

Note technique détaillée

Données climatiques prospectives pour le bâtiment

Version 3.0 du 23/05/2025

ADEME M. Marc Schoeffter	 500 route des Lucioles, 06560 Valbonne  marc.schoeffter@ademe.fr  +33 4 93 95 79 92	 <p>ADEME AGENCE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE</p>
------------------------------------	--	--

Chargé d'affaires : M. Alain Fleitz	 alain.fleitz@meteo.fr  +33 5 61 07 84 22	 <p>METEO FRANCE</p>
Responsables techniques : M. Raphaël Legrand	 raphael.legrand@meteo.fr  +33 5 61 07 86 11	
Chargées d'études : Mme Yohanna Michau Mme Clotilde Dubois	 yohanna.michau@meteo.fr @ clotilde.dubois@meteo.fr  +33 5 61 07 83 40  +33 5 61 07 84 07	

- page laissée intentionnellement vide -

Documents de référence antérieurs

	Intitulé	Référence	Date	Version
DR1	Production des données météorologiques pour la RE2020, Rapport de synthèse pour la DHUP	DHUP_MF_TMY_B	06/12/2019	

Évolutions successives

Référence	Date	Version	Évolution
MF_Note_technique_ADEME_TMY_v1	05/11/2024	1.0	Création
MF_Note_technique_ADEME_TMY_v2	04/12/2024	2.0	Corrections après lecture du client
MF_Note_technique_ADEME_TMY_v3	23/05/2025	3.0	Ajout/modification d'éléments techniques

Signatures

	Nom	Service	Signature
Rédacteur(s)	Yohanna Michau	DSM/CS/DC	YM
Relecteur(s)	Raphaël Legrand Céline de Saint-Aubin Jean-Michel Soubeyroux	DSM/CS/DC DSM/CS/DC DCSC	RL
Approbateur(s)	Raphaël Legrand	DSM/CS/DC	RL

Table des matières

1	Présentation générale	1
2	Stations météorologiques de référence	1
3	Construction de l'année type future	3
3.1	Variable dans les fichiers climatiques	3
3.2	Projections climatiques à haute résolution	3
3.2.1	Correction de biais	4
3.2.2	Variables simulées ou reconstruites	7
3.3	Données climatiques représentatives TRACC	9
3.3.1	Présentation de la TRACC	9
3.3.2	Adaptation de la norme ISO15927-4	10
3.3.3	Années météorologiques types retenues	13
3.3.4	Construction des fichiers	13
4	Sélection des évènements de vagues de chaleur futures	15
4.1	Définition de l'indicateur sur les vagues de chaleur	15
4.2	Sélection d'un épisode représentatif TRACC	16
4.3	Présentation des vagues de chaleur retenues	16
4.4	Construction des fichiers pour les vagues de chaleur	17
5	Limitations de l'étude	18
6	Annexes	21
6.1	Annexe A – Observations passées et projections climatiques	21
6.1.1	Mesures météorologiques du réseau RADOME	21
6.1.2	Produit d'Analyse de Nébulosité Satellite	21
6.1.3	Produit spatialisé APROFUS2R	21
6.1.4	Produit de précipitations COMEPHORE	22
6.1.5	Produit spatialisé SAFRAN	22
6.1.6	Produit spatialisé ANASTASIA	22
6.1.7	Analyse SIM2	22
6.1.8	Projections climatiques CNRM-AROME	23
6.1.9	Ensemble de projections EXPLORE-2	24
6.2	Annexe B – Variables simulées par CNRM-AROME sur les périodes historiques et futures	25
6.3	Annexe C – Années CNRM-AROME retenues pour la constitution des années météorologiques types	26
6.4	Annexe D – Evolution des températures de l'air à 2 mètres dans les fichiers climatiques de la RE2020	29
6.5	Annexe E – Vagues de chaleur pour Trappes	31
6.6	Annexe F – Caractéristiques des vagues de chaleur retenues pour la constitution des années météorologiques types	32

Liste des illustrations

Figure 1: Zones climatiques définies dans le cadre de la RT 2012 et utilisées pour la RE 2020.	2
Figure 2: Principe de la correction de biais par la méthode d'ajustement statistique quantile quantile. Source : Kim et al., 2015.	4
Figure 3: Distributions de la hauteur des précipitations (RR, en haut à droite), de la température de l'air à 2 mètres (T2m, en bas à gauche) et du rayonnement global horizontal (Rgh, en bas à droite) à Trappes. Sont représentées en gris les données observées, en bleu clair les données historiques et en bleu foncé les données historiques corrigées.	5
Figure 4: Cycle mensuel des variables météorologiques sur une année moyenne à Trappes. Sont représentées en gris les données observées, en bleu clair les données historiques corrigées, en jaune les données futures à moyen terme corrigées et en rouge les données futures à long terme corrigées.	6
Figure 5: Température de l'air à 2 mètres à Trappes sur l'année météorologique type représentative du niveau de réchauffement France à +4°C (en haut), France à +2,7°C (au milieu) et France +2°C (en bas).	14
Figure 6: Caractéristiques de la vague de chaleur de 2003 à l'échelle de la région parisienne par l'application de la méthode d'identification des vagues de chaleur sur les températures moyennes ANASTASIA (plus d'informations sur la donnée en Annexe 6.5).	15
Figure 7 : (À gauche) Caractéristiques des vagues de chaleur observées d'après SAFRAN sur la période historique 1971-2019 à Trappes. (À droite) Distribution de la sévérité des vagues de chaleur pour des niveaux de réchauffement de +2°C, +2,7°C et +4°C en France à partir des données EXPLORE2 (cf. FR 2°C, FR 2,7°C et FR 4°C) et simulées par le CNRM-AROME (cf. CNRM-AROME). Les boîtes à moustaches s'étendent du premier quartile (Q1) au troisième quartile (Q3) des données, avec une ligne à la médiane. Les moustaches s'étendent de la boîte au point de données le plus éloigné, situé à 1,5 fois l'intervalle interquartile (IQR) de la boîte. Les points les plus éloignés sont ceux qui se trouvent au-delà de l'extrémité des moustaches. La sévérité moyenne des vagues de chaleur est indiquée par un carré blanc. La sévérité des vagues de chaleur du CNRM-AROME représentatives des niveaux de réchauffement de la France à +2°C, +2,7°C et +4°C est indiquée en jaune, orange et rouge respectivement. La sévérité de la vague de chaleur de 2003, indiquée en vert, est donnée à titre indicatif.	17
Figure 8: Evolution en pourcentage des cumuls annuels de précipitation sur la France métropolitaine aux niveaux de réchauffement France +2°C, France +2,7°C et France +4°C d'après le jeu de données TRACC-2023. Source : A quel climat s'adapter en France selon la TRACC ? https://hal.science/hal-04797481	19
Figure 9: Résultats de certaines analyses complémentaires réalisées sur les précipitations. L'encadré bleu concerne exclusivement les fichiers climatiques de la RE2020 (de référence et prospectifs).	20
Figure 10: Descente d'échelle dynamique à trois modèles imbriqués incluant CNRM-CM5, CNRM-ALADIN, et CNRM-AROME.	23
Figure 11: Spatialisation à l'échelle de la France métropolitaine de plusieurs variables météorologiques simulées par CNRM-AROME sur la période historique 1986-2005. Les données présentées ici sont non corrigées.	25
Figure 12: Spatialisation à l'échelle de la France métropolitaine des évolutions entre la période historique et la période 2080-2099 de plusieurs variables météorologiques simulées par CNRM-AROME. Les données présentées ici sont non corrigées.	26

Figure 13: Vagues de chaleur simulées par le jeu de données EXPLORE2 (en jaune, orange et rouge pour les niveaux de réchauffement de +2°C, +2,7°C et +4°C respectivement) et par CNRM-AROME (en bleu). Les vagues de chaleur TRACC retenues sont indiquées en bordeaux. La vague de chaleur de 2003, en vert, est présentée à titre indicatif. _____ 32

Liste des tableaux

Tableau 1: Informations complémentaires sur les stations météorologiques représentatives des zones climatiques définies par la RT2020. _____	2
Tableau 2: Application à la station de référence de Trappes de la norme ISO15927-4 "adaptée" sur la température à 2 mètres simulée par CNRM-AROME et les données EXPLORE2 pour le niveau de réchauffement France à 4°C en considérant uniquement le mois de janvier 2080 (étapes 1 à 6). _____	11
Tableau 3: Application à la station de référence de Trappes de la norme ISO15927-4 "adaptée" (étape 7) en considérant uniquement le mois de janvier. _____	12
Tableau 4: Composition de l'année météorologique typique pour les niveaux de réchauffement France à +2°C, 3°C et 4°C à la station de Trappes. _____	13
Tableau 5: Périodes autour de l'année pivot considérées pour chaque simulation EXPLORE2 suivant le scénario RCP8.5 selon les niveaux de réchauffement global 1.5°C, 2°C et 3°C. _____	24
Tableau 6: Composition de l'année météorologique typique pour les niveaux de réchauffement France à +2°C, 3°C et 4°C aux différentes stations de référence. _____	26
Tableau 7: Distribution (à gauche) et cycle annuel moyen (à droite) de la température de l'air à 2 mètres dans les fichiers climatiques de référence pour la période climatique 2000-2018 (en bleu) et dans les fichiers climatiques prospectifs pour les niveaux de réchauffement France +2°C (en jaune), France +2,7°C (en orange) et France 4°C (en rouge). _____	29
Tableau 8: Sévérité normalisée (°C/jour) des vagues de chaleur retenues pour la constitution des années météorologiques types aux niveaux de réchauffement de +2°C, +2,7°C et +4°C. _____	32

Glossaire

Abréviation	Signification
ADAMONT	Adaptation des territoires de montagne au changement climatique
ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
ANASTASIA	Analyse spatiale des températures de surface avec initialisation AURELHY
ANS	Analyse de nébulosité satellite
ARAMIS	Application radar à la météorologie infra-synoptique
AROME	Application of research to operations at mesoscale
CMIP	Coupled model intercomparison project
COMEPHORE	Combinaison en vue de la meilleure estimation de la précipitation horaire
CSTB	Centre scientifique et technique du bâtiment
DHUP	Direction de l'habitat, de l'urbanisme et des paysages
DRIAS	Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'impact et l'adaptation de nos sociétés et environnement
EUCP	European climate prediction system
GIEC	Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat
GWL	Global warming level (niveau de réchauffement de la planète)
PNACC	Plan national d'adaptation au changement climatique
RCP	Representative concentration pathways (trajectoires représentatives de concentration)
RE	Réglementation environnementale
RADOME	Réseau d'acquisition de données et d'observations météorologiques étendu
RT	Réglementation thermique
SAFRAN	Système d'analyse fournissant des renseignements atmosphériques à la neige
TRACC	Trajectoire de réchauffement global de référence pour l'adaptation au changement climatique

1 Présentation générale

Pour accompagner les acteurs économiques du secteur du bâtiment, ainsi que les territoires dans la lutte contre le changement climatique, l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie), en collaboration avec le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) et la DHUP (Direction de l'Habitat, de l'Urbanisme et des Paysages), prévoit de mettre à disposition du grand public, courant d'année 2024, des fichiers prospectifs de paramètres météorologiques ou non météorologiques, appelés "années-type", par zone climatique. Ces fichiers prospectifs compléteront les fichiers climatiques pour la période dite du "climat actuel", basés sur les observations de la période 2000-2018, qui ont déjà été produits dans une étude précédente de Météo-France. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre de la mise à jour de la Réglementation Environnementale 2020 (RE2020), entrée en vigueur le 1er janvier 2022, visant à améliorer la performance énergétique et environnementale des bâtiments neufs.

Pour répondre aux besoins communs de l'ADEME, du CSTB et de la DHUP, cette étude a pour objectif de produire des séries de données climatiques prospectives qui reflètent le climat futur, tout en répondant aux exigences gouvernementales de la TRACC (Trajectoire de réchauffement de Référence pour l'Adaptation au Changement Climatique). Cet outil mis en place par le gouvernement français permet à chaque secteur d'activité de développer une stratégie d'adaptation basée sur des hypothèses uniformes de réchauffement (global et national).

Les fournitures livrées dans le cadre de cette étude sont :

- Un fichier pour chaque niveau de réchauffement TRACC et chaque station de référence, contenant des séries chronologiques de données horaires pour 14 paramètres météorologiques ou non météorologiques.
- Un fichier pour chaque niveau de réchauffement TRACC et chaque station de référence, comme ci-dessus, intégrant un épisode caractéristique de vague de chaleur.

La présente note technique décrit en Section 2 les huit stations de référence considérées comme étant représentatives des différentes zones climatiques de la France métropolitaine. La Section 3 présente les 14 paramètres d'intérêt, les projections climatiques corrigées du modèle CNRM-AROME utilisées pour la simulation à haute résolution spatiale et temporelle des variables météorologiques, les simulations EXPLORE2 utilisées pour extraire une série temporelle dans CNRM-AROME représentative d'un niveau de réchauffement TRACC, et enfin la méthodologie utilisée pour construire l'année type. Le rapport se termine par la Section 4, qui traite de la construction d'une année typique marquée par une vague de chaleur.

2 Stations météorologiques de référence

La production des fichiers climatiques prospectifs est mise en œuvre à l'échelle de huit stations de référence, localisées en France métropolitaine (Figure 1). L'identifiant et la position de chacune des 8 stations sont précisés dans le Tableau 1. Ces stations sont considérées comme représentatives des zones climatiques définies par la réglementation thermique de 2012 (RT2012). Pour rappel, elles ont été sélectionnées sur la base de trois critères :

- D'une part, elles appartiennent au réseau synoptique d'observations météorologiques de Météo-France, qui est développé et maintenu par l'établissement lui-même.
- D'autre part, les variables mesurées à ces stations ne présentent pas un manque significatif de données sur la période récente.
- Pour le rayonnement, en particulier, les séries temporelles ne présentent pas de rupture significative sur au moins 10 ans.

Les stations de référence ont été également utilisées dans l'étude précédente de Météo-France pour la construction des fichiers climatiques nécessaires à la RE2020.

