

Le Futur des Crues en France métropolitaine : Projections Explore2 Incertitudes et enseignements pour la communauté scientifique

Benoît HINGRAY, CNRS, IGE (Grenoble)
Guillaume EVIN et collègues Explore2

Pour en savoir plus :

- Dataverse Explore2 : <https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataverse/explore2>
- Evin et al. 2026 : Uncertainty in Explore2 : doi.org/10.5194/hess-30-1023-2026
- Webinaire TRACCS « Explore2 » : cf QRCode



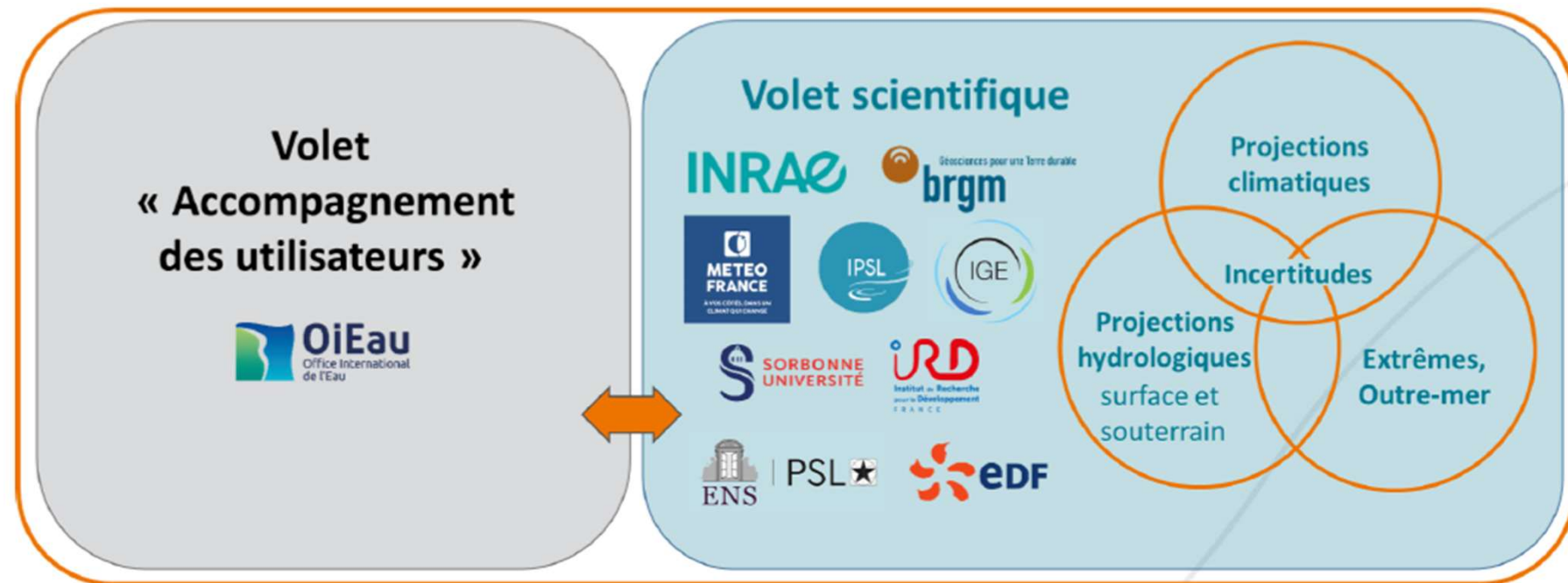
Atelier SYMBHI – Grenoble – 24 Février 2026

- **Une mobilisation conjointe scientifiques et acteurs de l'eau :**

- d'actualiser les connaissances d'  sur les climats et l'hydrologie futurs possibles pour la France au 21e siècle (1976-2100) sur la base d'avancées scientifiques et de modèles améliorés
- de faciliter leur appropriation par les acteurs pour l'adaptation

- **Un projet :**

- Mobilise 10 équipes de recherche (Climat, Hydro)
- soutenu par le MTECT et l'OFB, coordonné par l'OiEau et INRAE (2021-2025)



VOLET SCIENTIFIQUE : APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

Mise en œuvre d'une approche de simulation numérique

multi-scénarios et multi-modèles

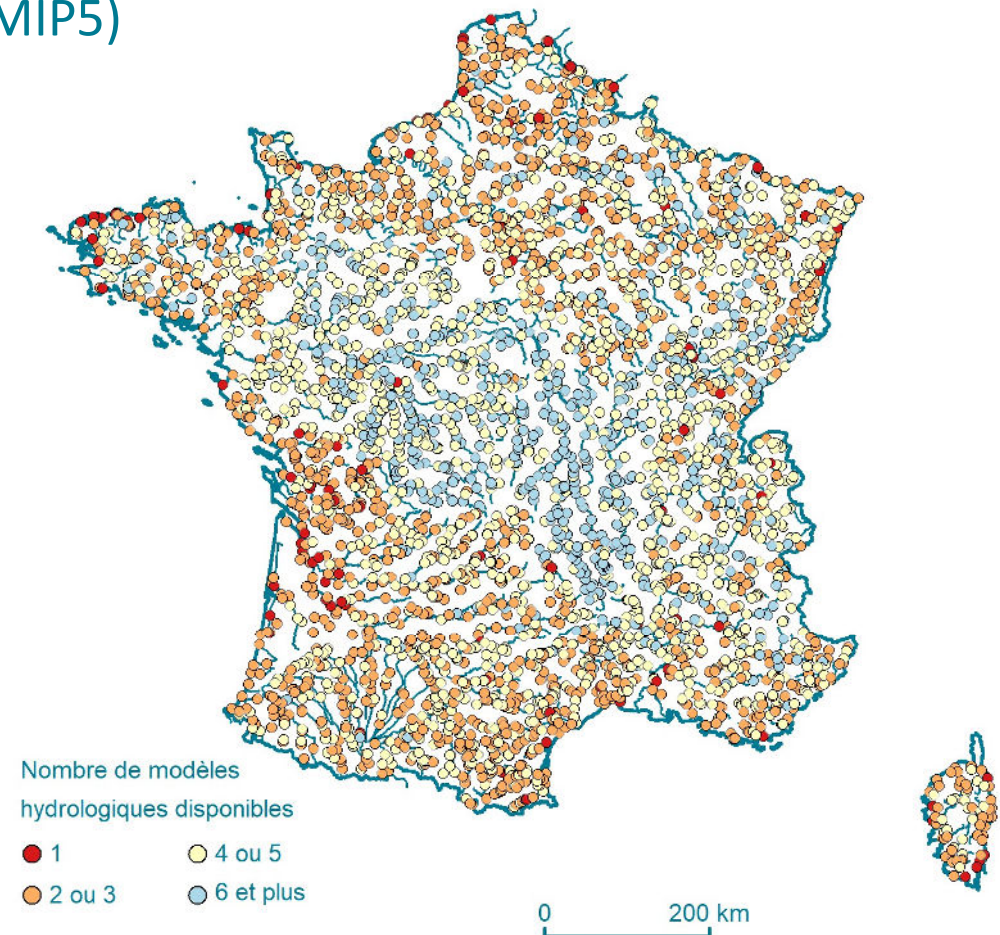
uniforme sur l'ensemble du territoire et du 21e siècle

raccord avec les standards de l'IPCC (exp. climatiques CMIP5)

pour :

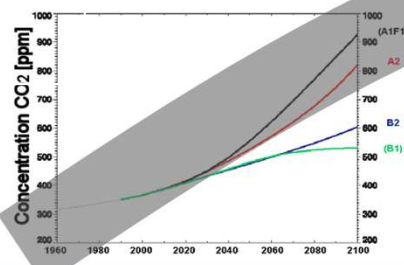
- explorer des futurs possibles
- apprécier les incertitudes associées aux projections
- évaluer ce qu'on peut dire / ne pas dire des futurs de l'eau

→ **Un ensemble de projections inédit en termes de richesse de modèles appliqués, de couverture spatiale, (~4000 points de simulation) sans équivalent en Europe**

