Cahier climatique de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon

Syndicat mixte des gorges du Gardon

Life Biospher' Adapt

Cofinancé par l'Union européenne

unesco

Réserve de biosphère des gorges du Gardon

SYNDICAT MIXTE DES GORGES DU GARDON

F. Renard, C. Boulmier, A. Farge – 2025

CLIMATE PRAXIS

Liste des acronymes

BDIFF : Base de données sur les incendies de forêts en France

BSk : climat semi-aride

CNRM : Centre National de Recherches Météorologiques

Cfa : climat tempéré chaud sans saison sèche (fully humid)

Csa : climat tempéré à été chaud et sec (climat méditerranéen – summer dry)

Csb : climat méditerranéen à été tempéré

DRIAS : Donner accès aux scénarios climatiques régionalisés français pour l'impact et l'adaptation de nos sociétés et environnements

ECMWF : Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme

ERA5 : cinquième génération de réanalyses de l'ECMWF du climat global. Fournit des estimations horaires d'un grand nombre de variables climatiques atmosphériques, terrestres et océaniques

EURO-CORDEX : Coordinated Downscaling Experiment - European Domain

GES : Gaz à Effet de Serre

GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

IPSL : Institut Pierre-Simon-Laplace

LCZ : Local Climate Zones (zones climatiques locales)

LIFE : Programme de financement de l'Union Européenne

LST : Land Surface Temperature (température de surface)

NASA : National Aeronautics and Space Administration

NDBaI : Normalized Difference Bareness Index (indice spectral de sols nus)

NDMI : Normalized Difference Moisture Index (indice spectral d'humidité des sols)

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index (indice spectral de végétation)

NORIF : Niveau Opérationnel du Risque Incendie de Forêt (indice synthétique de danger climatique de feux de forêt)

OFB : Office français de la biodiversité

OMM : Organisation Météorologique Mondiale

ONDE : Observatoire National Des Étiages

RCP : Representative Concentration Pathways

UI : Urban Index (indice spectral de l'urbain)

UNESCO : Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture

UTCI : Universal Thermal Climate Index (indice de confort thermique)

Sommaire

CAHIER CLIMATIQUE DE LA RESERVE DE BIOSPHERE DES GORGES DU GARDON ... 1

1. INTRODUCTION ET CADRAGE : UN RECIT CLIMATIQUE AU SERVICE D'UN TERRITOIRE VIVANT 9

2. CONTEXTE CLIMATIQUE MULTISCALAIRE : DU CHANGEMENT GLOBAL AUX SPECIFICITES TERRITORIALES 11

2.1. Le changement climatique à l'échelle mondiale..... 11

2.2. L'Europe et le bassin méditerranéen : un "hotspot" climatique 11

3. ANALYSE DES VARIABLES CLIMATIQUES ET DES INDICATEURS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE TERRITOIRE DE LA RESERVE DE BIOSPHERE.....15

3.1. Principes généraux et choix méthodologiques..... 15

3.2 Analyse historique des variables climatiques (1970–2024) 16

3.3 Analyse prospective des variables climatiques à partir des projections DRIAS..... 48

4 – ÉVOLUTION DU CONFORT THERMIQUE (INDICE UTCI) 93

4.1 Analyse du confort thermique (UTCI) estival (1970 – 2025) 94

4.2 – Analyse du confort thermique hivernal (UTCI) : une évolution plus modérée et contrastée..... 96

4.3 Analyse du confort thermique par classes UTCI 98

5. ÉVOLUTION DES TYPES DE CLIMAT : LECTURE STRUCTURELLE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE (CLASSIFICATION DE KÖPPEN-GEIGER) 104

5.1 La classification de Köppen-Geiger : un outil simple pour comprendre les changements de climat..... 104

5.2. Méthodologie et données mobilisées (DRIAS, RCP 4.5 / RCP 8.5) 105

5.3 - Evolution historique des types de climat (1950 – 2025) 110

5.4 – Évolution prospective des types de climat selon les scénarios RCP 4.5 et 6.5 (2025–2100) 112

5.5 – Évolution des types de climat selon le scénario RCP 8.5 : vers un basculement climatique majeur 114

5.6 – Synthèse : trajectoires climatiques contrastées et basculements de régime 117

6. LES ZONES CLIMATIQUES LOCALES (LCZ) DE LA RESERVE A L'EPREUVE DES TEMPERATURES DE SURFACE (LST) 119

6.1 – Températures de surface et structures urbaines : du climat régional au climat local vécu 119

6.2 – Données et méthodologie : caractérisation des températures de surface et croisement avec les LCZ .. 120

6.3 – Gradients thermiques et disparités spatiales des températures de surface 122

6.4 – Températures de surfaces (LST) vs zones climatiques locales (LCZ) : approche croisée 131

6.4 – Croisement des températures de surface (LST) et des zones climatiques locales (LCZ) en été 135

6.5 Analyse des écarts à la moyenne des températures de surface estivales en 2024 par LCZ 137

6.6 – Croisement des températures de surface (LST) et des zones climatiques locales (LCZ) en hiver 139

6.7 – Mise en perspective : des structures thermiques robustes aux enjeux d'adaptation territoriale 140

6.8 - Conclusion du chapitre 6 : l'apport du regard croisé entre LST et LCZ 141

7 – ÉVOLUTION DU RISQUE DE FEUX DE FORET A L'ECHELLE DE LA RESERVE DE BIOSPHERE 143

7.1 – Données et méthodologie : analyse du danger de feux de forêt à partir de la base BDIFF et de la chaîne DRIAS–NORIF 143

7.2 – Le niveau actuel du risque de feu de forêt sur la réserve 146

7.3 Risque à moyenne échéance (2030) et à plus long terme (2050) sur le territoire 151

7.4 – Synthèse opérationnelle : messages clés pour les gestionnaires 153

7.5 - **Conclusion du chapitre 7 – Évolution du risque de feu de forêt sur le territoire 155**

8. ANALYSE DE L'EVOLUTION HISTORIQUE DU NIVEAU DES NAPPES ET DES DEBITS : ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX ET TERRITORIAUX 157

8.1 Données et méthodologie – Analyse des niveaux de nappes souterraines à l'aide de Météeau nappes. 158

8.2 Fonctionnement saisonnier et variabilité interannuelle des niveaux de nappes 159

8.3 - Années contrastées et situations hydrologiques extrêmes : enseignements des années 2023 et 2024 . 162

8.4 Analyse des étiages de quatre cours d'eau de la Réserve de biosphère 164

8.5 Évolution projetée des débits du Gard à Sanilhac-Sagries (La Baume) 170

8.6 Mise en perspective : niveaux de nappes et dynamiques climatiques et environnementales du territoire 179

8.7 – Mise en perspective : nappes, étiages et dynamiques climatiques du territoire 181

8.8 Mise en perspective : fonctionnement karstique et implications hydrologiques 184

8.9 – Synthèse du chapitre 8 : évolution des niveaux de nappes et débit pour une reconfiguration des enjeux territoriaux 185

9 – CE QUI VARIE SANS SE TRANSFORMER : LECTURE CLIMATIQUE DES INDICES SPECTRAUX DE SURFACE (NDVI, NDMI, UI, NDBAI) 188

9.1 – Données et méthodologie 188

9.2 – Analyse de l'évolution du NDVI sur la période 2010–2025 190

9.3 – Évolution du NDMI : variabilité hydrique de la végétation et sensibilité climatique 193

9.4 – Évolution spatio-temporelle de l'indice d'urbanisation (UI) 197

9.5 – Analyse spatio-temporelle du NDBaI 201

9.6 Exploitation des outils d'analyse spatio-temporelle d'ArcGIS et limites observées 204

9.7 - Discussion de synthèse – Apports croisés des indices spectraux 205

CONCLUSION GENERALE : UN TERRITOIRE MEDITERRANEEN CONFRONTE A L'INTENSIFICATION DES CONTRAINTES CLIMATIQUES 207

10.1 - Un réchauffement avéré, dissymétrique et fonctionnellement structurant 207

10.2 - Des trajectoires climatiques contrastées selon les scénarios 207

10.3 - Températures de surface et structures territoriales : un climat local différencié 208

10.4 - Ressources en eau et risques de feux de forêt : vers une gestion sous contrainte accrue 208

10.5 - Indices spectraux : stabilité structurelle, variabilité fonctionnelle 208

10.6 - Enseignements transversaux et enjeux pour l'action 209

RÉFÉRENCES 211

ANNEXE 1 – TABLEAU SYNTHETIQUE DES SOURCES DE DONNEES 213

ANNEXE 2 – PRINCIPAUX MODELES CLIMATIQUES REGIONAUX (RCM) DISPONIBLES VIA DRIAS 214

ANNEXE 3 – DETERMINATION SYNTHETIQUE DES TYPES DE CLIMAT DE KÖPPEN 216

TABLES DES FIGURES 221

TABLES DES TABLEAUX 226

TABLES DES MATIERES.....227

1. Introduction et cadrage : un récit climatique au service d'un territoire vivant

Les gorges du Gardon constituent un territoire emblématique du sud de la France, à la fois par la richesse de leurs patrimoines naturels, paysagers et culturels, et par la diversité des usages et des activités humaines qui s'y déploient. Reconnu comme site classé dès 1982, puis désigné Réserve de biosphère par l'UNESCO en 2015, ce territoire s'inscrit pleinement dans une ambition de conciliation entre préservation des milieux et développement humain durable. À ce titre, il constitue un véritable laboratoire territorial, où s'expérimentent des formes renouvelées de gestion, d'aménagement et de mobilisation des acteurs face aux transitions en cours.

Le changement climatique vient aujourd'hui questionner en profondeur cet équilibre fragile. Élévation des températures, intensification des vagues de chaleur, modification des régimes hydrologiques, stress accru sur les écosystèmes et les activités humaines : autant de dynamiques déjà perceptibles sur le territoire, et appelées à s'accentuer dans les décennies à venir. Dans ce contexte, comprendre l'évolution du climat local, ses spécificités et ses impacts constitue une étape indispensable pour anticiper les vulnérabilités futures et construire des trajectoires d'adaptation partagées.

Un premier travail de mise en récit de ces évolutions a été conduit à l'échelle de la Réserve naturelle régionale (RNR) des gorges du Gardon, offrant un socle de connaissances et une approche pédagogique reconnue. Le présent cahier climatique s'inscrit dans la continuité de ce travail, tout en changeant d'échelle et de perspective. Il ne s'agit pas de reproduire le récit existant, mais de l'enrichir et de l'approfondir à l'échelle de la Réserve de biosphère, territoire plus vaste, habité, et marqué par une grande diversité de situations écologiques, sociales et économiques.

Ce changement d'échelle implique également un changement de posture. Le climat n'est plus seulement analysé comme un facteur de pression sur des milieux naturels protégés, mais comme une dynamique structurante du territoire de vie, influençant les paysages, les usages, la santé, l'agriculture, le tourisme, l'aménagement et les conditions de bien-être des populations. Le cahier climatique proposé ici vise ainsi à produire une lecture territorialisée, prospective et intégrée des évolutions climatiques, en croisant données scientifiques, analyses spatialisées et connaissances issues du terrain.

Ce travail s'inscrit pleinement dans le cadre du projet européen LIFE Climat Biospher'Adapt (Project 101157613), lancé en décembre 2024, qui ambitionne d'accompagner les Réserves de biosphère dans la construction de stratégies d'adaptation collective au changement climatique. Développé dans la continuité des démarches LIFE Natur'Adapt et TACCT, ce projet reconnaît les Réserves de biosphère comme des territoires pilotes, capables d'articuler enjeux climatiques, biodiversité, activités humaines et participation citoyenne.

Au sein de ce projet, le présent cahier climatique constitue une brique fondatrice. Intégré à la phase d'analyse prospective, il a vocation à fournir une base de connaissances partagée, objectivée et appropriable, sur laquelle pourra s'appuyer la construction d'un diagnostic de vulnérabilité puis, à terme, d'un plan d'adaptation co-élaboré avec les acteurs du territoire. Il

s'adresse en premier lieu aux techniciens et partenaires institutionnels, tout en préparant des supports adaptés aux décideurs locaux et au grand public.

Enfin, fidèle à l'esprit des Réserves de biosphère, ce cahier climatique ne se limite pas à un exercice d'expertise. Il se veut également un **outil de dialogue**, ouvert aux perceptions, aux expériences et aux savoirs locaux. En donnant à voir les évolutions climatiques passées, présentes et futures, et en mettant en lumière leurs implications concrètes pour le territoire des gorges du Gardon, il ambitionne de nourrir une **prise de conscience collective** et de contribuer à l'émergence de réponses d'adaptation justes, réalistes et partagées.

2. Contexte climatique multiscalaire : du changement global aux spécificités territoriales

Le climat observé aujourd'hui à l'échelle locale résulte de dynamiques qui s'expriment à plusieurs niveaux d'organisation spatiale et temporelle. Comprendre les évolutions en cours sur le territoire de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon nécessite ainsi de replacer le diagnostic climatique local dans un **contexte multiscalaire**, allant du changement climatique global aux particularités régionales et territoriales.

2.1. Le changement climatique à l'échelle mondiale

À l'échelle planétaire, les observations scientifiques convergent vers un constat désormais largement établi : le système climatique se réchauffe à un rythme sans précédent à l'échelle des temps historiques. Le sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC, 2023) montre que la température moyenne globale a déjà augmenté d'environ +1,1 °C par rapport à la période préindustrielle, avec une accélération marquée depuis les années 1980.

Ce réchauffement global s'accompagne d'une **augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes**, notamment les vagues de chaleur, les sécheresses, les pluies intenses et certains phénomènes de submersion. Ces évolutions ne se traduisent pas de manière uniforme sur l'ensemble du globe : elles varient fortement selon les régions, les saisons et les contextes géographiques, accentuant les contrastes climatiques existants.

2.2. L'Europe et le bassin méditerranéen : un "hotspot" climatique

À l'échelle européenne, le réchauffement est plus rapide que la moyenne mondiale. Le bassin méditerranéen est identifié par la communauté scientifique comme l'un des principaux **"hotspots" du changement climatique**, c'est-à-dire une région particulièrement sensible aux évolutions en cours (Ulbrich et al., 2006).

Les travaux de modélisation régionale montrent que cette zone est caractérisée par une **combinaison critique** de phénomènes :

- une augmentation marquée des températures moyennes et extrêmes,
- une diminution tendancielle des précipitations annuelles, notamment au printemps et en été,
- une accentuation des périodes de sécheresse,
- une intensification des pluies extrêmes à l'automne.

Cette évolution conduit à une **aridification progressive du climat méditerranéen**, avec des conséquences directes sur les ressources en eau, les écosystèmes, les activités agricoles et forestières, ainsi que sur les conditions de confort thermique des populations (UN Environment Programme, 2025).

2.3. Le sud de la France et la région gardoise

Dans le sud de la France, et plus particulièrement en Occitanie, ces tendances générales se traduisent déjà par des signaux climatiques clairement identifiables (Strohmenger et al., 2024). Les observations récentes mettent en évidence :

- une hausse des températures moyennes annuelles,
- une augmentation du nombre de journées très chaudes (températures supérieures à 30 °C et 35 °C),
- des vagues de chaleur plus longues, plus fréquentes et plus précoces,
- une variabilité accrue des précipitations, avec des alternances marquées entre périodes sèches prolongées et épisodes de pluies intenses.

Le département du Gard est particulièrement concerné par ces évolutions, du fait de sa position géographique à l'interface entre influences méditerranéennes, cévenoles et continentales. Cette situation renforce l'exposition du territoire aux extrêmes climatiques, qu'il s'agisse des canicules estivales, des épisodes cévenols ou des sécheresses hydrologiques.

2.4. Une lecture typologique : l'évolution des types de climat

Au-delà des indicateurs climatiques classiques (température, précipitations), une lecture complémentaire peut être apportée par l'analyse de l'évolution des types de climat, à travers la classification de Köppen-Geiger (Beck et al., 2018 – figure 1). Cette approche typologique permet de caractériser les climats en fonction de seuils bioclimatiques simples, et de visualiser les transitions climatiques dans le temps et dans l'espace.

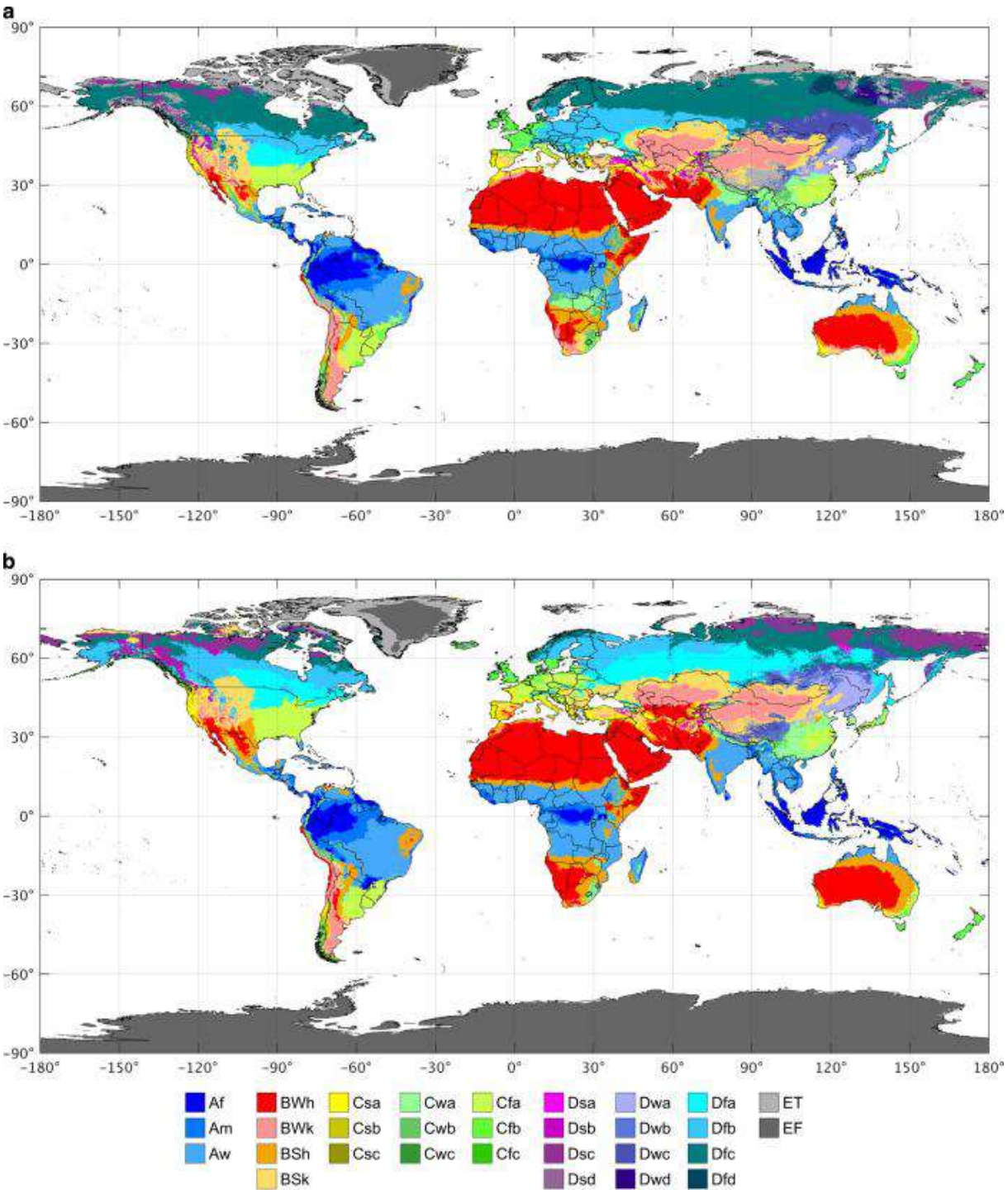


Figure 1 - (a) : types actuels de climats de Köppen-Geiger à l'échelle mondiale (1980-2016) et (b) types de climats futures (2071-2100) (sources : Beck et al., 2018).

Selon les projections climatiques intégrant des modèles DRIAS calibrés, sous un scénario intermédiaire (RCP 4.5), le territoire autour des gorges du Gardon conserve globalement un type climatique méditerranéen à été chaud (Csa) d'ici les années 2050 et jusqu'en 2100. En revanche, sous un scénario de fortes émissions (RCP 8.5), les projections à horizon 2060-2080 indiquent une tendance vers des types plus tempérés chauds (Cwa puis Cfa), marquant une modification profonde des régimes thermiques et pluviométriques moyens attendus sur le territoire, avec notamment une accentuation des précipitations.

Cette évolution typologique traduit, de manière synthétique et pédagogique, des changements déjà observables localement : étés plus chauds et plus secs, stress hydrique accru, modification des cycles écologiques et des usages du territoire. Elle constitue un cadre de lecture pertinent pour appréhender les transformations climatiques à venir et leurs implications concrètes pour le territoire.

2.5. Vers une territorialisation du climat

Ce contexte multiscalaire met en évidence un point essentiel : si le changement climatique est un phénomène global, ses effets se manifestent de façon **fortement différenciée à l'échelle locale**. Topographie, occupation du sol, présence de cours d'eau, structures paysagères et modes d'usage influencent directement les conditions climatiques ressenties et les vulnérabilités associées.

La section suivante du cahier climatique s'attache ainsi à **territorialiser ces constats**, en analysant finement l'évolution du climat sur le périmètre de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon. Elle mobilise pour cela des données stationnelles de la station Météo-France de Nîmes-Courbessac[1], des projections climatiques régionales DRIAS[2] et des analyses spatialisées de sources complémentaires, afin de passer d'un contexte général à un **diagnostic climatique ancré dans les réalités du territoire**.