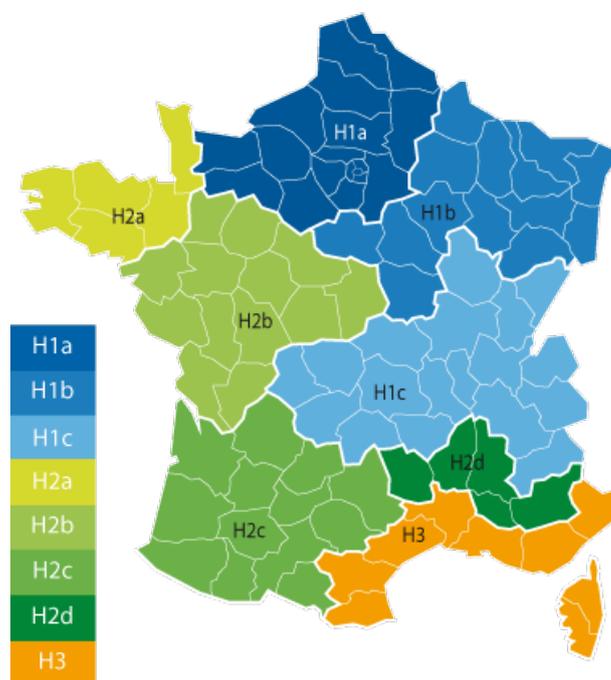


Figure 1: Zones climatiques définies dans le cadre de la RT 2012 et utilisées pour la RE 2020.

Tableau 1: Informations complémentaires sur les stations météorologiques représentatives des zones climatiques définies par la RT2020.

Zone climatique	Station	N° INSEE	Altitude	Longitude	Latitude
H1a	Trappes	78621001	167 m	2°00'35'E	48°46'24'N
H2a	Rennes	35281001	36 m	1°44'02'O	48°04'08'N
H2b	Tours	37179001	108 m	0°43'48'E	47°26'42'N
H2c	Agen	47091001	58 m	0°35'42'E	44°10'36'N
H3	Marignane	13054001	9 m	5°12'58'E	43°26'16'N
H2d	Carpentras	84031001	99 m	5°03'30'E	44°05'01'N

H1c	Mâcon	71105001	219 m	4°47'40'E	46°17'40'N
H1b	Nancy	54526001	212 m	6°13'17'E	48°41,'16'N

3 Construction de l'année type future

3.1 Variable dans les fichiers climatiques

La constitution des fichiers climatiques prospectifs pour l'année type future nécessite l'utilisation de plusieurs variables météorologiques ou non météorologiques :

- Température de l'air à 2 mètres (T2m, en °C)
- Hauteur de précipitation (RR, en mm)
- Pression atmosphérique (Ps, en hPa)
- Humidité relative (Hur, en %)
- Rayonnement global horizontal composé par le rayonnement de petite longueur d'onde descendant vers la surface (Rgh, en $W.m^{-2}$)
- Nébulosité (Ne, en %)
- Température du sol à 1 mètre (T-1m, en °C)
- Humidité spécifique (Hus, en kg d'eau/kg d'air)
- Force et direction du vent à 10 mètres (FF et DD, en $m.s^{-1}$ et °)
- Température du point de rosée (Tr, en °C)
- Température d'émission de l'atmosphère (Tc, en °C)
- Hauteur angulaire du Soleil et orientation par rapport au sud (Hs et Os, en °)
- Rayonnement direct normal (Rdn, en $W.m^{-2}$)
- Rayonnement horizontal diffus (Rdi, en $W.m^{-2}$)

3.2 Projections climatiques à haute résolution

Pour chacune des stations de référence, les fichiers climatiques prospectifs pour l'année type future sont élaborés à partir des projections climatiques du modèle CNRM-AROME (pour plus d'informations, voir l'Annexe 6.1.8). Ce modèle présente l'avantage d'avoir une résolution kilométrique ($0,025^\circ \times 0,025^\circ$), permettant ainsi de simuler explicitement certains phénomènes météorologiques de petite échelle et d'offrir une meilleure représentation des interactions entre l'atmosphère et la surface. Les simulations réalisées avec ce modèle sont également disponibles à haute résolution temporelle, avec un pas de temps horaire

pour l'ensemble des trois périodes simulées, à savoir la période historique 1986-2005 (20 ans), ainsi que les périodes futures 2041-2050 et 2080-2099 (10 ans et 20 ans respectivement).

À noter que dans l'intégralité de cette étude, les variables météorologiques simulées par CNRM-AROME sont extraites à la maille de la grille du domaine de simulation qui représente le plus réalistement les conditions environnementales, notamment l'occupation et l'usage des sols, de la station d'observations du réseau synoptique d'observations météorologiques de Météo-France.

À titre indicatif, l'Annexe 6.2 présente l'évolution future des variables météorologiques simulées par le modèle CNRM-AROME à l'échelle de la France métropolitaine.

3.2.1 Correction de biais

Tout comme les autres modèles climatiques, CNRM-AROME présente des biais, qui peuvent être liés à sa physique interne ou provenir des modèles forceurs utilisés dans la chaîne de modélisation. Pour cette étude, plusieurs variables simulées par CNRM-AROME ont été soumises à une étape de débiaisage à l'aide de la méthode d'ajustement statistique dite quantile-quantile. Dans cette méthode, comme cela est indiqué en Figure 2, le biais de la simulation climatique en période historique est mesuré par rapport à une observation (écart entre les deux points rouges), puis reporté sur les simulations climatiques futures.

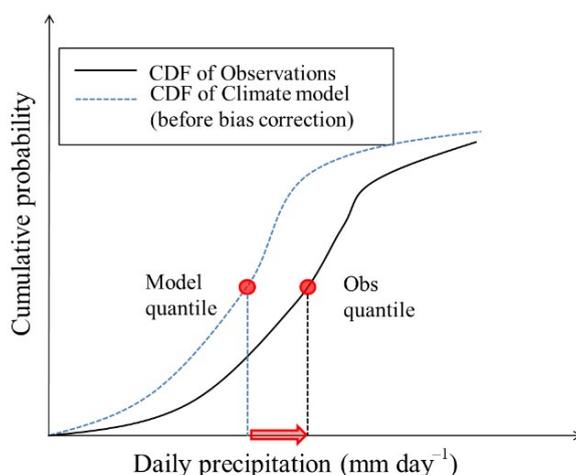


Figure 2: Principe de la correction de biais par la méthode d'ajustement statistique quantile-quantile. | Source : Kim et al., 2015.

La première étape, celle de la calibration, a été mise en œuvre sur la période historique 1986-2005 pour chaque variable d'intérêt, individuellement, en utilisant des données d'observation. Une description plus complète des données d'observation utilisées est disponible en Annexe 6.1 .

La température de l'air à 2 mètres, l'humidité relative, la force du vent à 10 mètres et la pression atmosphérique ont été corrigées à l'aide des données d'observation météorologique provenant des messages internationaux d'observation de surface circulant sur le système mondial de télécommunications de l'Organisation météorologique mondiale (OMM). La hauteur des précipitations a été corrigée à l'aide du produit de précipitations COMEPHORE. La couverture nuageuse a été corrigée à l'aide du produit d'Analyse

3 Construction de l'année type future



de Nébulosité Satellite (ANS). Pour ces variables, l'étape de calibration a consisté à comparer la distribution statistique des données simulées heure par heure avec les données d'observation (cf. Figure 2), afin de préserver les cycles diurnes des variables météorologiques.

Pour le rayonnement, qui a un cycle journalier marqué par des valeurs nulles lorsqu'il n'y a pas de Soleil et des valeurs positives lorsque le Soleil se lève, la méthode a été ajustée comme suit pour respecter cette particularité. Dans un premier temps, l'analyse du cycle journalier moyen du rayonnement a permis de distinguer quatre périodes dans le cycle : de 0h à 5h le rayonnement est généralement nul, de 6h à 11h sa valeur augmente jusqu'à atteindre un maximum, de 12h à 17h la valeur maximale a été atteinte et le rayonnement commence à diminuer, et enfin de 18h à 23h il diminue jusqu'à être nul. Pour cette variable, l'étape de calibration a consisté à comparer la distribution statistique des données simulées avec les données observées du produit APROFUS2R en distinguant ces quatre périodes.

Pour toutes les variables météorologiques à corriger, afin de rendre la procédure plus robuste, une fenêtre glissante de 31 jours centrés sur le jour courant de l'année a été utilisée. Par exemple, l'ajustement pour le 15 juin à 12 UTC a été calibré en utilisant les données du 1er juin au 30 juin à 12 UTC, sur les 20 années de la période de référence. La Figure 3 montre le résultat de la correction des biais sur la période historique pour les 3 variables d'intérêt, à savoir la température de l'air à 2 mètres, la hauteur des précipitations et le rayonnement global. Les ajustements définis lors de l'étape de calibration ont ensuite été appliqués aux projections lors de l'étape dite de correction (Figure 4).

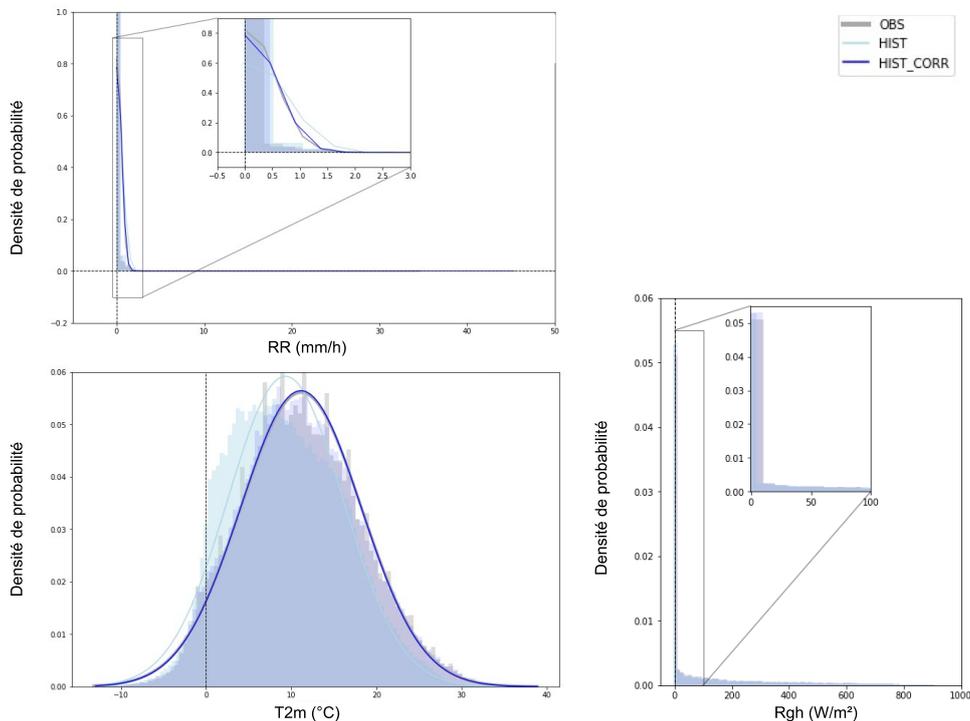


Figure 3: Distributions de la hauteur des précipitations (RR, en haut à droite), de la température de l'air à 2 mètres (T2m, en bas à gauche) et du rayonnement global horizontal (Rgh, en bas à droite) à Trappes. Sont représentées en gris les données observées, en bleu clair les données historiques et en bleu foncé les données historiques corrigées.

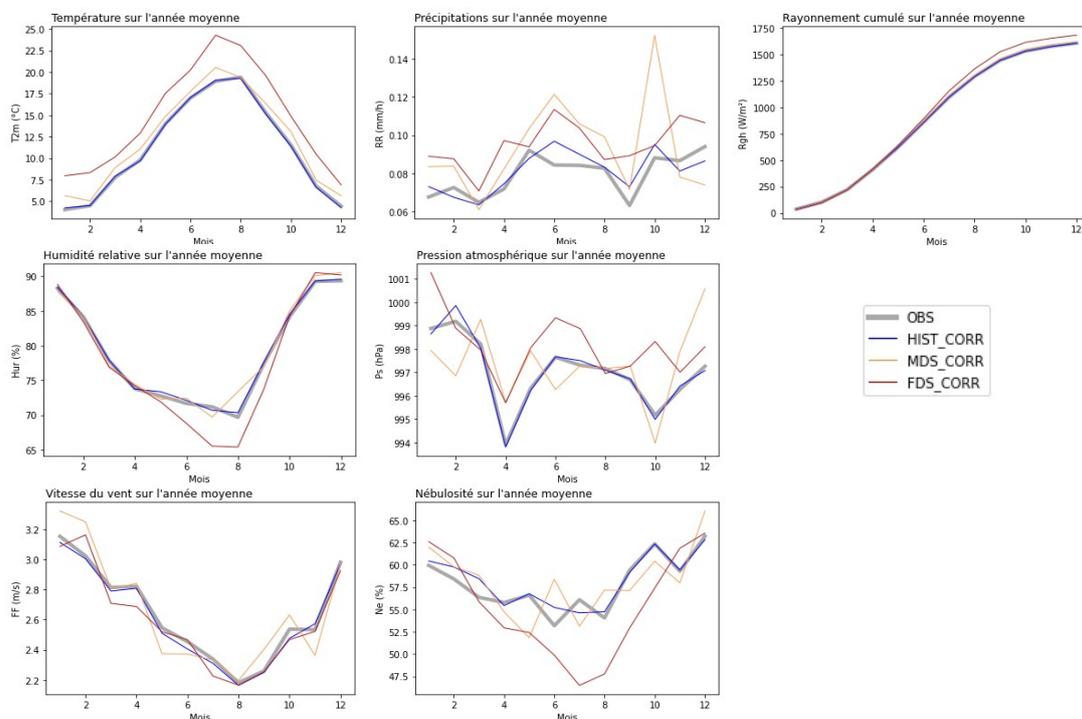


Figure 4: Cycle mensuel des variables météorologiques sur une année moyenne à Trappes. Sont représentées en gris les données observées, en bleu clair les données historiques corrigées, en jaune les données futures à moyen terme corrigées et en rouge les données futures à long terme corrigées.

3.2.2 Variables simulées ou reconstruites

Le modèle CNRM-AROME permet la simulation de la plupart des variables météorologiques constituant les fichiers climatiques, en particulier la température de l'air à 2 mètres, la hauteur de précipitations, la pression atmosphérique, l'humidité relative, le rayonnement global horizontal et la nébulosité. Pour les variables qui ne sont pas directement simulées par le modèle CNRM-AROME, elles ont été reconstruites à partir des variables simulées.

