet ensuite d'estimer là où il est intéressant de concentrer les ressources et les efforts pour améliorer les modèles et réduire au mieux les incertitudes qui peuvent l'être.

Le présent rapport décrit d'abord les différentes sources d'incertitude associées aux projections d'un ensemble de projections climatiques typique. Il présente ensuite QUALYPSO, la méthode statistique développée pour caractériser les ensembles de projections et les incertitudes associées. Il présente enfin les résultats obtenus pour les projections de différentes variables produites dans le projet Explore2.

1.3 Cascade d'incertitudes, Ensembles de Projections et Estimation

Cascade d'incertitudes

Les trois sources principales d'incertitudes (incertitudes "Scénario", incertitudes "Modèle" et "Variabilité Interne") des projections climatiques sont explicitées dans les encadrés 1, 2 et 3. Elles se propagent et s'amplifient le long de la chaîne de modélisation. C'est ce qu'on appelle la cascade d'incertitude, illustrée Figure 1. Quelle que soit la variable climatique considérée, cette cascade conduit à des différences potentiellement importantes entre les projections obtenues avec des chaînes de modélisation différentes.

Encadré 1. Incertitudes sur les scénarios d'émission.

Les émissions réelles de gaz à effet de serre et d'aérosols qui seront produites pour les décennies futures sont évidemment inconnues pour le moment. Ces émissions futures vont dépendre des choix socio-économiques que vont prendre les États, les entreprises et la société civile dans les décennies à venir. Ces incertitudes constituent la première source d'incertitude sur l'évolution du climat futur.

Dans les projections climatiques de l'IPCC, les incertitudes sur les émissions sont prises en compte en considérant les résultats de simulations obtenues pour différents scénarios d'émission. Les scénarios d'émission retenus pour le cinquième rapport de l'IPCC (AR5) sont les scénarios dits RCP, pour "Representative Concentration Pathways". Ils décrivent chacun une trajectoire différente du bilan radiatif de la Terre pour les décennies futures, chacune de ces trajectoires correspondant à différentes trajectoires possibles de développement socio-économique. Les scénarios sont identifiés par un nombre qui correspond au surplus de bilan radiatif de la Terre en 2100 en $W.m^{-2}$. Les scénarios dit RCP2.6 et RCP8.5 sont respectivement optimiste et pessimiste. Pour le premier, le réchauffement moyen projeté à l'échelle du globe ne dépasse pas 2°C en 2100. Pour le second, il est environ de 3.7°C. Dans tous les cas, le réchauffement projeté à l'échelle de la France est plus important que le réchauffement global.

Encadré 2. Incertitudes "Modèle".

Les incertitudes "Modèle" résultent des incertitudes scientifiques et techniques. Elles proviennent de nos connaissances incomplètes sur le fonctionnement du système Terre et de l'imperfection des modèles de climat que l'on développe pour le simuler. Le système Terre est complexe et il est nécessaire d'en simplifier certains aspects pour pouvoir le simuler. Les simplifications opérées conduisent inévitablement à des modèles imparfaits.

Les choix de simplification sont différents d'un centre de recherche sur le climat à l'autre. Les choix opérés conduisent à des modèles de climat différents, qui simulent, pour un même scénario de forçage radiatif, des climats futurs différents. Les incertitudes associées aux modèles de climat sont estimées à l'aide de la dispersion entre les projections obtenues avec différents modèles.

Les incertitudes "Modèle" concernent aussi les autres catégories de modèles utilisés dans les chaînes de modélisation (par exemple le modèle hydrologique). À chaque catégorie de modèle correspond une incertitude modèle spécifique, qui exprime le fait que différents modèles, forcés par les mêmes conditions aux limites, simulent des futurs différents. Par exemple :

- différents modèles de climat global (GCMs), forcés par un même scénario d'émission, simulent des évolutions climatiques globales différentes,
- différents modèles de climat régional (RCMs), forcés par les sorties d'un même modèle de climat global, simulent des climats régionaux différents,
- différentes méthodes de correction de biais (BCs) peuvent ajuster les simulations de climats régionaux différemment,
- différents modèles hydrologiques (HMs), alimentés par une même projection ajustée de climat régional, simulent des réponses hydrologiques différentes.

La dispersion entre les réponses climatiques de différents GCMs définit l'incertitude due aux GCMs. L'incertitude associée aux autres catégories de modèle peut être définie de la même manière.

Encadré 3. Incertitudes résultant de la variabilité interne du climat.

Indépendamment du changement climatique actuel qui résulte de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre induite par les activités humaines, le climat fluctue, naturellement. Une partie de ces variations est chaotique, non prévisible. Ces variations dépendent des multiples interactions qui se jouent entre les différents compartiments du système Terre et les phénomènes météorologiques (banquise, courants océaniques, circulations atmosphériques, etc.).

Cette **variabilité interne** du climat, ou naturelle, explique par exemple que les conditions météorologiques ne soient pas les mêmes d'une année sur l'autre : on peut avoir un hiver doux une année, puis un hiver très froid l'année suivante. On observe ces variations sur des temps courts (par exemple variations interannuelles) mais on peut aussi les observer sur des temps longs, avec par exemple des fluctuations de certaines variables s'étalant sur plusieurs années, ou décennies. Dans certaines régions du monde (principalement en Amérique, Asie du Sud-Est, Australie), on observe par exemple des séquences d'années plus sèches ou plus humides associées aux oscillations australes du phénomène El Niño.

Selon les années et selon les régions considérées, la variabilité interne du climat va accentuer ou à l'inverse atténuer la tendance à long terme liée au changement climatique. Dans les projections Explore2, la variabilité interne s'exprime, tout au long de la période de temps considérée par la simulation, par les fluctuations interannuelles ou décennales de la variable climatique d'intérêt, autour de la tendance à long terme simulée.

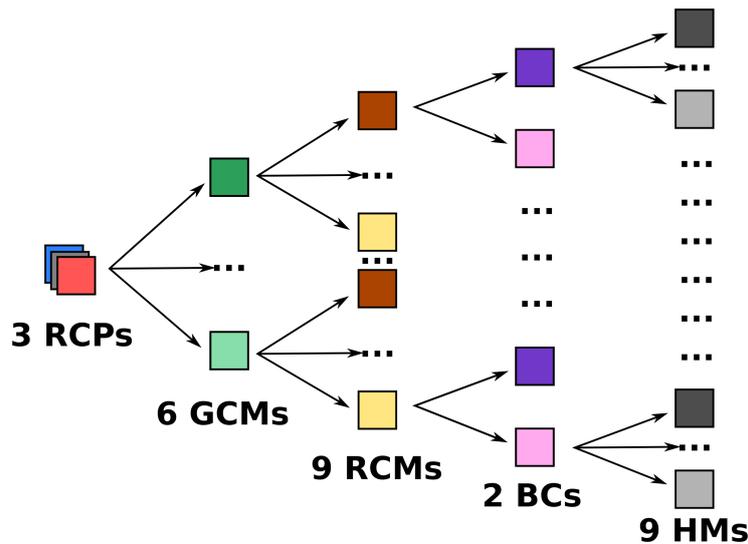


FIGURE 1 : La "Cascade d'incertitudes" dans les projections climatiques. Illustration avec l'ensemble Explore2, dont les projections ont été produites pour trois scénarios d'émission, avec 6 GCMs (Modèles de Climat Global), 9 RCMs (Modèles de Climat Régional), 2 BCs (Méthodes de Correction de Biais) et 9 HMs (Modèles Hydrologiques). Dans le cas d'Explore2, entre 17 et 255 projections hydrologiques sont disponibles aux points de simulation. Si toutes les combinaisons de scénarios/modèles étaient disponibles, l'ensemble Explore2 serait constitué de 2916 expériences hydroclimatiques (3x6x9x2x9) par indicateur et par bassin versant. Le nombre d'expériences effectivement disponibles dépend de la variable et du bassin versant considérés.

Importance relative des sources d'incertitude

Dans les projections climatiques, les incertitudes « Scénario », « Modèle » et celles associées à la variabilité interne sont plus ou moins importantes. Leur importance varie selon la [période future](#) considérée et selon la variable hydroclimatique considérée (températures, précipitations, débits, etc.). L'importance relative des différentes sources d'incertitude, telles qu'elles peuvent être appréciées dans l'ensemble de projections Explore2, sera évaluée par la suite.

De façon assez générale :

- les incertitudes liées au scénario d'émissions sont, pour toutes les variables, très faibles en début de siècle et augmentent ensuite. Pour certaines variables comme les températures ou l'enneigement, elles constituent la source d'incertitude majeure en fin de siècle.
- pour les prochaines décennies, la principale source d'incertitude est la variabilité interne du climat. C'est le cas pour la plupart des variables. Pour certaines variables, cette source d'incertitude devient rapidement très petite devant les autres sources d'incertitude. Pour les températures, elle est même très vite négligeable.
- par construction, les incertitudes "Modèle" présentées dans ce rapport sont nulles en début de siècle et augmentent avec l'horizon de projection. Leur importance relative dépend de la variable considérée. Pour les débits annuels moyens par exemple, l'incertitude en fin de siècle vient principalement des modèles de climat (GCMs et RCMs). Pour les débits de basses eaux, une part importante vient aussi du modèle hydrologique.

Grâce aux progrès de modélisation réalisés continûment par la communauté scientifique, on peut espérer que les incertitudes « Modèle » se réduisent d'un exercice de modélisation au suivant. Les incertitudes liées à la variabilité interne du climat sont à l'inverse irréductibles. 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.

Ensembles de projections

Pour estimer ces incertitudes, l'incertitude cumulée mais aussi la contribution des différentes sources d'in-

certitude à cette incertitude cumulée, on utilise un ensemble de projections produit par différentes chaînes de modélisation. La méthode QUALYPSO décrite à la section 3.1 permet d'estimer ces différentes sources d'incertitude.

1.4 Avertissements importants

1.4.1 Une étape clé des analyses : séparer réponse climatique et variabilité interne des chaînes

Définition : on définit la **réponse climatique** d'une réalisation de la chaîne de modélisation, comme les tendances long terme qui sont simulées par la chaîne de modélisation et qui sont attribuables aux changements profonds du climat induits par les activités anthropiques.

L'estimation de la réponse climatique de chacune des chaînes de modélisation disponibles est une étape clé de l'analyse proposée dans ce rapport afin de caractériser un ensemble de projections.

Une difficulté pour cette estimation est que les variations temporelles produites par une **expérience climatique** et obtenue avec une chaîne de modélisation donnée expriment à la fois 1) les changements profonds du climat induits par les activités anthropiques et 2) les fluctuations autour de ces changements, liées à la variabilité interne du climat. **La variabilité interne du climat ajoute donc du bruit à la réponse climatique de cette projection.** C'est ce qui est illustré sur la Figure 2.

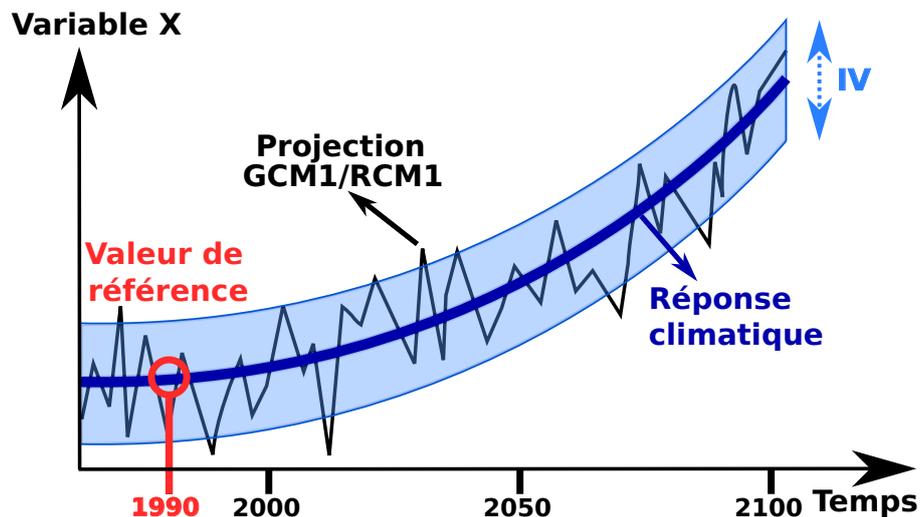


FIGURE 2 : Schéma de principe de l'extraction de la réponse climatique et de la variabilité interne (IV) pour la chronique d'un indicateur X. En rouge, la valeur de référence en 1990, pour la période de référence 1976-2005.

En pratique, ce bruit, qui se traduit pour chaque projection par des fluctuations quasi-aléatoires autour de sa réponse climatique, rend difficile l'identification de cette réponse climatique.

1.4.2 Attention à l'illusion de certitude sur les estimations des incertitudes

Les analyses d'impact du changement climatique, lorsqu'elles sont basées sur des ensembles de projection, fournissent généralement une estimation du changement moyen **projeté** et une estimation des incertitudes associées à cette estimation. Il est important de ne pas s'illusionner de certitudes sur les estimations des incertitudes et sur les limites "basses" et "hautes" des projections présentées.

Quelle que soit la méthode considérée pour les estimer, les estimations de la moyenne d'ensemble et de la plage d'incertitude associée à l'estimation sont conditionnelles à l'ensemble des expériences climatiques utilisées et aux hypothèses choisies pour les produire. En particulier, les estimations sont conditionnelles :

- aux scénarios d'émission retenus pour les simulations. Comme mentionné dans l'encadré 1, **ces scénarios ne sont pas des prévisions** et la trajectoire réelle des émissions futures sera évidemment différente de ce que propose l'un ou l'autre d'entre eux.

- aux modèles retenus pour les simulations. Quel que soit le réalisme avec lequel les modèles représentent les systèmes dont ils veulent simuler la réponse aux forçages anthropiques, les modèles comportent toujours un certain nombre de simplifications et de limitations, connues ou non.

La plage d'incertitude estimée à partir d'un ensemble de projections ne couvre pas nécessairement le futur qui se réalisera vraiment dans les décennies à venir. 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. Cependant, **la plage d'incertitude représentée ne peut pas être interprétée de façon probabiliste** et, en particulier, elle ne constitue pas un intervalle de confiance au sens des tests statistiques (STORCH et ZWIERS, 2013).

1.4.3 Avoir en tête les limitations des modélisations

La compréhension et l'anticipation des changements climatiques en cours n'auraient évidemment jamais pu être réalisées sans modèles, aussi imparfaits soient-ils. Il est cependant important de garder en tête que les modèles sont limités, qu'ils ne permettent pas de tout projeter et que l'information qu'ils produisent varie en qualité selon les processus et variables simulés. Voici quelques exemples de limitations connues ou suspectées des modélisations :

- **Tous les processus et mécanismes climatiques, météorologiques et / ou hydrologiques ne sont pas forcément bien représentés** parce qu'ils sont mal connus, ignorés ou parce qu'ils nécessitent d'être simplifiés. Dans Explore2 par exemple, certains RCMs négligent l'évolution possible des aérosols, d'autres non. Dans les RCMs, les processus de fine échelle sont souvent paramétrisés, c'est-à-dire qu'ils sont représentés par des relations physiques ou empiriques (comportant un certain nombre de paramètres fixés) adaptées à la représentation numérique du système modélisé. Dans les RCMs considérés dans Explore2 par exemple, la convection atmosphérique, qui conduit souvent aux précipitations locales les plus intenses, est paramétrisée (GIORGI, 2019).
- **Certains phénomènes météorologiques ou hydrologiques sont mal simulés par les modèles.** Pour ce qui concerne les projections Explore2, c'est par exemple le cas des pluies convectives et des crues qui en résultent pour les petits bassins versants. Pour ces deux phénomènes hydrométéorologiques, l'évolution future possible est incertaine (RESZLER *et al.*, 2018).
- **Les modèles hydrologiques sont une représentation imparfaite des systèmes hydrologiques naturels.** Ces modèles proposent tout d'abord une représentation très simplifiée des processus hydrologiques et du milieu dont les caractéristiques (topographie, occupation des sols, sols et sous-sols) varient énormément dans l'espace. Certaines simplifications peuvent avoir des impacts importants sur les débits simulés. Une illustration est donnée en section 5.3 avec l'impact sur les débits de la prise en compte des effets du CO₂ sur la physiologie des plantes. Dans Explore2, il est également important de noter que les modèles cherchent à simuler le comportement de bassins versants naturels, c'est-à-dire libres de toute influence anthropique (barrages, irrigation, usage des sols, etc.).
- **Les méthodes de correction de biais présentent des limitations importantes.** Pour les études d'impact, corriger les sorties des modèles de climat de leurs biais systématiques est souvent nécessaire, en particulier lorsque les systèmes considérés répondent de façon très non linéaire aux forçages climatiques. C'est le cas des bassins versants (dynamique du manteau neigeux, processus d'infiltration et d'évapotranspiration, etc.). Quelle que soit la méthode de correction retenue, les corrections ne sont pas parfaites et leur pertinence pour les études d'impact est régulièrement décriée. Parmi les limitations connues, EHRET *et al.*, 2012 listent les hypothèses fortes pour les corrections à appliquer aux valeurs extrêmes ; la difficulté à simuler des structures de variabilité / co-variabilité pertinentes au regard de celles observées ou produites par les modèles à corriger (par exemple la co-variabilité entre précipitations et températures, les structures spatiales, les dynamiques spatio-temporelles) ; l'hypothèse de transposabilité, c'est-à-dire le fait d'utiliser ces méthodes dans des contextes climatiques futurs différents du contexte actuel.
- **L'hypothèse de transposabilité temporelle des modèles est une hypothèse forte.** Les modèles sont supposés pouvoir simuler le comportement des systèmes qu'ils représentent dans un contexte hydroclimatique très différent de celui pour lequel ils ont été développés. Cette hypothèse est utilisée

pour toutes les catégories de modèles considérés : les modèles de climat, les modèles de correction de biais, les modèles hydrologiques, etc. Cette hypothèse est évidemment forte, en particulier lorsque les modèles sont empiriques, conceptuels ou qu'ils s'appuient sur des lois statistiques, estimées sur les observations passées (par exemple les modèles hydrologiques, les méthodes de correction de biais). Dans le futur, les systèmes pourraient activer certains types de fonctionnements qui ne pouvaient pas s'exprimer auparavant ou pourraient subir des transformations déterminantes du fait des activités anthropiques à venir. C'est le cas par exemple des "points de bascule" qui pourraient affecter de nombreux systèmes ou sous-systèmes du système Terre (MCKAY *et al.*, 2022).

- **La probabilité de surprises climatiques**, qui conduirait le climat à produire des événements extrêmes inattendus ou à évoluer d'une façon inattendue **est non nulle**. Pour illustration, différents épisodes extrêmes ont été observés au cours des années récentes alors qu'ils n'avaient jamais été simulés par les modèles, même dans les scénarios d'émission les plus extrêmes (par exemple le dôme de chaleur dans l'Ouest Canadien en juin 2021, HENDERSON *et al.*, 2022).

2 Ensemble Explore2 et indicateurs considérés

2.1 Modèles considérés

L'ensemble de projections Explore2 a été obtenu avec trois scénarios d'émission (RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5), six GCMs, neuf RCMs, deux méthodes de correction de biais (ADAMONT et CDF-t) et 1 à 9 HMs selon les bassins versants (voir Fig. 2 dans SAUQUET *et al.*, 2023). Les différents modèles considérés dans ce rapport pour chacune de ces catégories de modèle sont rappelés ci-dessous.

2.1.1 Chaînes GCM/RCM

Comme évoqué dans le rapport sur le volet Climat du projet Explore2 (ROBIN *et al.*, 2023), l'ensemble des chaînes de modélisation GCM/RCM retenu pour Explore2 repose en grande partie sur l'ensemble retenu pour le projet DRIAS2020. Il comporte cependant certaines différences :

- exclusion des combinaisons CNRM-CM5-LR/RACMO22E et IPSL-CM5A-MR/WRF381P (voir rapport de synthèse sur les projections climatiques régionalisées, MARSON *et al.*, 2024),
- ajout de chaînes avec le modèle régional HadREM3-GA7-05,
- ajustement des combinaisons GCM/RCM retenues pour avoir, autant que possible, pour chaque GCM considéré, plusieurs expériences avec plusieurs RCMs différents et de façon symétrique avoir, pour chaque RCM considéré, plusieurs expériences avec plusieurs GCMs différents.

L'ensemble de projections climatiques retenu pour Explore2 est présenté en Figure 3. Nous affichons les noms complets des modèles, les noms des institutions ayant produit les simulations étant indiqués en bleu. Dans la suite de ce rapport, afin d'alléger les illustrations, nous indiquons le nom du modèle sans le nom de l'institution. Les deux versions du modèle REMO sont considérées comme un unique modèle dans ce rapport, suivant les recommandations de VAUTARD *et al.*, 2021.

Quatre combinaisons GCM/RCM correspondent aux **narratifs** sélectionnés dans Explore2 sur la base d'une expertise Météo-France (MARSON *et al.*, 2024). Ces narratifs visent à représenter les contrastes entre futurs possibles et illustrer la dispersion (et donc les incertitudes de manière partielle) des projections contrastées sur la base des évolutions possibles du climat.

2.1.2 Méthodes de correction de biais

Deux méthodes de correction de biais (BC), ADAMONT et CDF-t, ont été considérées pour corriger les projections climatiques simulées par les chaînes GCM/RCM retenues et produire les trajectoires utilisées en entrée des modèles d'impact.

2.1.3 Modèles hydrologiques

Les analyses d'indicateurs hydrologiques présentées dans ce rapport concernent seulement l'hydrologie de surface. Les projections de débits ont été obtenues par application de neuf modèles qui ont ainsi pu fournir des résultats sur l'ensemble de la France métropolitaine ou sur des grands bassins versants (Tableau 1).

De plus, aucun modèle ne peut fournir des simulations sur l'intégralité de ces points, y compris ceux qui ont une application nationale (Tableau 1, dernière colonne). La raison principale est l'incapacité des modèles à placer les points de simulation sur leur représentation du réseau hydrographique. C'est sur le bassin de la Loire (du fait des domaines d'application de **EROS** et **J2000**) que les simulations de débits sont les plus nombreuses. Ce bassin fait l'objet d'une analyse plus détaillée.

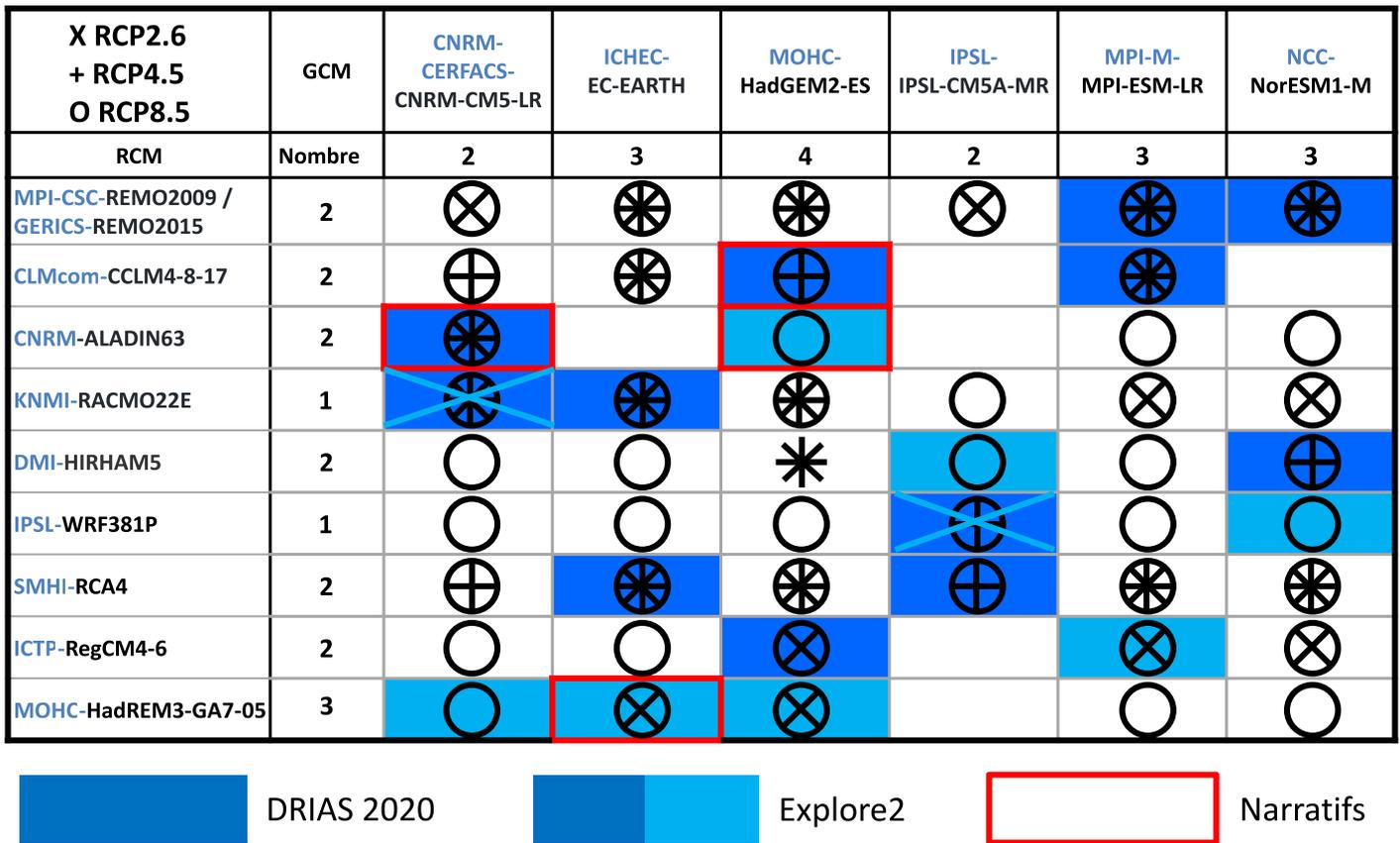


FIGURE 3 : Matrice des expériences climatiques sélectionnées pour Explore2 parmi les triplettes RCP-GCM-RCM, pour ensuite forcer les BCs et les HMs. En bleu foncé l'ensemble original DRIAS-2020 et en bleu clair celles ajoutées et supprimées (croix) pour Explore2. En encadré rouge la proposition de narratifs pour Explore2. Les symboles noirs représentent les RCPs disponibles (légende en haut à gauche) dans l'ensemble EURO-CORDEX début 2022.

Nom	Organisme	Région(s) simulée(s)	Nombre de points de simulation
CTRIP	Météo-France	France	2018
EROS	BRGM	Bretagne Loire	387
GRSD	INRAE	France	3712
J2000	INRAE	Loire Rhône	1291
MORDOR-SD	EDF	France	611
MORDOR-TS	EDF	Loire	535
ORCHIDEE	IPSL	France	3587
SIM2	Météo-France	France	649
SMASH	INRAE	France	3821

TABLEAU 1 : Quelques caractéristiques des modèles d'hydrologie de surface utilisés dans le projet Explore2.

2.2 Choix des indicateurs

L'analyse des incertitudes sera réalisée pour les projections de différents indicateurs représentatifs des changements projetés sur le climat et l'hydrologie. Le choix de ces indicateurs a été réalisé avec les partenaires scientifiques et le comité des utilisateurs (COUT-A) d'Explore2.

Le Tableau 2 présente l'ensemble des indicateurs utilisés pour l'analyse d'incertitudes, ainsi que ceux présentés dans ce rapport.

Abréviation	Nom complet	Catégorie
T_{saison}	Température moyenne saisonnière (DJF et JJA)	Climat
Pr_{saison}	Cumul de précipitations totales saisonnier (DJF et JJA)	Climat
$ET0_{saison}$	Cumul d'ET0 saisonnier (DJF et JJA)	Climat
RX1d	Précipitation quotidienne maximale annuelle	Climat
Prs_{NDJFMA}	Cumul de précipitations solides de novembre à avril	Climat
QA	Débit moyen	Hydrologie
QJXA	Débit journalier maximal annuel	Hydrologie
QMNA	Débit mensuel minimal de chaque année	Hydrologie

TABLEAU 2 : Indicateurs hydro-climatiques présentés dans ce rapport. Les indicateurs sont calculés à partir des chroniques journalières, pour chaque année. Les saisons sont climatiques : décembre-février (DJF : hiver), juin-août (JJA : été).

3 Méthodologie d'analyse

3.1 La méthode QUALYPSO

L'objectif de ce travail sur les incertitudes est de caractériser l'ensemble de projections produit pour l'indicateur considéré. Il s'agit, entre autres choses, d'estimer :

- la moyenne d'ensemble $M(t)$ (Eq. 1),
- l'incertitude totale V_{TOT} (Eq. 9, annexe A) associée à cet ensemble de projections, ainsi que les projections basses et hautes produites dans l'ensemble associées à des quantiles 5% et 95% des réponses climatiques (section A.6 en annexe),
- la contribution des différentes sources d'incertitude à cette incertitude totale (incertitude scénario, GCM, RCM, HM, variabilité interne, Eq. 10 en annexe),
- l'effet principal $EX_x(t)$ de chaque modèle individuel x , c'est-à-dire la différence entre la moyenne de l'ensemble de toutes les chaînes spécifiques à ce modèle et la moyenne de tout l'ensemble (section A.2 en annexe, étape 4).

La méthode QUALYPSO a été développée pour permettre ces différentes estimations et a été appliquée sur les projections Explore2 pour fournir les résultats présentés dans ce rapport. Une description succincte de QUALYPSO est donnée ci-après et une description détaillée est fournie dans l'annexe A. Le lecteur intéressé peut aussi se référer aux publications correspondantes (EVIN *et al.*, 2019; EVIN *et al.*, 2021) et à la présentation de la méthode réalisée lors de la conférence EGU2020 (HINGRAY et EVIN, 2020). QUALYPSO est disponible sous forme d'une librairie pour le langage de programmation R (R CORE TEAM, 2022), en accès libre sur la plateforme du projet CRAN¹.

QUALYPSO fait appel à des méthodes paramétriques d'extraction de signal (splines) et des méthodes d'analyse de variance (ANOVA). La méthode a été développée pour estimer au mieux la réponse climatique de chaque projection. Elle a aussi été développée pour pouvoir traiter des ensembles incomplets, c'est-à-dire des ensembles où certaines des combinaisons possibles de modèles ne sont pas disponibles (EVIN *et al.*, 2019), comme c'est le cas dans Explore2 (Figure 3).

La méthode s'appuie sur différentes hypothèses. Pour chaque projection :

- on considère que la réponse climatique varie de façon graduelle et lisse au cours du temps; les fluctuations autour de la réponse climatique sont dues à la variabilité interne du climat,
- l'amplitude des fluctuations (leur variance) due à la variabilité interne est supposée constante dans le temps,
- pour un scénario s donné, la réponse climatique en changement $RC_{s,g,r,b,h}^*(t)$ d'une projection composée d'un GCM g donné, d'un RCM r donné, d'une méthode de correction de biais b donnée et d'un modèle hydrologique h donné est supposée pouvoir être écrite sous **la forme additive suivante** :

$$RC_{s,g,r,b,h}^*(t) = M(t) + ES_s(t) + EG_g(t) + ER_r(t) + EB_b(t) + EH_h(t) + \epsilon_{s,g,r,b,h}(t), \quad (1)$$

où $M(t)$ est la moyenne d'ensemble de la réponse climatique en changement pour l'ensemble considéré et où $ES_s(t)$, $EG_g(t)$, $ER_r(t)$, $EB_b(t)$, $EH_h(t)$ sont respectivement l'effet principal pour l'horizon futur t du scénario s , du RCP s , du GCM g , du RCM r , du BC b et du HM h et où $\epsilon_{s,g,r,b,h}(t)$ est le terme résiduel, c'est-à-dire la partie de la réponse climatique de la chaîne considérée qui ne peut pas être expliquée par la somme des effets principaux individuels.

En pratique, la méthode QUALYPSO comporte les différentes étapes suivantes (section A.2 en annexe) :

1. estimation de la réponse climatique $RC(t)$ de chacune des chaînes de modélisation et de son évolution sur une longue période de temps (par exemple 1976-2100),
2. estimation de la variabilité interne IV de cette chaîne sur cette période,

1. <https://cran.r-project.org/package=QUALYPSO>

3. estimation de la réponse climatique en changement $RC^*(t)$ de chaque chaîne. **Les changements sont des changements absolus pour la température (en °C) et des changements relatifs pour les autres indicateurs (en %).** Ces changements sont toujours calculés par rapport à une [période de référence](#) (1976-2005 pour Explore2), en utilisant la valeur de la réponse climatique estimée pour l'année centrale de la période de référence (année 1990).
4. estimation de la réponse moyenne $M(t)$ et de l'effet principal $EX_x(t)$ associé à chacun des modèles considérés dans l'ensemble,
5. estimation de l'incertitude totale V_{TOT} et des différentes sources d'incertitude $\text{Var}_x(t)$ (Eq. 10), c'est-à-dire les incertitudes associées aux scénarios, aux différentes catégories de modèles (aux GCMs, aux RCMs, aux BCs et aux HMs) et celles liées à la variabilité interne du climat.

QUALYPSO permet également de fournir l'évolution temporelle de ces différentes estimations sur la période de temps couverte par les projections (par exemple 1976-2100).

Une étape clé de la méthode, qui va pour beaucoup conditionner la qualité de l'analyse réalisée, est l'estimation de la réponse climatique pour chaque chaîne. Différentes approches sont souvent utilisées à cette fin. Elles ne sont pas équivalentes. Les méthodes telles que QUALYPSO, qui utilisent les projections transitoires disponibles sur l'ensemble de la période de simulation, permettent une estimation plus robuste de la réponse de chaque chaîne, et en conséquence une meilleure estimation de l'ensemble des composantes de l'incertitude (HINGRAY *et al.*, 2019).

Dans tous les cas de figure, une appréciation visuelle des différentes étapes de la méthode d'analyse est fortement recommandée pour en évaluer sa pertinence (annexe A, Section A.5).

Sauf contraintes spécifiques associées à des variables particulières, la méthode peut être appliquée pour caractériser différentes catégories d'ensembles de projections, pour différents types de variables ou indicateurs climatiques (annexe A).