[1] https://meteo.data.gouv.fr/datasets?category=climatologique-base
[2] https://www.drias-climat.fr/

3. Analyse des variables climatiques et des indicateurs du changement climatique sur le territoire de la réserve de biosphère

3.1. Principes généraux et choix méthodologiques

L'analyse climatique présentée dans cette partie repose sur une combinaison d'approches historiques, prospectives et bioclimatiques, visant à caractériser à la fois :

- les évolutions observées du climat sur les dernières décennies,
- les trajectoires climatiques futures selon différents scénarios d'émissions,
- et leurs implications concrètes pour le territoire, notamment en matière de confort thermique et de conditions de vie.

Afin de garantir la robustesse des résultats, leur comparabilité dans le temps et leur cohérence spatiale, les analyses s'appuient prioritairement sur des jeux de données homogènes, spatialement explicites et reconnus à l'échelle nationale et européenne. Ces données sont, lorsque cela est pertinent, complétées par des traitements statistiques adaptés et des indicateurs dérivés permettant d'en faciliter l'interprétation.

Les travaux mobilisent en particulier :

- les données climatiques DRIAS 2020 et DRIAS-Eau, utilisées pour l'analyse des évolutions passées et des projections climatiques futures ;
- le jeu de données ERA5-HEAT, issu de la réanalyse ERA5, pour l'évaluation du confort thermique à partir de l'indice UTCI ;
- les données de Zones Climatiques Locales (Local Climate Zones – LCZ) produites par le Cerema, permettant une lecture fine des contrastes thermo-urbains et paysagers ;
- les données satellitaires Landsat (NASA), exploitées notamment pour l'analyse de la température de surface et des indicateurs de couverture et d'état de la végétation ;
- ainsi que des classifications bioclimatiques de type Köppen-Geiger, mobilisées comme outil de synthèse et de mise en perspective des évolutions climatiques observées et projetées.

L'ensemble des bases de données mobilisées est synthétisé en annexe 1. Ces choix méthodologiques s'inscrivent dans les orientations du projet LIFE Climat Biospher'Adapt, en visant une articulation étroite entre rigueur scientifique, lecture territorialisée et lisibilité pour l'aide à la décision.

3.2 Analyse historique des variables climatiques (1970–2024)

L'analyse historique des variables climatiques vise à caractériser les **évolutions observées du climat** sur le territoire de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon au cours des dernières décennies. Elle constitue une étape centrale du diagnostic climatique, en permettant d'objectiver les tendances déjà à l'œuvre et d'identifier les signaux significatifs du changement climatique à l'échelle territoriale.

3.2.1 Données et périmètre d'analyse

Cette analyse repose sur les **indicateurs climatiques annuels issus de la base DRIAS 2020** (annexe 1). Le modèle utilisé est le CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 / CNRM-ALADIN63 de Météo-France - Centre National de Recherches Météorologiques. Le scénario d'émissions utilisé est le scénario intermédiaire **RCP 4.5**, correspondant à une trajectoire de stabilisation des forçages radiatifs au cours de la seconde moitié du XXIe siècle. D'une manière complémentaire, les projections avec le **scénario RCP8.5** qui simule un forçage radiatif **sans politique climatique mondiale** seront également fournies à titre comparatif (dans le § 3.3 Analyse prospective des variables climatiques à partir des projections DRIAS).

Un **modèle climatique** est un outil numérique qui **simule le fonctionnement** du système climatique à partir des **lois physiques fondamentales** (dynamique de l'atmosphère, transferts d'énergie, cycle de l'eau, interactions avec les surfaces continentales et océaniques). Il permet de représenter **l'évolution du climat passé**, **présent** et **futur** en fonction de différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre et de leurs forçages radiatifs respectifs (W/m^2).

On distingue généralement deux grandes catégories de modèles complémentaires, généralement imbriqués (comme dans la plateforme Drias) :

- ✓ les **modèles climatiques globaux (GCM – Global Climate Models)** simulent le climat à l'**échelle de la planète**. Ils représentent les **grands équilibres** du système climatique (circulation atmosphérique et océanique, **bilan radiatif**) avec une résolution spatiale relativement **grossière** (de l'ordre de plusieurs dizaines à centaines de kilomètres). Parmi les modèles globaux utilisés figurent notamment **CNRM-CM5**, IPSL-CM5A ou EC-EARTH. Ces modèles constituent la **base** des projections climatiques internationales, notamment celles mobilisées par le GIEC.

- ✓ Les **modèles climatiques régionaux (RCM – Regional Climate Models)** permettent d'**affiner ces simulations à une échelle plus fine**, mieux adaptée à l'analyse des territoires. Ils utilisent les **sorties des modèles globaux** comme conditions aux limites et **simulent** de manière **plus détaillée les processus locaux** (relief, occupation du sol, contrastes terre-mer). Des modèles tels que **ALADIN63**, WRF ou RCA4 permettent ainsi de produire des projections climatiques à haute résolution, particulièrement pertinentes pour les études d'impact à l'échelle régionale ou locale. Un tableau synthétique des points forts et des limites des RCM est fourni en **annexe 2**.

L'association d'un **modèle global** et d'un **modèle régional** constitue une chaîne de modélisation cohérente, permettant de relier les grandes dynamiques climatiques globales aux

spécificités locales du territoire étudié. Le choix du modèle CNRM-CM5, régionalisé par ALADIN63 et diffusé via la plateforme DRIAS, repose sur plusieurs éléments garantissant la robustesse et la pertinence des projections à l'échelle du territoire étudié de la réserve de biosphère des Gorges du Gardon. Ce modèle climatique global, développé par Météo-France, le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) et le CERFACS, fait partie des modèles utilisés dans les exercices internationaux du GIEC. Il a fait l'objet de nombreuses évaluations et comparaisons inter-modèles, attestant de sa capacité à reproduire de manière réaliste les grandes caractéristiques du climat à l'échelle globale et régionale.

La régionalisation par le modèle ALADIN63 permet d'affiner la représentation des processus climatiques à une échelle plus fine, mieux adaptée à l'analyse des territoires. Cette étape est particulièrement importante dans des contextes à forte variabilité spatiale comme les régions méditerranéennes, où les contrastes topographiques et les effets locaux influencent fortement les conditions climatiques. Enfin, l'utilisation des données DRIAS, issues de chaînes de modélisation cohérentes et homogènes, garantit la comparabilité des résultats et leur adéquation avec les référentiels nationaux utilisés pour l'étude des impacts et de l'adaptation au changement climatique en France. Ainsi, le choix de ce modèle et de cette chaîne de traitement permet de disposer de projections climatiques robustes, cohérentes et adaptées aux enjeux territoriaux du diagnostic.

Il convient de souligner que les projections climatiques comportent des incertitudes inhérentes aux méthodes de modélisation. Celles-ci sont liées notamment au choix du modèle climatique, aux hypothèses de forçage (scénarios d'émissions), ainsi qu'à la variabilité naturelle du système climatique. En particulier, l'utilisation d'un seul modèle ne permet pas de représenter l'ensemble de la dispersion des réponses possibles du climat, généralement appréhendée à travers des ensembles multi-modèles. Toutefois, le recours à une chaîne de modélisation cohérente (tel que le CNRM-CM5 / ALADIN63 utilisé dans le cadre de cette étude) permet de fournir une trajectoire robuste et physiquement consistante des évolutions climatiques attendues. Dans le cadre de ce diagnostic territorial, cette approche permet de caractériser les tendances principales et les ordres de grandeur des changements à venir, tout en conservant une bonne lisibilité des résultats. Ces incertitudes n'affectent pas la direction générale des évolutions projetées, mais portent principalement sur leur amplitude.

Le choix de la chaîne de modélisation CNRM-CM5 / ALADIN63 repose notamment sur sa large utilisation dans les études climatiques à l'échelle nationale, ainsi que sur son adaptation aux spécificités climatiques et géographiques du territoire français. D'autres modèles régionalisés, tels que RACMO22E (développé par la Royal Netherlands Meteorological Institute, De Bilt, The Netherlands), présentent également de bonnes performances, mais sont moins directement intégrés aux référentiels opérationnels utilisés en France.

Les projections climatiques présentées reposent sur une chaîne de modélisation unique (CNRM-CM5 / ALADIN63), choisie pour sa robustesse, sa cohérence avec les référentiels nationaux et son adéquation aux spécificités climatiques du territoire des Gorges du Gardon. D'autres chaînes de modélisation disponibles dans DRIAS, telles que WRF381P associé au modèle global IPSL-CM5A ou RCA4 associé à EC-EARTH, présentent également de bonnes performances et sont largement utilisées dans les exercices de comparaison multi-modèles. Toutefois, dans le cadre du présent diagnostic territorial, le recours à une approche multi-modèle

n'a pas été retenu, afin de privilégier une lecture claire, cohérente et opérationnelle des résultats. Ce choix méthodologique permet de caractériser de manière robuste les tendances climatiques attendues, tout en conservant une lisibilité adaptée aux besoins des acteurs du territoire. Les incertitudes associées aux projections sont par ailleurs prises en compte à travers l'analyse de différents scénarios d'émissions (RCP4.5 et RCP8.5), permettant d'encadrer un éventail plausible des évolutions climatiques futures.

Les indicateurs climatiques sont extraits pour les quatre mailles DRIAS couvrant le territoire d'étude (mailles 4950, 4951, 4807 et 4808 - fig. 2). Afin de produire une lecture synthétique et représentative de l'ensemble de la Réserve de biosphère, les indicateurs ont été agrégés spatialement par moyenne sur ces mailles.

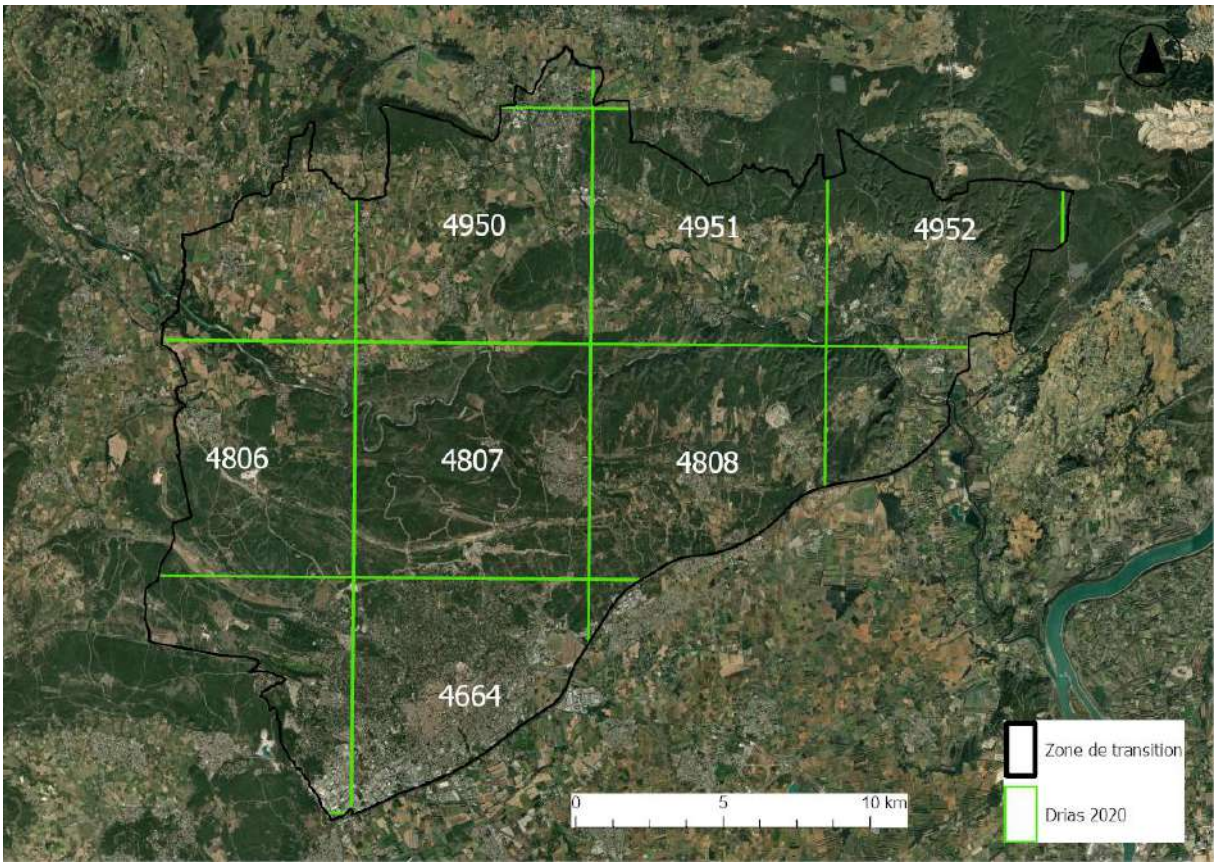


Figure 2 – Mailles Drias couvrant le territoire de la réserve de biosphère. Les mailles 4950, 4951, 4807 et 4808 ont été utilisées dans le cadre de cette étude

La période d'étude s'étend de 1970 à 2024, ce qui permet :

- de couvrir la phase d'accélération du réchauffement observée à partir des années 1980,
- d'intégrer les décennies récentes, marquées par une intensification des extrêmes climatiques,
- et de disposer de séries temporelles suffisamment longues pour l'analyse statistique des tendances.

3.2.2 Variables climatiques analysées

L'analyse porte sur un ensemble de **15 variables climatiques annuelles**, représentatives à la fois des **conditions thermiques moyennes**, des **extrêmes de température** et des **régimes de précipitations** (tableau 1) :

Variable	Descriptif
TAV	Température moyenne journalière (°C)
TNAV	Température minimale journalière (°C)
TXAV	Température maximale journalière (°C)
TX35	Nombre de jours de fortes chaleur (TX>35°C) (jour(s))
TXND	Nombre de jours anormalement chauds T>Tx_ref + 5°C (jour(s))
TNHT	Nombre de nuits anormalement chaudes T>Tn_ref + 5°C (jour(s))
TR	Nombre de nuits tropicales Tn > 20°C (jour(s))
TNFD	Nombre de jours de gel (jour(s))
TXHWD	Nombre de jours d'une vague de chaleur T>Tx_ref + 5°C dans une séquence de plus de 5 jours consécutifs (jour(s))
TRAV	Amplitude thermique journalière (°C)
RR	Cumul de précipitation (mm)
RR1MM	Nombre de jours de pluie (jour(s))
PN20MM	Nombre de jours de fortes précipitations RR> 20 mm (jour(s))
PXCWD	Nombre maximum de jours pluvieux consécutifs RR>1mm (jour(s))
PXCDD	Période de sécheresse Nombre de jours consécutifs pour lesquels RR<1mm (jour(s))

Tableau 1– Variables climatiques analysées dans le cadre de l'étude historique

Pour chacune de ces variables, les indicateurs suivants ont été calculés :

- valeur minimale observée,
- valeur maximale observée,
- moyenne sur la période,
- écart-type,
- statistique de tendance (tau de Kendall),
- estimation de l'amplitude de la tendance (pente de Sen),
- et significativité statistique des tendances détectées.

Les résultats sont présentés sous forme de **séries temporelles graphiques** et de **tableaux de synthèse**, facilitant l'interprétation conjointe des évolutions moyennes et des dynamiques extrêmes.

3.2.3 Méthodes d'analyse des tendances

Afin de détecter et de quantifier les tendances climatiques sur la période étudiée, deux méthodes statistiques complémentaires ont été mobilisées : le **test de Mann-Kendall** et l'**estimateur de pente de Sen**.

Le **test de Mann-Kendall** est un test statistique non paramétrique largement utilisé en climatologie et en hydrologie pour identifier l'existence d'une **tendance monotone** (croissante ou décroissante) dans une série temporelle. Il présente l'avantage de ne pas supposer de distribution particulière des données et d'être peu sensible aux valeurs extrêmes, ce qui le rend particulièrement adapté à l'analyse de séries climatiques. Le test fournit un coefficient (tau de Kendall) indiquant le sens et la force de la tendance, ainsi qu'un niveau de significativité statistique (Mann, 1945 ; Kendall, 1975).

La **pente de Sen** (ou estimateur de Sen-Theil) permet quant à elle d'estimer l'**amplitude de la tendance**, en calculant la médiane des pentes entre toutes les paires de points de la série temporelle. Cette méthode robuste fournit une estimation de l'évolution moyenne annuelle de la variable étudiée (par exemple en °C/an ou mm/an), complémentaire à l'information fournie par le test de Mann-Kendall (Sen, 1968, Yue et al., 2002).

L'utilisation conjointe de ces deux méthodes permet ainsi :

- d'identifier les tendances statistiquement significatives,
- d'en quantifier l'intensité,
- et de comparer les évolutions relatives entre différentes variables climatiques.

3.2.4 Objectifs de l'analyse

Cette analyse historique vise *in fine* à :

- mettre en évidence les **tendances climatiques déjà observables** sur le territoire,
- distinguer les variables présentant des évolutions significatives de celles dont la variabilité reste dominante,
- et fournir un **socle quantitatif robuste** pour la mise en perspective avec les projections climatiques futures, présentées dans la section suivante.

3.2.5 Les indicateurs de température

3.2.5.1 TAV : Température moyenne journalière (°C)

L'évolution de la **température moyenne journalière (TAV)** sur la période **1970–2024** met en évidence une **tendance nette et statistiquement significative au réchauffement** sur le territoire de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon (fig. 3). Le test de Mann-Kendall indique une tendance positive significative ($\tau = 0{,}305$), associée à une **pente de Sen estimée à +0,021 °C par an**, soit environ **+0,21 °C par décennie**.

L'examen de la série temporelle montre que ce réchauffement ne s'opère pas de manière linéaire, mais s'inscrit dans une dynamique progressive, marquée par plusieurs phases distinctes. Les années 1970 et le début des années 1980 se caractérisent par des valeurs de TAV globalement plus basses, avec plusieurs années inférieures à **14 °C**, traduisant un régime thermique relativement plus frais. À partir de la fin des années 1980 et surtout au cours des années 1990, une **élévation progressive des températures moyennes** s'observe, avec un basculement vers des valeurs plus fréquemment supérieures à **15 °C**.

Depuis le début des années 2000, et plus nettement encore au cours des années 2010, la série est marquée par une **augmentation de la fréquence des années chaudes**, avec plusieurs années atteignant ou dépassant **15,5 °C**, voire **16 °C**, ce qui correspond aux valeurs les plus élevées de la période étudiée. Cette séquence récente apparaît comme un **palier thermique élevé**, ponctué de quelques années plus fraîches mais sans retour durable aux niveaux observés dans les premières décennies de la série.

La variabilité interannuelle demeure présente (écart-type de 0,7 °C), traduisant l'influence de la variabilité climatique naturelle. Toutefois, celle-ci s'inscrit désormais autour d'une **moyenne plus élevée**, ce qui confirme que le signal de réchauffement dépasse largement les fluctuations annuelles.

Dans l'ensemble, l'évolution de la TAV traduit une **augmentation durable du niveau thermique moyen** du territoire, constituant un signal climatique structurant. Cette tendance a des implications directes sur les bilans énergétiques, les cycles biologiques, la demande en eau et le confort thermique, et fournit un cadre de référence essentiel pour l'analyse des extrêmes de chaleur et des indicateurs bioclimatiques développés dans les sections suivantes.

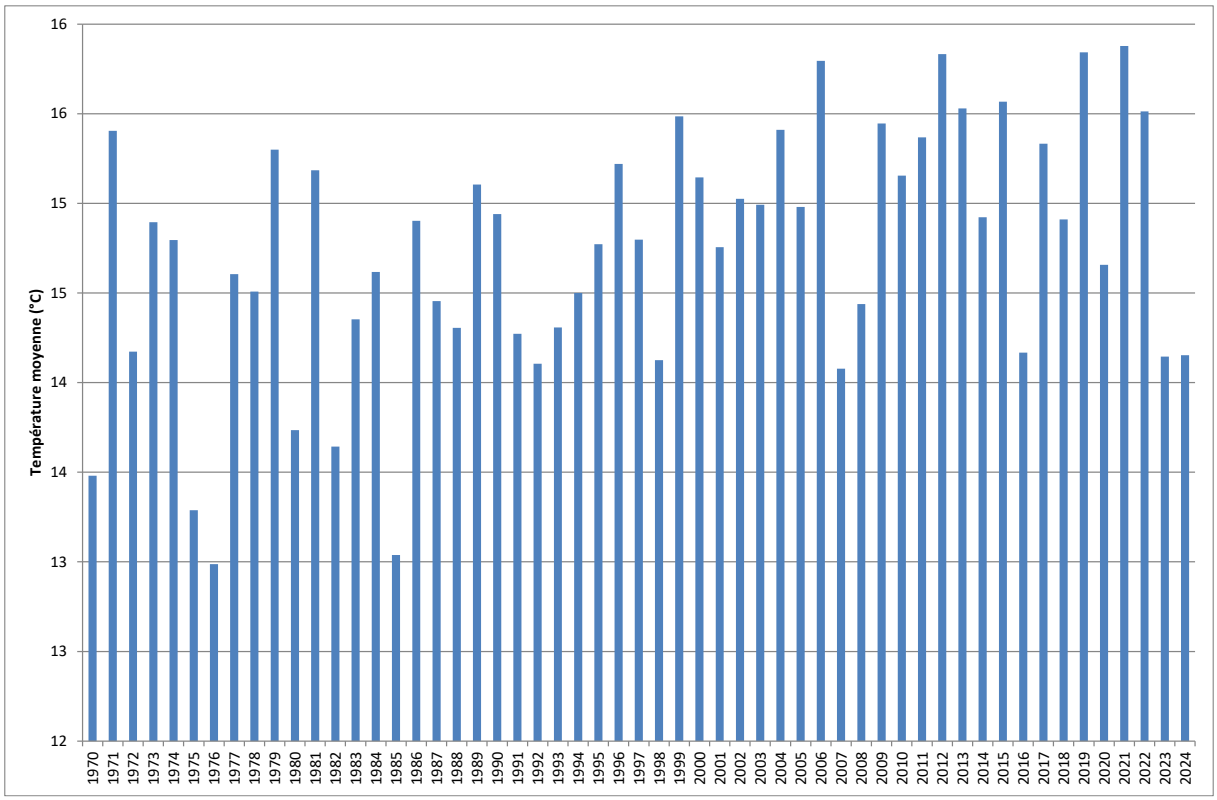


Figure 3– TAV : Température moyenne journalière (°C) (mailles Drias 4950, 4951, 4807 et 4808)

3.2.5.2 TNAV : Température minimale journalière (°C)

L'évolution de la **température minimale journalière (TNAV)** sur la période **1970–2024** met en évidence une **augmentation statistiquement significative des températures nocturnes** sur le territoire de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon (fig. 4). Le test de Mann-Kendall indique une tendance positive significative ($\tau = 0{,}299$), associée à une **pente de Sen estimée à +0,019 °C par an**, soit environ **+0,19 °C par décennie**.