- **Température du sol à 1 mètre (T-1m, en °C)**

Cette variable est reconstruite sur base de la fonction $f : y = f(x)$, qui relie la température de l'air observée à 2 mètres (mesurée à la station du réseau RADOME) et la température du sol dans la couche de sol entre 80 et 100 cm (issue de l'analyse SIM2 ; voir la description des données en Annexe 6.1.7).

La fonction f est construite par une approche de transformation quantile-à-quantile : on associe les quantiles (de 0 à 1, par pas de 0,1) des distributions des températures de l'air à 2 mètres et de la température du sol à 1 mètre.

L'application de cette fonction permet de projeter les températures de l'air corrigées issues du modèle CNRM-AROME vers une estimation correspondante de la température du sol à 1 mètre.

Cette méthode, purement statistique, repose donc sur la conservation des structures de distribution entre les deux variables, en supposant que la relation observée entre les quantiles reste valable pour les données corrigées du modèle.

Afin de réduire les variations rapides non physiques dans la température du sol estimée – une variable qui évolue naturellement de manière plus lente que la température de l'air –, un filtrage a été appliqué. Celui-ci consiste d'abord à calculer la moyenne mensuelle glissante de la température du sol à 1 mètre, puis à effectuer un lissage temporel par moyenne mobile sur 744 pas de temps (correspondant à 31 jours à raison d'une donnée par heure).

- **Humidité spécifique (Hus, en kg d'eau/kg d'air).**

Cette variable est calculée selon la formule empirique de Nadeau et Puiggali avec la pression de vapeur saturante donnée par les équations de Tetens et la pression atmosphérique à la station déduite à partir de son altitude en suivant la formulation de Allen et al. (1998).

$$Hus = \frac{0,622 \cdot Hur \cdot Zew}{Ps - 0,378 \cdot Hur \cdot Zew}$$

$$\text{avec : } Zew = \begin{cases} 610,8 \cdot e^{\frac{17,27 \cdot T_{2m}}{T_{2m} + 237,3}} & \text{si } T_{2m} \geq 0^\circ C \\ 610,8 \cdot e^{\frac{21,875 \cdot T_{2m}}{T_{2m} + 265,5}} & \text{si } T_{2m} \leq 0^\circ C \end{cases}$$

$$\text{et avec : } Ps = 101,3 \cdot \left(1 - 0,0065 \cdot \left(\frac{Z}{293}\right)^{5,26}\right)$$

où :

- Hur : humidité relative (valeur en % ramenée à une valeur entre 0 et 1)
- Ps : pression à la station (valeur en hPa convertie en Pa)
- Zew : pression de vapeur saturante (en Pa)
- z : altitude par rapport au niveau de la mer (en m)

- **Force et direction du vent à 10 mètres (FF et DD en m.s⁻¹ et °)**

Elles sont converties comme suit à partir des composantes U et V du vent simulées par CNRM-AROME :

$$FF = \sqrt{U^2 + V^2}$$

$$DD = \text{atan2}(V, U) \quad \text{mod } 360^\circ$$

- **Température du point de rosée (Tr, en °C)**

Elle est calculée en fonction de la température de l'air à 2 mètres et de l'indice d'humidité relative comme suit :

$$Tr = 237,7 \cdot \left(\frac{\alpha}{17,27 - \alpha} \right)$$

$$\text{avec : } \alpha = 17,27 \cdot \left(\frac{T_{2m}}{237,7 + T_{2m}} \right) + \ln(Hur)$$

où :

- Hur : humidité relative (valeur entre 0 et 1)

- **Température d'émittance de l'atmosphère (Tc, en °C)**

La discrétisation jour/nuit est mise en œuvre selon la hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon (paramètre Hs) afin de tenir compte de la variation saisonnière de la durée du jour.

$$Tc = \begin{cases} ((T_{2m} + 273,15) \cdot Emisc) - 273,15 & \text{si } Hs \geq 0^\circ \\ ((T_{2m} + 273,15) \cdot Emisc) - 273,15 + 4,5 & \text{si } Hs \leq 0^\circ \end{cases}$$

$$\text{avec : } Emisc = [(1 - 0,056 \cdot Ne) \cdot (0,741 + 0,0062 \cdot Tr) + 0,056 \cdot Ne]^{0,25}$$

où :

- Ne : nébulosité (échelle de 1 à 10)
- Hs : hauteur angulaire du Soleil (en °)
- Emisc : émissivité apparente en ciel clair

- **Hauteur angulaire du Soleil et orientation du Soleil par rapport au sud (Hs et Os, en °)**

Ces variables sont reconstruites à l'aide d'une série de fonctions développées et utilisées à Météo-France.

Le paramètre H_s est obtenu par la formule suivante en utilisant la latitude du lieu lat , la déclinaison solaire δ (en °) et l'angle horaire solaire H (en °) :

$$H_s = \frac{\arcsin(\sin(lat) \cdot \sin(\delta) + \cos(lat) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(H)) \cdot 180}{\pi}$$

Le paramètre O_s est obtenu par la formule suivante. Avec cette formulation, O_s est compris entre 0 et 360°. En complément, les fichiers climatiques prospectifs comprennent la variable O_s sur la gamme allant de -180 à 180°.

$$O_s = \frac{\arctan(\sin(H), \cos(H) \cdot \sin(lat) - \tan(\delta) \cdot \cos(lat)) \cdot 180}{\pi} \quad \text{mod } 360^\circ$$

- **Rayonnement direct normal et rayonnement horizontal diffus (Rdn et Rdi, en $W \cdot m^{-2}$)**

Il existe plusieurs méthodes pour estimer les composantes directes et diffuses du rayonnement global, dont quelques-unes sont disponibles au travers de la librairie Python *pvl*. La méthode Erbs, développée par Daryl Gregory Erbs à l'Université du Wisconsin en 1982, a été utilisée ici.

Le modèle Erbs estime la fraction diffuse (DF) à partir du rayonnement global horizontal grâce à une relation empirique entre DF et le rapport entre le R_{gh} . La fonction utilise la fraction diffuse pour calculer le Rdi comme suit :

$$R_{di} = R_{gh} \cdot DF$$

Puis, le Rdn est estimé à l'aide de l'angle du zénith solaire Z :

$$R_{dn} = \frac{(R_{gh} - R_{di})}{\cos(Z)}$$

3.3 Données climatiques représentatives TRACC

3.3.1 Présentation de la TRACC

Dans le cadre du développement de la troisième version du Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC3), le gouvernement français a défini la Trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC), afin de servir de référence aux actions d'adaptation sur le territoire français.

La TRACC a été établie, pour la France métropolitaine, en suivant l'approche du GIEC par degré de réchauffement en remplacement des projections par horizons temporels. D'après les engagements actuels des États en matière de réduction des émissions des gaz à effet de serre et les politiques climatiques mises en œuvre, le GIEC a estimé que le réchauffement global devrait atteindre +1.5°C par rapport à la période pré-industrielle à l'horizon 2030, +2°C à l'horizon 2050 et environ +3°C à l'horizon 2100. Les niveaux de réchauffement correspondants à l'échelle de la France, qui ont été estimés dans le cadre de la TRACC, sont de +2°C à l'horizon 2030, +2.7°C à l'horizon 2050 et +4°C à l'horizon 2100.

3.3.2 Adaptation de la norme ISO15927-4

Pour extraire dans CNRM-AROME une série temporelle représentative d'un niveau de réchauffement de la TRACC, le jeu de données TRACC-2023, s'appuyant sur les projections EXPLORE2 mises à disposition du public sur le portail DRIAS, a été utilisé. Une description complète de ces données est disponible en Annexe 6.1.9. Les données EXPLORE2 sont utilisées dans la norme ISO 15927-4 (2005), dont l'application a été modifiée pour les besoins de la présente étude. Les étapes du calcul sont décrites ci-dessous.

Pour chaque mois m de chaque année des simulations CNRM-AROME :

Les étapes 1 à 6 sont effectuées pour les trois paramètres que sont la température de l'air à 2 mètres, l'humidité relative et le rayonnement global horizontal. Les résultats obtenus à différentes étapes pour le niveau de réchauffement France à 4°C sont présentés dans les Tableaux 2 et 3.

- Étape 1) Les moyennes journalières du paramètre météorologique dans CNRM-AROME p_{AROME}^- sont calculées à partir de toutes les valeurs horaires du même paramètre météorologique p_{AROME} (colonne 2 du Tableau 2).
- Étape 2) Un rang K_{AROME} est attribué à chaque moyenne journalière p_{AROME}^- en fonction de sa place dans la liste classant par ordre croissant les moyennes journalières p_{AROME}^- associées au mois m (colonne 3 du Tableau 2).
- Étape 3) Pour chaque moyenne journalière p_{AROME}^- , la fonction de répartition $\phi(p_{AROME}^-, m)$ associée est calculée en divisant le rang K_{AROME} par le nombre de jours N_{AROME} du mois m dans l'ensemble de données (colonne 4 du Tableau 2).
- Étape 4) Un rang est attribué à chaque valeur journalière $p_{EXPLORE2}$ en fonction de sa place dans la liste classant par ordre croissant l'ensemble des valeurs journalières $p_{EXPLORE2}$ des mois m (colonne 5 du Tableau 2).
- Étape 5) Pour chaque valeur journalière du paramètre météorologique dans EXPLORE2 $p_{EXPLORE2}$, la fonction de répartition $\phi(p_{EXPLORE2}, m)$ associée est calculée en divisant le rang $K_{EXPLORE2}$ par le nombre de jours $N_{EXPLORE2}$ de tous les mois m du jeu de données EXPLORE2 (colonne 6 du Tableau 2).
- Étape 6) Un écart définitif $K^*(p, m)$ est calculé pour chaque pas de temps, comme la différence absolue entre la fonction de distribution $\phi(p_{EXPLORE2}, m)$ et la fonction de distribution $\phi(p_{AROME}^-, m)$ (colonne 7 du Tableau 2).
- Étape 7) Les écarts définitifs séparés des paramètres climatiques $K^*(p, m)$ sont cumulés afin de calculer la statistique de Finkelstein-Schafer qui mesure la distance entre les fonctions de répartition $\phi(p_{AROME}^-, m)$ et $\phi(p_{EXPLORE2}, m)$ (Tableau 3).
- Étape 8) Pour les trois mois ayant le cumul le plus bas, l'écart de la vitesse moyenne mensuelle du vent de CNRM-AROME par rapport à la moyenne mensuelle pluriannuelle EXPLORE2 est calculée.

3 Construction de l'année type future



Le mois présentant le plus faible écart de vitesse du vent est sélectionné pour être inclus dans l'année météorologique type.

Tableau 2: Application à la station de référence de Trappes de la norme ISO15927-4 "adaptée" sur la température à 2 mètres simulée par CNRM-AROME et les données EXPLORE2 pour le niveau de réchauffement France à 4°C en considérant uniquement le mois de janvier 2080 (étapes 1 à 6).

Jour de janvier 2080	Température moyenne quotidienne (en °C) $\bar{T} 2 m_{AROME}$	Rang AROME K_{AROME}	Rang AROME adimensionné $\phi(\bar{T} 2 m_{AROME}, m)$	Rang EXPLORE2 $K_{EXPLORE 2}$	Rang adimensionné EXPLORE2 $\phi(\bar{T} 2 m_{EXPLORE 2}, m)$	Rang adimensionné définitif $K*(T 2 m, m)$
01	3.9	1	0.03	3110	0.30	0.26
02	5.0	2	0.06	4161	0.39	0.33
03	7.5	14	0.45	6862	0.65	0.20
04	6.4	6	0.19	5645	0.54	0.34
05	7.1	9	0.29	6380	0.61	0.32
06	9.8	27	0.87	8974	0.85	0.02
07	11.1	30	0.97	9735	0.92	0.04
08	8.9	20	0.65	8251	0.78	0.14
09	7.8	17	0.55	7110	0.67	0.13
10	9.0	21	0.68	8323	0.79	0.11
11	8.2	18	0.58	7530	0.71	0.13
12	7.4	12	0.39	6753	0.64	0.25
13	5.6	4	0.13	4843	0.46	0.33
14	9.1	23	0.74	8457	0.80	0.06
15	9.7	26	0.84	8860	0.84	0.01
16	7.8	16	0.52	7117	0.68	0.16
17	7.5	13	0.42	6816	0.65	0.23
18	7.5	15	0.48	6866	0.65	0.17
19	7.2	10	0.32	6577	0.62	0.30
20	6.8	8	0.26	6102	0.58	0.32
21	6.8	7	0.23	6087	0.58	0.35
22	6.9	5	0.16	5544	0.53	0.36
23	9.6	25	0.81	8801	0.84	0.03
24	9.4	24	0.77	8616	0.82	0.04
25	9.1	22	0.71	8415	0.80	0.09
26	7.3	11	0.35	6619	0.63	0.27
27	10.3	28	0.90	9296	0.88	0.02
28	11.3	31	1.00	9795	0.93	0.07

29	11.1	29	0.94	9676	0.92	0.02
30	8.8	19	0.61	8151	0.77	0.16
31	5.4	3	0.10	4679	0.44	0.35

Tableau 3: Application à la station de référence de Trappes de la norme ISO15927-4 "adaptée" (étape 7) en considérant uniquement le mois de janvier.

Années	Rang adimensionné définitif $K*(T_{2m}, m)$	Rang adimensionné définitif $K*(R_{gh}, m)$	Rang adimensionné définitif $K*(H_{ur}, m)$	Rang adimensionné cumulé	Classement des rangs adimensionnés cumulés
2041	7	6	21	34	6
2042	3	21	10	34	6
2043	2	19	20	41	10
2044	10	15	1	26	3
2045	4	20	18	42	11
2046	9	13	9	31	4
2047	1	30	4	35	8
2048	13	28	2	43	12
2049	15	27	23	65	27
2050	5	29	12	46	16
2080	22	12	22	56	21
2081	11	2	24	37	9
2082	21	9	30	60	24
2083	14	14	5	33	5
2084	6	8	6	20	1
2085	27	22	7	56	21
2086	18	18	17	53	19
2087	24	11	16	51	18
2088	8	7	28	43	12
2089	19	23	26	68	30
2090	12	1	8	21	2
2091	16	26	3	45	14
2092	28	10	27	65	27
2093	17	24	13	54	20
2094	26	5	14	45	14
2095	29	17	15	61	25
2096	25	16	25	66	29
2097	20	25	11	56	21

2098	23	4	19	46	16
2099	30	3	29	62	26

3.3.3 Années météorologiques types retenues

L'application de la norme internationale 15927-4 (2005), avec les adaptations nécessaires à cette étude, a permis de sélectionner les années pour reconstituer une année météorologique type représentative d'un niveau de réchauffement de la TRACC. Les résultats de la station de Trappes sont présentés dans le Tableau 4. Pour les autres villes, les résultats sont présentés en Annexe 6.3 .