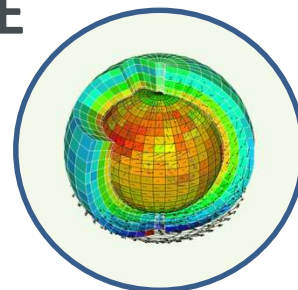


UNE PROJECTION CLIMATIQUE

Une chaîne de modélisation Des scénarios

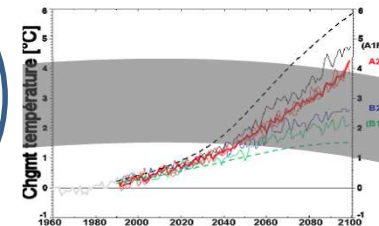


**Scénario d'émission
Gaz à Effet de Serre
et Aérosols**



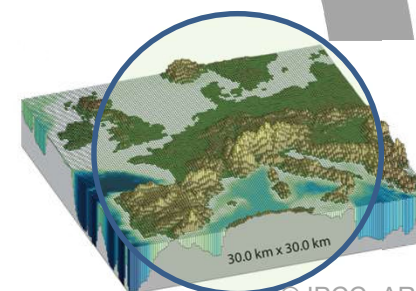
© CEA/DSM 2008

**Modèle de
Climat Global
(GCM)**

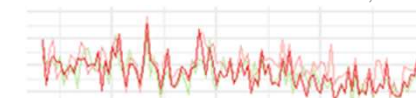


**Scénario
climatique global**

**Modèle
Zoom Régional**



© IPCC, AR5



**Scénario
climatique régional**

**Modèle
Hydrologique**



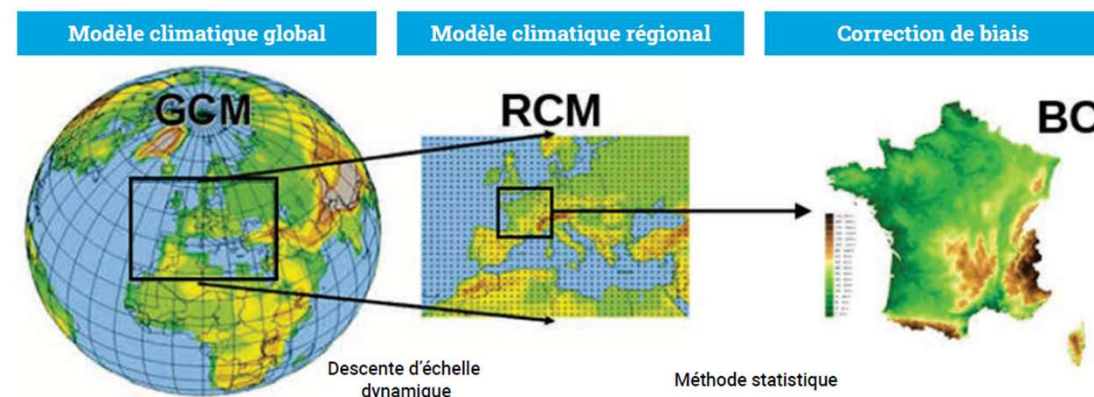
© François 2013

**Scénario
hydrologique**



LE ZOOM REGIONAL : TROIS FAMILLES DE MODELES

- **Régionalisation dynamique**



Lois physiques (conservation, état)
> cohérence physique entre variables
> nouveaux objets météo. possibles

Limites :

> Données à ajuster aux études d'impact... (biais, résolutions, ...)
> Paramétrisations sous maille :

Validité en climat futur ??

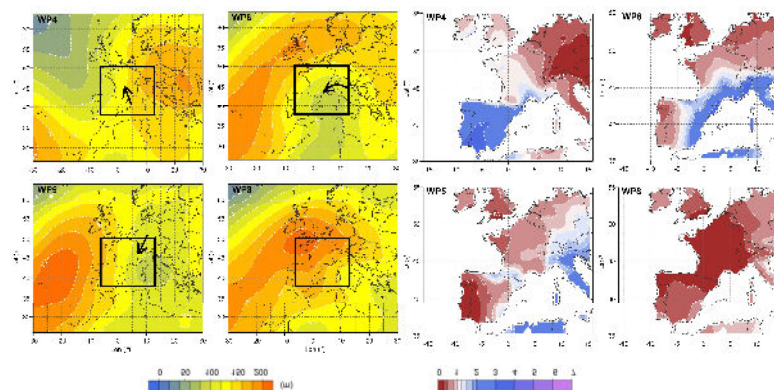
- **Régionalisation Statistique**

Analogues Atmosphériques
Types de temps
Réseaux Neurones

.....

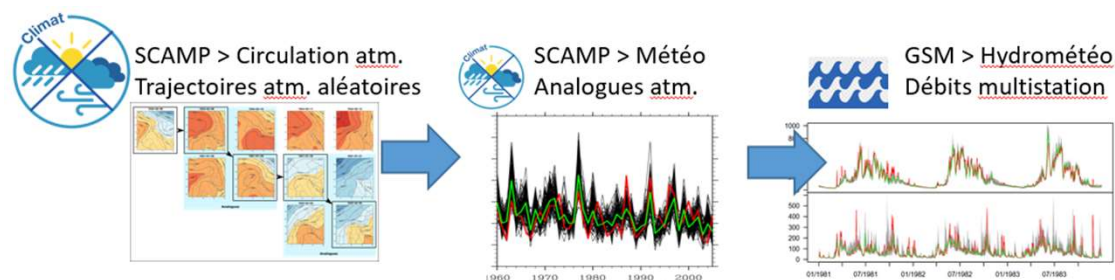
Types de temps EDF / DTG

Précip. Moyennes associées



- **Générateurs stochastiques de temps**

SCAMP, GWEX,
MOSHAYCC, SHYPRE,



Principe : Apprentissage et utilisation de liens d'échelle observés

Intérêt :

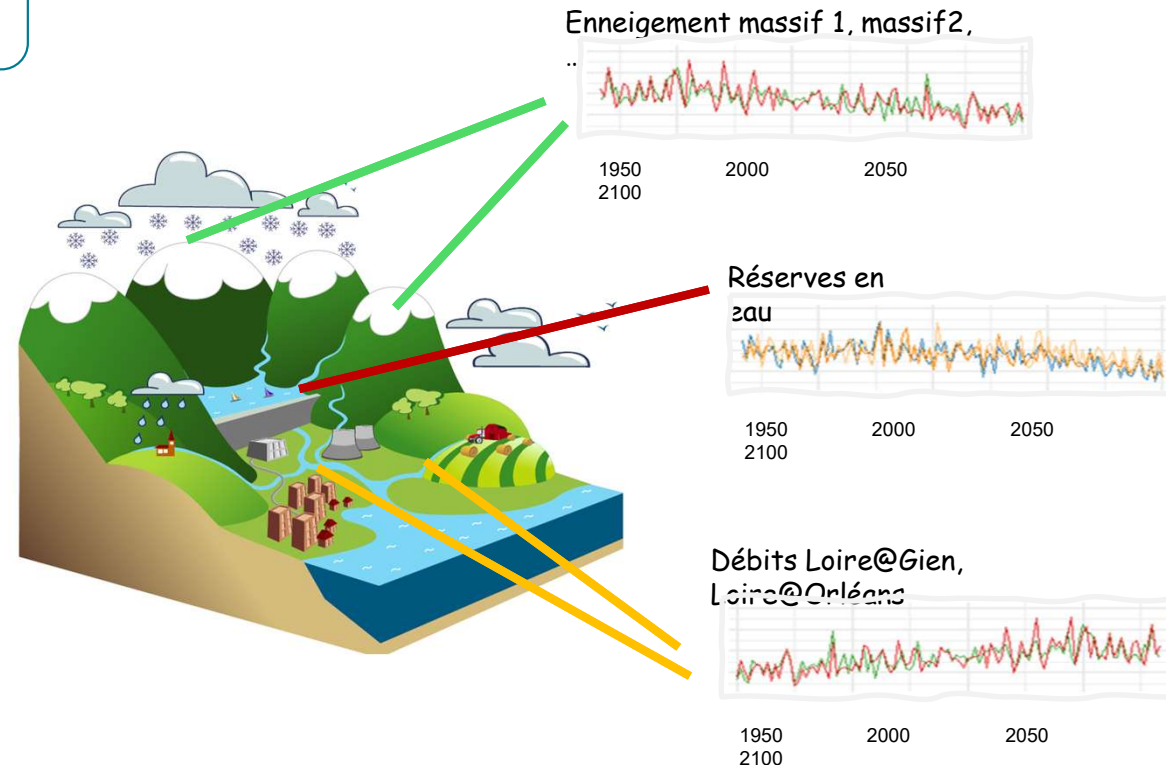
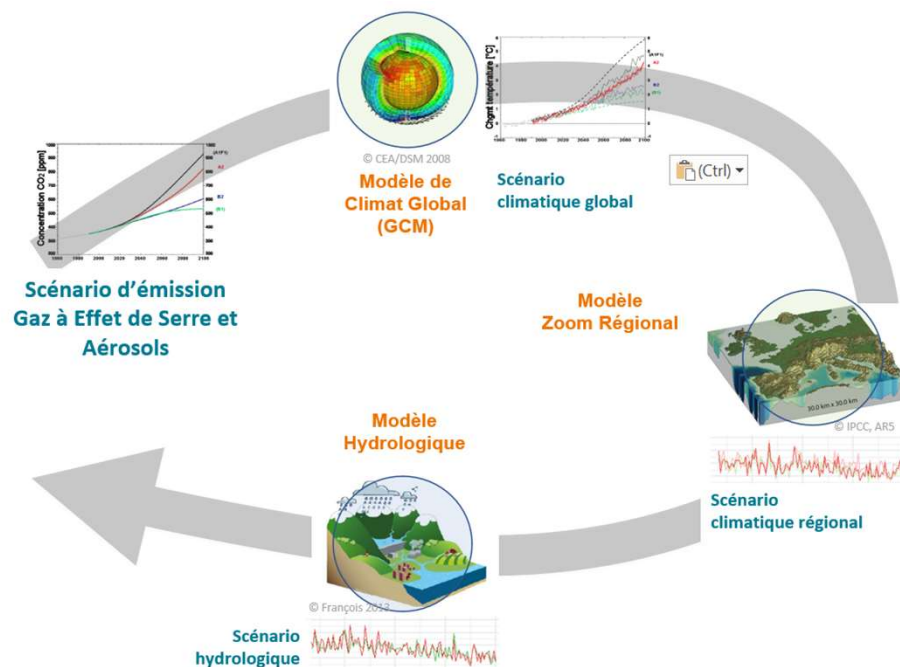
> Scénarios adaptés aux systèmes visés
> Variables atmosph. grandes échelles dites mieux simulées que variables locales

Limites :

> Cohérence multivariée
> Liens d'échelles ou paramétrisations :
Validité en climat futur ??

