



**HAL**  
open science

## Notice de présentation des projections et incertitudes pour Explore2: version courte

Alix Reverdy, Guillaume Evin, Benoît Hingray

### ► To cite this version:

Alix Reverdy, Guillaume Evin, Benoît Hingray. Notice de présentation des projections et incertitudes pour Explore2: version courte. INRAE; CNRS. 2023. hal-04258394v2

**HAL Id: hal-04258394**

**<https://hal.inrae.fr/hal-04258394v2>**

Submitted on 19 Dec 2023

**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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0  
International License



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

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

**16/10/2023**

Avec le soutien financier de :



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

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

## Table des matières

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Introduction .....   | 10 |
| 1.1   | Objectif du document.....  | 10 |
| 1.2   | Préambule : ensemble de projections et incertitudes.....                 | 10 |
| 1.2.1 | Chaines de modélisation utilisées pour les projections d’Explore2.....   | 10 |
| 1.2.2 | L’ensemble de projections climatiques d’Explore2.....                    | 11 |
| 1.3   | Analyses et graphiques pour caractériser l’ensemble de projections ..... | 11 |
| 1.3.1 | Représentation des incertitudes Explore2 et incertitudes réelles.....    | 11 |
| 1.3.2 | Représentations graphiques pour Explore2.....                            | 11 |
| 1.3.3 | Variable considérée pour les illustrations de la notice .....            | 11 |
| 2     | Représentations chronologiques par point de grille .....                 | 13 |
| 2.1   | Projections brutes .....   | 13 |
| 2.2   | Changements projetés .....   | 15 |
| 3     | Représentations cartographiques à l’échelle nationale .....              | 17 |
| 4     | Annexe : Modèles utilisés dans Explore2 .....                            | 19 |
| 5     | Références .....   | 20 |

## Résumé

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

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

## Acronymes

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

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

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

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

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

## Glossaire

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

## Liste des figures

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

**Figure 2.2 : Dispersion des réponses climatiques en changement relatif des cumuls de précipitations estivales sur le territoire du bassin Rhône-Méditerranée, issues de la méthode QUALYPSO.** Période de référence 1990. .... 15

**Figure 3.1 : Carte du changements relatif du cumul des précipitations estivales pour la France métropolitaine en RCP8.5 (%), par rapport à la référence 1990, à 3 horizons temporels : 2030, 2050 et 2085 (en lignes).** En colonnes sont donnés 1) le quantile 5% (projections basses), 2) la moyenne d'ensemble et 3) le quantile 95% (projections hautes) de l'ensemble Explore2 tel qu'estimés avec QUALYPSO (donc la moyenne d'ensemble et les bornes de l'intervalle d'incertitude à 90%). Cet intervalle d'incertitude prend en compte la dispersion entre les GCMs, les RCMs, les BCs et la variabilité résiduelle. Il ne prend pas en compte la variabilité interne. Pour la moyenne d'ensemble (colonne du milieu), le niveau d'accord entre chaînes de modélisation sur le signe du changement est donné par le figuré sous forme de hachures. Les zones présentant le figuré ont un niveau d'accord sur le signe du changement entre les chaînes de modélisation inférieur à 80%. Maillage 8x8km (SAFRAN). ..... 17

## Liste des tableaux

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

# 1 Introduction

## 1.1 Objectif du document

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

La méthode d'analyse fait appel à des méthodes statistiques avancées, qui permettent de produire différents types de résultats et de représentations graphiques. Le présent document en propose un niveau de lecture simplifié. Il utilise les résultats principaux. **Un niveau de lecture plus approfondi est possible. Il est décrit dans un document plus détaillé.**

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

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

## 1.2 Préambule : ensemble de projections et incertitudes

### Incertitudes associées aux projections climatiques

De façon générale, les incertitudes sont dues :

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

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

#### 1.2.1 Chaînes de modélisation utilisées pour les projections d'Explore2

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

1. Un modèle de climat global (GCM), qui simule l'évolution du climat global pour le scénario d'émission retenu,
2. Un modèle de climat régional (RCM), qui simule l'évolution du climat de la région d'intérêt
3. Un modèle de correction des biais (BC) systématiques des modèles précédents
4. Un modèle hydrologique (HM), qui simule l'évolution de l'hydrologie du bassin versant choisi

Pour chaque type de modèle, on a généralement à disposition plusieurs modèles pour effectuer les simulations. Pour le GCM par exemple, on utilise dans Explore2 l'un ou l'autre des GCMs suivants : CNRM-CM5-LR de Météo France, IPSL-CM5A-MR de l'IPSL, le modèle communautaire européen EC-EARTH, etc. (cf. Annexe n°1).