Tableau 4: Composition de l'année météorologique typique pour les niveaux de réchauffement France à +2°C, 3°C et 4°C à la station de Trappes.

Mois	Années sélectionnées pour la TRACC +2°C	Années sélectionnées pour la TRACC +2.7°C	Années sélectionnées pour la TRACC +4°C
Janvier	2084	2084	2084
Février	2048	2048	2089
Mars	2047	2047	2047
Avril	2045	2045	2081
Mai	2045	2089	2093
Juin	2085	2047	2050
Juillet	2045	2043	2096
Août	2048	2087	2087
Septembre	2084	2080	2083
Octobre	2049	2049	2085
Novembre	2096	2096	2092
Décembre	2094	2094	2047

Il convient de rappeler que la composition de l'année météorologique type pour les différents niveaux de réchauffement climatique est basée sur un échantillon simulé de 30 années en climat futur. L'échantillon reste relativement limité, ce qui explique que certaines années sont utilisées pour composer l'année météorologique type pour plusieurs niveaux de réchauffement global.

3.3.4 Construction des fichiers

Les données d'un mois associées à chaque année sélectionnée par l'application de la norme internationale 15927-4 (2005) ont été concaténées, afin de reconstituer une année (cf. Figure 5). Pour certaines variables météorologiques de température, d'humidité et de pression atmosphérique, un lissage sur 8 heures a été appliqué à chaque changement de mois.

Des contrôles spécifiques ont été effectués sur les données contenues dans chacun des fichiers climatiques prospectifs. Ces contrôles visent à s'assurer que l'année météorologique type ne contient pas de valeurs négatives de rayonnement ou de vitesse du vent, ni de sauts de température significatifs (supérieurs à 10°C).

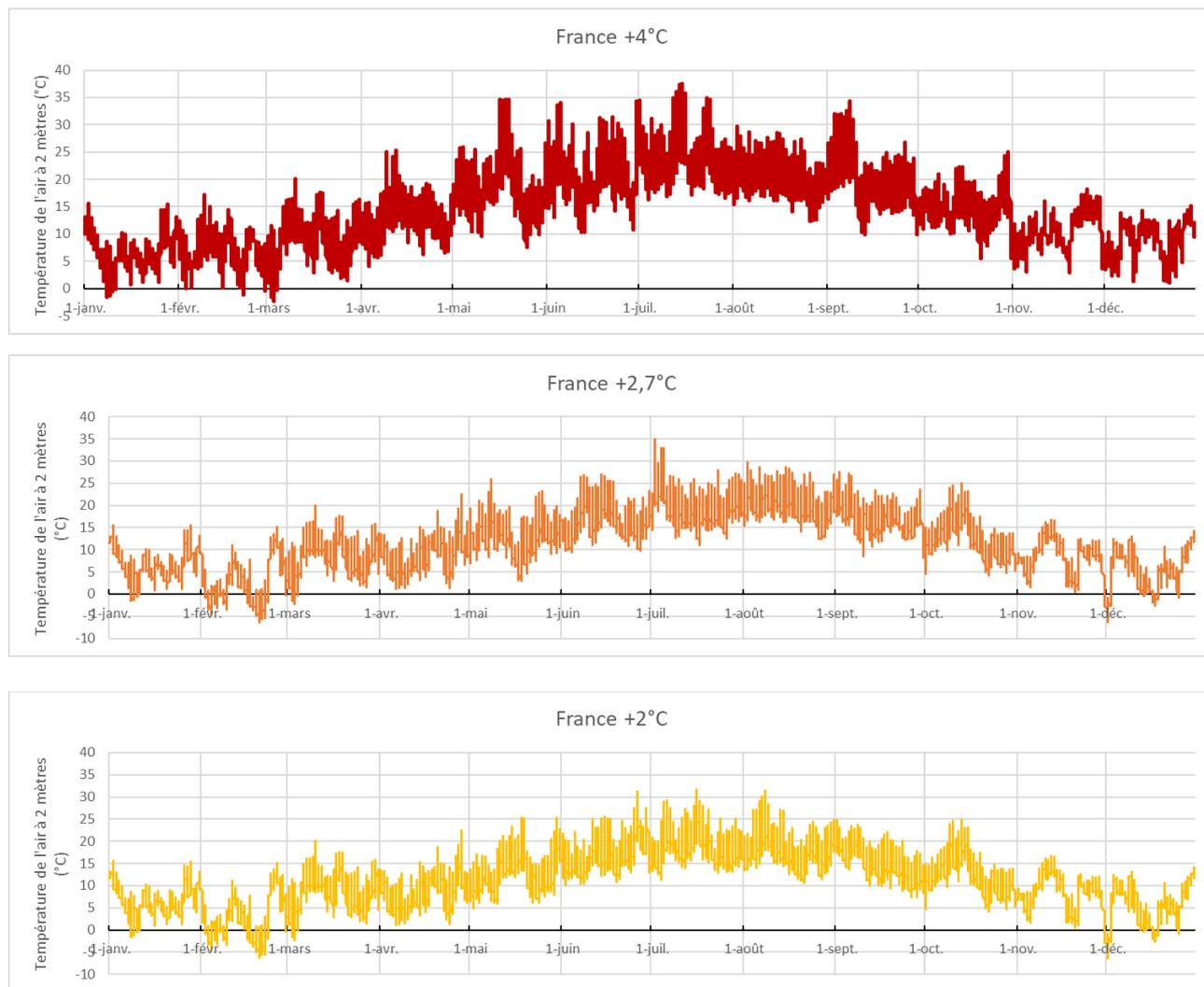


Figure 5: Température de l'air à 2 mètres à Trappes sur l'année météorologique type représentative du niveau de réchauffement France à +4°C (en haut), France à +2,7°C (au milieu) et France +2°C (en bas).

À titre indicatif, l'Annexe X présente les distributions de la température de l'air à 2 mètres pour chacun des niveaux de réchauffement ainsi que pour les fichiers climatiques de référence – couvrant la période 2000-2018 –.

4 Sélection des évènements de vagues de chaleur futures

4.1 Définition de l'indicateur sur les vagues de chaleur

Une vague de chaleur est définie par l'Organisation Météorologique Mondiale comme une période de chaleur inhabituelle et persistante pendant un certain nombre de jours et de nuits. Cependant, il n'existe pas de consensus dans la littérature sur une définition unique et des seuils permettant de caractériser un épisode de vague de chaleur. Le choix de la méthodologie dépend principalement du contexte dans lequel l'étude est réalisée et des objectifs d'analyse (étude climatique, système d'alerte et santé humaine, gestion de la demande énergétique, impacts sur les transports, agriculture, etc.).

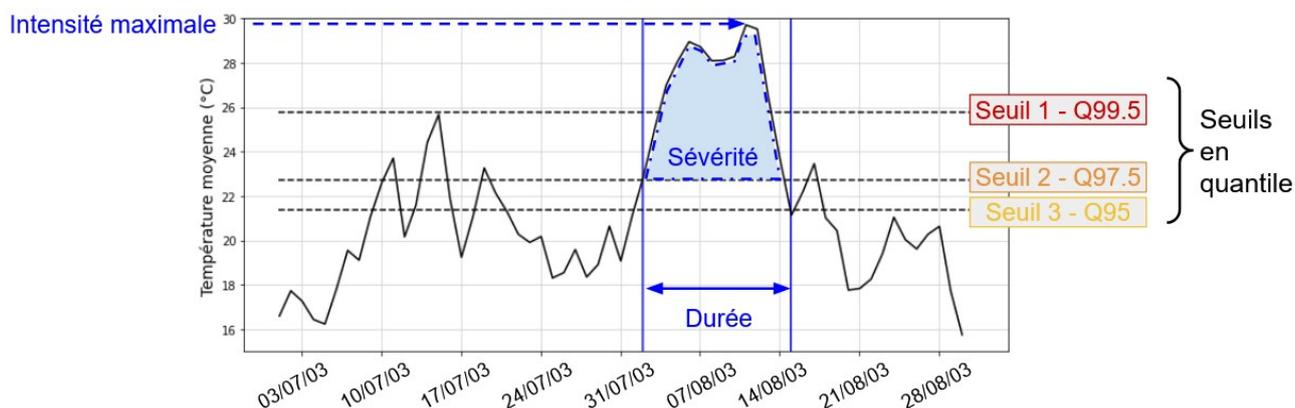


Figure 6: Caractéristiques de la vague de chaleur de 2003 à l'échelle de la région parisienne par l'application de la méthode d'identification des vagues de chaleur sur les températures moyennes ANASTASIA (plus d'informations sur la donnée en Annexe 6.5).

Dans cette étude, les seuils définis à l'échelle de la France métropolitaine pour les études climatiques à Météo-France ont été choisis pour la détection des vagues de chaleur (Ouzeau et al., 2016). Cette approche utilise des seuils en quantile, ce qui permet de l'appliquer à différentes régions et/ou à des contextes climatiques et géographiques variés. La méthode est basée sur des dépassements de seuils appliqués sur une longue série temporelle de températures moyennes journalières (TM, calculée comme la moyenne des températures minimales et maximales, Figure 6).

Trois quantiles différents sont utilisés pour définir les valeurs seuils sur la période historique, considérée comme période de référence. Un épisode de vague de chaleur est identifié lorsque la TM dépasse la valeur du quantile 99,5 (seuil S1). L'évènement se prolonge avant et après le pic de chaleur tant que la TM ne tombe pas durablement (c'est-à-dire plus de deux jours consécutifs) en dessous de la valeur du quantile 97,5 (seuil S2) et ne tombe pas, même occasionnellement, en dessous de la valeur du quantile 95 (seuil S3). Lorsque la durée de la vague de chaleur est au minimum de 3 jours, alors l'épisode est comptabilisé comme tel et décrit par trois paramètres principaux : sa durée (en jours), son intensité maximale (pic de la TM atteint pendant l'évènement, en °C) et sa sévérité, calculée comme le nombre cumulé de degrés au-dessus du seuil S2 pendant la durée de l'évènement (en °C).

4.2 Sélection d'un épisode représentatif TRACC

Comme précédemment, le jeu de données EXPLORE2 a été utilisé pour extraire des épisodes de vagues de chaleur CNRM-AROME représentatifs d'un niveau de réchauffement TRACC.

L'approche a consisté à appliquer la méthode de détection des vagues de chaleur à chacune des 17 simulations EXPLORE2. Les valeurs seuils ont été définies à l'aide des données météorologiques historiques quotidiennes de SAFRAN (description disponible en Annexe 6.1.5). Le choix s'est porté sur les données SAFRAN, qui sont les observations utilisées pour la correction des biais du jeu de données EXPLORE2, bien qu'il aurait été possible d'utiliser la simulation historique associée à chacune des futures simulations EXPLORE2. Une description plus complète de la donnée est disponible en Annexe 6.1.9.

Il a été établi en séance que le principal paramètre affectant le secteur du bâtiment est la sévérité. Elle a donc été utilisée pour classer les épisodes de vagues de chaleur détectés du plus sévère au moins sévère. Ce classement a permis de calculer les caractéristiques médianes d'une vague de chaleur pour un niveau de réchauffement donné, en prenant en compte uniquement 5% des épisodes les plus sévères. Ce choix a été fait pour s'assurer que les vagues de chaleur les plus extrêmes soient prises en compte.

La vague de chaleur CNRM-AROME la plus représentative d'un niveau de réchauffement global donné a été sélectionnée en déterminant l'épisode CNRM-AROME ayant la plus petite distance euclidienne par rapport à la vague de chaleur médiane EXPLORE2. Une série de tests a permis de définir le(s) paramètre(s) à considérer dans le calcul de la distance euclidienne, de manière à obtenir des vagues de chaleur d'intensité, de durée et/ou de gravité croissantes entre les niveaux de réchauffement France à +2°C, +2.7°C et +4°C. Finalement, la sélection des trois vagues de chaleur représentatives TRACC a été faite sur la base de la sévérité des épisodes.

4.3 Présentation des vagues de chaleur retenues

En reprenant l'exemple à la station de Trappes, les caractéristiques associées aux vagues de chaleur TRACC retenues sont les suivantes (Figure 7 et Figure 13 en Annexe 6.5) :

- La vague de chaleur représentative du niveau de réchauffement France à +2°C présente une sévérité de 26.0°C/jour.
- La vague de chaleur représentative du niveau de réchauffement France à +2.7°C a une sévérité de 43.0°C/jour.
- La vague de chaleur représentative du niveau de réchauffement France à +4°C a une sévérité de 66.0°C/jour.

À titre de comparaison, si l'on considère le produit historique SAFRAN, la vague de chaleur de 2003 à Trappes est caractérisée par une sévérité de 24.0°C/jour.

Pour les autres villes, les résultats sont présentés en Annexe 6.6.