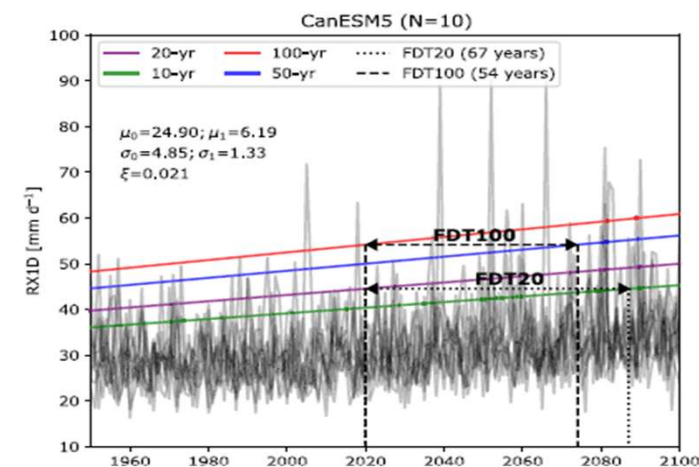
> Nouveaux objets météorologiques ??

UNE PROJECTION CLIMATIQUE



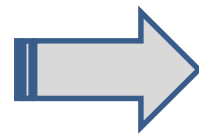
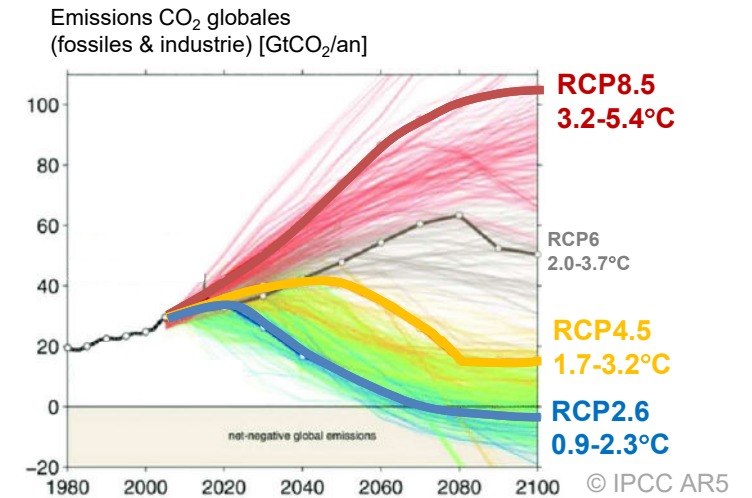
Méthodo d'analyse d'une projection (obtenue avec une chaine de modélisation)

- Simulation de chroniques (e.g. journalières) sur 150 ans (débits, réserves, enneigement)...
- Extraction indicateurs annuels : QA / QMNA5 / QJXA ...
- Analyse statistique (non stationnaire) des chroniques > évolutions projetées

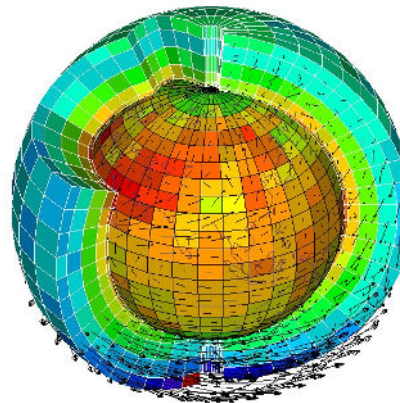


LES TROIS SOURCES D'INCERTITUDES

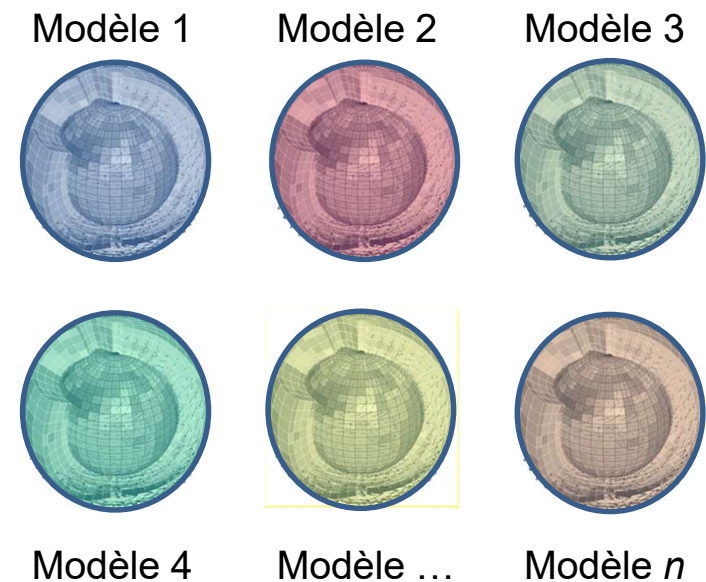
- **Les émissions futures**
 - > pour les exercices CMIP > choix de scénarios d'émissions
 - > les projections climatiques **ne sont pas des prévisions**
- **Les incertitudes de modélisation**
 - > résultent des incertitudes scientifiques & techniques
 - > le système Terre > simplifié, des modèles imparfaits
 - > **différents modèles simulent des futurs différents**



Modélisation
Hypothèses
Simplifications



© CEA/DSM 2008



LES TROIS SOURCES D'INCERTITUDES

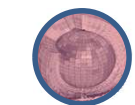
Projections des modèles Explore2 pour les changements 2085

Modèle Climatique Régional

Modèle Climatique Global



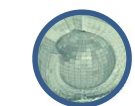
CNRM-CM5



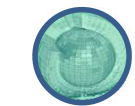
EC-Earth



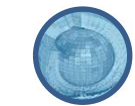
IPSL-CMSA



HadGEM2



MPI-ESM-LR



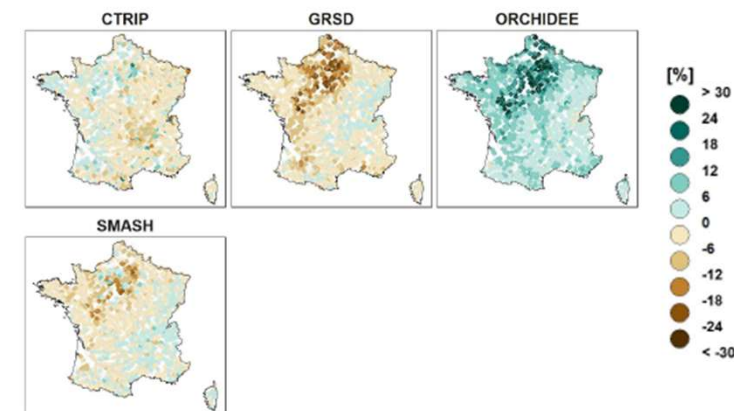
NorESM1-M

ALADIN RACMO HadREM RCA4 CCLM4 CM4 HIRAM5 WRF381 REMO009

RCP8.5

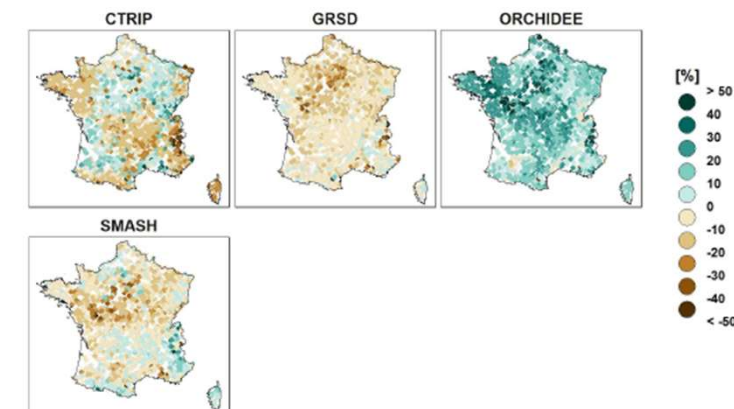
Changements projetés [%]
Précipitations annuelles

Modèle Hydrologique



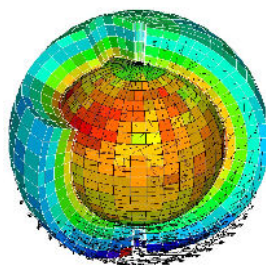
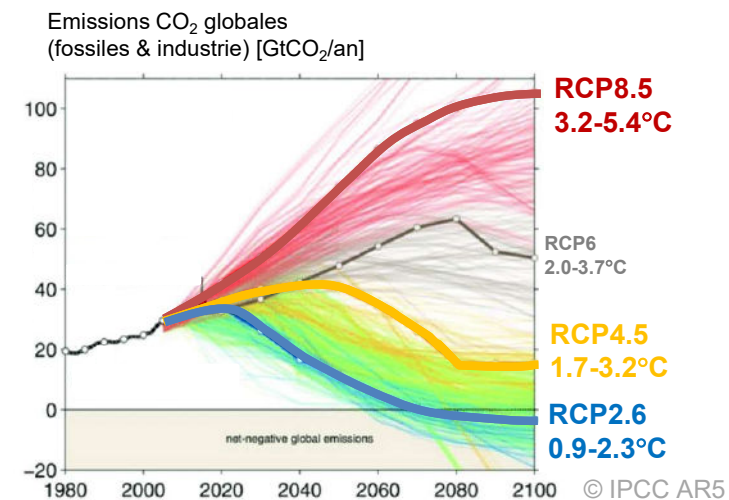
Δ Débit annuel moyen [%]

Δ Débit étiage moyen [%]