### 1.2.2 L'ensemble de projections climatiques d'Explore2

L'ensemble de projections climatiques d'Explore2 a été obtenu avec trois scénarios d'émission (RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5) et une vingtaine de chaînes de modélisation. Ces chaînes utilisent six GCMs (voir Annexe n°1), neuf RCMs (voir Annexe n°1), deux méthodes de corrections de biais (ADAMONT et R2D2) et 4 à 8 MHs selon les bassins versants.

## 1.3 Analyses et graphiques pour caractériser l'ensemble de projections

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

Dans Explore2, nous estimons principalement

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

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

### 1.3.1 Représentation des incertitudes Explore2 et incertitudes réelles

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

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

**Par ailleurs, même si elle peut en donner une idée, la plage d'incertitude estimée à partir des projections de l'ensemble Explore2 NE CORRESPOND PAS à la plage d'incertitude réelle sur les futurs possibles (v. le rapport "incertitudes" du projet Explore2 pour plus de détails à ce sujet).**

### 1.3.2 Représentations graphiques pour Explore2

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

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

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

### 1.3.3 Variable considérée pour les illustrations de la notice

Les illustrations qui suivent ont été obtenues pour les projections du « cumul des précipitations estivales ». Des analyses et représentations similaires seront proposées dans Explore2 pour des indicateurs sur les

débits ou pour d'autres indicateurs climatologiques, tels que ceux présentés dans des « fiches résultats par bassins versants ».