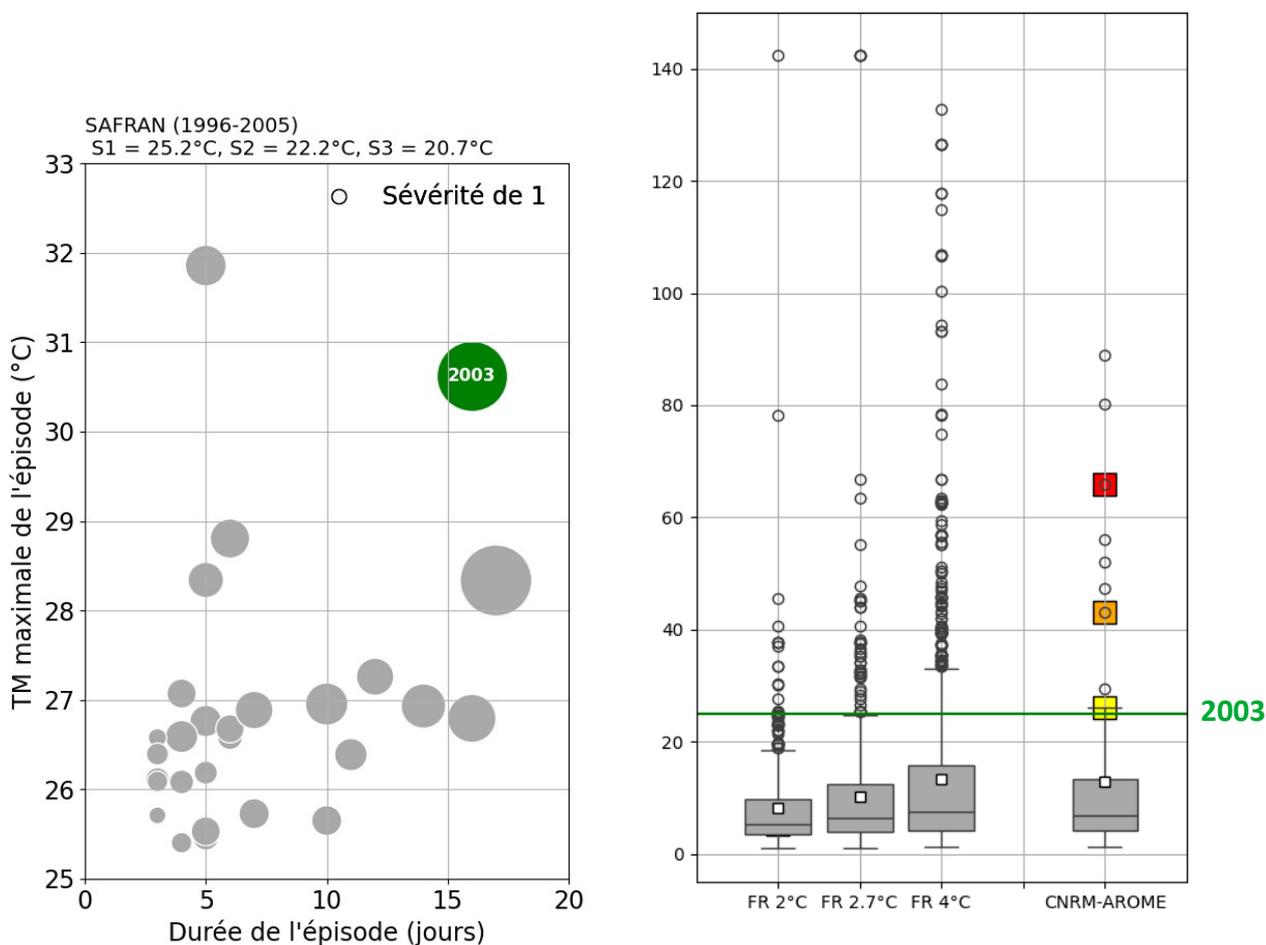


Figure 7 : (À gauche) Caractéristiques des vagues de chaleur observées d'après SAFRAN sur la période historique 1971-2019 à Trappes. (À droite) Distribution de la sévérité des vagues de chaleur pour des niveaux de réchauffement de +2°C, +2,7°C et +4°C en France à partir des données EXPLORE2 (cf. FR 2°C, FR 2,7°C et FR 4°C) et simulées par le CNRM-AROME (cf. CNRM-AROME). Les boîtes à moustaches s'étendent du premier quartile (Q1) au troisième quartile (Q3) des données, avec une ligne à la médiane. Les moustaches s'étendent de la boîte au point de données le plus éloigné, situé à 1,5 fois l'intervalle interquartile (IQR) de la boîte. Les points les plus éloignés sont ceux qui se trouvent au-delà de l'extrémité des moustaches. La sévérité moyenne des vagues de chaleur est indiquée par un carré blanc. La sévérité des vagues de chaleur du CNRM-AROME représentatives des niveaux de réchauffement de la France à +2°C, +2,7°C et +4°C est indiquée en jaune, orange et rouge respectivement. La sévérité de la vague de chaleur de 2003, indiquée en vert, est donnée à titre indicatif.

4.4 Construction des fichiers pour les vagues de chaleur

Pour chaque niveau de réchauffement global, les séries temporelles des variables d'intérêt (simulées ou reconstruites) ont été extraites pour les jours de vagues de chaleur. Ces séries ont ensuite été insérées dans la série temporelle correspondant à l'année météorologique type, en conservant les informations liées au

calendrier, à savoir les dates de début et de fin de l'épisode. Pour sept variables (la température de l'air à 2 mètres, la température du sol à 1 mètre, l'humidité relative, l'humidité spécifique, la température d'émission de l'atmosphère, la température du point de rosée et la pression atmosphérique), les jonctions entre les séquences ont été lissées sur 8 heures.

5 Limitations de l'étude

Le cahier des charges de cette étude nous a contraint à construire les fichiers climatiques prospectifs pour les 8 stations de référence de la RE2020. Cependant, nous pouvons nous interroger sur la pertinence de l'utilisation de ces zones climatiques en climat futur. En effet, la hausse des températures devrait entraîner un changement dans la répartition géographique des zones climatiques et donc, il pourrait être intéressant de les revoir à l'avenir. D'autre part, il est important de rappeler que les stations de référence étant situées dans des environnements plutôt ruraux, les fichiers climatiques prospectifs qui ont été produits ne représentent pas les effets urbains.

Cette étude tire parti de 30 années de simulations en climat futur réalisées à partir du modèle climatique à haute résolution CNRM-AROME pour produire des séries de données climatiques prospectives qui reflètent le climat futur, tout en répondant aux exigences gouvernementales de la TRACC.

Il est important de mentionner les limites de l'utilisation d'un seul modèle climatique (erreurs potentielles du modèle, variabilité interne du climat, etc.) et ce sur un échantillon réduit de 30 ans de climat futur. Cela induit que certaines années sont utilisées pour composer l'année météorologique type pour plusieurs niveaux de réchauffement climatique. Il en va de même pour les vagues de chaleur, qui sont des événements extrêmes pour lesquels 30 ans de simulations climatiques restent limités.

Ces limites pourront être réduites grâce aux futures données du SOCLE Métropole qui fourniront un ensemble de projections climatiques, basé sur les simulations de l'exercice CMIP6 et répondant aux différents besoins des services climatiques, à l'horizon 2026.

Certains des résultats contenus dans les fichiers climatiques prospectifs appellent à une **interprétation prudente** et mettent en évidence la nécessité de prévoir une évolution des fichiers climatiques prospectifs au fur et à mesure que les projections climatiques s'enrichissent et permettent des études multi-modèles.

- Les précipitations figurent parmi les variables climatiques les plus difficiles à projeter de manière précise dans les modèles climatiques. Les techniques de débiaisage de cette variable sont encore à ce jour un sujet de recherche. Par conséquent, les projections climatiques relatives aux précipitations présentent souvent une incertitude plus élevée que celles de la température. Les changements annuels du cumul de précipitations donnés par la TRACC sont un bon exemple pour illustrer cela. Sur la Figure 8, les zones géographiques hachurées correspondent à des zones où il existe une incertitude sur le signe du changement, en réponse à des projections variables des modèles climatiques.

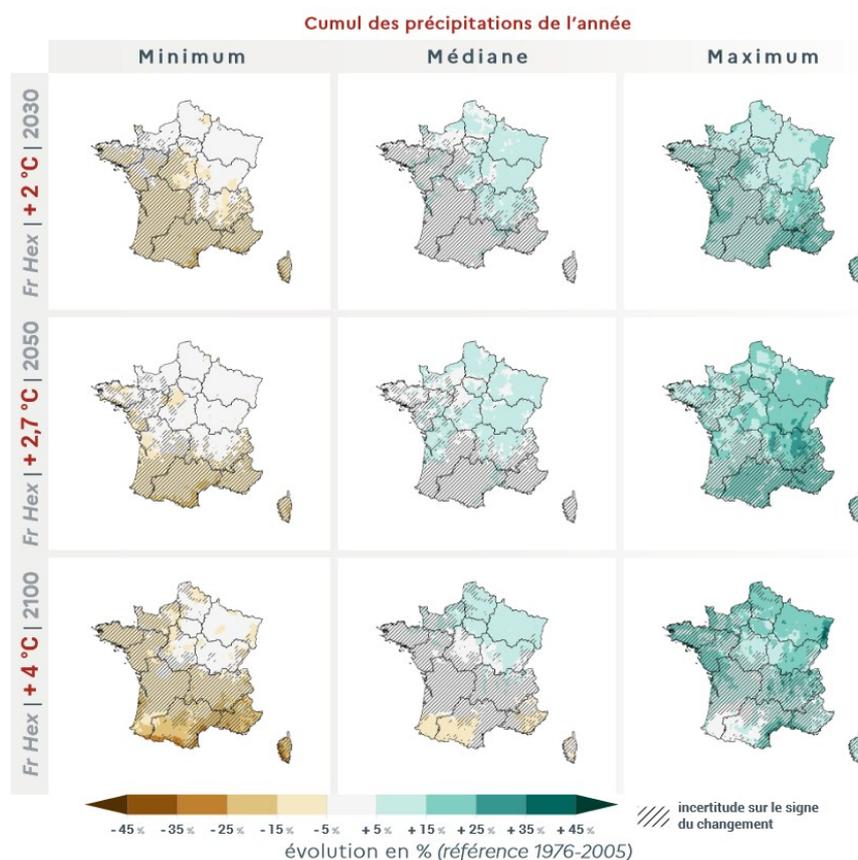


Figure 8: Evolution en pourcentage des cumuls annuels de précipitation sur la France métropolitaine aux niveaux de réchauffement France +2°C, France +2,7°C et France +4°C d'après le jeu de données TRACC-2023. | Source : A quel climat s'adapter en France selon la TRACC ? <https://hal.science/hal-04797481>

Ce phénomène n'épargne pas les fichiers climatiques prospectifs dans lesquels Météo-France, en collaboration avec le CSTB, a mis en évidence des cumuls de précipitations élevés dans certaines chroniques, malgré le débiaisage de ces valeurs. En effet, les années sélectionnées pour reconstituer une année météorologique type représentative d'un niveau de réchauffement de la TRACC semblent être des années à fort cumul de précipitations. Ainsi, dans certains fichiers, il existe une différence significative entre les cumuls annuels du fichier climatique de référence (2000-2018) et le fichier climatique prospectif correspondant (Figure 9). La tendance d'augmentation marquée des cumuls annuels de précipitations que l'on relève sur les fichiers climatiques prospectifs est donc à considérer avec beaucoup de prudence, car elle s'approche plus des maxima proposés dans les simulations TRACC (Figure 9) que d'un comportement médian par niveau de réchauffement.

Cumul annuel (mm)	AGEN	CARPENTRAS	MACON	MARIGNANE	NANCY	RENNES	TOURS	TRAPPES
Cumul annuel (mm) de la climatologie de référence 1991-2020	708.2	665.5	833.7	532.3	810.4	691	677.8	686.3
Cumul annuel moyen (mm) de CNRM-AROME corrigé 1986-2005	682.73	681.00	834.99	550.86	766.97	749.23	695.43	711.26
Cumul annuel (mm) du fichier climatique de référence 2000-2018	670.4	676	854.7	725	629	740.2	622.9	706.2
Ecart-relatif entre le cumul annuel du fichier climatique de référence (2000-2018) et le cumul annuel de la climatologie de référence (1991-2020)	-5%	+2%	+3%	+36%	-22%	+7%	-8%	+3%
Cumul annuel (mm) du fichier climatique prospectif FR +2°C	923.9	1108.8	889.1	1188.5	1108.3	869.3	1040.9	981.3
Ecart-relatif entre le cumul annuel moyen de CNRM-AROME corrigé et le cumul annuel du fichier climatique prospectif FR +2°C	+35%	+63%	+6%	+116%	+45%	+16%	+50%	+38%
Ecart-relatif entre le cumul annuel du fichier climatique de référence (2000-2018) et le cumul annuel du fichier climatique prospectif FR +2°C	+38%	+64%	+4%	+64%	+76%	+17%	+67%	+39%
Cumul annuel (mm) du fichier climatique prospectif FR +2.7°C	833.0	993.6	1084.2	1084.7	1059.4	1000.7	1018.9	985.4
Ecart-relatif entre le cumul annuel moyen de CNRM-AROME corrigé et le cumul annuel du fichier climatique prospectif FR +2.7°C	+22%	+46%	+30%	+97%	+38%	+34%	+47%	+38%
Ecart-relatif entre le cumul annuel du fichier climatique de référence (2000-2018) et le cumul annuel du fichier climatique prospectif FR +2.7°C	+24%	+47%	+27%	+50%	+68%	+35%	+64%	+40%
Cumul annuel (mm) du fichier climatique prospectif FR +4°C	993.9	784.7	1282.7	968.7	1351.8	791.4	960.1	1192.1
Ecart-relatif entre le cumul annuel moyen de CNRM-AROME corrigé et le cumul annuel du fichier climatique prospectif FR +4°C	+46%	+15%	+54%	+76%	+76%	+6%	+38%	+68%
Ecart-relatif entre le cumul annuel du fichier climatique de référence (2000-2018) et le cumul annuel du fichier climatique prospectif FR +4°C	+48%	+16%	+50%	+34%	+115%	+7%	+54%	+69%

Figure 9: Résultats de certaines analyses complémentaires réalisées sur les précipitations. L'encadré bleu concerne exclusivement les fichiers climatiques de la RE2020 (de référence et prospectifs).

6 Annexes

6.1 Annexe A – Observations passées et projections climatiques

6.1.1 Mesures météorologiques du réseau RADOME

Le réseau Radome (Réseau d'acquisition de données et d'observations météorologiques étendu) est un réseau synoptique d'observations météorologiques au sol, développé et maintenu par Météo-France, destiné à la surveillance en temps réel des conditions météorologiques de surface et à l'assimilation de ses données dans les modèles de prévision numérique du temps (Tardieu et Leroy, 2003). Il regroupe des stations intégrées au système mondial d'observation de l'Organisation Météorologique Mondiale, des stations complémentaires situées dans les aéroports, les sémaphores et les bases militaires. Ces stations météorologiques, nombreuses et réparties de manière relativement homogène sur le territoire métropolitain, mesurent divers paramètres tels que la température de l'air à 2 mètres, l'humidité relative à 2 mètres, la vitesse et la direction du vent à 10 mètres, et les précipitations. D'autres paramètres, tels que la pression atmosphérique, le rayonnement solaire global, la visibilité et la hauteur des nuages, peuvent également être mesurés par certaines stations.

