



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



METEO
FRANCE

COMITÉ SCIENTIFIQUE CONSULTATIF DE MÉTÉO-FRANCE

PROJECTIONS CLIMATIQUES : de la recherche aux services climatiques

Aurélien Ribes, Météo-France, UMR-CNRM Météo France / CNRS

Contributeurs et/ou relecteurs :

CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques) : Bertrand Decharme, Hervé Douville, Olivier Geoffroy, Julie Jebeile, Samuel Morin, Mariana Rocha, David Saint-Martin, David Salas y Méliá, Roland Sférian, Samuel Somot, Aurore Voldoire.

DESR (Direction de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche) : Marc Pontaud.

DCSC (Direction de la Climatologie et des Services Climatiques) : Lola Corre, Agathe Drouin, Patrick Josse, Mary Kerdoncuff, Jean-Michel Soubeyrou.

DSM (Direction des Services Météorologiques) : Yann Michel, Raphaël Legrand, Pascal Brovelli.

2023

Remerciements

Ce document a bénéficié, pour la partie recherche, des contributions et commentaires de nombreux collègues du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), pour la plupart issus du Groupe de Modélisation Grande Échelle et Climat (GMGEC), que je remercie ici.

La partie décrivant les jeux de données pour les services climatiques a fait l'objet d'une série de réunions, débutée fin août 2022, impliquant des collègues de plusieurs directions de Météo France (DCSC, DSM, DESR, CNRM). Parmi eux, Lola Corre et Yann Michel ont contribué à plusieurs parties du document. Le texte de la section 4.2 reprend largement un précédent document rédigé par ce groupe, à l'initiative de Patrick Josse. Je remercie également l'ensemble de ces contributeurs.

Enfin je remercie les rapporteurs du COMSI (Liliane Bel, Frédéric Hourdin, Valérie Masson-Delmotte), dont plusieurs commentaires et suggestions ont permis de préciser et d'enrichir le présent rapport, et plus largement l'ensemble des membres du COMSI, pour leurs questions et remarques après sa présentation en séance au COMSI du 15 mai 2023.

Table des matières

1. Contexte	3
Cadrage	3
Chaîne de production	4
Variabilité interne / forcée	5
Incertitudes	6
Le dilemme résolution / complexité / échantillon / incertitude modèle	7
2. Positionnement de Météo-France : objectifs scientifiques, ambitions sur les services climatiques	8
2.1 Recherche	9
2.2 Services	9
2.3 Collaborations	13
3. Contributions scientifiques de Météo-France	13
3.1. Modélisation du système climatique	13
3.2. Post-traitements statistiques	17
3.3. Compréhension et mécanismes	19
3.4. Analyses multi-modèles et incertitudes	21
3.5. Jeu de simulations pour les services	23
4. Stratégie scientifique à 5 ans	27
4.1. Recherche	28
4.1.1. Modélisation (globale et régionale)	28
4.1.2. Traitements statistiques	30
4.1.3. Compréhension et mécanismes	31
4.1.4. Analyse multi-modèles et incertitudes	32
4.2. Jeux de données pour les services	33
4.2.1. Stratégie générale	33
4.2.2. Court terme : information, niveaux de réchauffement	36
4.2.3. Moyen terme : un nouveau socle de projections	39
Outre-mer	42
4.2.4. Long terme : évolution du socle et des services	43
5. Synthèse	45
Bibliographie	46

1. Contexte

Le contexte général dans lequel s'inscrivent les travaux sur les projections climatiques est triple. Tout d'abord, le changement climatique est déjà bien engagé, et va continuer à s'intensifier dans les années et décennies à venir en fonction des émissions futures de gaz à effet de serre. Il affecte de nombreux types d'événements extrêmes, et concerne un large spectre de secteurs d'activité et d'écosystèmes, ce qui justifie diverses politiques d'adaptation. Ensuite, la météo et le climat constituent des enjeux de plus en plus décisifs pour de nombreux secteurs d'activité. Plusieurs activités économiques deviennent de plus en plus météo-sensibles (e.g., énergies renouvelables, gestion des ressources en eau). Enfin, la France s'est engagée via l'Accord de Paris et sa stratégie nationale bas carbone, à réduire fortement ses émissions de gaz à effet de serre. Une partie de l'effort consiste à renforcer les puits naturels de carbone (sols, végétation), ce qui demande à être évalué sous l'angle de contraintes géophysiques telles que l'évolution des ressources en eau. Pour répondre à ce triple défi, Météo-France ambitionne de mettre à disposition des projections climatiques offrant une description aussi précise et robuste que possible du climat du 21^{ème} siècle en France – métropole et outre-mer – voire au-delà.

Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) fournit de façon régulière (tous les 7 ans environ) un état des lieux sur les connaissances scientifiques sur l'évolution du climat, au 21^e siècle et au-delà, dans ses rapports d'évaluation. Le 6^{ème} rapport (IPCC, 2021), propose ainsi de nouvelles estimations, basées sur la dernière génération de modèles de climat, à l'échelle planétaire et à l'échelle de grandes régions (e.g., l'Europe est découpée en 4 grandes régions, la France métropolitaine étant à cheval sur deux de ces régions). L'atlas interactif, qui sera bientôt enrichi via le portail C3S¹, décline cette information sous forme de cartes et graphiques, et fournit une base scientifique particulièrement à jour. Cependant, cet atlas n'a pas vocation à couvrir l'ensemble des besoins liés à l'adaptation des activités économiques. Ces besoins concernent notamment des données facilement accessibles, à haute résolution, incluant les variables ou indices d'intérêt pour chaque secteur, et de façon plus générale, un service permettant une interaction et la prise de décision finale des utilisateurs.

Cadrage

Ce rapport décrit l'ensemble de la démarche scientifique engagée par Météo-France afin de répondre à ces besoins : les données de référence sur les projections climatiques, les méthodes associées, et toutes les activités scientifiques pertinentes de ce point de vue. Il couvre ainsi les travaux scientifiques des 5 dernières années portant sur la description du changement climatique, ce qui inclut la modélisation du climat, la compréhension des mécanismes, la quantification des changements passés et futurs physiquement plausibles, la production, le traitement, l'analyse de simulations numériques et de données sur le climat futur au sens large. Ce rapport ne cherche pas à faire une revue de toutes les connaissances sur le changement climatique. La stratégie de développement des modèles climatiques, l'évaluation des impacts du changement climatique sur des activités

¹ C3S : Copernicus Climate Change Services, <https://climate.copernicus.eu/>. L'enrichissement discuté ici porte sur l'ajout de nouvelles variables et indices.

particulières, et les aspects communication et vulgarisation sur le changement climatique ne sont pas traités.

Dans une logique de transfert de connaissances de la recherche vers les services, ce rapport décrit l'offre de services climatiques actuellement mise en place par l'établissement, en se concentrant en particulier sur les données et connaissances servant de base à ces services. Il présente la réflexion menée sur l'évolution des jeux de données de référence, et les défis actuels en termes de transfert des connaissances et de combinaison de multiples sources d'information. En revanche, les aspects organisationnels des activités de service, les interactions avec les clients, et les aspects co-construction ne sont pas couverts. Les travaux scientifiques ou services ciblant de façon spécifique les impacts et risques sur des domaines (e.g., ville, végétation, santé humaine, ressources en eau) ou secteur d'activités donnés (e.g., tourisme de sport d'hiver, agriculture) sont également exclus.

Chaîne de production

La chaîne d'outils mise en oeuvre pour produire une information climatique locale fait intervenir plusieurs étapes et outils (Figure 1) :

- les scénarios d'émissions, décrivant les émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES) et d'aérosols (AER) ainsi que d'autres perturbations anthropiques (e.g., utilisation des terres) et naturelles (activité solaire, éruptions volcaniques) du climat attendues au 21^{ème} siècle,
- les modèles globaux de climat, capables de simuler la réponse de l'ensemble du système climatique (atmosphère, hydrosphère dont océans, cryosphère, surfaces continentales, biosphère) à diverses perturbations,
- les techniques de descente d'échelle, qui permettent de raffiner les résultats des modèles globaux en fonction des caractéristiques du climat régional ou local. La descente d'échelle peut être dynamique, i.e., faisant intervenir des modèles régionaux de climat, équivalent des modèles globaux mais sur un domaine limité (e.g., l'Europe de l'ouest) et avec une résolution plus élevée. Alternativement, on parle de descente d'échelle statistique lorsque la montée en résolution est faite sur la base de relations statistiques entre variables de grande et petite échelles spatiales. Les deux approches dynamique et statistique sont parfois utilisées de façon successives (dynamique puis statistique).
- les méthodes de correction de biais, qui visent à corriger les biais statistiques des modèles afin de rendre les données simulées sur la période historique statistiquement cohérentes avec les observations disponibles – il s'agit également ici de méthodes statistiques. Cette étape est essentielle pour répondre aux besoins des usagers et clients qui ont des variables d'intérêt à seuil (e.g., hydrologie, températures de lignes électriques enterrées).

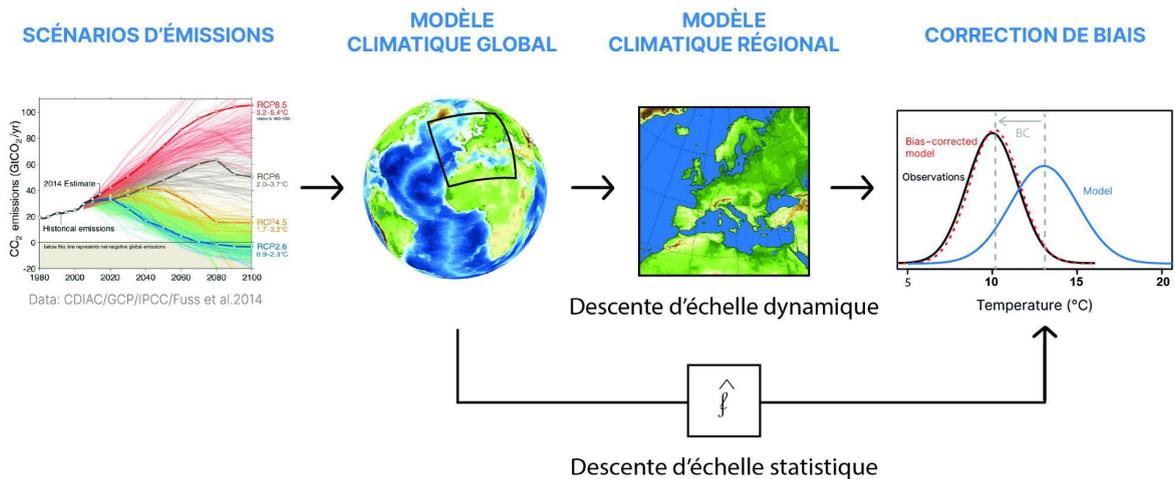


Figure 1: Chaîne de production de données.

On obtient de cette façon des séries spatio-temporelles et multivariées (e.g., température, précipitation, vents, rayonnement, eau dans le sol, etc) représentatives d'une évolution plausible du climat. Ces séries étant multiples (différents scénarios, modèles globaux ou régionaux, etc), une dernière étape consiste habituellement à en faire une synthèse statistique permettant de fournir des diagnostics agrégés intégrant chaque source d'incertitude.

Pendant, même si elle joue un rôle central, cette chaîne de production de données ne décrit que l'une des sources d'informations utiles à la construction d'une information climatique à l'échelle régionale – en l'occurrence les données issues de modèles numériques de climat (cf IPCC AR6, Fig 10.1). Les données d'observation (in-situ et satellitaires), la compréhension des mécanismes, et l'expertise au sens large (littérature, experts), constituent d'autres sources d'information importantes. L'agrégation de ces différentes sources d'information est également abordée dans ce rapport.

Variabilité interne / forcée

Deux types de facteurs contribuent à la variabilité climatique. La variabilité interne désigne les fluctuations naturelles des variables météorologiques, liées à la dynamique (chaotique) du système climatique ; elle est présente dans toute série temporelle décrivant l'état de ce système, avec ou sans influence humaine. Par opposition, la réponse forcée résulte d'une modification des conditions aux limites du système climatique appelées forçages externes (e.g., l'énergie solaire incidente, la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre, les éruptions volcaniques, etc). La notion de changement climatique est rattachée au second terme : le climat change lorsque la distribution statistique des variables météorologiques (ou décrivant l'état du système climatique) change en réponse à un forçage externe. Dans les données climatiques observées, ces deux effets cohabitent toujours (et sont quantifiés par les méthodes d'attribution) ; pour les futurs plausibles, les modulations des tendances dues à l'influence humaine par toute la plage de la variabilité naturelle (e.g., variabilité interne, éruptions volcaniques majeures) doivent être prises en compte pour fournir des informations robustes en appui aux stratégies d'adaptation.

Incertitudes

L'évaluation et la description des incertitudes sont un élément d'information clé sur l'évolution du climat. Les rapports du GIEC successifs ainsi que de nombreux autres travaux ont cherché à décrire cette incertitude, y-compris en s'appuyant sur des scénarios dits de "faible probabilité, fort impact", afin de favoriser une prise de décision éclairée en environnement incertain. Cela demande d'explorer de façon satisfaisante les trois sources d'incertitude affectant les projections climatiques :

- l'incertitude sur le scénario d'émissions, décrivant les émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols de l'humanité au 21^{ème} siècle. En pratique, un nombre réduit (typiquement 4 ou 5) de scénarios représentatifs d'une gamme plus large de trajectoires sont généralement retenus. Leur plausibilité doit être évaluée, tout en notant l'intérêt des scénarios de fort réchauffement pour bien discerner la réponse du système climatique.
- l'incertitude modèle, liée à l'utilisation d'un modèle de climat particulier et à sa calibration. Par extension, ce terme couvre l'ensemble des choix méthodologiques faits dans la chaîne de production décrite ci-dessus, i.e., le choix d'un modèle global² (et donc son contenu scientifique et les choix techniques d'implémentation numérique pour la résolution des équations), mais aussi d'une méthode de descente d'échelle dynamique ou statistique, et d'une méthode de correction de biais. L'incertitude modèle est d'une ampleur tout à fait substantielle, atteignant typiquement un facteur 2 sur l'amplitude du réchauffement global (à scénario d'émission donné), et bien plus encore à échelle régionale ou sur d'autres variables. L'exploration de cette incertitude, délicate, est discutée plus bas.
- la variabilité interne, décrite plus haut. L'exploration de cette incertitude passe généralement par la réalisation d'ensembles, c'est-à-dire de plusieurs simulations qui subissent les mêmes perturbations (i.e., forçages externes), et diffèrent uniquement par leurs conditions initiales. Plus l'ensemble est grand, plus l'estimation du changement climatique (réponse forcée) est précise.

Dans ce trio, l'incertitude modèle, prépondérante pour certaines variables sur le changement climatique au-delà de 2-3 décennies, est la plus difficile à explorer. Deux méthodes ont principalement été proposées pour la quantifier. L'approche la plus courante consiste à prendre en compte les résultats d'un échantillon de modèles climatiques différents – plutôt que d'un seul. Ces modèles, bien que tous basés sur le même principe (résolution numérique approchée des équations de la physique), diffèrent dans le détail par de nombreux choix algorithmiques, liés à la représentation des processus physiques, et au réglage des paramètres incertains. Leur comparaison est facilitée par l'existence d'ensembles d'expériences coordonnées (e.g., ensembles CMIP³ pour les modèles globaux, CORDEX⁴ pour les modèles régionaux). Néanmoins, l'évaluation des incertitudes sur cette

² Comprendre ici, et dans tout ce rapport, au sens "planétaire"

³ Coupled Model Intercomparison Project (Eyring et al., 2016)

⁴ Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (Jacob et al., 2014, pour l'exercice couvrant l'Europe)

base présente aussi des limites, liées (i) au petit nombre de modèles disponibles sur la planète, (ii) à la non-indépendance de ces modèles (e.g., pouvant avoir en commun le même modèle d'atmosphère ou d'océan), et (iii) au fait que l'ensemble n'est *de facto* pas construit pour explorer les incertitudes (e.g., aucun modèle n'est spécifiquement développé pour explorer les fortes ou faibles valeurs de sensibilité climatique⁵ ; les modèles peuvent en outre être plus ou moins calibrés sur les observations disponibles). Une deuxième approche consiste à explorer de façon systématique l'incertitude paramétrique d'un modèle de climat donné – on parle d'ensemble à physique perturbée (PPE). Dans tous les cas, l'exploration de l'incertitude modèle, nécessaire à une bonne description du climat futur, demande de prendre en compte les résultats d'un nombre suffisamment grand de modèles, ou de versions de modèles de climat, ce qui a des conséquences directes en termes d'affectation des ressources humaines et de calcul.

Le dilemme résolution / complexité / échantillon / incertitude modèle

L'utilisation de modèles de climat (globaux ou régionaux), centrale dans la chaîne de production des projections, est soumise à un dilemme sur l'affectation des ressources de calcul, entre :

- la résolution spatiale, dont l'accroissement permet de mieux représenter les conditions locales (topographie, état de la surface), et de mieux approcher les solutions des équations décrivant la dynamique des fluides géophysiques,
- le nombre et la complexité des phénomènes représentés, ce qui inclut le niveau de sophistication dans la représentation de phénomènes physiques bien connus (e.g., paramétrisations physiques dans l'atmosphère ou l'océan), mais aussi la représentation de nouvelles composantes ou processus (e.g., cycle biogéochimique du carbone, de l'azote, chimie atmosphérique, végétation, calottes glaciaires, etc),
- l'échantillonnage, c'est-à-dire le nombre d'années simulées, ou le nombre de simulations réalisées (e.g., pour un scénario donné). Des grands échantillons sont utiles lorsque le rapport signal sur bruit est faible, pour obtenir une meilleure estimation de la réponse forcée, des statistiques plus précises, et/ou une meilleure exploration de la variabilité interne et des événements extrêmes,
- l'incertitude modèle, c'est-à-dire la prise en compte d'un nombre suffisamment grand de (versions de) modèles de climat différents, afin de décrire l'incertitude liée aux nombreuses simplifications et hypothèses faites dans ces modèles.

⁵ La sensibilité climatique caractérise l'évolution de la température de l'atmosphère terrestre en réponse à un doublement de la concentration atmosphérique en CO₂

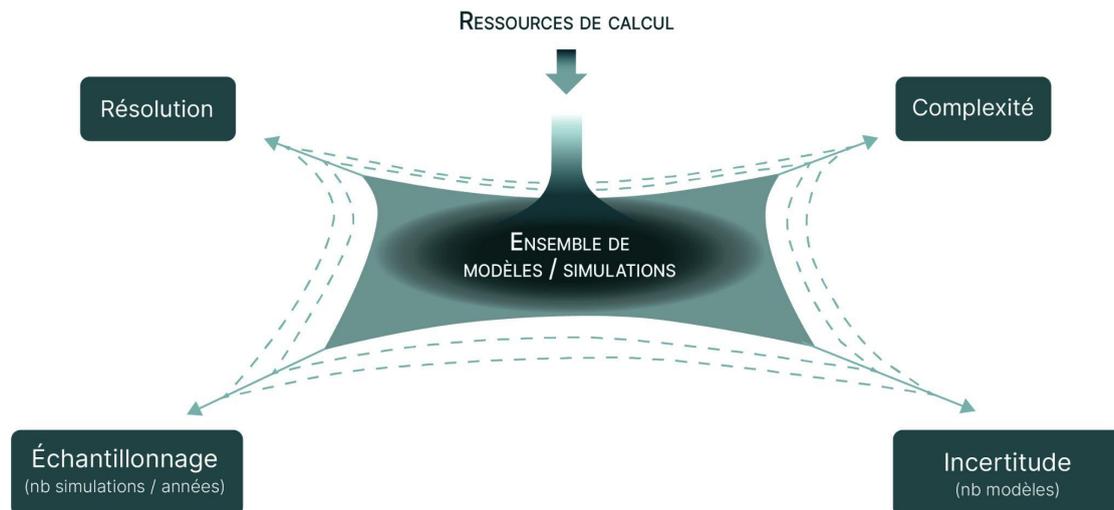


Figure 2 : Le dilemme résolution / complexité / échantillonnage / incertitude modèle.