Estimation lorsque l'on dispose de plusieurs membres

Le bruit autour du signal, c'est-à-dire les fluctuations dues à la variabilité interne, résultent de la nature chaotique du climat. Si l'on réalise plusieurs expériences climatiques avec la même chaîne de modélisation en changeant seulement les conditions initiales de l'expérience, les fluctuations obtenues autour de la réponse climatique de la chaîne sont différentes. Si l'on a suffisamment d'expériences (d'une à plusieurs dizaines selon la variable d'intérêt), leur moyenne d'ensemble tend, pour chaque [horizon futur](#) simulé, vers la réponse climatique de la chaîne considérée. L'identification de la réponse climatique d'une réalisation de la chaîne de modélisation est donc énormément facilitée lorsque l'on dispose de plusieurs [membres](#) pour chaque chaîne (DESER *et al.*, 2012 ; HINGRAY *et al.*, 2019).

De nombreux grands ensembles de ce type, connus sous le nom d'ensembles SMILEs (pour *single-model initial-condition large ensembles*) et comprenant plusieurs dizaines de membres, ont été produits au cours de la décennie passée avec différents modèles de climat globaux (DESER, 2020 ; LEHNER *et al.*, 2020). En pratique, réaliser une étude d'impact avec de tels ensembles est difficile, pour des questions de coût numérique. Pour la plupart des simulations régionales, on ne dispose de toute façon que d'un seul membre.

Estimation par la moyenne climatologique sur 30 ans

Dans la communauté climatique et jusqu'à peu, la réponse climatique pour une période future donnée a souvent été estimée par la moyenne climatologique, sur 30 ans, de la variable considérée pour la période visée (par exemple moyenne des précipitations annuelles sur la période 2070-2100). Cette estimation peut être assez différente de la réponse climatique si la variable considérée présente une forte variabilité interne. Une moyenne sur 30 ans permet de lisser la variabilité interannuelle. Elle ne permet pas de faire "disparaître" les composantes de la variabilité interne basses fréquences, décennale à pluri-décennale, qui restent indépendantes des forçages anthropiques (illustration Figure 4).

Estimation à l'aide d'un modèle de tendance

Une autre approche pour estimer la réponse climatique consiste à utiliser un modèle de tendance, comme c'est le cas pour la méthode QUALYPSO. En pratique, on va chercher un modèle paramétrique qui permette de représenter de façon graduelle et lisse l'évolution long terme (par exemple sur 1976-2100) de la réponse

climatique de l'expérience considérée. L'estimation de la réponse climatique pour un horizon futur donné se base donc sur toutes les données de la chronique disponible. Pour une chaîne de modélisation donnée, une estimation relativement robuste peut par la suite être effectuée même si l'on ne dispose que d'une seule [expérience climatique](#) (un seul membre).

La difficulté est de trouver un modèle de tendance qui soit à la fois 1) suffisamment adaptable pour représenter l'évolution long terme, qui peut présenter successivement pour certaines variables diverses formes (croissance, plateau, décroissance, etc.) et 2) suffisamment contrainte pour que l'évolution temporelle de la réponse climatique estimée ne soit pas pilotée par les fluctuations dues à la variabilité interne du climat. Trois modèles de tendance sont couramment utilisés pour estimer les réponses climatiques de projections climatiques :

1. **Tendance linéaire.** C'est le modèle de tendance le plus simple. Ce modèle, dont les paramètres peuvent être estimés par régression linéaire, est très robuste. Très rigide, il est cependant souvent inadapté pour représenter l'évolution souvent très non linéaire de la variable climatique considérée. C'est par exemple le cas des évolutions projetées des températures.
2. **Tendance polynomiale.** Un modèle polynomial d'ordre 3 ou 4 est aussi souvent utilisé (voir par exemple HAWKINS et SUTTON, 2012). Il est très adaptable *a priori*. Il peut en fait l'être trop, en particulier lorsque la variabilité interne de la variable considérée est importante. Il pourrait, par exemple, suggérer à tort que la réponse climatique présente diverses modulations alors que les modulations estimées ne sont dues en réalité qu'à la seule variabilité interne. C'est typiquement le risque avec les projections de précipitations. Pour ce type de variable, un modèle de tendance linéaire est souvent préférable (HINGRAY *et al.*, 2019).
3. **Spline cubique.** QUALYPSO utilise un modèle de spline cubique (CHAMBERS et HASTLE, 1992; GREEN et SILVERMAN, 1993). Ce modèle peut imposer un fort niveau de lissage de la chronique initiale tout en gardant plusieurs points d'inflexion. Il permet ainsi de supprimer les variations inter-annuelles et les fluctuations basses fréquence associées à la variabilité interne pluri-décennale, tout en gardant la possibilité d'évolutions continues progressives et non linéaires. Le modèle nécessite de définir l'intensité du lissage à opérer. Cette intensité est à choisir. Ce choix, un choix d'expert, nécessite une certaine familiarité avec l'analyse de signaux de changement climatique (RIGAL *et al.*, 2019). Dans ces analyses, on utilise la fonction `smooth.spline` dans R (R CORE TEAM, 2022) avec le paramètre de lissage `spar` égal à 1 pour les indicateurs liés à la température et 1.1 autrement.

3.2 Analyses et représentations graphiques proposées dans ce rapport

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

Pour l'ensemble Explore2, nous estimons principalement :

1. l'évolution temporelle de la moyenne d'ensemble des réponses climatiques en changement,
2. les différentes informations sur les incertitudes associées à ces projections, en particulier celles associées aux choix de simulation retenus (scénarios d'émission, modèles de simulation retenus) et à la variabilité interne du climat,
3. l'évolution temporelle de l'effet principal de chacun des modèles considérés dans l'ensemble.

3.2.1 Période de référence

Les projections sont caractérisées en termes de changements (absolus ou relatifs) par rapport à la [période de référence](#) retenue pour le projet Explore2, à savoir **1976-2005**.

3.2.2 Représentations chronologique et cartographique des changements

Pour chaque variable / indicateur considéré (par exemple le débit annuel), 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),

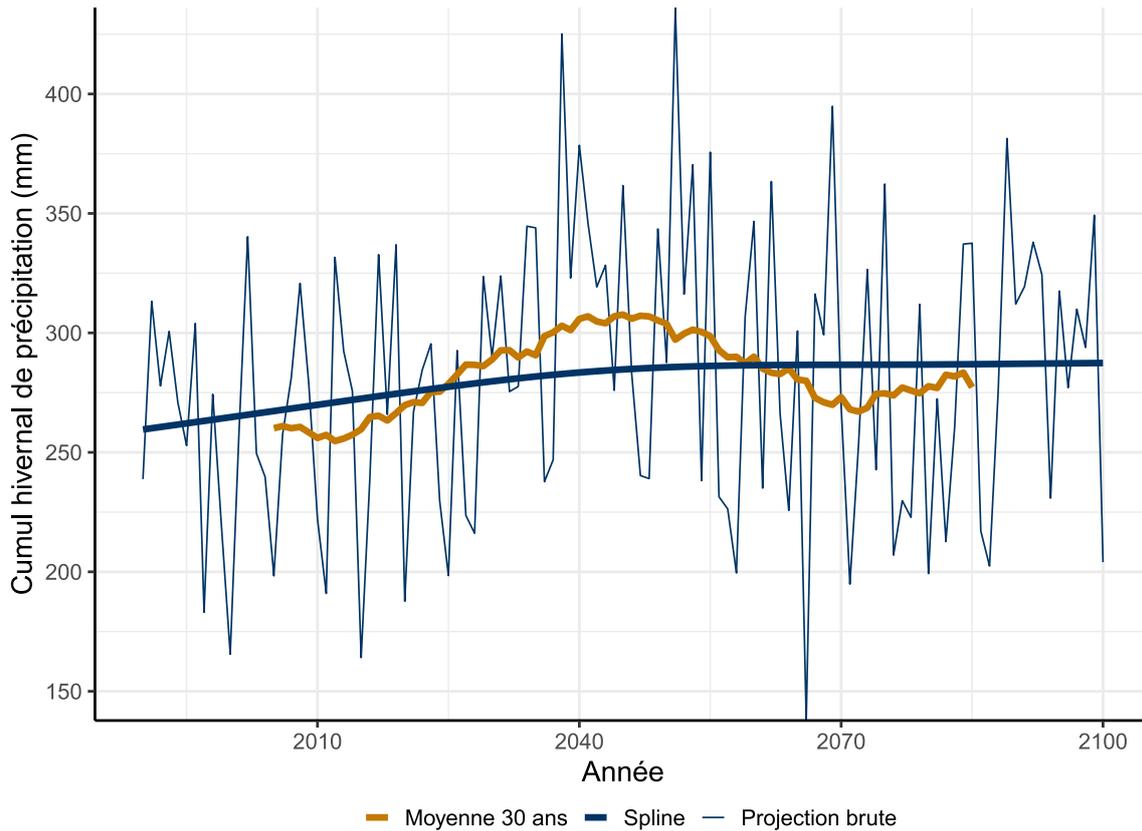


FIGURE 4 : Estimation de la réponse climatique $RC(t)$ d'une réalisation de la chaîne de modélisation : illustration de l'intérêt d'un modèle de tendance contraint. L'estimation avec un modèle de tendance à fort lissage, ici une fonction de spline cubique (courbe bleue) donne une évolution progressive de la réponse climatique, ce qui est attendu, à l'inverse d'une estimation avec une moyenne glissante sur 30 ans (courbe orange), pour laquelle subsistent différents types de fluctuations résultant de la variabilité interne du climat, dont des fluctuations basse fréquence importantes. Variable considérée : cumul annuel des précipitations hivernales pour la région Rhône-Méditerranée-Corse ; projections obtenues pour la chaîne CNRM-CM5/ALADIN63/ADAMONT pour le scénario RCP2.6 (trait fin).

- des représentations cartographiques évaluées pour un horizon donné et pour tous les pixels d'une région donnée (pour les projections climatiques) ou pour différents points de simulation (pour les projections hydrologiques, voir SAUQUET *et al.*, 2022b).

Différentes représentations ont été proposées dans le cadre du projet. La façon d'interpréter les résultats présentés dans ces représentations et les concepts qui les sous-tendent sont décrits dans une notice courte² et une notice détaillée³ produites en interaction avec le comité utilisateurs du projet Explore2 (REVERDY *et al.*, 2023a ; REVERDY *et al.*, 2023b).

3.2.3 Références et horizons chronologiques

QUALYPSO permet de faire les analyses avec deux types d'évolution : une évolution temporelle ou une évolution en termes de niveau de réchauffement planétaire. Quand les représentations graphiques sont produites pour un horizon futur donné, l'horizon peut donc être un horizon temporel (par exemple la période 2050-2070) ou un horizon de réchauffement planétaire (par exemple projection pour un réchauffement de +1.5°C). Pour Explore2, les analyses ont été faites pour trois horizons temporels :

- Horizon 2035 (2021-2050) ou "Futur proche",
- Horizon 2055 (2041-2070) ou "Milieu de siècle",
- Horizon 2085 (2070-2099) ou "Fin de siècle".

2. <https://doi.org/10.57745/IVDUSF>

3. <https://doi.org/10.57745/AMZCEZ>

Les horizons temporels sont ceux retenus en concertation avec le COUT-A d'Explore2. On parlera par exemple dans la suite de projection ou de changement en fin de siècle pour les changements projetés à l'horizon 2085 (année centrale de la période 2070-2099). Ultérieurement, ces analyses seront également produites pour différents niveaux de réchauffement (par ex. +3°C, +4°C de réchauffement planétaire par rapport à la période préindustrielle 1850-1900).

3.3 Intervalle d'incertitude présenté dans les représentations graphiques

Les plages d'incertitude présentées par la suite correspondent, sauf mention contraire, à la dispersion entre les réponses climatiques obtenues avec les différentes chaînes et, plus précisément, aux limites basse et haute des réponses hydroclimatiques dans l'ensemble Explore2. En première approximation, les limites de cette plage d'incertitude correspondent aux percentiles 5 et 95 des réponses climatiques dans l'ensemble Explore2 sous hypothèse de normalité des changements projetés (détails dans l'annexe A, Section A.6).

Comme indiqué ci-haut à la Section 1.4, plusieurs points nécessitent une attention particulière pour l'interprétation de la plage d'incertitude :

- La plage d'incertitude représentée est conditionnelle à l'ensemble de simulations hydroclimatiques utilisé. La plage d'incertitude ne couvre donc pas nécessairement le futur qui se réalisera vraiment dans les décennies à venir.
- La plage d'incertitude représentée ne constitue pas un intervalle de confiance au sens des tests d'hypothèses statistiques.
- Dans une représentation chronologique des projections, la plage d'incertitude totale est souvent représentée par une bande d'incertitude dont la largeur s'amplifie avec l'horizon temporel. Les limites hautes et basses de cette bande ont une évolution progressive et continue. Elles ne correspondent à aucune projection climatique de l'ensemble considéré mais permettent de synthétiser la variabilité des futurs projetés.
- De manière analogue, dans une représentation spatiale des projections, la carte de la limite basse (associée au quantile 5%) ou de la limite haute (associée au quantile 95%) des projections ne correspond à aucune projection climatique de l'ensemble. Les valeurs présentées pour différentes régions de France peuvent donc être issues de chaînes de modélisation différentes (voir figures mosaïques dans MARSON *et al.*, 2024, par exemple Fig. 11).

3.4 Narratifs

L'analyse d'ensemble conduite ici a vocation à être utilisée conjointement à une approche par **narratif**. Cette approche par narratif est construite sur la base des simulations produites par quelques chaînes de projections, proposant différents "récits" de futurs plausibles et contrastés (MARSON *et al.*, 2024).

4 Climats projetés en fin de siècle

Cette section présente les résultats issus de la méthode QUALYPSO appliquée à l'ensemble de projections Explore2 pour différentes variables climatiques :

- les températures moyennes hivernales et estivales,
- les cumuls des précipitations hivernales et estivales,
- les cumuls de l'évapotranspiration de référence (ET0) hivernale et estivale,
- les précipitations quotidiennes maximales annuelles,
- les cumuls de précipitations solides en hiver (novembre à avril).

Conformément aux saisons retenues dans les rapports de l'IPCC et mis à part pour les précipitations solides hivernales, l'hiver correspond à la période décembre-janvier-février (DJF) et l'été à la période juin-juillet-août (JJA).

Les résultats sont d'abord présentés sous forme cartographique sur la France entière pour la période 2070-2100, centrée sur 2085, puis sous forme chronologique pour l'ensemble de la période couverte par les simulations, pour deux grands bassins dont les évolutions projetées sont contrastées : le bassin Artois-Picardie et le bassin Adour-Garonne. Les résultats obtenus pour les autres horizons (périodes centrées sur 2035 et 2055) sont donnés dans le matériel supplémentaire.

Pour chacune des différentes variables considérées ici, les résultats sont présentés via un même ensemble de représentations cartographiques. Par exemple, concernant les températures estivales moyennes, la Figure 5 ci-dessous contient quatre volets :

- **volet A** : changements projetés pour les trois scénarios d'émission RCP (un scénario par ligne). Les cartes présentent la moyenne d'ensemble additionnée de l'effet du scénario s correspondant, c'est-à-dire $M(t) + ES_s(t)$ (colonne centrale : projections intermédiaires) et la gamme d'incertitude issue de la dispersion entre les modèles (gauche : projections basses et droite : projections hautes, correspondant respectivement aux quantiles 5% et 95% de l'ensemble).
- **volet B** : incertitude totale sans la variabilité interne. Cette incertitude totale représente la dispersion (l'écart-type) des réponses climatiques en changement ($\sqrt{V_{TOT}(t) - IV}$, Eq. 9 en annexe A).
- **volet C** : variabilité interne. La variabilité interne correspond à l'écart-type moyen des fluctuations autour de la réponse climatique d'une chaîne et quantifie la variabilité inter-annuelle de l'indicateur. Les deux incertitudes sont exprimées dans l'unité du changement considéré.
- **volet D** : importance relative (en %) des différentes sources d'incertitude, liée à la dispersion entre les différents scénarios ou modèles (incertitude totale sans la variabilité interne) : l'incertitude scénario, l'incertitude GCM, l'incertitude RCM et l'incertitude liée à la correction de biais BC (la somme des contributions fait 100%).

L'incertitude totale et la variabilité interne sont exprimées dans l'unité du changement considéré (c'est-à-dire en °C ou en %).

Toujours pour les températures estivales moyennes, la Figure 6 présente les effets principaux correspondant aux différentes sources d'incertitude : effets principaux estimés pour les 6 GCMs (Fig. 6A), les 9 RCMs (Fig. 6B) et les 2 méthodes de correction de biais (Fig. 6C) considérés dans l'ensemble. L'effet principal d'un modèle est la déviation moyenne des projections des chaînes de modélisation utilisant ce modèle par rapport à la moyenne d'ensemble. Pour chaque catégorie de modèle, la somme de ces effets est égale à 0 par construction.

Notations : Par souci de clarté, la plage de variation de la variable considérée sera notée [Z1, Z2] lorsque l'on considérera les variations spatiales de cette variable, telles que présentées dans les représentations cartographiques. Elle sera notée (Z3, Z4) lorsque l'on considérera la plage d'incertitude des projections pour cette variable, c'est-à-dire la dispersion entre les réponses climatiques des différentes chaînes de modélisation.

4.1 Température estivale moyenne

Changements projetés pour 2085, Figure 5A : Le réchauffement moyen de l'ensemble varie autour de 1°C pour le scénario RCP2.6, et autour de 4.5°C pour le scénario RCP8.5 [de 3.5°C à 6°C]. Le réchauffement est plus important au Sud, en particulier dans le Sud-Est. Il est plus important dans les Alpes, les Pyrénées, le Massif central.

Dispersion des projections, Figure 5A : Le réchauffement projeté diffère d'abord beaucoup d'un scénario d'émission à l'autre. Pour un scénario donné, la dispersion entre les chaînes de simulation est aussi importante. Pour le scénario RCP8.5 et en moyenne sur toute la France, les projections basses sont autour de 3.5°C [2.5°C, 4.5°C], les projections hautes autour de 6.5°C [4.5°C, 8.5°C]. Cet éventail de réchauffements projetés est beaucoup plus restreint pour le RCP2.6, toutes les configurations scénario/modèles climatiques/corrections de biais conduisant au maximum à un réchauffement inférieur à 4°C sur la France pour le quantile 95% (colonne 3, projections hautes). Pour ce scénario, on peut noter que certaines chaînes conduisent à une légère baisse des températures estivales en fin de siècle, comparée à la période de référence 1976-2005 (colonne 1, projections basses).

Incertitude totale (sans la variabilité interne), Figure 5B : Elle est de l'ordre de [1°C, 2.5°C] environ sur l'ensemble de la France, ce qui signifie que la dispersion moyenne des différentes chaînes de modélisation est environ de 1.5°C, lorsqu'on considère les réponses climatiques (c'est-à-dire hors variabilité interne).

Variabilité interne, Figure 5C : Elle est de l'ordre de [1°C, 1.5°C] environ sur l'ensemble de la France, ce qui signifie que, dans les modèles, les fluctuations d'un été à l'autre des températures moyennes autour de la réponse climatique en changement sont d'un peu plus de 1°C.

Sources d'incertitude, Figure 5D : En cohérence avec les études précédentes (EVIN *et al.*, 2021), l'incertitude scénario est de loin, en fin de siècle, la principale source d'incertitude.

Effets principaux des modèles, Figure 6A-C : Il est attendu que les cartes des effets GCMs soient relativement lisses puisque les GCMs portent le signal grande échelle des projections climatiques. A l'inverse, il est attendu que les cartes des effets RCMs montrent une variabilité à plus petite échelle, les RCMs représentant de façon moins grossière les facteurs de variabilité régionale, dont les facteurs liés à la topographie :

- GCMs : HadGEM2-ES conduit à des réchauffements plus élevés que CNRM-CM5-LR et MPI-ESM-LR. Les effets principaux de IPSL-CM5A-MR présentent un gradient NO-SE accentué.
- RCMs : Deux RCMs présentent des effets notables : WRF381P qui conduit à des réchauffements nettement plus faibles que la moyenne d'ensemble, notamment dans le sud-est de la France, et HadREM3-GA7-05 qui projette à l'inverse des réchauffements plus élevés, dans l'Est en particulier.
- BCs : les effets principaux de la méthode de correction de biais sont faibles au regard des effets GCMs/RCMs.

Pour la température moyenne estivale, plusieurs modèles sont proches de la moyenne de l'ensemble : les GCMs EC-EARTH et NorESM1-M et les RCMs RegCM4-6 et REMO.

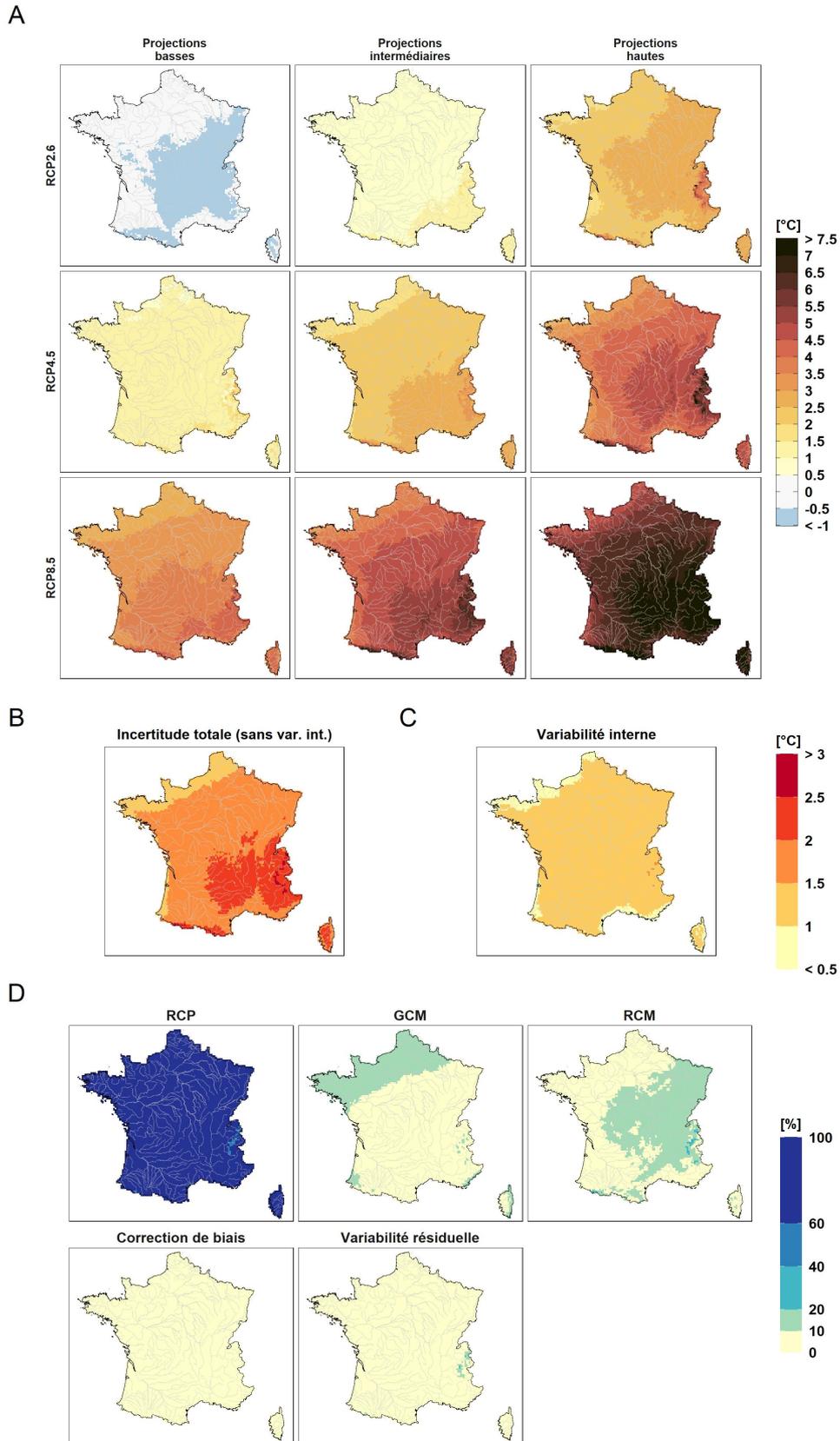


FIGURE 5 : **Température estivale moyenne. Changements projetés pour 2085.** (A) Projections basses (gauche), intermédiaires (centre) et hautes (droite) pour les trois scénarios d'émission RCP (un scénario par ligne). (B) Incertitude totale (sans la variabilité interne). (C) Variabilité interne. (D) Contribution des différentes sources d'incertitude à l'incertitude totale (sans la variabilité interne).

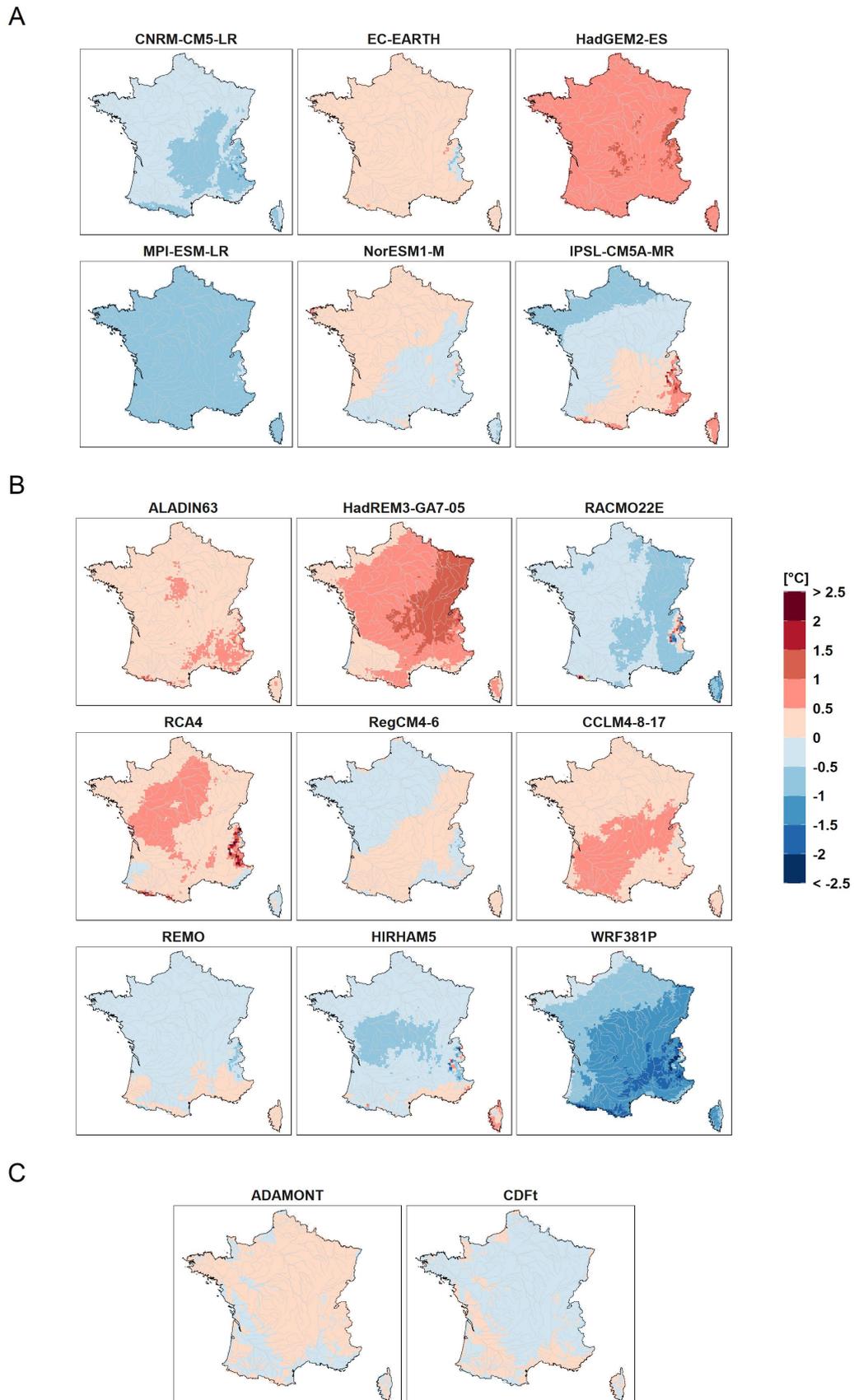


FIGURE 6 : **Température estivale moyenne. Effets principaux des modèles pour les changements 2085.** (A) GCMs. (B) RCMs. (C) BCs. La somme des effets pour une catégorie de modèles est nulle.

4.2 Température hivernale moyenne

Changements projetés pour 2085, Figure 7A : Le réchauffement est plus faible en hiver qu'en été, notamment avec le scénario d'émission RCP8.5 qui projette des changements moyens (colonne 2, projections intermédiaires) entre 2.5°C et 4.5°C (contre une gamme entre 3.5°C et 6°C en été) et des projections hautes qui atteignent environ 6°C (contre 8.5°C en été).

Dispersion des projections, Figure 7A : La dispersion entre les chaînes de modélisation est similaire à celle obtenue en été. La différence moyenne sur la France entre les projections basses et hautes est d'environ 1.5°C pour les trois scénarios RCP. La dispersion entre les modèles est plus importante sur les Alpes, les Pyrénées et en Corse en raison d'une variabilité plus importante des températures simulées dans les zones montagneuses pour les différents RCMs (Evin *et al.*, 2021).

Incertitude totale (sans la variabilité interne), Figure 7B : La dispersion entre les chaînes est d'environ [1°C, 1.5°C] sur une grande partie de la France mais elle est plus élevée dans les régions montagneuses : Alpes et Pyrénées.

Variabilité interne, Figure 7C : Elle varie de 1°C à 1.5°C selon les régions. Elle est similaire à celle obtenue en été, avec des valeurs plus marquées sur l'Est.

Sources d'incertitude, Figure 7D : Comme pour les températures estivales, la source d'incertitude prépondérante est l'incertitude scénario.

Effets principaux des modèles, Figure 8A-C : Ils sont très similaires à ceux obtenus pour l'été. Les empreintes spatiales des effets principaux des GCMs sont très lisses, celles pour les RCMs très liées au relief. Les effets des méthodes BCs sont négligeables. On peut noter un effet "chaud" du GCM HadGEM2-ES et un effet "froid" du RCM WRF381P, comme en été.

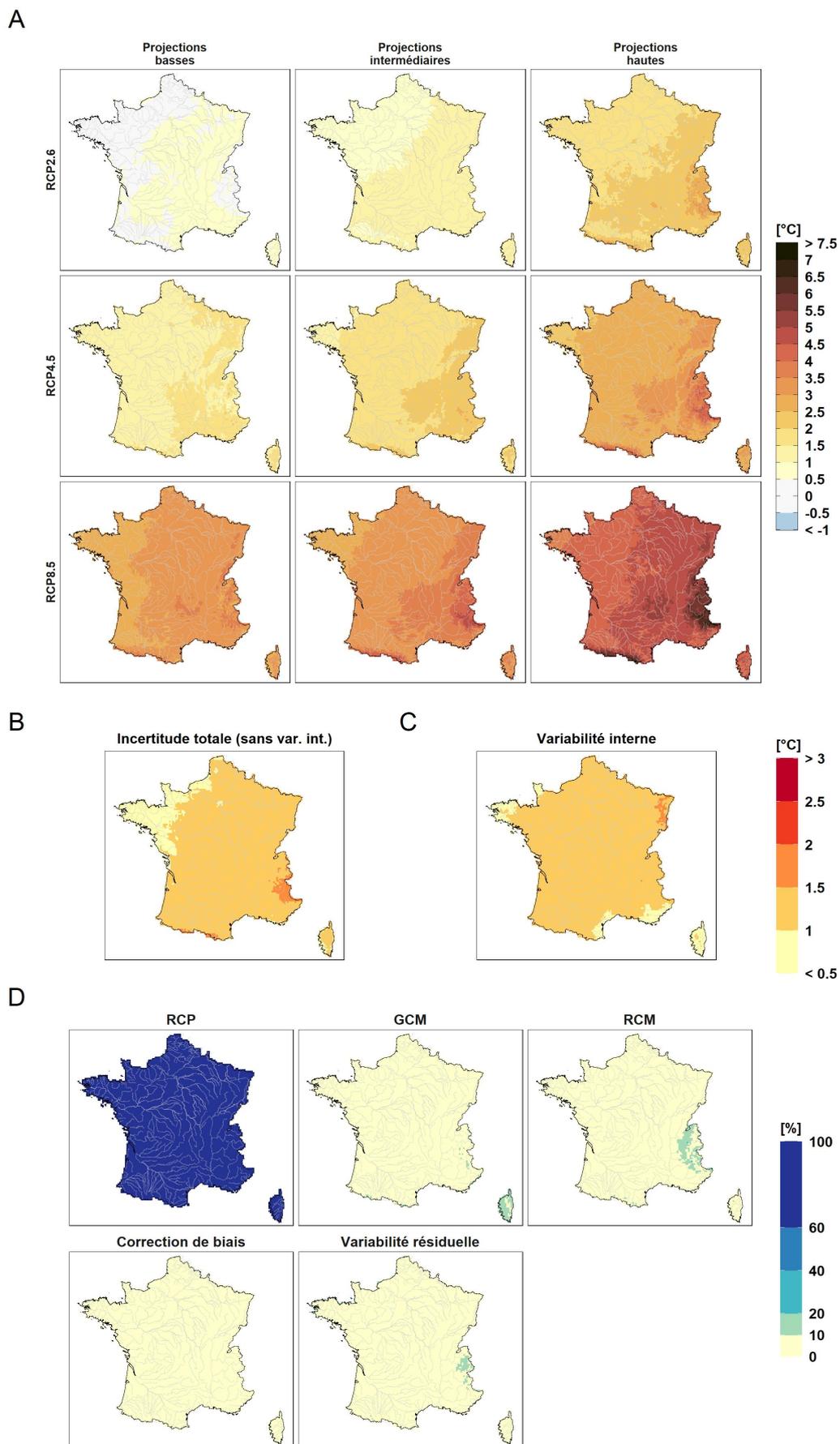


FIGURE 7 : Température hivernale moyenne. Changements projetés pour 2085.