L'analyse graphique révèle une structuration temporelle comparable à celle observée pour la température moyenne, mais avec des **signaux particulièrement marqués sur les températures basses**, traduisant un réchauffement nocturne progressif. Les années 1970 et le début des années 1980 se caractérisent par des valeurs de TNAV fréquemment comprises entre **9 et 10 °C**, avec plusieurs années proches, voire inférieures, à **9,5 °C**. Cette période correspond à un régime nocturne relativement frais, marqué par une forte variabilité interannuelle.

À partir de la fin des années 1980 et surtout au cours des années 1990, une **élévation progressive des températures minimales** est observable, avec un franchissement plus fréquent du seuil de **10,5 °C**, puis de **11 °C**. Cette tendance s'accentue nettement à partir des années 2000, période durant laquelle les années à températures minimales élevées deviennent majoritaires.

Depuis le début des années 2010, la série est marquée par la **récurrence d'années présentant des TNAV supérieures à 11 °C**, avec plusieurs maxima proches ou supérieurs à **11,5–12 °C**, correspondant aux valeurs les plus élevées de l'ensemble de la période étudiée. Bien que certaines années plus fraîches subsistent, celles-ci apparaissent désormais comme des exceptions au sein d'un régime thermique nocturne globalement plus chaud.

La variabilité interannuelle demeure notable (écart-type de 0,6 °C), mais elle s'inscrit autour d'un **niveau de référence plus élevé**, confirmant que le réchauffement des températures minimales constitue un signal climatique robuste et durable.

L'augmentation des températures minimales revêt une importance particulière en termes d'impacts, notamment en lien avec :

- la **réduction du rafraîchissement nocturne**,
- l'augmentation de la fréquence des **nuits chaudes et tropicales**,
- les effets sur le **confort thermique**, la **santé humaine** et certains processus écologiques.

Ainsi, l'évolution de la TNAV confirme que le réchauffement observé sur le territoire ne se limite pas aux températures diurnes, mais concerne pleinement le **régime thermique nocturne**, avec des implications directes pour les systèmes naturels et les usages humains.

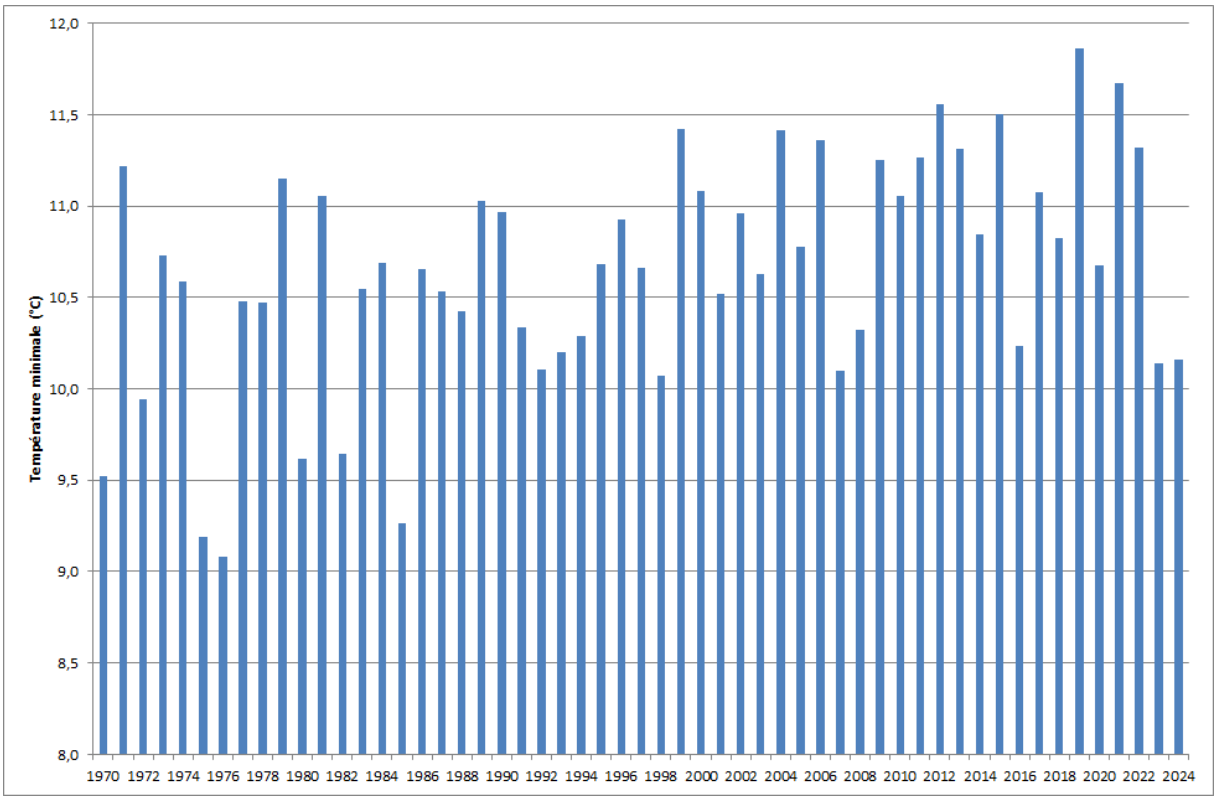


Figure 4– TNAV : Température minimale journalière (°C) (mailles Drias 4950, 4951, 4807 et 4808)

3.2.5.3 TXAV : Température maximale journalière (°C)

L'analyse de la **température maximale journalière (TXAV)** sur la période **1970–2024** met en évidence une **augmentation statistiquement significative des températures diurnes** sur le territoire de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon (fig. 5). Le test de Mann-Kendall indique une tendance positive significative ($\tau = 0{,}296$), associée à une **pente de Sen estimée à +0,022 °C par an**, soit environ **+0,22 °C par décennie**, valeur légèrement supérieure à celles observées pour les températures moyennes et minimales.

L'examen de la série temporelle montre une évolution progressive mais structurée. Les années 1970 et le début des années 1980 se caractérisent par des valeurs de TXAV globalement comprises entre **17 et 19 °C**, avec plusieurs années inférieures à **18 °C**, traduisant un régime diurne relativement modéré. Cette période est également marquée par une forte variabilité interannuelle, avec des alternances d'années plus chaudes et plus fraîches.

À partir de la fin des années 1980 et au cours des années 1990, les températures maximales journalières augmentent progressivement, avec un franchissement plus fréquent du seuil de **19 °C**. Cette dynamique s'accentue nettement au début des années 2000, période à partir de laquelle les valeurs élevées deviennent plus récurrentes.

Depuis le milieu des années 2000 et plus encore au cours des années 2010, la série est marquée par la **multiplication des années à TXAV supérieures à 19,5 °C**, avec plusieurs pics dépassant **20 °C**, correspondant aux valeurs les plus élevées observées sur l'ensemble de la période. Ces valeurs élevées s'inscrivent dans une séquence prolongée, confirmant l'installation d'un **nouveau régime thermique diurne**, plus chaud que celui observé au cours des décennies précédentes.

La variabilité interannuelle demeure présente (écart-type de 0,8 °C), mais elle s'exprime désormais autour d'un **niveau thermique moyen plus élevé**, ce qui confirme que l'augmentation des températures maximales journalières constitue un signal climatique robuste.

L'évolution de la TXAV, combinée à celle des températures minimales, explique en grande partie l'élévation des températures moyennes et contribue à l'intensification des **conditions de chaleur diurne**, avec des implications directes pour :

- la **fréquence** et **l'intensité** des épisodes de chaleur,
- les **bilans hydriques** et la **demande évaporative**,
- les **conditions de travail** et de **loisirs** en extérieur,
- et les **risques sanitaires** liés à la chaleur.

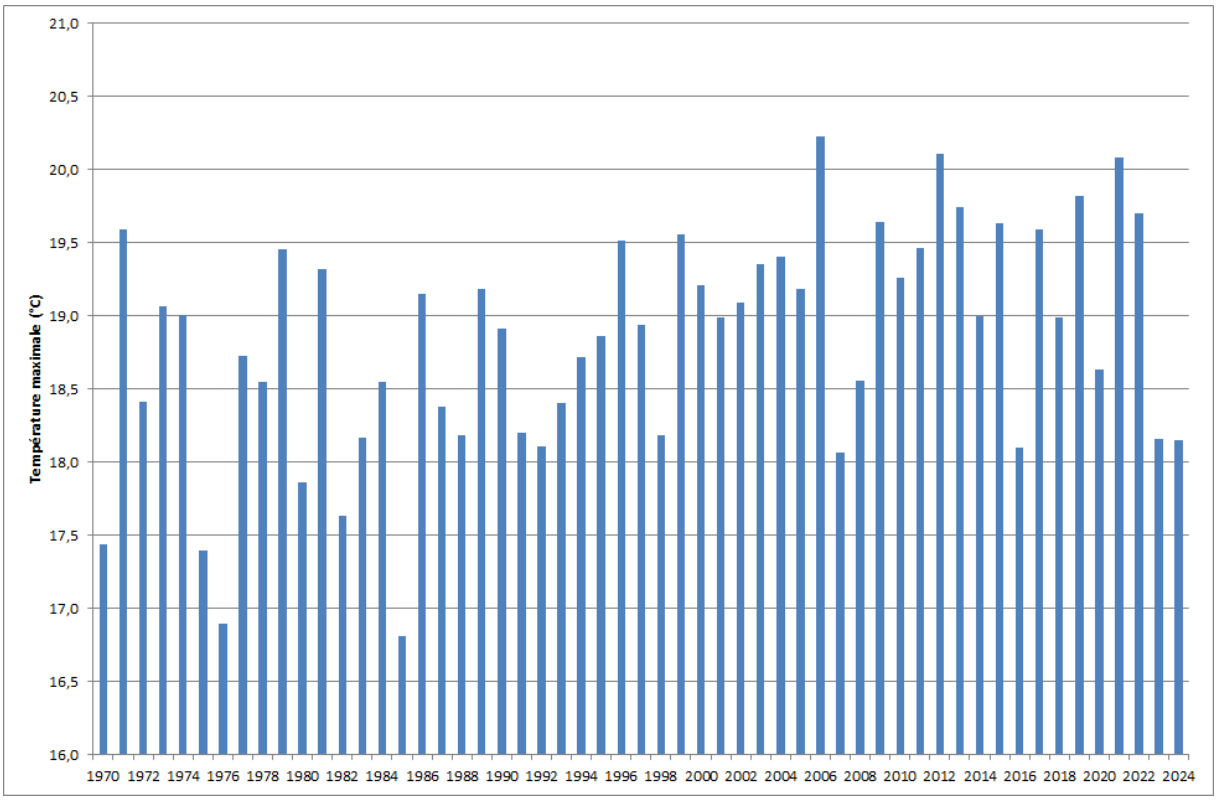


Figure 5– TXAV : Température maximale journalière (°C) (mailles Drias 4950, 4951, 4807 et 4808)

3.2.5.4 TX35 : Nombre de jours de fortes chaleur (TX>35°C)

L'évolution du **nombre de jours de fortes chaleurs (TX35)** sur la période **1970–2024** révèle une dynamique spécifique, caractérisée par une **forte variabilité interannuelle** et une **absence de tendance statistiquement significative** au sens du test de Mann-Kendall sur l'ensemble de la période étudiée (fig. 6).

Sur les premières décennies (années 1970 à début des années 1990), les occurrences de jours de fortes chaleurs restent **rares voire nulles**, avec la majorité des années présentant **moins de 2 jours** dépassant le seuil de 35 °C. Cette période correspond à un régime thermique dans lequel les températures extrêmes absolues demeurent exceptionnelles sur le territoire.

À partir du milieu des années 1990, et plus nettement encore depuis le début des années 2000, la série se distingue par l'apparition d'**années ponctuellement marquées par des pics élevés**, avec des valeurs atteignant ou dépassant **5 à 10 jours de fortes chaleurs**, et culminant lors de certains étés récents à **plus de 15 voire 20 jours**. Ces pics correspondent à des épisodes caniculaires marquants à l'échelle nationale et régionale.

Le graphique met ainsi en évidence une **mutation du régime des extrêmes thermiques** : sans augmentation régulière et progressive du nombre moyen annuel de jours très chauds, on observe une **concentration croissante des jours de fortes chaleurs au sein de certaines années**, traduisant une **intensification des épisodes extrêmes**, plutôt qu'un glissement continu de la moyenne.

Cette structure explique l'absence de tendance statistiquement significative sur l'ensemble de la période : la série est dominée par des **événements rares mais très intenses**, dont la distribution est fortement asymétrique. Néanmoins, l'augmentation de la fréquence des années à valeurs élevées depuis les années 2000 constitue un **signal climatique qualitativement fort**, cohérent avec les évolutions observées pour les températures moyennes et maximales.

En ce sens, l'indicateur TX35 complète utilement les indicateurs fondés sur des seuils relatifs (TXND, TNHT), en mettant en évidence le rôle croissant des **événements de chaleur extrême absolue**, aux impacts potentiellement majeurs sur la santé humaine, les écosystèmes et les activités du territoire, malgré leur occurrence encore irrégulière.

Si le nombre annuel de jours de fortes chaleurs ne présente pas encore de tendance statistiquement significative, l'analyse des indicateurs fondés sur des seuils relatifs permet d'appréhender plus finement l'évolution de la fréquence et de la persistance des situations de chaleur anormalement élevée.

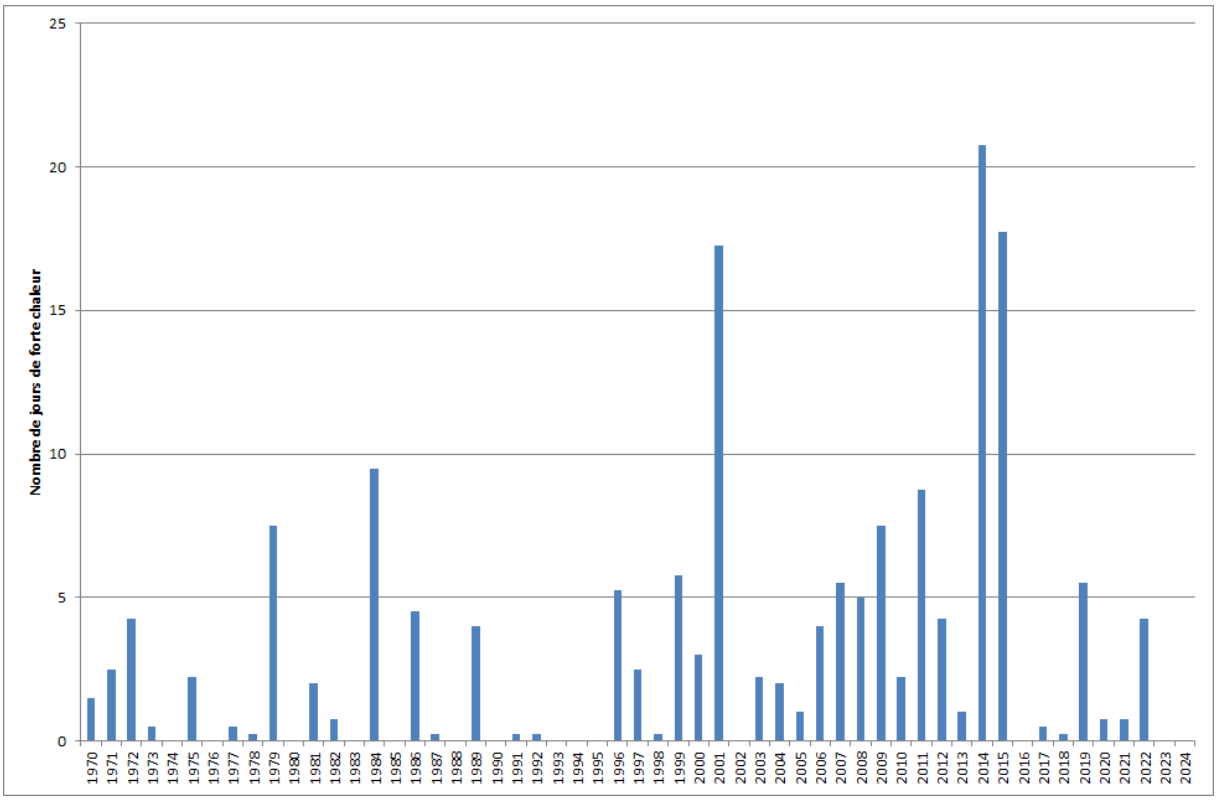


Figure 6– TX35 : Nombre de jours de fortes chaleur (TX>35°C) (jour(s)) (mailles Drias 4950, 4951, 4807 et 4808)

3.2.5.5 TXND : Nombre de jours anormalement chauds (T>Tx_ref + 5°C)

L'indicateur TXND correspond au nombre de jours pour lesquels la température maximale journalière dépasse de plus de 5 °C une valeur de référence climatologique (fig. 7). Cette référence est définie comme la moyenne climatologique de la température maximale journalière calculée sur une période de 30 ans (1981–2010), conformément aux méthodes utilisées dans le jeu de données DRIAS 2020 (Météo-France). L'indicateur permet ainsi de caractériser les situations de chaleur anormalement élevée relativement au climat local, indépendamment de la saisonnalité. Contrairement aux indicateurs fondés sur des seuils absolus, TXND repose sur un seuil relatif, défini par rapport à une normale climatologique de 30 ans, calculée à l'échelle de chaque maille DRIAS. Il permet ainsi de détecter les anomalies thermiques positives et d'analyser l'évolution de la fréquence des journées anormalement chaudes dans un contexte de réchauffement climatique.

L'évolution du nombre de jours anormalement chauds (TXND) sur la période 1970–2024 met en évidence une augmentation nette, continue et statistiquement significative de la fréquence des situations de chaleur anormalement élevée sur le territoire de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon. Le test de Mann-Kendall indique une tendance positive significative (τ = 0,331), associée à une pente de Sen de +0,457 jour par an, soit environ +4,6 jours par décennie.

La lecture du graphique révèle une structuration temporelle très marquée. Durant les années 1970 et le début des années 1980, le nombre annuel de jours anormalement chauds reste globalement limité, oscillant le plus souvent entre 10 et 30 jours par an, avec une forte variabilité interannuelle. Ces valeurs traduisent un climat dans lequel les dépassements significatifs des normales thermiques estivales demeurent relativement ponctuels.

À partir de la fin des années 1980 et surtout au cours des années 1990, une augmentation progressive du niveau moyen de l'indicateur est observable, avec un franchissement plus fréquent du seuil de 30 jours par an. Cette dynamique s'accentue nettement à partir du début des années 2000, période durant laquelle les valeurs élevées deviennent récurrentes.

Depuis la fin des années 2000 et au cours des années 2010, la série est marquée par la multiplication d'années présentant plus de 40 à 50 jours anormalement chauds, avec plusieurs pics atteignant ou dépassant 60 jours par an, correspondant aux valeurs les plus élevées de l'ensemble de la période étudiée. Ces niveaux traduisent un changement profond du régime thermique diurne, caractérisé non plus seulement par des extrêmes ponctuels, mais par une fréquence accrue de journées durablement plus chaudes que la normale.

Contrairement à l'indicateur TX35 (§ ci-dessus), fondé sur un seuil absolu élevé, TXND met ainsi en évidence une transformation progressive et structurelle du climat, en captant l'augmentation de la fréquence des anomalies chaudes relatives. Ce comportement explique la forte significativité statistique de la tendance, malgré une variabilité interannuelle toujours présente (écart-type de 14,6 jours).

L'augmentation du nombre de jours anormalement chauds constitue un signal climatique majeur, aux implications multiples :

- accroissement de la contrainte thermique sur les populations et les écosystèmes,
- augmentation de la demande évaporative et du stress hydrique,
- allongement des périodes de conditions thermiques défavorables pour les activités agricoles, forestières et touristiques.

Ainsi, l'indicateur TXND apparaît comme l'un des marqueurs les plus robustes et les plus parlants du **réchauffement déjà engagé** sur le territoire de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon.