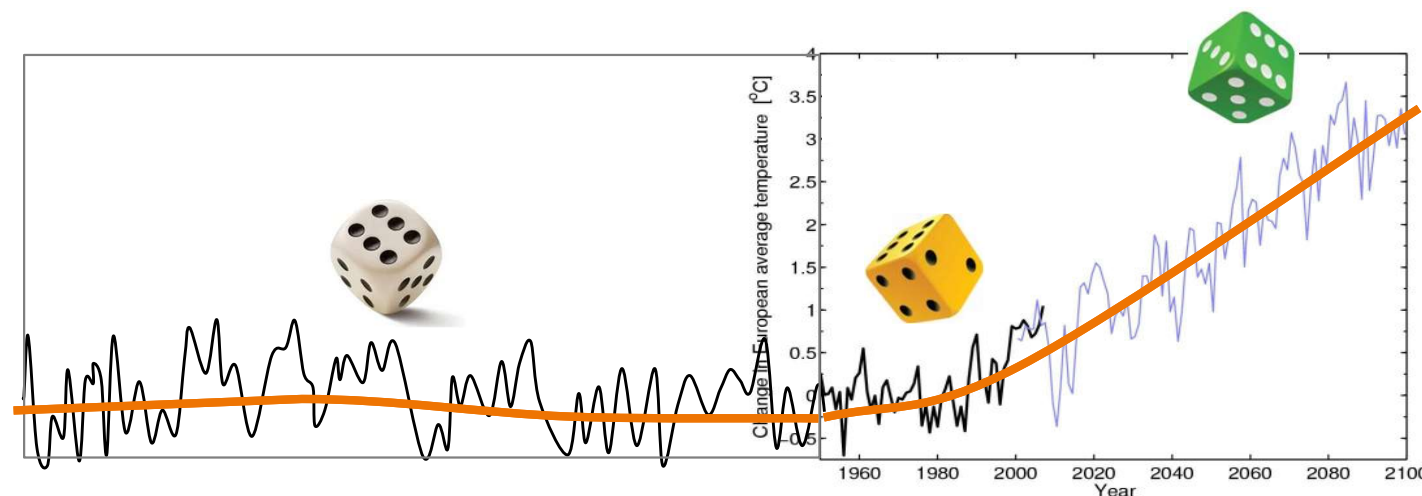


LES TROIS SOURCES D'INCERTITUDES

- **Les émissions futures**
> les projections sont des scénarios
- **Les incertitudes de modélisation**
> différents modèles simulent des futurs différents
- **La variabilité interne du climat**
> ajoute du bruit aléatoire aux changements profonds
> l'incertitude associée est irréductible

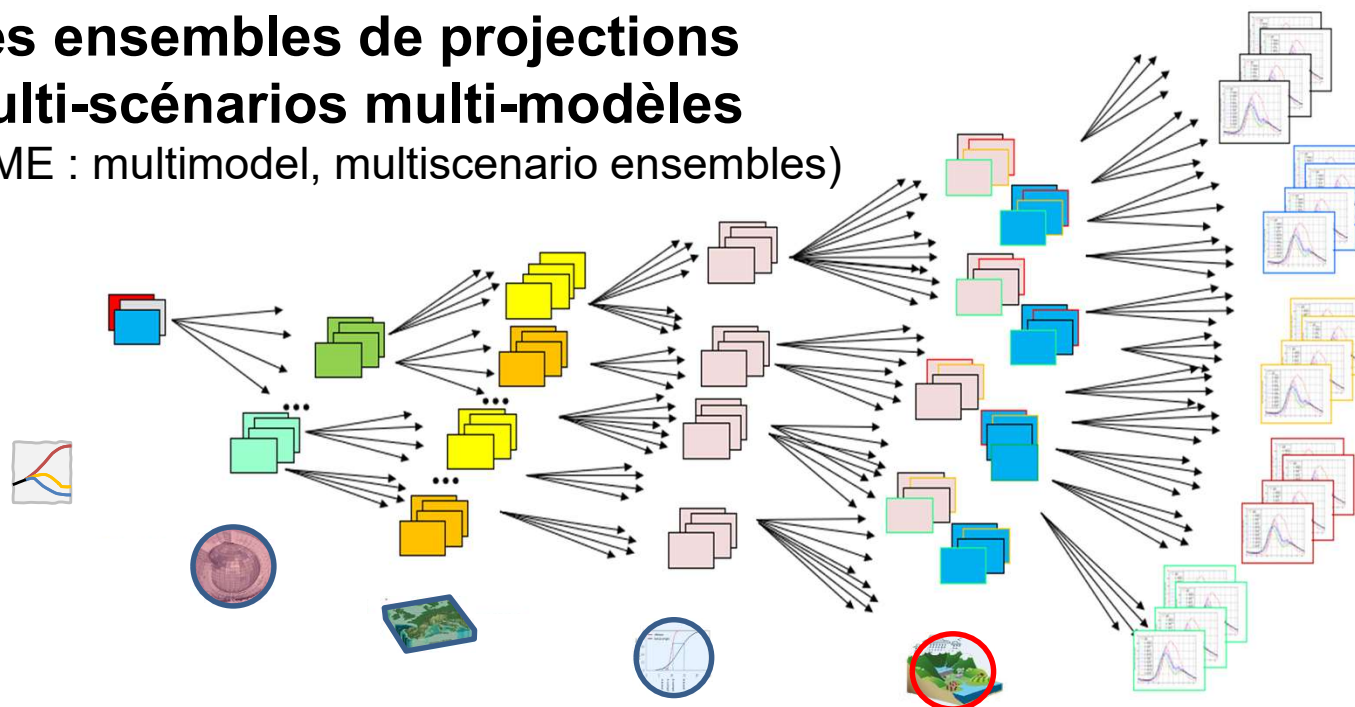


© CEA/DSM 2008



L'ENSEMBLE EXPLORE2

Des ensembles de projections multi-scénarios multi-modèles
(MME : multimodel, multiscenario ensembles)

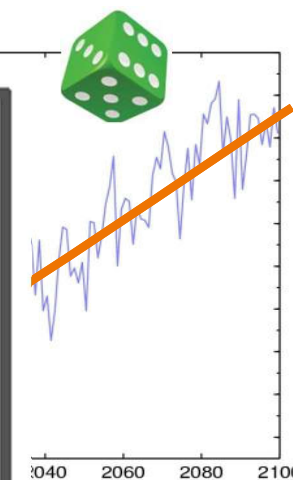
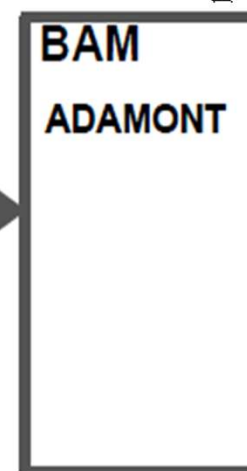
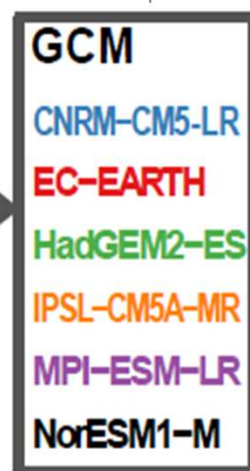
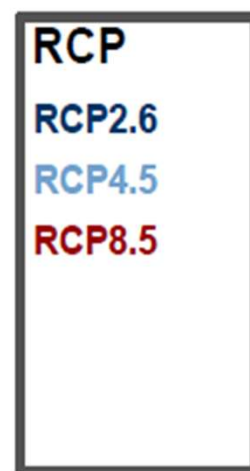
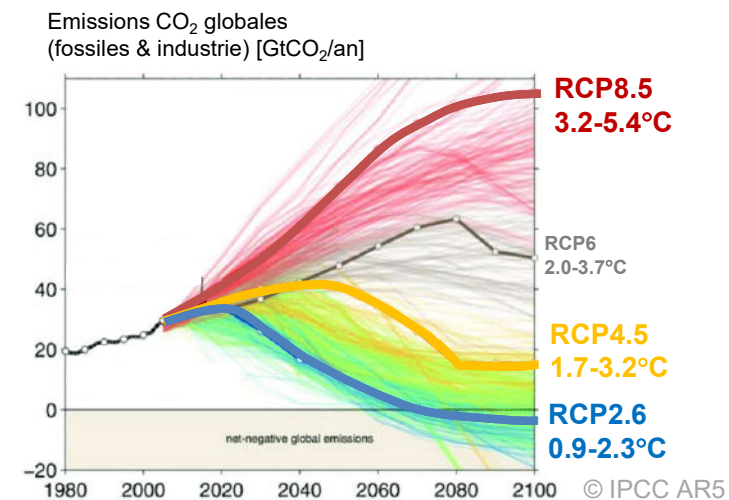


3

6

9

9



Δ RÉPONSES CLIMATIQUES : MOYENNES ET DISPERSION RCP8.5, Fin du Siècle

Climate

ΔTemp. [°C]