6.1.2 Produit d'Analyse de Nébulosité Satellite

Le produit ANS (Analyse de Nébulosité Satellite) fournit des données détaillées sur la couverture nuageuse observée à partir d'images satellites. Le calcul de l'ANS s'appuie sur le produit de classification nuageuse du Centre de météorologie spatiale (CMS) de Météo-France, qui est composé de 21 classes décrivant les nuages en termes de texture et de niveau. À chaque valeur de classe et pour chaque pixel on associe une valeur de nébulosité sous forme d'un pourcentage de couverture nuageuse. Les valeurs (de 0, 50 ou 100%) sont donc affectées à chaque point d'une grille à la résolution maximale de l'image. Ensuite, pour chaque point de la grille finale une moyenne est effectuée sur un nombre de pixels autour du point de grille de façon à intégrer les données dans une zone d'environ 30 km de rayon.

6.1.3 Produit spatialisé APROFUS2R

APROFUS2R est une analyse spatialisée des paramètres météorologiques de base construite à partir :

- Des observations de surface issues des messages internationaux d'observation en surface (température à 2 mètres, température horaire minimale à 2 mètres, température horaire maximale à 2 mètres, humidité à 2 mètres, force et direction du vent à 10 mètres) ;
- Des analyses AROME (température à 2 mètres, humidité à 2 mètres, composantes zonale et méridienne du vent moyen à 10 mètres) issues de l'assimilation et disponibles toutes les heures ;

- Des analyses spatialisées du rayonnement solaire global ;
- Du relief.

6.1.4 Produit de précipitations COMEPHORE

COMEPHORE (COMbinaison en vue de la Meilleure Estimation de la Précipitation HORaiRE, Tabary et al., 2012) est un jeu spatialisé de données de précipitation à 1 km de résolution horizontale et disponible au pas de temps horaire sur la France métropolitaine. Il est basé sur la fusion entre les données de réflectivité 5 min des radars locaux et les données d'environ 4000 pluviomètres avec un pas de temps quotidien et 1200 pluviomètres avec un pas de temps horaire. Plus précisément, la chaîne de traitement consiste au calcul des cumuls quotidiens des réflectivités radars qui sont corrigés des erreurs de mesure radar et complétés par les données des pluviomètres. Une désagrégation temporelle vers les données horaires est ensuite réalisée. Ce jeu de données est disponible à partir de 1997 (date de début de disponibilité des données radar pour le réseau français ARAMIS, Application Radar à la Météorologie Infra-Synoptique) et mis à jour chaque année.

6.1.5 Produit spatialisé SAFRAN

SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige, Vidal et al., 2010) est un système de réanalyse climatique fournissant des données météorologiques historiques à haute résolution sur la France. Ce produit utilise des observations météorologiques terrestres et des modèles climatiques pour reconstituer les conditions météorologiques passées. Les données SAFRAN sont largement utilisées pour des études climatiques, la recherche en hydrologie, et la planification des activités agricoles et énergétiques.

6.1.6 Produit spatialisé ANASTASIA

ANASTASIA (Analyse Spatiale des Températures de Surface avec Initialisation AURELHY, Besson et al., 2019) est un produit spatialisé de températures minimales et maximales quotidiennes à 1 km de résolution horizontale sur la France métropolitaine couvrant la période 1947-2016. Ce jeu de données utilise une méthode de régression-krigeage avec deux sources d'information : les observations *in situ* des températures minimales et maximales journalières enregistrées par les stations météorologiques du réseau opérationnel de Météo-France et un champ climatologique mensuel des températures minimales et maximales journalières défini sur la période 1982-2010. Cette méthode inclut un modèle numérique de terrain permettant la prise en compte de l'influence de la topographie sur la variabilité spatiale de la température.

6.1.7 Analyse SIM2

SIM2 est la mise à jour de la chaîne SIM (SAFRAN-ISBA-MODCOU) qui permet le suivi hydro-climatologique sur la France. Cette chaîne exécute en cascade les modèles SAFRAN pour la météorologie, SURFEX pour le sol et MODCOU pour le suivi des cours d'eau.

Dans cette étude, ce sont les sorties de modélisation SURFEX qui ont été utilisées. SURFEX est la plateforme de modélisation des surfaces naturelles. Elle active notamment l'option ISBA-DF (Decharme et al., 2011). Cette version du modèle de végétation ISBA (Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère) discrétise le sol en plusieurs couches et permet de modéliser de façon plus physique les transferts verticaux de chaleur et d'eau dans la colonne de sol.

6.1.8 Projections climatiques CNRM-AROME

Les simulations climatiques CNRM-AROME utilisées dans le cadre de cette étude ont été réalisées dans le cadre du projet européen EUCP (EUropean Climate Prediction system). Elles sont obtenues à partir d'une modélisation en cascade intégrant trois modèles climatiques imbriqués de manière successive (Figure 10). En configuration de scénario climatique, le modèle global de circulation générale CNRM-CM5, avec une résolution horizontale de 1.4°, force aux bords le modèle régional de climat CNRM-ALADIN, avec une résolution horizontale de 12,5 km. CNRM-ALADIN force à son tour le modèle CNRM-AROME, qui atteint une résolution horizontale plus fine de 2,5 km.

Dans le cadre de cette étude, ce sont les simulations sur le domaine nord-ouest (NW-3, pour northwest en anglais) qui sont exploitées. Ce domaine couvre entièrement la France métropolitaine, ainsi qu'une grande partie du Royaume-Uni, de l'Allemagne, de la Suisse, du Danemark et de l'Espagne (cf. Figure 10).

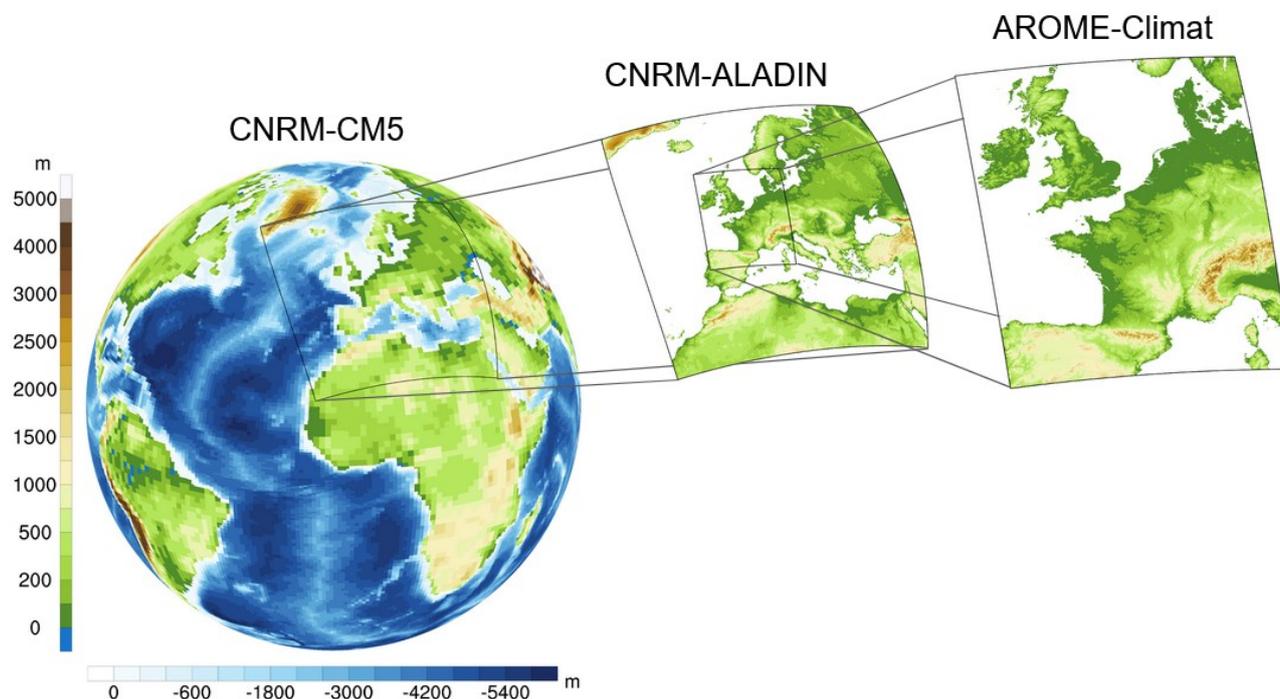


Figure 10: Descente d'échelle dynamique à trois modèles imbriqués incluant CNRM-CM5, CNRM-ALADIN, et CNRM-AROME.

Les projections climatiques fournies par CNRM-AROME couvrent 3 périodes continues : la période historique 1986-2005 (20 ans), la période future 2041-2050 (10 ans) et la période future 2080-2099 (20 ans).

Ces projections du climat suivent le scénario d'émission future de gaz à effet de serre RCP8.5 (Representative Concentration Pathways). Ce scénario a été utilisé dans le cadre du cinquième rapport d'évaluation du GIEC en 2013. Il correspond à un forçage radiatif supérieur à $8,5 \text{ W.m}^{-2}$ en 2100. Il est considéré comme le scénario le plus pessimiste des RCP puisqu'il impliquerait des températures moyennes globales durant la période 2081-2100 supérieures d'environ 4°C par rapport à la période 1986-2005.

6.1.9 Ensemble de projections EXPLORE-2

Le projet EXPLORE2 est un programme de recherche visant à actualiser les connaissances sur l'impact du changement climatique sur l'hydrologie en France. Ce projet a permis de créer des projections hydro-climatiques détaillées jusqu'en 2100, en se basant sur divers modèles climatiques et hydrologiques. Pour alimenter ces projections hydrologiques, le volet climat d'EXPLORE2 a produit des données atmosphériques à haute résolution, corrigées de leurs biais, couvrant la France métropolitaine de 1976 à 2100. L'ensemble des données EXPLORE2 (Marson et al., 2024) comprend 17 simulations qui ont été sélectionnées pour leur représentativité des changements attendus sur la France en termes de température et de précipitations par rapport à des ensembles de simulations climatiques plus larges (EURO-CORDEX, CMIP5 et CMIP6).

Le jeu de données EXPLORE2, en considérant uniquement le scénario RCP8.5, qui est le seul à couvrir tous les niveaux de réchauffement requis par TRACC, a été utilisé pour produire les projections climatiques de référence pour la TRACC. Pour chacune des 17 simulations, la température annuelle moyenne a été calculée. Une année charnière a été identifiée lorsque la température annuelle moyenne a dépassé un niveau de réchauffement global donné. Les projections climatiques par niveau de réchauffement global ont ensuite été obtenues en sélectionnant la période de 20 ans autour de cette année dite de pivot (Tableau 5).

Tableau 5: Périodes autour de l'année pivot considérées pour chaque simulation EXPLORE2 suivant le scénario RCP8.5 selon les niveaux de réchauffement global 1.5°C , 2°C et 3°C .

GCM	RCM	GWL 1.5°C	GWL 2°C	GWL 3°C
CNRM-CM5	ALADIN63	2031-2050	2046-2065	2070-2089
CNRM-CM5	HadREM3-GA7	2025-2044	2040-2059	2064-2083
EC-EARTH	HadREM3-GA7	2017-2036	2033-2052	2057-2076
EC-EARTH	RACMO22E	2026-2045	2041-2060	2066-2085
EC-EARTH	SMHI-RCA4	2022-2041	2037-2056	2062-2081
HadGEM2-ES	ALADIN63	2014-2033	2031-2050	2056-2075
HadGEM2-ES	CCLM4-8-17	2013-2032	2027-2046	2052-2071
HadGEM2-ES	HadREM3-GA7	2010-2039	2025-2044	2049-2068
HadGEM2-ES	RegCM4-6	2016-2035	2031-2050	2055-2074
IPSL-CM5A-MR	HIRHAM5	2025-2044	2039-2058	2063-2082
IPSL-CM5A-MR	SMHI-RCA4	2023-2042	2038-2057	2060-2079
MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17	2037-2056	2052-2071	2079-2098
MPI-ESM-LR	REMO2009	2038-2057	2054-2073	2081-2100
MPI-ESM-LR	RegCM4-6	2034-2053	2049-2068	2076-2095

NorESM1-M	HIRHAM5	2023-2042	2039-2058	2062-2084
NorESM1-M	REMO2015	2026-2045	2043-2062	2068-2087
NorESM1-M	WRF381P	2036-2055	2053-2072	2078-2097

6.2 Annexe B – Variables simulées par CNRM-AROME sur les périodes historiques et futures

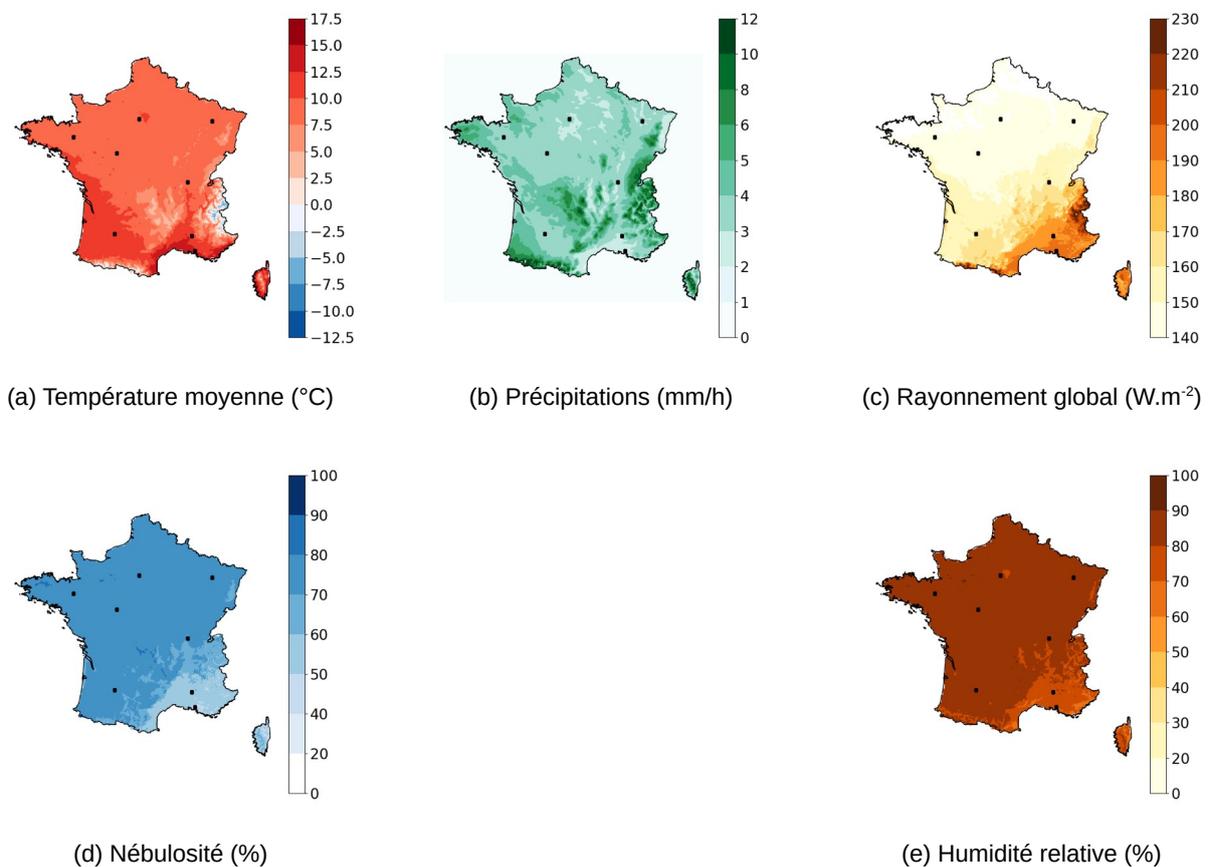


Figure 11: Spatialisation à l'échelle de la France métropolitaine de plusieurs variables météorologiques simulées par CNRM-AROME sur la période historique 1986-2005. Les données présentées ici sont non corrigées.