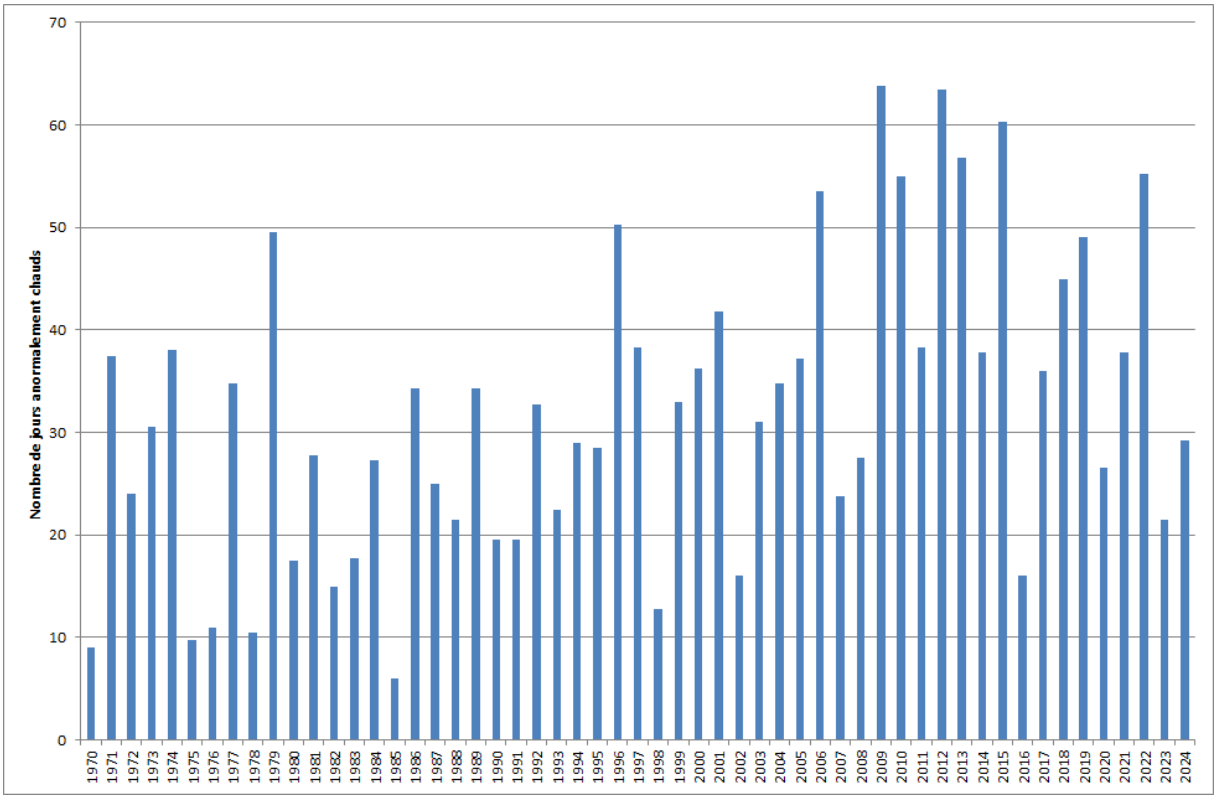


Figure 7– TXND Nombre de jours anormalement chauds (T>Tx_ref + 5°C) (mailles Drias 4950, 4951, 4807 et 4808)

3.2.5.6 TNHT : Nombre de nuits anormalement chaudes (T>Tn_ref + 5°C)

L'évolution du **nombre de nuits anormalement chaudes (TNHT** *Température minimale journalière supérieure de plus de 5 °C à la référence climatologique)***)** sur la période **1970–2024** met en évidence une **augmentation nette et statistiquement significative des anomalies thermiques nocturnes** sur le territoire de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon (fig. 8). Le test de Mann-Kendall indique une tendance positive significative (τ = **0,317**), associée à une **pente de Sen estimée à +0,25 nuit par an**, soit environ **+2,5 nuits par décennie**.

La lecture du graphique montre une structuration temporelle très marquée. Durant les années 1970 et le début des années 1980, le nombre de nuits anormalement chaudes reste globalement limité, oscillant le plus souvent entre **5 et 15 nuits par an**, avec une variabilité

interannuelle importante. Ces valeurs traduisent un régime nocturne dans lequel les anomalies chaudes demeurent ponctuelles et irrégulières.

À partir de la fin des années 1980 et surtout au cours des années 1990, une **augmentation progressive du niveau moyen de l'indicateur** est observable, avec un franchissement plus fréquent du seuil de **15 nuits par an**. Cette dynamique s'accentue nettement à partir du début des années 2000, période durant laquelle les années à valeurs élevées deviennent de plus en plus fréquentes.

Depuis la fin des années 2000 et tout au long des années 2010, la série est marquée par la **récurrence d'années présentant plus de 25 à 30 nuits anormalement chaudes**, avec plusieurs pics atteignant ou dépassant **30 à 35 nuits par an**, correspondant aux valeurs maximales observées sur l'ensemble de la période étudiée. Ces niveaux témoignent d'un **changement profond du régime thermique nocturne**, caractérisé par une élévation durable des températures minimales au-delà des normales climatologiques.

Contrairement aux indicateurs fondés sur des seuils absolus (comme les nuits tropicales), l'indicateur TNHT permet de capter une **transformation progressive et structurelle du climat nocturne**, en intégrant l'évolution du climat de référence. La forte significativité statistique observée confirme que l'augmentation des anomalies nocturnes excède la simple variabilité interannuelle (écart-type de 8,4 nuits).

L'augmentation du nombre de nuits anormalement chaudes constitue un signal climatique majeur, avec des implications directes :

- sur le **confort thermique nocturne**, en limitant les capacités de récupération physiologique,
- sur la **santé humaine**, en particulier lors des épisodes de chaleur prolongée,
- sur certains **processus écologiques**, notamment ceux dépendant des cycles thermiques jour/nuit (nycthéméraux).

Ainsi, l'indicateur TNHT apparaît comme l'un des marqueurs les plus sensibles et les plus pertinents du **réchauffement nocturne déjà à l'œuvre** sur le territoire de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon, et prépare directement l'analyse des nuits tropicales et des vagues de chaleur.

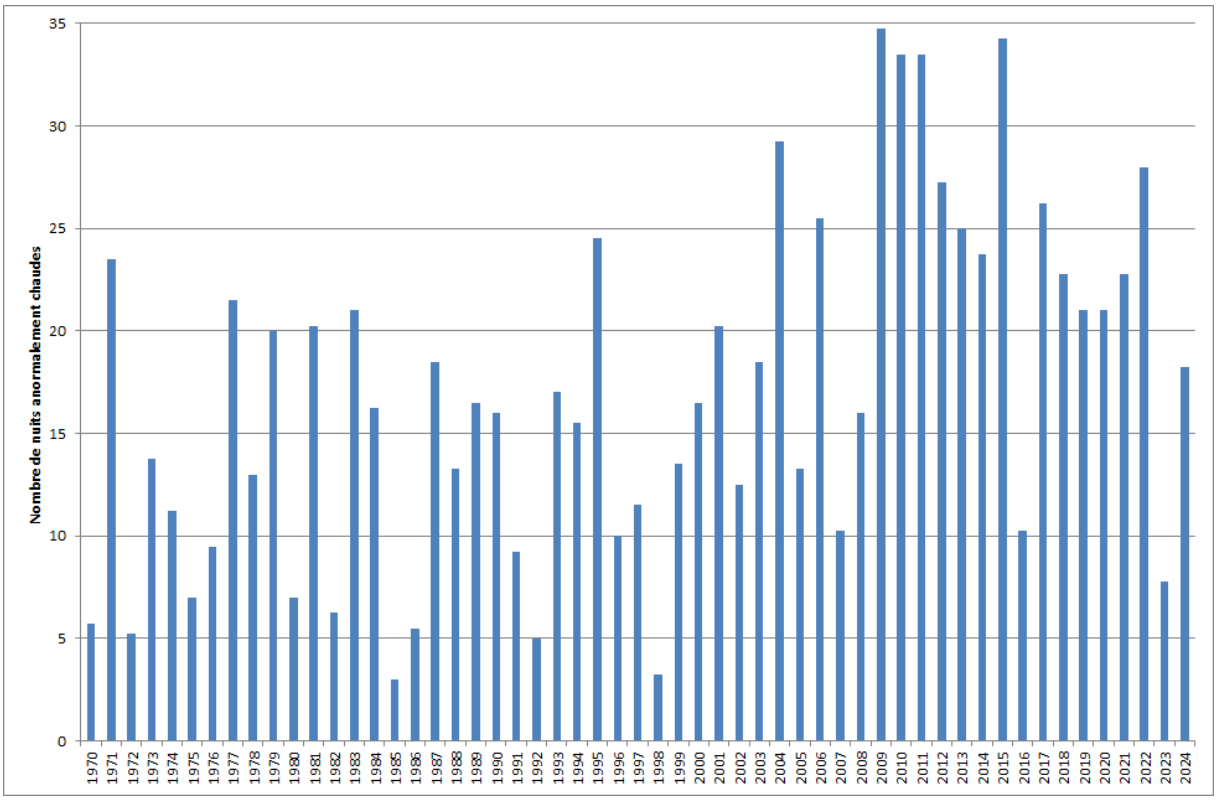


Figure 8– TNHT Nombre de nuits anormalement chaudes (T>Tn_ref + 5°C) (mailles Drias 4950, 4951, 4807 et 4808)

3.2.5.7 TR : Nombre de nuits tropicales

L'analyse de l'évolution du **nombre de nuits tropicales** (TR - *Température minimale journalière supérieure à 20 °C)* sur la période **1970–2024** met en évidence une **augmentation statistiquement significative de la fréquence des nuits chaudes** sur le territoire de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon (fig. 9). Le test de Mann-Kendall indique une tendance positive significative (τ = **0,257**), associée à une **pente de Sen de +0,364 nuit par an**, soit environ **+3,6 nuits tropicales par décennie**.

La lecture du graphique révèle une évolution marquée par une forte variabilité interannuelle, mais également par une **élévation progressive du niveau moyen** de l'indicateur. Durant les années 1970 et le début des années 1980, le nombre de nuits tropicales varie fortement d'une année à l'autre, avec des valeurs généralement comprises entre **5 et 30 nuits par an**, et plusieurs années présentant des occurrences encore limitées.

À partir de la fin des années 1980 et surtout au cours des années 1990, les nuits tropicales deviennent **plus fréquentes**, avec un nombre croissant d'années dépassant le seuil de **30 nuits par an**. Cette évolution s'intensifie nettement à partir des années 2000, période durant laquelle les valeurs élevées deviennent récurrentes.

Depuis le milieu des années 2000 et tout au long des années 2010, la série est caractérisée par la **multiplication d'années comptant plus de 40 à 50 nuits tropicales**, avec plusieurs pics atteignant ou dépassant **60 nuits par an**, correspondant aux valeurs maximales observées sur

l'ensemble de la période. Ces niveaux traduisent une banalisation progressive des nuits chaudes, autrefois exceptionnelles, et désormais fréquentes sur le territoire.

Comparé à l'indicateur TNHT, fondé sur un seuil relatif, TR met en évidence le franchissement répété d'un seuil thermique absolu, particulièrement critique pour la santé humaine et le confort thermique. L'augmentation du nombre de nuits tropicales traduit une dégradation des conditions de rafraîchissement nocturne, réduisant les capacités de récupération physiologique lors des épisodes de chaleur prolongée. Les valeurs absolues doivent toutefois être interprétées avec prudence, certains indicateurs de seuil pouvant être sensibles aux biais des simulations climatiques.

L'évolution de l'indicateur TR constitue ainsi un signal fort du réchauffement nocturne en cours, aux implications directes :

- pour la santé publique, notamment lors des canicules,
- pour le confort thermique résidentiel, en particulier dans les logements peu adaptés à la chaleur,
- pour les écosystèmes, sensibles aux cycles thermiques jour/nuit.

Combiné aux indicateurs TNHT et TXND, le nombre de nuits tropicales confirme l'installation progressive d'un nouveau régime thermique, caractérisé par une chaleur non seulement plus intense en journée, mais également plus persistante la nuit.

Après avoir mis en évidence l'augmentation des anomalies thermiques nocturnes et le franchissement de seuils absolus de température minimale, l'analyse des vagues de chaleur permet d'appréhender la dimension temporelle et cumulative des épisodes de chaleur extrême.

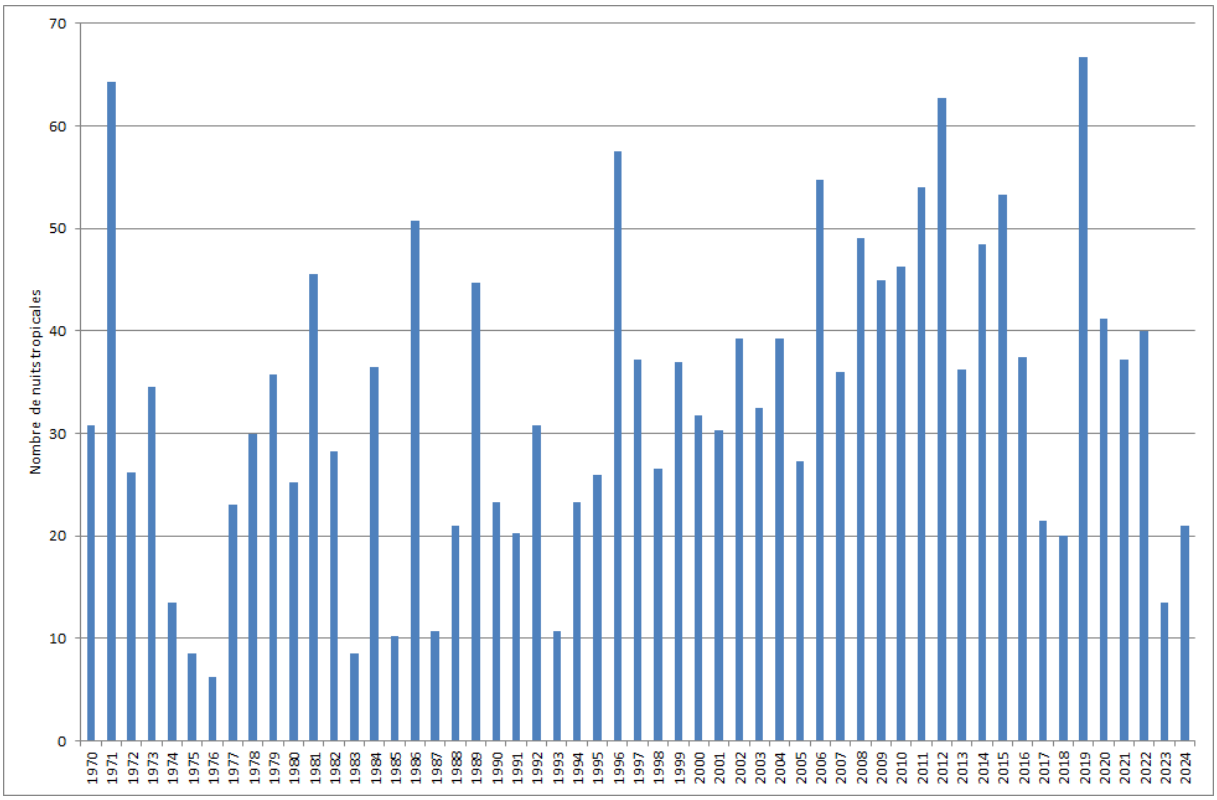


Figure 9 – TR Nombre de nuits tropicales (Température minimale journalière supérieure à 20 °C) (mailles Drias 4950, 4951, 4807 et 4808)

3.2.5.8 TXHWD : Nombre de jours appartenant à une vague de chaleur

L'analyse de l'évolution du **nombre de jours appartenant à une vague de chaleur** (TXHWD : *(Température maximale journalière supérieure de plus de 5 °C à la référence climatologique pendant au moins 5 jours consécutifs)* sur la période **1970–2024** met en évidence une **augmentation significative de la persistance des épisodes de chaleur** sur le territoire de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon (fig. 10). Le test de Mann-Kendall indique une tendance positive statistiquement significative (τ = **0,261**), associée à une **pente de Sen estimée à +0,029 jour par an**, soit environ **+0,3 jour par décennie**.

La lecture du graphique révèle une dynamique très contrastée selon les périodes. Durant les années 1970, 1980 et une grande partie des années 1990, les vagues de chaleur au sens de cet indicateur restent **rares et peu persistantes**, avec de nombreuses années présentant **aucun jour** appartenant à une séquence de chaleur prolongée, et quelques occurrences ponctuelles, généralement inférieures à **5 à 10 jours**.

À partir du début des années 2000, une **rupture nette du régime thermique** est observable. Les vagues de chaleur deviennent **plus fréquentes et surtout plus longues**, avec une augmentation marquée du nombre de jours consécutifs soumis à des températures anormalement élevées. Cette évolution s'accentue fortement à partir de la fin des années 2000 et au cours des années 2010.

Plusieurs années récentes se distinguent par des valeurs exceptionnellement élevées, atteignant ou dépassant **20 à 35 jours** appartenant à des vagues de chaleur, correspondant aux maximas de la série. Ces épisodes traduisent non seulement une intensification des températures, mais surtout une **augmentation de la durée des séquences de chaleur**, facteur clé de vulnérabilité pour les populations, les écosystèmes et les activités du territoire.

Contrairement aux indicateurs fondés sur des seuils journaliers (TXND, TX35), TXHWD met en évidence la **dimension cumulative et temporelle du stress thermique**. L'augmentation statistiquement significative de cet indicateur confirme que le réchauffement observé se traduit désormais par des **épisodes de chaleur plus longs et plus persistants**, et non plus uniquement par des pics ponctuels.

L'évolution des vagues de chaleur constitue ainsi un signal climatique majeur, aux implications directes :

- sur la **santé humaine**, en raison de l'exposition prolongée à des températures élevées,
- sur les **écosystèmes**, soumis à un stress thermique et hydrique durable,
- sur les **activités économiques et touristiques**, particulièrement sensibles à la durée des épisodes extrêmes.

Combiné aux indicateurs TXND, TNHT et TR, l'indicateur TXHWD confirme l'installation progressive d'un **nouveau régime de chaleur**, caractérisé par des températures plus élevées, mais surtout **plus persistantes dans le temps**. Au-delà de l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des situations de chaleur, l'analyse met ainsi en évidence une évolution marquée de leur durée, traduisant un renforcement de la contrainte thermique exercée sur le territoire.

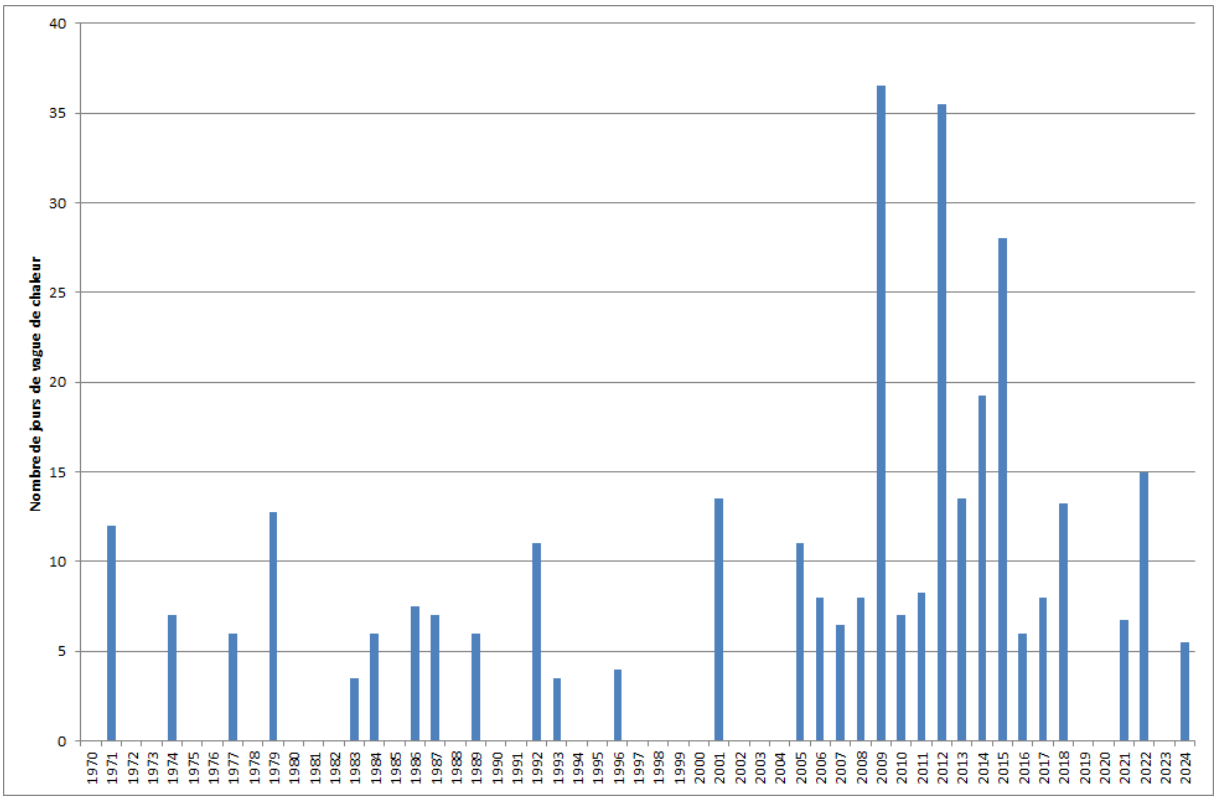


Figure 10 – TXHWD Nombre de jours d'une vague de chaleur T>Tx_ref + 5°C dans une séquence de plus de 5 jours consécutifs (jour(s)) (mailles Drias 4950, 4951, 4807 et 4808)

3.2.5.9 TRAV Amplitude thermique journalière (°C)

L'évolution de l'**amplitude thermique journalière** (TRAV *Différence entre la température maximale et minimale journalière, en °C)* sur la période **1970–2024** apporte un éclairage complémentaire sur la nature du réchauffement observé sur le territoire de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon (fig. 11). Contrairement aux indicateurs de températures moyennes, minimales et maximales, TRAV ne présente **pas de tendance statistiquement significative** sur la période étudiée, comme l'indique le test de Mann-Kendall.

Les valeurs annuelles de l'amplitude thermique journalière oscillent globalement autour d'une moyenne de **8,2 °C**, avec une variabilité interannuelle relativement modérée (écart-type ≈ **0,3 °C**). Les amplitudes les plus faibles sont observées au milieu des années 1980 et ponctuellement dans les années 1990, tandis que des valeurs plus élevées apparaissent principalement au cours des années 2000 et du début des années 2010, avec un maximum approchant **8,8–8,9 °C**.