Les centres de modélisation comme les acteurs des services climatiques sont confrontés à ce dilemme. Se pose par exemple, pour un centre de modélisation comme Météo-France, la question de la répartition des efforts (humains et informatiques) portés respectivement sur ces différents axes, en compétition les uns avec les autres. Le dernier axe “incertitude modèle” se pose de façon plus aiguë encore pour les activités de services climatiques, qui nécessitent d’explorer la diversité des résultats de la communauté. Il s’agit d’un fait durable : ce dilemme se pose dans les mêmes termes même avec une capacité de calcul plus grande. En conséquence, il n’existe pas, et il n’existera sans doute jamais, d’ensemble qui soit simultanément au niveau de ce qui se fait de mieux en termes de haute résolution, complexité, échantillonnage et incertitude modèle. Dans ce contexte, les approches mettant en œuvre, par exemple, des simulations globales à très hautes résolutions spatiales (de l’ordre du kilomètre), ne sauraient constituer, dans un avenir envisageable, une solution exclusive à la production de données climatiques pertinentes pour la production de services climatiques. Ces approches constituent en revanche une piste particulièrement prometteuse pour s’attaquer à des verrous de compréhension et de modélisation des mécanismes et processus qui régissent l’évolution du climat et les rétroactions, notamment atmosphériques.

2. Positionnement de Météo-France : objectifs scientifiques, ambitions sur les services climatiques

Cette section décrit les principaux objectifs scientifiques de Météo-France sur la question des projections climatiques, en termes de recherche et de services climatiques. Il reprend les principaux points de documents fixant la stratégie de long terme de l’établissement, notamment le Contrat d’Objectifs et Performance (COP), la stratégie scientifique de Météo-France et la prospective du CNRM.

2.1 Recherche

Météo-France est un organisme de recherche académique de premier plan au niveau national, européen et international en matière de climat et de changement climatique. Via cette activité scientifique, Météo-France vise à faire progresser la connaissance du climat, de sa variabilité et des événements extrêmes associés, en incluant son évolution passée et l'anticipation des changements futurs de l'échelle globale à l'échelle locale.

Météo-France développe une famille cohérente de modèles climatiques au meilleur niveau international allant du modèle global de résolution de l'ordre de 50 à 100 km au modèle régional d'échelle kilométrique, afin d'être en capacité de simuler le climat à toutes les échelles. Le développement de ces modèles nécessite à la fois une recherche amont sur les processus physiques, et une compétence technique forte. L'établissement contribue aux exercices d'intercomparaison CMIP et CORDEX via la production de simulations coordonnées, dont des projections climatiques. Les analyses des simulations climatiques réalisées dans ce cadre permettent de faire progresser la connaissance des évolutions climatiques et de leurs impacts sur la France métropolitaine comme les outremer.

Météo-France participe également à l'analyse des ensembles multi-modèles de simulations climatiques, dans le but de décrire les multiples facettes du changement climatique, notamment du point de vue des événements extrêmes, d'améliorer la compréhension des mécanismes en jeu, et de quantifier les incertitudes associées. L'établissement contribue à l'attribution de certaines de ses manifestations aux activités humaines, et à la caractérisation du changement climatique passé afin de mieux prévoir le futur.

Météo-France contribue aux rapports du GIEC via ses simulations climatiques, l'ensemble de ses travaux scientifiques (publications) et son expertise (écriture, relecture). Météo-France est une source de connaissances de référence pour les institutions scientifiques et les pouvoirs publics.

2.2 Services

Météo-France a l'ambition d'être l'acteur national de référence en matière de fourniture de données et de services climatiques, en appui aux démarches d'adaptation au changement climatique. Le changement climatique s'intensifiant, de nombreux acteurs économiques et décideurs ont besoin d'éléments objectifs afin d'anticiper et de s'adapter à l'évolution du climat. Ce besoin concerne notamment la prévention des risques face à des événements extrêmes potentiellement plus fréquents et/ou intenses (ex: canicules, forte précipitations, assèchement des sols, feux de forêts), mais plus généralement tous les choix visant à adapter l'activité des différents secteurs au climat des prochaines décennies : concevoir la ville de demain, faire évoluer les pratiques agricoles, ou repenser certaines activités touristiques pour ne prendre que quelques exemples. Ces services climatiques peuvent également porter sur l'évaluation de l'efficacité de certaines méthodes d'atténuation pouvant être mises en œuvre à l'échelle des territoires (ex: potentiel hydraulique, solaire ou éolien dans le mix énergétique, puits de carbone dans les sols et la végétation).

Du point de vue institutionnel, Météo-France participe à la décision publique dans le domaine de l'adaptation au changement climatique, notamment via la fourniture d'une

information fiable sur le changement climatique au niveau mondial et à l'échelle des territoires français, ses actions de formations et par sa participation au PNACC (Plan National d'Adaptation au Changement Climatique, sous l'égide de l'ONERC). Météo-France contribue à enrichir le centre de ressources sur l'adaptation au changement climatique (CRACC) du Ministère de la Transition Écologique. L'établissement fournit une information ciblée à destination des territoires et collectivités territoriales, permettant de caractériser les effets du changement climatique à leur échelle.

Météo-France développe une offre riche et à forte valeur ajoutée de services climatiques en appui aux démarches d'adaptation au changement climatique, en ciblant les besoins spécifiques des différents utilisateurs : acteurs publics et collectivités, filières économiques ou grand public (cf Encadré 1). Météo-France développe, maintient et alimente les portails « DRIAS les futurs du climat » mettant à disposition les scénarios climatiques régionalisés produits par les acteurs nationaux, « Climat HD » de services climatiques « génériques », et d'autres portails plus ciblés. Météo-France évalue et communique sur les effets actuels et futurs du changement climatique pour contribuer à la sensibilisation des décideurs et du grand public. Enfin Météo-France propose plusieurs formations clé en main (en ligne ou présentielle) pour accompagner les nouveaux acteurs de l'adaptation au changement climatique.

Enfin, Météo-France mène, en mode consultance, des études ciblées vers ses clients et quelques secteurs d'activité dans les domaines public et privé, identifiés comme particulièrement sensibles parmi lesquels l'énergie, les transports dont l'aéronautique, l'agriculture et la sécurité alimentaire, la gestion de l'eau, le tourisme, l'aménagement urbain. Ces études peuvent être de nature commerciale ou institutionnelle (ONERC, participation aux Groupes Régionaux d'Experts sur le Climat – GREC). Cet accompagnement concerne les stratégies d'adaptation comme les actions d'atténuation visant la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Pour y parvenir, Météo-France entretient et développe des partenariats opérationnels avec des organismes publics (tels que le CNRS, l'ADEME, l'INRAE, le CNES ou encore le CEREMA) ou privés pour mieux intégrer les spécificités des secteurs économiques visés, notamment en termes d'impacts, et faciliter un large déploiement de services climatiques.

La stratégie de l'établissement pour élaborer ces services consiste à développer un socle commun de projections climatiques pouvant être utilisées pour répondre de façon cohérente à l'ensemble de nos utilisateurs et besoins. Les demandes des clients et acteurs concernent notamment la fourniture de données (i) multi-modèles afin de décrire les incertitudes affectant les projections, (ii) multi-membres, c'est-à-dire avec un grand nombre d'années simulées, afin de disposer d'un large échantillon d'événements extrêmes, et (iii) haute résolution, permettant de disposer de données sur le climat du futur à une échelle pertinente pour l'étude des impacts et la prise de décision.

Encadré 1 : les services climatiques à Météo-France

L'offre de services climatiques de Météo-France se décline selon trois modalités principales. D'une part, Météo-France développe et maintient plusieurs portails fournissant un accès

direct à des données ou informations climatiques de référence. Ces portails peuvent être génériques, ou ciblés sur un secteur d'activité ou un type d'acteur particulier. D'autre part, Météo-France réalise des études de consultance au bénéfice de clients publics ou privés. Enfin, et surtout, Météo-France propose des services qui combinent une information climatique de référence et des éléments de vulnérabilité spécifiques aux différents secteurs pour éclairer les choix et les stratégies en matière d'adaptation au changement climatique.

Les Portails

DRIAS : les futurs du climat

Le service [Drias les futurs du climat](#) (Météo-France, IPSL, Cerfacs), issu du projet Drias (Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnement), est une mesure du premier [Plan National d'Adaptation au Changement Climatique](#) (PNACC 2011). Il a pour vocation de donner accès à des données de référence sur les changements climatiques futurs en France (métropole et outre-mers) et de fournir l'information et l'accompagnement nécessaires pour étudier les impacts associés. Il s'adresse à l'ensemble des acteurs nationaux impliqués dans les études d'impact et d'adaptation aux échelles nationale et infra-nationale (bureaux d'étude, collectivités territoriales, organismes publics, éducation, recherche).

Il a été récemment enrichi d'un portail [Drias les futurs de l'eau](#) qui donne accès à des projections hydrologiques des eaux de surface et souterraines, réalisées dans le cadre du projet national Explore2, ainsi que l'ensemble des informations utiles à leur bonne utilisation, sous différentes formes graphiques ou numériques.

Ces deux portails proposent une démarche d'appropriation en trois étapes : l'Espace Accompagnement présente un guide d'utilisation et de bonnes pratiques pour les projections climatiques ou hydrologiques. L'Espace Découverte permet de visualiser et géolocaliser les projections, pour les variables climatiques principales (température, précipitations, vent, humidité, rayonnement, évapotranspiration potentielle) et un large choix d'indicateurs représentatifs des évolutions moyennes et des extrêmes. Les projections sont déclinées pour différents horizons temporels (proche, milieu de siècle, fin de siècle) et trois scénarios climatiques (RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5). Enfin, l'Espace Données et Produit permet de télécharger les variables et indicateurs climatiques selon plusieurs formats de données numériques.

Climat HD

Destinée aux citoyens, l'application [Climat^{HD}, climat d'hier et de demain](#), propose des graphiques simples et des messages clés pour prendre la mesure des changements climatiques à l'échelle nationale et pour les régions françaises (métropole et outre-mers). A travers une vision intégrée des périodes passé et futur, elle permet de visualiser les changements de température, des précipitations, de divers phénomènes (jours chauds, jours de gel, vagues de chaleur, vagues de froid, pluies intenses) et d'indicateurs d'impact (humidité des sols, sécheresse, enneigement). ClimatHD est alimenté par des observations pour le climat passé et par les projections climatiques pour le climat futur, en cohérence avec les données du portail DRIAS.

La consultance : deux exemples dans le domaine de l'énergie

Energie – GRTgaz : pointes de froid en climat futur

En tant que Gestionnaire de Réseau de Transport, le groupe GRTgaz doit être en capacité de faire face à l'augmentation des quantités de gaz transportées lors des périodes de froid même dans des conditions climatiques exceptionnelles. À ce titre, GRTgaz veille au dimensionnement adéquat de ses infrastructures pour contribuer à la sécurité d'approvisionnement en France et en Europe.

GRTgaz retient une estimation de la consommation de gaz naturel à la pointe de températures froides au risque 2 %, c'est-à-dire la valeur associée à la durée de retour 50 ans. Le service rendu par Météo-France consiste donc, sur la base d'une liste de stations liées à la consommation de gaz en France, à établir les niveaux des extrêmes froids annuels pour des durées de retour 10, 20 et 50 ans, en utilisant des observations passées et des projections climatiques futures.

Energie – RTE : transition énergétique dans un contexte de changement climatique

En 2019, RTE a lancé une large étude sur l'évolution du système électrique intitulée « Futurs énergétiques 2050 ». Cette étude implique une démarche inédite en matière de concertation et de transparence impliquant les parties prenantes intéressées à tous les stades de construction des scénarios. Météo-France a participé à cette étude en fournissant une description du climat de la France en 2050 pour deux scénarios d'émission (RCP 4.5 et 8.5), sur la base des simulations à climat constant décrites ci-dessous. Cette consultation a conduit à la description de scénarios de production et de consommation électriques garantissant la sécurité d'approvisionnement et une électricité bas-carbone en 2050.

Les services d'aide à la décision

Climadiag commune

À partir des projections climatiques disponibles sur le portail DRIAS, [Climadiag commune](#) donne accès à une information ciblée sur les principaux changements climatiques attendus pour une commune ou intercommunalité à l'horizon du milieu du siècle. Une sélection d'indicateurs est présentée en regard des vulnérabilités déjà identifiées par le service Géorisques pour la commune et l'intercommunalité.

Climadiag entreprise

Sur la même base, [Climadiag entreprise](#) a pour but d'aider les entreprises de France métropolitaine à estimer leur sensibilité au changement climatique. En croisant les impacts actuels des aléas climatiques sur le fonctionnement de l'entreprise avec les évolutions de ces mêmes aléas dans le futur, ce service facilite l'identification de premières pistes en matière d'adaptation au changement climatique.

ClimSnow

[ClimSnow](#) vise à quantifier l'enneigement en stations de sport d'hiver (neige naturelle, damée, avec ou sans production de neige), à diverses échéances : fiabilité de l'enneigement, variabilité, capacité à maintenir une exploitation, selon quels efforts et selon quelles modalités. Il est ainsi possible de tenir compte de l'impact de l'évolution du climat dans les réflexions prospectives sur le développement et les transitions des territoires de montagne.

2.3 Collaborations

La très grande majorité des travaux de recherche conduits à Météo-France s'effectuent en collaboration avec plusieurs autres organismes scientifiques, nationaux et internationaux. Sans chercher à en faire une liste exhaustive, plusieurs de ces organismes jouent un rôle clé du fait de l'existence de collaborations fructueuses et pérennes. Le CNRS, via l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU), est co-tutelle du CNRM avec Météo-France, favorisant de très nombreuses synergies entre les personnels des deux structures au sein du laboratoire et au-delà. Le CERFACS partage avec Météo-France plusieurs thématiques de recherche et outils, notamment le modèle couplé global de climat. L'IPSL et ses laboratoires jouent un rôle clé au sein de la communauté française des sciences du climat, et constituent des partenaires privilégiés de long terme. De façon plus large, différentes collaborations existent au sein de la communauté nationale, notamment avec l'Observatoire Midi-Pyrénées (OMP), l'Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE), Mercator, ainsi que l'ensemble des partenaires membres de l'alliance AllEnvi. Enfin, Météo-France participe activement à plusieurs structures internationales de recherche, ou d'animation et de coordination, dont le GIEC, le WCRP⁶, notamment en ce qui concerne le dimensionnement des exercices CMIP, ou le CEPMMT⁷, avec lequel est développé le modèle atmosphérique global.

3. Contributions scientifiques de Météo-France

Cette section décrit les travaux scientifiques menés à Météo-France sur la question des projections climatiques, en recherche (3.1 à 3.4) ou au bénéfice des activités de services (3.5). Une large part de ces travaux relève de la contribution de Météo-France aux travaux du GIEC, qui prend différentes formes parmi lesquelles : (i) la modélisation du climat et la réalisations de simulations climatiques servant de base aux différents rapports, (ii) la publication de nombreuses études scientifiques mobilisées et citées dans les rapports, (iii) une participation directe à la relecture et à l'écriture des rapports (plusieurs auteurs des rapports du 6ème cycle d'évaluation étant issus de Météo-France). Certains des résultats ont également alimenté les rapports d'autres organismes, parmi lesquels le Haut Conseil pour le Climat.

3.1. Modélisation du système climatique

Météo-France développe et utilise un certain nombre de modèles numériques de climat, à l'échelle globale comme régionale. Ces modèles sont utilisés à la fois pour (i) répondre à une large gamme de questions scientifiques via des expériences numériques, (ii) améliorer les connaissances de l'ensemble des processus du système climatique, (iii) participer aux exercices internationaux de simulation du climat, en contribuant à la diversité des modèles

⁶ [World Climate Research Program](#)

⁷ [Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme](#)

de climat au niveau mondial, et ainsi (iv) fournir des données clés sur les projections climatiques, qui servent de base à de très nombreuses publications scientifiques (bien au-delà de Météo-France), à de nombreux rapports d'expertise dont les rapports du GIEC, et aux services climatiques de Météo-France et d'autres instituts nationaux ou internationaux (les données étant libres d'accès), (v) réaliser des expériences spécifiques en fonction des besoins scientifiques, de services ou de clients de l'établissement. Le développement de ces modèles et leur maintien à l'état de l'art sont des activités très structurantes, car nécessitant un investissement fort et dans la durée, en moyens humains comme matériels.

Échelle globale

Afin de mener ses recherches, et de participer à CMIP6, Météo-France a développé le modèle climatique couplé global CNRM-CM6 (Voldoire et al., 2019) et sa version système Terre CNRM-ESM2 (Séférian et al., 2019). Ces modèles simulent le système couplé composé de l'atmosphère, l'océan, les surfaces continentales, la glace de mer. La composante atmosphérique de ces outils est le modèle ARPEGE-Climat, version climat du modèle ARPEGE développé au CNRM (en lien avec le CEPMMT) et exploité par Météo-France pour la prévision numérique du temps (PNT). Les développements de ces modèles pour les applications PNT et climat sont coordonnés à l'échelle du CNRM et se nourrissent mutuellement.

En termes de développement, toutes les versions de ce modèle global ont bénéficié du développement d'une nouvelle physique pronostique au sein de la composante atmosphérique ARPEGE-Climat (Roehrig et al., 2020). Elle inclut notamment une nouvelle description de la turbulence, des ondes non-orographiques, des condensats, de l'ozone stratosphérique, et un schéma de convection traitant de façon unifiée la convection sèche, profonde et peu profonde. Les échanges d'énergie et d'eau avec les surfaces continentales et l'océan ont été revus. La représentation des surfaces continentales par le modèle SURFEX a évolué avec l'utilisation de schémas de neige et de sol multi-couches, la représentation de la thermique des lacs, et la prise en compte de nouveaux processus hydrologiques liés aux plaines inondées et aux eaux souterraines. L'océan est simulé par le modèle d'océan communautaire NEMO, avec un couplage à fréquence horaire. La composante glace de mer GELATO est développée au CNRM.

La version système Terre CNRM-ESM2 est basée sur le cœur physique de CNRM-CM6, et intègre d'autres composantes, en particulier le cycle du carbone. Sa composante continentale inclut l'évolution de la végétation en fonction de la concentration atmosphérique en CO₂ (effet fertilisant et anti-transpirant), les feux de forêt, l'évolution de la couverture des sols, le stockage du carbone dans les sols, sa décomposition, les flux associés de CO₂ vers l'atmosphère, sa lixiviation (lessivage) et son transport par les rivières. La partie océanique du cycle du carbone repose sur le modèle de biogéochimie marine PISCES. CNRM-ESM2 comporte aussi un modèle 3D de chimie stratosphérique et un schéma d'aérosols interactifs (poussières désertiques, sels marins, carbone-suie, particules organiques et aérosols secondaires sulfatés). À la différence de CNRM-CM6 qui est piloté par la concentration de gaz à effet de serre, cette version ESM peut être pilotée par des chronologies d'émissions (e.g., de CO₂), ce qui permet d'aborder de nouvelles questions (e.g., réchauffement additionnel attendu après un arrêt complet des émissions de CO₂ ; Jones et al., 2019).