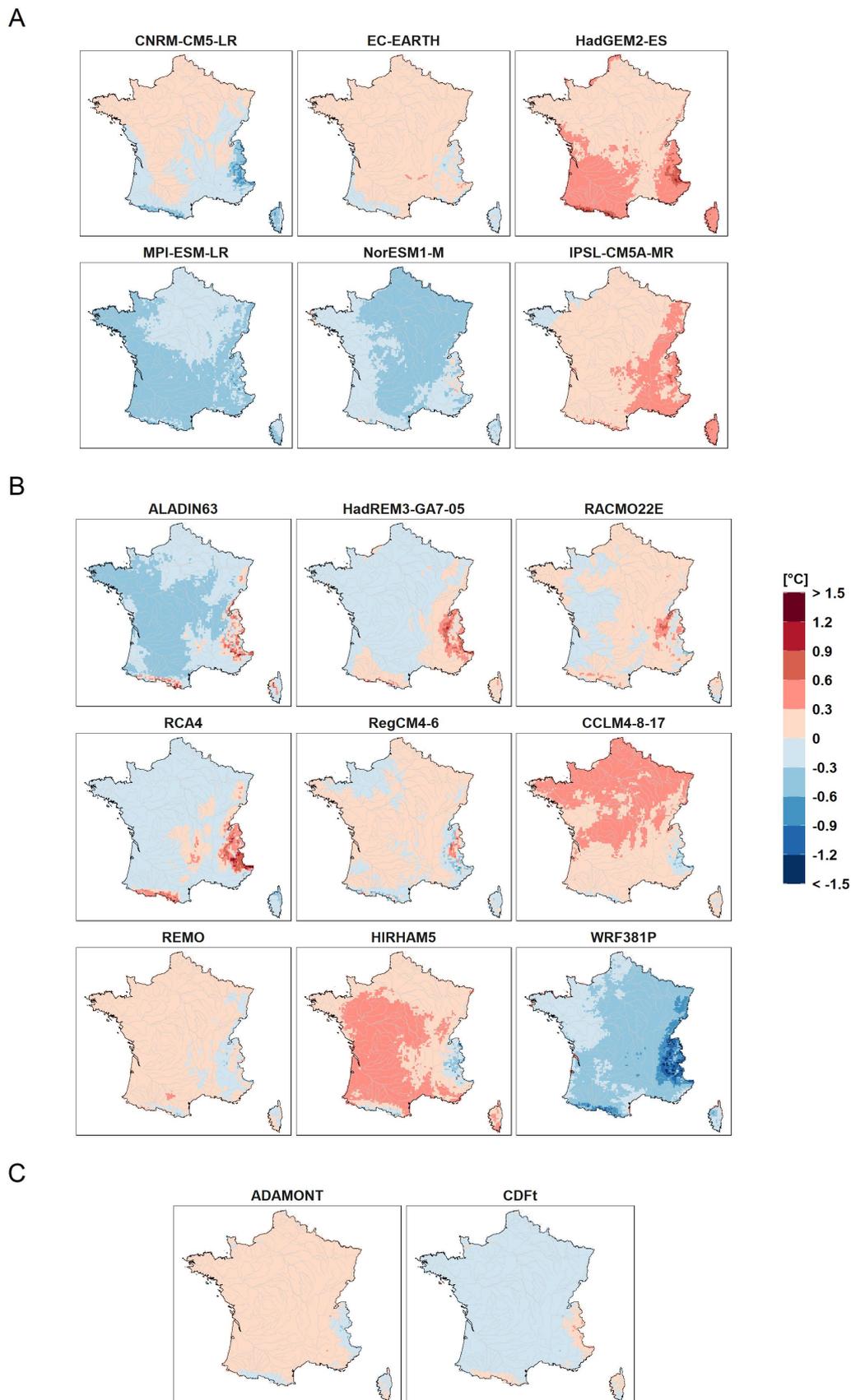


FIGURE 8 : **Température hivernale moyenne. Effets principaux des modèles pour les changements 2085.** (A) GCMs. (B) RCMs. (C) BCs. La somme des effets pour une catégorie de modèles est nulle.

4.3 Cumul des précipitations estivales

Changements relatifs projetés pour 2085, Figure 9A : Les changements moyens projetés sont peu importants et autour de zéro pour les scénarios RCP2.6 [-5%, +20%] et RCP4.5 [-20%, 0%]. Ils sont plus importants pour le scénario RCP8.5, la diminution moyenne projetée variant de -10% à -40% sur la majeure partie de la France.

Dispersion des projections, Figure 9A : Quel que soit le scénario RCP, le signe du changement est incertain, les projections basses et les projections hautes conduisant presque partout à une diminution forte ou très forte des précipitations, et à une augmentation légère ou modérée, respectivement. Pour les RCP4.5 et RCP8.5, certaines projections donnent des diminutions très importantes. Pour les projections basses obtenues avec le RCP8.5, les diminutions sont de l'ordre de -60% en moyenne sur la France et jusqu'à -85% dans le Sud.

Incertitude totale (sans la variabilité interne), Figure 9B : On note une incertitude totale, hors variabilité interne, qui varie entre 10% et 20% dans le nord-est de la France et de l'ordre de 30% dans le Sud, la dispersion maximum étant atteinte dans le pourtour méditerranéen et en Corse.

Variabilité interne, Figure 9C : La variabilité interne est une composante importante des incertitudes, plus élevée que la variabilité entre les réponses climatiques en changement (Fig. 9B). Elle est beaucoup plus élevée sur le pourtour méditerranéen (supérieure à 50% le long des côtes) que sur le reste de la France.

Sources d'incertitude, Figure 9D : Pour la majeure partie du territoire, les sources principales d'incertitude sont portées par les scénarios RCP et les RCMs (entre 20% et 40%), avec une importance légèrement supérieure pour les RCMs, ce qui est cohérent avec les résultats obtenus pour l'Europe (EVIN *et al.*, 2021). L'incertitude GCM et la variabilité résiduelle ont une contribution similaire.

Effets principaux des modèles, Figure 10A-C :

- GCMs : IPSL-CM5A-MR donne un assèchement plus important que les autres GCMs (entre -8% et -24% environ).
- RCMs : CCLM4-8-17 donne un assèchement plus important que les autres RCMs, surtout dans le sud de la France. A contrario, le RCM WRF381P donne un assèchement moins important que les autres RCMs.
- BCs : l'effet de la méthode de correction de biais n'est pas marqué.

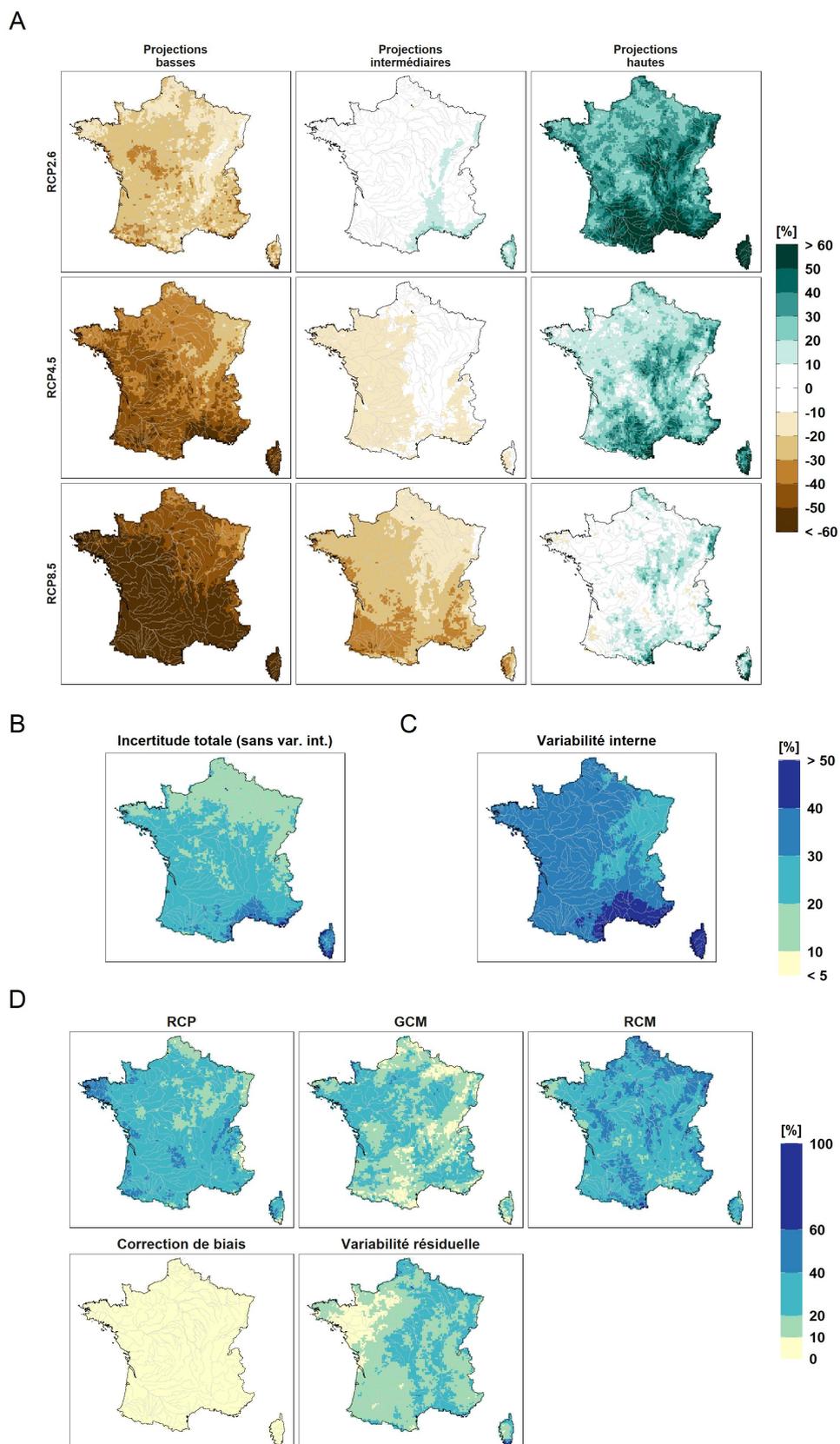


FIGURE 9 : Cumul des précipitations estivales. Changements relatifs projetés pour 2085.

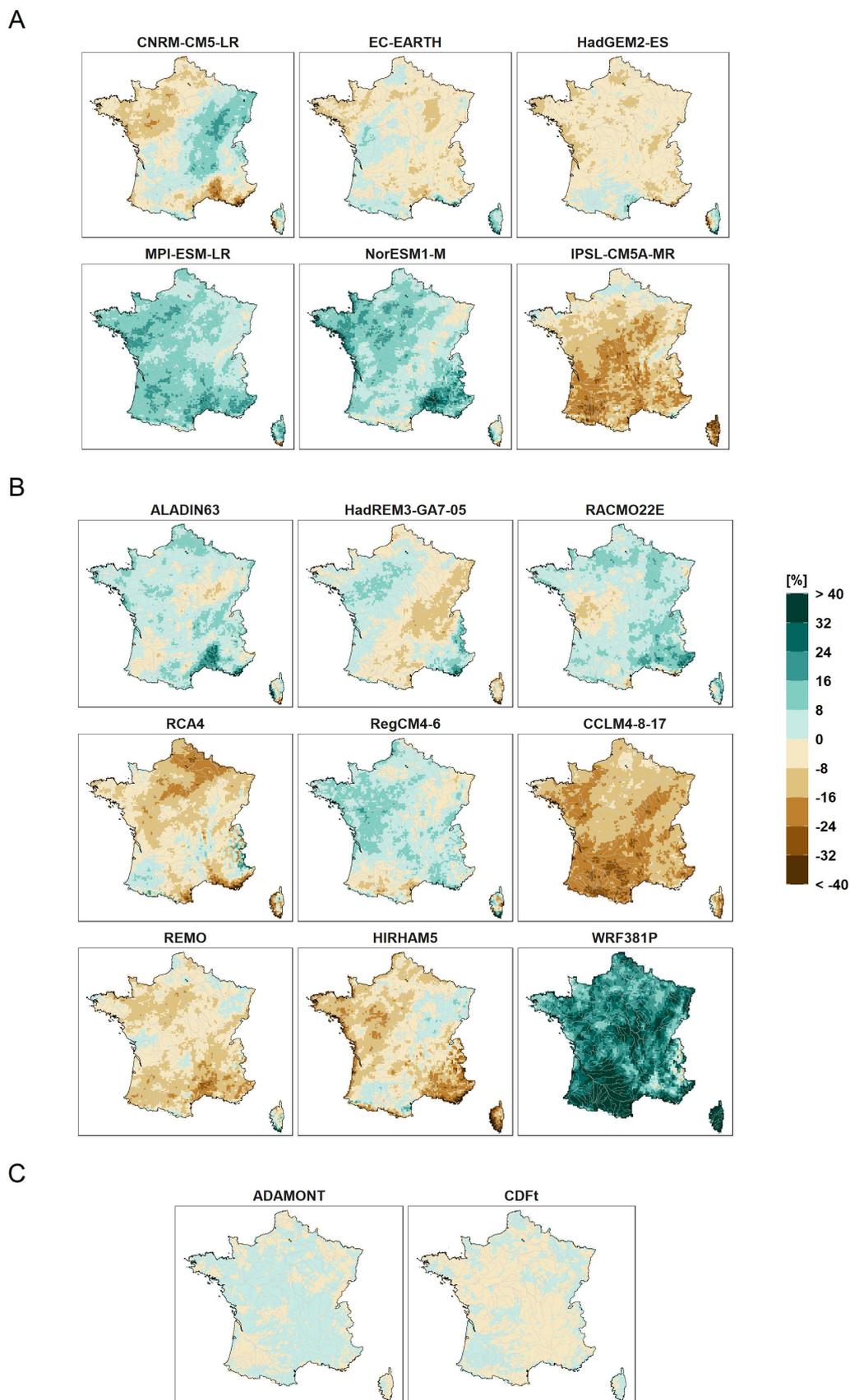


FIGURE 10 : **Cumul des précipitations estivales. Effets principaux des modèles pour les changements 2085.**
 (A) GCMs. (B) RCMs. (C) BCs. La somme des effets pour une catégorie de modèles est nulle.

4.4 Cumul des précipitations hivernales

Changements projetés pour 2085, Figure 11A : Contrairement aux changements projetés pour l'été, les changements de précipitations projetés pour l'hiver sont globalement à la hausse. Avec le scénario RCP8.5, la hausse projetée intermédiaire est supérieure à 20% sur la moitié nord de la France. La hausse correspondante pour les projections hautes (quantile 95%) est d'environ 50% sur la France (jusqu'à 75% pour certaines régions).

Dispersion des projections, Figure 11A : Mise à part dans le Sud, et surtout pour le RCP8.5, les projections s'accordent sur le signe du changement puisque les projections basses indiquent également une légère hausse. La dispersion entre les chaînes peut être importante cependant, couvrant par exemple dans le Sud-Est un intervalle de (+0%, +50%) pour le RCP2.6 ou de (-20, +20%) dans le Sud-Ouest pour le scénario RCP8.5.

Incertitude totale (sans la variabilité interne), Figure 11B : Comme pour les précipitations estivales, la dispersion entre les chaînes de simulation est plus importante dans le sud-est de la France, avec un écart moyen de l'ordre de 20%.

Variabilité interne, Figure 11C : Comme en été, elle est plus importante sur la zone méditerranéenne et dans la vallée du Rhône pour cet indicateur, et plus importante que la variabilité entre les chaînes de simulation (Fig. 11B).

Sources d'incertitude, Figure 11D : Contrairement aux précipitations estivales, la dispersion entre les projections est surtout portée par les GCMs sauf pour les zones montagneuses et le pourtour méditerranéen où elles sont beaucoup portées par les RCMs. La variabilité résiduelle est une seconde source d'incertitude importante, surtout dans le sud-ouest de la France. Une bonne part de la dispersion entre les réponses climatiques en changement ne peut donc pas être expliquée par la dispersion des effets principaux.

Effets principaux des modèles, Figure 12A-C :

- GCMs : A l'exception de IPSL-CM5A-MR, qui projette une augmentation nettement plus importante que les autres GCMs sur toute la France, l'effet principal des autres GCMs varie souvent fortement d'une région à l'autre. EC-EARTH projette par exemple une augmentation moindre sur une grande moitié nord, NorESM1-M sur une frange sud/sud-est.
- RCMs : Sur les zones montagneuses, l'incertitude RCM est surtout issue des RCMs RACMO22E, RCA4, RegCM4-6 (augmentation moindre) et HIRHAM5, WRF381P (augmentation accrue). Dans le Sud-Est, les simulations contrastées sont REMO, HIRHAM5 (augmentation moindre) et RegCM4-6 (augmentation accrue).
- BCs : Les effets des méthodes de correction de biais sont modérés mais plus importants que sur les précipitations estivales. Les deux méthodes ont des effets qui s'inversent dans les Alpes.

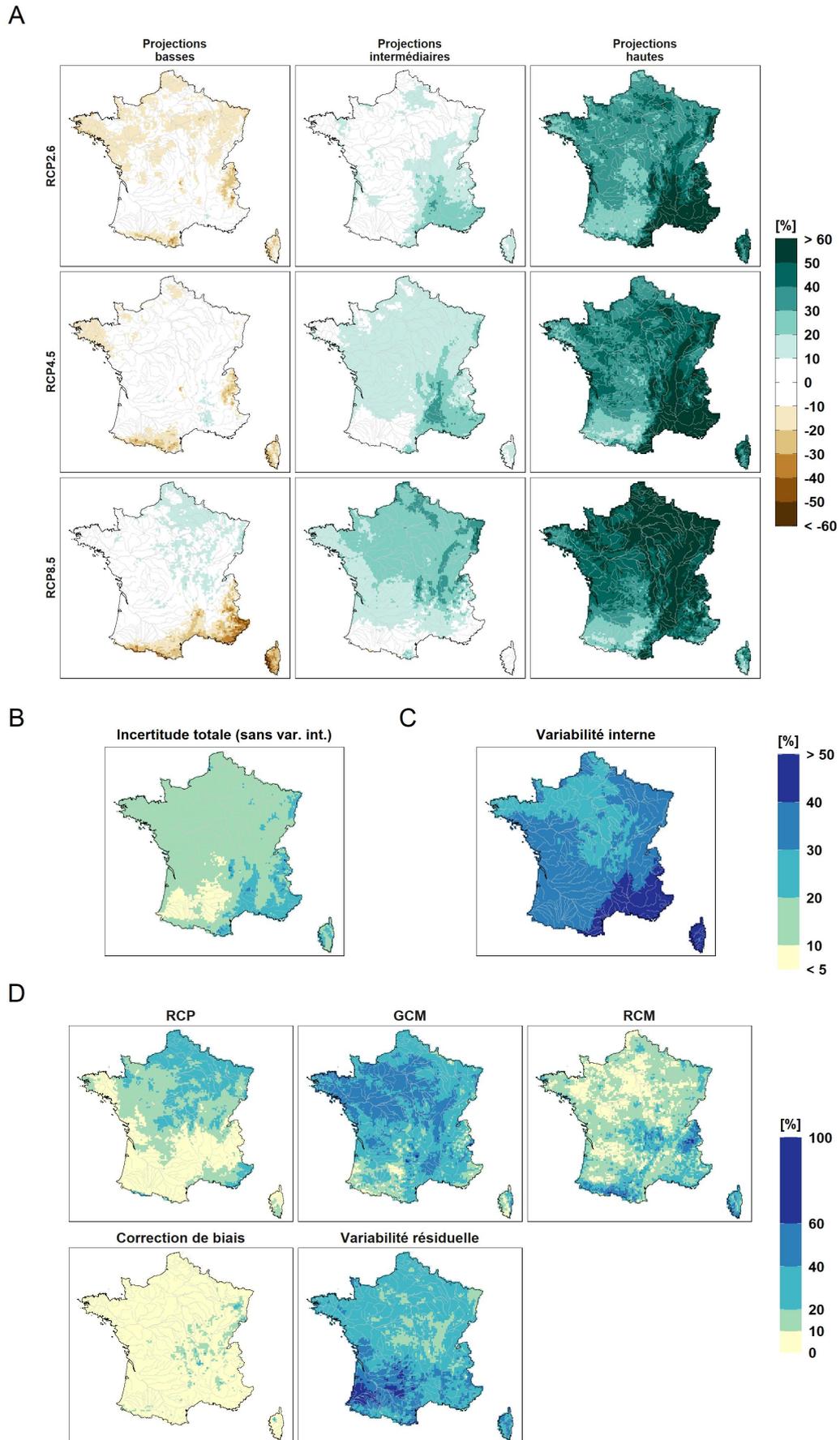


FIGURE 11 : Cumul des précipitations hivernales. Changements relatifs projetés pour 2085.

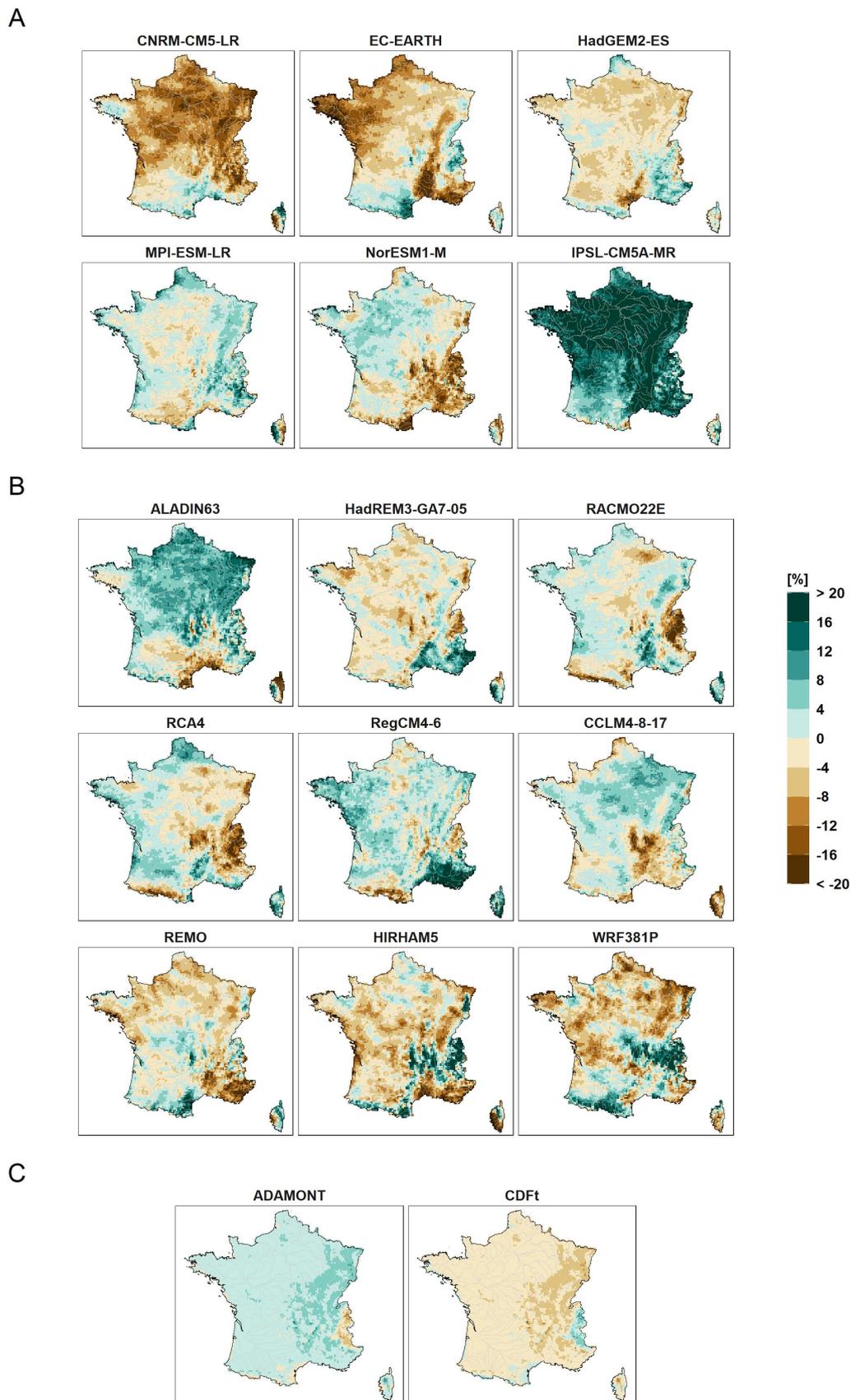


FIGURE 12 : **Cumul des précipitations hivernales. Effets principaux des modèles pour les changements 2085.** (A) GCMs. (B) RCMs. (C) BCs. La somme des effets pour une catégorie de modèles est nulle.

4.5 Evapotranspiration de référence estivale

Les changements projetés pour l'ET0 estivale en fin de siècle sont très cohérents avec les réchauffements projetés pour cette période.

Changements projetés pour 2085, Figure 13A : Pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5, les changements relatifs moyens projetés pour l'ET0 estivale sont à la hausse en fin de siècle. Ils sont proches de 0 pour le RCP2.6. Pour le RCP8.5, les hausses moyennes varient dans un intervalle [+20%, +30%] sur la majeure partie de la France.

Dispersion des projections, Figure 13A : De même que pour les températures estivales, l'accord entre les modèles sur le signe des changements est important, sur tout le territoire. Les changements projetés peuvent différer significativement selon les chaînes. Pour le scénario RCP8.5, ils varient selon la région de [+5%, +20%] pour les projections basses à [+30%, +50%] pour les projections hautes.

Incertitude totale (sans la variabilité interne), Figure 13B : L'incertitude liée à la dispersion entre les réponses climatiques en changement est assez homogène et de l'ordre de [10%, 20%] sur la France.

Variabilité interne, Figure 13C : La variabilité interne est du même ordre de grandeur, mais est plus importante dans certaines régions, en particulier dans le Nord.

Sources d'incertitude, Figure 13D : Comme pour les températures, la contribution principale des incertitudes de l'ET0 estivale est liée au choix du scénario d'émission RCP. Une part importante est également due aux RCMs (entre 20% et 40%).

Effets principaux des modèles, Figure 14A-C : Les effets principaux des modèles pour les changements d'ET0 estivale sont très cohérents avec leurs effets principaux pour les changements de température estivale (Figure 6A-C) : les modèles qui réchauffent le plus sont ceux qui projettent les plus fortes augmentations d'ET0 :

- GCMs : HADGEM2-ES conduit à l'augmentation d'ET0 la plus forte, MPI-ESM-LR conduit à l'augmentation la plus faible.
- RCMs : HadREM3-GA7-05 conduit à l'augmentation d'ET0 la plus forte (effet entre +8% et +16%), WRF381P à l'augmentation la moins forte (effet entre -8% et -16%).
- BCs : effets principaux négligeables.

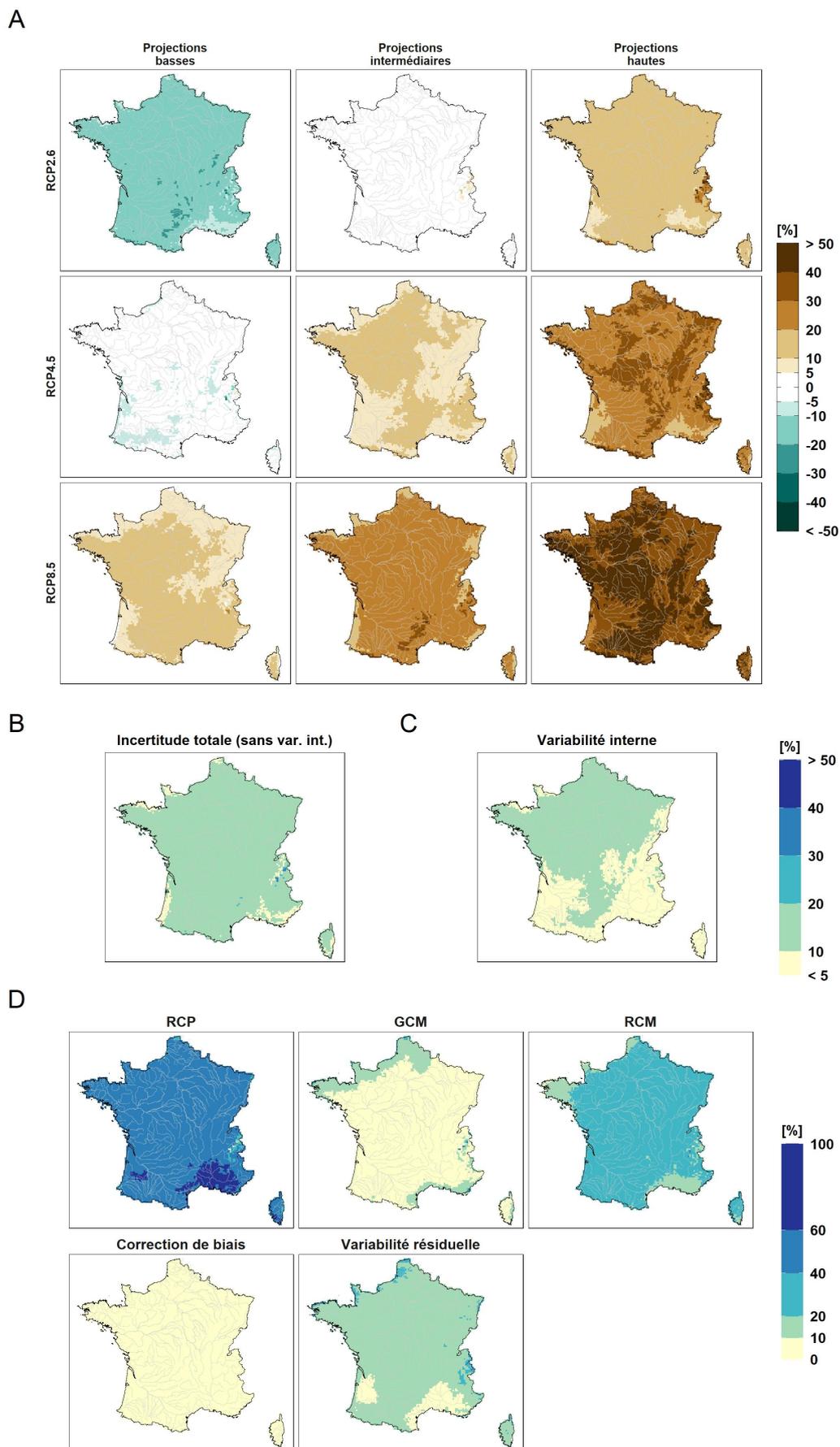


FIGURE 13 : Cumul d'ET0 estivale. Changements relatifs projetés pour 2085.

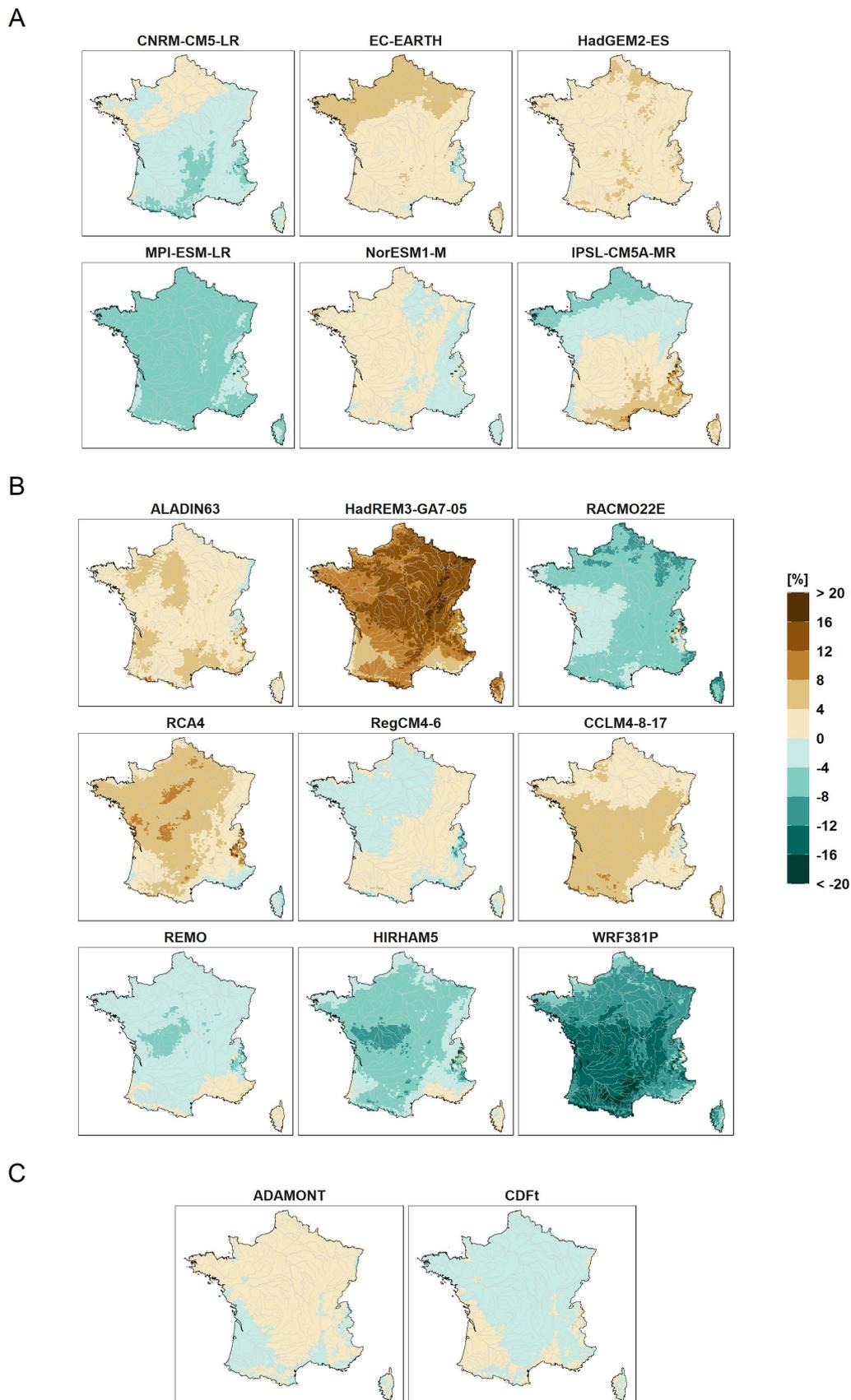


FIGURE 14 : **Cumul d'ET0 estivale. Effets principaux des modèles pour les changements 2085.** (A) GCMs. (B) RCMs. (C) BCs. La somme des effets pour une catégorie de modèles est nulle.

4.6 Evapotranspiration de référence hivernale

Changements projetés pour 2085, Figure 15A : Comme pour l'été, l'ET0 hivernale projetée pour 2085 augmente par rapport à l'ET0 de la période de référence. L'augmentation moyenne projetée est similaire à celle projetée pour l'été, excepté une augmentation légèrement moindre sur l'ouest de la France avec le RCP8.5.