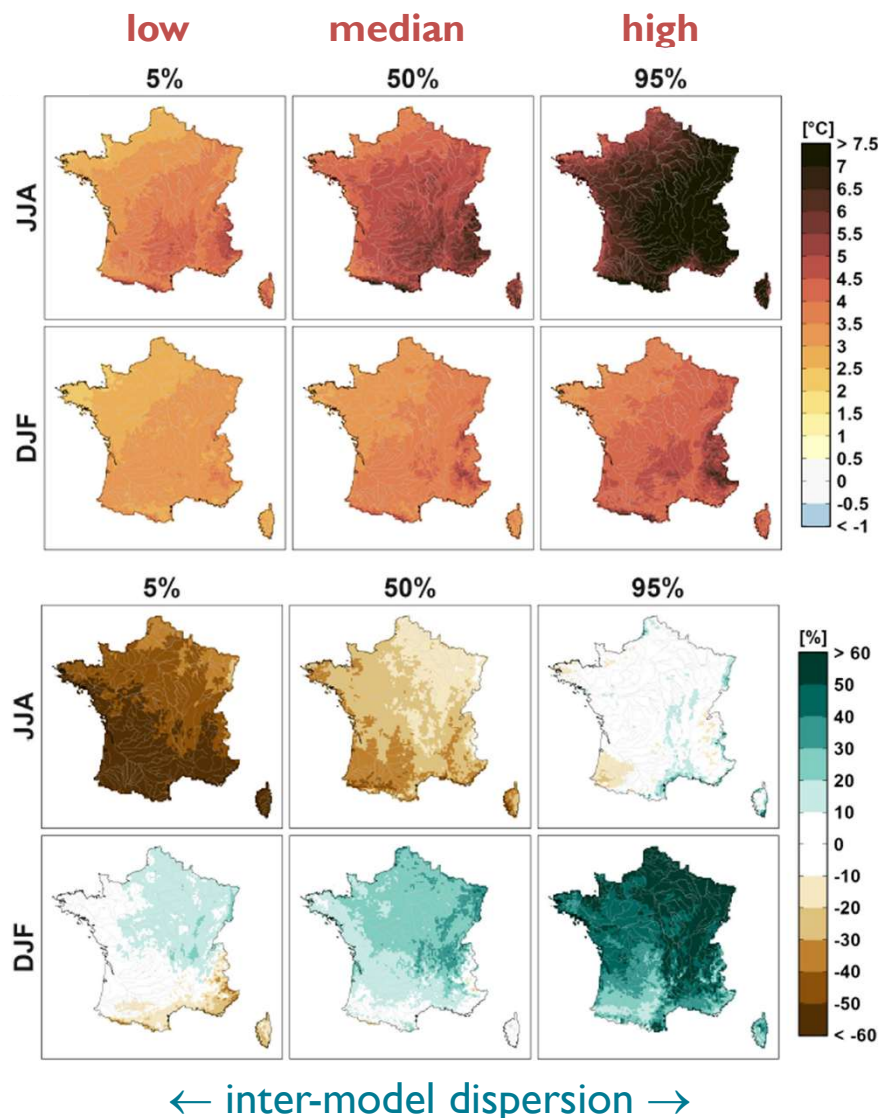
JJA

DJF

ΔPrecip. [%]

JJA

DJF

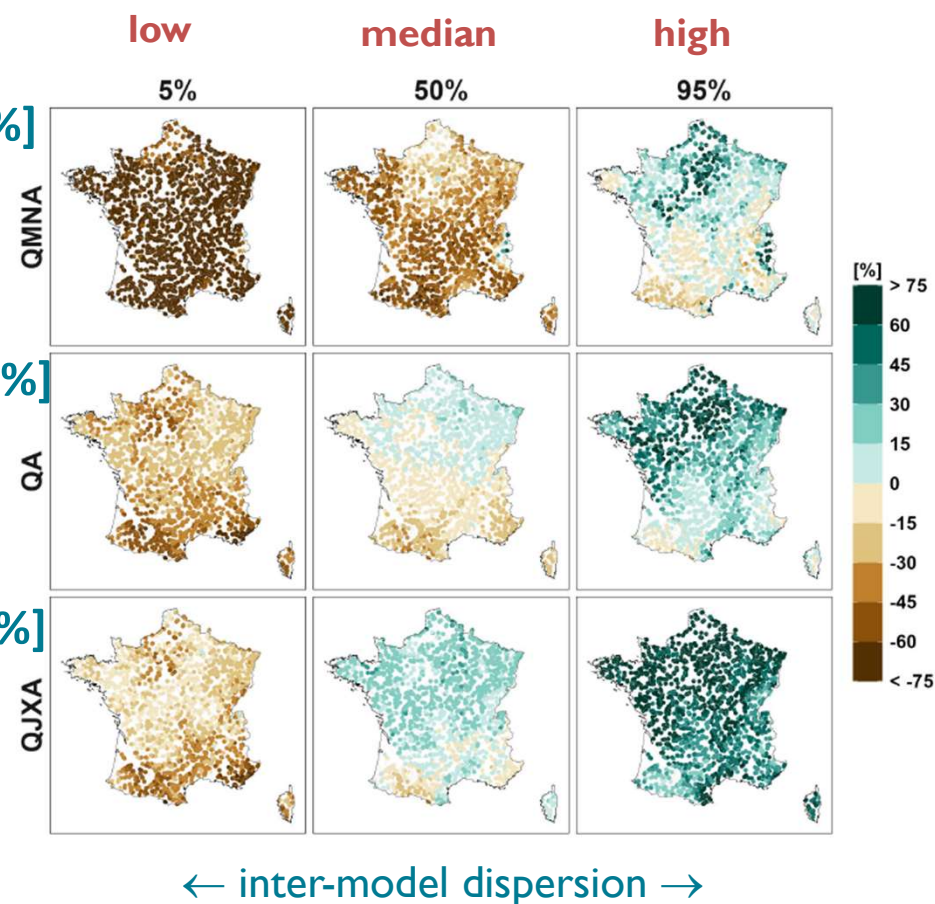


HYDROLOGY

Δ Low Flows [%]

Δ Mean Flow [%]

Δ High Flows [%]



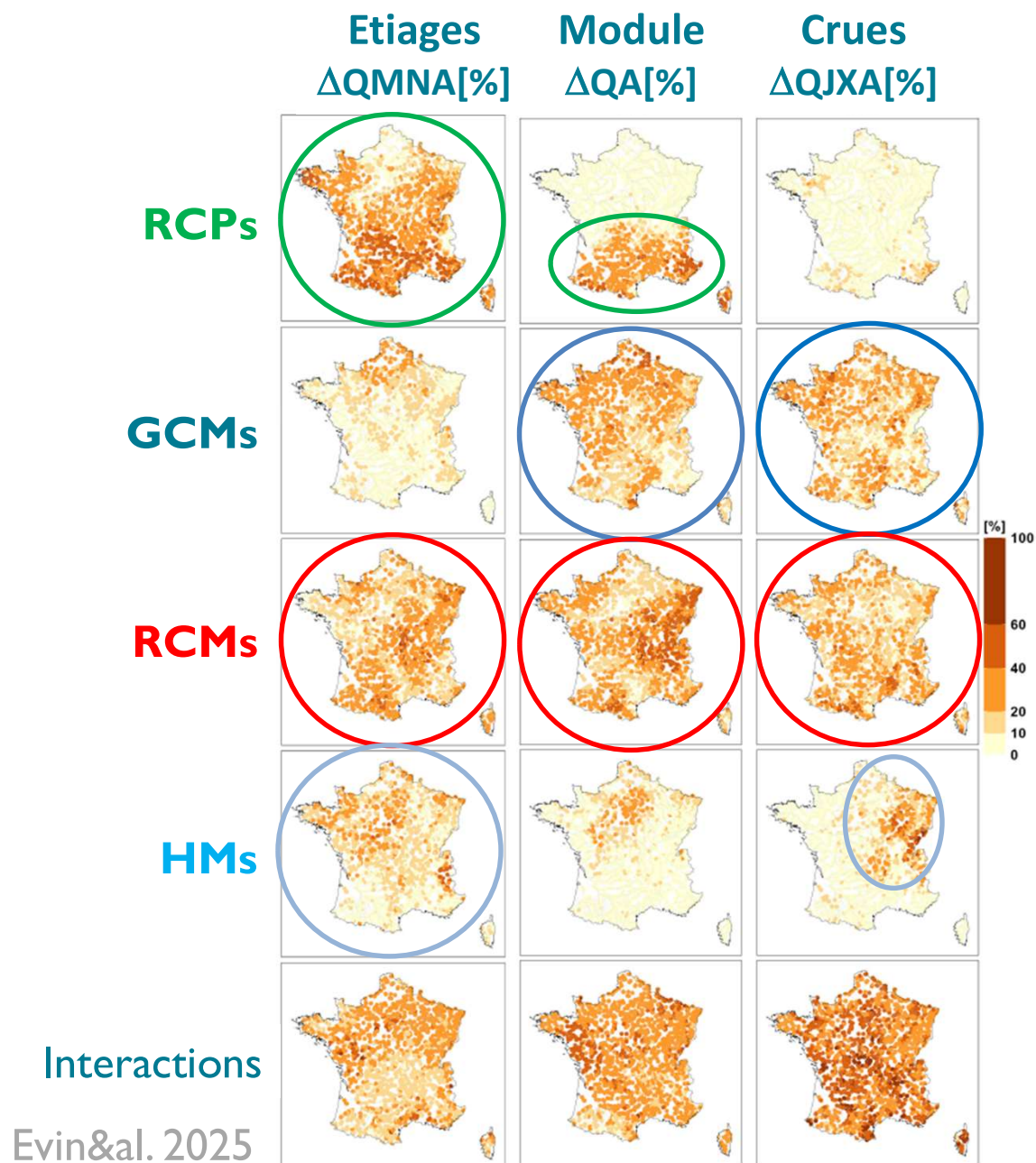
**Forte dispersion sur les évolutions profondes projetées
Précip. Et variables liées : svt pas d'accord sur le signe**

LES INCERTITUDES, CA VIENT D'OÙ ? Réponses Climatiques, RCP8.5, Fin du Siècle

Les sources principales d'incertitude dépendent de la variable et de la région

Les modèles climatiques régionaux sont toujours une source d'incertitude importante

Contributions relatives [%]
de chaque catégorie de modèle
À l'incertitude totale
Sur Δ réponse climatique [%]