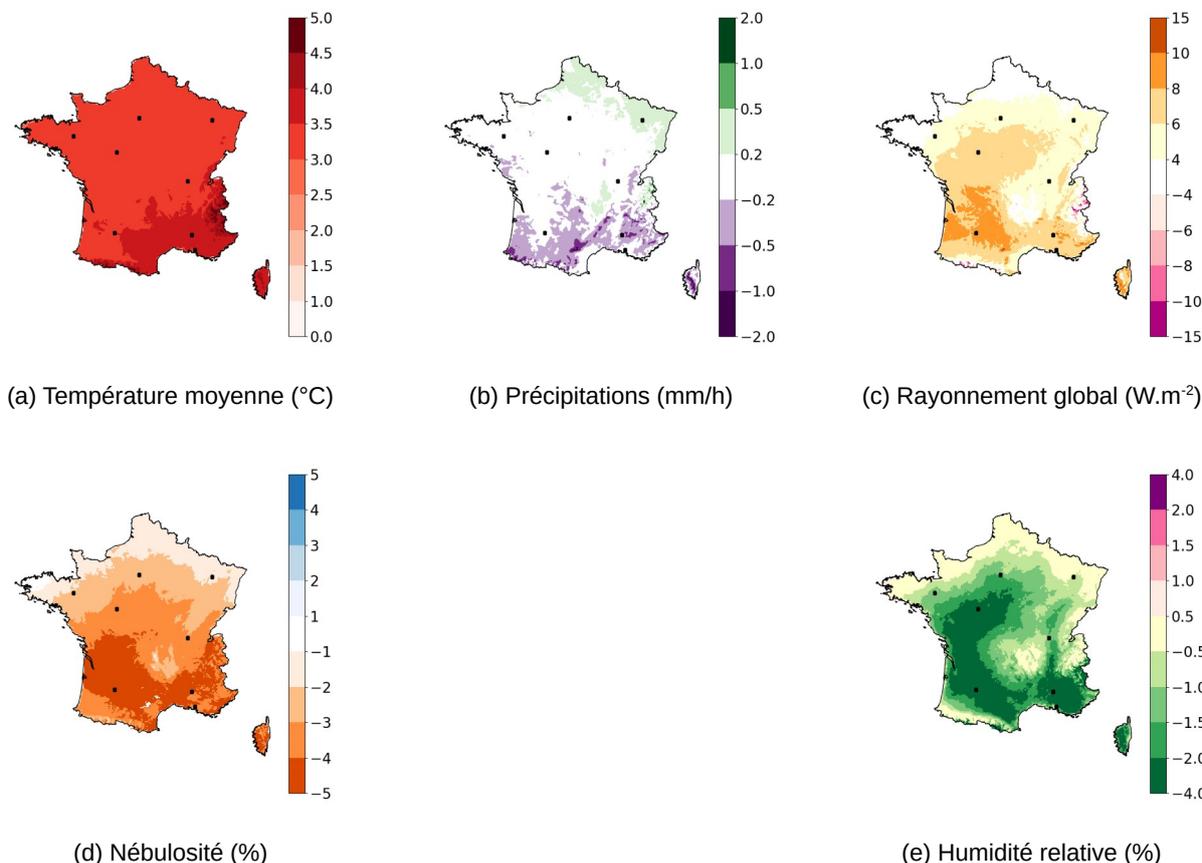


Figure 12: Spatialisation à l'échelle de la France métropolitaine des évolutions entre la période historique et la période 2080-2099 de plusieurs variables météorologiques simulées par CNRM-AROME. Les données présentées ici sont non corrigées.

6.3 Annexe C – Années CNRM-AROME retenues pour la constitution des années météorologiques types

Tableau 6: Composition de l'année météorologique typique pour les niveaux de réchauffement France à +2°C, 3°C et 4°C aux différentes stations de référence.

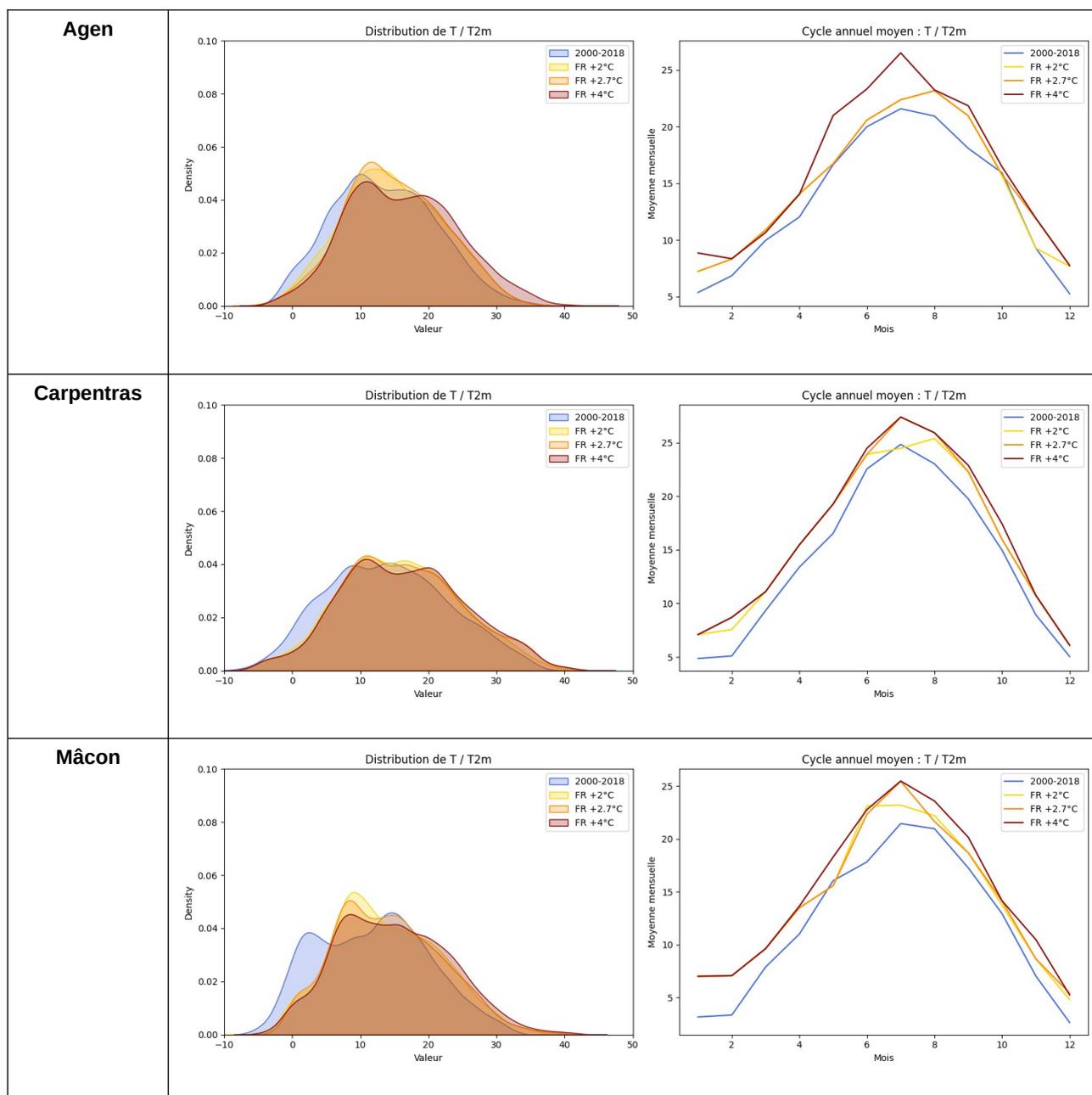
Mois	Années sélectionnées pour la TRACC +2°C	Années sélectionnées pour la TRACC +2.7°C	Années sélectionnées pour la TRACC +4°C
Janvier	Agen : 2083 Carpentras : 2047 Mâcon : 2094 Marignane : 2047 Nancy : 2081 Rennes : 2048	Agen : 2083 Carpentras : 2047 Mâcon : 2094 Marignane : 2047 Nancy : 2081 Rennes : 2046	Agen : 2094 Carpentras : 2047 Mâcon : 2094 Marignane : 2047 Nancy : 2098 Rennes : 2048

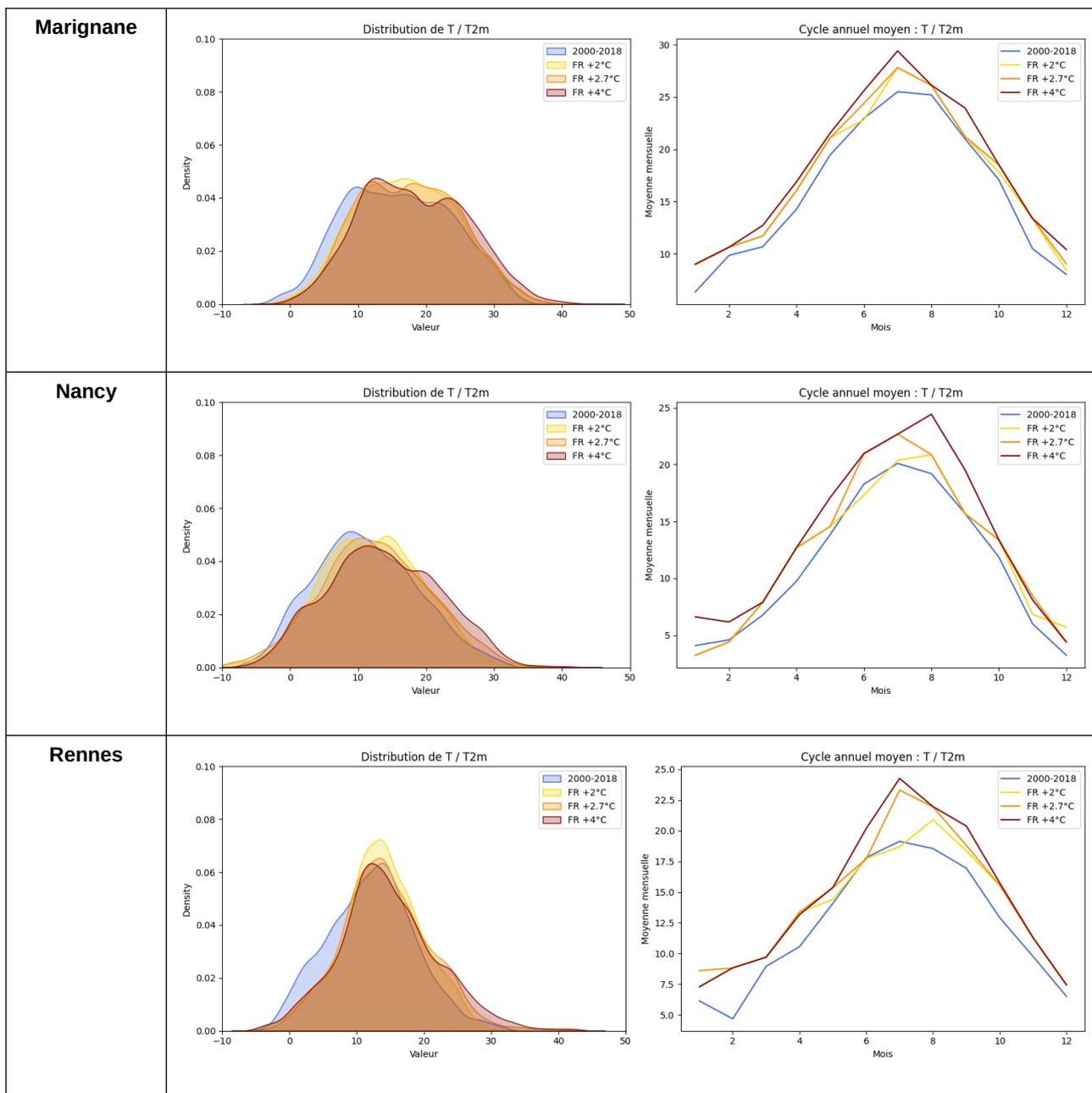
	Tours : 2083 Trappes : 2084	Tours : 2043 Trappes : 2084	Tours : 2083 Trappes : 2084
Février	Agen : 2050 Carpentras : 2050 Mâcon : 2047 Marignane : 2047 Nancy : 2042 Rennes : 2094 Tours : 2044 Trappes :	Agen : 2050 Carpentras : 2081 Mâcon : 2047 Marignane : 2047 Nancy : 2042 Rennes : 2094 Tours : 2084 Trappes : 2048	Agen : 2047 Carpentras : 2081 Mâcon : 2047 Marignane : 2047 Nancy : 2086 Rennes : 2094 Tours : 2095 Trappes : 2089
Mars	Agen : 2081 Carpentras : 2047 Mâcon : 2047 Marignane : 2041 Nancy : 2096 Rennes : 2047 Tours : 2047 Trappes : 2048	Agen : 2081 Carpentras : 2047 Mâcon : 2047 Marignane : 2041 Nancy : 2096 Rennes : 2047 Tours : 2047 Trappes : 2047	Agen : 2044 Carpentras : 2047 Mâcon : 2047 Marignane : 2082 Nancy : 2096 Rennes : 2047 Tours : 2047 Trappes : 2047
Avril	Agen : 2082 Carpentras : 2089 Mâcon : 2087 Marignane : 2097 Nancy : 2087 Rennes : 2087 Tours : 2097 Trappes : 2047	Agen : 2082 Carpentras : 2089 Mâcon : 2087 Marignane : 2097 Nancy : 2087 Rennes : 2087 Tours : 2097 Trappes : 2045	Agen : 2082 Carpentras : 2089 Mâcon : 2097 Marignane : 2094 Nancy : 2087 Rennes : 2097 Tours : 2097 Trappes : 2081
Mai	Agen : 2047 Carpentras : 2046 Mâcon : 2045 Marignane : 2097 Nancy : 2047 Rennes : 2048 Tours : 2046 Trappes : 2045	Agen : 2047 Carpentras : 2046 Mâcon : 2045 Marignane : 2097 Nancy : 2047 Rennes : 2046 Tours : 2046 Trappes : 2089	Agen : 2093 Carpentras : 2046 Mâcon : 2096 Marignane : 2092 Nancy : 2088 Rennes : 2042 Tours : 2094 Trappes : 2093
Juin	Agen : 2041 Carpentras : 2049 Mâcon : 2081 Marignane : 2041 Nancy : 2043 Rennes : 2041 Tours : 2081 Trappes : 2085	Agen : 2041 Carpentras : 2049 Mâcon : 2084 Marignane : 2049 Nancy : 2086 Rennes : 2041 Tours : 2081 Trappes : 2047	Agen : 2081 Carpentras : 2086 Mâcon : 2089 Marignane : 2091 Nancy : 2086 Rennes : 2089 Tours : 2081 Trappes : 2050
Juillet	Agen : 2044 Carpentras : 2050 Mâcon : 2043 Marignane : 2087 Nancy : 2044 Rennes : 2047 Tours : 2050 Trappes : 2045	Agen : 2044 Carpentras : 2087 Mâcon : 2086 Marignane : 2087 Nancy : 2093 Rennes : 2092 Tours : 2050 Trappes : 2043	Agen : 2098 Carpentras : 2087 Mâcon : 2086 Marignane : 2097 Nancy : 2093 Rennes : 2086 Tours : 2089 Trappes : 2096
Août	Agen : 2050 Carpentras : 2085 Mâcon : 2046	Agen : 2050 Carpentras : 2082 Mâcon : 2084	Agen : 2050 Carpentras : 2082 Mâcon : 2088