Dispersion des projections, 15A : La dispersion est de nouveau importante, elle couvre la plage (+10%, +35%) pour le RCP8.5 (moyenne France).

Incertitude totale et variabilité interne, Figure 15B-C : L'incertitude totale liée à la dispersion entre les chaînes et la variabilité interne varie environ entre 10% et 20%. La dispersion entre les chaînes est plus importante dans le nord de la France.

Sources d'incertitude, Figure 15D : De nouveau, la contribution la plus importante à l'incertitude totale de l'ET0 est liée aux scénarios RCP. Elle est suivie par l'incertitude RCM, qui est d'ailleurs plus importante que l'incertitude RCP dans l'Ouest.

Effets principaux des modèles, Figure 16A-C : Les effets principaux des modèles pour les changements d'ET0 hivernale sont très cohérents avec leurs effets principaux pour les changements de température hivernale (Figure 8A-C). Les modèles qui réchauffent le plus sont ceux qui projettent des plus fortes augmentations d'ET0. C'est particulièrement visible pour les RCMs, mais aussi, dans une moindre mesure pour les GCMs.

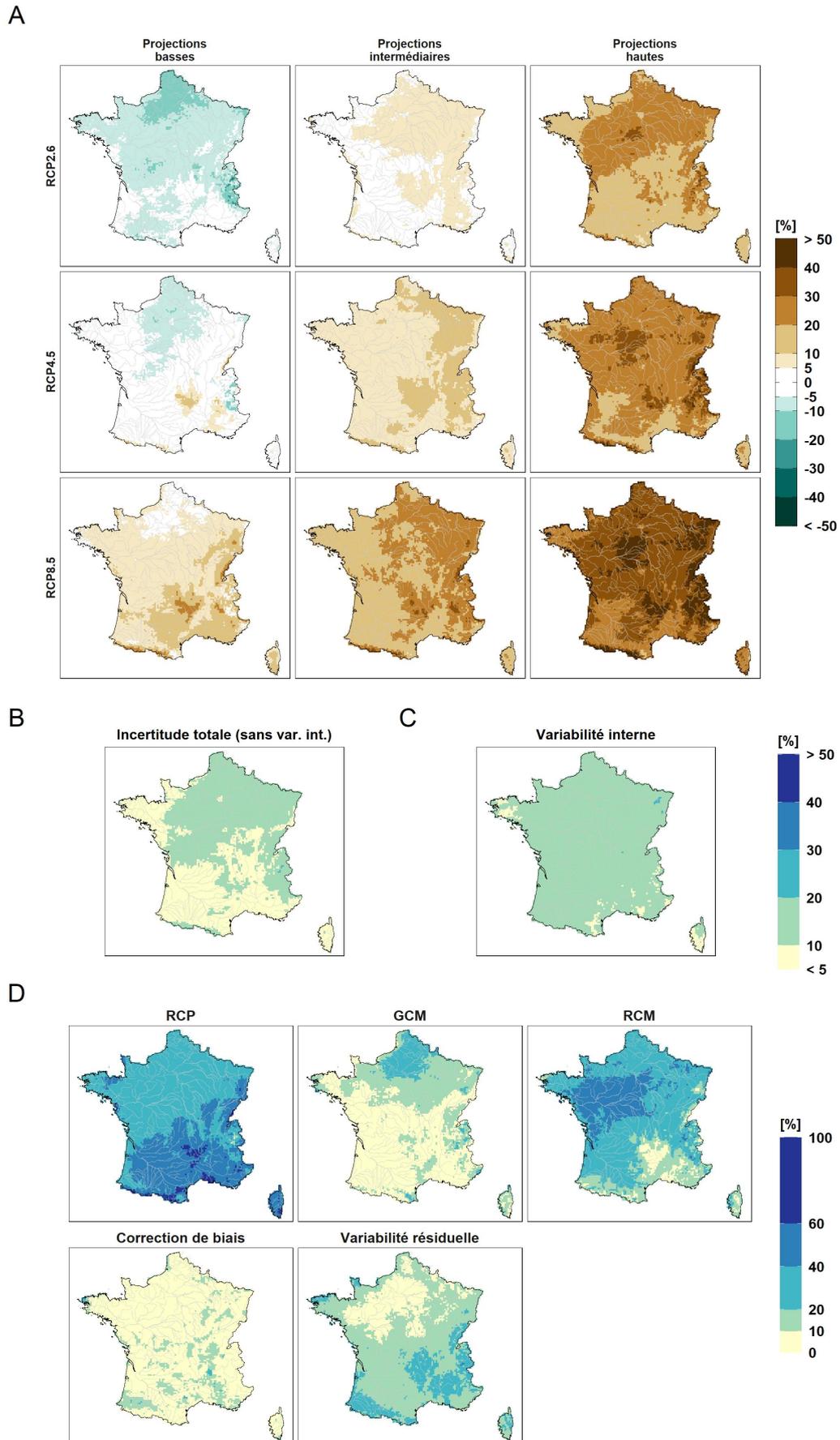


FIGURE 15 : Cumul d'ET0 hivernale. Changements relatifs projetés pour 2085.

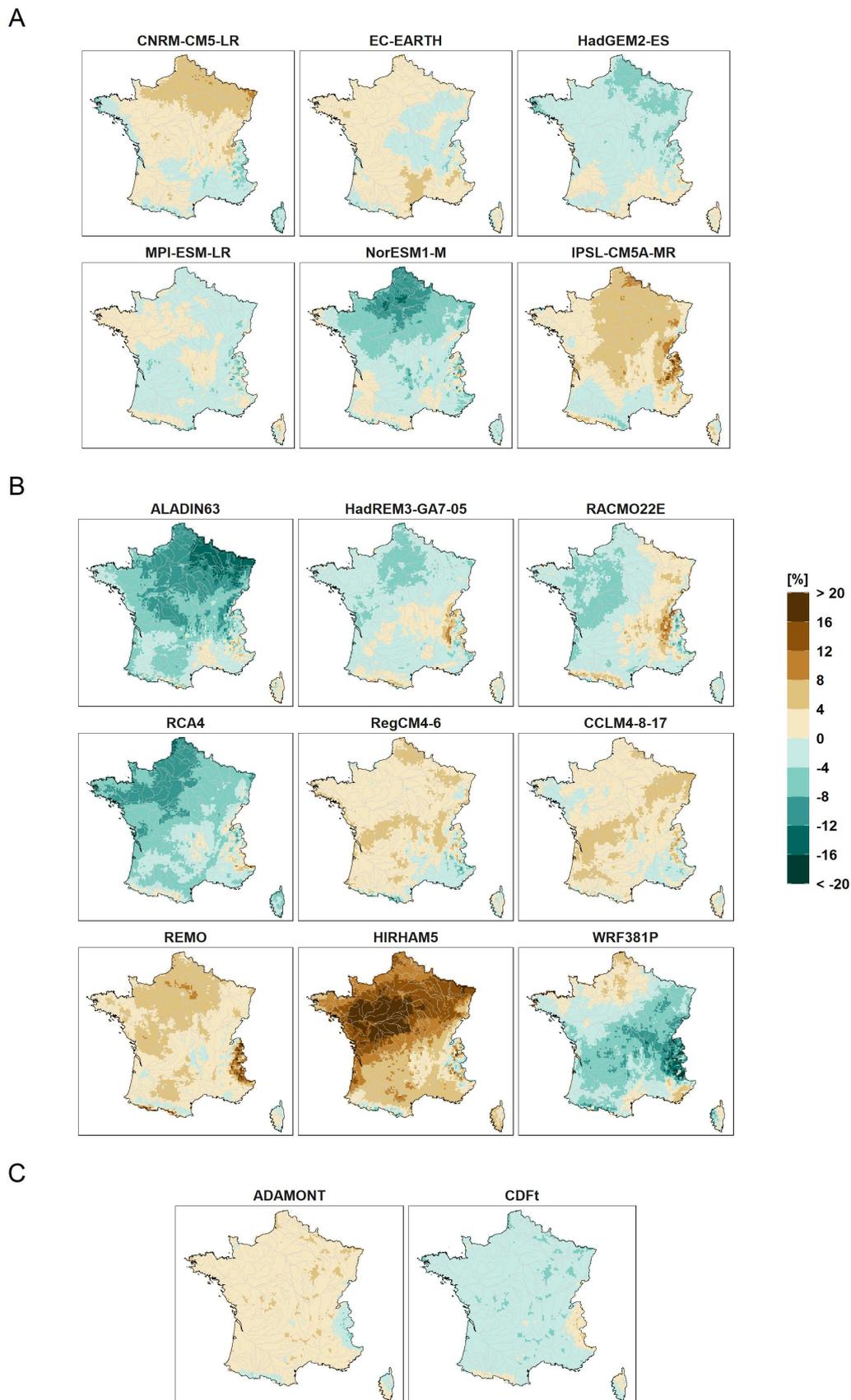


FIGURE 16 : **Cumul d'ET0 hivernale. Effets principaux des modèles pour les changements 2085.** (A) GCMs. (B) RCMs. (C) BCs. La somme des effets pour une catégorie de modèles est nulle.

4.7 Précipitation quotidienne maximale annuelle

La précipitation quotidienne maximale annuelle est un indicateur qui permet d'appréhender les tendances des précipitations intenses. Le rapport d'Explore2 dédié à l'analyse des extrêmes hydroclimatiques (TRAMBLAY *et al.*, 2024) présente des analyses plus détaillées de ces tendances, et pour des fréquences plus rares (périodes de retour 2 ans et 20 ans).

Changements projetés pour 2085, Figure 17A : Les projections intermédiaires pour la précipitation quotidienne maximale annuelle indiquent une légère hausse sur l'ensemble de la France. Pour le scénario RCP8.5, les changements projetés sont légèrement plus forts dans le nord de la France. Ils sont beaucoup plus homogènes dans l'espace pour les autres scénarios. Dans tous les cas, la signature spatiale n'est pas très marquée et les cartes sont assez pixelisées. Cela traduit le fait que l'estimation des réponses climatiques est difficile pour cet indicateur, en raison d'une variabilité interne importante.

Dispersion des projections, Figure 19A : Les écarts entre les réponses climatiques des différentes chaînes sont importants. Pour les trois scénarios, les projections basses sont proches de zéro ou légèrement négatives (jusqu'à -30% dans certaines régions) et les projections hautes autour de +50% (en moyenne sur la France).

Incertitude totale (sans la variabilité interne), Figure 17B : L'incertitude liée à la variabilité entre les réponses climatiques en changement varie entre 10% et 30% sur la France.

Variabilité interne, Figure 17C : La variabilité interne est beaucoup plus grande que la variabilité entre les réponses climatiques en changement, et dépasse généralement 40%. Cette forte variabilité interne peut expliquer en partie la faible cohérence spatiale de toutes les cartes présentées dans les figures 17 et 18, car le signal des réponses climatiques est plus difficile à estimer (faible rapport signal/bruit).

Sources d'incertitude, Figure 17D : La variabilité résiduelle est la source d'incertitude la plus importante. Cela souligne de nouveau la difficulté à estimer de façon robuste les réponses climatiques, et par suite les effets des différents scénarios et modèles climatiques. On peut cependant noter des contributions souvent supérieures à 20% des incertitudes GCMs et RCMs.

Effets principaux des modèles, Figure 18A-C : Les effets des différents GCMs et RCMs atteignent souvent $\pm 30\%$ mais varient beaucoup d'une région à une autre. On peut cependant noter des effets globalement positifs du RCM HIRHAM5 et négatifs du RCM WRF381P dans le nord de la France.

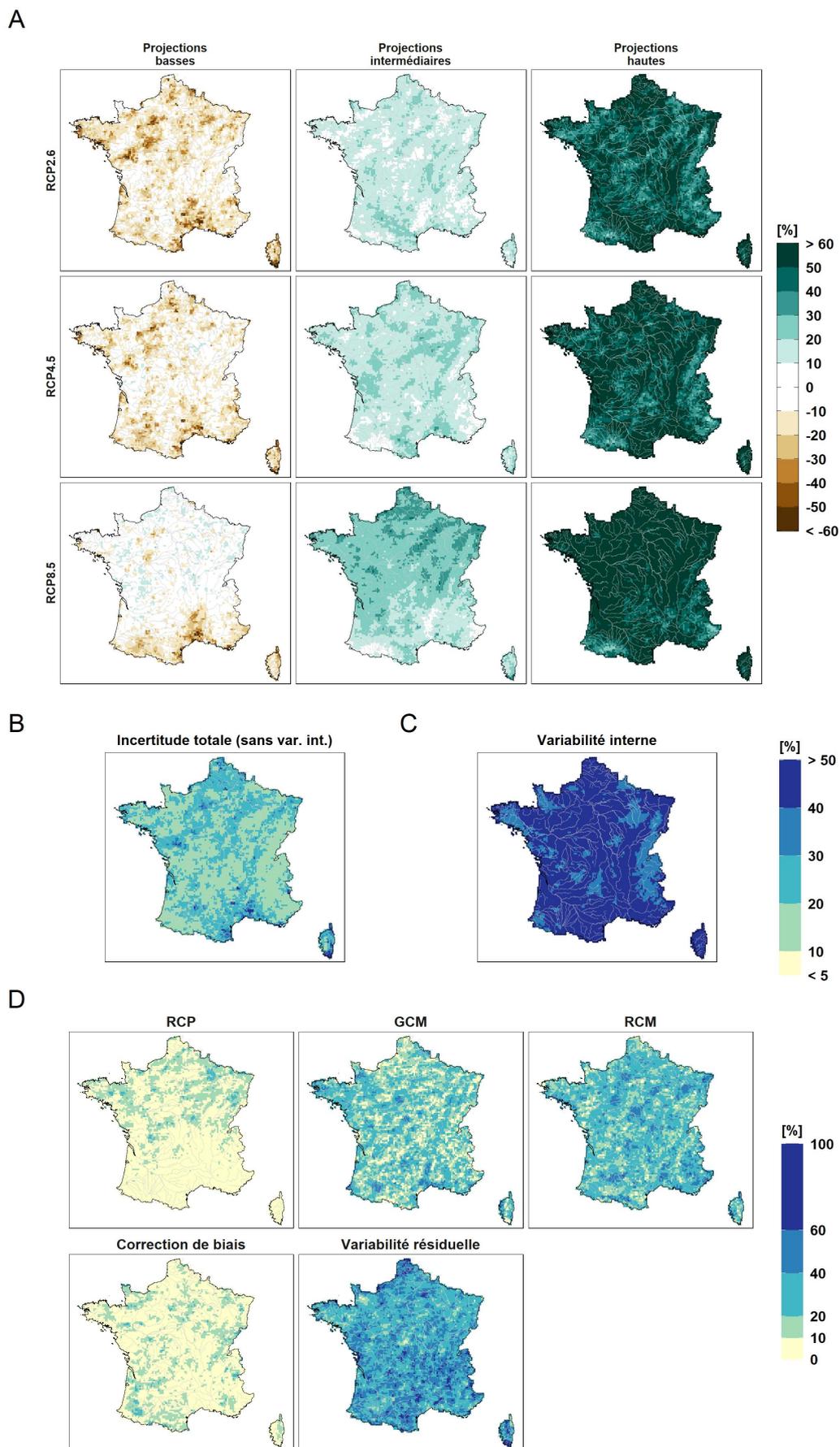


FIGURE 17 : Précipitation quotidienne maximale annuelle. Changements relatifs projetés pour 2085.

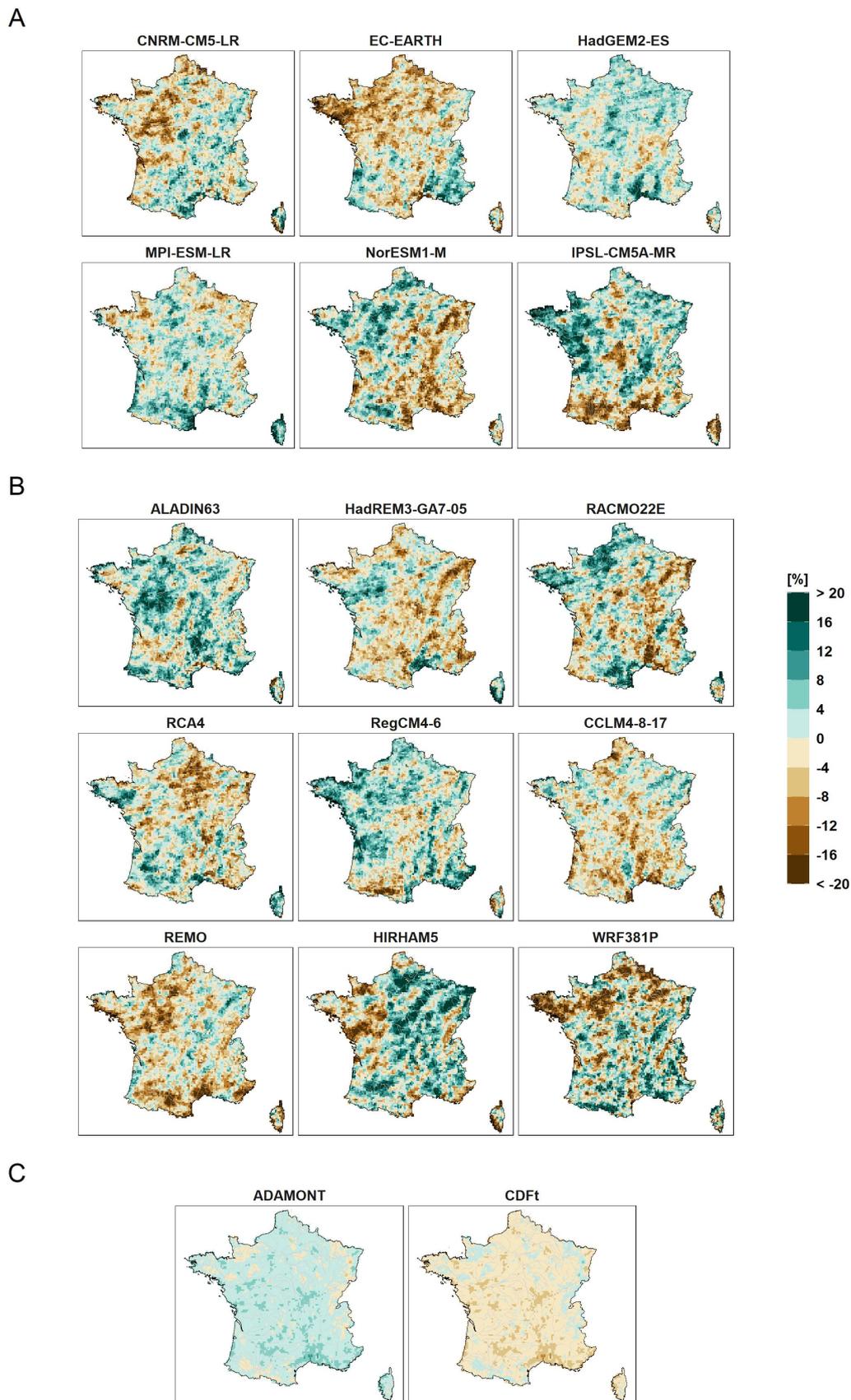


FIGURE 18 : Précipitation quotidienne maximale annuelle. Effets principaux des modèles pour 2085. (A) GCMs. (B) RCMs. (C) BCs. La somme des effets pour une catégorie de modèles est nulle.

4.8 Précipitations solides de novembre à avril

Les précipitations solides, c'est-à-dire sous forme de neige, sont définies sur la saison hivernale étendue (de novembre à avril), uniquement pour les pixels situés au-dessus de 1000 m. Les changements attendus sont globalement bien documentés et compris dans la littérature, voir par exemple l'étude de CASTEBRUNET *et al.*, 2014 dans les Alpes françaises. À basse altitude, à court terme et à la fin du siècle, les projections de chutes de neige indiquent généralement une diminution, pour tous les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. À plus haute altitude (par exemple à 3000 m dans les Alpes françaises), lorsque l'augmentation de la température est insuffisante pour affecter la partition pluie/neige des précipitations totales, l'augmentation totale des précipitations hivernales peut entraîner une augmentation des chutes de neige (IPCC, 2019).

Changements projetés pour 2085, Figure 19A : Les tendances projetées pour les précipitations solides en hiver sont logiquement à la baisse. La diminution moyenne atteint jusqu'à -60% sur les Pyrénées, le sud des Alpes, l'ouest du Massif central avec le scénario RCP8.5. Les diminutions sont moins importantes pour les Alpes internes, dans des régions où les altitudes sont élevées (> 3000 m) et où le réchauffement projeté ne conduit pas aussi souvent à des températures positives en hiver.

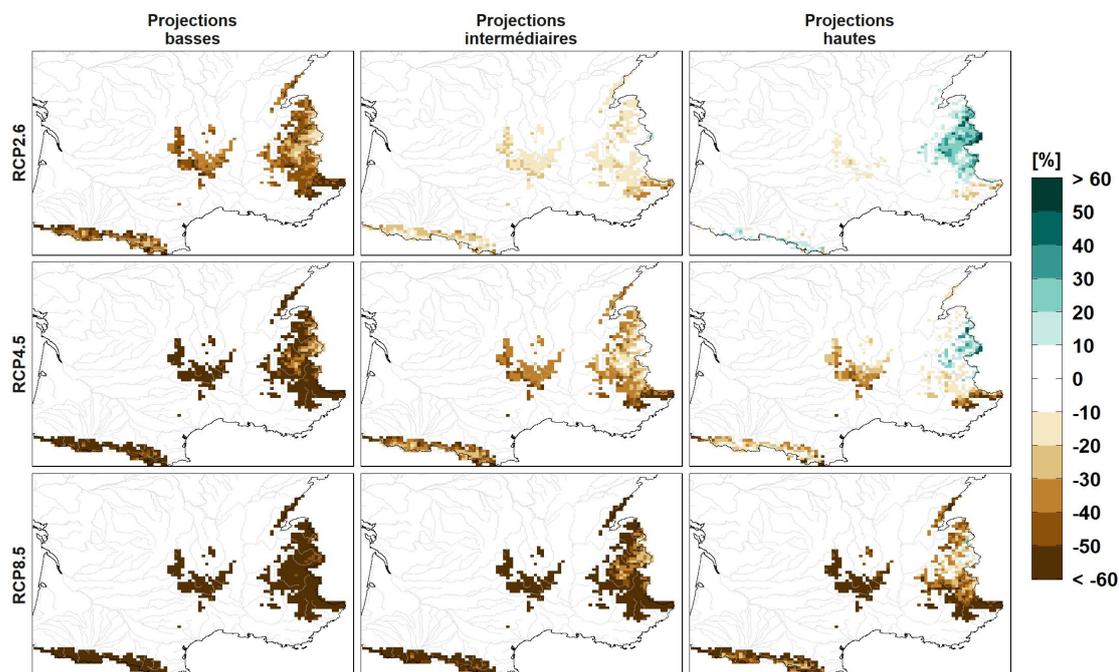
Dispersion des projections, Figure 19A : Pour le RCP8.5, les diminutions projetées les plus importantes avec le RCP8.5 (projections basses) indiquent une disparition presque complète des chutes de neige pour les Pyrénées, le Massif central, les pré-Alpes et les Alpes du Sud. A contrario, certaines chaînes de simulation (projections hautes) conduisent à des diminutions plutôt modérées dans les Alpes du Nord [-20%, 0%] et plus sévères dans les autres régions montagneuses (jusqu'à -60% dans le Massif central, les Pyrénées).

Incertitude totale (sans la variabilité interne), Figure 19B : L'incertitude liée à la dispersion entre les réponses climatiques en changement est de l'ordre de 20% sur les différents massifs français. Cette variabilité est plus faible sur le Massif central et les Alpes internes.

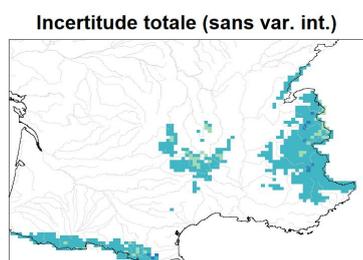
Variabilité interne, Figure 19C : La variabilité interne est du même ordre de grandeur que la variabilité entre les réponses climatiques en changement (environ 20% sur le Massif central, la majeure partie des Alpes) mais est nettement plus forte dans le sud des Alpes.

Sources d'incertitude, Figure 19D : La source principale d'incertitudes associée à ces changements est liée aux scénarios RCPs comme pour les changements des températures. On voit cependant une dispersion importante entre les RCMs, notamment en conséquence d'un désaccord entre les RCMs RCA4 (effet négatif jusqu'à -24%) et WRF381P (effet positif jusqu'à +30%), voir Figure 20B.

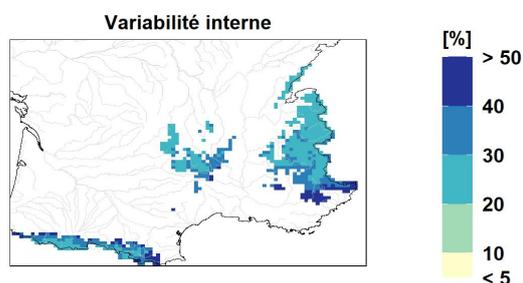
A



B



C



D

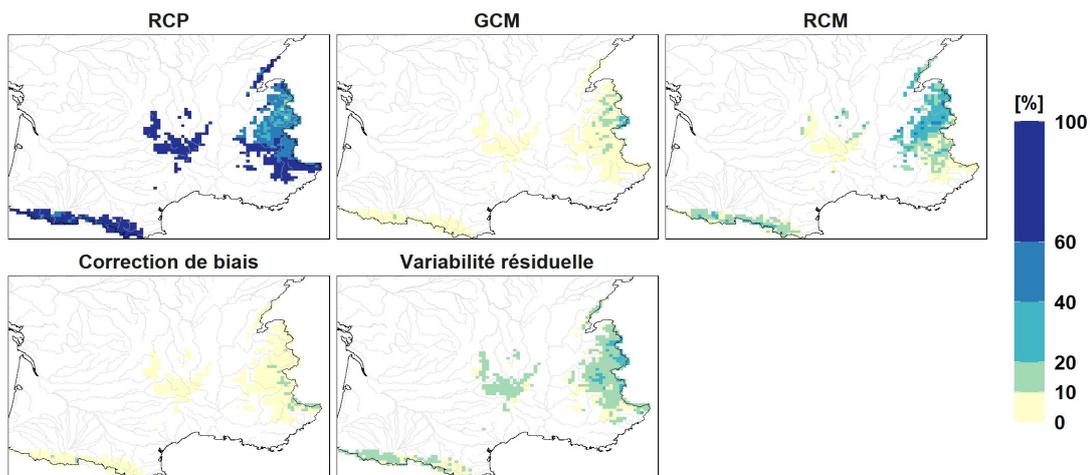


FIGURE 19 : Cumul de précipitations solides de novembre à avril. Changements relatifs projetés pour 2085.

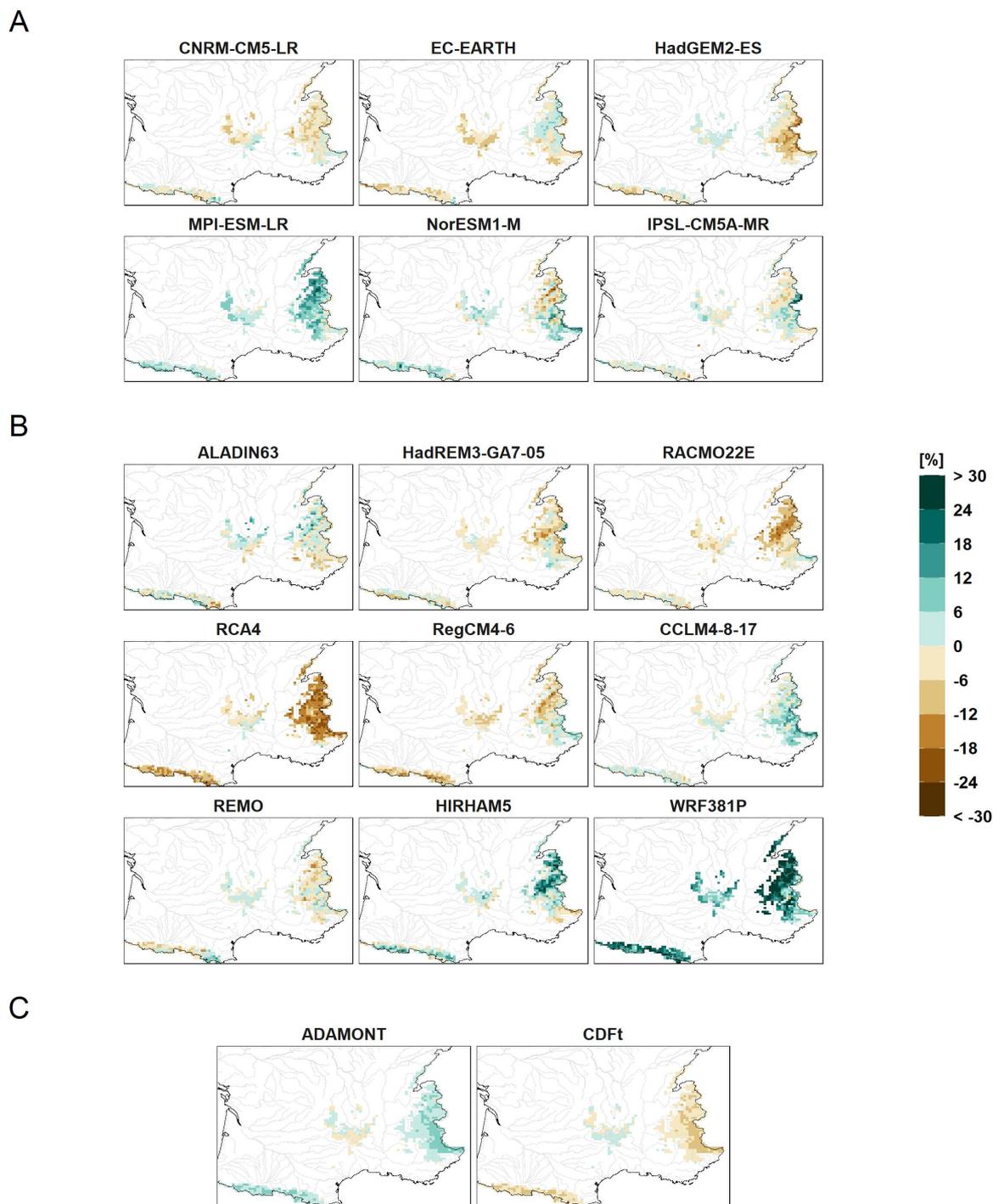


FIGURE 20 : **Cumul de précipitations solides de novembre à avril. Effets principaux des modèles pour 2085.** (A) GCMs. (B) RCMs. (C) BCs. La somme des effets pour une catégorie de modèles est nulle.

4.9 Focus chronologique sur deux régions contrastées

Les résultats des analyses QUALYPSO peuvent être présentés pour une région particulière sous forme chronologique. À titre d'illustration, les Figures 21 et 22 présentent les résultats des changements relatifs projetés pour les températures moyennes et les précipitations totales en hiver et en été, pour les bassins Artois-Picardie et Adour-Garonne, respectivement (grands bassins hydrographiques correspondants aux agences de l'eau respectives). Les figures pour les bassins Loire-Bretagne, Rhin-Meuse, Seine-Normandie et Rhône-Méditerranée-Corse sont également fournies dans la section S3 du supplément.

Les résultats sont présentés via un même ensemble de figures. Elles présentent l'évolution de différentes variables ou grandeurs sur la période considérée :

- **Graphiques A** : changements projetés pour chacun des trois scénarios d'émission RCP (un scénario par graphique). Chaque graphique présente 1) la moyenne d'ensemble projetée sur la période couverte par les simulations, 2) la bande d'incertitude "Modèle", représentant la dispersion entre les réponses climatiques des différentes chaînes de simulation de l'ensemble, 3) la bande couverte par les projections brutes, figurant les variations interannuelles possibles de la variable considérée dues à la variabilité interne du climat.
- **Graphique B** : accord sur le signe de changement. Il est indiqué sous forme chronologique (une valeur par décennie) pour chacun des trois scénarios d'émission. Une triangle orienté vers le haut (resp. vers le bas) indique que 80% des modèles sont en accord sur un changement positif (resp. négatif). Un cercle indique les autres cas.
- **Graphique C** : sources d'incertitude. Le graphique présente la partition de variance, c'est-à-dire la contribution relative des différentes sources d'incertitude à l'incertitude totale (y compris la variabilité interne, en % de la variance totale).
- **Graphiques D-F** : effets principaux estimés pour les 6 GCMs, les 9 RCMs et les 2 méthodes de correction de biais considérés dans l'ensemble.

4.9.1 Bassin Artois-Picardie

Changements projetés, Figure 21A : Les changements projetés moyens sont clairement positifs pour les températures moyennes saisonnières et pour les précipitations hivernales, particulièrement avec le scénario RCP8.5. Ils sont plus faibles pour les précipitations estivales, en particulier lorsqu'ils sont mis en regard des incertitudes sur les réponses climatiques.

Accord sur le signe des changements, Figure 21B : Quelle que soit la décennie future considérée, au moins 80% des modèles s'accordent sur un changement positif pour les températures moyennes saisonnières et pour les précipitations hivernales, pour tous les scénarios. Les réponses climatiques des différentes simulations s'accordent aussi sur une diminution des précipitations estivales, pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. On peut noter que pour le RCP4.5, l'accord sur les réponses climatiques (estimé sur la base des simulations disponibles) est très net, alors que la plage couverte par les réponses climatiques (estimé avec QUALYPSO à partir de l'ensemble reconstitué) est proche de zéro. Ceci illustre les différences possibles lorsqu'on considère la dispersion des simulations disponibles ou la dispersion reconstituée à partir des analyses QUALYPSO (discussion en annexe A.6).

Sources d'incertitude, Fig. 21C : Pour les températures saisonnières, on remarque la part croissante de l'incertitude scénario (en violet) tout au long du siècle, la seconde contribution importante étant liée aux GCMs (en orange) surtout en été. Pour les précipitations saisonnières, on remarque principalement l'importante de la variabilité inter-annuelle (naturelle, en gris), suivi par celle portée par la dispersion entre les RCMs en été.