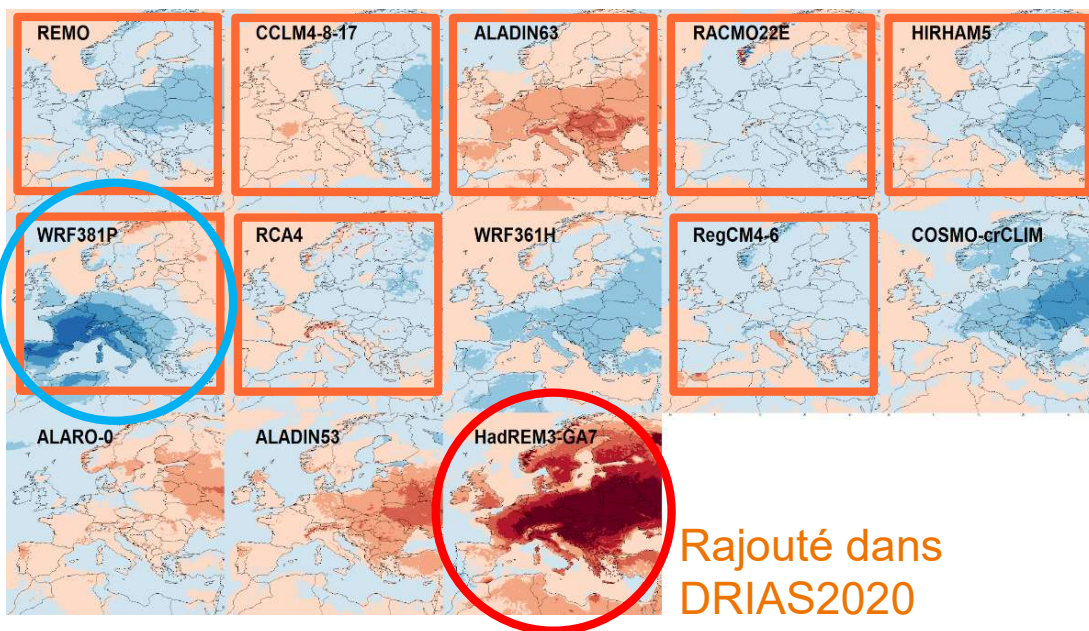


LES INCERTITUDES, CA VIENT D'OÙ ? Réponses Climatiques, RCP8.5, Fin du Siècle

Un ou deux modèles individuels peuvent avoir des réponses climatiques très contrastées
et avoir une contribution large à l'incertitude modèle, parfois localement

Effets principaux de chaque RCM (13 RCMs Eurocordex)

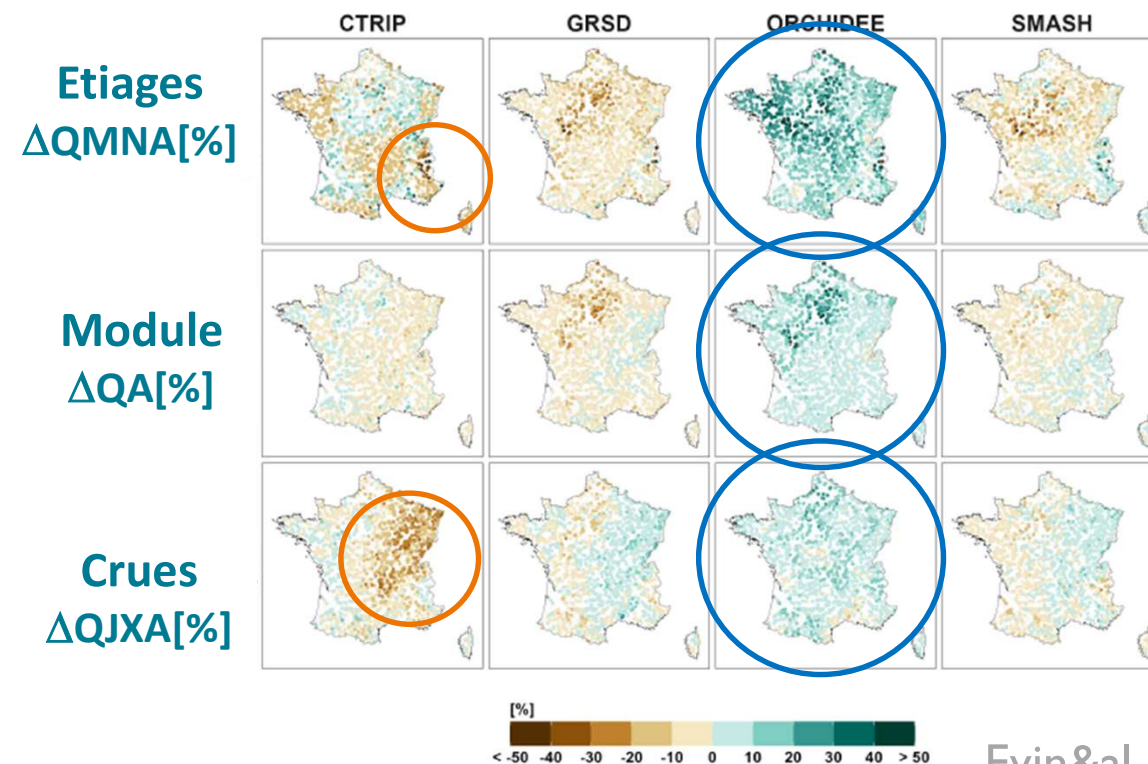
Temp. hiver Δ TDJF [°C]



Evin&al. 2021

WRF381P réchauffe beaucoup moins
HadREM3 réchauffe beaucoup plus
que la moyenne d'ensemble

Effets principaux de chaque Modèle Hydrologique



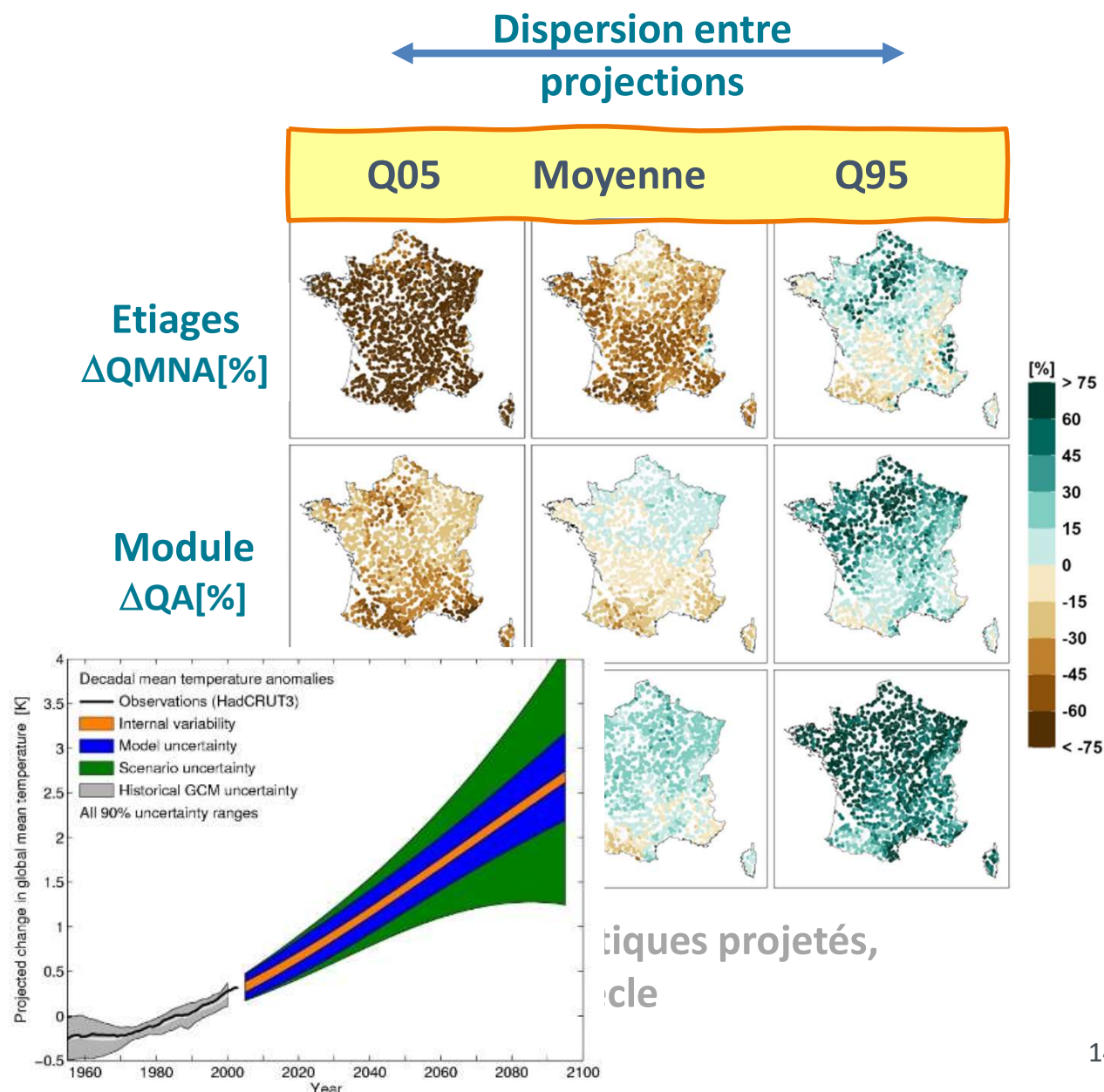
Evin&al. 2025

UN TRÈS GRAND ENSEMBLE DE PROJECTIONS (200 à 400+ simulations par station)

Une pression pour fournir des projections sous la forme d'un risque mesurable

> **La tentation probabiliste** (avec 3 chiffres significatifs !!)