Plusieurs développements ont été réalisés depuis la fin de l'exercice CMIP6. Sans recherche d'exhaustivité, on peut citer l'utilisation de nouveaux schémas de physique atmosphérique (convection profonde et peu profonde, rayonnement), l'utilisation d'une chimie atmosphérique plus complexe, la modélisation du pergélisol et une révision du couplage océan / fleuves. De nombreux autres développements scientifiques et techniques ont débuté en préparation des futures versions de ces modèles. En parallèle, une version optimisée du modèle ARPEGE-Climat a été mise au point (Geoffroy & Saint-Martin, en préparation). Elle bénéficie du développement d'une physique à l'état de l'art (e.g., amélioration de la convection et des différents types de nuage). Cette version est plus rapide d'un facteur 11 que les autres configurations équivalentes grâce à la mise en place, à architecture de calculs donnée, de plusieurs facteurs d'optimisation : "coarsening spatial" pour le transfert radiatif et la surface, calculs en simple précision, nettoyage et optimisation du code, de la physique, des entrées / sorties, travail sur la conservation de la masse, sur les niveaux verticaux, grilles cubique (spectrale) et icosaédrale (point de grille). Avec ce modèle, des simulations climatiques atmosphériques à 10-20 km pour un coût de calcul abordable sont d'ores et déjà envisageables.

Participation à CMIP6 (production de simulations)

Météo-France a participé, en association avec le CNRS et le CERFACS, à l'exercice international d'intercomparaison de modèles globaux CMIP6, avec trois versions de modèles :

- la version standard CNRM-CM6, avec une résolution de ~100 km, utilisée pour générer de grands échantillons de données (e.g., plusieurs simulations historiques et en scénarios), et réaliser nombre d'expériences de sensibilité (e.g., forçages radiatifs, détection et attribution, surfaces continentales, etc).
- une version à haute résolution CNRM-CM6-HR, avec une résolution de ~50 km, permettant de mieux représenter certains phénomènes tels que les cyclones tropicaux, utilisée pour un nombre réduit de simulations en raison de son coût de calcul (coût CM6 x10),
- la version système Terre CNRM-ESM2, décrite plus haut, avec une résolution identique à celle de CNRM-CM6 (coût CM6 x3). Les simulations produites avec cette version ont été sélectionnées récemment parmi les modèles globaux qui feront l'objet d'une descente d'échelle dynamique par les modèles régionaux de l'exercice EURO-CORDEX-CMIP6, en cours de démarrage au niveau international.

Ces différentes configurations du modèle de climat de Météo-France simulent généralement mieux les états moyens et certains processus que leurs prédécesseurs. Elles montrent une sensibilité climatique à l'équilibre (+4,5 °C à +5 °C pour un doublement de CO₂) plus élevée que la précédente version CM5, et dans le haut de la fourchette CMIP6.

La participation à un tel exercice est un effort considérable, nécessitant un engagement fort des personnels de recherche sur plusieurs années, dans les phases de développement du modèle, calibration, puis production de simulations, publication des résultats et de suivi des demandes utilisateurs. Elle implique notamment un effort important sur l'environnement technique des modèles, et la chaîne de production. Les données produites par les modèles

du CNRM ont été publiées via le réseau de bases de données internationales ESGF⁸ en 2018 et 2019, mais sont le fruit d'un travail débuté plusieurs années auparavant.

Échelle régionale

La modélisation régionale du climat, vise à fournir une vision du climat et du changement climatique à fine échelle (plus haute résolution) spatiale sur une région d'intérêt plutôt que sur la planète entière. Le fait de se concentrer sur une petite partie de la surface de la planète permet de mettre la puissance de calcul disponible au service d'une résolution spatiale et temporelle supérieure à celle du modèle global, et une meilleure description des processus en jeu dans les climats locaux, le tout à un coût de calcul acceptable. Au niveau mondial, Météo-France est un des instituts pionniers sur ce thème scientifique en ayant démarré dans les années 1990 (Déqué & Piedelievre, 1995) et ses travaux font aujourd'hui référence dans ce domaine. Ces dernières années, la modélisation régionale du climat s'est appuyée sur des modèles développés au CNRM, en cherchant à utiliser des versions aussi proches que possible de celles utilisées pour la prévision du temps et pour la modélisation globale du climat. Météo-France développe et utilise trois modèles régionaux de climat :

- CNRM-ALADIN, dont le code est maintenu au plus proche de celui d'ARPEGE-Climat, pour des résolutions allant jusqu'à 10 km,
- CNRM-AROME, modèle non-hydrostatique à convection profonde résolue, qui permet d'atteindre les résolutions kilométriques (souvent 2.5 km),
- CNRM-RCSM, modèle couplé du système climatique régional, au plus proche du modèle CNRM-ESM, intégrant la représentation à haute résolution de l'atmosphère, de l'océan, des aérosols naturels et anthropiques, des surfaces continentales incluant l'hydrologie et les fleuves. La composante atmosphérique s'appuie aujourd'hui sur ALADIN, avant de s'appuyer demain sur AROME – ce qui correspond à la version climat de la plateforme AROBASE (voir Lebeaupin-Brossier et al., COMSI 2023).

Ces différents modèles constituent des outils précieux pour décrire les climats actuels et futurs des régions d'intérêt pour l'établissement. Leur développement et utilisation en interne permet de les utiliser sur toute région d'intérêt, en métropole comme en outre-mer, et de réaliser des expériences numériques en fonction des besoins scientifiques, de services ou des clients de l'établissement.

La majorité des simulations climatiques régionales réalisées à Météo-France et des études associées concerne la zone France métropolitaine, Europe, Méditerranée. Cependant des simulations ont été réalisées avec les modèles régionaux de Météo-France sur de nombreuses zones géographiques : Océan indien tropical sud-est (dont La Réunion), Océan Atlantique tropical (dont zone Antilles-Guyane), Océan Pacifique tropical dont Nouvelle-Calédonie et Polynésie Française, Antarctique, Amérique du Nord, zone Chili-Pérou, et d'autres.

L'utilisation de modèles régionaux soulève plusieurs questions scientifiques en soi. Primo, plusieurs études montrent que les modèles à haute résolution présentent une valeur ajoutée par rapport à des modèles de résolution plus modeste, par exemple en termes d'épisodes de précipitations extrêmes tels que les événements méditerranéens (Caillaud et al., 2021;

⁸ Earth System Grid Federation (ESGF)

Fumière et al., 2020; Lucas-Picher et al., 2023), de vents régionaux, ou de flux air-mer intenses en Méditerranée. Secundo, des incohérences entre modèles globaux et régionaux ont été mises en évidence dans les projections climatiques régionales sur l'Europe. Ce dernier point est particulièrement important pour l'étude du climat futur sur la France métropolitaine. Plusieurs études récentes (Boé et al., 2020; Gutiérrez et al., 2020; Taranu et al., 2022) montrent que certains processus non représentés dans les modèles régionaux (notamment évolution temporelle des aérosols et effet direct du CO₂ sur la végétation) contribuent à limiter le réchauffement futur en Europe de l'Ouest. Inversement, d'autres études suggèrent que la résolution peut modifier des caractéristiques importantes du signal de changement climatique pour de bonnes raisons (e.g., une meilleure représentation du relief) (Giorgi et al., 2016).

Participation à CORDEX

Depuis son lancement en 2009 à Toulouse, Météo-France participe à l'initiative internationale de coordination de modèles régionaux de climat, appelée CORDEX, et coordonne son volet méditerranéen appelé Med-CORDEX. Ce programme vise à coordonner la production de simulations climatiques par des modèles régionaux (résolution typique : 50 à 12 km). Il fixe des protocoles de simulations, notamment les domaines géographiques étudiés (prioritairement les zones continentales). Météo-France est impliqué à des degrés divers dans les volets régionaux Europe (EURO-CORDEX), Méditerranée (Med-CORDEX), Afrique (CORDEX Africa) et Amérique du Nord (CORDEX North-America) ainsi que dans des initiatives plus thématiques (Flagship Pilot Studies). Les données des modèles globaux étant utilisées comme données d'entrée des modèles régionaux, les exercices CORDEX sont toujours décalés dans le temps par rapport aux exercices CMIP. La plupart des simulations CORDEX existantes à ce jour s'appuient donc sur des simulations de CMIP5. La phase CORDEX-CMIP6 n'a réellement démarré qu'en 2022.

L'ensemble de simulations le plus conséquent et le plus utilisé à ce jour dans les études d'impact et la production de services climatiques, est sans aucun doute l'ensemble EURO-CORDEX, financé en partie par le contrat Copernicus C3S PRINCIPLES auquel Météo-France a participé avec ALADIN. L'ensemble final contient plus d'une centaine de projections (triplet scénario / modèle global / modèle régional) à 12 km de résolution sur un domaine qui inclut la France métropolitaine, Corse comprise. Elles couvrent les trois scénarios RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5. Le RCP 8.5 est celui pour lequel le plus grand nombre de simulations sont disponibles : on en compte 67 (dont 5 basées sur le RCM ALADIN), chacune basée sur un couple GCM/RCM distinct.

Comme pour CMIP, la contribution de Météo-France à CORDEX constitue un effort significatif en ressources humaines et en calcul mais génère d'importantes retombées.

3.2. Post-traitements statistiques

La correction statistique des données de simulations numériques fait partie intégrante de la chaîne de production de données décrite Figure 1. Bien que Météo-France ait eu recours à ce type de technique pour ses besoins de production, notamment pour alimenter les services climatiques, il ne s'agissait pas d'un axe important de recherche sur la période récente (il l'a été précédemment). Quelques travaux peuvent malgré tout être signalés.

Descente d'échelle statistique

La descente d'échelle statistique vise à accroître la résolution spatiale de champs simulés par des modèles, sur la base de relations statistiques reliant la grande échelle (simulée par les modèles), et la petite échelle. Elle peut être utilisée à la place ou en complément de la descente d'échelle dynamique, qui utilise des modèles à aire limitée pour atteindre le même objectif.

Le principal travail mené sur cette thématique au cours des 5 dernières années concerne l'émulation d'un modèle régional (résolution ~12 km) par des réseaux de neurones profonds (Doury et al., 2022). Il s'agit d'apprendre, de façon statistique, la fonction de transfert entre champs de grande échelle et éventuellement d'altitude (température, vent, géopotentiel, humidité, concentrations en gaz à effet de serre) et champs de petite échelle proche de la surface (précipitations, température), au pas de temps quotidien. Cette approche peut être qualifiée de descente d'échelle hybride car elle utilise les résultats d'un modèle régional (donc une descente d'échelle dynamique) comme échantillon d'apprentissage – alors que la plupart des méthodes de descente d'échelle statistiques apprennent des observations ou des réanalyses. De cette façon, l'apprentissage couvre le climat présent comme le climat futur – ce qui est très intéressant pour une utilisation en mode projections. Les résultats sont très prometteurs, et suggèrent que cette approche est plus précise que nombre d'alternatives. Une fois le réseau de neurones entraîné, la descente d'échelle de 100 ans de simulations se fait en moins d'une minute sur PC, donc à un coût numérique presque négligeable par rapport à celui du modèle haute-résolution.

Correction de biais

De manière générale, les projections climatiques ne peuvent être utilisées directement pour les études d'impact à l'échelle locale car elles présentent des écarts (biais) par rapport aux observations. La mise en œuvre d'une méthode de correction statistique des simulations climatiques est indispensable pour pouvoir comparer les résultats des projections avec le climat actuel ou passé et pour pouvoir calculer un grand nombre d'indicateurs climatiques basés notamment sur des seuils absolus. Ces méthodes constituent un domaine d'étude à part entière. Elles sont une source supplémentaire d'incertitude dans la chaîne de production, et peuvent modifier en partie le signal du changement climatique.

La méthode Adamont (Déqué, 2007; Verfaillie et al., 2017) permet, pour chaque variable, de corriger (méthode quantile-quantile) la distribution simulée par saison et régime de temps.

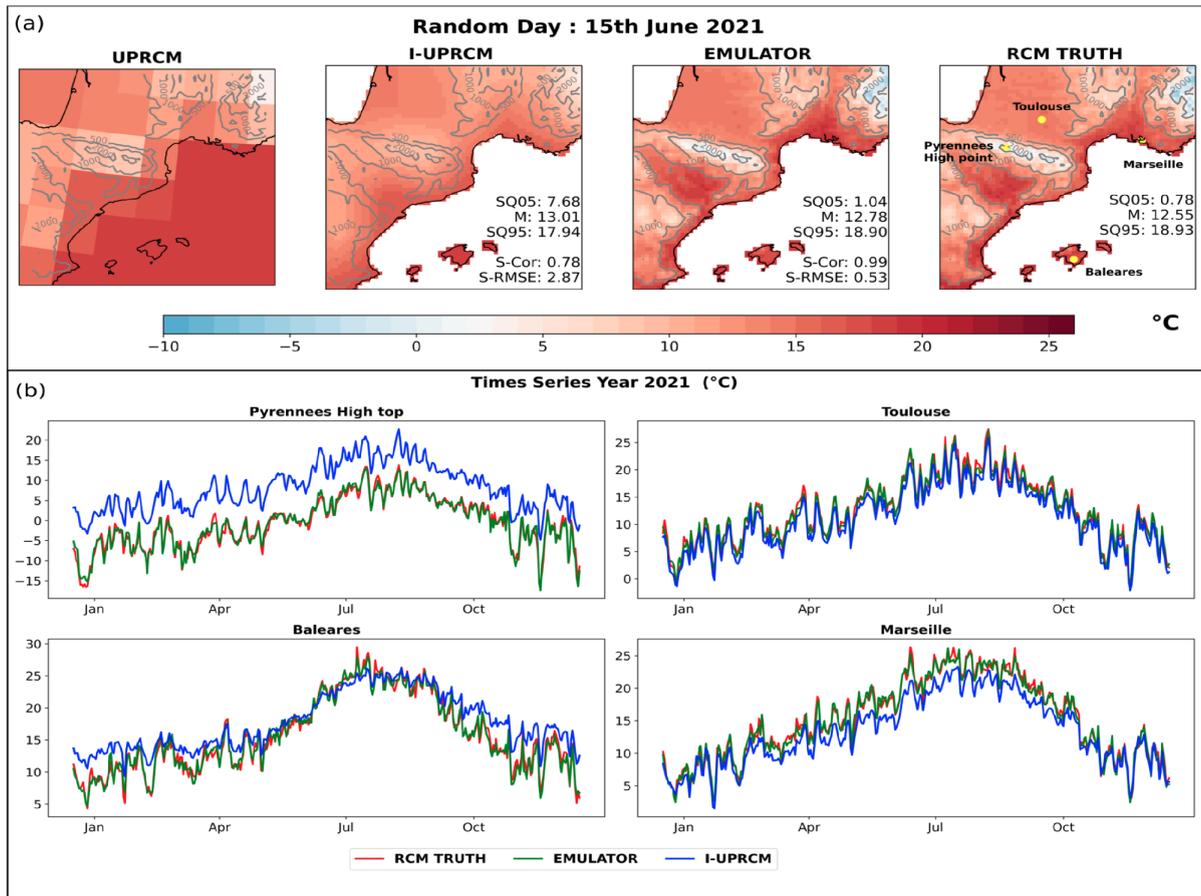


Figure 3 : Descente d'échelle statistique par IA (émulation d'un modèle haute-résolution) (a) Illustration de différentes méthodes de descente d'échelle visant à évaluer le champ de température d'une journée particulière : champ de grande échelle (*UPRCM*), interpolation spatiale (*I-UPRCM*), émulation par IA (*EMULATOR*), et "vérité" du modèle haute résolution (ici un RCM ; *RCM TRUTH*). (b) Séries temporelles reconstruites sur une année calendaire, sur 4 sites particuliers, illustrant la qualité de la reconstruction par IA. Figure issue de Doury et al. (2022).

3.3. Compréhension et mécanismes

Une large gamme de travaux visent à améliorer la compréhension du changement climatique, et des mécanismes physiques et biogéochimiques qu'il met en jeu. Par mécanismes, on entend ici des phénomènes macroscopiques tels que, par exemple, un forçage externe, une composante (e.g., l'océan), une rétroaction, un changement de la circulation atmosphérique ou océanique, etc, par opposition aux processus de petite échelle qui font l'objet de l'effort de modélisation décrit plus haut. Ces travaux orientés "compréhension" sont fondamentaux pour élever le niveau de confiance sur un diagnostic ou une caractéristique du changement climatique, et sont un pilier de l'expertise de Météo-France, et notamment du CNRM, sur cette thématique. Ces travaux s'appuient souvent sur l'ensemble des simulations produites par les centres de modélisation

internationaux, et de façon générale, l'expertise sur le changement climatique s'appuie sur l'ensemble de la littérature scientifique disponible.

Un premier axe vise à distinguer les variations climatiques qui relèvent des forçages externes (traduisant un changement climatique), de celles liées à la variabilité interne (traduisant une fluctuation naturelle), via les études de détection et d'attribution. De telles études ont été conduites sur le réchauffement global ou à l'échelle de la France (Ribes et al., 2021, 2022), en cherchant à identifier les contributions de différents forçages externes (notamment, gaz à effet de serre, aérosols), mais aussi d'autres variables comme l'humidité du sol (Wang et al., 2022), le contenu de chaleur océanique (Charles et al., 2020), etc. Cette thématique a été étendue à l'étude d'événements extrêmes particuliers, dans le but de déterminer dans quelle mesure l'influence humaine sur le climat affecte les propriétés (probabilité, intensité) d'un événement spécifique – par exemple les canicules 2019 en France (Robin et al., 2021). Ces méthodes (e.g., Robin & Ribes, 2020) sont désormais utilisées de façon quasi-opérationnelle pour étudier des événements affectant la France – dont les résultats sont parfois repris par le Haut Conseil pour le Climat (HCC).

Un deuxième axe concerne l'étude de la sensibilité du système climatique à différentes perturbations idéalisées, incluant l'analyse de différentes rétroactions climatiques. Cet axe est vaste. Il inclut par exemple les travaux portant sur la sensibilité du climat (réchauffement de long terme induit par un doublement de la concentration atmosphérique en CO₂) et les rétroactions radiatives associées, dans nos modèles (Saint-Martin et al., 2021) ou à long-terme (Rugenstein et al., 2020). Il couvre également l'étude de la sensibilité hydrologique (Allan et al., 2020; Douville & John, 2021), ou certains processus liés à la composition chimique de l'atmosphère ou au cycle du carbone, envisagés comme des rétroactions (Séférian et al., 2019). L'étude spécifique des aérosols, à l'échelle globale comme régionale, et de leur rôle dans les tendances climatiques passées et futures est également un axe de recherche important (Drugé et al., 2022; Nabat et al., 2020; Smith et al., 2020).

Un troisième concerne l'étude de la circulation de l'atmosphère ou de l'océan. Une modification de cette circulation est elle-même susceptible d'influencer diverses facettes du changement climatique. On peut citer la circulation atmosphérique des moyennes latitudes (Oudar, Cattiaux, & Douville, 2020; Oudar, Cattiaux, Douville, et al., 2020), ou la circulation thermohaline de l'Atlantique nord (Waldman et al., 2021). Par opposition, plusieurs caractéristiques du changement climatique telles que l'humidification de l'atmosphère ou l'intensification des épisodes de fortes précipitations relèvent de façon privilégiée d'une réponse thermodynamique (Chauvin et al., 2017).

Différents mécanismes permettent de mieux comprendre l'évolution des événements extrêmes. On peut citer la distinction des contributions dynamiques et thermodynamiques (Jézéquel et al., 2018; Yiou et al., 2020), les changements de climat moyen vis-à-vis de la variabilité – et par extension les changements de variabilité, etc. Certains mécanismes sont spécifiques aux événements étudiés, par exemple les extrêmes de niveau de la mer (Chaigneau et al., 2022), ou les questions de ressources en eau (Costantini et al., 2023).

Certains travaux portent spécifiquement sur des phénomènes climatiques régionaux, e.g., vents tels que Mistral ou Tramontane (Obermann-Hellhund et al., 2018), climat des îles

tropicales (Hopuare et al., 2015) ; ou sont orientés pour approcher la question des impacts, e.g., sur la végétation (Albergel et al., 2019), l'enneigement en montagne (Monteiro et al., 2022). Ce faisant, ces études contribuent directement à la réflexion sur les stratégies d'adaptation et présentent un intérêt direct aussi pour les services climatiques.