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

## 2 Représentations chronologiques par point de grille

### 2.1 Projections brutes

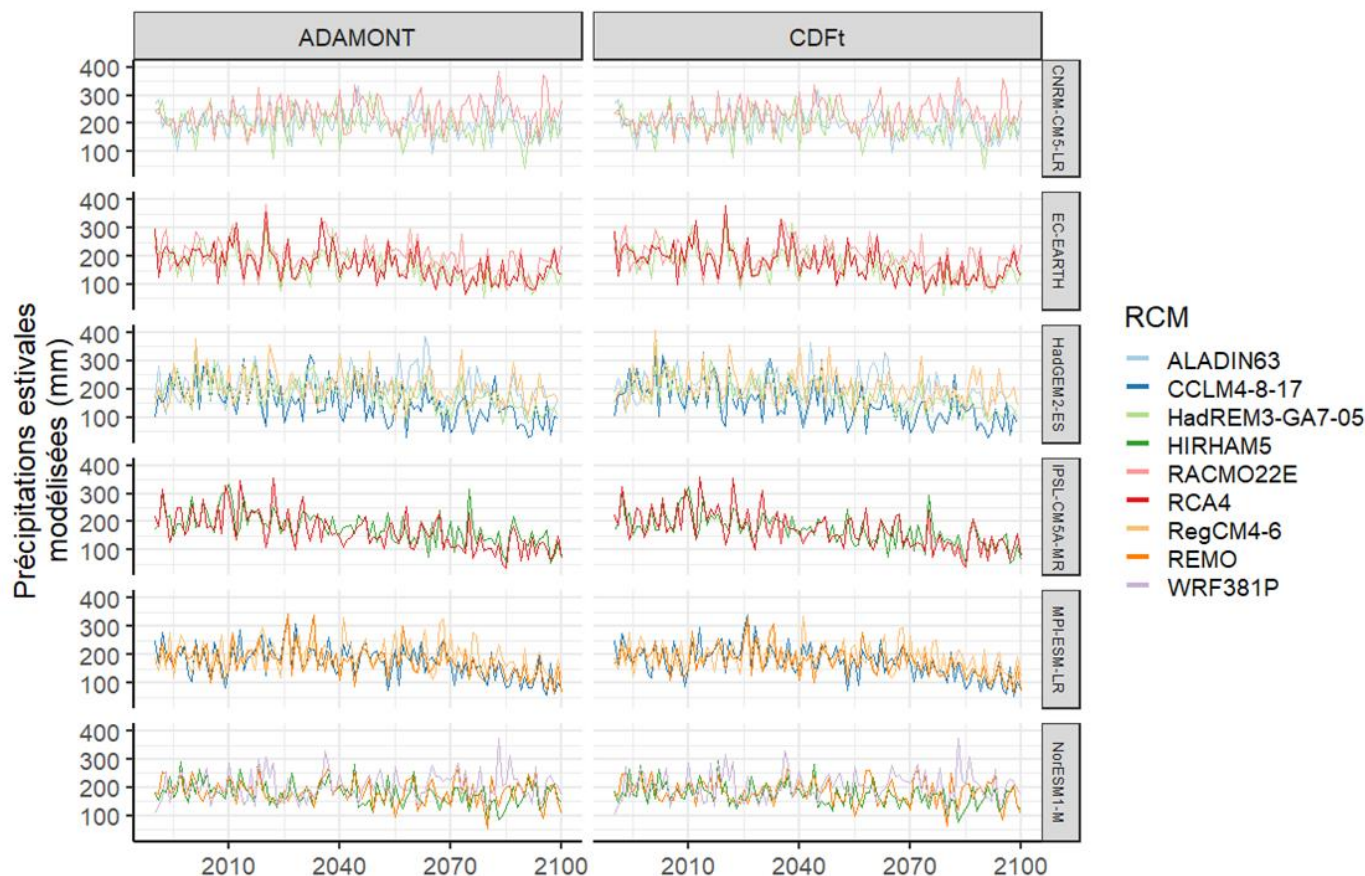


Figure 2.1 : Projections brutes du cumul des précipitations estivales (mm) pour le territoire de l'Agence du bassin Rhône-Méditerranée et le scénario RCP8.5. Chaque graphique montre les projections obtenues avec les différents RCMs disponibles pour un même couple GCM/BC. Dans cet ensemble de projection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

#### Utilité de ces figures pour l'utilisateur :

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

### Eclairages sur les résultats présentés :

1. Le cumul des précipitations estivales projeté avec la chaîne RCP8.5/IPSL-CM5A-MR/RCA4/R2D2 a tendance à diminuer sur le 21<sup>e</sup> siècle, mais les fluctuations interannuelles importantes peuvent toujours conduire à des alternances d'années sèches et humides, bien qu'un peu plus sèches et un peu moins humides en fin de siècle.