Malgré ces fluctuations, l'absence de tendance significative suggère que le réchauffement observé sur le territoire ne s'accompagne pas d'une modification marquée du contraste thermique journalier. Autrement dit, l'augmentation des températures minimales et

maximales semble s'opérer de manière relativement parallèle, sans élargissement ni réduction systématique de l'écart jour/nuit.

Ce résultat est cohérent avec les analyses précédentes :

- l'augmentation significative des **températures minimales (TNAV)**,
- l'augmentation parallèle des **températures maximales (TXAV)**,
- et la forte hausse des indicateurs liés aux **chaleurs nocturnes** (TNHT, TR).

L'évolution du régime thermique apparaît ainsi dominée par un **déplacement global vers des températures plus élevées**, plutôt que par une transformation du cycle thermique journalier. Cette stabilité relative de l'amplitude thermique n'atténue toutefois en rien les impacts du réchauffement, dans la mesure où l'élévation simultanée des températures de jour et de nuit contribue à un **stress thermique accru et plus continu**, en particulier lors des épisodes de chaleur persistante. Si l'amplitude thermique journalière ne montre pas de tendance marquée, l'évolution des températures minimales interroge directement la persistance des conditions froides, analysée à travers l'indicateur du nombre de jours de gel.

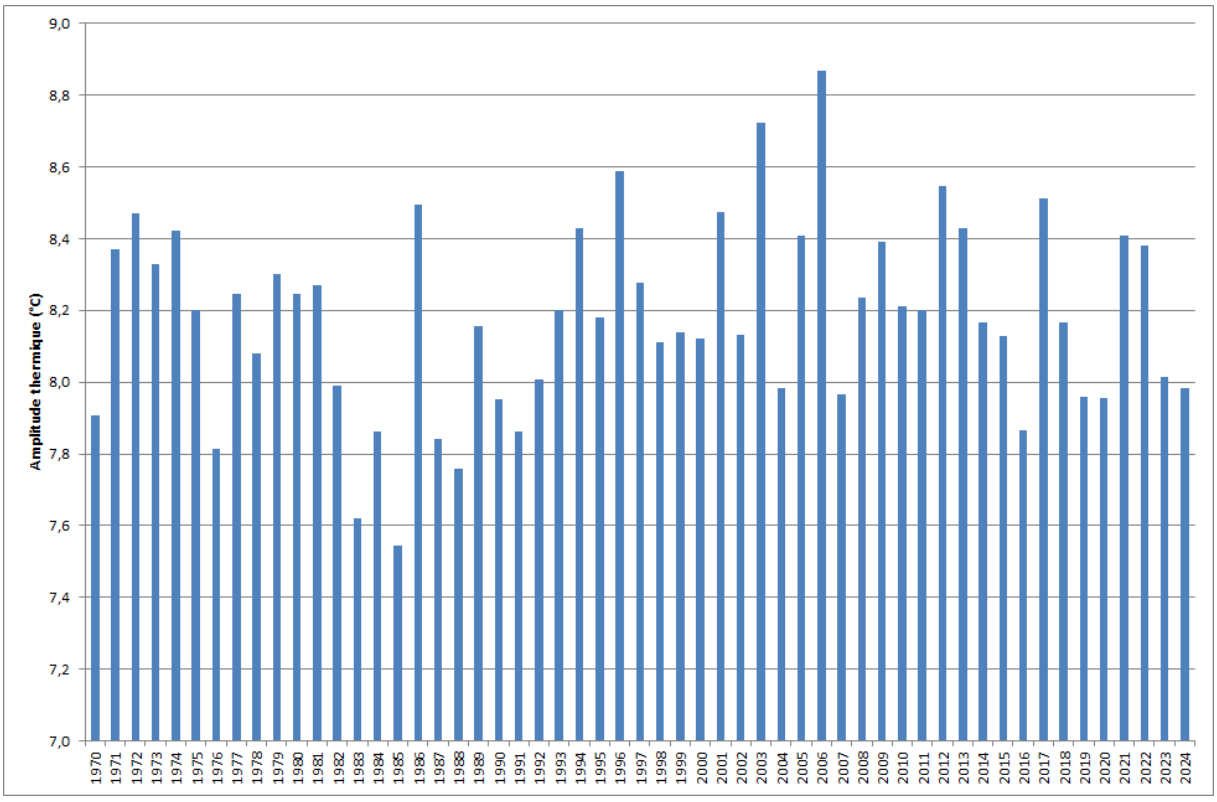


Figure 11 – TRAV Amplitude thermique journalière (°C) (mailles Drias 4950, 4951, 4807 et 4808)

3.2.5.10 TNFD – Nombre de jours de gel

L'analyse de l'évolution du **nombre annuel de jours de gel** (TNFD *Nombre de jours pour lesquels la température minimale journalière est inférieure à 0 °C)* sur la période **1970–2024** met en évidence une **forte variabilité interannuelle**, sans tendance statistiquement significative au sens du test de Mann-Kendall (fig.12). Malgré un contexte général de réchauffement marqué des températures moyennes et minimales, cet indicateur ne présente pas de diminution monotone ou régulière sur la période étudiée.

Les valeurs annuelles de TNFD s'échelonnent entre **environ 5 et près de 40 jours de gel par an**, avec une moyenne de l'ordre de **16,5 jours** et un écart-type relativement élevé (**≈ 8,3 jours**), traduisant une grande sensibilité de cet indicateur aux conditions hivernales particulières. Certaines années des décennies 1970 et 1980 présentent des hivers rigoureux, avec des nombres de jours de gel supérieurs à 25–30 jours, tandis que des valeurs plus faibles sont observées au cours de certaines années des décennies 1990 et 2000.

Toutefois, le graphique montre également que des **années récentes peuvent encore présenter un nombre élevé de jours de gel**, y compris dans la décennie 2020, ce qui contribue à l'absence de tendance significative sur l'ensemble de la période. Ce comportement contraste avec les indicateurs de chaleur, dont l'évolution est plus nette et statistiquement robuste. Cette absence de tendance ne remet pas en cause le réchauffement observé, mais souligne que :

- les **événements de froid n'ont pas disparu** du climat local,
- leur occurrence reste fortement dépendante de la variabilité interannuelle et des configurations atmosphériques hivernales,
- et que le réchauffement se manifeste davantage par une **augmentation de la chaleur extrême et des températures nocturnes** que par une suppression totale des conditions de gel.

Dans un territoire méditerranéen comme celui des gorges du Gardon, cet élément est particulièrement important pour les **écosystèmes**, l'**agriculture** et certaines infrastructures, car il implique la coexistence d'un stress thermique estival croissant et de **risques hivernaux encore bien présents**.

TNFD illustre bien que le changement climatique ne se traduit pas par une simple disparition du froid, mais par une **recomposition du régime thermique**, caractérisée par :

- une hausse rapide et significative des températures moyennes, maximales et minimales,
- une augmentation marquée des chaleurs nocturnes et des vagues de chaleur,
- et le maintien d'une variabilité hivernale suffisante pour générer encore des épisodes de gel.

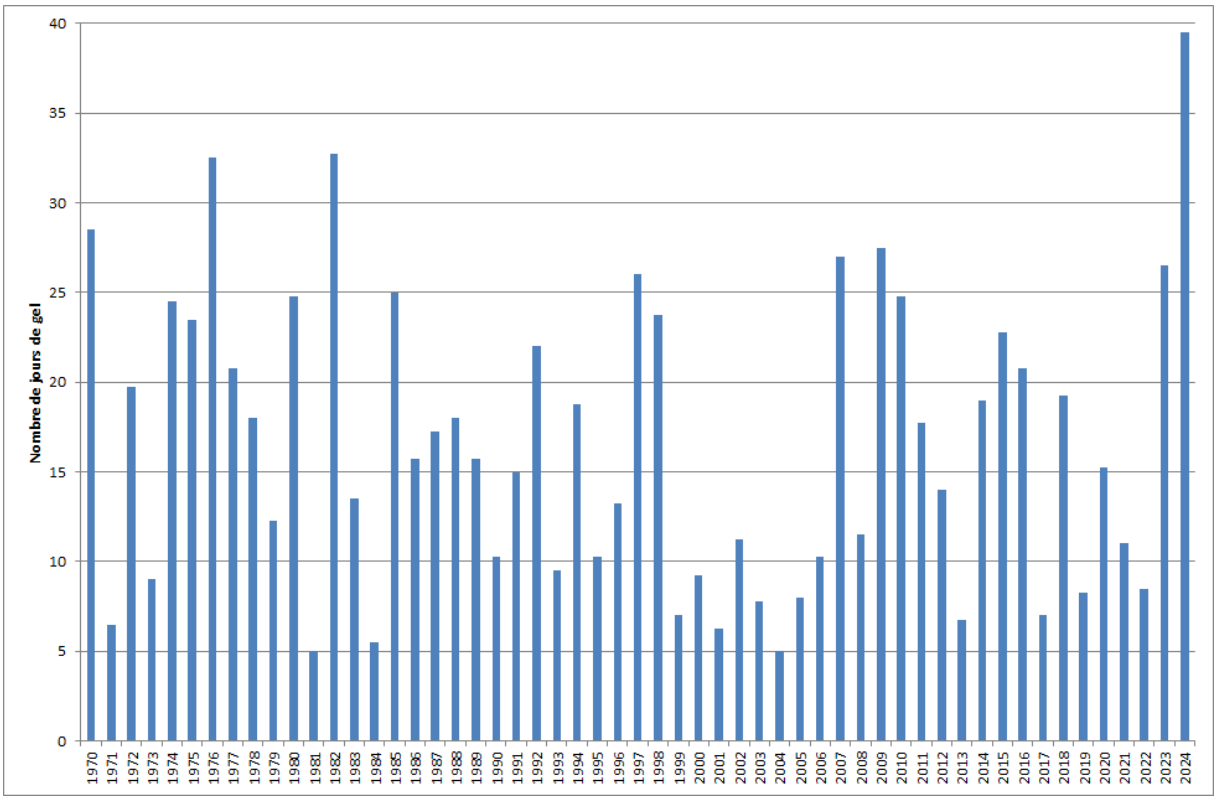


Figure 12 – TNFD Nombre de jours de gel (mailles Drias 4950, 4951, 4807 et 4808)

3.2.5.11 Synthèse intermédiaire – Évolution des températures et des extrêmes thermiques

L'analyse des indicateurs thermiques sur la période **1970–2024** met en évidence une **évolution profonde et cohérente du régime thermique** sur le territoire de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon. Les résultats convergent vers un constat clair : le changement climatique se manifeste avant tout par une **augmentation significative des températures et de la fréquence, de l'intensité et de la persistance des situations de chaleur**, tandis que les marqueurs du froid évoluent de manière plus contrastée.

Les températures moyennes, minimales et maximales journalières (TAV, TNAV, TXAV) présentent toutes des **tendances positives statistiquement significatives**, confirmant un réchauffement généralisé. Cette hausse concerne à la fois les températures diurnes et nocturnes, traduisant un déplacement global du climat local vers des conditions plus chaudes, sans modification majeure de l'amplitude thermique journalière.

Les indicateurs d'extrêmes chauds révèlent toutefois une transformation plus marquée encore. L'augmentation significative :

- du nombre de **jours anormalement chauds (TXND)**,
- du nombre de **nuits anormalement chaudes (TNHT)**,
- du nombre de **nuits tropicales (TR)**,
- et du nombre de **jours appartenant à des vagues de chaleur (TXHWD)**,

témoignent non seulement d'une intensification de la chaleur, mais surtout d'une **accumulation et d'une persistance accrues du stress thermique**, en particulier depuis le début des années 2000.

Les années récentes se distinguent par des valeurs élevées, parfois exceptionnelles, illustrant l'installation progressive d'un nouveau régime thermique caractérisé par des épisodes chauds plus longs, plus fréquents et plus difficiles à supporter, notamment la nuit.

À l'inverse, certains indicateurs fondés sur des seuils fixes, comme le **nombre de jours de fortes chaleurs (TX35)**, ne présentent pas de tendance statistiquement significative sur l'ensemble de la période. Ce résultat souligne l'intérêt de recourir à une **palette complémentaire d'indicateurs**, intégrant à la fois des seuils absolus et des références climatologiques relatives, pour appréhender finement les évolutions en cours.

Enfin, l'analyse du **nombre de jours de gel (TNFD)** montre que les conditions froides n'ont pas disparu du territoire. La forte variabilité interannuelle et l'absence de tendance significative rappellent que le réchauffement climatique ne se traduit pas par une suppression linéaire du froid, mais par une **recomposition du régime thermique**, où coexistent encore des hivers ponctuellement rigoureux et des étés de plus en plus contraignants.

Dans leur ensemble, ces résultats mettent en évidence une **asymétrie marquée entre la dynamique de la chaleur et celle du froid**. Le changement climatique observé sur le territoire de la Réserve de biosphère se traduit avant tout par une **accentuation des extrêmes chauds**, en particulier nocturnes et persistants, constituant un enjeu majeur pour la santé humaine, les écosystèmes, les ressources naturelles et les activités socio-économiques locales. Et si l'évolution des températures et des extrêmes thermiques constitue un signal fort et cohérent du changement climatique, l'analyse des précipitations appelle une lecture plus nuancée, marquée par une forte variabilité interannuelle et des évolutions moins systématiques.

3.2.6 Les indicateurs de précipitations

3.2.6.1 Cumul annuel des précipitations (RR)

L'analyse du **cumul annuel des précipitations (RR : s***omme annuelle des précipitations, en mm)* sur la période **1970–2024** met en évidence une **forte variabilité interannuelle**, caractéristique du climat méditerranéen, sans tendance statistiquement significative au sens du test de Mann-Kendall (fig. 13). Malgré un contexte de réchauffement thermique marqué, l'évolution des cumuls annuels ne révèle pas de diminution ou d'augmentation monotone sur l'ensemble de la période étudiée.

Les cumuls annuels observés s'échelonnent entre environ **440 mm** et plus de **1 100 mm**, avec une moyenne proche de **800 mm** et un écart-type élevé (≈ **170 mm**), traduisant une alternance marquée d'années sèches et humides. Le graphique montre clairement la coexistence, sur l'ensemble de la série, d'années très déficitaires et d'années très arrosées, y compris dans les décennies récentes.

Certaines périodes se distinguent par des séquences relativement humides (années 1970, fin des années 1990, début des années 2000, années 2010–2020), tandis que d'autres sont marquées par des déficits prononcés, notamment au milieu des années 1990 et au milieu des années 2000, avec plusieurs années présentant des cumuls inférieurs à **600 mm**.

L'absence de tendance significative sur les cumuls annuels ne signifie toutefois pas une stabilité du régime pluviométrique. Elle indique plutôt que le changement climatique ne se traduit pas, à ce stade, par une modification nette du volume annuel de précipitations, mais par une **reconfiguration potentielle de leur répartition temporelle**, de leur intensité et de leur saisonnalité, aspects qui seront explorés à travers les indicateurs complémentaires.

Dans ce contexte, l'évolution des précipitations apparaît fondamentalement différente de celle des températures. Là où le signal thermique est clair, continu et statistiquement robuste, le signal pluviométrique demeure **plus bruité**, dominé par la variabilité naturelle et les épisodes extrêmes. Cette dissociation entre chaleur et précipitations constitue un trait majeur du changement climatique en climat méditerranéen, avec des implications importantes pour la gestion de l'eau, les écosystèmes et les activités humaines. L'analyse des cumuls annuels met ainsi en évidence une forte variabilité sans tendance nette, invitant à examiner plus finement la fréquence des jours de pluie et l'intensité des épisodes précipitants.

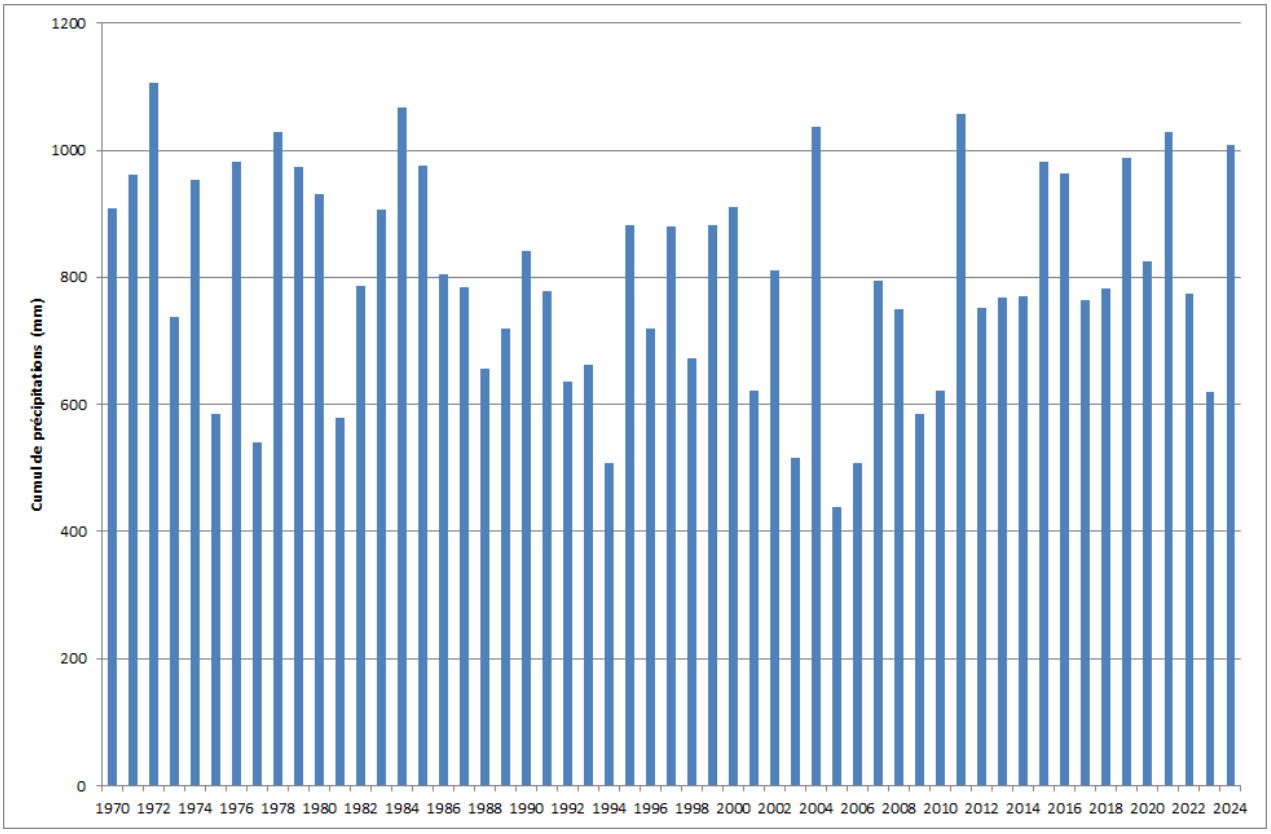


Figure 13 – RR Cumul annuel de précipitations (mm) (mailles Drias 4950, 4951, 4807 et 4808)

3.2.6.2 Nombre de jours de pluie (RR1MM)

L'évolution du **nombre annuel de jours de pluie** (RR1MM *Nombre annuel de jours avec une précipitation supérieure ou égale à 1 mm)* sur la période **1970–2024** met en évidence une **variabilité interannuelle marquée**, sans tendance statistiquement significative selon le test de Mann-Kendall (fig. 14). Cet indicateur oscille globalement entre **environ 45 et 100 jours de pluie par an**, avec une moyenne proche de **73 jours** et un écart-type d'environ **10 jours**, traduisant une alternance régulière d'années plus ou moins arrosées en termes de fréquence des précipitations.

Le graphique montre que les décennies 1970 et 1980 présentent des valeurs relativement élevées et assez stables, souvent comprises entre **70 et 85 jours de pluie par an**, avec quelques années exceptionnellement humides. À partir des années 1990, la variabilité interannuelle demeure importante, sans qu'apparaisse une diminution ou une augmentation nette et continue du nombre de jours de pluie.

Certaines années récentes se distinguent par des valeurs plus faibles, parfois inférieures à **60 jours de pluie**, tandis que d'autres présentent au contraire des fréquences élevées, comparables à celles observées dans les décennies antérieures. Cette coexistence d'années sèches et humides tout au long de la période contribue à l'absence de tendance statistiquement significative sur l'ensemble de la série.

L'analyse de RR1MM confirme ainsi que, malgré le réchauffement marqué observé sur les températures, la **fréquence annuelle des jours de pluie ne présente pas de signal clair d'évolution** sur le territoire de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon. Comme pour les cumuls annuels, le régime pluviométrique reste dominé par une forte variabilité naturelle, typique des climats méditerranéens.

Toutefois, la stabilité apparente du nombre de jours de pluie ne préjuge pas de l'évolution des **modalités de précipitation**. Elle invite à examiner plus finement :

- l'intensité des épisodes pluvieux,
- la concentration des précipitations sur un nombre réduit de jours,
- et la succession de périodes sèches plus longues,

Ce sont des aspects essentiels pour comprendre les impacts hydrologiques et écologiques du changement climatique. En effet, la relative stabilité du nombre de jours de pluie masque toutefois des évolutions possibles de l'intensité des précipitations, analysées à travers les indicateurs de fortes pluies et de séquences pluvieuses ou sèches.