Enfin, certaines problématiques liées à l'atténuation du changement climatique ont été abordées, telles que les scénarios d'émission de CO₂ compatibles avec l'objectif de réchauffement global de 1,5 °C (collaboration avec le CIRED). Le recours aux cultures pour les bioénergies avec stockage de carbone (BECCS) a été évalué, montrant de possibles limitations liées aux ressources en eau à mobiliser pour les cultures.

3.4. Analyses multi-modèles et incertitudes

Une part significative de l'activité scientifique de Météo-France sur l'évolution future du climat concerne, au-delà du développement de nos outils de modélisation climatique et de la production de simulations, l'analyse des simulations climatiques produites avec nos modèles comme ceux des autres centres de modélisation. Elle revêt plusieurs aspects.

De nombreux travaux visent à décrire l'évolution des événements extrêmes en changement climatique. Un large éventail d'événements extrêmes ont été abordés sous cet angle, dont (i) les vagues de chaleur, sur continents et dans l'océan (Darmaraki et al., 2019; Robin & Ribes, 2020; Santana-Falcón & Séférian, 2022), (ii) les fortes précipitations, dont les épisodes de fortes précipitations méditerranéens (Ribes et al., 2019; Trambly & Somot, 2018) ou ceux associés à des cyclones tropicaux, (iii) les sécheresses, et questions de ressources en eau (Costantini et al., 2023), (iv) les cyclones tropicaux, notamment en termes d'intensité, localisation, saisonnalité (Cattiaux et al., 2020; Chauvin et al., 2020). Ces études sur les événements extrêmes peuvent s'appuyer sur des résultats de simulations de modèles globaux, de modèles régionaux, mais aussi d'observations.

L'analyse des ensembles multi-modèles existants vise également à décrire et quantifier les incertitudes qui affectent les projections. Plusieurs travaux documentent la dispersion des modèles globaux CMIP (Geoffroy & Saint-Martin, 2019; John et al., 2022; Tebaldi et al., 2021), ou régionaux (Pichelli et al., 2021). L'évaluation des incertitudes est particulièrement délicate dans le cas des simulations régionales type CORDEX, du fait de l'absence d'ensembles multi-membres (estimation de la réponse forcée moins précise), de simulations plus courtes (référence pré-industrielle non disponible), et de la représentation très inégale (en nombre de simulations) de certains modèles globaux ou régionaux dans l'ensemble. Ce problème a fait l'objet d'études spécifiques, visant à mieux estimer l'incertitude affectant ces projections (Evin et al., 2021), sans être encore traité explicitement à des fins de services climatiques.

Un nouveau thème de recherche concerne la combinaison statistique de modèles (résultats de simulations numériques) et d'observations pour obtenir une meilleure estimation du changement climatique futur ; les "contraintes observationnelles". En effet, l'incertitude sur l'ampleur du réchauffement à scénario donné demeure importante, typiquement un facteur 2 sur la température moyenne planétaire – et davantage pour d'autres variables ou échelles

géographiques. Le réchauffement climatique étant désormais bien engagé, les observations disponibles commencent à renseigner sur l'amplitude de cette réponse. A l'échelle globale, le 6ème rapport du GIEC a, pour la première fois, fait le choix d'utiliser ce type de technique pour estimer le réchauffement attendu en réponse à différents scénarios d'émission. Ce faisant, les plus forts niveaux de réchauffement, simulés par les modèles les plus sensibles à l'augmentation de l'effet de serre, ont été exclus de l'évaluation du GIEC, car jugés irréconciliables avec le réchauffement observé ces dernières décennies.

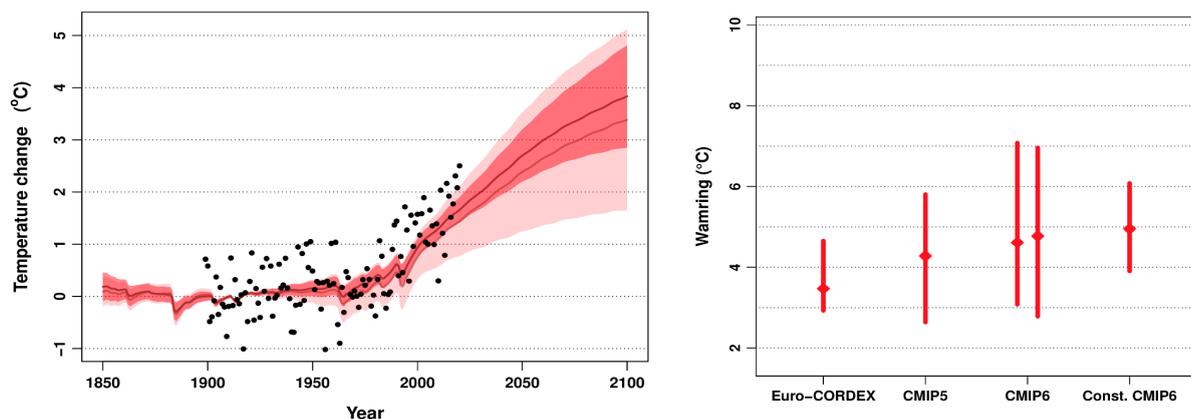


Figure 4 : Contrainte observationnelle sur le réchauffement en France métropolitaine. **Gauche :** Contrainte observationnelle sur l'évolution de la température moyenne annuelle en France métropolitaine, dans un scénario SSP2-4.5. Rose : intervalle de confiance à 90% sur le réchauffement (réponse forcée) simulé par les modèles globaux CMIP6. Rouge : intervalle de confiance à 90% après application de la contrainte observationnelle. Points noirs : température moyenne annuelle observée pour chaque année individuelle depuis 1899. Toutes les valeurs sont en anomalies par rapport à la période 1900-1930. **Droite :** Réchauffement estimé en moyenne annuelle entre les périodes 1976-2005 et 2070-2098, dans un scénario de fortes émissions (RCP8.5 ou SSP5-8.5), pour différents ensembles de simulations ou méthodes : l'ensemble des simulations de modèles régionaux Euro-CORDEX forcé par CMIP5 (Euro-CORDEX), l'ensemble des modèles globaux CMIP5, l'ensemble des modèles globaux CMIP6 (les 2 estimations se distinguent par des méthodes de calcul différentes), et les résultats de la contrainte observationnelle de l'ensemble CMIP6. Figures tirées de (Ribes et al., 2022).

Les travaux menés à Météo-France ont consisté à proposer une nouvelle méthode statistique permettant de réaliser ce type de combinaison, et prenant en compte l'ensemble des observations historiques, via des méthodes statistiques bien connues (krigeage, filtre de Kalman) (Ribes et al., 2021). Les résultats obtenus avec cette méthode sur le réchauffement planétaire moyen indiquent une réduction importante de l'incertitude, en particulier sur les valeurs les plus hautes, et ont contribué à l'évaluation du GIEC. Cette même méthode a ensuite été généralisée pour préciser les projections à échelle locale, révisant ainsi la carte du réchauffement attendu (Qasmi & Ribes, 2021). La même méthodologie a été utilisée pour préciser les projections d'autres variables, notamment liées à la réponse du cycle de l'eau (Douville, Qasmi, et al., 2022). Cette utilisation de contraintes observationnelles à l'échelle

régionale ou pour de nouvelles variables est une thématique nouvelle, qui va au-delà des travaux considérés dans l'AR6. Elle suggère, ainsi que d'autres travaux (Douville, Allan, et al., 2022), que la question des incertitudes régionales ne se limite pas à mieux caractériser la réponse des températures en moyenne globale.

Une application spécifique à l'échelle de la France métropolitaine suggère, contrairement aux résultats obtenus en moyenne globale, une révision à la hausse du réchauffement attendu dans le futur (Ribes et al., 2022 ; Figure 4). Ainsi, le réchauffement très rapide observé en France métropolitaine depuis les années 1970 (+2,1 [1,6 à 2,6] °C/siècle en tendance linéaire sur 1971-2020) semble irréconciliable avec les projections de certains modèles (+1,2 °C/siècle en moyenne pour les modèles Euro-CORDEX, +1,6 °C/siècle pour les modèles CMIP6), même en tenant compte de la variabilité interne. Ces résultats, très récents, doivent encore être critiqués et appropriés par la communauté scientifique. Ils posent néanmoins la question de comment utiliser au mieux le bouquet de simulations existantes (globales ou régionales) si ce type d'estimation est retenue. Il s'agit là d'une question nouvelle, souvent peu abordée à l'échelle des services climatiques nationaux (cf Encadré 3).

3.5. Jeu de simulations pour les services

Deux jeux de données principaux ont été utilisés au cours de la période récente dans le cadre des services climatiques. Le premier correspond aux données alimentant le portail DRIAS les futurs du climat, et a fait l'objet d'une mise à jour importante en 2020, décrite ci-dessous. Le second est constitué de simulations à climat constant, et a été utilisé pour différentes études commerciales.

Les données DRIAS 2020

Les données distribuées sur le portail DRIAS les futurs du climat doivent être à haute résolution spatiale, permettant des diagnostics fins sur les phénomènes météorologiques locaux et leur évolution future, indispensables aux acteurs socio-économiques. Elles doivent également couvrir au mieux les incertitudes inhérentes à toute projection.

Les données actuellement distribuées sur ce portail ont été publiées en 2020 – le précédent jeu de données datait de 2014 – et sont décrites dans un rapport dédié (Soubeyroux et al., 2021). Ce jeu de données DRIAS-2020 repose largement sur l'ensemble EURO-CORDEX-CMIP5 à 12 km de résolution, car il répond au double objectif résolution / incertitude modèle, en fournissant des simulations de différents modèles à haute résolution. Cependant, les modèles globaux et régionaux utilisés pour produire cet ensemble ne sont pas également répartis, ni d'égale qualité. A cela s'ajoute la complexité d'utilisation d'un jeu qui comporte plus d'une centaine de simulations. Ces arguments ont amené à sélectionner un sous-ensemble de simulations pour servir de base au jeu de référence DRIAS-2020 distribué sur le portail DRIAS les futurs du climat.

Huit critères ont été définis pour sélectionner les simulations :

1. Sélection d'une dizaine de couples GCM/RCM,

2. Les simulations doivent être disponibles pour au moins deux scénarios RCP,
3. Les GCMs doivent être jugés réalistes sur l'Europe (Mc Sweeney et al., 2015),
4. Maximiser le nombre de RCMs différents,
5. Les couples GCM/RCM concernés par une erreur connue sont rejetés,
6. Les simulations réalisées par des centres de recherche ou instituts français doivent être incluses,
7. Les couples avec une cohérence de physique entre le GCM et le RCM sont favorisés,
8. La dispersion du changement climatique simulé par l'ensemble EURO-CORDEX doit être conservée.

Ces critères ont abouti à sélectionner douze couples GCM/RCM, soit 30 simulations du climat futur (12 projections RCP 8.5, 10 projections RCP 4.5 et 8 projections RCP 2.6) et 12 simulations historiques. Le critère 8, concernant la conservation de la dispersion, a fait l'objet d'une attention particulière. En effet, à chaque étape de la sélection, depuis l'ensemble des simulations globales CMIP5 existantes jusqu'aux simulations régionales EURO-CORDEX sélectionnées, la dispersion des changements climatiques simulés est susceptible d'être modifiée. L'objectif pour DRIAS-2020 était de s'assurer que la réduction du nombre de simulations entraîne le moins possible de perte d'informations.

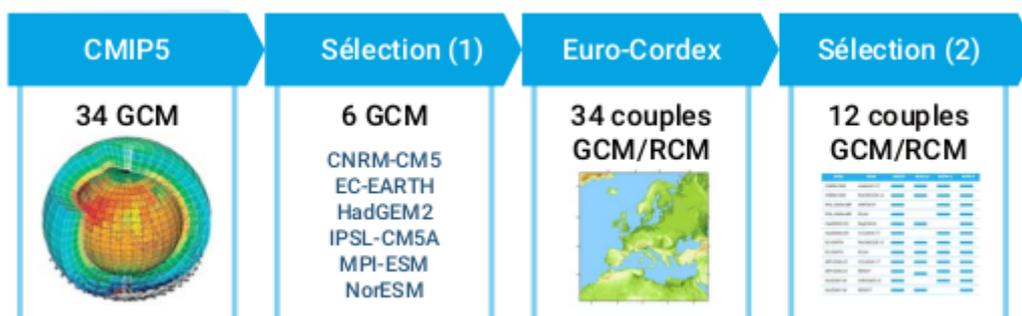


Figure 5 : Synthèse des étapes de la sélection des simulations pour le jeu DRIAS-2020. L'ensemble CMIP5 est ici caractérisé par 34 GCM. Les « forceurs » sont les 6 GCM CMIP5 qui ont été utilisés pour forcer des simulations régionales EURO-CORDEX jugés réalistes sur l'Europe. Les 34 couples EURO-CORDEX correspondent aux simulations régionales forcées par ces 6 GCM forceurs, disponibles en 2020. Parmi eux, 12 sont sélectionnés pour former l'ensemble DRIAS, selon les critères explicités.

Les données brutes des simulations EURO-CORDEX ont été projetées sur une grille de 8 km de résolution couvrant la France métropolitaine, et corrigées de leur biais par la méthode statistique ADAMONT à partir de la réanalyse météorologique de surface SAFRAN.

Dans l'ensemble finalement obtenu, le même poids est accordé à chacune des simulations retenues, dans une logique de démocratie des modèles, mais l'étape de sélection peut être considérée comme un filtre. Les propriétés statistiques de l'ensemble sont proches de celles de l'ensemble EURO-CORDEX complet, et montre un réchauffement sur la France légèrement plus faible que les modèles globaux CMIP5, notamment en été. Ce décalage

s'explique en partie par des forçages mal représentés dans les modèles régionaux (Boé et al., 2020), et plus généralement des incohérences entre modèles globaux et régionaux, notamment en termes de physique atmosphérique (Taranu et al., 2022).

Les simulations à climat constant (SCC)

Météo-France a réalisé dès 2005, pour les besoins d'EDF et de RTE, 400 années de simulations à climat constant avec le modèle ARPEGE Climat étiré de manière à obtenir une résolution native de 20 km sur la France. Deux climats (années 2000 et 2050) ont été simulées, ainsi que deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et 8.5).

Ces projections climatiques ont été post-traitées avec un pas de temps horaire et sur la zone Europe pour les besoins spécifiques notamment de RTE afin de coupler des modèles de simulation de l'équilibre du réseau électrique, dans le cadre de l'étude "futurs énergétiques 2050".

Les distributions des variables sont corrigées par une méthode de débiaisage basée sur la réanalyse ERA5 pour ce qui est des observations de référence, permettant d'inclure les extrêmes historiques dans les scénarios simulés.

Discussion

L'analyse des forces et faiblesses des deux approches sont résumées dans le Tableau 1.

Le principal point fort des SCC est l'échantillonnage de la variabilité interne pour le modèle utilisé. En effet, on dispose d'un grand nombre d'années (400 ans) décrivant un climat donné. Ceci permet d'établir des statistiques fiables et de disposer d'exemples d'événements extrêmes. Les principaux points faibles concernent l'impossibilité d'estimer les incertitudes liées aux modèles (un seul modèle), le non référencement dans des publications scientifiques, et le faible nombre d'horizons temporels disponibles (2000 et 2050). Ce dernier point serait rédhibitoire pour l'utilisation des SCC dans une approche niveau de réchauffement global (GWL) ou régional (RWL).

Les simulations DRIAS-2020 sont documentées dans le rapport DRIAS (Soubeyrou et al., 2021). Les simulations EURO-CORDEX dont elles sont issues ont été évaluées (Vautard et al., 2021) et ont servi de base à de nombreuses publications (Coppola et al., 2021; IPCC, 2021). L'utilisation de ces données est facilitée par le service DRIAS – les futurs du climat : le portail renseigne sur les bonnes pratiques et une hotline permet de poser des questions via un formulaire de contact. L'utilisation d'une douzaine de modèles régionaux permet une évaluation de l'incertitude modèle, d'autant plus robuste que ces modèles ont été sélectionnés pour représenter la gamme des futurs possibles simulée par l'ensemble EURO-CORDEX. En revanche, on ne dispose que d'un membre par modèle, ce qui ne permet pas d'échantillonner précisément la variabilité interne de chaque modèle. Parmi les autres limitations de ce jeu DRIAS-2020, on peut signaler la qualité médiocre des données horaires, qui permet d'alimenter des modèles de surface à bilan d'énergie (SURFEX/ISBA ou ORCHIDEE) mais ne permet pas d'étudier le changement climatique sur des variables infra-quotidiennes, l'absence de certaines variables utiles notamment pour le secteur de l'énergie (ex : le vent à 10 m), et la couverture géographique limitée à la France.

Enfin, une faiblesse importante qui concerne ces deux jeux de données est l'incohérence avec les résultats plus récents issus de CMIP6 et/ou de contraintes observationnelles.

	DRIAS-2020	SCC
nombre de modèles	8 à 12, selon le scénario	1
variété des scénarios	3 (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5)	2 (RCP4.5, RCP8.5)
échantillonnage de la variabilité interne par modèle	130 ans, climat transitoire	400 ans pour une date donnée
publications scientifiques	Rapport DRIAS, publications EURO-CORDEX, méthode de correction ADAMONT (Verfaillie et al., 2017)	Actes de conférences, e.g. Moncoulon (2016) Notes techniques de consultation publique, e.g., ELIA 2020 à l'intention des utilisateurs énergéticiens (Belgique)
résolution temporelle	1 jour	1 h ou 1 jour
résolution spatiale	8 km	20 km (résolution native sur la France)
variables disponibles	10 variables + nombreux indicateurs dérivés	80 variables, dont des variables d'altitude
couverture spatiale	France	Europe et Afrique du Nord
support utilisateurs	portail et hotline DRIAS	Selon la commande commerciale

Tableau 1 : Analyse comparative de l'ensemble de projections climatiques DRIAS-2020 et des Scénarios à Climat Constant (SCC).

Outre-mer

La couverture des territoires ultra-marins fait l'objet d'une attention particulière. Les jeux de données décrits plus haut pour la métropole ne répondent pas à ce besoin car ils ciblent spécifiquement l'Europe (EURO-CORDEX). En 2014, les territoires ultra-marins les plus peuplés (Antilles, Guyane, la Réunion, Nouvelle-Calédonie, Polynésie française), ont été couverts par des simulations régionales à une résolution de 10km environ. Les données issues de ces simulations sont accessibles via le portail DRIAS, mais leur qualité est variable. De plus, on ne dispose pas actuellement pour les outre-mer d'ensemble multi-modèles permettant d'évaluer l'incertitude modèle, ou de fournir un échantillonnage important. Au cours de la période récente, plusieurs initiatives ont visé à produire de

nouvelles projections régionales pour les Antilles (projet C3AF), la Guyane (projet GuyaClimat), La Réunion (projet BRIO) et la région Pacifique (projet CLIPSSA en cours). Ces expériences restent cependant basées sur un ou deux modèles, et hétérogènes (différentes générations de scénarios, différents types de modélisation, différentes résolutions, etc.) et donc sont difficilement exploitables pour alimenter les services climatiques. De façon plus générale, la littérature scientifique disponible sur les caractéristiques spécifiques du changement climatique dans ces régions est plus limitée que sur l'Europe occidentale.

4. Stratégie scientifique à 5 ans

Les perspectives à 5 ans sur les projections s'inscrivent dans la continuité de travaux en cours au sein des équipes. Ils vont également bénéficier de l'apport du PEPR TRACCS⁹ (cf Encadré 2) qui couvre une large part des thèmes abordés ci-dessous, et d'autres projets européens (e.g., ESM 2025, coordonné par Météo-France).