Effets principaux des modèles, Figure 21D-F : Pour tous les modèles, l'effet principal du modèle a tendance à augmenter avec le temps. La dispersion entre les réponses climatiques des différentes chaînes augmente donc logiquement aussi (augmentation de la largeur des bandes d'incertitude sur la Fig. 21B). La dispersion entre les effets GCMs est plus importante que celle entre les RCMs, excepté pour les précipitations estivales. On retrouve certains effets principaux marqués cités précédemment :

- GCMs : le GCM HadGEM2-ES réchauffe plus que les autres GCMs en été, MPI-ESM-LR, IPSL-CM5A-MR et CNRM-CM5-LR réchauffent moins dans le nord de la France. Pour les précipitations hivernales, IPSL-CM5A-MR contribue à une augmentation plus forte, CNRM-CM5-LR et EC-Earth à une augmentation plus faible.
- RCMs : les modèles présentant les effets principaux les plus marqués concernant les précipitations saisonnières. En été, on retrouve l'effet "humidifiant" de WRF381P (sur toute la France) et l'effet "asséchant" de RCA4 dans le nord de la France illustré à la Figure 10.
- BCs : effets négligeables.

4.9.2 Bassin Adour-Garonne

Changements projetés, Figure 22A : Les changements projetés sont similaires à ceux obtenus pour le bassin Artois-Picardie. Les diminutions des précipitations estivales sont cependant plus marquées.

Accord sur le signe des changements, Figure 22A : Pour toutes les décennies futures, la grande majorité des chaînes de simulation s'accordent sur un réchauffement en été et en hiver, sur le signe négatif (resp. positif) des changements de précipitations estivales (resp. hivernales) pour les RCP4.5 et RCP8.5. Il y a également un accord sur la hausse des précipitations hivernales pour le RCP2.6.

Sources d'incertitude, Fig. 22C : Les sources d'incertitude dominantes sont les mêmes que celles du bassin Artois-Picardie, hormis quelques petites différences. Par exemple, concernant les précipitations estivales, la contribution de l'incertitude liée au scénario est plus importante pour ce bassin que pour le bassin Artois-Picardie.

Effets principaux des modèles, Figure 22D-F : On note surtout des effets importants des RCMs pour les précipitations estivales, dont deux s'écartent beaucoup de la moyenne d'ensemble : WRF381P (effet principal de +30%) et CCLM4-8-17 (effet principal de -20%), et d'un GCM pour les précipitations hivernales (IPSL-CM5A-MR, +10%). Les autres effets RCMs sont assez faibles et du même ordre de grandeur que les effets GCMs (<10 % en été et < 5% en hiver). Les effets liés à la méthode de correction des biais sont très faibles.

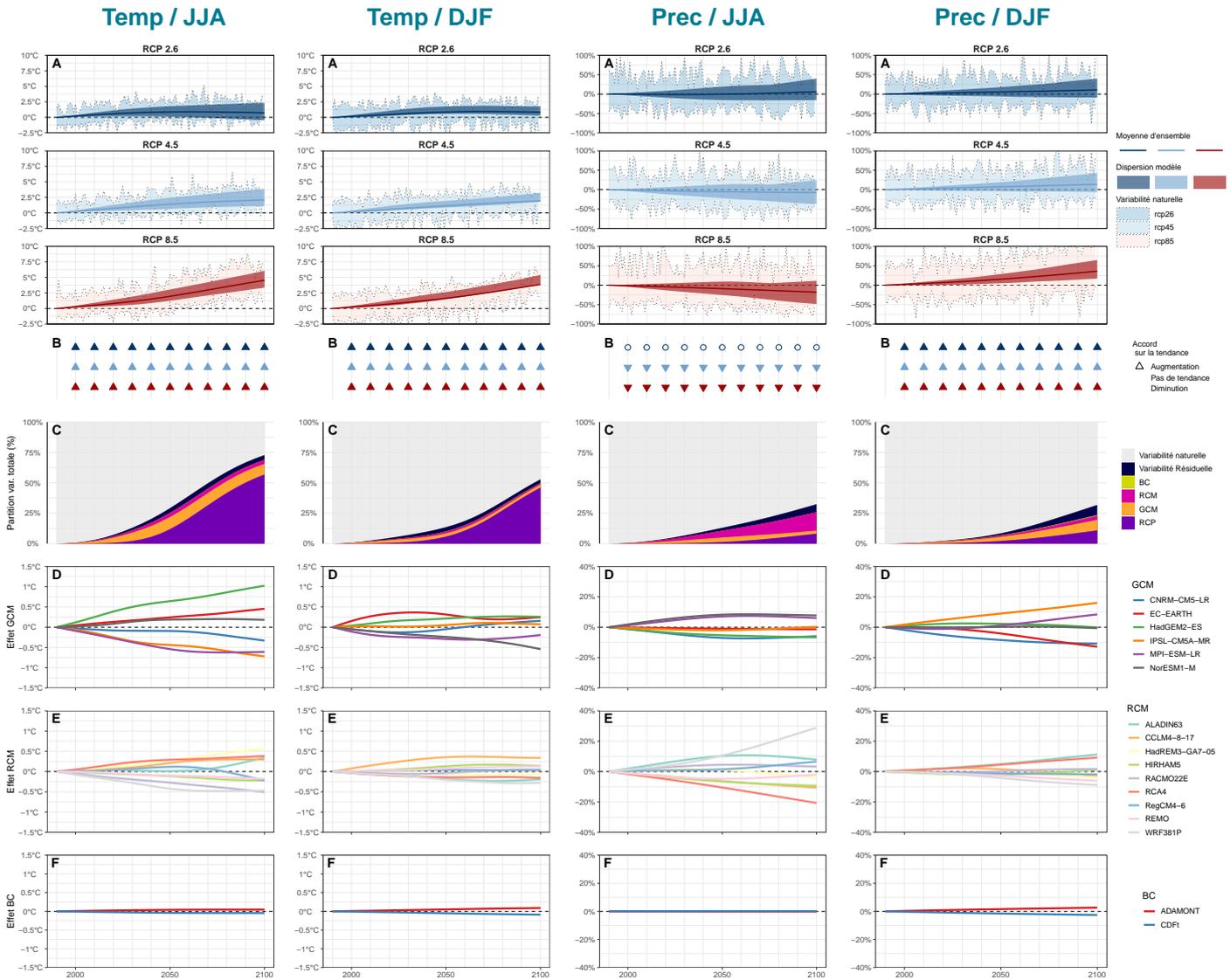


FIGURE 21 : Changements relatifs projetés des températures et précipitations saisonnières pour le bassin Artois-Picardie (<https://www.eau-artois-picardie.fr/lagence-de-leau/le-bassin-artois-picardie>). (A) Moyenne d'ensemble des changements (trait coloré), dispersion liée aux différentes réponses climatiques des modèles (bande colorée centrale), courbe enveloppe des fluctuations liées à la variabilité interne (zone pastel, minimum et maximum de l'ensemble initial, chaque année). (B) Accord entre les projections sur le signe du changement projeté. Triangle orienté vers le haut (resp. vers le bas) si plus de 80% des projections projettent un changement positif (resp. négatif). (C) Fraction de l'incertitude totale (en variance) expliquée par les incertitudes scénarios, GCM, RCM, BC, par la variabilité résiduelle et la variabilité interne. (D-F) Effets principaux des modèles pour chaque catégorie de modèle.

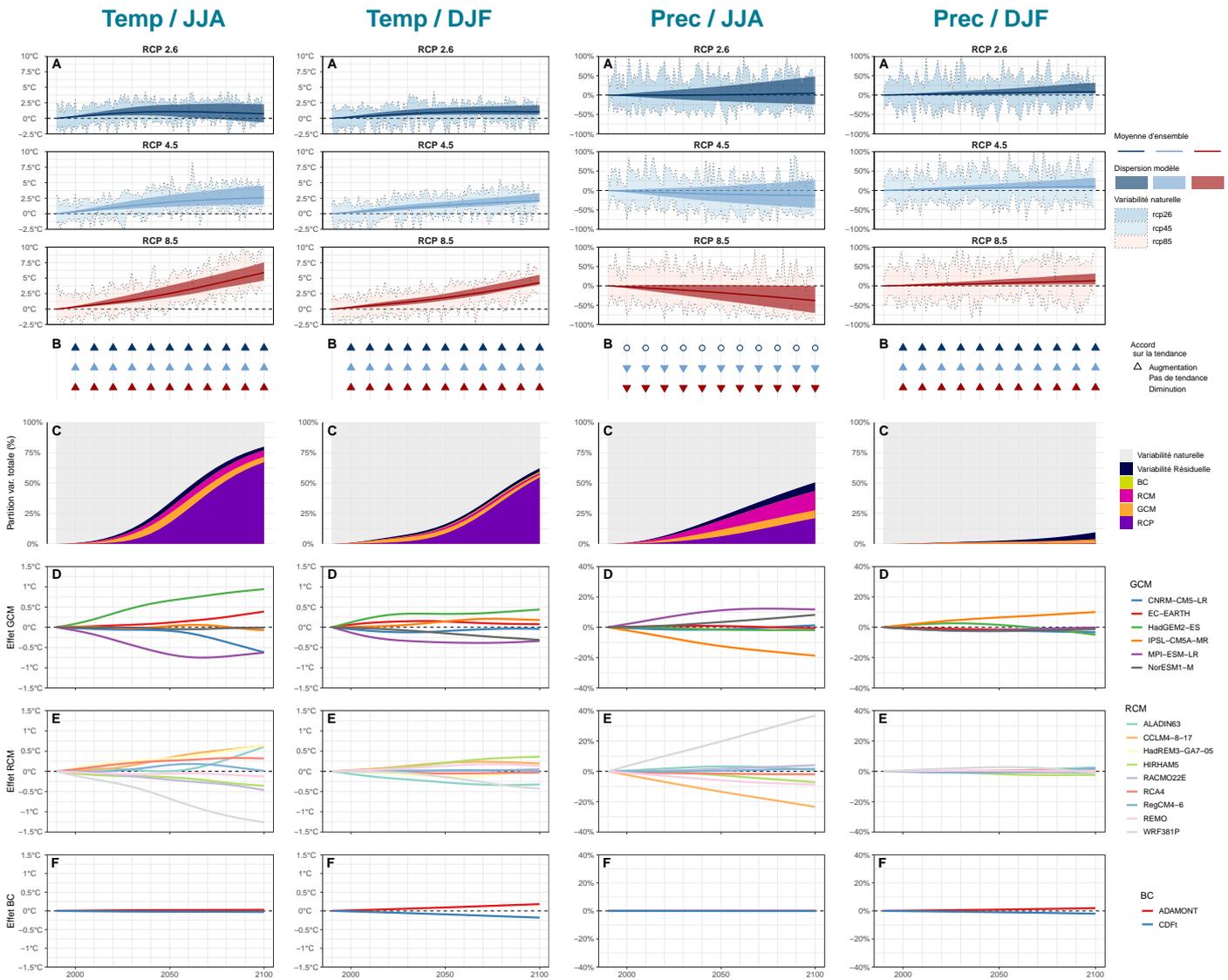


FIGURE 22 : Changements relatifs projetés des températures et précipitations saisonnières pour le territoire de l'agence de bassin Adour-Garonne.

5 Résultats hydrologie

Cette section présente les résultats issus de la méthode QUALYPSO lorsqu'elle est appliquée aux projections hydrologiques, plus particulièrement lorsqu'elle est appliquée à trois indicateurs hydrologiques :

- le débit annuel (QA),
- le débit journalier maximal annuel (QJXA) représentatif des hautes eaux,
- le débit mensuel minimal de chaque année (QMNA) représentatif des basses eaux.

Pour ces projections, la chaîne de modélisation est constituée de l'enchaînement des modèles GCM / RCM / BC / HM. Aux incertitudes GCM, RCM et BC s'ajoutent donc les incertitudes liées au modèle hydrologique (HM). Plusieurs HMs sont utilisés dans Explore2. Pour mémoire, ils sont tous forcés avec les mêmes chroniques de projections climatiques. Pour un scénario RCP et une chaîne GCM/RCM/BC donnés, les différences entre projections ne viennent donc que du HM. Dans la suite :

- Nous présentons d'abord les résultats "Fin de siècle" obtenus pour la France entière avec les modèles hydrologiques GRSD, SMASH, CTRIP et ORCHIDEE (Section 5.1).
- Pour illustrer de façon plus détaillée les incertitudes résultant de la modélisation hydrologique et en particulier les effets principaux des HMs, nous présentons ensuite les résultats pour le bassin Loire obtenus avec un ensemble de projections étendu, produit avec neuf modèles hydrologiques : CTRIP, EROS, GRSD, J2000, MORDOR-SD, MORDOR-TS, ORCHIDEE, SIM2 et SMASH (Section 5.2).
- Nous discutons une incertitude de modélisation liée aux effets physiologiques du CO₂ (section 5.3).
- Nous présentons ensuite une version synthétique des résultats obtenus avec les neuf HMs sous forme chronologique pour le bassin versant de la Loire à Digoin (section 5.4).

Les résultats sont présentés via le même ensemble de figures que celles présentées dans la section précédente pour les variables climatiques. Les effets "modèle" sont présentés pour les GCMs, les RCMs et les HMs.

La suite présente l'analyse QUALYPSO des projections hydrologiques obtenues avec la correction ADAMONT car :

1. tous les modèles hydrologiques ont produit des projections avec cette méthode, alors que plusieurs modèles (ORCHIDEE, SIM2, CTRIP) ont besoin de forçages météorologiques au pas de temps horaire et n'ont pas pu produire de simulations hydrologiques avec les projections corrigées avec la méthode CDF-t.
2. les résultats des analyses d'incertitude sur les variables climatiques montrent une incertitude liée à la méthode de correction de biais relativement faible en comparaison des autres sources d'incertitude.

5.1 France

Les représentations cartographiques suivantes sont présentées pour la France entière et concernent les stations pour lesquelles les modèles CTRIP, GRSD, SMASH et ORCHIDEE ont pu fournir des simulations (SAUQUET *et al.*, 2022a).

5.1.1 Débit annuel - QA

Les Figures 23 et 24 présentent tout d'abord les résultats pour les débits moyens annuels.

Changements projetés pour 2085, Figure 23A : Les projections intermédiaires (moyennes) indiquent des tendances projetées différentes selon le scénario. Pour le scénario RCP2.6, une tendance à la hausse est projetée sur toute la France, entre 0% et 30%. Pour le scénario RCP8.5, les tendances sont différentes pour les moitiés nord et sud de la France, avec des tendances légèrement à la hausse (souvent inférieure à 15%) pour la moitié nord, et à la baisse (jusqu'à -30%) pour la moitié sud. Le signe des tendances est cependant très variable selon les chaînes de modélisation, les projections basses indiquant presque toutes des diminutions (jusqu'à -75% dans le Sud-Est avec le RCP8.5) et les projections hautes des augmentations (jusqu'à +75% dans le Nord avec le RCP8.5). Excepté dans les Pyrénées et le sud des Alpes avec le RCP8.5

où la majorité de l'ensemble indique une tendance à la baisse, le signe des changements pour le débit annuel est donc incertain.

Incertitude totale (sans la variabilité interne), Figure 23B : L'incertitude totale, hors variabilité interne, est de l'ordre de 15% sur la majeure partie de la France, et est plus forte pour certaines stations dans le nord de la France, des Pyrénées et dans le Sud-Est.

Variabilité interne, Figure 23C : La variabilité interne est plus forte que l'incertitude totale hors variabilité interne, et dépasse le plus souvent 30%. Pour certaines stations, l'incertitude totale (avec variabilité interne) est très forte (points bleus foncés dans les volets B et C), notamment le long du pourtour méditerranéen.

Sources d'incertitude, Figure 23B : La source dominante varie spatialement. L'incertitude GCM est prépondérante (> 40%) dans le nord de la France, alors que l'incertitude RCM domine dans l'Est. La répartition des incertitudes est plus uniforme dans le Sud. L'incertitude RCP est très importante dans un grand tiers sud de la France, ce qui illustre l'importance des changements des températures et des pertes par évapotranspiration dans le bilan hydrologique annuel de cette région. On note également une contribution importante de la variabilité résiduelle sur cet indicateur (entre 20% et 40%), qui indique probablement des interactions importantes entre certaines composantes (scénario RCP/GCM, RCM/HM, etc.). En revanche, il est intéressant de noter que la contribution de l'incertitude liée au choix du modèle hydrologique a peu d'influence pour cet indicateur (hors région parisienne), ce qui signifie que la variabilité des changements projetés obtenue pour les différents modèles hydrologiques est faible en comparaison de celle liée aux RCPs, aux GCMs et aux RCMs.

Effets principaux des modèles, Figure 24A-C : Ces effets varient tous dans un intervalle [-30%,+30%], ce qui signifie que les projections peuvent diverger de la moyenne d'ensemble de 30% ponctuellement pour un modèle. Pour les effets GCMs/RCMs, on retrouve globalement les effets liés aux changements projetés de précipitations totales en été et en hiver (Figures 10 et 12).

- GCMs : Les effets GCMs mettent en opposition les modèles conduisant à des changements plus élevés que la moyenne pour la majeure partie de la France (IPSL-CM5A-MR, MPI-ESM-LR) et plus faibles que la moyenne, surtout dans le nord de la France (CNRM-CM5-LR, EC-EARTH, HadGEM2-ES). On peut noter des oppositions très fortes entre certains GCMs pour certaines stations, par exemple entre IPSL-CM5A-MR et CNRM-CM5-LR dans les stations des Pyrénées orientales pour laquelle l'incertitude totale est très importante.
- RCMs : Les effets RCMs font apparaître des modèles donnant des changements plus élevés que la moyenne (WRF381P) et moins élevés (HadREM3-GA7-05).
- HMs : Le modèle ORCHIDEE conduit à des changements projetés plus élevés que la moyenne sur toute la France. Les effets sont plus variables pour les trois autres modèles CTRIP, GRSD et SMASH. Les effets GRSD et SMASH présentent la même variabilité spatiale et leur similarité est remarquable, ce qui est en partie liée à leur structure dérivée des modèles GR (PERRIN *et al.*, 2007). A noter que les effets négatifs de GSRD et SMASH sur une partie des bassins de la Loire et de la Seine sont liés aux effets positifs d'ORCHIDEE sur cette région, puisque ce sont les effets relatifs des modèles les uns par rapport aux autres (la somme des effets est égale à zéro).

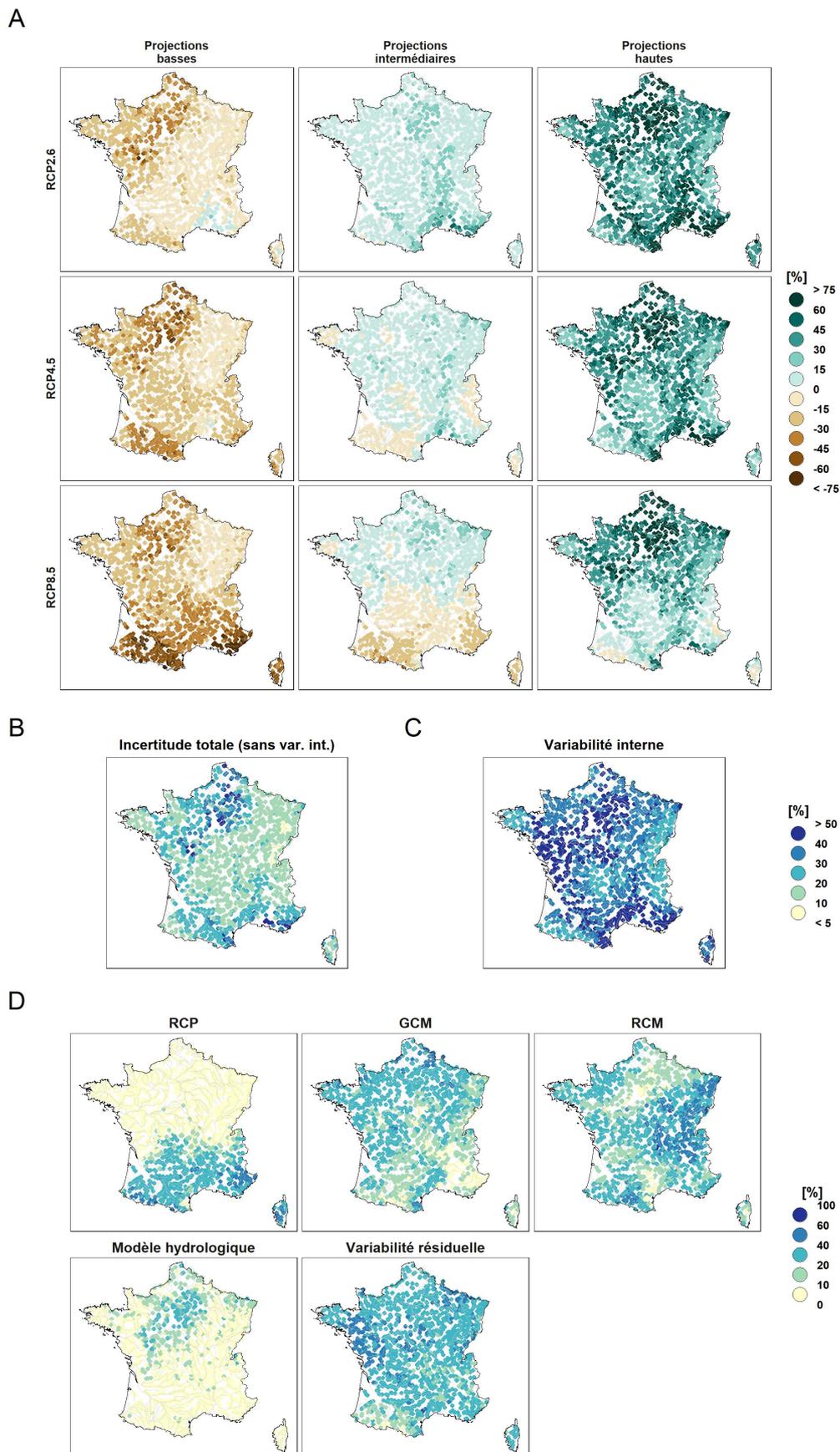


FIGURE 23 : Débit Annuel (QA). Changements relatifs projetés pour 2085. 4 HMs : CTRIP, GRSD, SMASH et ORCHIDEE.

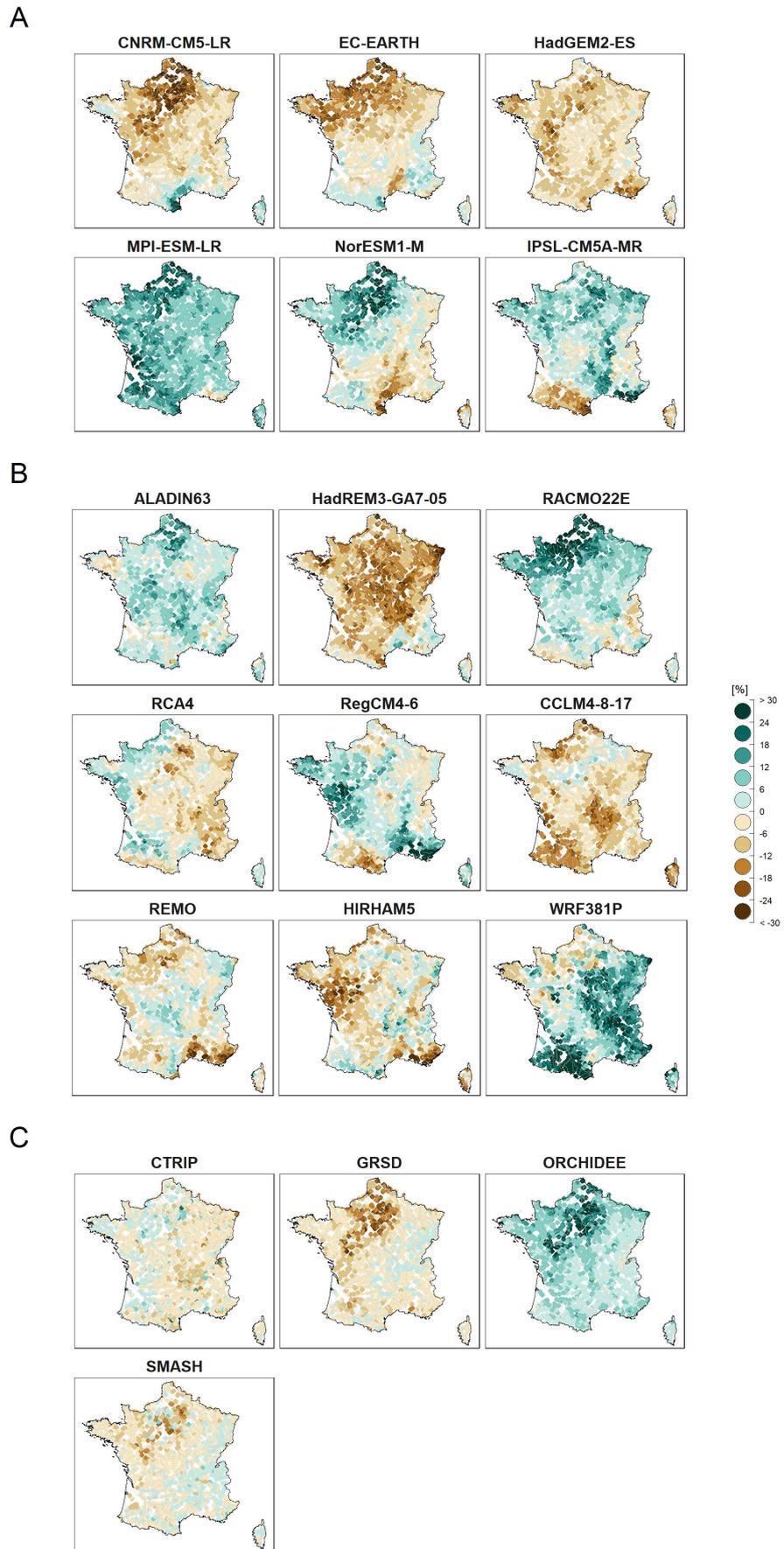


FIGURE 24 : Débit Annuel (QA). Effets principaux des modèles pour 2085. (A) GCMs, (B) RCMs, (C) HMs.

5.1.2 Débit journalier maximal annuel - QJXA

Changements projetés pour 2085, Figure 25A : Pour tous les scénarios, les projections intermédiaires (moyennes) conduisent à de légères augmentations en fin de siècle, allant jusqu'à +30% pour le scénario RCP8.5. Pour les projections hautes, c'est-à-dire les changements les plus élevés de l'ensemble, le changement relatif de QJXA dépasse souvent +60% avec tous les scénarios. Cependant, les changements projetés sont aussi à la baisse pour une partie des chaînes de simulations. Quel que soit le scénario, les projections hautes et basses présentent des signes opposés.

Incertitude totale (sans la variabilité interne), Figure 25B : L'incertitude inter-chaînes est plus élevée que pour le débit annuel, et dépasse souvent 30% dans les Cévennes, dans le sud de la France.

Variabilité interne, Figure 25C : De nouveau, la variabilité interne est très élevée (supérieure à 40% sur toute la France). Elle peut dépasser 100% sur certaines stations, c'est-à-dire que le QJXA peut varier plus que du simple au double d'une année à l'autre.

Sources d'incertitude, Figure 25D : La source principale d'incertitude est la variabilité résiduelle, indiquant que la dispersion entre les effets principaux des RCPs, GCMs, RCMs et HMs ne suffit pas à caractériser l'incertitude des changements projetés. Les incertitudes GCM et RCM sont équivalentes et leurs contributions respectives varient selon les régions. Une forte proportion de la dispersion entre les réponses climatiques est expliquée par les HMs dans l'Est (> 40%).

Effets principaux des modèles, Figure 26A-C :

- GCMs : Dans le nord de la France, l'incertitude GCM s'explique surtout par les effets IPSL-CM5A-MR importantes (> 24%) et des effets opposés pour les autres GCMs (par exemple EC-EARTH dans l'Ouest).
- RCMs : Les signatures des différents RCMs sont moins nettes mais on note tout de même que les valeurs de QJXA obtenues avec HadREM3-GA7-05 sont moins élevées que les autres RCMs sur toute la France.
- HMs : L'incertitude liée aux modèles hydrologiques dans l'est de la France est surtout due au modèle CTRIP qui présente des effets très négatifs (entre -25% et -30%) sur cette région, en opposition aux trois autres modèles.

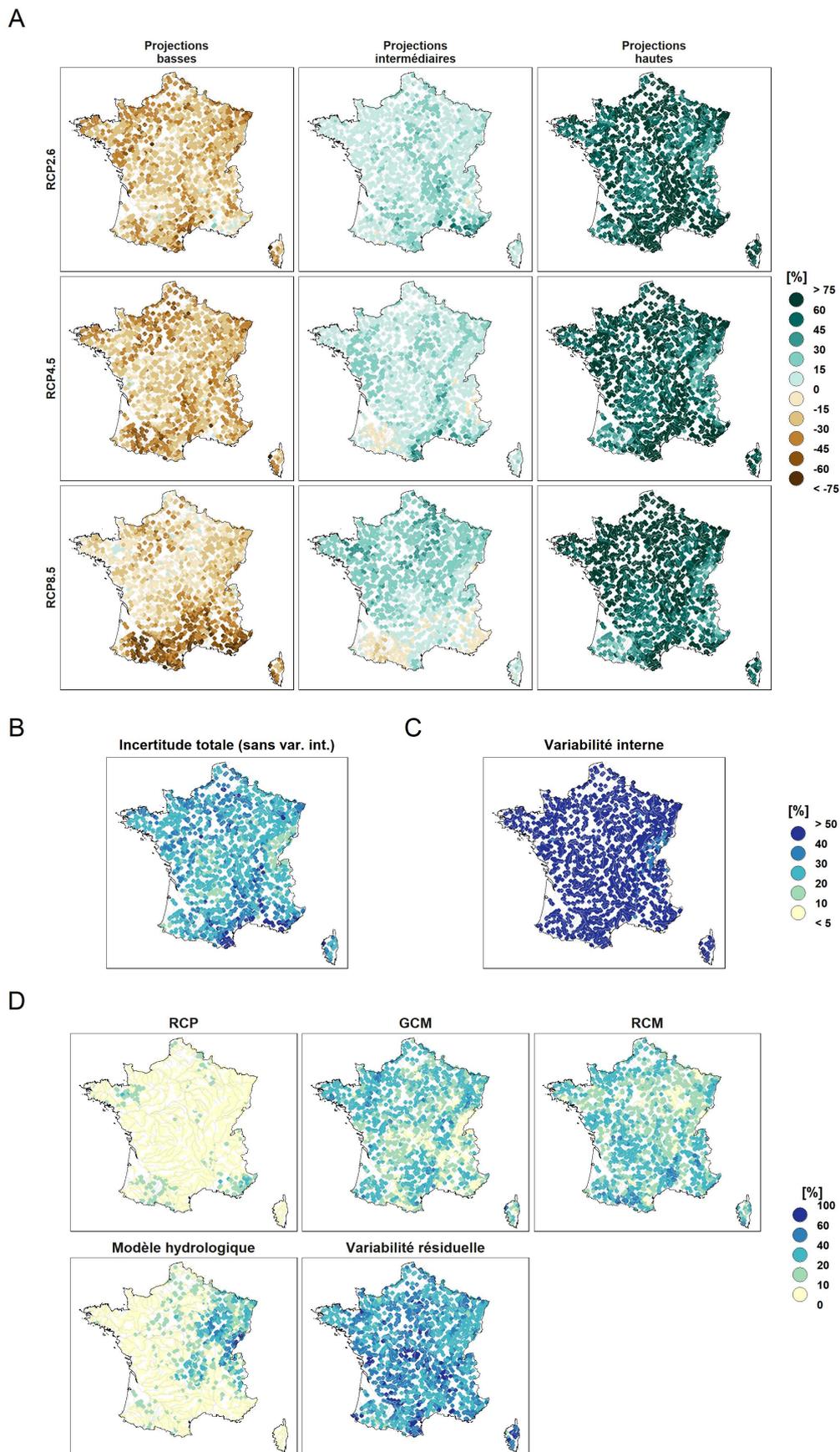


FIGURE 25 : Débit journalier maximal annuel (QJXA). Changements relatifs projetés pour 2085. 4 HMs : CTRIP, GRSD, SMASH et ORCHIDEE.

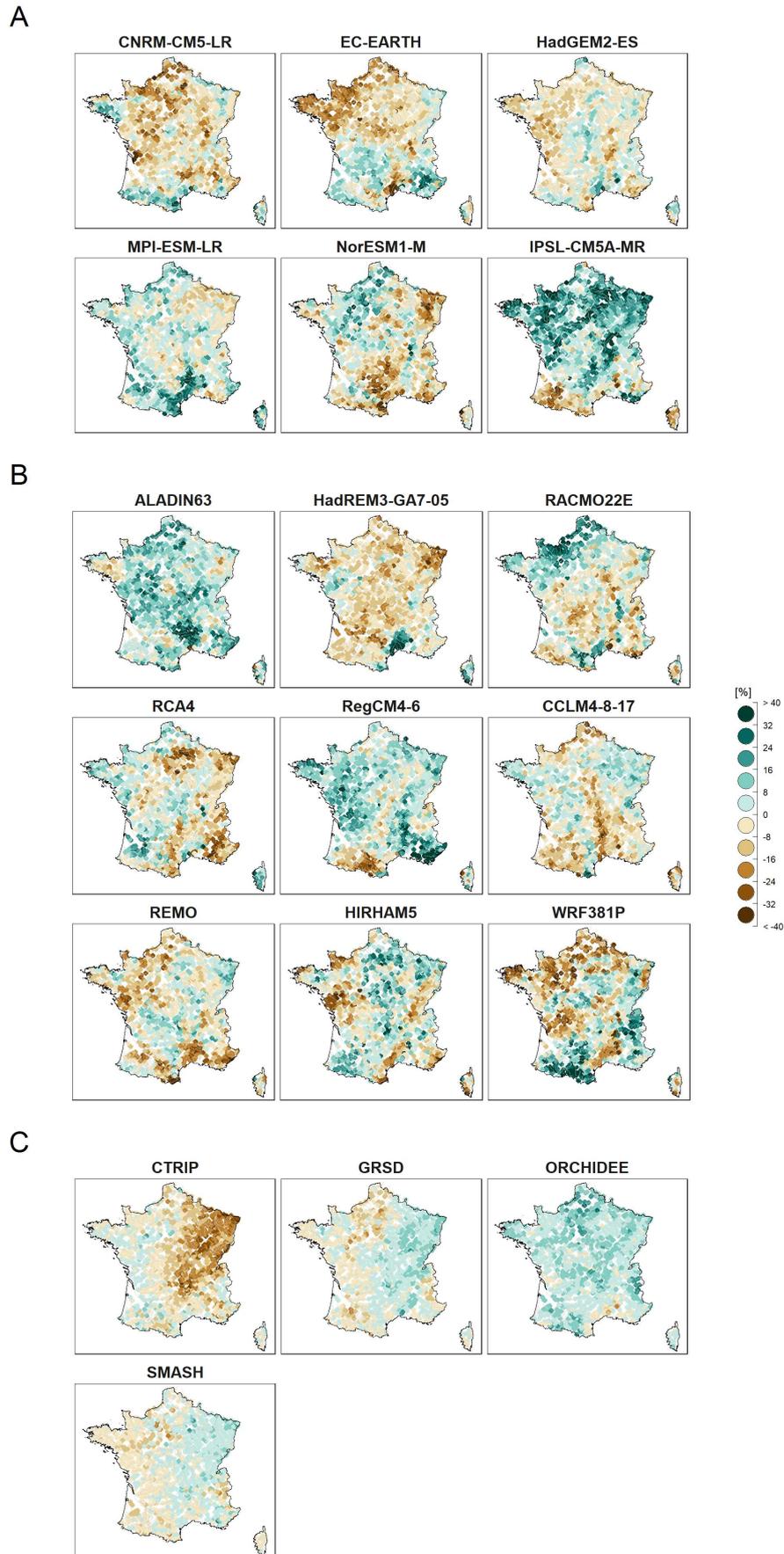


FIGURE 26 : Débit journalier maximal annuel (QJXA). Effets principaux des modèles pour 2085. (A) GCMs, (B) RCMs, (C) HMs.