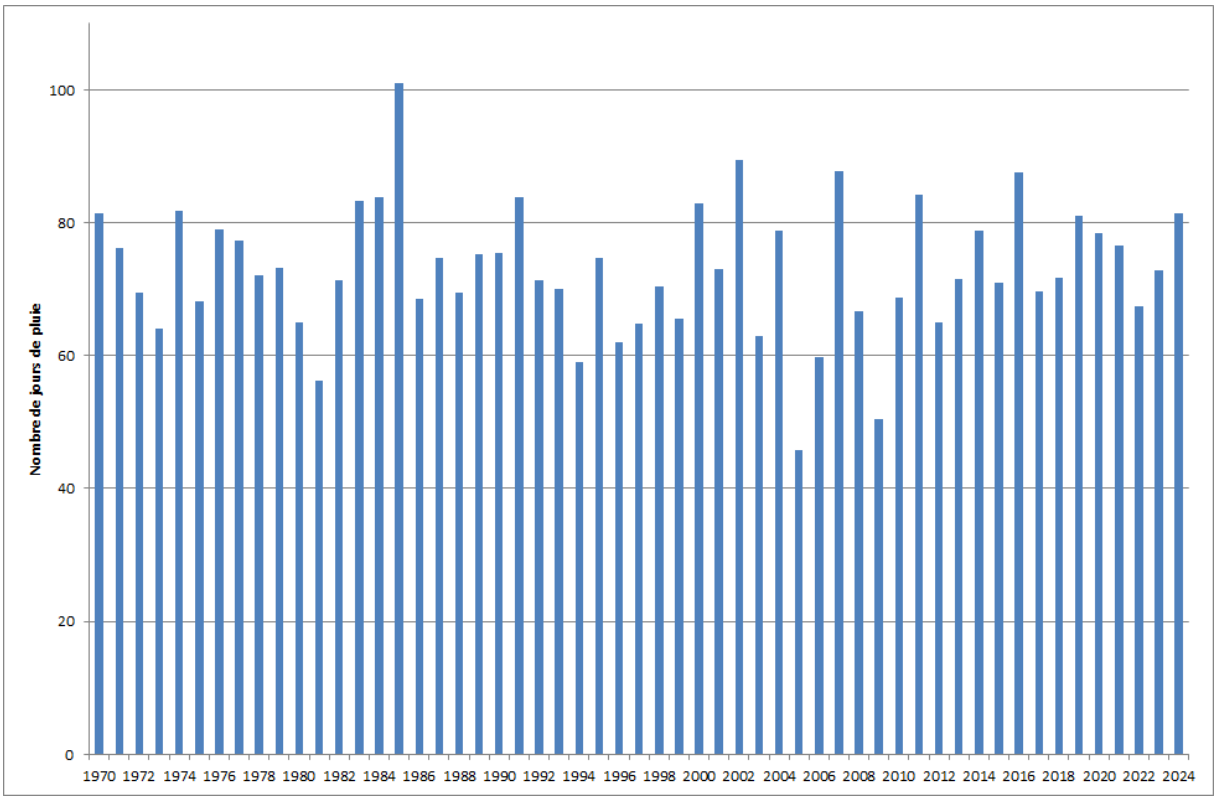


Figure 14 – RR1mm Nombre annuel de jours avec une précipitation supérieure ou égale à 1 mm (mailles Drias 4950, 4951, 4807 et 4808)

3.2.6.3 Nombre de jours de fortes précipitations (PN20MM)

L'analyse du **nombre annuel de jours de fortes précipitations** (PN20MM Nombre *annuel de jours avec des précipitations supérieures à 20 mm)* sur la période **1970–2024** met en évidence une **variabilité interannuelle marquée**, sans tendance statistiquement significative selon le test de Mann-Kendall (fig. 15). Cet indicateur, qui renseigne sur la fréquence des épisodes pluvieux intenses, oscille globalement entre **environ 3 et 19 jours par an**, avec une moyenne proche de **12 jours**.

Le graphique montre une alternance prononcée d'années caractérisées par de nombreux épisodes de fortes précipitations et d'années beaucoup plus calmes, cette variabilité étant présente sur l'ensemble de la période étudiée. Les décennies 1970 et 1980 présentent fréquemment des valeurs relativement élevées, souvent comprises entre **12 et 16 jours de fortes précipitations par an**, tandis que certaines années du début des années 2000 se distinguent par des valeurs plus faibles, parfois inférieures à **6–7 jours**.

À partir des années 2010, plusieurs années récentes présentent à nouveau des valeurs élevées, atteignant ou dépassant **15 à 18 jours de fortes précipitations**, illustrant le retour ponctuel d'épisodes intenses. Toutefois, cette augmentation n'est ni régulière ni suffisamment monotone pour faire émerger une tendance statistiquement significative sur l'ensemble de la période.

L'absence de tendance nette sur PN20MM suggère que le changement climatique ne se traduit pas, à ce stade, par une augmentation systématique de la **fréquence annuelle** des fortes précipitations sur le territoire de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon. En revanche, la persistance d'années à forte occurrence d'épisodes intenses souligne le rôle central de la **variabilité interannuelle** et des configurations atmosphériques méditerranéennes propices aux pluies intenses.

Cet indicateur doit donc être interprété conjointement avec ceux relatifs à la **concentration des précipitations dans le temps** et à la **succession des périodes humides et sèches**, afin d'appréhender pleinement les enjeux hydrologiques et les risques associés (ruissellement, érosion, crues rapides). Si la fréquence des jours de fortes précipitations ne présente pas d'évolution statistiquement significative, l'organisation temporelle des épisodes pluvieux constitue un autre facteur déterminant, analysé à travers la durée des séquences pluvieuses et des périodes sèches.

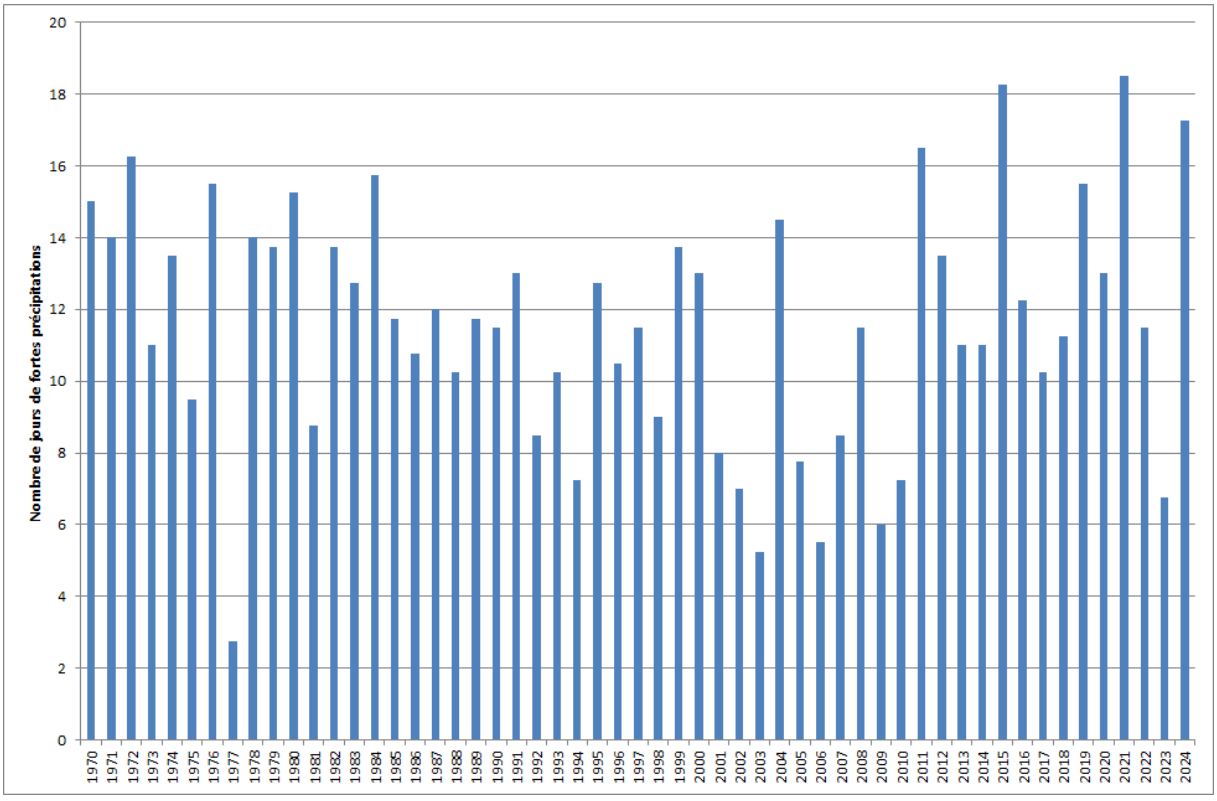


Figure 15 – PN20MM Nombre de jours de fortes précipitations (mailles Drias 4950, 4951, 4807 et 4808)

3.2.6.4 Nombre maximum de jours pluvieux consécutifs (PXCWD)

L'évolution du **nombre maximum de jours pluvieux consécutifs** (PXCWD *Durée maximale annuelle d'une séquence de jours consécutifs avec des précipitations ≥ 1 mm)* sur la période **1970–2024** met en évidence une **variabilité interannuelle modérée**, sans tendance statistiquement significative selon le test de Mann-Kendall (fig. 16). Cet indicateur renseigne sur la capacité des épisodes pluvieux à s'inscrire dans la durée, paramètre déterminant pour les processus de saturation des sols, de ruissellement et de recharge hydrique.

Les valeurs annuelles de PXCWD varient généralement entre 3 et 9 jours consécutifs, avec une moyenne proche de 5 jours. Les valeurs les plus élevées, proches de 8 à 9 jours, apparaissent ponctuellement, sans continuité temporelle marquée, aussi bien dans les premières décennies de la série que dans les années récentes.

Le graphique montre que les séquences pluvieuses longues restent relativement rares, la majorité des années étant caractérisée par des durées maximales comprises entre 4 et 6 jours consécutifs. Aucune évolution nette vers un allongement ou un raccourcissement systématique des épisodes pluvieux n'est observable sur l'ensemble de la période étudiée.

Cette stabilité apparente suggère que le changement climatique ne se traduit pas, à ce stade, par une modification claire de la persistance des épisodes pluvieux sur le territoire de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon. Néanmoins, même en l'absence de tendance statistique, la survenue ponctuelle de séquences pluvieuses longues peut contribuer à des situations hydrologiques critiques, en particulier lorsqu'elles se combinent à des sols déjà humides ou à des épisodes de pluies intenses.

L'indicateur PXCWD doit ainsi être interprété en articulation avec les indicateurs d'intensité (PN20MM) et de cumul (RR), afin d'appréhender la diversité des configurations pluviométriques susceptibles d'affecter le territoire. En miroir de la persistance des épisodes pluvieux, la durée des périodes sans pluie constitue un autre élément structurant du régime hydrologique, analysé à travers l'indicateur de période de sécheresse.

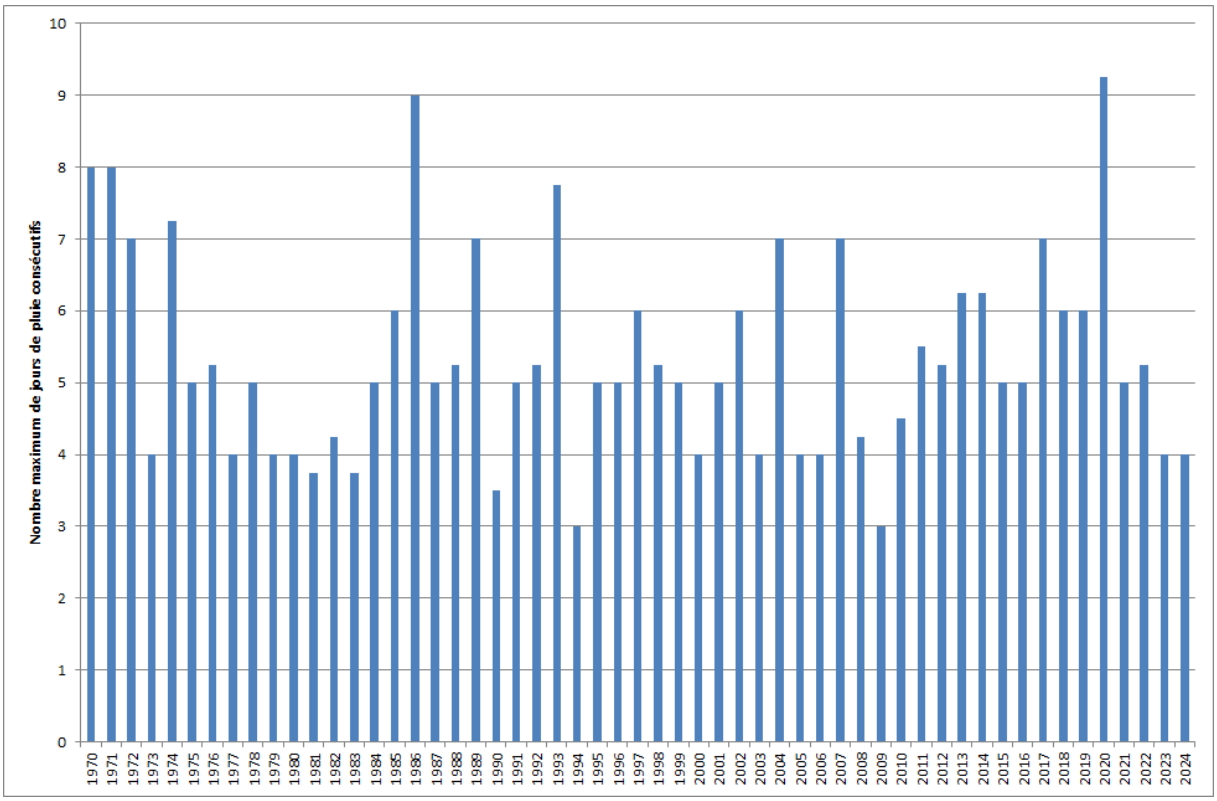


Figure 16 - PXCWD Nombre maximum de jours pluvieux consécutifs (mailles Drias 4950, 4951, 4807 et 4808)

3.2.6.5 Durée maximale des périodes sèches (PXCDD)

L'analyse de la durée maximale annuelle des périodes sèches (PXCDD *Nombre maximal annuel de jours consécutifs avec des précipitations inférieures à 1 mm*) sur la période 1970–2024 met en évidence une variabilité interannuelle importante, sans tendance statistiquement significative selon le test de Mann-Kendall (fig. 17). Cet indicateur, qui renseigne sur la persistance des périodes sans pluie, constitue un élément clé pour appréhender les dynamiques de sécheresse et les contraintes hydriques pesant sur les milieux et les usages.

Les valeurs annuelles de PXCDD varient globalement entre environ 18 et plus de 50 jours consécutifs, avec une moyenne proche de 32 à 33 jours et un écart-type d'environ 8 jours, traduisant une alternance marquée d'années à sécheresse plus ou moins prolongée. Plusieurs années se distinguent par des périodes sèches longues, dépassant 40 voire 50 jours consécutifs, tant dans les décennies anciennes que dans les périodes plus récentes.

Le graphique montre que les périodes de sécheresse prolongée ne constituent pas un phénomène nouveau sur le territoire, mais qu'elles demeurent structurellement présentes tout au long de la série. L'absence de tendance statistiquement significative indique que leur durée maximale annuelle ne s'allonge pas de manière monotone sur l'ensemble de la période étudiée, malgré le réchauffement climatique observé.

Toutefois, cette stabilité statistique ne doit pas masquer l'importance fonctionnelle de cet indicateur. Dans un contexte de hausse marquée des températures et d'augmentation des extrêmes chauds, des périodes sèches de durée comparable à celles du passé peuvent aujourd'hui générer des impacts plus sévères, en raison :

- d'une évapotranspiration accrue,
- d'un assèchement plus rapide des sols,
- et d'un stress hydrique renforcé pour les écosystèmes, l'agriculture et les ressources en eau.

PXCDD souligne ainsi que le changement climatique agit moins par une transformation simple de la durée des sécheresses que par une amplification de leurs effets, liée à l'élévation des températures et à la répétition des épisodes de chaleur.

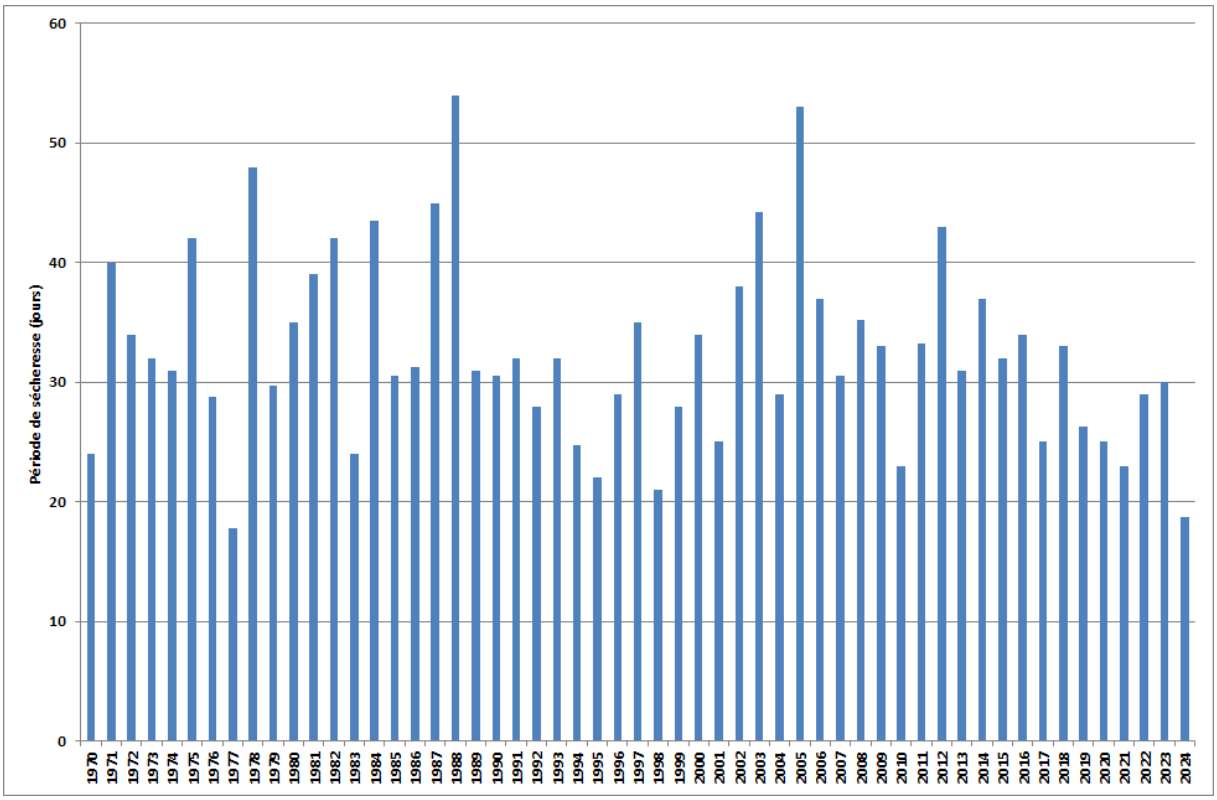


Figure 17 – PXCDD Durée maximale des périodes sèches (mailles Drias 4950, 4951, 4807 et 4808)

3.2.6.6 Synthèse intermédiaire – Évolution des précipitations et périodes sèches

Avec RR, RR1MM, PN20MM, PXCWD et PXCDD, l'analyse montre que :

- les **cumuls annuels**, la **fréquence des jours de pluie**, l'**intensité des précipitations** et la **durée des séquences humides ou sèches** ne présentent pas de tendances statistiques robustes sur la période 1970–2024 ;
- le régime pluviométrique reste dominé par une **forte variabilité interannuelle**, typique du climat méditerranéen ;
- les enjeux climatiques liés à l'eau résultent principalement de la **combinaison entre cette variabilité pluviométrique et l'augmentation marquée des températures**, plutôt que d'une évolution nette des précipitations elles-mêmes.

3.2.7 Synthèse – Évolution conjointe des températures et des précipitations (1970–2024)

L'analyse conjointe des variables thermiques et pluviométriques sur la période **1970–2024** met en évidence une évolution climatique contrastée sur le territoire de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon, caractérisée par un **signal thermique net et robuste**, et un **signal pluviométrique plus diffus**, dominé par la variabilité interannuelle.

- **Un réchauffement marqué et statistiquement significatif**

Les indicateurs thermiques analysés témoignent de manière cohérente d'un **réchauffement significatif du climat local**. Les températures moyenne, minimale et maximale journalières (TAV, TNAV, TXAV) présentent toutes des **tendances positives statistiquement significatives**, confirmées par les tests de Mann-Kendall et les pentes de Sen (tableau 2). Ce réchauffement s'exprime de manière continue sur l'ensemble de la période étudiée, avec une accentuation nette à partir des années 1990–2000.