- Une communication statistique ? ... un piège
> conditionnelle à l'ensemble (scénarios, modèles)
- Risque de décrédibilisation
> ne résiste pas aux actualisations (explore3?)
> au futur vécu
- Véhicule illusion de certitude
> nie l'imperfection des connaissances, modèles
> nie le risque de surprises climatiques
- Risques de mal-adaptations
> enfermer dans des futurs prochainement caduques
> négliger des futurs contrastés mais plausibles

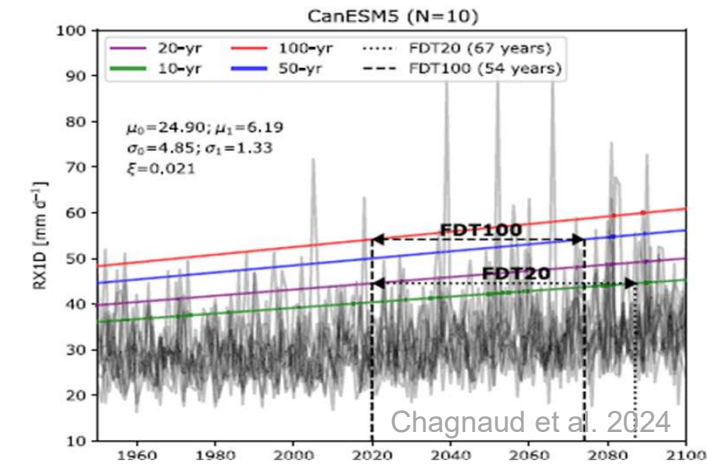


UN TRÈS GRAND ENSEMBLE DE PROJECTIONS (200 à 400+ simulations par station)

Une pression pour fournir des projections sous la forme d'un risque mesurable

> La tentation de la surinterprétation (avec 3 chiffres significatifs)

- Une manipulation numérique (et statistique) « facile »
> crues/étiages rares, événements extrêmes composés
- Valeur des projections = $f(\text{variable}, \text{échelle})$
> les crues aux échelles locales
? RCMs Explore2
? Méthodes de « correction de biais »
- Mauvaise compréhension des projections
> recommandations non pertinentes / mal-adaptations



Inondations
En Isère, il ne reste plus rien du hameau de la Bérarde, détruit par les flots

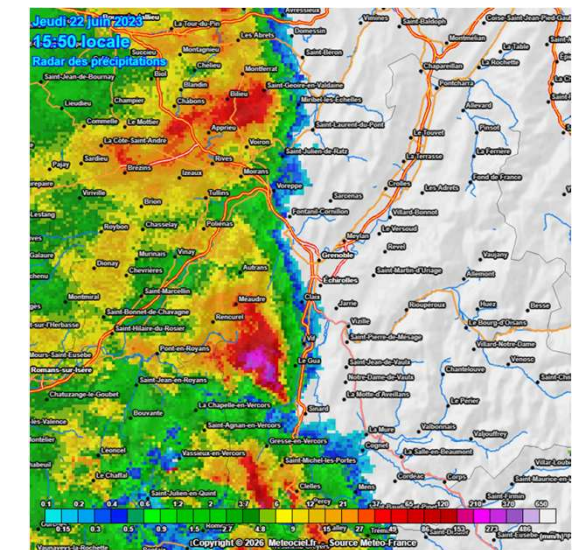


20 juin 2024



Le hameau de la Bérarde (Isère) avant et après les crues du 20 juin 2024
© BFMTV

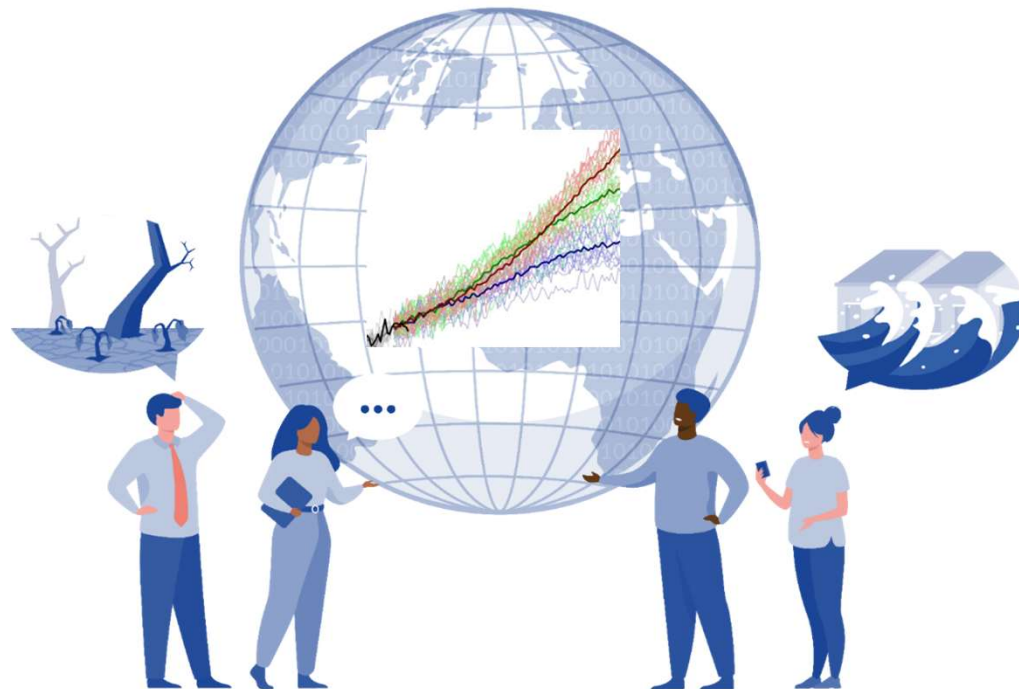
Des objets météorologiques nouveaux



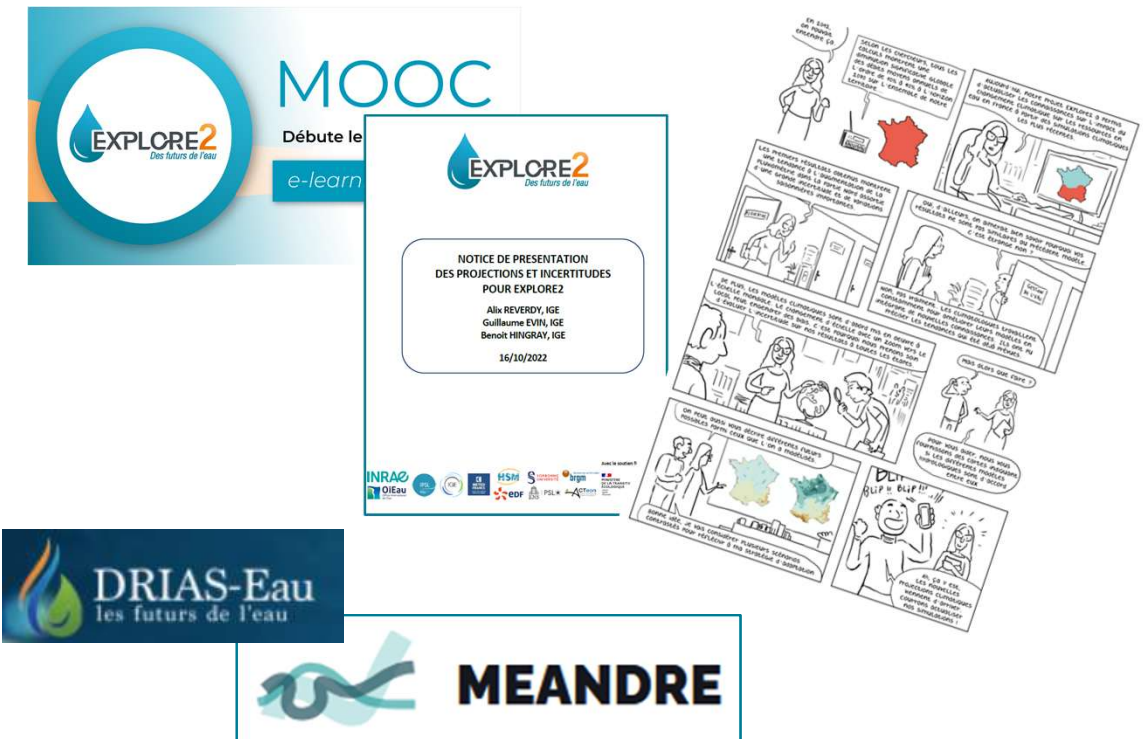
UN TRÈS GRAND ENSEMBLE DE PROJECTIONS... et un énorme besoin d'accompagnement

Une besoin **de développer/partager des bonnes pratiques
d'acculturation collective**

Un enjeu : **comprendre les projections, les données
ce qu'on peut en dire ou pas**



Les interactions avec le Comité Utilisateurs
Les supports de transfert & vulgarisation
notices, fiches, formations
Méthodologie, concepts, termes appropriés, valeurs



UN TRÈS GRAND ENSEMBLE DE PROJECTIONS...