### A noter :

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



## 2.2 Changements projetés

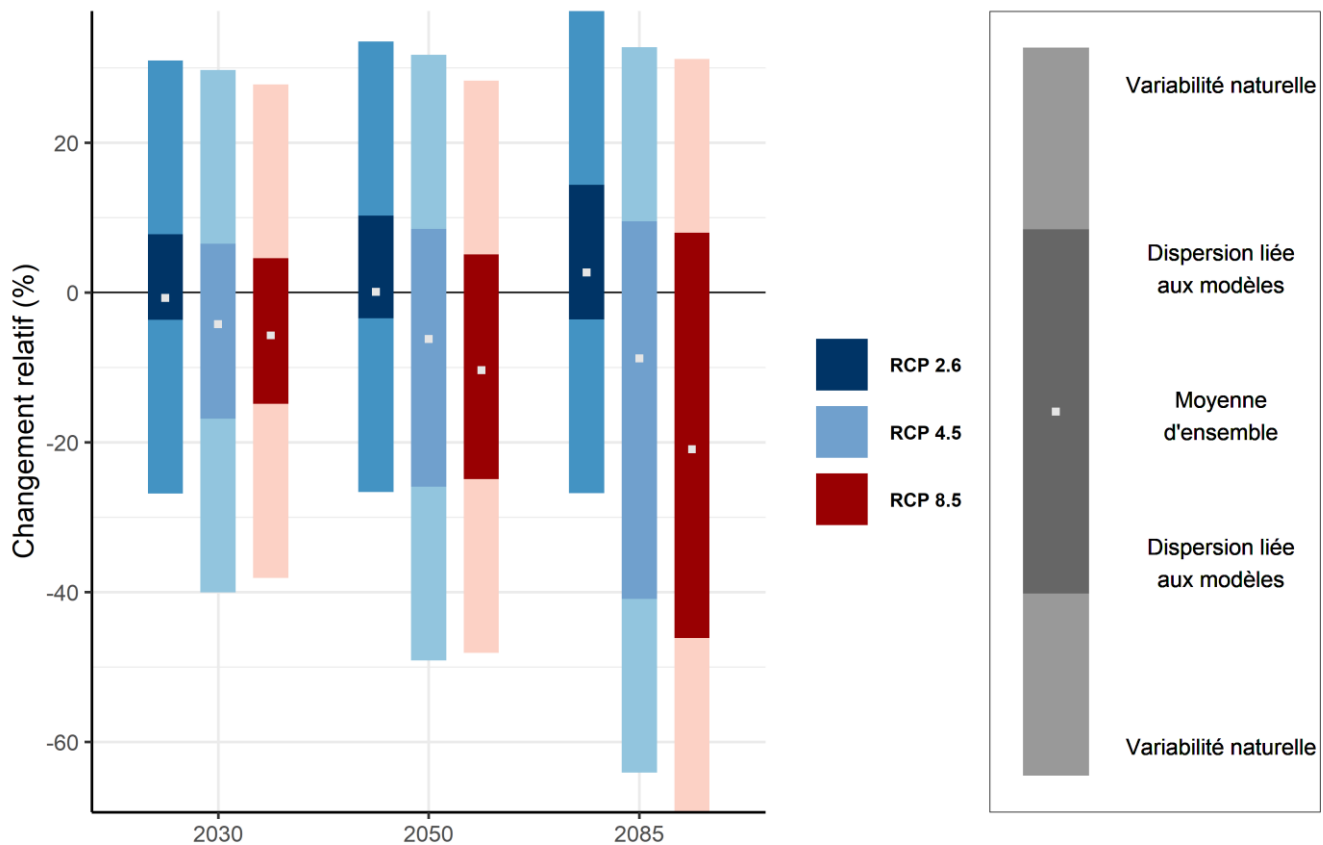


Figure 2.2 : Dispersion des réponses climatiques en changement relatif des cumuls de précipitations estivales sur le territoire du bassin Rhône-Méditerranée, issues de la méthode QUALYPSO. Période de référence 1990.

### Utilité pour l'utilisateur :

1. Cette représentation permet une comparaison directe des changements projetés entre les scénarios RCPs et une vision rapide de l'étendue des futurs projetés pour un point de grille, à la fois en termes de dispersion entre les chaînes de modélisations et en termes de variabilité naturelle intrinsèque du climat.

### Eclairages :

1. Plus l'on progresse dans le temps, plus l'incertitude liée à la modélisation (dispersion entre les tendances des projections) augmente (l'étendue de la zone foncée augmente). Par contre la variabilité interannuelle (alternance d'années sèches et humides indépendamment de la tendance en changement) reste la même.
2. En 2085 même si les projections avec les RCPs 2.6 et 8.5 se recoupent, les moyennes de ces ensembles sont relativement différentes avec respectivement +4% et -20% de changement moyen du cumul des précipitations estivales.
3. Quel que soit le scénario d'émission, l'incertitude sur les changements de précipitations estivales est importante. Même le signe du changement est incertain ; pour le scénario RCP4.5 en fin de siècle, les changements vont de -40% à +10% selon les chaînes de modélisation considérées.