Variable	Descriptif	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	Tau de Kendall	Pente de Sen
TAV	Température moyenne journalière (°C)	13,0	15,9	14,7	0,7	0,305	0,021
TNAV	Température minimale journalière (°C)	9,1	11,9	10,6	0,6	0,299	0,019
TXAV	Température maximale journalière (°C)	16,8	20,2	18,8	0,8	0,296	0,022
TX35	Nombre de jours de fortes chaleur (TX>35°C) (jour(s))	0,0	20,8	3,1	4,5	non significative	
TXND	Nombre de jours anormalement chauds T>Tx_ref + 5°C (jour(s))	6,0	63,8	32,0	14,6	0,331	0,457
TNHT	Nombre de nuits anormalement chaudes T>Tn_ref + 5°C (jour(s))	3,0	34,8	17,0	8,4	0,317	0,25
TR	Nombre de nuits tropicales Tn > 20°C (jour(s))	6,3	66,8	33,3	15,0	0,257	0,364
TNFD	Nombre de jours de gel (jour(s))	5,0	39,5	16,5	8,3	non significative	
TXHWD	Nombre de jours d'une vague de chaleur T>Tx_ref + 5°C dans une séquence de plus de 5 jours consécutifs (jour(s))	0,0	36,5	6,1	8,4	0,261	0,029
TRAV	Amplitude thermique journalière (°C)	7,5	8,9	8,2	0,3	non significative	
RR	Cumul de précipitation (mm)	438,4	1105,6	802,3	169,2	non significative	
RR1MM	Nombre de jours de pluie (jour(s))	45,8	101,0	72,9	9,8	non significative	
PN20MM	Nombre de jours de fortes précipitations RR> 20 mm (jour(s))	2,8	18,5	11,6	3,4	non significative	
PXCWD	Nombre maximum de jours pluvieux consécutifs RR>1mm (jour(s))	3,0	9,3	5,3	1,4	non significative	
PXCDD	Période de sécheresse Nombre de jours consécutifs pour lesquels RR<1mm (jour(s))	17,8	54,0	32,5	7,9	non significative	

Tableau 2 – Synthèse des paramètres de position des variables et tendances associées

Au-delà des moyennes, les indicateurs d'extrêmes thermiques révèlent une transformation profonde du régime climatique estival :

- le nombre de jours anormalement chauds (TXND) et de nuits anormalement chaudes (TNHT) augmente fortement ;
- les nuits tropicales (TR) deviennent plus fréquentes, traduisant une dégradation du rafraîchissement nocturne ;
- les jours appartenant à des vagues de chaleur (TXHWD) montrent une hausse significative, illustrant l'intensification et la structuration des épisodes de chaleur.

En parallèle, le nombre de jours de gel (TNFD) tend à diminuer, bien que sans tendance statistiquement significative sur la période complète, signalant néanmoins une raréfaction des conditions hivernales rigoureuses. L'amplitude thermique journalière (TRAV) reste globalement stable, suggérant que le réchauffement affecte de manière relativement homogène les températures minimales et maximales.

Dans leur ensemble, ces résultats traduisent un basculement progressif vers un climat plus chaud, marqué par une augmentation de la fréquence, de l'intensité et de la durée des extrêmes thermiques, particulièrement en période estivale.

- Des précipitations dominées par la variabilité interannuelle

À l'inverse, les indicateurs pluviométriques analysés (RR, RR1MM, PN20MM, PXCWD, PXCDD) ne présentent pas de tendances statistiques significatives sur la période 1970–2024. Les cumuls annuels, le nombre de jours de pluie, la fréquence des fortes précipitations, ainsi que la durée des séquences humides ou sèches restent caractérisées par une forte variabilité interannuelle, typique du climat méditerranéen.

Les périodes de sécheresse prolongée (PXCDD) et les séquences pluvieuses continues (PXCWD) sont observées tout au long de la série, sans évolution monotone identifiable. De même, les années à forts cumuls pluviométriques alternent avec des années nettement plus sèches, sans signal directionnel clair.

Cette absence de tendance ne signifie pas une absence d'enjeu. Elle souligne au contraire que le régime des précipitations reste hautement irrégulier, exposant le territoire à une alternance persistante d'années humides et sèches.

- Une combinaison défavorable : chaleur accrue et précipitations inchangées

L'élément central mis en évidence par cette analyse réside dans la dissociation croissante entre températures et précipitations. Le réchauffement marqué du climat local, combiné à l'absence de compensation pluviométrique claire, conduit à une augmentation structurelle de l'aridité fonctionnelle du territoire.

Concrètement, des périodes sèches de durée comparable à celles observées par le passé génèrent aujourd'hui des impacts plus importants, du fait :

- d'une évapotranspiration accrue,

- d'un assèchement plus rapide des sols,
- d'une pression renforcée sur les ressources en eau,
- et d'un stress hydrique accru pour les écosystèmes, l'agriculture et les usages humains.

Cette évolution renforce la vulnérabilité du territoire face aux sécheresses, aux feux de forêts et aux tensions sur l'eau, même en l'absence d'une diminution nette des précipitations.

- Enseignements pour la suite de l'analyse

Cette synthèse intermédiaire met en évidence que le changement climatique sur le territoire de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon s'exprime avant tout par un changement du régime thermique, qui agit comme un facteur amplificateur des aléas hydriques existants.

Elle constitue ainsi un socle essentiel pour :

- l'analyse prospective des trajectoires climatiques futures,
- l'étude du confort thermique et des impacts sur la santé,
- et l'identification des vulnérabilités territoriales à intégrer dans les stratégies d'adaptation.

3.3 Analyse prospective des variables climatiques à partir des projections DRIAS

Après l'analyse des évolutions climatiques observées sur la période récente, cette section vise à explorer les trajectoires climatiques futures du territoire de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon, à partir des projections issues du portail DRIAS 2020 (Météo-France). L'objectif est d'anticiper les changements attendus à moyen et long terme, afin d'éclairer les réflexions en matière d'adaptation et de gestion durable du territoire.

L'analyse prospective repose sur une comparaison entre trois périodes climatiques distinctes :

- une période de référence (1951–2005), représentative du climat dit « historique »,
- un horizon H2 (2041–2070), correspondant au milieu du XXIe siècle,
- un horizon H3 (2070–2099), représentant la fin du siècle.

Les projections mobilisées sont issues du même cadre de modélisation que celui utilisé pour l'analyse historique, garantissant ainsi la cohérence méthodologique et la comparabilité des résultats. Elles s'appuient sur le modèle global CNRM-CM5, régionalisé par le modèle CNRM-ALADIN63 et corrigé par la méthode ADAMONT, spécifiquement développée pour les territoires français. Cette étude est menée pour le scénario de changement climatique RCP4.5 qui correspond au scénario avec une politique climatique visant à stabiliser les concentrations en CO_2 (graphiques « a »). D'une manière complémentaire, les projections avec le scénario RCP8.5 qui simule un forçage radiatif sans politique climatique mondiale sont également fournies à titre comparatif (graphiques « b »).

L'analyse est conduite à partir de **17 variables climatiques normalisées**, couvrant l'ensemble des dimensions thermiques, pluviométriques et hydriques du climat (tableau 3). Ces indicateurs incluent à la fois :

- des variables de **température moyenne, minimale et maximale**,
- des indicateurs d'**extrêmes thermiques** (jours de forte chaleur, nuits tropicales, vagues de chaleur),
- des variables liées aux **précipitations**, à leur fréquence et à leur intensité,
- ainsi que des indicateurs de **sécheresse météorologique et de bilan hydrique**, tels que la période de sécheresse ou l'évapotranspiration potentielle.

L'ensemble des résultats est analysé de manière comparative entre les périodes de référence, H2 et H3, afin d'identifier :

- l'ampleur des évolutions attendues,
- les éventuelles ruptures ou accélérations des tendances,
- et les variables les plus susceptibles de structurer les vulnérabilités futures du territoire.

Variable	Descriptif
NORTAV	Température moyenne (°C)
NORTNAV	Température minimale (°C)
NORTXAV	Température maximale (°C)
NORTX35	Nombre de jours de forte chaleur
NORTXND	Nombre de jours anormalement chauds
NORTNHT	Nombre de nuits anormalement chaudes
NORTR	Nombre de nuits tropicales
NORTNFD	Nombre de jours de gel
NORTXHWD	Nombre de jours de vague de chaleur
NORTRAV	Amplitude thermique (°C)
NORRR	Cumul de précipitations (mm)
NORRR1MM	Nombre de jours de pluie
NORPN20MM	Nombre de jours de fortes précipitations
NORPXCWD	Nombre maximum de jours de pluie consécutifs
NORPXCDD	Période de sécheresse (jours)
NORTPSPI	Temps passé en sécheresse météorologique
NORETPC	Cumul de l'évapotranspiration potentielle (méthode Hargreaves)

Tableau 3- variables étudiées dans le cadre de l'analyse prospective

Cette approche prospective ne vise pas à produire une prévision déterministe, mais à **caractériser des trajectoires climatiques plausibles**, en cohérence avec l'état des connaissances scientifiques actuelles. Elle constitue un socle essentiel pour la suite du cahier climatique, en permettant de relier les dynamiques climatiques futures aux enjeux écologiques, socio-économiques et territoriaux propres aux gorges du Gardon.

3.3.1. Évolution prospective de la température moyenne (NORTAV)

L'évolution prospective de la **température moyenne** sur le territoire de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon met en évidence un **réchauffement marqué et généralisé**, quelle que soit la saison, dès l'horizon du milieu du XXIe siècle, et s'accentuant nettement à l'horizon de fin de siècle (fig. 18a et 18b). En effet, la comparaison entre la période de référence (1951–2005), l'horizon **H2 (2041–2070)** et l'horizon **H3 (2070–2099)** révèle une **augmentation progressive des températures moyennes mensuelles**, avec une intensité variable selon les saisons.

Les mois hivernaux (janvier à mars) connaissent une hausse sensible mais modérée des températures moyennes. En janvier, la température moyenne passe d'environ **5,9 °C** sur la période de référence à **7,5 °C** à l'horizon H2, puis **8,1 °C** à l'horizon H3. Des évolutions comparables sont observées en février et en mars, traduisant un adoucissement hivernal marqué, susceptible de modifier la fréquence et l'intensité des épisodes de froid sans pour autant les faire disparaître. Le réchauffement devient plus prononcé au printemps. Entre avril et juin, l'augmentation des températures moyennes atteint déjà **+2 à +3 °C** à l'horizon H3 par rapport à la période de référence. Cette élévation précoce des températures constitue un signal fort pour les cycles biologiques, agricoles et hydrologiques, en favorisant un démarrage plus anticipé de la saison chaude.

Les écarts les plus marqués concernent la période estivale. En juillet et août, les températures moyennes atteignent respectivement **environ 26,5 à 26,7 °C** à l'horizon H3, contre **24,0 à 24,6 °C** sur la période de référence. Le réchauffement est déjà très net à l'horizon H2, suggérant une **intensification durable de la chaleur estivale** dès le milieu du siècle. Ces valeurs moyennes élevées traduisent mécaniquement une augmentation de la fréquence et de la durée des situations de forte chaleur, déjà mises en évidence dans l'analyse historique.

À l'automne, le signal de réchauffement reste marqué. En septembre et octobre, les températures moyennes augmentent de **+2 à +3 °C** entre la période de référence et l'horizon H3, prolongeant la saison chaude bien au-delà de l'été météorologique. Cette extension thermique de l'automne contribue à allonger les périodes de stress thermique et hydrique pour les milieux naturels et les activités humaines. Enfin, les mois de novembre et décembre présentent également une hausse significative des températures moyennes, traduisant une **atténuation progressive des contrastes saisonniers**, sans remise en cause de la structure générale du cycle annuel.

Dans l'ensemble, les projections montrent que le réchauffement futur ne se limite pas à un déplacement uniforme des températures, mais qu'il affecte prioritairement les saisons déjà chaudes, renforçant la contrainte thermique estivale tout en étendant sa durée. Cette évolution constitue un élément structurant des vulnérabilités futures du territoire et prépare les conditions d'un basculement vers un climat de type méditerranéen plus chaud et plus contraignant.

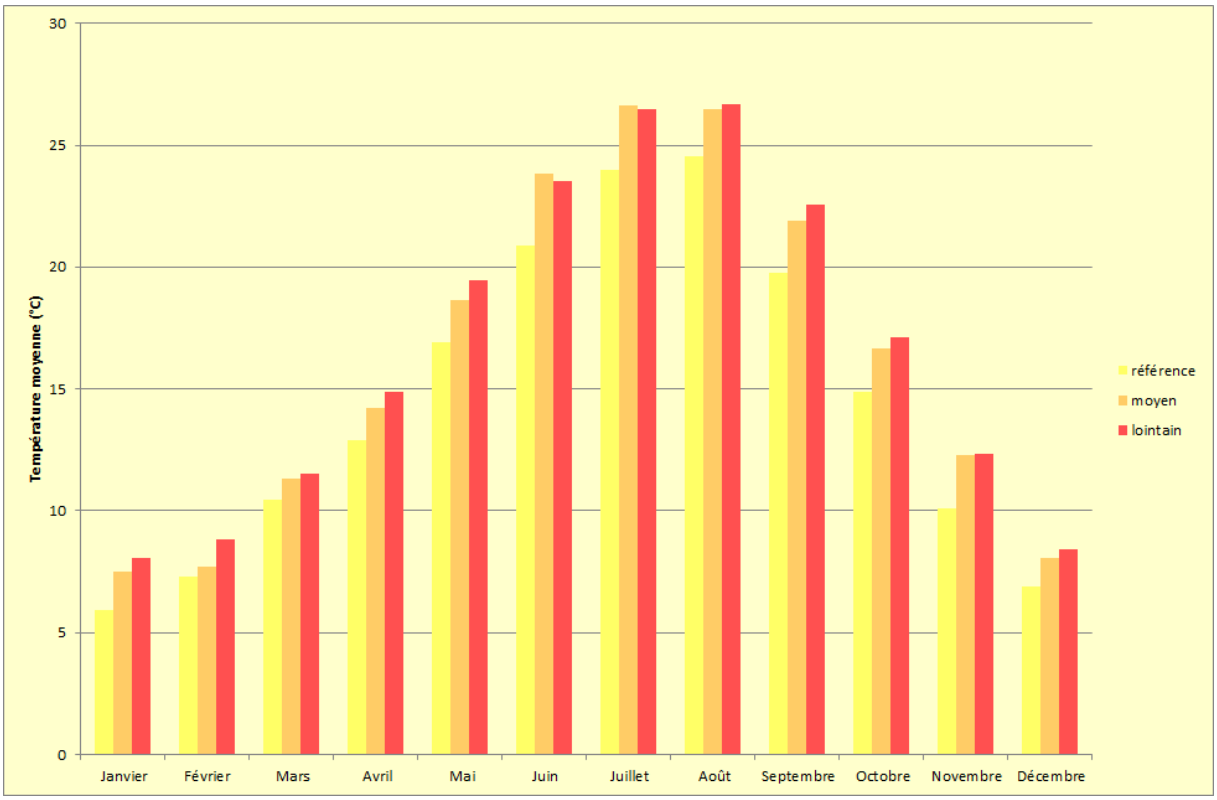


Figure 18a – Températures moyennes mensuelles (NORTAV) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5

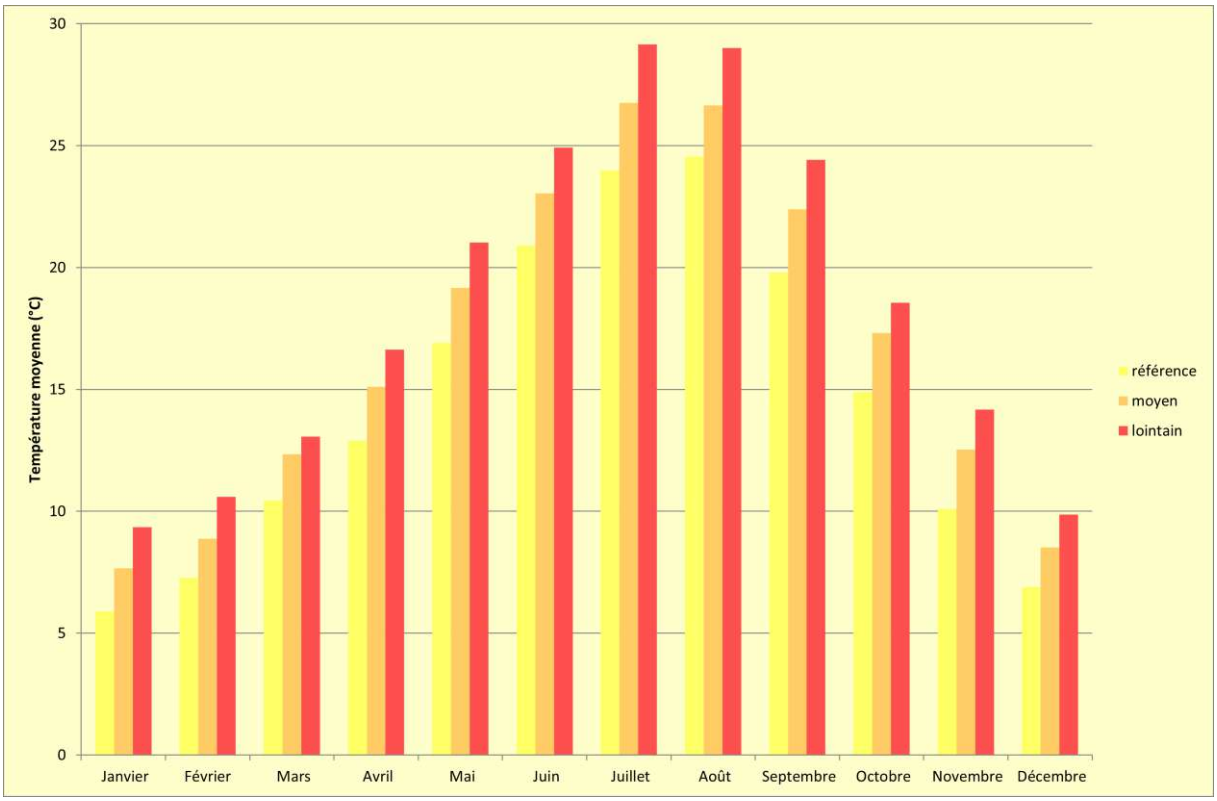


Figure 18b – Températures moyennes mensuelles (NORTAV) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP8.5

3.3.2 Évolution prospective de la température minimale (NORTNAV)

L'analyse prospective des **températures minimales moyennes** met en évidence un signal de réchauffement particulièrement marqué, souvent plus prononcé encore que celui observé pour les températures moyennes (fig. 19a et 19b). Cette évolution constitue un élément central du changement climatique futur sur le territoire de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon, en raison de ses implications directes sur le confort thermique, la santé humaine et le fonctionnement des écosystèmes.

Sur l'ensemble de l'année, les températures minimales augmentent de manière continue entre la période de référence (1951–2005), l'horizon **H2 (2041–2070)** et l'horizon **H3 (2070–2099)**. Cette hausse est observable pour tous les mois, sans exception, traduisant un réchauffement nocturne généralisé.

En hiver, les températures minimales moyennes connaissent une augmentation significative. En janvier, elles passent d'environ **2,7 °C** sur la période de référence à **4,3 °C** à l'horizon H2, puis **4,7 °C** à l'horizon H3. Des évolutions comparables sont observées en février et en décembre. Cet adoucissement hivernal réduit la fréquence des nuits froides, sans toutefois les faire totalement disparaître, ce qui explique la persistance ponctuelle des jours de gel observée dans l'analyse historique.

Au printemps, le réchauffement des températures minimales s'accentue nettement. Entre mars et mai, les températures nocturnes augmentent de **+2 à +3 °C** à l'horizon H3, favorisant un démarrage plus précoce des cycles biologiques et une avancée de la saison de végétation.

Les écarts les plus marqués concernent la période estivale. En juillet et août, les températures minimales moyennes atteignent respectivement **environ 21,5 à 21,7 °C** à l'horizon H3, contre **19,1 à 19,6 °C** sur la période de référence. Ces valeurs traduisent une **généralisation des nuits chaudes**, et une augmentation très probable du nombre de **nuits tropicales**, déjà observée dans la période récente. À l'horizon H3, les températures minimales estivales dépassent durablement le seuil de 20 °C, limitant fortement les capacités de rafraîchissement nocturne.

À l'automne, le signal reste très marqué. En septembre et octobre, les températures minimales augmentent respectivement d'environ **+2,5 à +3 °C** à l'horizon H3, prolongeant la période de contraintes thermiques nocturnes bien au-delà de l'été.

Dans l'ensemble, ces projections montrent que le réchauffement futur affecte de manière particulièrement intense les températures nocturnes. Cette évolution est déterminante pour le territoire, car elle amplifie les effets des vagues de chaleur, accroît la vulnérabilité des populations sensibles et modifie les équilibres écologiques, notamment pour les milieux forestiers et aquatiques. Elle constitue ainsi l'un des leviers majeurs du changement climatique futur dans les gorges du Gardon.



Figure 19a – Températures minimales mensuelles (NORTNAV) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5



Figure 19b – Températures minimales mensuelles (NORTNAV) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP8.5

3.3.3 Évolution prospective de la température maximale (NORTXAV)

L'analyse prospective des **températures maximales moyennes** confirme et amplifie le signal de réchauffement mis en évidence pour les températures moyennes et minimales (fig. 20a et 20b). Elle met en lumière une augmentation marquée des chaleurs diurnes, particulièrement prononcée durant la période estivale, avec des conséquences directes sur le confort thermique, les activités humaines et les écosystèmes du territoire.

Sur l'ensemble de l'année, les températures maximales augmentent de manière systématique entre la période de référence (1951–2005), l'horizon **H2 (2041–2070)** et l'horizon **H3 (2070–2099)**. Cette hausse concerne tous les mois, traduisant un réchauffement diurne généralisé.

En hiver, les températures maximales moyennes progressent de façon notable. En janvier, elles passent d'environ **9,3 °C** sur la période de référence à **10,7 °C** à l'horizon H2, puis **11,4 °C** à l'horizon H3. Des évolutions comparables sont observées en février et décembre, illustrant un adoucissement hivernal diurne, en cohérence avec la diminution progressive des journées froides.

Au printemps, l'augmentation devient plus marquée. Entre mars et mai, les températures maximales gagnent en moyenne **+2 à +3 °C** à l'horizon H3. En mai, elles atteignent environ **24,1 °C**, contre **21,3 °C** sur la période de référence. Ce réchauffement précoce contribue à un allongement de la saison chaude et à une exposition plus précoce des milieux naturels et des activités humaines à des conditions thermiques élevées.