5.1.3 Débit mensuel minimal de chaque année - QMNA

Changements projetés pour 2085, Figure 27A : Les tendances à la baisse pour cet indicateur sont très nettes avec les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 et de manière plus prononcée dans le sud de la France où la diminution moyenne peut atteindre -60% et où même les projections hautes indiquent souvent des diminutions avec le scénario RCP8.5. Toujours pour ce scénario, les changements relatifs projetés de QMNA sont de l'ordre de [-45%, -60%] dans le sud de la France pour les projections moyennes et souvent inférieurs à -60% pour les projections basses (quantile 0.05 de l'ensemble). Toutefois, les projections ne s'accordent pas toujours sur le signe des changements. C'est en particulier le cas pour le scénario RCP2.6, et dans une moindre mesure pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Pour le scénario RCP8.5, les projections s'accordent sur le signe négatif des changements sauf pour la région du Centre Nord et les Alpes.

Incertitude totale et variabilité interne, Figure 27B-C : Comme pour le QA et le QJXA, la variabilité interne est importante (supérieure à 40%) et plus élevée que l'incertitude inter-chaînes qui est l'ordre de [20%, 40%] (volet B).

Sources d'incertitude, Figure 27D : Les sources dominantes d'incertitudes sont les scénarios RCP dans le sud de la France (qui conditionnent beaucoup les changements en température et les pertes par évapotranspiration, en particulier en été, voir par exemple Fig. 5), les RCMs dans l'est de la France et une contribution importante des modèles hydrologiques de manière générale. Comme pour le QJXA, la variabilité résiduelle est aussi une source d'incertitude importante au regard des autres sources.

Effets principaux des modèles, Figure 28A-C :

- GCMs : la contribution des GCMs à l'incertitude totale est modérée, mais on retrouve globalement les effets obtenus pour la température estivale (Fig. 6) qui conditionnent beaucoup les tendances projetées pour cet indicateur de débit mensuel minimal.
- RCMs : les RCMs HadREM3-GA7-05 et CCLM4-8-17 accentuent cette tendance projetée à la baisse du QMNA, contrairement aux RCMs RACMO22E et WRF381P qui sont plus humides que les autres RCMs en été (Fig. 10).
- HMs : le modèle CTRIP donnent des tendances à la baisse plus fortes (entre -20% et -30%) par rapport aux autres modèles dans certaines régions (Bretagne, Massif central, Pyrénées, Alpes) alors qu'ORCHIDEE tire ces tendances vers le haut (effets positifs).

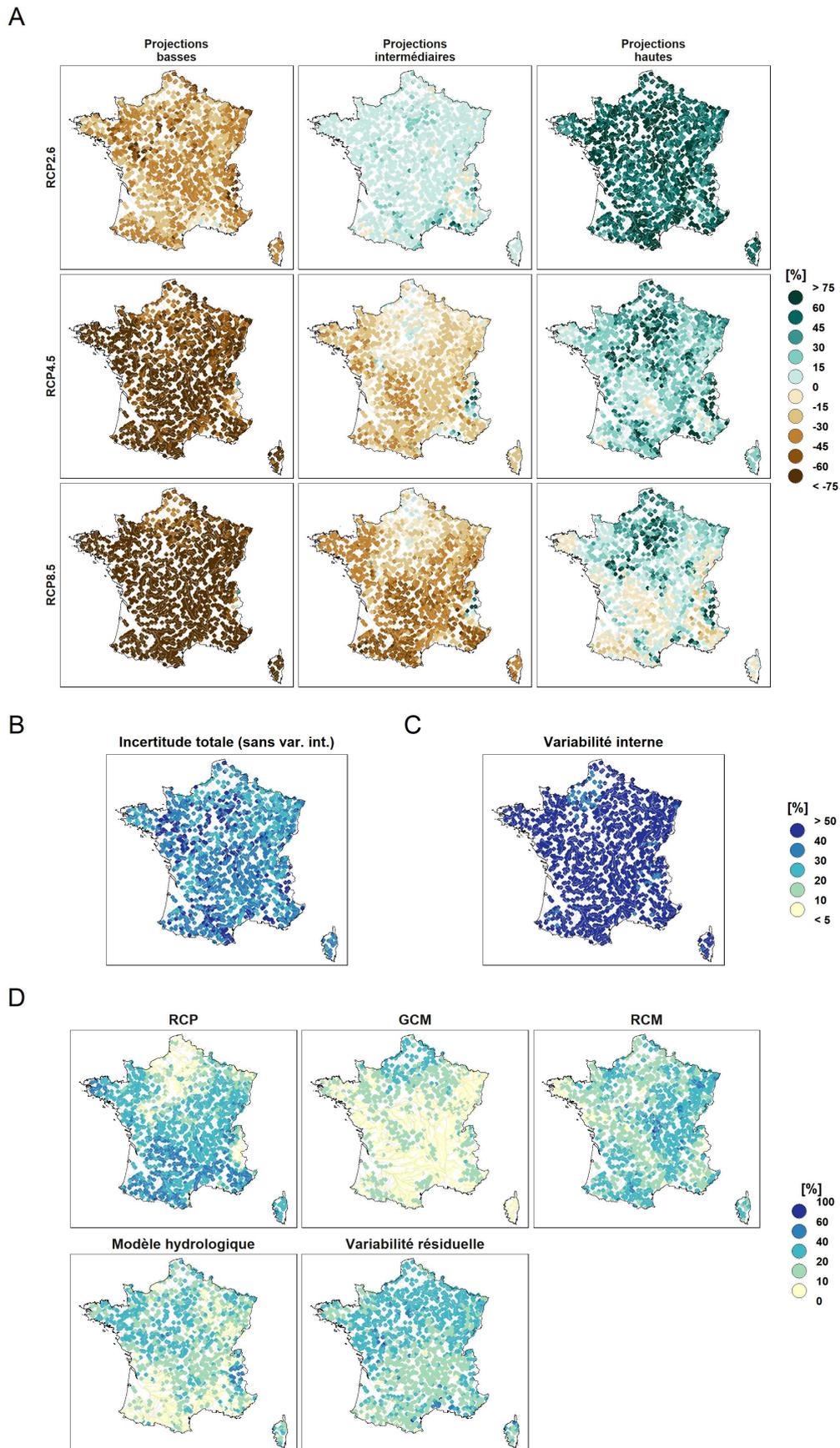


FIGURE 27 : Débit mensuel minimal de chaque année (QMNA). Changements relatifs projetés pour 2085. 4 HMs : CTRIP, GRSD, SMASH et ORCHIDEE.

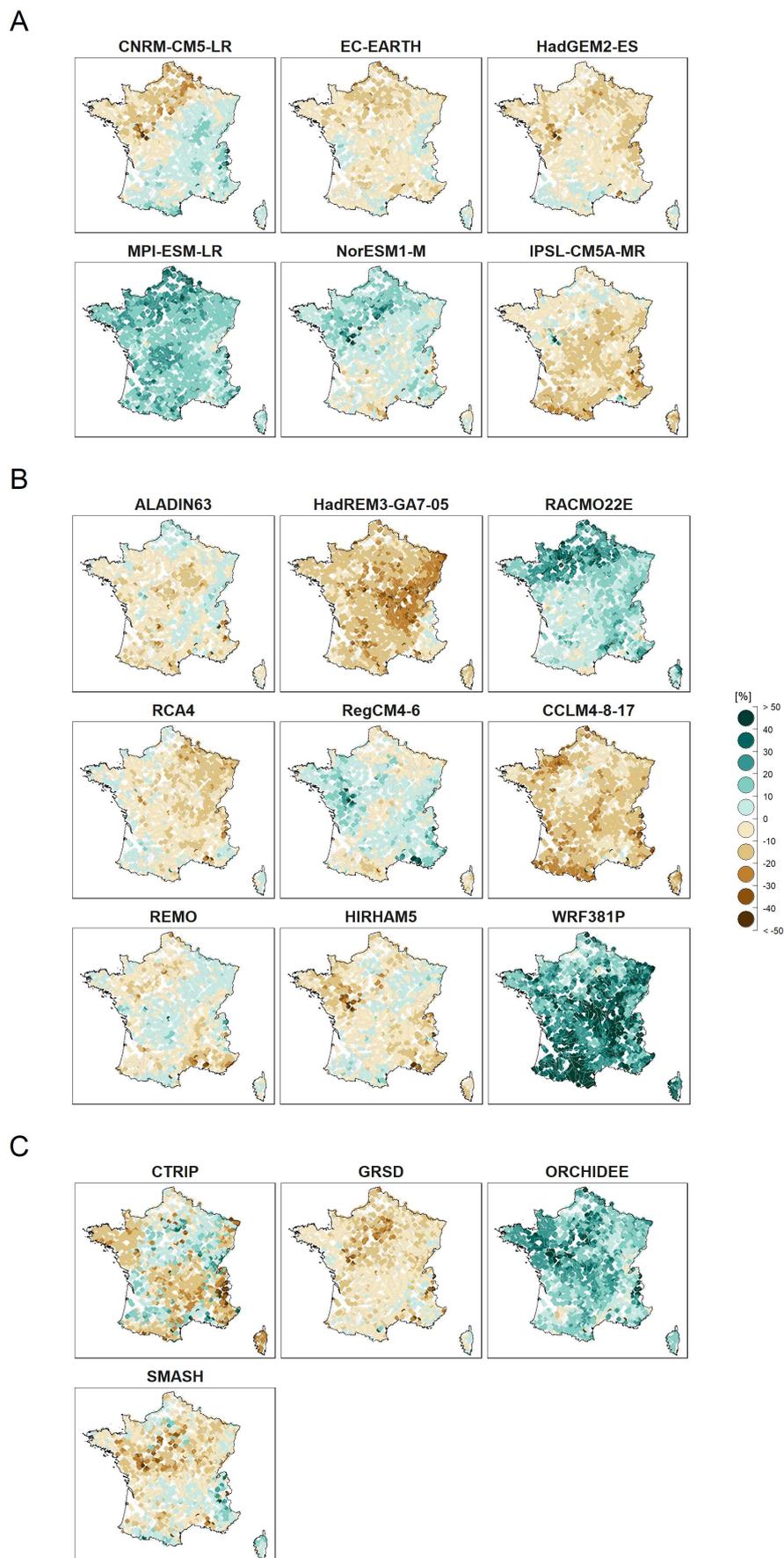


FIGURE 28 : Débit mensuel minimal de chaque année (QMNA). Effets principaux des modèles pour 2085. (A) GCMs, (B) RCMs, (C) HMs.

5.2 Focus sur la Loire : effets principaux des modèles hydrologiques

Pour les projections hydrologiques sur la Loire, neuf modèles hydrologiques ont été utilisés : CTRIP, EROS, GRSD, J2000, MORDOR-SD, MORDOR-TS, ORCHIDEE, SIM2 et SMASH. Cet ensemble étendu de projections, plus fourni que celui disponible pour la France, permet d'estimer de façon plus fine les incertitudes liées à la modélisation hydrologique.

Dans cette section, nous détaillons les effets des différents modèles hydrologiques sur les changements projetés fin de siècle pour les indicateurs QA, QJXA et QMNA sur les stations du bassin de la Loire où tous les modèles ont produit des simulations (31 stations). Ces effets traduisent les différences de représentation des processus hydrologiques entre modèles, notamment les processus liés aux bilans eau/énergie, les processus liés à la production et aux transferts des ruissellements et au routage dans le réseau hydrographique. Les principaux résultats sont les suivants (Figures 29-31) :

- De façon générale, la dispersion entre les modèles est assez faible pour QA (Figure 29), modérée pour QJXA (Figure 30) et assez forte pour le QMNA (Figure 31), en cohérence avec les résultats présentés ci-dessus. Les différences importantes sur le QMNA mettent en évidence les différences importantes de représentation entre les modèles pour les processus liés aux étiages (pertes par évapotranspiration, soutien d'étiage). L'incertitude HM importante pour les variables caractéristiques d'étiage est cohérente avec diverses études antérieures (VIDAL *et al.*, 2016 ; LEMAITRE-BASSET *et al.*, 2021). De manière générale, on peut considérer que le QA est lié aux fonctions de production des modèles hydrologiques et les variables saisonnières QJXA et QMNA aux fonctions de production et de routage (ratio ruissellement / écoulement lent). Il est donc attendu que les modèles hydrologiques qui partagent une même représentation de ces fonctions soient semblables en termes d'effet.
- Les effets principaux de CTRIP et SIM2 sont très proches pour QA. Ils sont également très similaires pour QJXA mais différents pour QMNA. Cela s'explique pour grande partie par la grande similarité des modèles : un même support spatial (SAFRAN) pour la discrétisation des bassins, une représentation commune des bilans d'eau et d'énergie à l'échelle de chaque maille. Cependant, le modèle de routage diffère ainsi que la prise en compte des aquifères pour CTRIP au contraire de SIM2, ce qui pourrait expliquer les différences pour le QMNA sur ce bassin en particulier.
- Les effets principaux des modèles GRSD, MORDOR-SD, MORDOR-TS, et SMASH sont très similaires (ce qu'on avait déjà pu constater pour GRSD et SMASH sur la France), avec pour la Loire un contraste amont / aval du bassin versant assez marqué pour le QA et le QJXA (à l'exception de MORDOR-SD qui donne des débits annuels moyens légèrement plus faibles que les autres modèles en amont du bassin). Cette similarité peut probablement s'expliquer par l'appartenance de ces quatre modèles à une même famille de modèle hydrologique conceptuel à réservoirs, au contraire des autres modèles qui ont une toute autre représentation des processus.
- Bien que les modèles J2000 et ORCHIDEE se basent sur des représentations et paramétrisations très différentes, leurs effets principaux sont aussi assez similaires. Ils sont aussi similaires, pour QA et QJXA, aux effets du modèle EROS.
- Les modèles J2000 et ORCHIDEE sont généralement plus "humides" que les autres et produisent des effets positifs pour les trois indicateurs, particulièrement prononcés pour le QMNA. L'effet positif du modèle ORCHIDEE sur les débits simulés, systématique sur tous les indicateurs et à l'échelle de la France entière en fin de siècle sous scénario à fortes émissions (Figures 23, 25, 27), résulte de la dépendance de ce modèle à la teneur en CO₂ atmosphérique, comme détaillé en section 5.3.
- Les effets principaux des modèles GRSD, MORDOR-SD, MORDOR-TS, et SMASH sont moins importants que ceux des autres modèles.

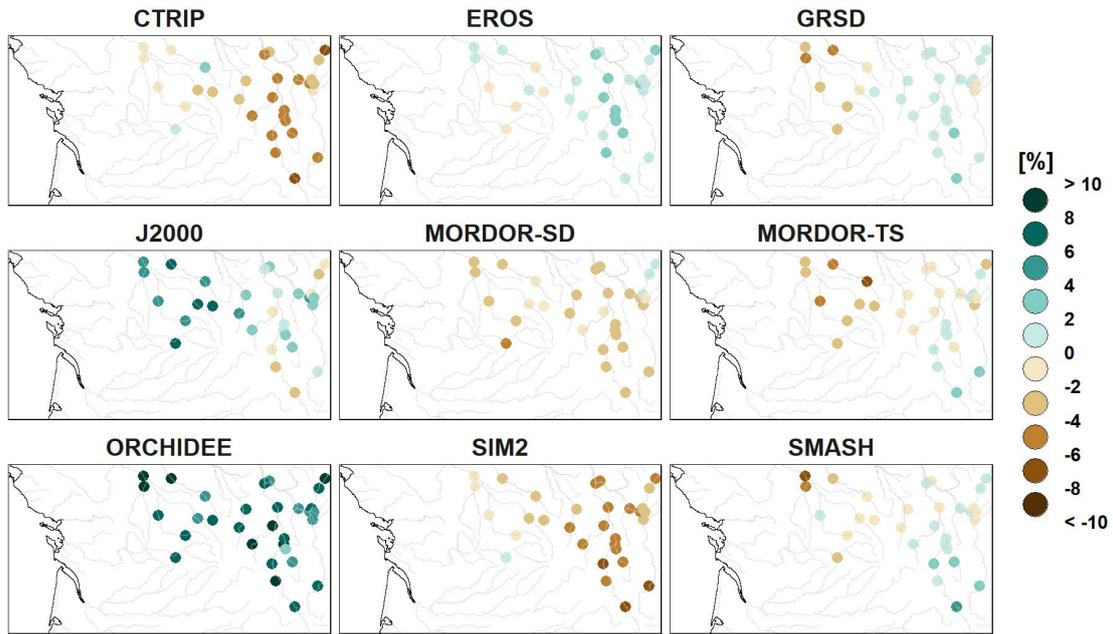


FIGURE 29 : Débit annuel (QA). Effets principaux des modèles hydrologiques. Zoom sur la Loire. Points aux exutoires, 9 HMs.

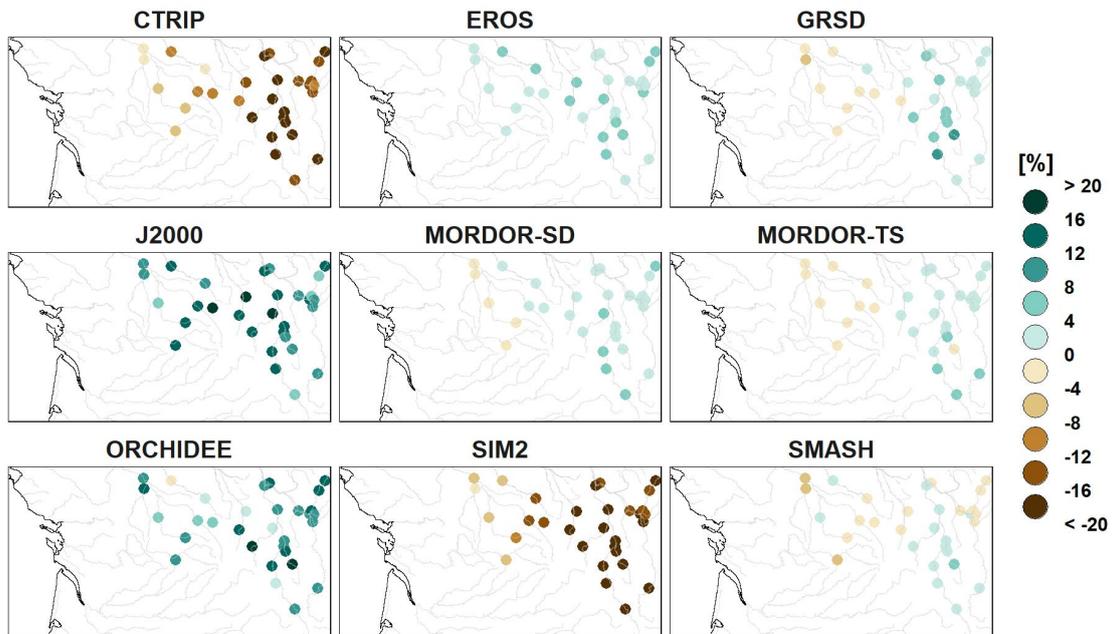


FIGURE 30 : Débit journalier maximal annuel (QJXA). Effets principaux des modèles hydrologiques. Zoom sur la Loire. Points aux exutoires, 9 HMs.

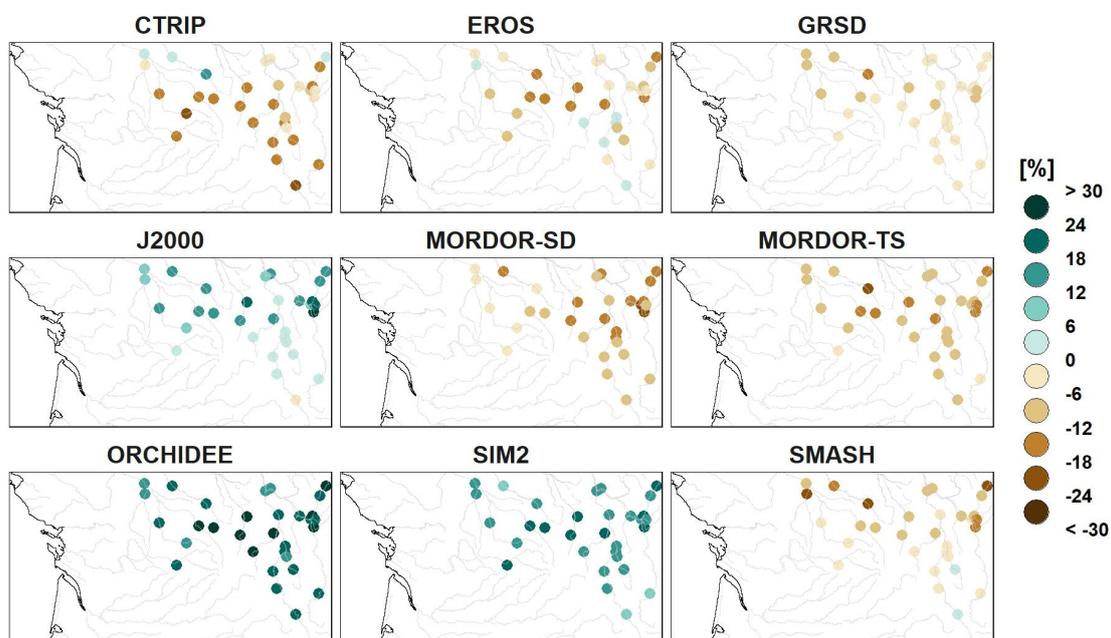


FIGURE 31 : Débit mensuel minimal de chaque année (QMNA). Effets principaux des modèles hydrologiques. Zoom sur la Loire. Points aux exutoires, 9 HMs.

5.3 Focus sur une incertitude de modélisation : les effets physiologiques du CO₂

Le changement climatique anthropique dont le projet Explore2 cherche à quantifier les impacts hydrologiques résulte principalement de l'augmentation dans l'atmosphère de la concentration en gaz à effet de serre, dont le principal est le CO₂. Outre ses effets radiatifs qui réchauffent la Terre, le CO₂ atmosphérique alimente aussi la photosynthèse des végétaux, avec deux effets physiologiques qui influencent le bilan hydrique des surfaces continentales et des bassins versants :

1. un effet "anti-transpirant", car les plantes peuvent réduire le diamètre d'ouverture de leurs stomates⁴ pour capter la quantité de CO₂ dont elles ont besoin si la concentration atmosphérique est plus élevée, ce qui limite d'autant les pertes en vapeur d'eau par ces mêmes stomates (transpiration);
2. un effet "fertilisant", car pour une ouverture stomatique donnée, une quantité plus importante de CO₂ peut être fixée par photosynthèse lorsque l'atmosphère est enrichie en CO₂, ce qui tend à augmenter la biomasse et la surface foliaire.

Ces deux effets ont été largement démontrés par des expériences d'enrichissement en CO₂ (AINSWORTH et LONG, 2005). Leur dépendance opposée à l'ouverture stomatique les rend antagonistes (si l'un est plus fort, l'autre le sera moins), et leur force respective dépend des espèces végétales, de la teneur en CO₂, et d'autres facteurs de contrôle de la photosynthèse et de la santé des plantes (luminosité, humidité, nutriments, etc.). Ces deux effets ont aussi une influence opposée sur l'évapotranspiration, qui est réduite par l'effet anti-transpirant, mais favorisée par l'effet fertilisant (des feuilles plus grandes permettant une transpiration plus forte).

Les débits d'un bassin versant se définissant largement par la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration (modulo des processus de stockage), les effets physiologiques du CO₂ doivent donc avoir une influence sur les débits, qui sont augmentés par l'effet anti-transpirant, et réduits par l'effet fertilisant. En tant que composante continentale des GCMs développés à l'IPSL (IPSL-CM5A-MR, IPSL-CM6A-LR, BOUCHER *et al.*, 2020), le modèle ORCHIDEE est le seul modèle hydrologique utilisé pour Explore2 à décrire ces deux effets, qui sont nécessaires pour simuler le cycle du carbone dans les modèles de climat, mais avec des incertitudes importantes aux fortes teneurs en CO₂, faute d'observations (CANADELL *et al.*, 2023).

Des simulations complémentaires ont été réalisées avec ce modèle ORCHIDEE pour estimer l'impact de ces effets sur les débits simulés, et l'incertitude associée à leur non prise en compte dans les autres modèles. Le principe est de dupliquer les simulations faites pour Explore2, mais en désactivant les deux effets physiologiques du CO₂, ce qui revient à imposer aux plantes des concentrations en CO₂ constantes tout au long des simulations, depuis 1950 jusqu'à la fin du 21^e siècle. La concentration pour ces simulations est celle de l'année 2005 (soit 380 ppm). Elles ont été faites pour les quatre narratifs d'Explore2, qui correspondent tous les quatre au scénario d'émissions le plus pessimiste (RCP8.5), très enrichi en CO₂ en fin de siècle (800 ppm en moyenne sur la période 2070-2100). Dans les huit simulations ainsi comparées, quatre à CO₂ 2005 et quatre à CO₂ RCP8.5, le climat se réchauffe pendant la période simulée car l'effet radiatif du CO₂ reste activé dans les simulations climatiques.

La Figure 32 confirme que le modèle ORCHIDEE capture bien les effets physiologiques du CO₂. L'effet fertilisant entraîne une augmentation de la surface foliaire (LAI), de 7% en 150 ans sur l'ensemble des quatre narratifs. Il est intéressant de noter que sans l'effet fertilisant (cCO₂ en violet), la surface foliaire tend au contraire à baisser après 2050, en conséquence de la baisse de l'humidité du sol qui stresse la croissance végétale. L'effet anti-transpirant est également exprimé, puisque l'évapotranspiration est plus faible dans les simulations où le CO₂ est plus élevé (simulations eCO₂/cCO₂ après/avant 2005). L'évapotranspiration plus faible pour l'expérience eCO₂ conduit logiquement à une humidité des sols et à des débits plus élevés, la différence augmentant avec le temps. Il faut enfin noter que les manifestations de ces effets ne sont pas uniformes, ni entre les différents narratifs (comme indiqué par la plage de dispersion importante autour de la moyenne sur la Figure 32), ni entre les régions géographiques, ni entre les saisons.

4. pores à la surface des feuilles permettant les échanges gazeux, entrants pour le CO₂, et sortants pour la vapeur d'eau.

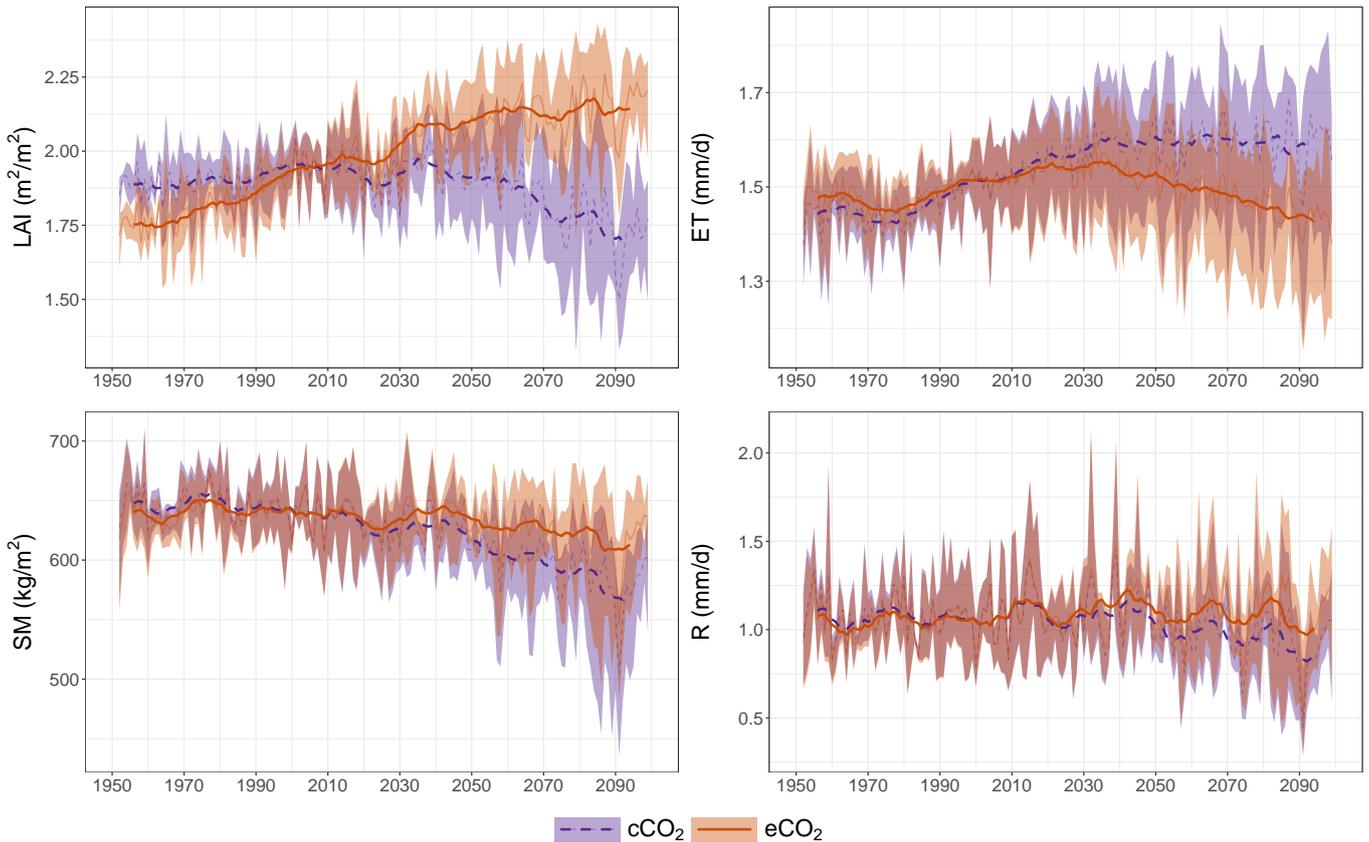


FIGURE 32 : Effets physiologiques du CO₂ sur l'évolution des bilans d'eau simulés par le modèle hydrologique ORCHIDEE. Évolutions depuis 1950 jusqu'à 2100 des moyennes annuelles sur l'ensemble du domaine DRIAS-2020, pour l'indice de surface foliaire (LAI), l'évapotranspiration (ET), l'humidité du sol (SM sur 2 mètres de profondeur), et le débit spécifique (R, somme du ruissellement et du drainage). Les courbes en violet et orange correspondent à la moyenne des quatre narratifs, pour les simulations à CO₂ 2005 (cCO₂) et à CO₂ RCP8.5 (eCO₂), respectivement. Les plages colorées indiquent la dispersion des quatre narratifs autour de leur moyenne.

En conclusion, les débits plus forts au 21^e siècle dans les simulations ORCHIDEE qui tiennent compte des effets physiologiques du CO₂ (eCO₂ en orange, qui sont un sous-ensemble des simulations ORCHIDEE produites pour Explore2) expliquent très probablement son effet plus humide que les autres modèles hydrologiques du projet, qui ne tiennent pas compte de ces effets. Comme déjà indiqué, ces effets sont encore mal quantifiés, surtout aux fortes teneurs CO₂, et ils font l'objet d'une recherche active au niveau international, y compris en ce qui concerne leurs impacts hydrologiques (ZHOU *et al.*, 2023 ; ZAITCHIK *et al.*, 2023). Ils constituent donc une source d'incertitude dans les résultats Explore2, à plusieurs titres :

- le fait que le modèle ORCHIDEE décrit ces effets contrairement aux autres modèles induit de la dispersion entre les simulations et contribue donc à l'incertitude de modélisation hydrologique quantifiée par la méthode QUALYPSO ;
- la représentation de ces effets dans ORCHIDEE est elle-même incertaine, notamment en ce qui concerne la force respective des deux effets fertilisant et anti-transpirant en fonction du type de plantes, de la concentration en CO₂, etc. : il s'agit ici d'une incertitude scientifique, liée au déficit des connaissances actuelles sur ce sujet ;
- l'absence de ces effets dans les autres modèles hydrologiques est aussi une source d'incertitude sur les simulations produites, puisqu'ils existent dans la nature, même s'ils sont encore peu marqués aux concentrations passées en CO₂ (les concentrations ont augmenté de 310 ppm en 1950 à 380 ppm en 2020, soit de 70 ppm en 70 ans, augmentation faible en comparaison des 520 ppm d'augmentation projetés sous RCP8.5 sur la période 2020-2100). Beaucoup de modèles hydrologiques ne représentent pas la végétation par souci de simplicité et parcimonie, mais cette simplification, acceptable en climat actuel, peut devenir questionnable en climat enrichi en CO₂.