Encadré 2 : le programme TRACCS

La communauté française des sciences du climat a obtenu en 2022 le financement d'un Programme et Équipements Prioritaires de Recherche (PEPR) dédié à cette discipline, le programme exploratoire TRACCS – TRAnsformer la modélisation du Climat pour les services ClimatiquES. Il vise à transformer la modélisation du climat pour répondre à différents défis scientifiques et techniques actuels, à améliorer les connaissances et outils permettant d'évaluer les impacts et risques climatiques, à répondre aux attentes sociétales en contribuant au développement des services climatiques. Les activités envisagées couvrent: i) la modélisation des processus pertinents pour simuler le climat de l'échelle globale à l'échelle locale de manière à fournir des données climatiques fiables, ii) l'adaptation des codes informatiques aux nouvelles architectures de calcul pour saisir les opportunités offertes par l'exascale, iii) l'utilisation de méthodes statistiques avancées et d'intelligence artificielle pour caractériser les extrêmes climatiques, accélérer les modèles, et développer des émulateurs permettant de mieux quantifier les incertitudes, iv) l'estimation des impacts du changement climatique sur différents secteurs d'activité et différents territoires pour co-construire l'adaptation, et v) le développement d'un dialogue entre scientifiques et parties prenantes, l'enseignement et la communication avec tous les publics afin de co-construire des prototypes de services climatiques. Le co-pilotage par Météo-France et le CNRS de ce programme majeur pour l'action publique matérialise une

⁹ PEPR : Programmes et Équipements Prioritaires de Recherche ; TRACCS : TRAnsformer la modélisation du Climat pour les Services ClimatiquES

coopération efficace entre la communauté de recherche académique et l'opérateur national en météorologie et climat. Ce programme apporte un financement de 51 M€ sur 8 ans, répartis entre financement direct des activités de recherche, appels à projets, et activités de coordination et formation, avec un lancement en mars 2023.

Pour en savoir plus: <https://climeri-france.fr/pepr-traccs/>

4.1. Recherche

4.1.1. Modélisation (globale et régionale)

Échelle globale

Météo-France vise le maintien à l'état de l'art et le développement d'un modèle couplé global permettant de réaliser des simulations climatiques, selon plusieurs axes de recherche.

Un certain nombre de développements concernent le modèle couplé standard CNRM-CM de résolution de l'ordre de 100 km. Parmi les développements les plus significatifs, dont certains sont déjà engagés, on peut citer ceux concernant la physique de l'atmosphère (convection et rayonnement), les surfaces continentales (résolution, température de l'eau), l'utilisation de nouvelles versions des modèles d'océan et de glace de mer.

En parallèle, le remplacement de morceaux du code numérique (en particulier les paramétrisations physiques) par des réseaux de neurones commence à être exploré (Balogh et al., 2021, 2022) – dans un contexte de progrès rapides de ces approches en prévision du temps (Bi et al., 2022; Lam et al., 2022) comme en climat (Rasp et al., 2018).

Les développements de la version "Système Terre" CNRM-ESM sont davantage axés sur la complexité. Les développements en cours, notamment dans le cadre du projet H2020 ESM2025 (coordonné par Météo-France), visent une chimie atmosphérique plus complexe dans le but de mieux représenter les aérosols (chimie troposphérique, aérosols secondaires), une meilleure représentation du cycle du carbone (végétation, feu, zones humides), et de nouveaux couplages (e.g., aérosols et biogéochimie marine).

L'objectif général est de disposer de nouvelles versions des modèles couplés CM et ESM, intégrant les développements en cours sur chacune des composantes, à échéance 4-5 ans. Ce délai inclut une longue étape d'assemblage des composantes, et de réglage du modèle couplé, correspondant à environ deux ans de travail.

Participation à CMIP7 (production de simulations)

Météo-France participera à l'exercice CMIP7, même si les modalités, à la fois de l'exercice lui-même et de la contribution Météo-France, restent largement à définir. La communauté réfléchit actuellement au design de ce nouvel exercice, en tenant compte de l'effort considérable qu'il représente pour tous les centres de modélisation impliqués, en moyen

humain (développement des modèles, production des simulations) comme matériel (coût de calcul, infrastructure de stockage puis distribution). Météo-France participe à la conception et au dimensionnement de ce nouvel exercice via divers groupes de travail du WCRP. Tel qu'actuellement envisagé, il pourrait s'agir d'un exercice beaucoup plus léger que son prédécesseur CMIP6, centré sur un nombre réduit de simulations, mais comprenant toujours des simulations historiques et des scénarios – nécessaires aux activités de service. Les simulations sont envisagées à l'horizon 2025-26, en amont du 7ème rapport d'évaluation du GIEC, probablement autour de 2028. La contribution de Météo-France, telle qu'actuellement envisagée, reposerait largement sur la version CNRM-ESM2 déjà utilisée dans CMIP6, avant une montée de version majeure sur la plupart des composantes du système pour l'exercice suivant (CMIP8).

Échelle régionale

Météo-France poursuivra son effort de développement de modèle de climat à l'échelle régionale, dans le but de disposer de données représentatives du climat futur localement, ou à des échelles spatiales très fines. Les deux modèles régionaux actuels ALADIN (résolution ~10 km, dérivé du modèle global ARPEGE) et AROME (résolution ~2 km, dérivé du modèle non-hydrostatique utilisé en prévision du temps) continueront d'être utilisés dans les années à venir, notamment dans le cadre du prochain exercice EURO-CORDEX-CMIP6 (cf ci-dessous). Néanmoins, selon l'augmentation de la résolution des modèles globaux, le modèle ALADIN pourrait ne plus être utile au-delà de 2027, ce qui conduirait à concentrer les efforts de recherche sur le modèle AROME. Compte tenu de la résolution déjà élevée du modèle AROME, l'augmentation attendue de la capacité de calcul sera, pour ce modèle, affectée prioritairement à la réalisation de simulations plus longues, nombreuses, et couvrant un domaine plus large. Météo-France dispose également d'une version "système climatique" de ces modèles régionaux (équivalent du Système Terre global), qui inclut notamment un couplage avec l'océan et des aérosols interactifs – ce qui constitue une originalité et une force en modélisation régionale. Cette version va continuer à se développer selon un axe "complexité", visant notamment à inclure une meilleure représentation de la végétation et des villes. Cet axe de travail fait l'objet d'un projet interne associant plusieurs groupes du CNRM et des partenaires extérieurs (projet AROBASE).

Enfin, au-delà du développement des modèles eux-mêmes, les questions de valeur ajoutée des simulations régionales, et de cohérence des modèles globaux et régionaux sur les changements de grande échelle, continueront d'être étudiées.

Participation à CORDEX

Dans le but de réaliser une descente d'échelle dynamique de la dernière génération de simulations globales CMIP6, un nouvel exercice coordonné à l'échelle européenne est en train de débuter. Une sélection de modèles globaux à utiliser a été définie (Sobolowski et al., 2023). Les premières simulations de ce nouvel ensemble débutent actuellement, mais sans que la date de fin de cet exercice soit clairement définie – le précédent ensemble, à partir des modèles CMIP5, a continué à s'enrichir ces dernières années. Météo-France prévoit une contribution significative, avec le traitement d'au moins trois modèles globaux différents. Une partie au moins de ces nouvelles simulations couvrira une période élargie 1850-2100 – en cohérence avec les simulations CMIP.

Un nouveau volet de l'exercice CORDEX devrait porter spécifiquement sur la très haute résolution (i.e., <5 km), i.e., des modèles de type AROME, capables de simuler explicitement la convection profonde (CPRCM). Météo-France prévoit de contribuer à cet ensemble via des simulations AROME à 2.5 km de résolution, emboîtées dans les simulations ALADIN de type CORDEX (e.g., EURO-CORDEX sur la métropole), elles-même emboîtées dans des simulations de GCMs CMIP6. Néanmoins, si de tels modèles sont déjà utilisés par différents groupes européens, la coordination est moins avancée, et il n'y a pas à ce jour d'accord sur le domaine ni la période de temps que pourrait couvrir un exercice commun – notamment en raison du coût élevé de ces simulations, qui restreint fortement le champ des possibles. Un tel ensemble est envisageable à l'échéance 2027-28, mais sans certitude.

Exercice	2023		2024		2025		2026		2027		2028		2029		2030	
	S1	S2														
CMIP7																
CORDEX-C6																
CPRCM-C6																

Tableau 2 : Calendrier *indicatif* des prochains ensembles de simulation multi-modèles. La réalisation même de l'ensemble CPRCM-C6 est incertaine à ce stade.

La mise en oeuvre de ce calendrier devra également tenir compte de l'évolution des ressources de calcul intensif de Météo-France, dont le renouvellement est prévu dans les prochaines années, et qui s'accompagnera possiblement d'une évolution de l'architecture de calcul et de nécessaires adaptations des codes informatiques, actuellement en préparation. Ces moyens de calcul sont utilisés pour la prévision numérique du temps opérationnelle, mais aussi pour les recherches sur les processus physiques et de leur modélisation à haute résolution, la mise au point des systèmes de prévision numérique du temps, la composition atmosphérique, l'état des surfaces continentales et océaniques, et la modélisation climatique. Ces activités reposent en grande partie sur des codes communs et bénéficient fortement d'un environnement commun de développement et de calcul pour mutualiser outils et codes informatiques, et personnels mobilisés sur ces actions.

4.1.2. Traitements statistiques

Bien qu'il s'agisse d'une étape indispensable de la chaîne de production de données de projections climatiques, Météo-France ne conduit actuellement pas de recherche propre sur les méthodes statistiques de correction de biais. Nos futurs produits devront donc s'appuyer sur des méthodes développées par ailleurs dans la communauté nationale ou internationale.

En ce qui concerne la descente d'échelle statistique, dans la continuité des travaux récents, la principale piste explorée est l'émulation de modèle haute-résolution par intelligence artificielle. Les futurs développements viseront l'étude de nouvelles variables (i.e., au-delà

des températures et précipitations), et des résolutions temporelles et spatiales plus élevées (pas de temps horaire et résolution kilométrique) – les deux aspects constituant des défis. Pour les variables déjà traitées, l'application à grande échelle (traitement d'un ensemble de modèles globaux et comparaison à la descente d'échelle dynamique) constituera une étape de validation supplémentaire. Enfin, une étape de production devra être mise en œuvre en vue d'une éventuelle utilisation opérationnelle dans les services climatiques.

D'autres recherches sont menées sur ce thème hors Météo-France, au sein de la communauté française ou internationale, qui pourront être pertinentes dans l'élaboration de jeux de données. Des méthodes de descente d'échelle de type analogue (i.e., recherche d'une journée observée proche de celle simulée), ont été utilisées dans une précédente version de DRIAS (Boé & Terray, 2008; Dayon et al., 2018). L'extension de méthodes de correction de biais univariée (e.g., CDFt, Michelangeli et al., 2009) ou multivariée (e.g., R2D2, Vrac, 2018) au problème de la descente d'échelle est également à l'étude.

Des données de référence de qualité sont essentielles pour la mise en œuvre de méthodes de correction de biais. Météo-France est engagé, dans le cadre de son COP actuel (2022-2026), dans la mise en place d'une nouvelle réanalyse météorologique de surface à échelle kilométrique couvrant une durée d'au moins 50 ans, en remplacement à terme de la réanalyse SAFRAN. Cette nouvelle réanalyse, dénommée ARRA (AROME ReAnalyse), actuellement en cours de définition, s'appuie sur le système de modélisation AROME à 1,3 km de résolution. D'autres données à haute résolution peuvent également être mobilisées pour ces corrections de biais, par exemple les produits "lame d'eau haute résolution" tels que COMEPHORE.

4.1.3. Compréhension et mécanismes

L'activité de recherche visant la compréhension du changement climatique et les mécanismes associés s'inscrit dans une logique de long terme, et sera poursuivie dans les années à venir. Ce paragraphe met en avant quelques sujets d'importance particulière pour notre établissement. L'expertise développée continuera à s'appuyer sur l'ensemble des travaux (simulations, publications) réalisés par la communauté scientifique.

L'étude des rétroactions climatiques restera centrale pour la compréhension de plusieurs caractéristiques phares du climat global comme régional. Parmi elles, on peut citer les rétroactions nuageuses (étudiées via divers développements en modélisation et des expériences idéalisées), continentales (humidité des sols, neige), ou celles liées à des nouvelles composantes telles que le cycle du carbone ou la composition de l'atmosphère (e.g., végétation, feux). Cela concerne notamment la sensibilité (thermique) transitoire ou à l'équilibre, mais aussi la sensibilité hydrologique, et au-delà des moyennes globales, la distribution spatiale des changements.

Sur les questions d'attribution, incluant changement climatique moyen et événements extrêmes, les nouvelles pistes de recherche concernent (i) le suivi régulier de l'évolution du climat (e.g., réchauffement moyen, global ou régional), éventuellement en tenant compte de modes de variabilité observés (e.g., El-Nino), (ii) l'étude d'autres variables que la

température. Plusieurs perturbations anthropiques feront l'objet d'une étude détaillée, dont l'effet climatique des aérosols anthropiques, les modifications d'usage des sols, et les perturbations anthropiques directes de la ressource en eau (notamment prélèvements).

L'étude des mécanismes responsables de l'évolution des événements extrêmes, ainsi que les modifications de la circulation de l'atmosphère et de l'océan resteront des éléments importants de l'activité scientifique de l'établissement.

4.1.4. Analyse multi-modèles et incertitudes

Plusieurs axes de recherche vont continuer d'analyser les ensembles multi-modèles existants, et à quantifier les incertitudes sur les projections climatiques. Il s'agit d'une question d'intérêt pour une partie des acteurs de l'adaptation, dans le but de se protéger contre des phénomènes peu probables mais à fort impact.

Un premier axe concerne les contraintes observationnelles, à l'échelle globale comme régionale, et pour un nombre croissant de variables. Il s'agit d'une science jeune, dont les méthodes vont continuer d'évoluer, et dont certaines hypothèses doivent encore être discutées de façon approfondie – une première attente concerne donc la robustesse des résultats. Les principaux défis sur ce plan concernent (i) la mise à jour régulière de ce type d'estimation, chaque nouvelle année observée venant préciser un peu plus la trajectoire de long terme, (ii) l'application à un nombre croissant de variables (e.g., précipitations, eau du sol, niveau de la mer, extrêmes), et (iii) l'amélioration des méthodes, notamment en vue d'applications multivariées et/ou en grande dimension.

Un deuxième axe concerne l'exploration et la quantification de l'incertitude, et en particulier de l'incertitude modèle. L'objectif de long terme est de disposer d'une estimation fiable du changement climatique à l'échelle locale, notamment sur des zones d'intérêt particulier (côtes, montagnes, îles, villes). Une telle estimation inclut une description des incertitudes affectant les projections, et s'approche donc d'une information probabiliste. L'analyse des ensembles d'opportunité tels CMIP ou CORDEX, principale source d'information sur l'incertitude modèle des projections jusqu'à récemment, constitue en soi un sujet de recherche, du fait des faiblesses connues de ces ensembles (petite taille des ensembles, design, liens de parentés entre les modèles, combinaison des modèles globaux et régionaux). De nouveaux efforts sont envisagés pour explorer cette source majeure d'incertitude, via la réalisation d'ensemble de physique perturbée, dans lesquels les paramètres incertains des modèles sont perturbés dans le but d'explorer les incertitudes. En parallèle, les techniques de calibration des modèles (globaux comme régionaux), susceptibles d'influencer la dispersion de l'ensemble, commencent à être explicitement discutées, à la fois en termes de critères (ceux devant faire l'objet d'une calibration) et de méthodes (Hourdin et al., 2017). Elles présentent un double enjeu : (i) permettre une exploration systématique et une quantification précise des incertitudes, (ii) possiblement calibrer les modèles pour obtenir des projections climatiques cohérentes avec les observations (ou contraintes observationnelles) – un objectif qui risque de devenir de plus en plus difficile à atteindre au fur et à mesure que les observations réduisent la fourchette

des valeurs admissibles. Globalement, l'articulation entre ensembles de simulations disponibles et contraintes observationnelles justifiera de nouvelles recherches (cf aussi 4.2).

L'évolution des événements extrêmes sous l'effet du changement climatique sera abordée sous plusieurs angles : (i) les méthodes statistiques, nécessaires pour estimer des événements rares et impactants pour les infrastructures, (ii) l'élaboration de projections robustes, dans le but de préciser les risques futurs, (iii) les études d'attribution, en visant un élargissement des types d'événements étudiés. Les extrêmes chaud, froid, sec, humide et vent forts restent une priorité, mais de nouveaux travaux seront menés sur d'autres types d'événements, composés (e.g., extrêmes chauds et humides), d'échelle plus fine (e.g., phénomènes convectifs), ou liés à de nouvelles problématiques (e.g., pannes de vent).

Enfin, le champ des variables météo-climatiques pertinentes pour l'adaptation s'élargissant, de nouvelles variables seront étudiées, y compris sous un angle d'incertitude. A titre d'exemples, on peut citer le vent à 100 m d'altitude et/ou sur l'océan, le rayonnement, la température dans le sol ou les rivières, les extrêmes de précipitations horaires, etc.

4.2. Jeux de données pour les services

4.2.1. Stratégie générale

L'évolution à 5 ans des jeux de données de projections climatiques doit répondre à deux défis principaux :

- synthétiser les différentes sources d'information sur l'évolution future du climat. Ces sources diverses et parfois contradictoires, incluent notamment les différentes générations de modèles (globaux ou régionaux, et les traitements statistiques associés), et les observations, via l'émergence des contraintes observationnelles.
- répondre à des besoins variés des utilisateurs en termes de résolution, échantillonnage, et exploration des incertitudes (notamment modèle), tout en assurant une cohérence des informations et du discours sur le changement climatique et ses effets.

La stratégie générale proposée consiste à construire un ensemble de référence, ou socle commun de projections climatiques, permettant de couvrir autant que possible l'ensemble des besoins utilisateurs. Le recours à cet ensemble de référence assure une bonne cohérence dans les différents diagnostics ou services pouvant être fournis par l'établissement à l'ensemble de ses usagers et clients.

Parmi les demandes prioritaires des utilisateurs se trouve le besoin d'une information robuste, représentative des connaissances du moment et des incertitudes associées. En pratique, le futur ensemble de référence utilisé par Météo-France sera multi-modèles, afin de rendre compte de la diversité des réponses climatiques simulées par les modèles actuels.

Plus généralement, le prochain ensemble de référence sera plus hétérogène dans sa construction que l'actuel ensemble DRIAS-2020 – reflétant l'évolution de la recherche en modélisation climatique dans différentes directions, dont haute-résolution, complexité, grands échantillons, etc. Alors que l'ensemble actuel se limite à une descente d'échelle dynamique via des modèles régionaux (ensemble EURO-CORDEX), plusieurs approches complémentaires sont envisagées pour l'avenir. Les propositions détaillées ici s'inspirent également des stratégies de production de données utilisées dans d'autres pays (cf Encadré 3).

Encadré 3 : Stratégies de production de données dans d'autres pays

Les modèles régionaux d'EURO-CORDEX privilégiés en Europe, les modèles globaux favorisés en Amérique du Nord.

Afin d'alimenter leurs services climatiques, une majorité de pays européens ont adopté une stratégie proche de celle utilisée dans l'ensemble DRIAS-2020, axée en priorité sur l'utilisation de l'ensemble de modèles régionaux EURO-CORDEX. C'est notamment le cas de l'Allemagne, l'Espagne, la Suède, le Danemark, la Suisse, et d'autres. En revanche, les méthodes de traitements statistiques (descente d'échelle et correction de biais), et dans une moindre mesure, la sélection des simulations, varient selon les pays. Les produits finaux présentent un ensemble de modèles, et généralement des statistiques assez simples sur cet ensemble (e.g., moyenne, intervalle de confiance), dans une logique probabiliste. Les modèles de l'ensemble sont traités de façon démocratique, sans prise en compte de contraintes observationnelles.