Des choix/recommandations de communication



DES futurs de l'eau

Des futurs du climat selon Explore2

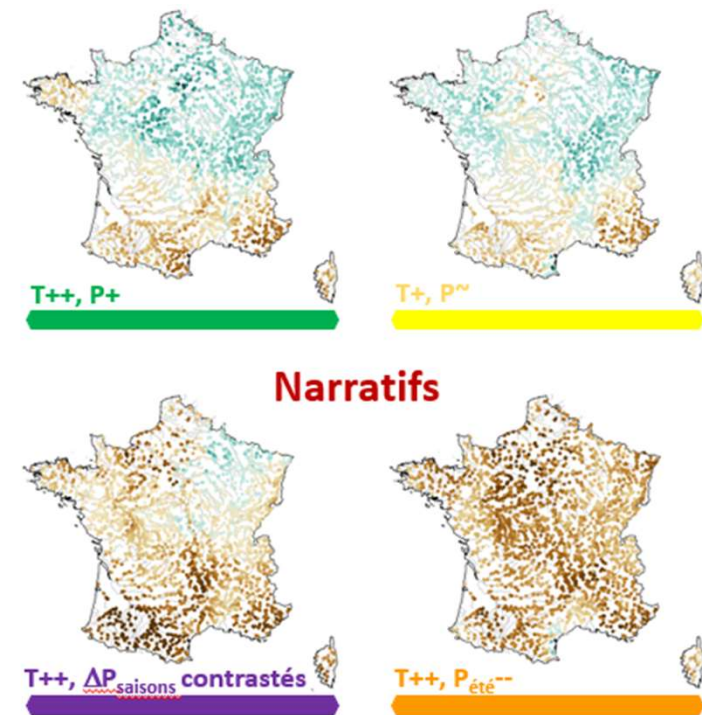
Messages appuyés par les projections hydroclimatiques d'Explore2		Confiance	Consensus sur le signe à l'échelle France (sauf précision)
 MESSAGES ET ENSEIGNEMENTS DU PROJET EXPLORE2 Erik SAUQUET (INRAE), Guillaume EVIN (INRAE), Sébastien SAUJAT (OFRE), Audrey BORNANCKIN PLANTIER (OFRE), Natacha JACQUIN (OFRE), Patrick ARNAUD (INRAE), Maël BEREL (INTEC), Sébastien BERNUS (Météo France), Jérôme INRAE AU (INRAE), Elise BOUTANGER (INRAE), Yann CABALLERO (INRAE), François COLLEONE (INRAE), Ulla COLLET (EDF), Lolo CORRE (Météo France), Agathe CROQUIN (Météo France), Agnès DUCHAMNE (INRAE, IPSL), Math Fournier (ACTeon), Joël GAUHAUD (INRAE), Elise LAMBERT (INRAE), Frédéric DE NIERCKE (INRAE), Louis THERY (INRAE), Daniel HINGRAY (INRAE, IGE), Peng HUANG (Sorbonne Université), Frédéric JACOTTE (INRAE), Alexis JONET (Météo France), Sandra LAMIN (INRAE), Matthieu LE LAY (EDF), Sarah LOUDIN (ACTeon), Claire MAGAND (OFRE), Paul MARSON (Météo France), Ludovic MIMEAU (INRAE), Céline MONTIEL (EDF), Simon MUNIER (Météo France), Charles NATHAN (INRAE), Sébastien NATHAN (INRAE), Céline NATHAN (INRAE), Thomas ROBIN (INRAE), Fabienne ROUSSET (Météo France), Jean Michel SOUBEYROUX (Météo France), Laurent STROMMINGER (INRAE), Souvik THAKUR (INRAE, IPSL), Guillaume THIBEL (INRAE), Elise TOULOUZE (Météo France), Yves THUILLIER (INRAE), Isabelle VERGÈS (INRAE), Jean Philippe VIDAL (INRAE), Mathieu VIAC (INRAE, IPSL) 28/06/2024 Avec le soutien financier de: 	Le réchauffement moyen en France hexagonale se poursuivra, avec une forte accélération à partir du milieu de siècle entre les scénarios d'émissions modérées et fortes émissions.	Forte	Fort
	Le réchauffement moyen projeté à l'échelle France est de l'ordre de +4°C (entre +3°C et +5.5°C selon les modèles). Les températures plus élevées de l'ordre de +1.5°C sont projetées dans le sud-est du pays par rapport au nord-ouest.	Forte	Fort
	Le réchauffement moyen est légèrement moins marqué que pour la température annuelle.	Forte	Fort
	Le réchauffement moyen projeté à l'échelle France est de l'ordre de +3.5°C (entre +3°C et +4.5°C selon les projections).	Forte	Fort
	Le réchauffement moyen à l'échelle France est le plus intense.	Forte	Fort
	Le réchauffement moyen projeté à l'échelle France est de l'ordre de +4.5°C (entre +3.5°C et +7°C selon les projections).	Forte	Faible
	Les évolutions des cumuls annuels de précipitation en France hexagonale sont d'importantes incertitudes.	Forte	Faible
	Les changements projetés varient fortement d'un modèle à un autre et la dispersion augmente avec l'horizon temporel. En moyenne, les changements projetés à l'échelle nationale sont faibles (proches de zéro).	Forte	Faible
	Après exceptions régionales près, les différentes projections ne s'accordent pas sur le signe des changements. Ces exceptions concernent le nord-est de la France (hausse des cumuls), et le sud-est et près des Pyrénées (baisse des cumuls) et concernent uniquement le scénario de fortes émissions.	Forte	Moderé à fort selon les régions
	La cohérence des projections s'accroît sur une hausse de la pluviométrie en hiver pour les deux scénarios d'émissions.	Forte	Moderé à fort selon les régions
	En fin de siècle et pour le scénario de fortes émissions, la hausse projetée des précipitations moyennes hivernales en France se situe entre +10% et +45%. Elle est plus importante dans le nord et le sud-est. La variabilité d'une année à l'autre reste forte et les projections sont donc incertaines, quels que soient les scénarios et horizons.	Forte	Moderé à fort selon les régions
	Cumul estival de précipitation	Faible	L'été se caractérise par une tendance à la diminution des précipitations en France. Cette diminution est particulièrement prononcée dans le sud-est et le sud-ouest.

La transparence et l'honnêteté

Les limites de l'exercice, la qualité des simulations...

Des narratifs climatiques (4) au lieu des Q5, Q50, Q95 & des narratifs hydro pour la TRACC

Module $\Delta QA[\%]$



Narratifs

- Le consensus modèles, la confiance scientifique
- Toujours afficher la plage de dispersion des projections & Une précision appropriée sur les projections chiffrées (+13% > autour de 10%)

ET QUID DE LA PRISE DE DÉCISION POUR L'ADAPTATION...

Stationnarity is dead (Milly, 2008)

>> Les méthodes pseudo déterministes sont caduques

>> Urgence à changer de logiciel pour les dimensionnements, les analyses de danger, ...

Les certitudes / incertitudes seront +/- les mêmes dans 5 ans / 10 ans

QUESTIONS :

- Comment s'adapter, quelle prise de décision sous incertitudes profondes ?
- Quelles bonnes pratiques ?
Quelles approches raisonnables ?
Opérationnalisables ?

Des méthodes/approches à apprendre des pays AngloSaxons ?

- Décision sans regret
- Dynamic Adaptation Pathways
- Stress tests ? Decision Scaling ?

Dans tous les cas :

- réévaluations régulières ?
- garder une réserve d'agilité permanente ?



Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world

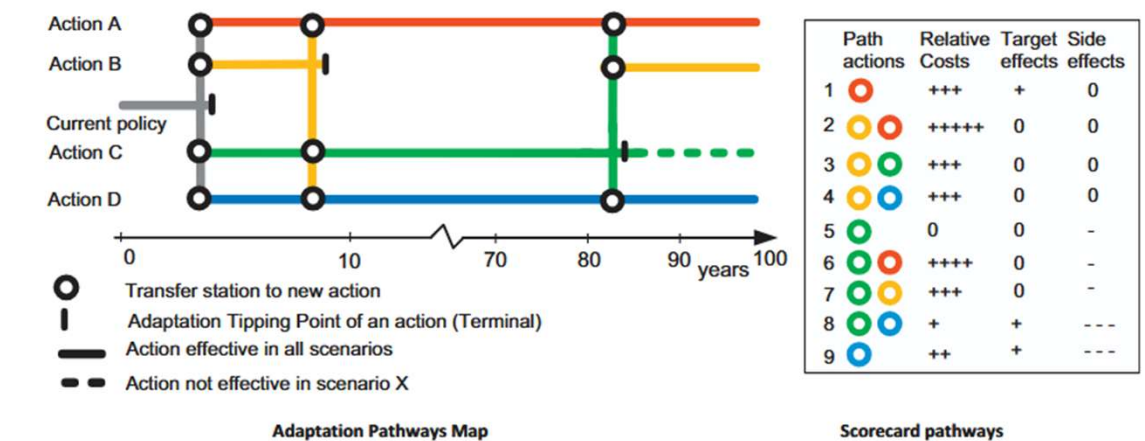
Marjolijn Haasnoot^{a,b,d,*}, Jan H. Kwakkel^c, Warren E. Walker^c, Judith ter Maat^d

^aUtrecht University, Department of Geosciences, P.O. Box 80115, 3508 TC Utrecht, The Netherlands

^bTwente University, Department of Water Engineering & Management, P.O. Box 217,7500 AE Enschede, The Netherlands

^cDelft University of Technology, Faculty of Technology, Policy and Management, P.O. Box 5015, 2600 GA Delft, The Netherlands

^dDeltares, P.O. Box 177, 2600 MH Delft, The Netherlands



PEPR TRACCS

**Transformer
la modélisation du climat
pour les services
climatiques**

10 ans : 2023-2033

51 M€



Samuel Morin
Moss Keeyevame

QUELQUES LIENS ET RÉFÉRENCES

Rapports, fiches de synthèse :

- Dataverse Explore2 : <https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataverse/explore2>

Quelques publications :

- Trambly *et al.*, 2025. Evolution of flood generating processes under climate change in France, <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-1635>
- Sauquet *et al.*, 2025. A large ensemble of streamflow and groundwater projections in France, <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-1788>
- Evin *et al.*, 2025. Uncertainty sources in Explore2 projections: Regional Climate Models and Internal Variability matter. <https://hess.copernicus.org/articles/30/1023/2026/>
- Evin *et al.*, 2021. Balanced Estimate and Uncertainty Assessment of European Climate Change with EURO-CORDEX. <https://doi.org/10.5194/esd-2021-8>
- Jeantet *et al.*, 2025, Climate change impacts on groundwater simulated using the AquIFR modelling platform. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-93>

Accès aux données :

- Les portails DRIAS (<https://www.drias-eau.fr>, <https://www.drias-climat.fr>)
- Le dataverse d'Explore2 (<https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataverse/explore2>)

Vulgarisation et visualisation des données :

- MEANDRE <https://meandre.explore2.inrae.fr>
- MOOC <https://e-learning.oieau.fr/enrol/index.php?id=3799>