5.4 Focus chronologique sur un bassin versant

La Figure 33 présente une synthèse des résultats des chroniques de changements projetés pour les trois indicateurs QA, QJXA et QMNA pour le bassin versant de la Loire à Digoin (surface de 9320 km²). On retrouve les éléments présentés sous forme de carte pour la fin de siècle et elle permet de mieux apprécier les différences entre les tendances projetées pour les différents indicateurs, notamment :

- **Volet A** : Les tendances les plus nettes sont les diminutions obtenues pour le QMNA avec les RCP4.5 et RCP8.5, dès le début des chroniques. La variabilité naturelle est très importante pour QJXA et QMNA et peut conduire à des variations relatives d'une année à l'autre de +500% pour certaines chaînes de simulation.
- **Volet B** : On retrouve bien l'accord plus ou moins grand entre les modèles illustré dans le volet A. Pour le RCP2.6, il est important en fin de siècle pour le QA et le QJXA. Pour les RCP4.5 et RCP8.5, il est important pour le QMNA. Pour le RCP8.5, les chaînes ne sont pas en accord sur l'évolution du QA et du QJXA.
- **Volet C** : Les sources d'incertitude les plus importantes, hors variabilité interne, sont pour QA, les RCMs suivis des RCPs et des GCMs, pour QJXA, les RCMs, et pour le QMNA, les RCMs et les RCPs.
- **Volets D-F** : On retrouve des effets GCMs similaires pour QA et QJXA (effet "asséchant" de NorESM1-M et humide de MPI-ESM-LR et IPSL-CM5A-MR). Les effets GCMs sont plus faibles pour le QMNA. Les effets des modèles hydrologiques présentent une certaine consistance pour les trois indicateurs, CTRIP et SIM2 présentant des effets négatifs similaires, en opposition aux autres modèles pour QA et QJXA. ORCHIDEE a souvent les effets les plus positifs.

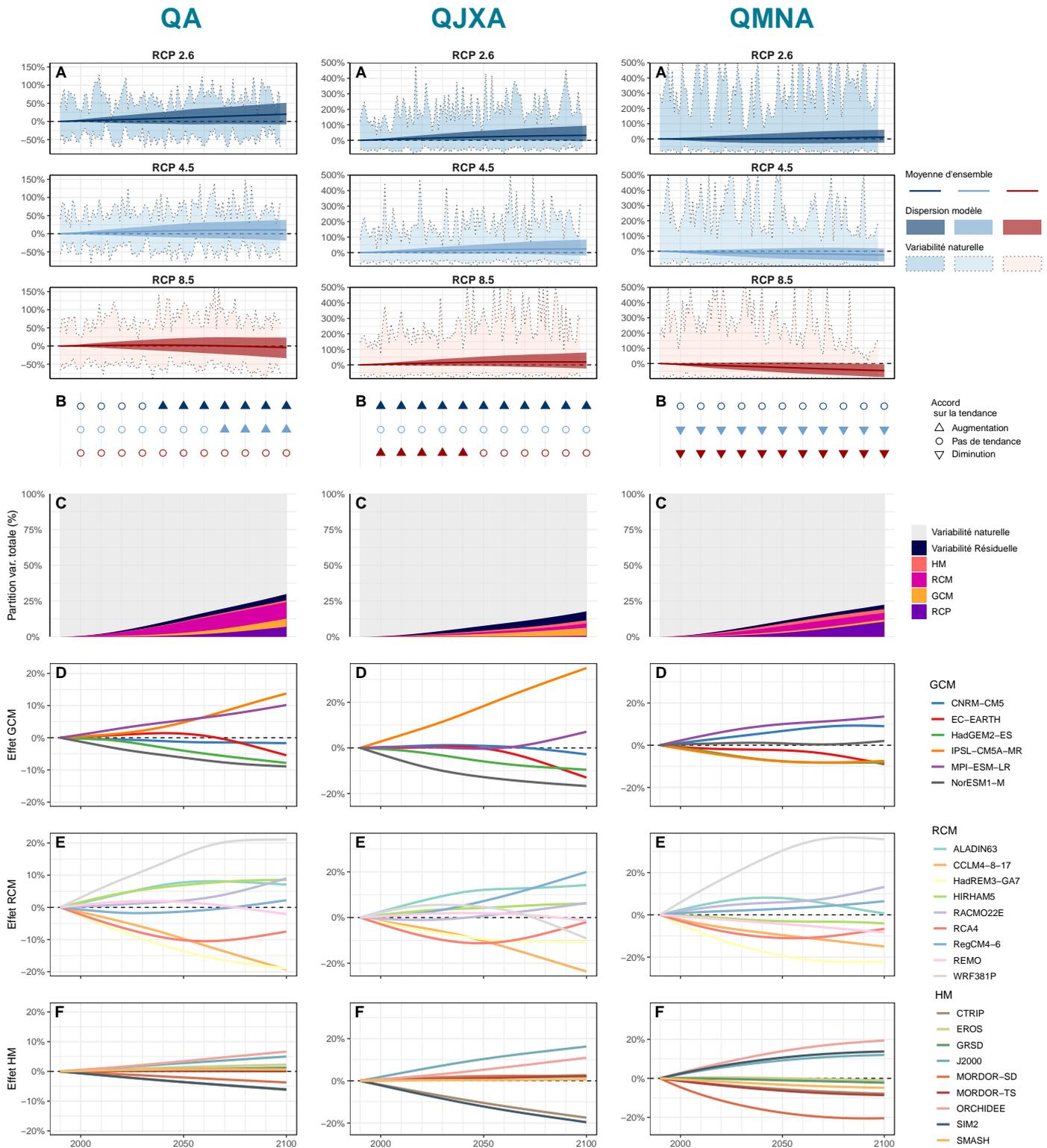


FIGURE 33 : Pour chacun des indicateurs **QA, QJXA et QMNA** pour le bassin versant de Loire à Digoin (station K118001010) (A) Changements relatifs projetés (%) avec la moyenne d'ensemble des changements (trait coloré), dispersion liée aux différentes réponses climatiques des modèles (bande colorée centrale), courbe enveloppe des fluctuations liées à la variabilité interne (zone pastel, minimum et maximum de l'ensemble initial, chaque année). (B) Accord entre les projections sur le signe du changement projeté. Triangle orienté vers le haut (resp. vers le bas) si plus de 80% des projections projettent un changement positif (resp. négatif). (C) Fraction de l'incertitude totale (en variance) expliquée par les différentes sources d'incertitude. (D-F) Effets principaux des GCMs, RCMs et des HMs.

6 Fiche incertitudes

Cette section décrit le contenu des fiches "incertitudes" qui seront produites pour les différents points de simulation hydrologique et qui reprendront essentiellement les éléments décrits dans ce rapport. Nous exploiterons également des résultats issus d'un travail présenté en annexe B qui vise à répondre à la problématique des simulations hydrologiques manquantes. En effet, les stations pour lesquelles les modèles hydrologiques ont produit des simulations sont variables d'un modèle à un autre (Tableau 1) et, par conséquent, les modèles manquants diffèrent d'une station à l'autre.

Pour que les résultats des projections obtenus sur les différentes stations puissent être comparés, notamment entre stations voisines, il est nécessaire qu'ils soient basés sur les mêmes ensembles de modèles. Pour chaque station, chaque scénario d'émission s et chaque modèle hydrologique h , nous proposons une estimation de $\hat{M}_{s,h}(t) = M(t) + ES_s(t) + EH_h(t)$ (voir Eq. 1 pour la définition de ces termes), c'est-à-dire la réponse climatique moyenne en changement associé à ce scénario et ce modèle hydrologique. Cette reconstruction propose une tentative d'homogénéisation des résultats et est principalement basée sur deux hypothèses :

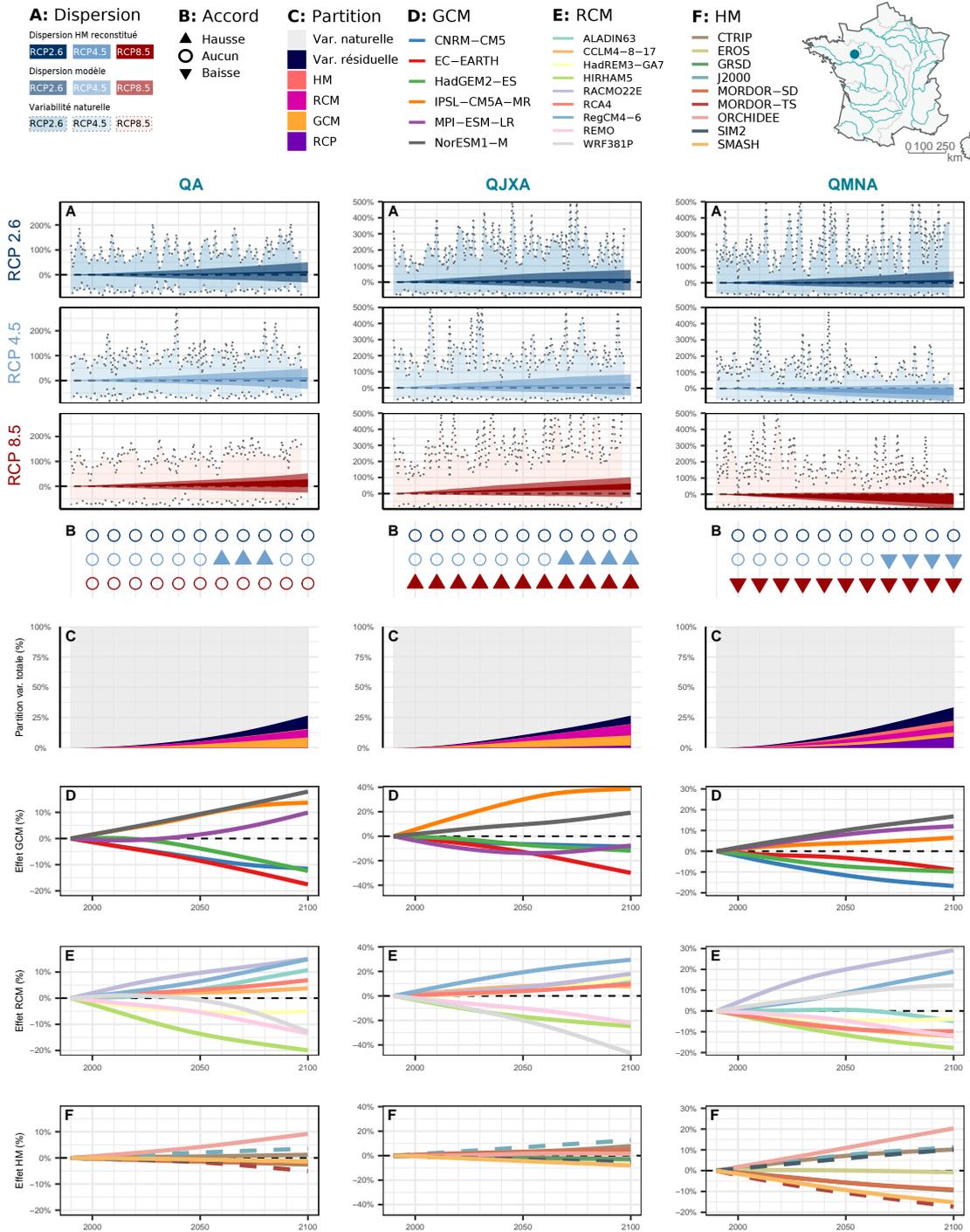
- Pour un modèle hydrologique h , $\hat{M}_{s,h}(t)$ varie de façon continue et progressive dans l'espace. Pour les stations où le modèle hydrologique h n'a pas produit de simulations, on suppose pouvoir estimer les changements par interpolation spatiale des changements projetés aux stations où les simulations sont disponibles.
- Les changements moyens $\hat{M}_{s,h_1}(t), \hat{M}_{s,h_2}(t), \dots$ associés à différents modèles hydrologiques h_1, h_2, \dots sont corrélés. Pour une station donnée, on suppose que les changements moyens des modèles disponibles peuvent être utilisés pour estimer les changements qui auraient pu être projetés avec le modèle manquant.

En pratique, la méthode de reconstruction utilisée ici est une méthode d'interpolation permettant de prendre en compte les projections d'un autre modèle disponible à la station cible (krigeage avec dérive externe, "KED"). Le modèle considéré pour fournir la dérive externe est, en priorité, le modèle SMASH car il est disponible pour la majorité des points de simulation. La méthode permet d'estimer des changements projetés moyens tous GCMs, RCMs et BCs confondus, pour différents horizons et pour chaque scénario d'émission.

La figure 34 présente un exemple de fiche incertitude pour le bassin de l'Erve à Auvers-Le-Hamon (station M063301010). Cette figure reprend essentiellement la figure de synthèse décrite en détail en section 5.4 pour le bassin de la Loire à Digoin. Les résultats sont cependant complétés en considérant les changements moyens reconstruits $\hat{M}_{s,h}(t)$:

1. Volet A : Pour chaque scénario d'émission et les indicateurs QA, QJXA et QMNA, la moyenne d'ensemble est remplacée par une bande colorée foncée représentant la dispersion des changements moyens projetés $\hat{M}_{s,h}(t)$, pour tous les modèles hydrologiques h , qu'ils soient disponibles ou reconstruits. Cette bande permet donc de visualiser ces changements moyens sur la même base de modèles hydrologiques (ici sur le bassin de la Loire, les neuf modèles hydrologiques qui ont produit des simulations).
2. Volet F : Les effets moyens des HMs sont présentés sur la base de tous les modèles hydrologiques ayant produits des simulations pour le bassin hydrographique concerné, les effets reconstruits étant visualisés par des courbes en pointillé (ici SIM2, J2000 et MORDOR-TS).

M063301010 – L’Erve à Auvers–Le–Hamon



Fiche incertitude p.1/1
avril 2024

FIGURE 34 : Exemple de fiche incertitude. Pour chacun des indicateurs **QA**, **QJXA** et **QMNA** pour le bassin versant de l’Erve à Auvers-Le-Hamon (station M063301010) (A) Changements relatifs projetés (%) dispersion des changements moyens projetés par les différents modèles hydrologiques (bande colorée foncée), dispersion liée aux différentes réponses climatiques des modèles (bande colorée claire), courbe enveloppe des fluctuations liées à la variabilité interne (zone pastel, minimum et maximum de l’ensemble initial, chaque année). (B) Accord entre les projections sur le signe du changement projeté. Triangle orienté vers le haut (resp. vers le bas) si plus de 80% des projections projettent un changement positif (resp. négatif). (C) Fraction de l’incertitude totale (en variance) expliquée par les différentes sources d’incertitude. (D-F) Effets principaux des GCMs, RCMs et des HMs, les courbes en pointillé indiquent les changements moyens reconstruits.

7 Conclusions

S'il est une certitude, c'est que la température de l'air en France va augmenter dans les prochaines décennies, et l'intensité de la hausse va dépendre de la trajectoire en émission de gaz à effet de serre. Le réchauffement sera plus important en été (changements moyens projetés de $[+3.5^{\circ}\text{C}, +6^{\circ}\text{C}]$ sur la France avec le RCP8.5) qu'en hiver ($[+2.5^{\circ}\text{C}, +4.5^{\circ}\text{C}]$ avec le même scénario). En été, le réchauffement sera plus important dans le sud de la France et en hiver, sur les massifs montagneux. Concernant les précipitations totales, les incertitudes portées par les scénarios, GCMs et RCMs sont importantes et le signe des changements projetés n'est pas certain. Les seules tendances consistantes sur l'ensemble sont obtenues avec le scénario RCP8.5 : baisse des précipitations estivales de -10% à -40% sur la majeure partie de la France, avec une baisse plus prononcée dans le Sud, et hausse des précipitations hivernales dans le nord de la France : $[+20\%, +30\%]$. La conséquence directe du réchauffement projeté est une hausse projetée de l'ET0 en été et en hiver (augmentation moyenne de $[+10\%, +30\%]$ sur la France avec le RCP8.5) et une diminution projetée des cumuls de neige de novembre à avril, les incertitudes sur ces deux indicateurs climatiques étant très similaires à celles obtenues pour la température saisonnière (impact important du choix de scénario d'émission).

Les changements projetés sur le climat ont évidemment des conséquences directes sur les changements hydrologiques projetés en France. Pour le débit annuel moyen, l'incertitude sur l'évolution des précipitations totales conduit à des tendances très incertaines sur la France (très légères hausses projetées dans le Nord et très légères baisses dans le Sud) principalement liées aux variabilités entre GCMs et RCMs (et au choix du scénario dans le sud de la France). Les tendances projetées pour le débit journalier maximal annuel (QJXA) sont similaires et très peu claires (légères tendances à la hausse), les variabilités entre modèles hydrologiques s'ajoutant à ceux des GCMs et RCMs dans l'est de la France. Sur les trois indicateurs hydrologiques présentés dans ce rapport (QA, QJXA et QMNA), les seules certitudes portent sur le QMNA pour lequel l'ensemble de projections indique une tendance nette à la baisse dans le sud de la France (changements projetés moyens de $[-30\%, -60\%]$) avec le scénario RCP8.5.

Du fait des contraintes spécifiques différentes pour les différents modèles hydrologiques, les ensembles de projections hydrologiques sont incomplets dans l'espace. En d'autres termes, les projections hydrologiques ne sont pas disponibles sur toutes les stations. Pour remédier à ce problème, une méthode géostatistique a été développée afin de fournir des reconstructions des changements moyens projetés pour les modèles hydrologiques qui ne sont pas disponibles aux différents sites (points de simulation), pour chaque scénario d'émission et chaque période future.

Ces analyses fournissent une appréciation approfondie des évolutions projetées dans l'ensemble Explore2. Il est cependant important de mentionner que les résultats présentés sont conditionnels à cet ensemble, et donc au choix des scénarios et des modèles utilisés pour produire cet ensemble. Aucun des scénarios RCP ne se réalisera et les modèles sont tous des représentations simplifiées et imparfaites des systèmes physiques réels. De ce fait, et ceci est valable quel que soit l'ensemble considéré, il ne faut pas donner à la moyenne d'ensemble et à la plage d'incertitude estimées une valeur qu'elles n'ont pas. En particulier, la plage d'incertitude ne couvre pas nécessairement le futur qui se réalisera vraiment dans les décennies à venir. Malgré tout, la connaissance de ces incertitudes fait partie des informations importantes à prendre en compte pour le choix de stratégies d'adaptation aux changements à venir. Le futur n'est jamais certain, mais il est possible d'en faire des projections au meilleur de nos connaissances actuelles. L'incertitude résultante ne doit pas être un frein à la décision, mais une composante à part entière du processus d'adaptation. En complément de la caractérisation des différentes sources d'incertitude présentées dans ce rapport, l'approche par narratif permet de proposer un ensemble très réduit de futurs contrastés et de simplifier les messages importants obtenus à partir de ces trajectoires futures.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les partenaires du projet Explore2 pour tous les échanges autour des questions traitées dans ce rapport, et en particulier Guillaume Thirel, Charles Perrin, Claire Magand et Jean-Michel Soubeyroux pour le temps consacré à sa relecture et leurs retours constructifs. Nous remercions également les comités des utilisateurs (COUT-A et COUT-B) du projet Explore2 pour ses retours sur différentes versions préliminaires des représentations graphiques présentées dans ce rapport. Ces travaux ont bénéficié d'un accès aux moyens de calcul de l'IDRIS au travers des allocations de ressources A0150114642 et AD010113599 attribuées par GENCI.

Références

- AINSWORTH, E. A. et S. P. LONG (2005). « What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂ ». In : *New phytologist* 165.2, p. 351-372.
- BICHET, A. et al. (2019). « Potential impact of climate change on solar resource in Africa for photovoltaic energy : analyses from CORDEX-AFRICA climate experiments ». In : *ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS* 14.12. DOI : [10.1088/1748-9326/ab500a](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab500a).
- BICHET, A. et al. (2020). « Assessing uncertainties in the regional projections of precipitation in CORDEX-AFRICA ». In : *CLIMATIC CHANGE* 162.2, p. 583-601. DOI : [10.1007/s10584-020-02833-z](https://doi.org/10.1007/s10584-020-02833-z).
- BOUCHER, O. et al. (2020). « Presentation and evaluation of the IPSL-CM6A-LR climate model ». In : *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 12.7, e2019MS002010.
- BROWN, M. B. et A. B. FORSYTHE (1974). « The Small Sample Behavior of Some Statistics Which Test the Equality of Several Means ». In : *Technometrics* 16.1. Publisher : [Taylor & Francis, Ltd., American Statistical Association, American Society for Quality], p. 129-132. ISSN : 0040-1706. DOI : [10.2307/1267501](https://doi.org/10.2307/1267501).
- CANADELL, J. G. et al. (2023). « Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Global carbon and other biogeochemical cycles and feedbacks ». In : *Climate change 2021 : The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, p. 673-816.
- CASTEBRUNET, H. et al. (sept. 2014). « Projected changes of snow conditions and avalanche activity in a warming climate : the French Alps over the 2020-2050 and 2070-2100 periods ». In : *The Cryosphere* 8.5, p. 1673-1697. ISSN : 1994-0424. DOI : [10.5194/tc-8-1673-2014](https://doi.org/10.5194/tc-8-1673-2014).
- CHAMBERS, J. M. et T. J. HASTLE (1992). *Statistical Models in S*. New York : Routledge. ISBN : 978-0-203-73853-5. DOI : [10.1201/9780203738535](https://doi.org/10.1201/9780203738535).
- DESER, C. (2020). « Certain Uncertainty : The Role of Internal Climate Variability in Projections of Regional Climate Change and Risk Management ». In : *EARTHS FUTURE* 12. DOI : [10.1029/2020EF001854](https://doi.org/10.1029/2020EF001854).
- DESER, C. et al. (2012). « Uncertainty in climate change projections : the role of internal variability ». In : *CLIMATE DYNAMICS* 38.3-4, p. 527-546. ISSN : 0930-7575. DOI : [10.1007/s00382-010-0977-x](https://doi.org/10.1007/s00382-010-0977-x).
- EHRET, U. et al. (2012). « "Should we apply bias correction to global and regional climate model data?" » In : *HYDROLOGY AND EARTH SYSTEM SCIENCES* 16.9, p. 3391-3404. DOI : [10.5194/hess-16-3391-2012](https://doi.org/10.5194/hess-16-3391-2012).
- EVIN, G., S. SOMOT et B. HINGRAY (2021). « Balanced estimate and uncertainty assessment of European climate change using the large EURO-CORDEX regional climate model ensemble ». en. In : DOI : [10.5194/esd-2021-8](https://doi.org/10.5194/esd-2021-8).
- EVIN, G. et al. (avr. 2019). « Partitioning Uncertainty Components of an Incomplete Ensemble of Climate Projections Using Data Augmentation ». en. In : *Journal of Climate* 32.8. Number : 8, p. 2423-2440. ISSN : 0894-8755, 1520-0442. DOI : [10.1175/JCLI-D-18-0606.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0606.1).
- GIORGI, F. (2019). « Thirty Years of Regional Climate Modeling : Where Are We and Where Are We Going next? » In : *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-ATMOSPHERES* 124.11, p. 5696-5723. ISSN : 2169-897X. DOI : [10.1029/2018JD030094](https://doi.org/10.1029/2018JD030094).
- GREEN, P. J. et B. W. SILVERMAN (1993). *Nonparametric Regression and Generalized Linear Models : A roughness penalty approach*. New York : Chapman et Hall/CRC. ISBN : 978-0-429-16105-6. DOI : [10.1201/b15710](https://doi.org/10.1201/b15710).
- HAWKINS, E. et R. SUTTON (jan. 2012). « Time of emergence of climate signals ». en. In : *Geophysical Research Letters* 39.1. Number : 1, n/a-n/a. ISSN : 00948276. DOI : [10.1029/2011GL050087](https://doi.org/10.1029/2011GL050087).

- HENDERSON, S. B. et al. (2022). « Analysis of community deaths during the catastrophic 2021 heat dome : Early evidence to inform the public health response during subsequent events in greater Vancouver, Canada ». In : *ENVIRONMENTAL EPIDEMIOLOGY* 6.1. DOI : [10.1097/EE9.000000000000189](https://doi.org/10.1097/EE9.000000000000189).
- HINGRAY, B. et M. SAÏD (sept. 2014). « Partitioning Internal Variability and Model Uncertainty Components in a Multimember Multimodel Ensemble of Climate Projections ». en. In : *Journal of Climate* 27.17, p. 6779-6798. ISSN : 0894-8755, 1520-0442. DOI : [10.1175/JCLI-D-13-00629.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00629.1).
- HINGRAY, B. et al. (sept. 2019). « Uncertainty component estimates in transient climate projections : Precision of estimators in a single time or time series approach ». en. In : *Climate Dynamics* 53.5-6. Number : 5-6, p. 2501-2516. ISSN : 0930-7575, 1432-0894. DOI : [10.1007/s00382-019-04635-1](https://doi.org/10.1007/s00382-019-04635-1).
- HINGRAY, B. et G. EVIN (2020). *Partitioning uncertainty components of an incomplete ensemble of climate projections using data augmentation. EGU2020 conference, Vienna. April 2020.*
- IPCC (2019). *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]
- LAFAYASSE, M. et al. (2014). « Internal variability and model uncertainty components in future hydrometeorological projections : The Alpine Durance basin ». In : *WATER RESOURCES RESEARCH* 50.4, p. 3317-3341. DOI : [10.1002/2013WR014897](https://doi.org/10.1002/2013WR014897).
- LEHNER, F. et al. (mai 2020). « Partitioning climate projection uncertainty with multiple large ensembles and CMIP5/6 ». en. In : *Earth System Dynamics* 11.2. Number : 2, p. 491-508. ISSN : 2190-4987. DOI : [10.5194/esd-11-491-2020](https://doi.org/10.5194/esd-11-491-2020).
- LEMAITRE-BASSET, T. et al. (avr. 2021). « Climate change impact and uncertainty analysis on hydrological extremes in a French Mediterranean catchment ». en. In : *Hydrological Sciences Journal* 66.5. Number : 5, p. 888-903. ISSN : 0262-6667, 2150-3435. DOI : [10.1080/02626667.2021.1895437](https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1895437).
- MARSON, P. et al. (2024). *Explore2 : Rapport de synthèse sur les projections climatiques régionalisées*. Rapp. tech. Météo-France ; INRAE, p. 134. DOI : [10.57745/K8YKCD](https://doi.org/10.57745/K8YKCD).
- MCKAY, D. I. A. et al. (2022). « Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points ». In : *SCIENCE* 377.6611, p. 1171+. DOI : [10.1126/science.abn7950](https://doi.org/10.1126/science.abn7950).
- PERRIN, C., C. MICHEL et V. ANDRÉASSIAN (2007). *Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR)*. Rapp. tech. Cemagref, p. 16.
- R CORE TEAM (2022). *R : A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.
- RESZLER, C., M. B. SWITANEK et H. TRUHETZ (2018). « Convection-permitting regional climate simulations for representing floods in small- and medium-sized catchments in the Eastern Alps ». In : *NATURAL HAZARDS AND EARTH SYSTEM SCIENCES* 18.10, p. 2653-2674. DOI : [10.5194/nhess-18-2653-2018](https://doi.org/10.5194/nhess-18-2653-2018).
- REVERDY, A., G. EVIN et B. HINGRAY (2023a). *Notice descriptive des incertitudes pour les utilisateurs des projections Explore2. Notice courte. Projet Ministère Transition Ecologique et Office Français de la Biodiversité. UGA, CNRS, INRAE, Grenoble. hal-04258382*. Rapp. tech. DOI : [10.57745/IVDUSF](https://doi.org/10.57745/IVDUSF).
- (2023b). *Notice descriptive des incertitudes pour les utilisateurs des projections Explore2. Notice détaillée. Projet Ministère Transition Ecologique et Office Français de la Biodiversité. UGA, CNRS, INRAE, Grenoble. hal-04258394*. Rapp. tech. DOI : [10.57745/AMZCEZ](https://doi.org/10.57745/AMZCEZ).
- RIGAL, A., J.-M. AZAÏS et A. RIBES (juill. 2019). « Estimating daily climatological normals in a changing climate ». en. In : *Climate Dynamics* 53.1, p. 275-286. ISSN : 1432-0894. DOI : [10.1007/s00382-018-4584-6](https://doi.org/10.1007/s00382-018-4584-6).
- ROBIN, Y. et al. (2023). *Explore2 : Projections climatiques régionalisées : correction de biais et changements futurs*. Rapp. tech. LSCE ; Météo-France, p. 62. DOI : [10.57745/99X4CD](https://doi.org/10.57745/99X4CD).

- SAUQUET, E. et al. (2022a). *Explore2 : Identification de stations hydrométriques et piézomètres pour l'évaluation des modélisations hydrologiques et hydrogéologiques*. Rapp. tech. INRAE ; BRGM, p. 33.
- SAUQUET, E. et al. (2022b). *Explore2 : Points et supports de simulation des projections hydrologiques*. Rapp. tech. INRAE ; BRGM, p. 22. DOI : [10.57745/GYLJYP](https://doi.org/10.57745/GYLJYP).
- SAUQUET, E. et al. (2023). *Explore2 : Diagnostic des modèles hydrologiques : des données aux résultats*. Rapp. tech. INRAE ; IGE, p. 130. DOI : [10.57745/SQBZJM](https://doi.org/10.57745/SQBZJM).
- SCHABENBERGER, O. (2005). *Statistical methods for spatial data analysis*. eng. Chapman & Hall/CRC texts in statistical science series 64. Boca Raton : Chapman & Hall/CRC. ISBN : 978-1-58488-322-7.
- STORCH, H. von et F. ZWIERS (mars 2013). « Testing ensembles of climate change scenarios for “statistical significance” ». en. In : *Climatic Change* 117.1, p. 1-9. ISSN : 1573-1480. DOI : [10.1007/s10584-012-0551-0](https://doi.org/10.1007/s10584-012-0551-0).
- TRAMBLAY, Y. et al. (2024). *Explore2 : Scénarios d'extrêmes hydrologiques*. Rapp. tech. IRD ; INRAE : Météo-France ; CNRM ; BRGM, p. 85. DOI : [10.57745/K8YKCD](https://doi.org/10.57745/K8YKCD).
- VAUTARD, R. et al. (2021). « Evaluation of the Large EURO-CORDEX Regional Climate Model Ensemble ». en. In : *Journal of Geophysical Research : Atmospheres* 126.17. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2019JD032344>. ISSN : 2169-8996. DOI : [10.1029/2019JD032344](https://doi.org/10.1029/2019JD032344).
- VIDAL, J.-P. et al. (sept. 2016). « Hierarchy of climate and hydrological uncertainties in transient low-flow projections ». en. In : *Hydrology and Earth System Sciences* 20.9. Number : 9, p. 3651-3672. ISSN : 1607-7938. DOI : [10.5194/hess-20-3651-2016](https://doi.org/10.5194/hess-20-3651-2016).
- ZAITCHIK, B. F. et al. (2023). « Wetting and drying trends under climate change ». In : *Nature Water* 1.6, p. 502-513.
- ZHOU, S. et al. (2023). « Projected increase in global runoff dominated by land surface changes ». In : *Nature Climate Change* 13.5, p. 442-449.