La situation est plus contrastée en Amérique du Nord, où les modèles globaux de type CMIP sont souvent combinés à de la descente d'échelle statistique pour fournir une information à l'échelle fédérale ou des États.

Les exemples mis en avant ci-dessous visent à décrire certaines de ces pratiques.

Suisse : pratique proche de Météo-France

Personnes interrogées : E. Fischer (ETH), S. Kotlarski (MeteoSwiss)

La Suisse produit à échéance régulière une évaluation du changement climatique attendu à l'échelle du pays. Les résultats clés font l'objet d'un [rapport](#), d'un [résumé grand public](#), et d'un [portail](#) qui articule l'information nationale avec celle issue de l'AR6. L'ensemble de cette procédure d'évaluation s'appuie sur un dialogue avec divers utilisateurs et fait l'objet d'une publication (Fischer et al., 2022).

Le jeu de données utilisé s'appuie principalement sur l'ensemble EURO-CORDEX à 12 km de résolution, complété de façon statistique pour garantir l'utilisation du même ensemble de modèle pour les différentes périodes et scénarios (les résultats sont fournis pour des périodes cibles plutôt que sous forme de séries temporelles), auquel est appliqué une correction de biais (Sørland et al., 2018). Les résultats sont présentés sous forme probabiliste, typiquement moyenne et intervalles de confiance 5-95% sur les modèles considérés. Il s'agit donc d'un ensemble très similaire à DRIAS-2020.

L'évolution envisagée (nouveau rapport en 2025-2026) inclut l'ajout de nouvelles simulations régionalisées (génération CMIP6) et des simulations à résolution kilométrique disponibles, l'utilisation de niveaux de réchauffement globaux. La prise en compte de contraintes observationnelles sera évaluée, car le réchauffement observé se situe tout en haut de la fourchette simulée par les modèles actuels, induisant une inquiétude sur une possible sous-estimation du réchauffement par les modèles.

Royaume-Uni : projections probabilistes

Personne interrogée : B. Booth (UK Met Office)

Le Royaume-Uni distribue, via le portail [UK Climate Projections](#), un éventail de données et de résultats sur le changement climatique, passé et futur. Les données proposées couvrent un large spectre : variables atmosphériques et océaniques, observations et projections pour le futur (21^{ème} siècle), territoire national mais aussi Europe et échelle globale. Elles correspondent à plusieurs types de produits (Lowe et al., 2018), dont :

(i) des projections probabilistes, obtenues via une méthode statistique sophistiquée, qui combinent les résultats d'un ensemble de physique perturbé avec le modèle britannique (HadCM3), l'ensemble CMIP5, et les observations. L'information finale est présentée sous forme de distributions de probabilité, représentatives de l'ensemble des incertitudes affectant le calcul.

(ii) un ensemble de simulation globales (60 km), composé de 13 modèles CMIP5 et de 15 réalisations de physique perturbé avec le modèle britannique HadGEM3,

(iii) un ensemble de simulations régionales (12 km), basées uniquement sur le modèle national HadGEM3 (en configuration GCM ou RCM),

(iv) à terme, un ensemble CPRCM (2,2 km), produit avec le modèle de prévision du temps opérationnel.

Le service britannique se distingue donc par l'utilisation privilégiée (global) ou exclusive (régional) du modèle national, incluant un ensemble de physique perturbée, la sélection ou pondération des modèles, et les produits probabilistes.

États-Unis : descente d'échelle statistique

Personnes interrogées : M. Wehner (Univ. Berkeley), A. Crimmins (USGCRP)

Des rapports décrivant la science du changement climatique et de la variabilité du climat, ainsi que leurs impacts sur les États-Unis, aujourd'hui et tout au long de ce siècle, sont publiés de façon régulière ([NCA, National Climate Assessment](#)) – suivant une structure proche de celle des rapports du GIEC. Les données (notamment projections) utilisées ne sont pas distribuées via un portail, mais accessibles sur demande. Divers [résultats](#) (figures et données correspondantes) sont accessibles, sur un format similaire à l'atlas GIEC. Parmi les particularités de l'approche américaine, on peut citer l'absence de descente d'échelle dynamique. Les données de modèles globaux (CMIP) sont ramenées sur une grille de 7 km par descente d'échelle statistique via une méthode par analogue (LOCA, Pierce et al., 2014) ; d'autres méthodes sont testées pour le prochain rapport (sortie 2023 ou 2024). Les résultats des modèles globaux sont pondérés en fonction de leurs qualités (Sanderson et al., 2017). Afin de couvrir les attentes de différents utilisateurs, les rapports NCA contiennent des chapitres ciblés pour différents secteurs d'activité, et des variables spécifiques.

Canada : variété d'approches

Personnes interrogées : F. Zwiers (PCIC), D. Paquin (Ouranos)

La distribution de données climatiques au Canada fait intervenir différentes organisations, au niveau national et fédéral. Au niveau fédéral, des données de projections et diagnostics associés sont accessibles via [un portail commun](#), ainsi que via l'[atlas du climat du Canada](#). La principale source de données sont les modèles globaux CMIP (incluant des grands ensembles), descendus en échelle par une méthode statistique multivariée (Cannon, 2018) à une résolution de 10 km sur le pays. Néanmoins, des données obtenues par descente d'échelle dynamique sont également distribuées. Les modèles CMIP5 ont tous le même poids ("model democracy"), mais cette approche devrait évoluer pour CMIP6, du fait de modèles qui semblent montrer un réchauffement excessif (Hausfather et al., 2022). La prise en compte de l'incertitude modèle est encouragée, mais sans interprétation probabiliste. Parmi les évolutions envisagées à 5 ans figurent l'utilisation de descente d'échelle statistique par IA (entraînées sur des observations ou réanalyses), la réalisation de nouvelles simulations régionales, et une réflexion sur l'infrastructure technique, car le stockage de grands jeux de données haute résolution devient un challenge.

4.2.2. Court terme : information, niveaux de réchauffement

A court terme (2023-2024), il ne sera pas possible de disposer d'un nouvel ensemble de simulations multi-modèles de meilleure qualité que celui actuellement distribué via le portail DRIAS les futurs du climat. L'enjeu principal consiste donc à mettre en cohérence l'information issue de cet ensemble avec les résultats de la nouvelle génération de modèles globaux (CMIP6), et les estimations basées sur les contraintes observationnelles sur la France métropolitaine.

Une première action consiste à fournir une information sur les nouvelles simulations et études parues, et un avertissement sur les éventuelles incohérences avec certaines des données actuellement distribuées. Cette information concernerait à la fois les températures et les précipitations. Il conviendra d'explicitier l'idée que les simulations les plus chaudes DRIAS-2020 sont cohérentes avec l'ensemble CMIP6 contraint et d'identifier ces simulations dans une approche storyline¹⁰ ou de modélisation des impacts. La pertinence de l'utilisation des différents scénarios RCP en fonction de l'échéance temporelle sera discutée ; par exemple, le RCP8.5 DRIAS-2020 est-il compatible avec les projections SSP2-4.5 CMIP6 contraintes par les observations ? Cette information serait également à destination des services climatiques basés sur l'ensemble DRIAS-2020 et sur les simulations à climat constant.

Une deuxième piste consiste à décrire le climat de la France à *niveau de réchauffement donné*, le niveau de réchauffement pouvant être global ou régional. L'approche par niveaux de réchauffement global (GWL) permet un lien direct entre les objectifs des négociations internationales (e.g., accord de Paris visant à limiter le réchauffement mondial sous la barre des +2 °C par rapport à la période pré-industrielle, ou engagements actuels des états

¹⁰ Trajectoire plausible et cohérente du système climatique, permettant d'illustrer les incertitudes associées à la réponse du système climatique au forçage et à la variabilité interne.

reflétés par leurs contributions déterminées nationalement) et les impacts locaux. Elle a été largement utilisée dans les récents rapports du GIEC (IPCC, 2018, 2021) et la littérature scientifique en général. Elle permet de restaurer une certaine cohérence entre les résultats des contraintes observationnelles (e.g., qui prévoient un réchauffement de +2 °C en 2050 dans un scénario d'émissions intermédiaires), et certains modèles qui réchauffent trop ou pas assez vite (e.g., un modèle CMIP6 est déjà à +2 °C de réchauffement en 2020). En raisonnant à +2 °C de réchauffement global, tous les modèles redeviennent pertinents pour décrire la distribution spatiale du réchauffement (et beaucoup d'autres caractéristiques du changement climatique) correspondant à un tel réchauffement global.

L'approche par niveau de réchauffement est également une réponse à une demande institutionnelle. Dans le cadre des travaux de préparation de la première loi de programmation sur l'énergie et le climat (LPEC), une trajectoire de référence pour l'adaptation (TRACC) doit être définie, et une approche par niveau de réchauffement a été retenue. L'ONERC a demandé à Météo-France d'éclairer ce que signifie pour la France 1,5, 2, 3, ou 4 °C de réchauffement global depuis 1850-1900 conformément aux références adoptées par le GIEC (2021, 2022). Pour réaliser ce calcul, l'approche adoptée dans l'AR6 (Nikulin et al., 2018) consiste à rechercher la période au cours de laquelle un niveau de réchauffement global est atteint, puis à décrire le climat de la France autour de cette date (Figure 6, option 1). Cependant, cette approche directe n'est pas satisfaisante avec le jeu DRIAS-2020, car elle conduit à une estimation du réchauffement sur la France inférieure à celle obtenue à partir des dernières simulations climatiques CMIP6 (avec ou sans contrainte observationnelle). En particulier, on ne retrouve pas l'ordre de grandeur suggéré par les contraintes observationnelles – réchauffement sur la France +20% à +30% au-dessus du réchauffement global. Ce point a été soulevé dans le cadre de la préparation du PNACC3.

Dans le but de mettre en cohérence les simulations DRIAS-2020 avec les résultats de CMIP6 contraint, une possibilité consiste à faire le même type de séparation entre chronologie et caractéristiques spatiales, mais en s'appuyant sur le niveau de réchauffement moyen à l'échelle de la France métropolitaine (Figure 6, option 2). L'utilisation d'un niveau de réchauffement régional présente toutefois des inconvénients : (i) une confusion possible entre le réchauffement France et le réchauffement global (utilisé dans les négociations internationales), (ii) un manque de pertinence pour des régions non métropolitaines (outre-mer), (iii) une difficulté pour comparer les résultats avec d'autres pays (e.g., européens), si chacun utilise des niveaux de réchauffement sur une région différente.

Alternativement, l'approche par niveau de réchauffement régional pourrait être utilisée (seulement) comme un intermédiaire de calcul, dans une description du climat de la France par niveau de réchauffement global. Il s'agirait, pour chaque niveau de réchauffement global (i) d'évaluer le niveau de réchauffement sur la France correspondant, sur la base des résultats CMIP6 contraints, puis (ii) de décrire le climat de la France au moment où ce niveau de réchauffement national est atteint, sur la base des simulations DRIAS-2020 (Figure 6, option 3).

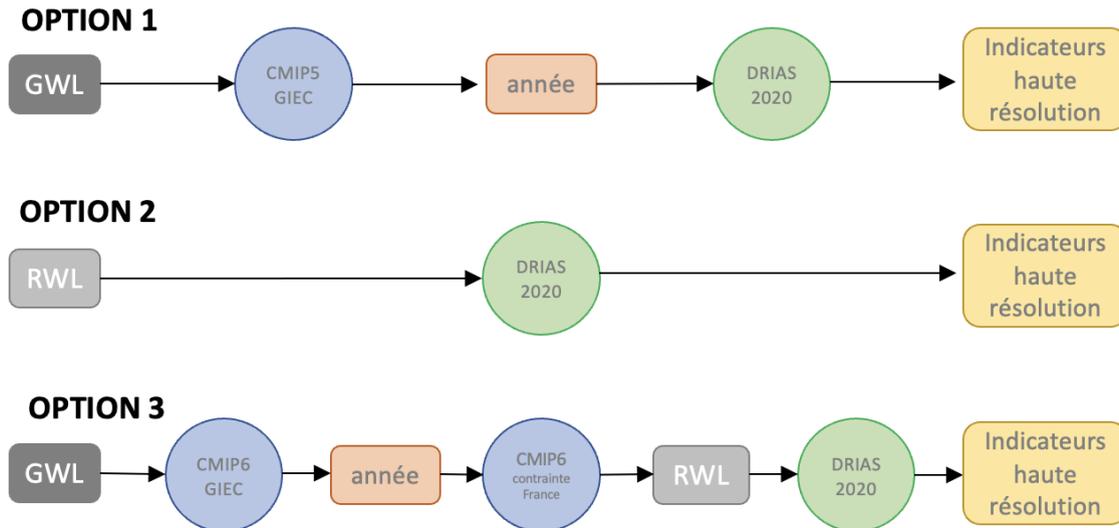


Figure 6 : Vision schématique des différentes pistes envisagées pour présenter une information climatique à haute résolution sur la France à niveau de réchauffement donné, global (global warming level, GWL) ou régional (regional warming level, RWL).

La mise en œuvre de l'une ou l'autre de ces méthodes est actuellement à l'étude.

Cette dernière option est actuellement privilégiée pour le travail de description fine du climat de la métropole dans la trajectoire de référence pour la TRACC. Il conviendra cependant d'analyser l'impact sur toutes les variables climatiques, dont les précipitations. Une difficulté concerne le traitement des niveaux de réchauffement élevés, e.g., +4 °C GWL, car le niveau de réchauffement France correspondant n'est pas atteint dans certaines simulations DRIAS-2020 (même dans un scénario de fortes émissions).

Par ailleurs, les travaux sur les contraintes observationnelles à l'échelle régionale étant très récents, les questionnements ci-dessus sont nouveaux et n'ont pas été abordés dans de nombreux autres pays (cf Encadré 3). Pour cette raison, la démarche décrite ici, si elle aboutit, fera l'objet d'une publication.

Enfin la question des incertitudes à niveau de réchauffement (global ou régional) donné devra faire l'objet d'une attention particulière. Par exemple, l'incertitude sur l'évolution des précipitations reste aussi large à niveau de réchauffement donné que dans l'approche chronologique habituelle. Les produits finaux devront rendre compte de cette incertitude, que ce soit de façon probabiliste ou via l'utilisation de storylines, afin qu'elle puisse être intégrée dans la prise de décision. Une évaluation robuste des incertitudes nécessitera notamment de combiner les incertitudes sur la date à laquelle le niveau de réchauffement cible est atteint, sur les caractéristiques du climat local à ce niveau de réchauffement France et sur la correspondance RWL/GWL.

4.2.3. Moyen terme : un nouveau socle de projections

Objectif et stratégie

L'objectif est de constituer, à l'horizon 2025 (mais avec une certaine souplesse afin de s'adapter à l'arrivée des nouveaux ensembles multi-modèles, cf Tableau 2) d'un nouvel ensemble "socle commun" de projections climatiques qui permette de répondre aux besoins actuellement satisfaits par le jeu DRIAS-2020 et par les scénarios à climat constant, puis de l'utiliser pour élaborer de nouveaux services climatiques. Cet ensemble étendu de projections devra répondre à différentes exigences :

- besoins type DRIAS : couvrir l'incertitude sur la réponse attendue en température, précipitations, et état de surface (sols, neige, etc), à partir d'une sélection de simulations.
- besoins des clients actuellement servis avec des Simulations Climat Constant :
 - disposer d'un ensemble suffisamment étendu pour explorer la variabilité interne des modèles, ceci notamment pour la caractérisation des extrêmes,
 - disposer des variables d'intérêt pour l'énergie (hydrologie, rayonnement, vent à hauteur d'éolienne, température dans le sol etc. et à pas de temps horaire pour la simulation du réseau électrique)
 - couvrir un domaine plus large que la métropole (Europe), par exemple en débiaisant les simulations GCM/RCM utilisées directement avec la réanalyse européenne CERRA,
 - disposer de séries de données permettant d'évaluer des risques rares et/ou multivariés, en climat actuel ou futur, sur différentes zones géographiques (Europe, outremer ou plus régionales) et traiter en cohérence les variables température, vent, rayonnement, nébulosité en particulier pour les énergies renouvelables.
- besoins « haute résolution » : disposer de premières simulations kilométriques et horaires avec le modèle AROME sur une partie de l'ensemble, pour aborder le potentiel des modèles CPM (Convection Permitting Models) notamment pour les précipitations (e.g., besoin RTE: rafales de vent, ruissellement sur les postes, lignes et pylônes ; besoin CCR : précipitations intenses liées aux épisodes méditerranéens). En attendant la réanalyse kilométrique ARRA, l'ajustement statistique sur les précipitations pourra être fait sur la réanalyse radar COMEPHORE.

Le *socle* de simulations visé ici constitue un vivier de simulations sur lequel peuvent s'appuyer les différents services climatiques rendus par l'établissement. La stratégie pour bâtir cet ensemble consiste à utiliser des simulations de nature variée, couvrant différentes résolutions, variables, domaines spatiaux ou temporels, etc. Selon les usages ou le type de service climatique visé, une partie seulement de ce large ensemble pourra être utilisée.

La réflexion portée dans cette section est centrale dans le périmètre du programme TRACCS (cf Encadré 2), qui constitue un cadre pour mener à bien ces travaux, apporter des ressources, et favoriser la nécessaire collaboration scientifique entre les acteurs concernés (Météo-France, CNRS, CERFACS, laboratoires de l'IPSL notamment).

Constitution de l'ensemble

La première version de ce socle commun de projections pourrait combiner plusieurs types d'approches listées ci-dessous, à une résolution (après traitement statistique) comparable à celle de DRIAS-2020. La pertinence ou la faisabilité de certaines d'entre elles demandent encore à être confirmées ; leur inclusion dans l'ensemble devra faire l'objet d'une décision dans la suite de la démarche.

- Simulations globales CMIP6 directement descendues d'échelle sur la France avec une ou plusieurs méthodes statistiques. Cela inclut l'utilisation de plusieurs membres d'un ou plusieurs GCMs ("grands ensembles") pour explorer la variabilité interne. La question de faisabilité concerne ici principalement les méthodes de descente d'échelle statistique, notamment la facilité à les mettre en œuvre et le réalisme des résultats obtenus. Une piste prometteuse actuellement disponible au CNRM consiste à utiliser une descente d'échelle par apprentissage machine décrite plus haut (Doury et al., 2022) ; actuellement seule l'émulation de la température (publiée) et des précipitations quotidiennes (testées) sont disponibles. D'autres méthodes pourront également être testées, notamment celles étudiées dans TRACCS. A noter que de telles approches statistiques ont été utilisées au début de DRIAS, et que la communauté française mène toujours des recherches sur ce thème.
- Intégration, selon disponibilité et après évaluation, des premières simulations régionales EURO-CORDEX-CMIP6. Plusieurs simulations seront réalisées en interne avec le modèle ALADIN à partir de plusieurs GCMs CMIP6 sélectionnés avec soin, dont celui de Météo-France (travaux déjà engagés). Cet effort permet de ne pas dépendre entièrement des autres centres, et de produire les fichiers de couplage nécessaires pour AROME. D'autres simulations seront produites par les partenaires européens d'EURO-CORDEX. Une incertitude persiste sur la date à laquelle ces simulations seront disponibles (les toutes premières simulations sont terminées chez certains partenaires européens mais pas encore disponibles). Par ailleurs, le problème de l'estimation plus faible (par rapport aux GCM) du réchauffement, lié à l'utilisation de modèles climatiques régionaux, risque de persister dans cette nouvelle version, au moins en partie.
- Des simulations atmosphériques globales à 10-20 km de résolution avec la version optimisée du modèle ARPEGE-Climat. La couverture globale permet de couvrir l'ensemble des territoires français (métropole et outre-mer) de façon cohérente, sans recours à des modèles régionaux, et permet une meilleure représentation des phénomènes de grande échelle ou pilotés par la grande échelle (e.g., à 10-20 km : tempêtes, cyclones tropicaux, etc). Cette approche permet de couvrir une période temporelle étendue, partant de l'ère préindustrielle. Afin de répondre aux besoins des utilisateurs du futur jeu de données, une attention particulière sera portée sur la constitution de l'ensemble, afin de prendre en compte les principales incertitudes (modélisation, variabilité interne, scénarios). Les caractéristiques définitives du jeu de données produit seront ajustées en fonction de l'avancée des travaux et du calendrier visé. De telles simulations peuvent permettre de forcer des modèles de type AROME sur n'importe quel domaine du monde, en particulier outre-mers, sans

passer par des modèles intermédiaires de type ALADIN.