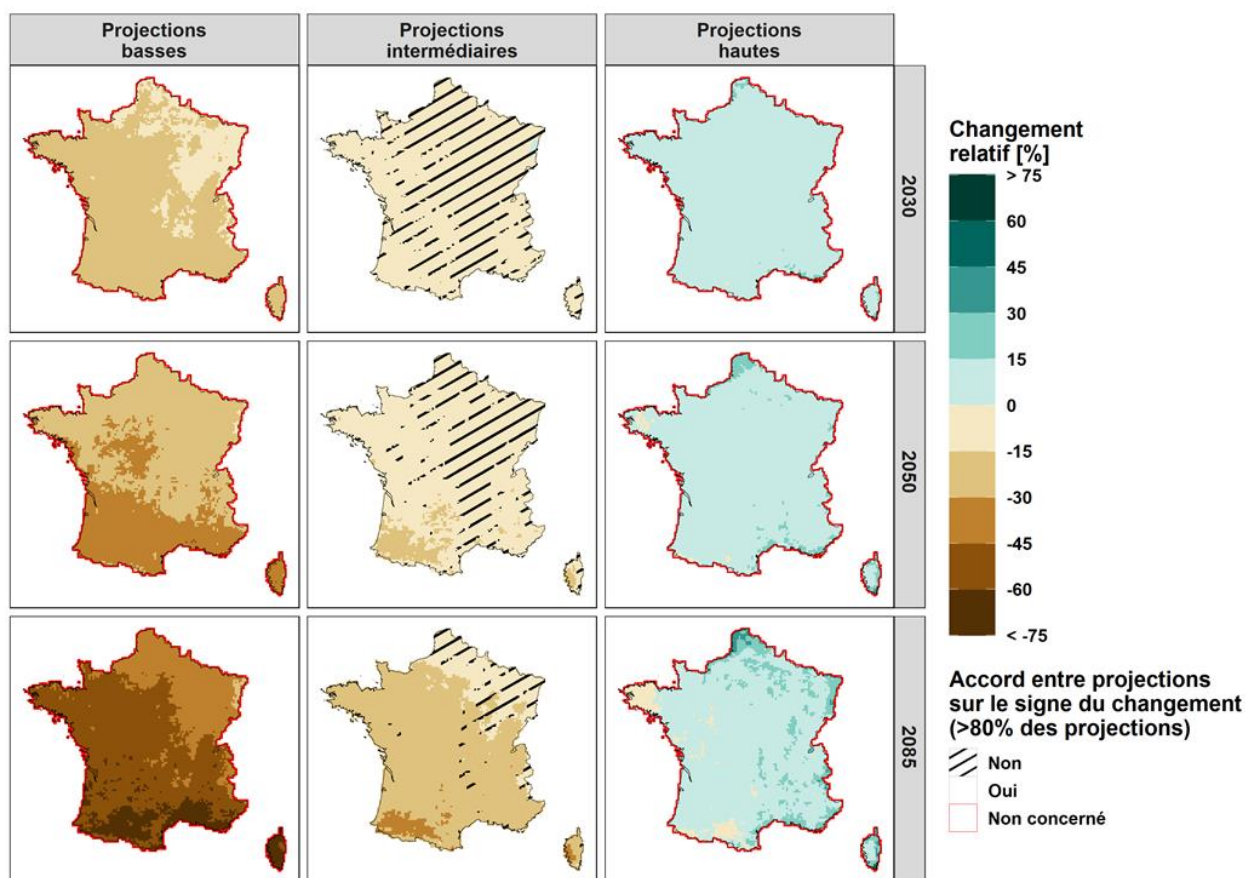
4. L'incertitude liée à la dispersion entre les modèles est plus forte en RCP8.5 que dans les autres scénarios d'émission.

**A noter :**

1. Les valeurs moyennes fournies sont **des moyennes d'ensemble de réponses en changement climatique** (tendance du signal sans variabilité naturelle). Elles sont données en changement relatif à la période de référence 1976-2005.
2. En première approximation, les limites inférieure et supérieure de la plage d'incertitude correspondent aux percentiles 5 et 95% des réponses climatiques obtenues avec les différentes chaînes de simulation de l'ensemble considéré. Il ne faut pas donner d'interprétation probabiliste à ces quantiles.

### 3 Représentations cartographiques à l'échelle nationale

En complément des représentations chronologiques ci-dessus, fournies en moyenne sur un territoire donné, des représentations cartographiques similaires à l'échelle nationale peuvent également être



proposées.

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

#### Utilité pour l'utilisateur :

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

#### Eclairages :

1. Pour la moyenne d'ensemble des changements estimés, on observe une variation spatiale assez importante du changement relatif du cumul des précipitations estivales à l'échelle du territoire en 2085, avec des valeurs moyennes comprises entre environ 0% et -45% suivant la région, mais des transitions spatiales assez régulières.
2. Plus l'horizon temporel est distant, plus le changement (positif ou négatif) est marqué et l'incertitude (intervalle 5%/95%) issue de la modélisation est grande. Plus le RCP est pessimiste (RCP8.5), plus l'assèchement est marqué, mais plus la dispersion augmente.

3. L'intervalle d'incertitude 5%/95% produit des valeurs dépassant -75% au Sud et +30% au Nord en 2085.

**A noter :**

1. Il ne faut pas donner d'interprétation probabiliste aux quantiles 5%/95% utilisés pour caractériser les limites inférieure et supérieure de la plage d'incertitude.
2. La borne supérieure de l'intervalle d'incertitude (quantile 95%) correspond à la valeur prise par une des chaînes de modélisation de l'ensemble considéré. **La chaîne en question peut différer d'une maille à l'autre. La carte du quantile 95% ne correspond donc *a priori* pas à la carte d'une chaîne de modélisation particulière.** C'est la même chose pour la carte du quantile 5%.

## 4 Annexe : Modèles utilisés dans Explore2

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

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



DRIAS 2020



Explore2



Narratifs Explore2

## 5 Références

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

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

*Présentation de vulgarisation de la méthode QUALYPSO :*

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

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

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