Glossaire

BC Bias Correction, modèle de correction des biais systématiques produits par un couple GCM/RCM. Les biais systématiques sont par exemple des biais des valeurs moyennes, des biais de distribution, des biais sur les structures de co-variabilité entre différentes variables météorologiques simulées par une combinaison GCM/RCM particulière. [6](#), [11](#), [18](#)

chaîne de modélisation Une chaîne de modélisation est une chaîne de modèles permettant de simuler l'évolution temporelle, sur une période de temps donnée (passée, présente ou future), de différentes variables hydroclimatiques (par exemple : les précipitations). Dans Explore2, une chaîne de modélisation fait référence à un modèle de climat global, un modèle de climat régional, un modèle de correction des biais et un modèle hydrologique. Elle est utilisée pour produire différentes expériences climatiques correspondant à différents scénarios de forçage radiatif (v. entrée "Expérience climatique"). Par exemple : RCP8.5/CNRM-CM5/ALADIN63/ADAMONT/SIM2 (RCP/GCM/RCM/BC/HM). [6](#), [11](#)

effet principal L'effet principal est défini pour un modèle/scénario/traitement spécifique utilisé pour produire une partie des expériences climatiques d'un ensemble de projections donné. C'est l'effet marginal de ce modèle/scénario/traitement dans cet ensemble. Il est 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. On parlera par exemple de l'effet principal du GCM CNRM-CM5 sur le réchauffement estival projeté ou de l'effet principal du modèle hydrologique SIM2 sur la diminution des débits d'étiage estivaux. [21](#)

ensemble un ensemble de projections obtenu avec plusieurs chaînes de modélisation. [6](#), [11](#)

expérience climatique simulation obtenue avec une chaîne de modélisation lorsqu'elle est soumise à un scénario choisi des différents forçages qui influent le bilan radiatif de la Terre (principalement gaz à effet de serre et aérosols, activité solaire, activité volcanique). Une expérience climatique vise à donner une simulation des climats régionaux à attendre pour ce scénario, en particulier de l'ensemble des situations météorologiques possibles régionalement pour ce scénario (situations courantes, exceptionnelles et extrêmes, pluies fortes, sécheresses, vagues de chaleurs...). Une expérience climatique "historique" est effectuée en utilisant l'évolution historiques des forçages radiatifs, i.e. l'évolution des forçages qui a été observée au cours des décennies passées. Une expérience climatique "future" est effectuée pour un scénario d'émissions de gaz à effet de serre et aérosols choisi pour les décennies futures. L'expérience climatique couvre typiquement une période de temps longue (par ex. 1976-2005 pour les expériences historiques, 2006-2100 pour les expériences futures). [15](#), [23](#)

GCM Modèle de Climat Global (Global Climate Model), modèle physique de représentation du climat à l'échelle planétaire. Il permet de simuler l'évolution du climat global pour un scénario d'émissions choisi. [6](#), [11](#)

HM Hydrological Model, modèle hydrologique du fonctionnement d'un ou plusieurs bassins versants. Il permet de simuler l'évolution de l'hydrologie du bassin versant choisi qui pourrait résulter de l'évolution du climat régional simulée par le RCM, éventuellement corrigée de ses biais. [6](#), [11](#)

horizon futur période de temps future utilisée pour produire des graphiques et analyses sur le climat projeté. L'horizon futur peut être exprimé dans un référentiel temporel : il s'agit alors d'une "période future", e.g. 2036-2065 avec comme année centrale 2050. L'horizon futur peut être exprimé dans un référentiel lié au "niveau de réchauffement planétaire" atteint : par exemple, horizon de réchauffement +1.5°C ou +3°C. [21](#), [22](#)

indicateur 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. 6

IPCC The Intergovernmental Panel on Climate Change (Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat (GIEC). Emanant des Nations Unies, le GIEC est chargé de fournir des évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur les changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies d'atténuation et d'adaptation. 7, 11

membre plusieurs expériences climatiques sont parfois produites avec un même modèle pour un même scénario de forçage (par exemple plusieurs expériences d'un même GCM sont souvent produites pour un scénario d'émission RCP donné). Ces différentes expériences (ou ces différents membres de l'ensemble d'expériences) sont obtenues en faisant varier les conditions initiales de la simulation ou la physique du modèle. Ces différentes expériences sont souvent utilisées pour estimer la variabilité interne du climat. Dans Explore2, un seul membre par modèle est considéré. 22

narratif dans Explore2 : sous-ensemble de combinaisons RCP-GCM-RCM sélectionnées pour décrire des scénarios plausibles et contrastés au regard des différentes projections climatiques produites dans l'ensemble Explore2. Les principaux narratifs retenus pour Explore2 (au nombre de 4) ont été identifiés sur la base des changements du cumul annuel de précipitations et de la température moyenne annuelle simulés pour la France métropolitaine. 18, 25

période 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. 22, 23

période future période de temps future utilisée pour produire les 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. 14

prévision 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 (par exemple, 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 (e.g. 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 (e.g. 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 (e.g. 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. 11, 15

projection climatique synonyme d'expérience climatique pour une période future donnée. Souvent la projection fait référence au résultat d'une expérience climatique pour une période de temps future limitée en durée. Par exemple : projection pour le milieu de siècle (2040-2070). Les projections climatiques 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 des scénarios d'émission possibles pour les décennies à venir, mise à jour faite par ailleurs au regard de la trajectoire d'émission que l'on a observée jusqu'aux années récentes. Au sens large, une projection climatique peut faire référence à l'une ou l'autre des nombreuses variables liées au climat (e.g. sur l'hydrologie, la cryosphère, les écosystèmes...). 11

QUALYPSO méthode d'analyse statistique avancée permettant de caractériser différents aspects d'un ensemble de projections climatiques. QUALYPSO permet de déterminer les réponses climatiques des différentes chaînes de simulations, la moyenne d'ensemble de ces réponses climatiques, l'incertitude

totale associée et sa partition entre les différents types de modèles utilisés pour les projections (e.g. incertitude liée au GCMs, incertitude liée au RCM, ...). QUALYPSO permet aussi d'estimer l'effet principal de chacun des modèles considérés dans l'ensemble (e.g. effet principal du GCM CNRM-CM5). QUALYPSO est une Analyse de Variance (ANOVA) appliquée à des projections transitoires, ce qui permet d'estimer la "réponse climatique" (et par suite aussi la Variabilité Interne) de toute chaîne de modélisation même lorsqu'elle ne dispose que d'un seul membre. QUALYPSO utilise des techniques d'augmentation de données, ce qui permet aussi de l'appliquer à des ensembles de projections incomplets. La méthode est décrite de façon détaillée dans l'Annexe A. 6, 11

RCM Modèle de Climat Régional (Regional Climate Model), modèle physique de représentation du climat à l'échelle régionale. Il permet de simuler l'évolution du climat de la région d'intérêt (e.g. l'Europe) qui pourrait résulter de l'évolution du climat global simulée par un GCM choisi. 6, 11

RCP Les scénarios d'émission de gaz à effet de serre et aérosols retenus par l'IPCC pour le programme CMIP5 sont les dits scénarios RCP, pour "Representative Concentration Pathways". Ils décrivent chacun une trajectoire différente du bilan radiatif de la terre pour les décennies futures. Ils sont identifiés par un nombre qui correspond au surplus de bilan radiatif de la Terre en 2100. Parmi ces scénarios, le scénario dit RCP2.6 est un scénario optimiste et le scénario RCP8.5 est un scénario pessimiste. Pour le premier, le réchauffement moyen ne devrait pas dépasser 2°C en 2100. Pour le second, il pourrait atteindre ou dépasser 3.7°C. 6, 12

réponse climatique évolution 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). 15

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. 21

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. 6, 13

variable 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. 6

A La méthode QUALYPSO

QUALYPSO est une méthode d'analyse statistique développée pour caractériser les ensembles multi-scénarios, multi-modèles de projections climatiques (EVIN *et al.*, 2019). Elle fait appel à des méthodes statistiques avancées appliquées à des séries temporelles transitoires, dont des méthodes paramétriques d'extraction de signal (splines) et des méthodes d'analyse de variance (ANOVA).

Ressources possibles :

1. **Développements théoriques** : HINGRAY et SAÏD, 2014; EVIN *et al.*, 2019; HINGRAY *et al.*, 2019
2. **Présentation EGU2020** : HINGRAY et EVIN, 2020⁵,
3. **Package (R CORE TEAM, 2022)** : <https://cran.r-project.org/package=QUALYPSO>
4. **Applications** :
 - Précipitations ou températures régionalisées pour l'Europe (EVIN *et al.*, 2021) et pour l'Afrique (BICHET *et al.*, 2020),
 - Ressource solaire (BICHET *et al.*, 2019),
 - Débits d'étiage (VIDAL *et al.*, 2016), débits de crue (LEMAITRE-BASSET *et al.*, 2021),
 - Durée / extension de couvert nival (LAFAYSSE *et al.*, 2014).

A.1 Hypothèses de la méthode

QUALYPSO s'applique ici à un ensemble de N projections climatiques $Y_{s,g,r,b,h}(t)$ obtenues pour différents scénarios d'émission s , à l'aide de différentes chaînes de modélisation. Dans Explore2, une chaîne de modélisation comprend un modèle GCM g ; un modèle RCM r ; un modèle de correction de biais b et un modèle hydrologique h . QUALYPSO s'appuie sur deux hypothèses :

1. La variabilité interne (variance de l'écart à la réponse en changement climatique) est supposée être constante sur la période de simulation (par exemple 1976-2100),
2. Pour un scénario s donné, la réponse en changement climatique $RC_{s,g,r,b,h}^*(t)$ d'une chaîne de modélisation GCM g / RCM r / BC b / HM h peut s'écrire sous forme additive et linéaire (Section 3.1, Eq. 1).

A.2 Étapes de l'analyse QUALYPSO

Les différentes étapes de la méthode QUALYPSO sont rappelées ici :

1. Estimation de la réponse climatique $RC(t)$ de chacune des chaînes de modélisation.

Une étape clé de l'analyse, qui va pour beaucoup conditionner sa qualité, est l'estimation de la réponse climatique pour chaque chaîne. QUALYPSO utilise un modèle de tendance basé sur des splines cubiques appliqué aux projections transitoires disponibles sur l'ensemble de la période de simulation.

2. Estimation de la réponse en changement climatique $RC^*(t)$ de chacune des chaînes de modélisation

En accord avec la pratique courante, on considère des changements absolus pour la température (Eq. 2) et relatifs pour les autres indicateurs (Eq. 3). Ces changements sont toujours calculés par rapport à la période de référence (1976-2005 pour Explore2), en utilisant la réponse climatique estimée pour son année centrale (année 1990 pour Explore2) :

$$RC^*(t) = RC(t) - RC(t_{ref}), \quad (2)$$

$$RC^*(t) = \frac{RC(t) - RC(t_{ref})}{RC(t_{ref})}, \quad (3)$$

5. https://presentations.copernicus.org/EGU2020/EGU2020-21864_presentation.pdf

avec t l'année centrale de la période future considérée, t_{ref} l'année centrale de la période de référence, RC la réponse climatique et RC^* la réponse climatique en changement pour une chaîne $\{s, g, r, b, h\}$.

3. Estimation de la variabilité interne de cette chaîne sur la période d'analyse

Pour Explore2, la variabilité interne d'une chaîne est supposée constante dans le temps (en variance). Pour chaque chaîne $\{s, g, r, b, h\}$ et chaque horizon t , on considère tout d'abord les écarts entre la projection brute $Y(t)$ et la réponse en changement climatique $RC^*(t)$:

$$EC^*(t) = Y(t) - RC(t), \quad (4)$$

$$EC^*(t) = \frac{Y(t) - RC(t)}{RC(t_{ref})}. \quad (5)$$

selon que l'on considère des changements absolus ou relatifs, respectivement. La variabilité interne est ensuite estimée par la variance temporelle de ces écarts $EC^*(t)$, tout au long de la période considérée :

$$IV_{s,g,r,b,h} = \text{Var}\{EC^*(t)\}. \quad (6)$$

4. Estimation de la réponse moyenne en changement climatique de l'ensemble, $M(t)$, et estimation des effets principaux de chacun des scénarios/modèles, $ES_s(t), EG_g(t), ER_r(t), EB_b(t), EH_h(t)$.

Cette estimation consiste à estimer les différents termes de l'Eq. 1. Cette estimation est effectuée pour chaque horizon futur t à l'aide d'un modèle de régression linéaire, où on minimise les moindres carrés des résidus $\epsilon_{s,g,r,b,h}(t)$.

Dans un ensemble de projections complet, l'effet principal d'un modèle s'interprète facilement comme l'écart moyen entre 1) la réponse en changement climatique de toutes les chaînes de simulation utilisant ce modèle et 2) la réponse en changement climatique moyenne de l'ensemble (Fig. 35). Par construction, la somme des effets principaux des différents modèles appartenant à une catégorie de modèles donnée est nulle (Eq. 7) :

$$\sum_s ES_s(t) = \sum_g EG_g(t) = \sum_r ER_r(t) = \sum_b EB_b(t) = \sum_h EH_h(t) = 0. \quad (7)$$

Quel que soit le facteur ou la catégorie de modèle considéré, l'effet principal d'un scénario ou d'un modèle varie avec l'horizon temporel considéré.

5. Estimation des différentes sources d'incertitude pour l'ensemble.

La variabilité interne de l'ensemble est estimée par la moyenne d'ensemble des variabilités internes estimées pour les N chaînes de modélisation de l'ensemble :

$$IV = \frac{1}{N} * \sum_i^N IV_{s,g,r,b,h}. \quad (8)$$

Pour l'horizon futur t , l'incertitude associée aux scénarios d'émission et les incertitudes associées à chaque catégorie de modèles (incertitudes liées au GCM, au RCM, à la méthode de correction de biais, au modèle hydrologique) sont estimées comme suit :

- **L'incertitude scénario** est estimée par la variance des effets principaux $ES_s(t)$, $s = 1..N_s$, estimés pour les N_s scénarios considérés.
- De manière similaire, pour une catégorie de modèles donnée, la variance des effets principaux estimés pour les différents modèles de cette catégorie est une mesure de **l'incertitude modèle** associée à cette catégorie. Par exemple, l'incertitude GCM pour l'horizon futur t est la variance des effets principaux $E_g(t)$ des différents GCMs utilisés dans l'ensemble.

La variabilité résiduelle $RV(t)$ est la variance des résidus $\epsilon_{s,g,r,b,h}$.

Pour un scénario d'émission s , **l'incertitude totale** sur les projections (Eq. 9) est, en variance, la somme de la variabilité résiduelle, de la variance de chaque catégorie de modèle et la variabilité interne :

$$V_{TOT}(t) = \text{Var}(ES_s(t)) + \text{Var}(EG_g(t)) + \text{Var}(ER_r(t)) + \text{Var}(EB_b(t)) + \text{Var}(EH_h(t)) + RV(t) + IV, \quad (9)$$

avec $V_{TOT}(t)$ la variance totale de l'incertitude associée à l'ensemble de projections, et $RV(t)$ la variance résiduelle. Ces différentes estimations permettent aussi d'estimer la fraction de l'incertitude totale résultant de chaque source d'incertitude :

$$FV_x(t) = \text{Var}_x(t)/V_{TOT}(t), \quad (10)$$

où $FV_x(t)$ est la fraction de l'incertitude totale expliquée par la source d'incertitude associée à x (ici $x =$ scénario, GCM, RCM, BC, HM, RV ou IV). Un exemple d'évolution dans le temps des contributions relatives des différentes sources d'incertitude est donné par la Figure 33C. La variabilité interne est toujours la seule source d'incertitude en début de siècle. Sa contribution relative se réduit avec le temps au bénéfice de l'incertitude "Scénarios" et des différentes incertitudes "Modèle".

A.3 Ensembles de projection incomplets

La plupart des ensembles de projections sont "incomplets", c'est-à-dire qu'il manque certaines combinaisons de modèles ou de traitements. Par exemple, un ensemble où les projections ont été produites avec des chaînes GCM/RCM comprenant 3 GCMs (GCM1, GCM2, GCM3) et 2 RCMs (RCM1, RCM2) serait incomplet s'il manquait l'expérience GCM2/RCM2. L'ensemble Explore2 est très incomplet (Fig. 3).

Les effets principaux des modèles peuvent être estimés même lorsque l'ensemble est incomplet pour autant que la connectivité de l'ensemble soit assurée, sinon certains effets ne sont pas identifiables. Un ensemble est connecté si, en partant d'une combinaison RCP/GCM/RCM donnée, il est possible de couvrir toutes les combinaisons disponibles de l'ensemble, en changeant un à un et à tour de rôle, soit le GCM, soit le RCM, soit le RCP. En utilisant l'Eq. 1, il est possible de proposer des reconstitutions des réponses en changement pour chaque combinaison de modèles (Fig. 35).

Il est important de noter qu'avec l'estimation des effets avec le modèle linéaire 1 dans QUALYPSO, les modèles sur-représentés (resp. sous-représentés) dans l'ensemble initial n'ont donc pas un poids plus (resp. moins) important que les autres modèles dans les estimations (par exemple de la moyenne d'ensemble, des différentes sources d'incertitude). **Cela limite en particulier le risque d'une estimation biaisée de la moyenne directe de l'ensemble disponible qui pourrait résulter du déséquilibre de représentation entre certains scénarios ou modèles** (EVIN *et al.*, 2021). Ces déséquilibres ont d'autant plus d'impact sur les estimations que les modèles sur- ou sous-représentés sont éloignés de la moyenne d'ensemble.

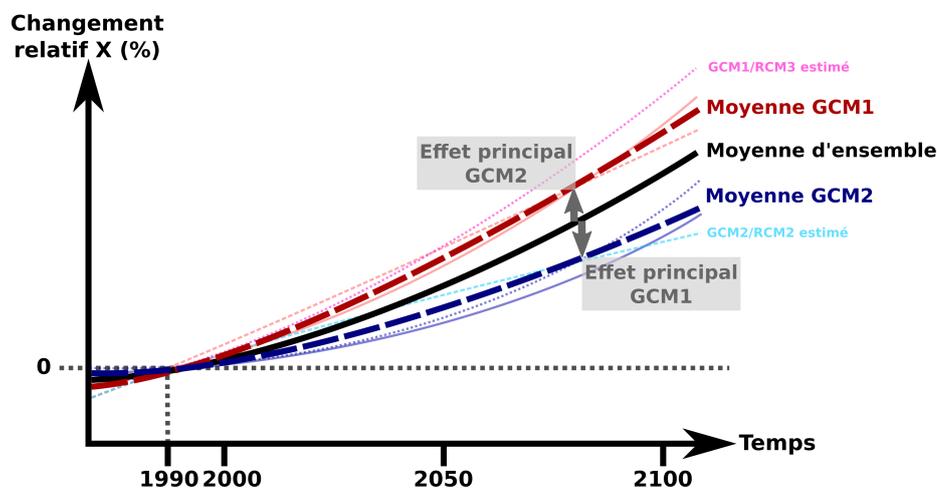


FIGURE 35 : Ensemble complété avec QUALYPSO. Les chaînes GCM1/RCM3 et GCM2/RCM2, non disponibles dans l'ensemble initial, ont été estimées avec QUALYPSO sur la base des effets principaux estimés respectivement pour GCM1, GCM2, RCM1, RCM2 et RCM3.

A.4 Forces de la méthode QUALYPSO

Estimation de la réponse climatique avec un modèle de tendance de type spline.

L'utilisation d'un modèle de tendance pour estimer la réponse climatique d'une chaîne de modélisation est un point fort de la méthode :

- Cela permet d'estimer la réponse climatique et la variabilité interne de chaque chaîne, même lorsque l'on ne dispose que d'un seul membre pour cette chaîne (par exemple un seul membre pour un GCM, une seule réalisation de la descente d'échelle pour une descente d'échelle statistique).
- En utilisant toutes les données de la période couverte par l'expérience climatique, cela permet aussi une estimation plus robuste de la réponse de chaque chaîne, et par suite une estimation plus robuste de l'ensemble des composantes de l'incertitude (HINGRAY *et al.*, 2019).
- L'utilisation d'une spline cubique permet, si besoin, de forcer un lissage important sur le signal brut. Le spline cubique permet aussi d'avoir un modèle de tendance suffisamment souple pour capter les inflexions dans la tendance sur la période, et suffisamment rigide pour ne pas polluer l'estimation de la réponse climatique par les fluctuations basses fréquences liées à la variabilité interne du climat.

L'estimation des effets Principaux des modèles

La décomposition de la réponse climatique en changement en une somme de moyenne d'ensemble et d'effets principaux est un autre point fort de la méthode. Cela permet d'estimer comment se positionne chacun des modèles dans l'ensemble.

Analyse pour différents horizons futurs

QUALYPSO est classiquement appliquée sur les chroniques temporelles de la variable d'intérêt. Dans ce contexte la référence chronologique est temporelle et les résultats sont présentés pour différents horizons temporels (par exemple 2040-2070, 2070-2100). Lorsqu'un modèle de tendance est utilisé pour toutes les chaînes de l'ensemble de projections, cela permet d'obtenir une évolution continue et progressive de toutes les variables d'intérêt extraites de l'ensemble (moyenne d'ensemble, effets principaux des modèles, ...) et donc d'assurer une cohérence de résultats entre différents horizons futurs (par exemple différents horizons temporels).

QUALYPSO et méthodes d'estimation conventionnelles

Pour les raisons mentionnées ci-dessus, **les estimations QUALYPSO sont différentes des estimations qui seraient obtenues avec d'autres méthodes "conventionnelles"**, potentiellement biaisées et moins robustes. C'est en particulier le cas lorsque la méthode conventionnelle effectue l'extraction de la réponse climatique par moyenne glissante 30 ans et estime le changement moyen de l'ensemble avec la moyenne d'ensemble de l'ensemble incomplet.

Cette différence est illustrée en Figure 36, pour le changement de la température moyenne estivale projeté en fin de siècle. Ici, les différences sont surtout marquées pour les projections basses obtenus avec le scénario RCP2.6 car QUALYPSO tient compte de la sous-représentation des chaînes obtenues avec ce scénario dans ses estimations.

A.5 Précautions d'usage de QUALYPSO

Différentes précautions sont à prendre pour appliquer QUALYPSO :

1. Vérifier les bonnes propriétés de l'ensemble de projections

- L'ensemble doit idéalement, pour chacun des modèles, comporter plusieurs chaînes de modélisation utilisant ce modèle. L'estimation de l'effet principal d'un modèle est d'autant plus robuste que le nombre de chaînes de modélisation utilisant ce modèle est important.
- Pour les ensembles incomplets, l'ensemble doit être connecté (section 2.1).
- Plus la longueur des chroniques à disposition pour l'analyse sont longues (par exemple 1976-2100), meilleure sera la qualité de l'analyse. QUALYPSO peut être utilisée sur des chroniques de durée réduite mais au détriment de la précision des estimations.

2. **Vérifier les bonnes propriétés statistiques de l'indicateur hydroclimatique.** Pour l'application de QUALYPSO, il est nécessaire 1) que la réponse climatique de l'indicateur ne sature pas sur une valeur bornée donnée et 2) que les erreurs résiduelles soient distribuées normalement.
3. **Évaluer la qualité et la pertinence de l'analyse.** Il n'y a pas de métrique numérique qui permette d'évaluer quantitativement la qualité et la pertinence d'une analyse QUALYPSO. Dans tous les cas de figure cependant, les résultats d'une analyse QUALYPSO nécessitent d'être évalués à dire d'expert. Pour cela, il est fortement recommandé d'effectuer une appréciation visuelle de l'évolution temporelle des différentes estimations obtenues lors des deux étapes de la méthode d'analyse (estimation des réponses climatiques et analyse de variance). La présence de fluctuations dans ces évolutions suggère souvent une estimation erronée des réponses climatiques pour certaines chaînes de modélisation, et suggère que le modèle de tendance est inapproprié (en l'occurrence un modèle trop adaptable aux fluctuations liées à la variabilité interne). L'homoscedasticité des écarts entre la réponse climatique ajustée et la projection brute est aussi importante à examiner. Ces écarts doivent être grossièrement distribués autour de zéro sur toute la période de temps considérée. Des écarts majoritairement positifs en début de période et majoritairement négatifs en fin de période révéleraient par exemple un mauvais ajustement.
4. **Vérifier que la variabilité interne peut être supposée constante au cours du temps.** Les écarts à la réponse climatique doivent être identiquement distribués dans le temps, ce qui peut être vérifié visuellement. Un test de Brown-Forsythe (BROWN et FORSYTHE, 1974) peut être appliqué en complément.
5. **Garder en tête les limites de l'exercice et ne pas s'illusionner de certitude sur les incertitudes estimées.** On ne le répétera pas assez : les résultats de QUALYPSO ne doivent pas être sur-interprétés, ils sont conditionnels à l'ensemble de projections retenu pour l'analyse. C'est vrai pour la moyenne d'ensemble projetée et pour la plage estimée des incertitudes associées. Même si elle peut en donner une idée, la plage d'incertitudes ne couvre pas nécessairement le futur qui se réalisera vraiment dans les décennies à venir.

Les conditions du point 2 empêchent d'appliquer QUALYPSO pour certains indicateurs, typiquement pour le cumul pour les précipitations solides (chutes de neige) de novembre-avril à faible altitude ou le débit d'étiage de cours d'eau présentant des assecs ponctuels. Ces indicateurs atteignent souvent une valeur seuil pour certaines périodes (par exemple des cumuls de neige nuls en fin de siècle sous le RCP8.5). Les réponses climatiques sont alors "tronquées" vers 0 et les conditions de normalité des erreurs résiduelles ne sont pas vérifiées. Pour cette raison, certains indicateurs ont été exclus de l'analyse QUALYPSO. C'est le cas des précipitations solides qui ne sont étudiées que pour les altitudes au-dessus de 1000 m.

A.6 Estimation des projections "basses" et "hautes"

Dans ce rapport, nous nous proposons une estimation des projections "basses" et "hautes" selon les quantiles 5% et 95% de l'ensemble, pour chaque scénario. La méthode QUALYPSO nous permet d'estimer la variabilité (écart-type) totale associée à chaque scénario d'émission, hors variabilité interne :

$$s_Q(t) = \sqrt{V_{TOT}(t) - \text{Var}(ES_s(t)) - IV}. \quad (11)$$

Cette estimation est cependant la même quel que soit le scénario d'émission s , par construction. Nous proposons donc de tenir compte des variabilités différentes selon le scénario en estimant également la variabilité directement à partir des réponses climatiques en changement :

$$s_E(s, t) = \sqrt{\text{Var}(RC_s^*(t))}, \quad (12)$$

pour un scénario s et un horizon t et où $RC_s^*(t)$ indique l'ensemble des réponses climatiques en changement disponibles pour le scénario s .

Nous considérons ensuite des réponses climatiques en changement modifiées afin de prendre en compte l'estimation $s_Q(t)$:

$$\tilde{RC}_{s,g,r,b,h}^*(t) = RC_{s,g,r,b,h}^*(t) \times \frac{s_Q(t)}{s_E(s, t)}. \quad (13)$$

Enfin, les estimations des projections "basses" et "hautes" pour un scénario d'émissions correspondent aux quantiles 5% et 95% de ces réponses climatiques en changement modifiées correspondantes à ce scénario. Il est important de noter que cette estimation heuristique est uniquement utilisée à des fins d'illustration dans les volets A des figures synthétisant les résultats QUALYPSO (par exemple la Figure 5).

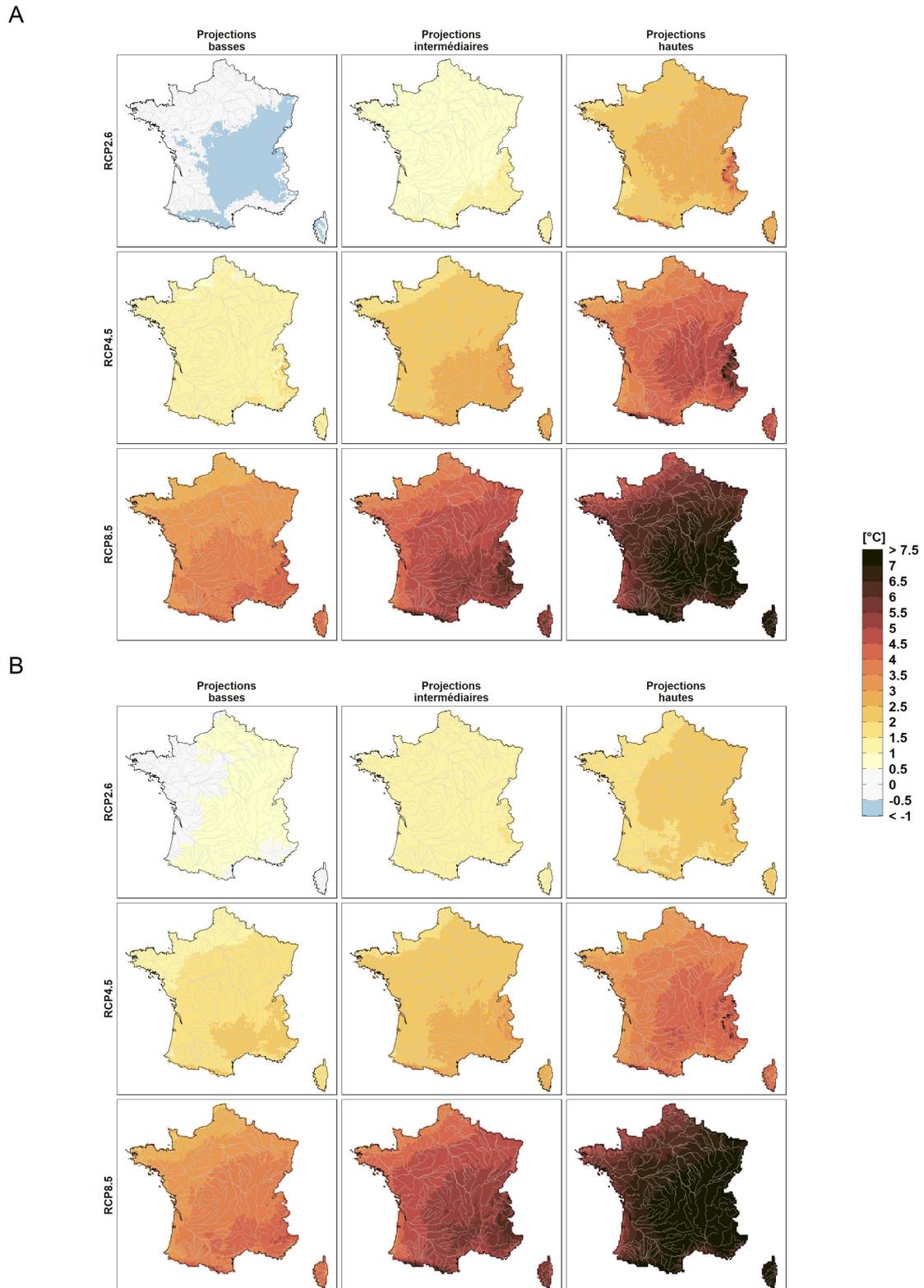


FIGURE 36 : Comparaison des changements projetés pour l'évolution de la température moyenne estivale entre la méthode QUALYPSO (A) et la méthode "conventionnelle" (B). Changement absolu entre l'horizon futur 2071-2100 et la période de référence 1976-2005. En lignes les trois scénarios RCP et en colonnes la valeur intermédiaire (moyenne) de l'ensemble et sa gamme d'incertitudes (basse et haute, resp. quantiles 5% et 95%). Dans les deux cas, les hachures (seulement sur les projections intermédiaires) montrent les cas où moins de 80% des projections de l'ensemble projettent un changement du même signe (pas d'accord). (A) Extraction de la fonction de réponse par modèle spline et estimation d'un modèle linéaire par QUALYPSO. (B) Extraction de la fonction de réponse par moyenne glissante 30 ans et moyenne directe de l'ensemble "incomplet".

B Reconstruction des réponses climatiques moyennes

Comme discuté à la section 5, les résultats des analyses d'incertitudes concernant les projections hydrologiques reposent sur les simulations disponibles en chaque station. Les stations pour lesquelles les modèles hydrologiques ont produit des simulations sont variables d'un modèle à un autre, en nombre (Tableau 1) mais aussi en couverture spatiale (SAUQUET *et al.*, 2022a). Les modèles EROS, J2000 et MORDOR-TS couvrent uniquement une partie du territoire. MORDOR-SD et SIM2 ont simulé environ 1/6ème de tous les points de simulation dont seulement 201 stations en commun. Seuls les modèles GRSD, ORCHIDEE et SMASH couvrent une grande proportion des 3991 points de simulations. Pour que les résultats des projections soient comparables d'une station à l'autre, nous avons proposé une approche permettant d'estimer les réponses climatiques moyennes des différents modèles hydrologiques aux stations où ils n'ont pas produit de simulations, pour chaque scénario d'émission. **Pour chaque station, chaque scénario d'émission s et chaque modèle hydrologique h manquant, nous avons estimé $\hat{M}_{s,h}(t)$, c'est-à-dire la réponse climatique moyenne en changement associé à ce scénario et à ce modèle hydrologique h . On ne cherche donc qu'à reconstituer le signal moyen par scénario pour ce modèle hydrologique et pas toutes les trajectoires des différentes chaînes de modélisation.** Les principes de la méthode de reconstruction sont décrits ci-dessous.

La méthode de reconstruction repose sur deux hypothèses complémentaires :

- On suppose tout d'abord que $\hat{M}_{s,h}(t)$ est similaire pour des stations voisines et qu'il peut donc être interpolé spatialement. Cette première hypothèse semble être confortée par les effets des HMs obtenus pour le QA, QJXA et QMNA (Figs. 24-28). Pour un modèle hydrologique h donné, l'idée est donc de reconstruire les réponses climatiques moyennes à une station cible sur la base des réponses climatiques moyennes des stations voisines avec des techniques géostatistiques.
- On suppose également qu'il est possible d'utiliser le lien entre $\hat{M}_{s,h_1}(t), \hat{M}_{s,h_2}(t), \dots$ pour différents modèles hydrologiques h_1, h_2, \dots . Les figures S53-S55 dans le supplément présentent les corrélations des réponses climatiques moyennes pour les différents couples de modèles hydrologiques, pour le scénario RCP8.5, en fin de siècle. Ces corrélations sont toutes positives, ce qui indique que les différents modèles convergent globalement sur le signe des changements et souvent également sur leur intensité. Les corrélations sont souvent supérieures à 0.5, et parfois très élevées (0.97 entre CTRIP et SIM2 pour le QA, 0.87 entre MORDOR-SD et EROS pour le QJXA, 0.72 entre GRSD et SMASH pour le QMNA), globalement plus élevées pour le QA que pour le QJXA, et plus élevées pour le QJXA que pour le QMNA.

Plusieurs méthodes de reconstruction, basées sur ces hypothèses, sont possibles. Trois méthodes ont été testées ici. La méthode retenue est décrite plus bas. Les trois méthodes considérées sont :

- une méthode d'interpolation simple (krigeage ordinaire, "OK"),
- une méthode d'interpolation permettant de prendre en compte les prédictions d'un autre modèle disponible à la station cible (krigeage avec dérive externe, "KED"),
- et une méthode d'intelligence artificielle (forêt aléatoire, "RF") permettant de prendre en compte en plus la surface du bassin de la station cible.

La figure S56 du supplément montre les erreurs moyennes absolues obtenues avec ces trois méthodes lorsque les réponses climatiques moyennes de SMASH sont utilisées comme co-variable, dans un exercice de validation croisée. On peut retenir que :

- Les méthodes de krigeage avec dérive externe et forêt aléatoire ont des performances similaires et surpassent systématiquement le krigeage ordinaire, ce qui indique bien que les réponses climatiques moyennes obtenues avec un autre modèle disponible à la station cible donnent une information exploitable.
- Les erreurs moyennes absolues varient environ entre 2% et 6% et dépendent de l'indicateur (elles sont plus faibles pour le QA et plus élevée pour le QMNA) et du modèle hydrologique (elles sont plus élevées pour CTRIP et ORCHIDEE). Pour le QMNA, ces erreurs moyennes absolues peuvent dépasser 10% pour CTRIP et ORCHIDEE, selon le scénario RCP.

- Les performances obtenues avec la méthode KED sont similaires à celles obtenues avec la méthode RF (légèrement supérieures pour le QJXA et le QMNA).

La méthode de reconstruction sélectionnée est la méthode de krigeage avec dérive externe, notée KED (SCHABENBERGER, 2005), sur la base de cette évaluation et en raison de sa simplicité. Les détails de la méthode KED appliquée sont les suivants :

- Pour chaque station s , on applique tout d'abord la méthode QUALYPSO indépendamment pour chaque modèle hydrologique h qui a fourni des simulations. On obtient la réponse climatique moyenne $\bar{Q}_{h,s}^s(t)$ de ce modèle pour chacun des scénarios s .
- Pour ce modèle h et pour chaque scénario s , on ajuste un variogramme sphérique à ces réponses climatiques moyennes $\bar{Q}_{h,s}^{i=1}(t), \dots, \bar{Q}_{h,s}^{n_h}(t)$ où i est l'index des n_h stations disponibles pour ce modèle.
- Pour chaque scénario s et une station i où il est nécessaire de reconstruire la réponse climatique moyenne, la co-variable utilisée comme dérive externe est la réponse climatique moyenne à la station cible obtenue avec SMASH ($\bar{Q}_{SMASH,s}^i(t)$). Les simulations de SMASH étant disponibles sur 3821 points de simulation, ce choix permet d'améliorer la cohérence des reconstructions. S'il n'est pas disponible, on exploite, par ordre de préférence, les simulations de GRSD, CTRIP et ORCHIDEE.

Les figures S57-S59 en supplément présentent les cartes des réponses climatiques moyennes obtenues pour chaque scénario RCP et chaque modèle hydrologique, en complétant les changements projetés des simulations disponibles par les changements projetés reconstruits.