- Un échantillon de simulations climatiques kilométriques, réalisées essentiellement avec des modèles de climat à convection profonde explicite, à 2-4 km de résolution. Au CNRM, il s'agira de simulations AROME à 2,5 km de résolution. Ces simulations sont prévues dans le COP de Météo-France. Certaines simulations de ce type ont déjà été produites (île de La Réunion) avec AROME ; celles sur la métropole le seront à partir de 2024, emboîtées dans les simulations EURO-CORDEX-CMIP6 réalisées avec ALADIN. En revanche, une incertitude persiste sur la production par d'autres instituts européens de simulations kilométriques couvrant la métropole, et son calendrier.

Chacun de ces sous-ensembles sera ensuite ramené sur une grille commune, impliquant potentiellement une descente d'échelle, mais avec un changement de résolution modeste. Ensuite, ces données seront ajustées via l'application d'une correction de biais. Le jeu de données de référence pour la période observée (e.g., réanalyses SAFRAN à 8 km, ou ARRA à 1 km sur la France ; réanalyse CERRA/ERA5 sur l'Europe) devra être discuté avec soin. Une réflexion sera menée sur le choix de la méthode de correction, notamment son caractère univarié ou multivarié (i.e., intégrant les dépendances entre variables), et le traitement des extrêmes, qui constitue une attente forte des clients.

Une réflexion sera menée sur la période de temps couverte par ce nouvel ensemble. L'utilisation d'une référence pré-industrielle (e.g., 1850-1900) s'est imposée dans les négociations climatiques internationales comme dans l'AR6. Les simulations régionales type EURO-CORDEX sont habituellement restreintes à la période post-1950 (certaines simulations du prochain ensemble devraient être étendues jusqu'en 1850). La possibilité d'exprimer une partie des résultats par rapport à cette référence sera évaluée.

Un autre point d'attention concerne la cohérence des résultats tout le long de la chaîne de production de données. Comme discuté plus haut, divers résultats récents suggèrent que l'utilisation de modèles régionaux peut modifier les caractéristiques du changement climatique, même à grande échelle. De la même façon, les méthodes de correction de biais peuvent affecter les caractéristiques du changement climatique. Un effort particulier sera fait pour étudier, documenter et limiter ces incohérences.

Il sera essentiel de documenter (et de publier) les méthodes utilisées pour constituer ces jeux de données ainsi que les résultats obtenus, afin de permettre la meilleure traçabilité possible des résultats et l'adéquation de ce travail avec les bonnes pratiques du domaine qui se consolident progressivement (rapport GIEC 2021, projet européen ClimatEurope2 <https://climateurope2.eu/>, etc).

De la donnée à l'information pertinente

La constitution d'un tel ensemble, ou socle commun de simulations climatiques, est à distinguer de son exploitation, et de l'information qui sera finalement délivrée aux clients ou sur des portails tels DRIAS. Deux grands défis peuvent être mentionnés. Primo, synthétiser de façon statistique l'information fournie par les différentes composantes d'un tel ensemble hétérogène. Secundo, y intégrer l'information apportée par les contraintes observationnelles.

Concernant le second point, l'arrivée des contraintes observationnelles affecte la pratique, relativement standard jusqu'à l'AR6, qui consistait à accorder la même crédibilité à chacun des modèles constituant l'ensemble ("model democracy"). Deux difficultés sont à anticiper :

- une part non négligeable des futures simulations (globales comme régionales) seront probablement en désaccord avec les estimations issues des contraintes observationnelles (globales, régionales, ou portant sur d'autres variables que les températures) – de la même façon qu'une partie des simulations actuelles sont en désaccord avec ces contraintes.
- les estimations fournies par les contraintes observationnelles risquent de varier, d'une part car il s'agit d'une science jeune dont les méthodes peuvent évoluer, d'autre part car, à mesure que le temps passe, l'influence humaine se renforce et les nouvelles observations permettront de préciser les estimations actuelles.

Ce défi de l'accord simulations / contraintes observationnelles semble incontournable, car il se posera a minima pour toutes les analyses de type séries temporelles¹¹, de la même manière qu'il se pose avec l'ensemble actuel. Il pourrait devenir plus aigu dans le futur, si de nouvelles contraintes observationnelles sont proposées dans la littérature (e.g., nouvelles variables).

La stratégie envisagée ici consiste à s'appuyer sur un socle commun de simulations, aussi diverses et hétérogènes que possible, et qui n'évolue que lentement. Dans le même temps, les diagnostics multi-modèles et produits délivrés en fin de chaîne reposent sur une analyse statistique de l'ensemble, dans laquelle le poids donné à chacun des modèles varie. Il peut s'agir d'une sélection (poids 0/1, certaines simulations sont exclues des résultats finaux car considérées comme non-plausibles), d'une pondération (poids variables), ou d'une autre méthode. Cette étape de pondération peut être révisée, en fonction de l'évolution des connaissances (e.g., nouvelles contraintes observationnelles), sans que l'ensemble de simulations sous-jacent n'évolue. Elle peut même faire l'objet d'une co-construction avec le client en fonction de l'application visée, toujours sur la base du même socle.

En parallèle, certaines simulations individuelles pourront être mises en avant dans une logique *storyline*, c'est-à-dire visant à raconter un futur possible. On peut de cette façon, décrire un futur particulièrement sec, ou avec des pics de chaleur particulièrement élevés, etc. Cette pratique est adaptée, par exemple, à l'exploration de scénarios de type "pire cas" (e.g., comme la réglementation l'impose au secteur de l'énergie). Le choix des quelques simulations à utiliser peut faire l'objet d'un conseil individualisé. La logique de socle commun est également utile dans cette approche car elle permet d'explorer une large diversité de trajectoires, et de situer la ou les simulations retenues dans un ensemble plus large, représentatif de l'état de l'art.

Outre-mer

Anticiper les impacts futurs du changement climatique dans les territoires d'outre-mer et définir des stratégies d'adaptation suppose de disposer de simulations climatiques à échelle

¹¹ Les résultats obtenus avec le nouvel ensemble de simulations seront décrits en niveaux de réchauffement, mais également sous forme de séries-temporelles, car il s'agit d'une attente d'un certain nombre d'utilisateurs.

fine de l'ordre de la dizaine de kilomètres et même à l'échelle kilométrique. Ces simulations climatiques régionalisées ne sont pas disponibles aujourd'hui pour ces territoires, et Météo-France ne dispose pas d'équipe de recherche permanente sur ces sujets outre-mer. L'ambition est donc de construire une compétence et une organisation pérenne visant à garantir une production climatique de données type DRIAS 2020 et leur actualisation régulière pour les 4 zones ultramarines, ainsi que la mise en place de services climatiques similaires à ceux que Météo-France propose en métropole.

Une demande est actuellement en cours pour doter l'établissement de 15 ETP supplémentaires répartis entre R&D et traitement statistiques, études d'impacts spécifiques aux territoires d'outre-mer et partenariats et activités de diffusion locales. Dans la mesure où cette organisation pourrait être mise en place prochainement, son premier objectif sera alors de fournir des simulations climatiques régionalisées à haute résolution (2,5 km), d'ici fin 2025, sur les Antilles-Guyane, la Réunion, Mayotte, la Nouvelle-Calédonie, Wallis et Futuna et les îles les plus peuplées de la Polynésie-Française. Au-delà, il s'agira de chercher à combiner différentes sources d'informations, comme proposé dans ce rapport pour la métropole, afin de délivrer pour ces régions une information climatique robuste. Cela inclut notamment l'étude des observations, via les contraintes observationnelles, ou des études d'attribution. Ce travail permettra en particulier de décliner en outre-mer, le principe de trajectoire de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC) qui va être mise en œuvre pour la métropole à partir de 2023.

4.2.4. Long terme : évolution du socle et des services

Évolution du socle de simulations

De nouveaux jeux de données et méthodes vont continuer d'être développés et produits au-delà de l'échéance cible de 2025. On peut citer à titre d'exemple (liste non-exhaustive) :

- le nouvel ensemble de simulations globales CMIP7, dont le contour exact est actuellement discuté au sein de la communauté, et qui pourrait inclure certaines simulations globales à très haute résolution (e.g., 10 km).
- un véritable ensemble de simulations de CPRCM de "classe AROME", couvrant la métropole, dont des simulations AROME forcées par différents GCM. Le caractère multi-modèle de cet ensemble (ensemble type EURO-CORDEX à échelle kilométrique) reste flou. Tout dépend de la capacité des instituts européens à se coordonner autour de cet objectif, en retenant un domaine qui couvre la France métropolitaine, et à trouver des soutiens financiers nationaux ou européens (discussions en cours).
- l'arrivée à maturité des méthodes de descente d'échelle statistique ou hybride par apprentissage machine.
- diverses autres avancées scientifiques susceptibles d'affecter tout ou partie de la chaîne de production actuelle – nécessitant une veille scientifique de fond.

Dans le même temps, les exigences des utilisateurs DRIAS (un nombre minimum de simulations représentant la dispersion d'un ensemble plus large) et des clients sectoriels

(énergie, assurances, agriculture ; notamment sur l'échantillonnage, i.e., le nombre d'années simulées disponibles) persistent.

Pour répondre à ces exigences, il est proposé de continuer à faire évoluer le socle commun de simulations décrit à la section précédente. Ce socle demeurera un ensemble hétérogène, mais pourra être enrichi par l'arrivée de nouvelles simulations ou méthodes, sous différentes conditions incluant notamment (i) une labellisation via une publication scientifique de référence, et (ii) une validation scientifique des résultats. On peut imaginer une évolution sur une base annuelle, avec un processus de décision formalisé. En parallèle, les services climatiques tels que les portails (e.g., DRIAS, Climadiag), pourront évoluer à une fréquence plus lente, sur la base de versions bien identifiées. Ces versions pourront donner lieu à une publication décrivant les principales caractéristiques de l'ensemble, et l'évolution des indicateurs clés, à l'image du rapport DRIAS-2020 (Soubeyroux et al., 2021).

Comité scientifique

En parallèle de l'effort de définition et de production d'un socle commun, il est proposé de mettre en place un comité scientifique dans le but de discuter puis de légitimer les principaux choix sur les jeux de données (en particulier la constitution du socle commun de simulations), mais aussi leur traitement statistique, les produits associés, et leur utilisation pour diverses applications, au bénéfice des acteurs de l'adaptation. Les contenus proposés sur le portail *DRIAS – les futurs du climat* sont, depuis son origine, le résultat d'une collaboration de la communauté française des sciences du climat impliquant notamment, outre Météo-France (notamment les acteurs du CNRM, de la DCSC et la DSM), l'IPSL et ses laboratoires, et le Cerfacs. Un partenariat du même type sera renforcé dans les années à venir dans le cadre du PEPR TRACCS. Ce comité réunira des experts de la communauté nationale (e.g., CNRS, IPSL, Cerfacs, IGE), couvrant les différentes étapes de la chaîne de production des aspects ciblés (i.e., modélisation et traitements statistiques). L'ouverture à des experts internationaux sera étudiée, pour bénéficier des bonnes pratiques mises en œuvre dans d'autres pays.

Périmètre, partenariats.

Au-delà des principales lignes d'évolution décrites ci-dessus, la question du périmètre des données et services climatiques pourra également être examinée. Cela concerne notamment la couverture de l'océan, alors que les données actuellement distribuées se limitent aux surfaces terrestres de la France (métropole et outre-mers). En effet, un certain nombre de demandes concernent l'évolution en changement climatique de l'état de l'atmosphère au-dessus de l'océan (notamment vent, température, rayonnement), voire l'océan superficiel lui-même (température, salinité). La composition du socle de simulations décrit ci-dessus peut permettre de couvrir certains de ces besoins, puisqu'il s'agit de variables directement simulées par tout ou partie des modèles numériques utilisés. Au-delà, d'autres variables climatiques, sur océan ou sur continent, pourront faire l'objet d'une instruction spécifique et/ou de partenariat avec d'autres acteurs français ou européens. On peut citer, à titre d'exemple, le niveau de la mer, qui demande un traitement spécifique pour prendre en compte des composantes non simulées par les modèles du Système Terre actuels (e.g., évolution des calottes), des variables décrivant le climat urbain ou la composition chimique de l'atmosphère.

5. Synthèse

Diverses sources de données et méthodes interviennent dans la production de données de projections climatiques, dont la demande augmente fortement. Les recherches menées à Météo-France couvrent une large gamme de ces techniques, avec des travaux importants en modélisation du climat, à l'échelle globale comme à l'échelle régionale, et sur l'analyse des ensembles de simulations internationaux, tant en termes de mécanismes que de description des incertitudes.

Plusieurs éléments scientifiques nouveaux incitent à ré-évaluer certains aspects de la génération et du traitement de ces données. Ces questions se posent à Météo-France comme dans de nombreux autres organismes en charge des services climatiques.

Premièrement, de nouvelles sources de données et méthodes deviennent pertinentes pour l'estimation du changement climatique, parmi lesquelles on peut citer l'arrivée de nouvelles techniques de descente d'échelle statistique, ou des simulations à haute-résolution. Ces nouveaux éléments plaident pour une diversification des sources considérées, tout en veillant à la cohérence des différentes estimations. Cette diversification permettra en outre de répondre à des besoins variés des utilisateurs.

Deuxièmement, désormais, les tendances climatiques observées constituent également, via les contraintes observationnelles, une source d'information pertinente pour les projections climatiques, susceptible de remettre en cause la "démocratie des modèles". L'intégration de cette nouvelle source d'information est un enjeu. A court terme, cette intégration pourra se faire via la description du climat futur par niveaux de réchauffement, globaux ou régionaux – répondant également à une demande institutionnelle.

En conséquence, les jeux de données mobilisés pour les services climatiques de Météo-France vont évoluer. La stratégie de l'établissement est de se doter d'un socle commun de simulations, permettant de répondre aux différents besoins de façon cohérente, et synthétisant différentes sources de données, en termes de scénarios, de modèles, de descente d'échelle, etc. Ce socle permettra de rendre compte de l'incertitude modèle, importante pour de nombreuses variables à l'échelle régionale, et dont la communication et la prise en compte dans les politiques publiques sont des enjeux.

Bibliographie

- Albergel, C., Dutra, E., Bonan, B., Zheng, Y., Munier, S., Balsamo, G., de Rosnay, P., Muñoz-Sabater, J., & Calvet, J.-C. (2019). Monitoring and Forecasting the Impact of the 2018 Summer Heatwave on Vegetation. *Remote Sensing*, 11(5), Art. 5. <https://doi.org/10.3390/rs11050520>
- Allan, R. P., Barlow, M., Byrne, M. P., Cherchi, A., Douville, H., Fowler, H. J., Gan, T. Y., Pendergrass, A. G., Rosenfeld, D., Swann, A. L. S., Wilcox, L. J., & Zolina, O. (2020). Advances in understanding large-scale responses of the water cycle to climate change. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1472(1), 49-75. <https://doi.org/10.1111/nyas.14337>
- Balogh, B., Saint-Martin, D., & Ribes, A. (2021). A Toy Model to Investigate Stability of AI-Based Dynamical Systems. *Geophysical Research Letters*, 48(8), e2020GL092133. <https://doi.org/10.1029/2020GL092133>
- Balogh, B., Saint-Martin, D., & Ribes, A. (2022). How to Calibrate a Dynamical System With Neural Network Based Physics? *Geophysical Research Letters*, 49(8), e2022GL097872. <https://doi.org/10.1029/2022GL097872>
- Bi, K., Xie, L., Zhang, H., Chen, X., Gu, X., & Tian, Q. (2022). *Pangu-Weather : A 3D High-Resolution Model for Fast and Accurate Global Weather Forecast* (arXiv:2211.02556). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.02556>
- Boé, J., Somot, S., Corre, L., & Nabat, P. (2020). Large discrepancies in summer climate change over Europe as projected by global and regional climate models : Causes and consequences. *Climate Dynamics*, 54(5), 2981--3002.
- Boé, J., & Terray, L. (2008). Weather regimes and downscaling. *La Houille Blanche*, 94(2), 45-51. <https://doi.org/10.1051/lhb:2008016>
- Caillaud, C., Somot, S., Alias, A., Bernard-Bouissières, I., Fumière, Q., Laurantin, O., Seity, Y., & Ducrocq, V. (2021). Modelling Mediterranean heavy precipitation events at climate scale : An object-oriented evaluation of the CNRM-AROME convection-permitting regional climate model. *Climate Dynamics*, 56(5), 1717-1752. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05558-y>
- Cannon, A. J. (2018). Multivariate quantile mapping bias correction : An N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. *Climate Dynamics*, 50(1), 31-49. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3580-6>
- Cattiaux, J., Chauvin, F., Bousquet, O., Malardel, S., & Tsai, C.-L. (2020). Projected Changes in the Southern Indian Ocean Cyclone Activity Assessed from High-Resolution Experiments and CMIP5 Models. *Journal of Climate*, 33(12), 4975-4991. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0591.1>
- Chaigneau, A. A., Reffray, G., Voldoire, A., & Melet, A. (2022). IBI-CCS : A regional high-resolution model to simulate sea level in western Europe. *Geoscientific Model Development*, 15(5), 2035-2062. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-2035-2022>
- Charles, E., Meyssignac, B., & Ribes, A. (2020). Observational Constraint on Greenhouse Gas and Aerosol Contributions to Global Ocean Heat Content Changes. *Journal of Climate*, 33(24), 10579-10591. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0091.1>
- Chauvin, F., Douville, H., & Ribes, A. (2017). Atlantic tropical cyclones water budget in observations and CNRM-CM5 model. *Climate Dynamics*, 49(11), 4009-4021.