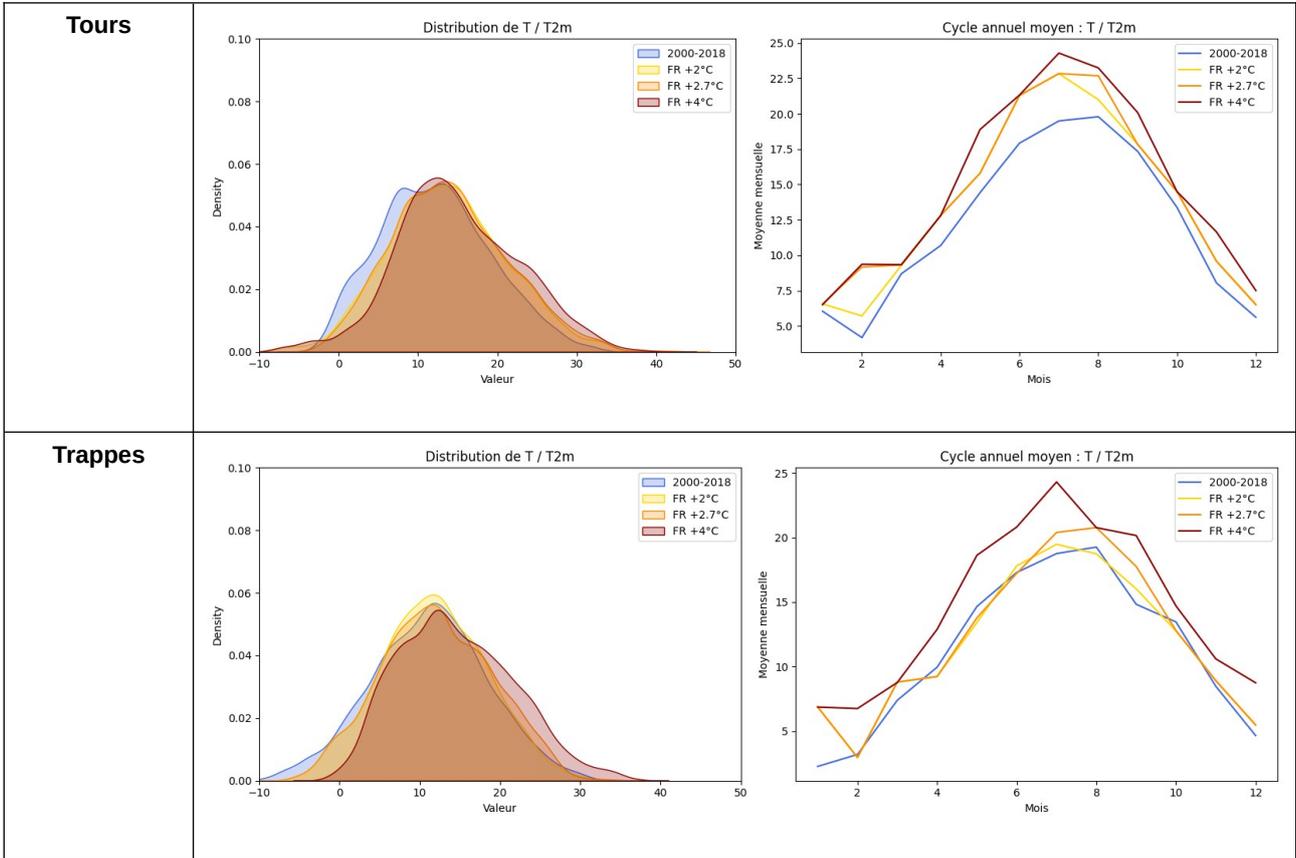
	Marignane : 2085 Nancy : 2084 Rennes : 2087 Tours : 2084 Trappes : 2048	Marignane : 2085 Nancy : 2084 Rennes : 2086 Tours : 2086 Trappes : 2087	Marignane : 2085 Nancy : 2095 Rennes : 2086 Tours : 2085 Trappes : 2087
Septembre	Agen : 2080 Carpentras : 2094 Mâcon : 2049 Marignane : 2048 Nancy : 2041 Rennes : 2048 Tours : 2048 Trappes : 2084	Agen : 2080 Carpentras : 2094 Mâcon : 2049 Marignane : 2048 Nancy : 2041 Rennes : 2087 Tours : 2048 Trappes : 2080	Agen : 2083 Carpentras : 2096 Mâcon : 2083 Marignane : 2096 Nancy : 2083 Rennes : 2093 Tours : 2093 Trappes : 2083
Octobre	Agen : 2047 Carpentras : 2046 Mâcon : 2049 Marignane : 2041 Nancy : 2047 Rennes : 2086 Tours : 2082 Trappes : 2049	Agen : 2082 Carpentras : 2046 Mâcon : 2045 Marignane : 2050 Nancy : 2047 Rennes : 2086 Tours : 2082 Trappes : 2049	Agen : 2099 Carpentras : 2087 Mâcon : 2045 Marignane : 2050 Nancy : 2047 Rennes : 2082 Tours : 2082 Trappes : 2085
Novembre	Agen : 2042 Carpentras : 2096 Mâcon : 2083 Marignane : 2046 Nancy : 2042 Rennes : 2082 Tours : 2082 Trappes : 2096	Agen : 2092 Carpentras : 2096 Mâcon : 2096 Marignane : 2046 Nancy : 2045 Rennes : 2082 Tours : 2096 Trappes : 2096	Agen : 2092 Carpentras : 2096 Mâcon : 2081 Marignane : 2046 Nancy : 2048 Rennes : 2082 Tours : 2084 Trappes : 2092
Décembre	Agen : 2092 Carpentras : 2090 Mâcon : 2046 Marignane : 2085 Nancy : 2089 Rennes : 2043 Tours : 2098 Trappes : 2094	Agen : 2092 Carpentras : 2090 Mâcon : 2080 Marignane : 2096 Nancy : 2046 Rennes : 2043 Tours : 2098 Trappes : 2094	Agen : 2092 Carpentras : 2090 Mâcon : 2048 Marignane : 2047 Nancy : 2046 Rennes : 2043 Tours : 2082 Trappes : 2047

6.4 Annexe D – Evolution des températures de l'air à 2 mètres dans les fichiers climatiques de la RE2020

Tableau 7: Distribution (à gauche) et cycle annuel moyen (à droite) de la température de l'air à 2 mètres dans les fichiers climatiques de référence pour la période climatique 2000-2018 (en bleu) et dans les fichiers climatiques prospectifs pour les niveaux de réchauffement France +2°C (en jaune), France +2,7°C (en orange) et France 4°C (en rouge).







6.5 Annexe E – Vagues de chaleur pour Trappes

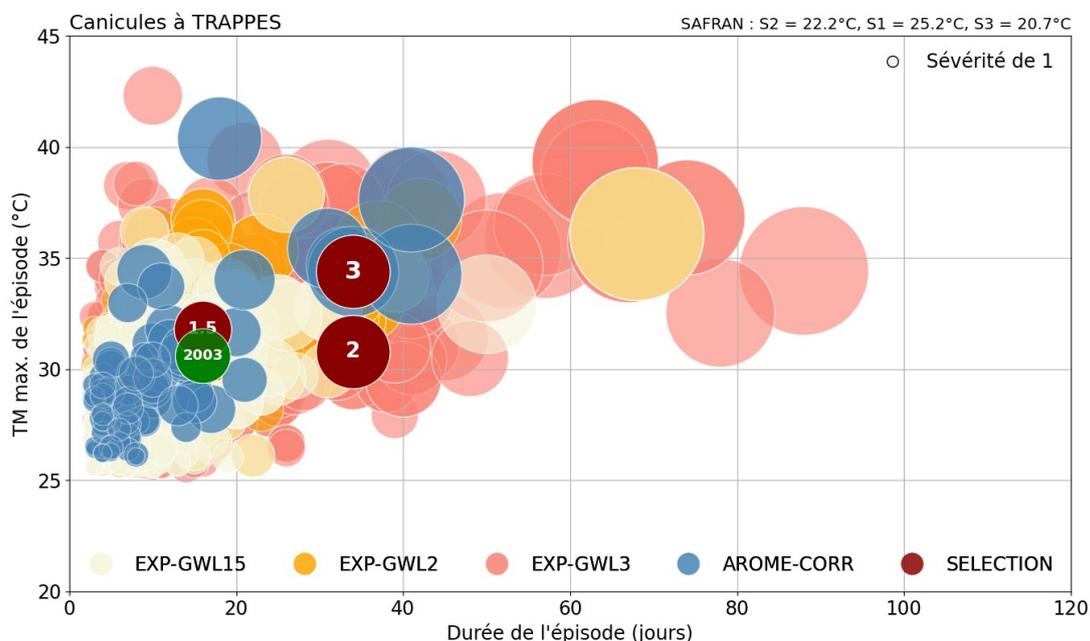


Figure 13: Vagues de chaleur simulées par le jeu de données EXPLORE2 (en jaune, orange et rouge pour les niveaux de réchauffement de +2°C, +2,7°C et +4°C respectivement) et par CNRM-AROME (en bleu). Les vagues de chaleur TRACC retenues sont indiquées en bordeaux. La vague de chaleur de 2003, en vert, est présentée à titre indicatif.

6.6 Annexe F – Caractéristiques des vagues de chaleur retenues pour la constitution des années météorologiques types

Tableau 8: Sévérité normalisée (°C/jour) des vagues de chaleur retenues pour la constitution des années météorologiques types aux niveaux de réchauffement de +2°C, +2,7°C et +4°C.

Mois	Années sélectionnées pour la TRACC +2°C	Années sélectionnées pour la TRACC +2.7°C	Années sélectionnées pour la TRACC +4°C
Sévérité (°C/jour)	Agen : 21,715 Carpentras : 61,367 Mâcon : 32,351 Marignane : 48,962 Nancy : 32,419 Rennes : 28,324 Tours : 30,97 Trappes : 26,007	Agen : 34,529 Carpentras : 88,491 Mâcon : 45,799 Marignane : 66,309 Nancy : 45,608 Rennes : 37,923 Tours : 38,563 Trappes : 43,026	Agen : 58,006 Carpentras : 130,413 Mâcon : 68,796 Marignane : 153,361 Nancy : 58,774 Rennes : 73,442 Tours : 72,436 Trappes : 66,006

Bibliographie

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper*.
- Kim, K. B., Kwon, H.-H., & D. Han, D. (2015). Precipitation ensembles conforming to natural variations derived from Regional Climate Model using a new bias correction scheme. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, **12**, 10261–10287. doi:10.5194/hessd-12-10261-2015
- Tardieu, J., & Leroy, M. (2003). Radome, le réseau temps réel d'observation au sol de Météo-France. *La Météorologie*.
- Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M. & Soubeyroux, J.-M. (2010). A 60-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the SAFRAN system. *Int. J. Climatol*.
- Tabary, P., Dupuy, P., L'Henaff, G., Guegen, C., Moulin, L., Laurantin, O., Merlier, C., & Soubeyroux, J.-M. (2012). 10-year (1997-2006) reanalysis of quantitative precipitation estimation over France: methodology and first results. *IAHS-AISH publication*, 255-260.
- Ouzeau, G., Soubeyroux, J.-M., Schneider, M., Vautard, R., & Planton, S. (2016). Heat waves analysis over France in present and future climate : applications of a new method on the EURO-CORDEX ensemble. *Climate Services*.
- Besson, F., Dubuisson, B., Etchevers, P., Gibelin, A.-L., Lassegues, P., Schneider, M., & Vincendon, B. (2019). Climate monitoring and heat and cold waves detection over France using a new spatialization of daily temperature extremes from 1947 to present. *Advances in Science and Research*.
- Marson, P., Corre, L., Soubeyroux, J.-M., Sauquet, E., Robin, Y., Vrac, C. & Dubois, C. (2024). Rapport de synthèse sur les projections climatiques régionalisées EXPLORE2.

FIN DE DOCUMENT