- <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3559-3>
- Chauvin, F., Pilon, R., Palany, P., & Belmadani, A. (2020). Future changes in Atlantic hurricanes with the rotated-stretched ARPEGE-Climat at very high resolution. *Climate Dynamics*, 54(1), 947-972. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-05040-4>
- Coppola, E., Nogherotto, R., Ciarlo', J. M., Giorgi, F., van Meijgaard, E., Kadygrov, N., Iles, C., Corre, L., Sandstad, M., Somot, S., Nabat, P., Vautard, R., Levavasseur, G., Schwingshackl, C., Sillmann, J., Kjellström, E., Nikulin, G., Aalbers, E., Lenderink, G., ... Wulfmeyer, V. (2021). Assessment of the European Climate Projections as Simulated by the Large EURO-CORDEX Regional and Global Climate Model Ensemble. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(4), e2019JD032356. <https://doi.org/10.1029/2019JD032356>
- Costantini, M., Colin, J., & Decharme, B. (2023). Projected Climate-Driven Changes of Water Table Depth in the World's Major Groundwater Basins. *Earth's Future*, 11(3), e2022EF003068. <https://doi.org/10.1029/2022EF003068>
- Darmaraki, S., Somot, S., Sevault, F., Nabat, P., Cabos Narvaez, W. D., Cavicchia, L., Djurdjevic, V., Li, L., Sannino, G., & Sein, D. V. (2019). Future evolution of Marine Heatwaves in the Mediterranean Sea. *Climate Dynamics*, 53(3), 1371-1392. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04661-z>
- Dayon, G., Boé, J., Martin, É., & Gailhard, J. (2018). Impacts of climate change on the hydrological cycle over France and associated uncertainties. *Comptes Rendus Geoscience*, 350(4), 141-153. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2018.03.001>
- Déqué, M. (2007). Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario : Model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57(1), 16-26. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.11.030>
- Déqué, M., & Piedelievre, J. Ph. (1995). High resolution climate simulation over Europe. *Climate Dynamics*, 11(6), 321-339. <https://doi.org/10.1007/BF00215735>
- Doury, A., Somot, S., Gadat, S., Ribes, A., & Corre, L. (2022). Regional climate model emulator based on deep learning : Concept and first evaluation of a novel hybrid downscaling approach. *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06343-9>
- Douville, H., Allan, R. P., Arias, P. A., Betts, R. A., Caretta, M. A., Cherchi, A., Mukherji, A., Raghavan, K., & Renwick, J. (2022). Water remains a blind spot in climate change policies. *PLOS Water*, 1(12), e0000058. <https://doi.org/10.1371/journal.pwat.0000058>
- Douville, H., & John, A. (2021). Fast adjustment versus slow SST-mediated response of daily precipitation statistics to abrupt 4xCO₂. *Climate Dynamics*, 56(3), 1083-1104. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05522-w>
- Douville, H., Qasmi, S., Ribes, A., & Bock, O. (2022). Global warming at near-constant tropospheric relative humidity is supported by observations. *Communications Earth & Environment*, 3(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00561-z>
- Drugé, T., Nabat, P., Mallet, M., Michou, M., Rémy, S., & Dubovik, O. (2022). Modeling radiative and climatic effects of brown carbon aerosols with the ARPEGE-Climat global climate model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(18), 12167-12205. <https://doi.org/10.5194/acp-22-12167-2022>
- 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*, 12(4), 1543-1569. <https://doi.org/10.5194/esd-12-1543-2021>

- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958.
- Fischer, A. M., Strassmann, K. M., Croci-Maspoli, M., Hama, A. M., Knutti, R., Kotlarski, S., Schär, C., Schnadt Poberaj, C., Ban, N., Bavay, M., Beyerle, U., Bresch, D. N., Brönnimann, S., Burlando, P., Casanueva, A., Fatichi, S., Feigenwinter, I., Fischer, E. M., Hirschi, M., ... Zubler, E. M. (2022). Climate Scenarios for Switzerland CH2018 – Approach and Implications. *Climate Services*, 26, 100288. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2022.100288>
- Fumière, Q., Déqué, M., Nuissier, O., Somot, S., Alias, A., Caillaud, C., Laurantin, O., & Seity, Y. (2020). Extreme rainfall in Mediterranean France during the fall : Added value of the CNRM-AROME Convection-Permitting Regional Climate Model. *Climate Dynamics*, 55(1), 77-91. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04898-8>
- Geoffroy, O., & Saint-Martin, D. (2019). Equilibrium-and transient-state dependencies of climate sensitivity : Are they important for climate projections? *Journal of Climate*. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0248.1>
- Geoffroy, O., & Saint-Martin, D. (en préparation). *Speed-up and improvement of the CNRM global atmospheric model*.
- Giorgi, F., Torma, C., Coppola, E., Ban, N., Schär, C., & Somot, S. (2016). Enhanced summer convective rainfall at Alpine high elevations in response to climate warming. *Nature Geoscience*, 9(8), Art. 8. <https://doi.org/10.1038/ngeo2761>
- Gutiérrez, C., Somot, S., Nabat, P., Mallet, M., Corre, L., Meijgaard, E. van, Perpiñán, O., & Gaertner, M. A. (2020). Future evolution of surface solar radiation and photovoltaic potential in Europe : Investigating the role of aerosols. *Environmental Research Letters*, 15(3), 034035. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6666>
- Hausfather, Z., Marvel, K., Schmidt, G. A., Nielsen-Gammon, J. W., & Zelinka, M. (2022). Climate simulations : Recognize the 'hot model' problem. *Nature*, 605(7908), 26-29. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-01192-2>
- Hopuare, M., Pontaud, M., Céron, J.-P., Déqué, M., & Ortéga, P. (2015). Climate change assessment for a small island : A Tahiti downscaling experiment. *Climate Research*, 63(3), 233-247. <https://doi.org/10.3354/cr01298>
- Hourdin, F., Mauritsen, T., Gettelman, A., Golaz, J.-C., Balaji, V., Duan, Q., Folini, D., Ji, D., Klocke, D., Qian, Y., Rauser, F., Rio, C., Tomassini, L., Watanabe, M., & Williamson, D. (2017). The Art and Science of Climate Model Tuning. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(3), 589-602. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00135.1>
- IPCC. (2018). *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*.
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Vol.* doi:10.1017/9781009157896. Cambridge University Press.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., ... Yiou, P. (2014). EURO-CORDEX : New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14(2), 563-578.

- <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
- Jézéquel, A., Cattiaux, J., Naveau, P., Radanovics, S., Ribes, A., Vautard, R., Vrac, M., & Yiou, P. (2018). Trends of atmospheric circulation during singular hot days in Europe. *Environmental Research Letters*, 13(5), 054007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab5da>
- John, A., Douville, H., Ribes, A., & Yiou, P. (2022). Quantifying CMIP6 model uncertainties in extreme precipitation projections. *Weather and Climate Extremes*, 36, 100435. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100435>
- Jones, C. D., Frölicher, T. L., Koven, C., MacDougall, A. H., Matthews, H. D., Zickfeld, K., Rogelj, J., Tokarska, K. B., Gillett, N. P., Ilyina, T., Meinshausen, M., Mengis, N., Séférian, R., Eby, M., & Burger, F. A. (2019). The Zero Emissions Commitment Model Intercomparison Project (ZECMIP) contribution to C4MIP : Quantifying committed climate changes following zero carbon emissions. *Geoscientific Model Development*, 12(10), 4375-4385. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-4375-2019>
- Lam, R., Sanchez-Gonzalez, A., Willson, M., Wirnsberger, P., Fortunato, M., Pritzel, A., Ravuri, S., Ewalds, T., Alet, F., Eaton-Rosen, Z., Hu, W., Merose, A., Hoyer, S., Holland, G., Stott, J., Vinyals, O., Mohamed, S., & Battaglia, P. (2022). *GraphCast : Learning skillful medium-range global weather forecasting* (arXiv:2212.12794). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.12794>
- Lowe, J. A., Bernie, D., Bett, P., Bricheno, L., Brown, S., Calvert, D., Clark, R., Edwards, T., Fosser, G., Fung, F., Gohar, L., Good, P., Gregory, J., Harris, G., Howard, T., Kaye, N., Kendon, E., Krijnen, J., Maisey, P., ... Belcher, S. (2018). *UKCP18 Science Overview Report*.
- Lucas-Picher, P., Brisson, E., Caillaud, C., Alias, A., Nabat, P., Lemonsu, A., Poncet, N., Cortés Hernandez, V. E., Michau, Y., Doury, A., Monteiro, D., & Somot, S. (2023). Evaluation of the convection-permitting regional climate model CNRM-AROME41t1 over Northwestern Europe. *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06637-y>
- Michelangeli, P.-A., Vrac, M., & Loukos, H. (2009). Probabilistic downscaling approaches : Application to wind cumulative distribution functions. *Geophysical Research Letters*, 36(11). <https://doi.org/10.1029/2009GL038401>
- Moncoulon, D. (2016). *Impact of climate change on natural disaster insurance in France*. <https://www.consosegurosdigital.com/>. <https://www.consosegurosdigital.com/en/numero-04/front-page/impact-of-climate-change-on-natural-disaster-insurance-in-france>
- Monteiro, D., Caillaud, C., Samacoïts, R., Lafaysse, M., & Morin, S. (2022). Potential and limitations of convection-permitting CNRM-AROME climate modelling in the French Alps. *International Journal of Climatology*, 42(14), 7162-7185. <https://doi.org/10.1002/joc.7637>
- Nabat, P., Somot, S., Cassou, C., Mallet, M., Michou, M., Bouniol, D., Decharme, B., Drugé, T., Roehrig, R., & Saint-Martin, D. (2020). Modulation of radiative aerosols effects by atmospheric circulation over the Euro-Mediterranean region. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(14), 8315-8349. <https://doi.org/10.5194/acp-20-8315-2020>
- Nikulin, G., Lennard, C., Dosio, A., Kjellström, E., Chen, Y., Hänsler, A., Kupiainen, M., Laprise, R., Mariotti, L., Maule, C. F., Meijgaard, E. van, Panitz, H.-J., Scinocca, J. F., & Somot, S. (2018). The effects of 1.5 and 2 degrees of global warming on Africa in the CORDEX ensemble. *Environmental Research Letters*, 13(6), 065003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab1b1>

- Obermann-Hellhund, A., Conte, D., Somot, S., Torma, C. Z., & Ahrens, B. (2018). Mistral and Tramontane wind systems in climate simulations from 1950 to 2100. *Climate Dynamics*, 50(1), 693-703. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3635-8>
- Oudar, T., Cattiaux, J., & Douville, H. (2020). Drivers of the Northern Extratropical Eddy-Driven Jet Change in CMIP5 and CMIP6 Models. *Geophysical Research Letters*, 47(8), e2019GL086695. <https://doi.org/10.1029/2019GL086695>
- Oudar, T., Cattiaux, J., Douville, H., Geoffroy, O., Saint-Martin, D., & Roehrig, R. (2020). Robustness and drivers of the Northern Hemisphere extratropical atmospheric circulation response to a CO₂-induced warming in CNRM-CM6-1. *Climate Dynamics*, 54(3), 2267-2285. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-05113-4>
- Pichelli, E., Coppola, E., Sobolowski, S., Ban, N., Giorgi, F., Stocchi, P., Alias, A., Belušić, D., Berthou, S., Caillaud, C., Cardoso, R. M., Chan, S., Christensen, O. B., Dobler, A., de Vries, H., Goergen, K., Kendon, E. J., Keuler, K., Lenderink, G., ... Vergara-Temprado, J. (2021). The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution part 2 : Historical and future simulations of precipitation. *Climate Dynamics*, 56(11), 3581-3602. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05657-4>
- Pierce, D. W., Cayan, D. R., & Thrasher, B. L. (2014). Statistical Downscaling Using Localized Constructed Analogs (LOCA). *Journal of Hydrometeorology*, 15(6), 2558-2585. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0082.1>
- Qasmi, S., & Ribes, A. (2021). *Reducing uncertainty in local climate projections* [Preprint]. In Review. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-364943/v1>
- Rasp, S., Pritchard, M. S., & Gentine, P. (2018). Deep learning to represent subgrid processes in climate models. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(39), 9684-9689. <https://doi.org/10.1073/pnas.1810286115>
- Ribes, A., Boé, J., Qasmi, S., Dubuisson, B., Douville, H., & Terray, L. (2022). An updated assessment of past and future warming over France based on a regional observational constraint. *Earth System Dynamics*, 13(4), 1397-1415. <https://doi.org/10.5194/esd-13-1397-2022>
- Ribes, A., Qasmi, S., & Gillett, N. P. (2021). Making climate projections conditional on historical observations. *Science Advances*, 7(4), eabc0671. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abc0671>
- Ribes, A., Thao, S., Vautard, R., Dubuisson, B., Somot, S., Colin, J., Planton, S., & Soubeyroux, J.-M. (2019). Observed increase in extreme daily rainfall in the French Mediterranean. *Climate Dynamics*, 52(1), 1095-1114. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4179-2>
- Robin, Y., Drouin, A., Soubeyroux, J.-M., Ribes, A., & Vautard, R. (2021). Comment attribuer une canicule au changement climatique ? *La Météorologie*, 2021(115), 28-36. <https://doi.org/10.37053/lameteorologie-2021-0090>
- Robin, Y., & Ribes, A. (2020). Nonstationary extreme value analysis for event attribution combining climate models and observations. *Advances in Statistical Climatology, Meteorology and Oceanography*, 6(2), 205-221. <https://doi.org/10.5194/ascmo-6-205-2020>
- Roehrig, R., Beau, I., Saint-Martin, D., Alias, A., Decharme, B., Guérémy, J.-F., Voldoire, A., Abdel-Lathif, A. Y., Bazile, E., Belamari, S., Blein, S., Bouniol, D., Bouteloup, Y., Cattiaux, J., Chauvin, F., Chevallier, M., Colin, J., Douville, H., Marquet, P., ... Sénési, S. (2020). The CNRM Global Atmosphere Model ARPEGE-Climat 6.3 : Description and Evaluation. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(7),

- e2020MS002075. <https://doi.org/10.1029/2020MS002075>
- Rugenstein, M., Bloch-Johnson, J., Gregory, J., Andrews, T., Mauritsen, T., Li, C., Frölicher, T. L., Paynter, D., Danabasoglu, G., Yang, S., Dufresne, J.-L., Cao, L., Schmidt, G. A., Abe-Ouchi, A., Geoffroy, O., & Knutti, R. (2020). Equilibrium Climate Sensitivity Estimated by Equilibrating Climate Models. *Geophysical Research Letters*, 47(4), e2019GL083898. <https://doi.org/10.1029/2019GL083898>
- Saint-Martin, D., Geoffroy, O., Voldoire, A., Cattiaux, J., Brient, F., Chauvin, F., Chevallier, M., Colin, J., Decharme, B., Delire, C., Douville, H., Guérémy, J.-F., Joetzjer, E., Ribes, A., Roehrig, R., Terray, L., & Valcke, S. (2021). Tracking Changes in Climate Sensitivity in CNRM Climate Models. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13(6), e2020MS002190. <https://doi.org/10.1029/2020MS002190>
- Sanderson, B. M., Wehner, M., & Knutti, R. (2017). Skill and independence weighting for multi-model assessments. *Geoscientific Model Development*, 10(6), 2379-2395. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2379-2017>
- Santana-Falcón, Y., & Séférian, R. (2022). Climate change impacts the vertical structure of marine ecosystem thermal ranges. *Nature Climate Change*, 12(10), Art. 10. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01476-5>
- Séférian, R., Nabat, P., Michou, M., Saint-Martin, D., Voldoire, A., Colin, J., Decharme, B., Delire, C., Berthet, S., Chevallier, M., Sénési, S., Franchisteguy, L., Vial, J., Mallet, M., Joetzjer, E., Geoffroy, O., Guérémy, J.-F., Moine, M.-P., Msadek, R., ... Madec, G. (2019). Evaluation of CNRM Earth System Model, CNRM-ESM2-1 : Role of Earth System Processes in Present-Day and Future Climate. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(12), 4182-4227. <https://doi.org/10.1029/2019MS001791>
- Smith, C. J., Kramer, R. J., Myhre, G., Alterskjær, K., Collins, W., Sima, A., Boucher, O., Dufresne, J.-L., Nabat, P., Michou, M., Yukimoto, S., Cole, J., Paynter, D., Shiogama, H., O'Connor, F. M., Robertson, E., Wiltshire, A., Andrews, T., Hannay, C., ... Forster, P. M. (2020). Effective radiative forcing and adjustments in CMIP6 models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(16), 9591-9618. <https://doi.org/10.5194/acp-20-9591-2020>
- Sobolowski, S., Somot, S., Fernandez, J., Evin, G., Maraun, D., Kotlarski, S., Jury, M., Benestad, R., Teichmann, C., Christensen, O. B., Bülow, K., Buonomo, E., Katragkou, E., Steger, C., Sørland, S. L., Nikulin, G., McSweeney, C., Dobler, A., Palmer, T., ... Brands, S. (2023). *EURO-CORDEX CMIP6 GCM Selection & Ensemble Design : Best Practices and Recommendations*. <https://www.zenodo.org/record/7673400>
- Sørland, S. L., Schär, C., Lüthi, D., & Kjellström, E. (2018). Bias patterns and climate change signals in GCM-RCM model chains. *Environmental Research Letters*, 13(7), 074017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aacc77>
- Soubeyroux, J.-M., Bernus, S., Corre, L., Drouin, A., Dubuisson, B., Etchevers, P., Gouget, V., Josse, P., Kerdoncuff, M., Samacoits, R., & Tocquer, F. (2021). *Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole*. <http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf>
- Taranu, I. S., Somot, S., Alias, A., Boé, J., & Delire, C. (2022). Mechanisms behind large-scale inconsistencies between regional and global climate model-based projections over Europe. *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06540-6>
- Tebaldi, C., Debeire, K., Eyring, V., Fischer, E., Fyfe, J., Friedlingstein, P., Knutti, R., Lowe, J., O'Neill, B., Sanderson, B., van Vuuren, D., Riahi, K., Meinshausen, M., Nicholls,

- Z., Tokarska, K. B., Hurtt, G., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Meehl, G., ... Ziehn, T. (2021). Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6. *Earth System Dynamics*, 12(1), 253-293. <https://doi.org/10.5194/esd-12-253-2021>
- Tramblay, Y., & Somot, S. (2018). Future evolution of extreme precipitation in the Mediterranean. *Climatic Change*, 151(2), 289-302. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2300-5>
- Vautard, R., Kadyrov, N., Iles, C., Boberg, F., Buonomo, E., Bülow, K., Coppola, E., Corre, L., van Meijgaard, E., Nogherotto, R., Sandstad, M., Schwingshackl, C., Somot, S., Aalbers, E., Christensen, O. B., Ciarlo, J. M., Demory, M.-E., Giorgi, F., Jacob, D., ... Wulfmeyer, V. (2021). Evaluation of the Large EURO-CORDEX Regional Climate Model Ensemble. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(17), e2019JD032344. <https://doi.org/10.1029/2019JD032344>
- Verfaillie, D., Déqué, M., Morin, S., & Lafaysse, M. (2017). The method ADAMONT v1.0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models. *Geoscientific Model Development*, 10(11), 4257-4283. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4257-2017>
- Voltaire, A., Saint-Martin, D., Sénési, S., Decharme, B., Alias, A., Chevallier, M., Colin, J., Guérémy, J.-F., Michou, M., Moine, M.-P., Nabat, P., Roehrig, R., Salas y Méliá, D., Séférian, R., Valcke, S., Beau, I., Belamari, S., Berthet, S., Cassou, C., ... Waldman, R. (2019). Evaluation of CMIP6 DECK Experiments With CNRM-CM6-1. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(7), 2177-2213. <https://doi.org/10.1029/2019MS001683>
- Vrac, M. (2018). Multivariate bias adjustment of high-dimensional climate simulations : The Rank Resampling for Distributions and Dependences (R²D²) bias correction. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(6), 3175-3196. <https://doi.org/10.5194/hess-22-3175-2018>
- Waldman, R., Hirschi, J., Voltaire, A., Cassou, C., & Msadek, R. (2021). Clarifying the Relation between AMOC and Thermal Wind : Application to the Centennial Variability in a Coupled Climate Model. *Journal of Physical Oceanography*, 51(2), 343-364. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-19-0284.1>
- Wang, Y., Mao, J., Hoffman, F. M., Bonfils, C. J. W., Douville, H., Jin, M., Thornton, P. E., Ricciuto, D. M., Shi, X., Chen, H., Wullschleger, S. D., Piao, S., & Dai, Y. (2022). Quantification of human contribution to soil moisture-based terrestrial aridity. *Nature Communications*, 13(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34071-5>
- Yiou, P., Cattiaux, J., Faranda, D., Kadyrov, N., Jézéquel, A., Naveau, P., Ribes, A., Robin, Y., Thao, S., van Oldenborgh, G. J., & Vrac, M. (2020). Analyses of the Northern European Summer Heatwave of 2018. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(1), S35-S40.