Les évolutions les plus significatives concernent la période estivale. En juillet et août, les températures maximales moyennes atteignent respectivement **31,4 °C** et **31,7 °C** à l'horizon H3, contre **28,8 °C** et **29,5 °C** sur la période de référence. Cette hausse de l'ordre de **+2,5 à +3 °C** traduit une intensification nette des chaleurs estivales, rapprochant durablement les températures maximales moyennes des seuils associés aux fortes chaleurs.

À l'automne, le signal reste marqué. En septembre, les températures maximales passent d'environ **24,6 °C** sur la période de référence à **27,5 °C** à l'horizon H3. En octobre, elles atteignent **21,1 °C**, contre **18,6 °C** auparavant. Ces évolutions témoignent d'un maintien de conditions chaudes tardives, prolongeant la période de stress thermique au-delà de l'été.

Dans l'ensemble, l'évolution des températures maximales souligne une **intensification des chaleurs diurnes**, particulièrement en été, et une extension temporelle des périodes chaudes au printemps et à l'automne. Combinée à l'augmentation des températures minimales, cette dynamique renforce la fréquence et l'intensité des situations de stress thermique, préparant le terrain à une hausse des épisodes de fortes chaleurs et de vagues de chaleur, analysées dans les sections suivantes.

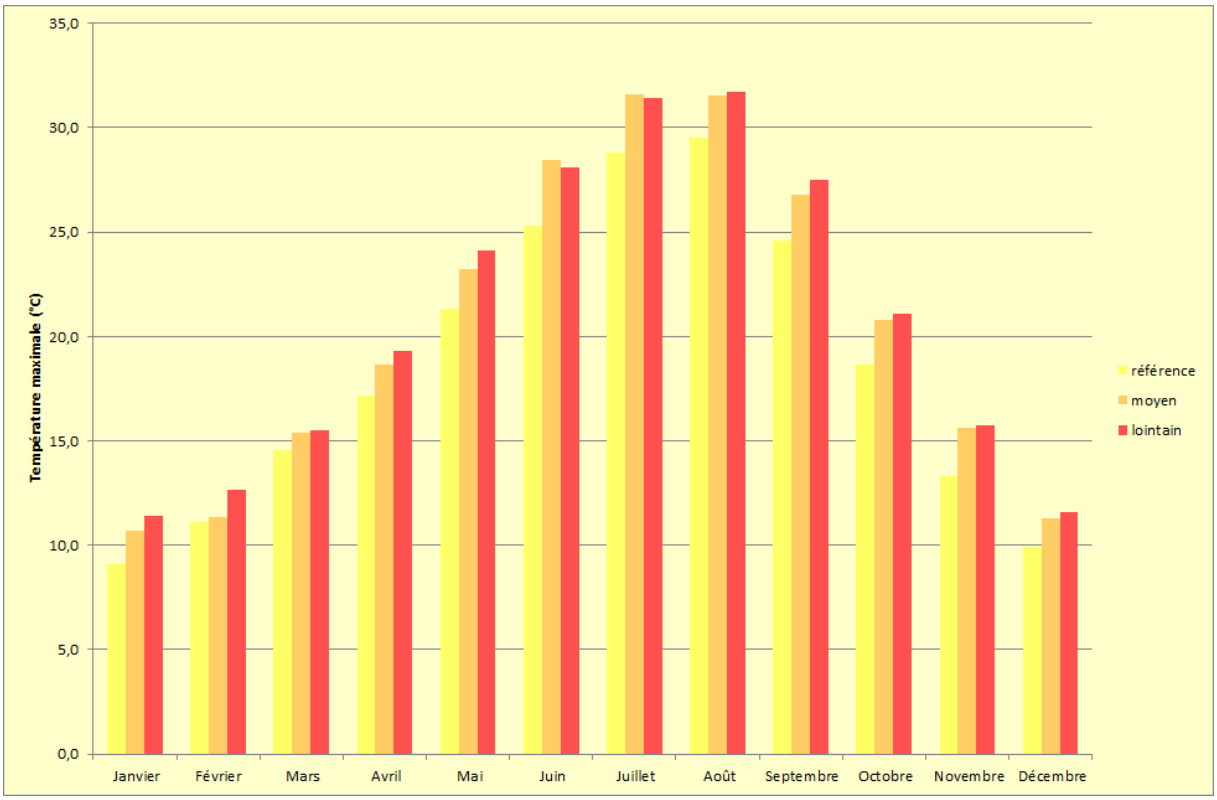


Figure 20a – Températures maximales mensuelles (NORTXAV) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5

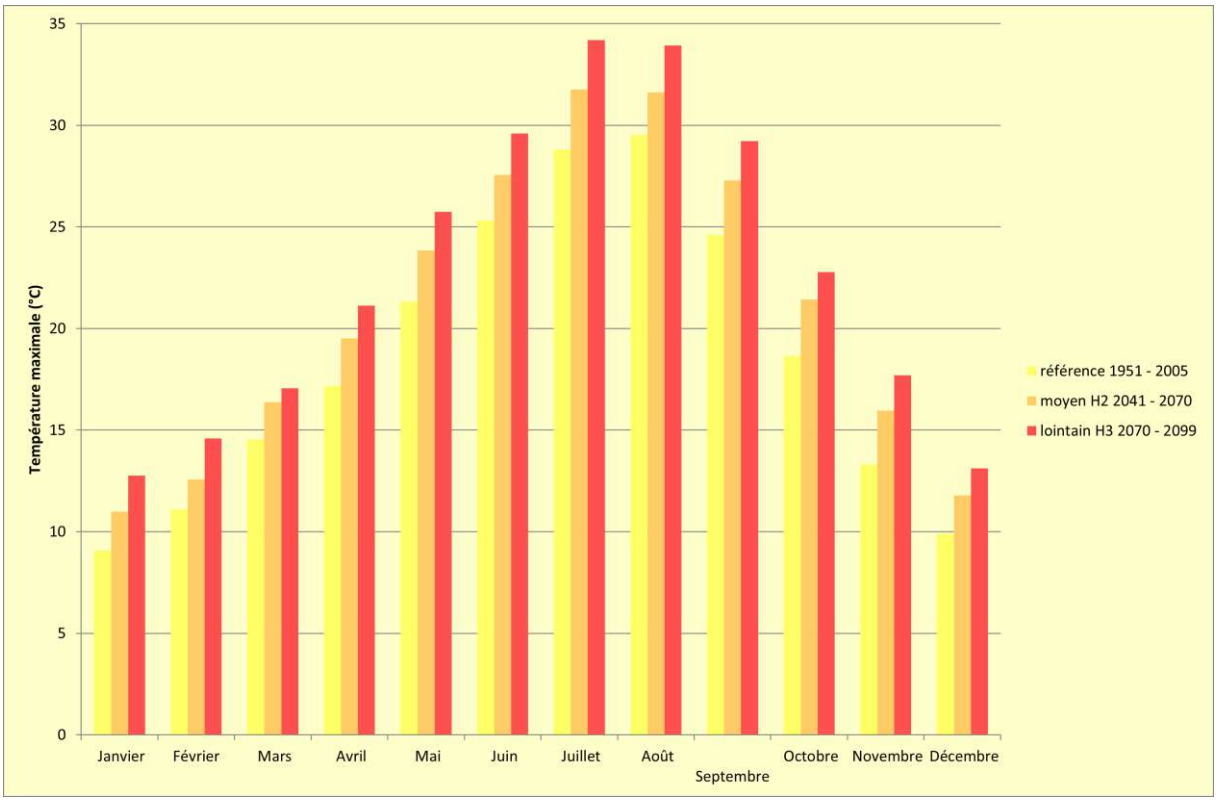


Figure 20b – Températures maximales mensuelles (NORTXAV) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP8.5

3.3.4. Évolution prospective du nombre de jours de forte chaleur (NORTX35)

Le nombre de jours de forte chaleur, défini ici comme les journées au cours desquelles la température maximale dépasse 35 °C, constitue un indicateur particulièrement sensible du réchauffement climatique et de l'intensification des extrêmes thermiques (fig. 21a et 21b). Son analyse prospective met en évidence l'émergence et la généralisation progressive de ces épisodes sur le territoire de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon.

Sur la période de référence (1951–2005), les jours de forte chaleur sont quasi inexistants à l'échelle annuelle. Ils apparaissent de manière très marginale et ponctuelle, essentiellement en été, traduisant un régime thermique encore peu propice à l'atteinte régulière du seuil de 35 °C.

À l'horizon H2 (2041–2070), un changement net s'opère. Les jours de forte chaleur deviennent un phénomène estival identifiable, concentré principalement sur les mois de juillet et août. En juillet, la moyenne atteint environ 5,2 jours, tandis qu'en août elle s'élève à 5,7 jours, contre moins d'un jour sur la période de référence. Des occurrences commencent également à apparaître en juin et, plus marginalement, en septembre.

À l'horizon H3 (2070–2099), le signal reste très marqué mais présente une légère redistribution saisonnière. Le nombre de jours de forte chaleur demeure élevé en juillet (≈ 5,1 jours) et en août (≈ 4,6 jours), confirmant l'installation durable de conditions thermiques extrêmes en plein été. Par ailleurs, les mois de juin et de septembre voient une augmentation plus nette du nombre de jours dépassant le seuil de 35 °C, traduisant un élargissement de la saison des fortes chaleurs.

L'ensemble de ces résultats indique un basculement climatique majeur : les jours de forte chaleur, auparavant exceptionnels, deviennent récurrents à l'échelle annuelle à partir du milieu du XXIe siècle. Cette évolution renforce fortement les risques sanitaires, les contraintes sur les usages du territoire, ainsi que les pressions sur les écosystèmes, en particulier lors des périodes estivales déjà marquées par des déficits hydriques. Cet indicateur constitue ainsi un marqueur clé de l'intensification du réchauffement et prépare l'analyse des indicateurs suivants, relatifs aux nuits chaudes, nuits tropicales et vagues de chaleur, qui permettent d'appréhender la persistance temporelle de ces situations extrêmes.

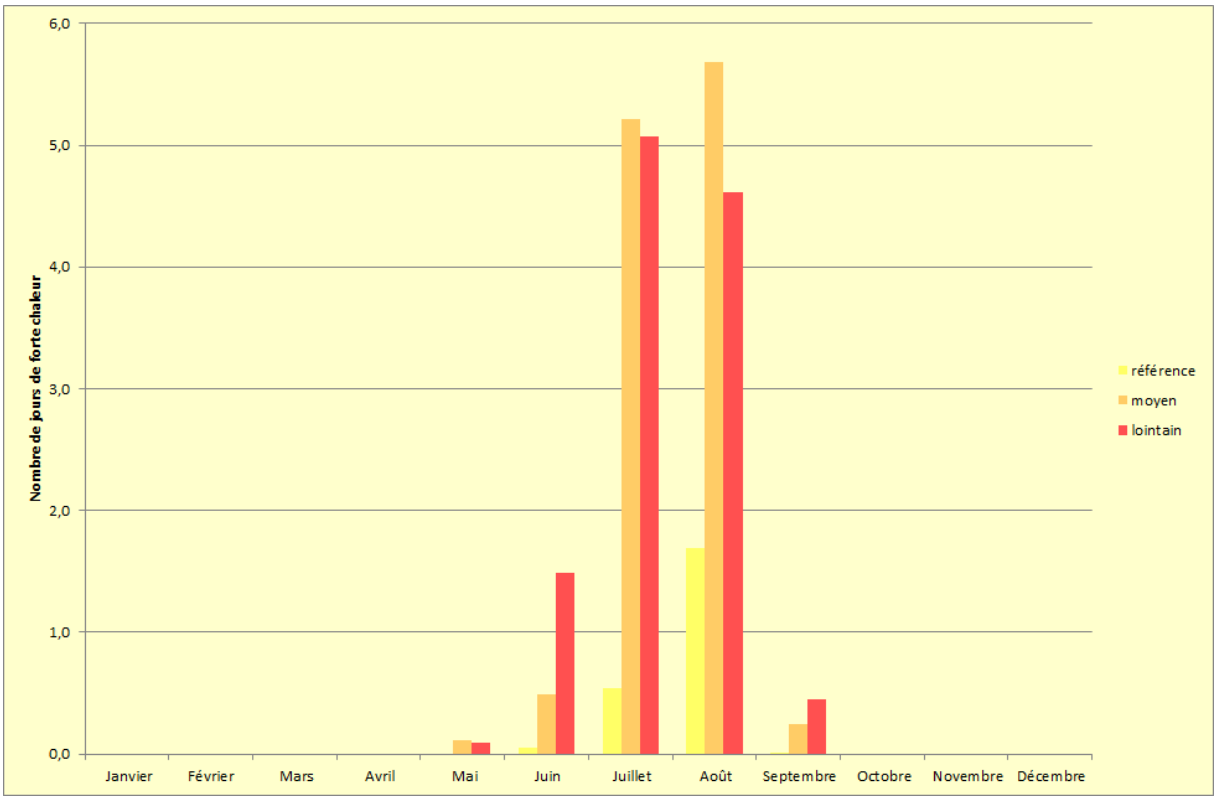


Figure 21a – Nombre de jours de forte chaleur (NORTX35) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5

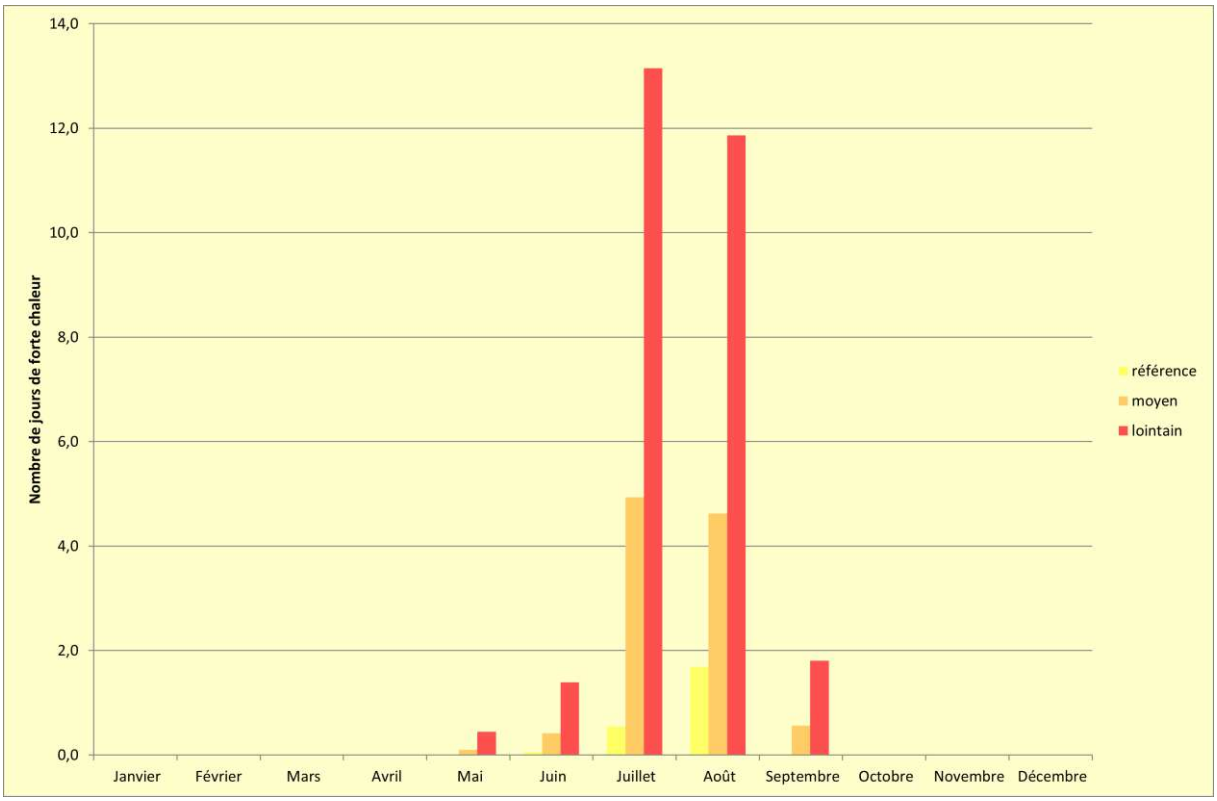


Figure 21b – Nombre de jours de forte chaleur (NORTX35) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP8.5

3.3.5 Évolution prospective du nombre de jours anormalement chauds (NORTXND)

Le nombre de jours anormalement chauds, défini comme les journées pour lesquelles la température maximale dépasse de plus de 5 °C la valeur de référence climatologique, constitue un indicateur particulièrement pertinent pour appréhender les situations de chaleur inhabituelle, indépendamment du franchissement de seuils absolus comme les 35 °C (fig. 22). Il permet ainsi de qualifier des anomalies thermiques relatives, souvent plus précoces et plus étendues dans l'année.

Sur la période de référence (1951–2005), les jours anormalement chauds sont présents tout au long de l'année, mais restent globalement limités en nombre. Ils se concentrent principalement au printemps et en été, avec des valeurs généralement comprises entre 1 et 3 jours par mois, traduisant une variabilité thermique encore modérée.

À l'horizon H2 (2041–2070), une augmentation nette et généralisée du nombre de jours anormalement chauds est observée sur l'ensemble de l'année. Les hausses les plus marquées concernent le printemps et le début de l'été. En avril, le nombre moyen passe à environ 5 jours, tandis qu'en mai et juin il atteint respectivement 6 et 9,5 jours. Cette évolution traduit une intensification précoce des anomalies chaudes, bien avant le cœur de l'été.

À l'horizon H3 (2070–2099), le signal se renforce encore. Les jours anormalement chauds deviennent fréquents sur une large partie de l'année, y compris en hiver et en automne. En janvier et février, leur nombre atteint respectivement 6,3 et 4 jours, contre environ 2 jours sur la période de référence. Au printemps, les valeurs culminent en mai (8,5 jours) et surtout en juin (9 jours), illustrant une banalisation des anomalies thermiques positives à cette période de l'année.

En été, bien que le nombre de jours anormalement chauds reste élevé, une légère redistribution saisonnière apparaît. En juillet et août, les valeurs se situent autour de 7,3 et 5,3 jours, tandis que le mois de septembre connaît une forte augmentation, atteignant près de 7,8 jours à l'horizon H3. Ce décalage vers l'arrière-saison souligne un allongement significatif de la période propice aux anomalies chaudes, désormais étendue du printemps jusqu'au début de l'automne.

Dans l'ensemble, l'évolution de NORTTXND met en évidence une augmentation marquée de la fréquence des situations thermiques anormalement chaudes, y compris en dehors des périodes traditionnellement estivales. Cet indicateur révèle un réchauffement progressif mais structurel du régime thermique, contribuant à une exposition accrue des populations, des milieux naturels et des activités aux stress thermiques, même lorsque les seuils de fortes chaleurs ne sont pas systématiquement atteints.

Cette dynamique complète utilement l'analyse des jours de forte chaleur et prépare l'examen des indicateurs relatifs aux nuits chaudes, nuits tropicales et vagues de chaleur, qui permettent d'appréhender la persistance et la continuité temporelle des épisodes de chaleur.



Figure 22a – Nombre de jours normalement chauds (NORTTXND) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5



Figure 22b – Nombre de jours normalement chauds (NORTTXND) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP8.5

3.3.6. Évolution prospective du nombre de nuits anormalement chaudes (NORTNHT)

Le nombre de nuits anormalement chaudes, défini comme les nuits au cours desquelles la température minimale dépasse de plus de 5 °C la valeur de référence climatologique, constitue un indicateur clé pour appréhender la persistance nocturne de la chaleur (fig. 23a et 23b). Il permet d'évaluer la capacité de rafraîchissement nocturne du climat, essentielle tant pour le confort thermique humain que pour le fonctionnement des écosystèmes.

Sur la période de référence (1951–2005), les nuits anormalement chaudes restent relativement peu fréquentes. Elles sont observées principalement entre le printemps et l'été, avec des valeurs généralement comprises entre 1 et 3 nuits par mois, traduisant des anomalies nocturnes ponctuelles et encore limitées.

À l'horizon H2 (2041–2070), une augmentation nette du nombre de nuits anormalement chaudes est observée sur l'ensemble de l'année. Cette hausse est particulièrement marquée au printemps et en été. En avril, le nombre moyen atteint environ 4 à 5 nuits, tandis qu'en mai et juin il progresse fortement pour atteindre respectivement 6 et 9,5 nuits. Cette évolution traduit une dégradation progressive du rafraîchissement nocturne dès le début de la saison chaude.

À l'horizon H3 (2070–2099), le signal devient très marqué et concerne désormais une large partie de l'année. Les nuits anormalement chaudes deviennent fréquentes dès l'hiver : en janvier et février, leur nombre atteint respectivement 6,3 et 4 nuits, contre environ 2 nuits sur la période de référence. Au printemps, l'augmentation s'accentue nettement, avec des valeurs atteignant 7 nuits en avril, 8,5 nuits en mai et jusqu'à 9 nuits en juin.

En été, les nuits anormalement chaudes restent nombreuses, avec environ 7 à 8 nuits en juillet, et plus de 5 nuits en août. Le mois de septembre se distingue également par une forte augmentation, atteignant près de 7,8 nuits à l'horizon H3, illustrant un allongement marqué de la période de nuits chaudes vers l'arrière-saison.

Dans l'ensemble, l'évolution de NORTNHT met en évidence une dégradation progressive et structurelle des conditions thermiques nocturnes. La fréquence accrue des nuits anormalement chaudes limite les possibilités de récupération thermique, accroît les risques sanitaires lors des épisodes de chaleur et renforce la vulnérabilité des milieux naturels, en particulier dans un contexte de sécheresses estivales récurrentes.

Cet indicateur souligne ainsi un changement majeur du régime thermique, complémentaire de l'augmentation des températures diurnes, et prépare l'analyse suivante consacrée aux nuits tropicales, qui traduisent le franchissement de seuils nocturnes absolus particulièrement contraignants.

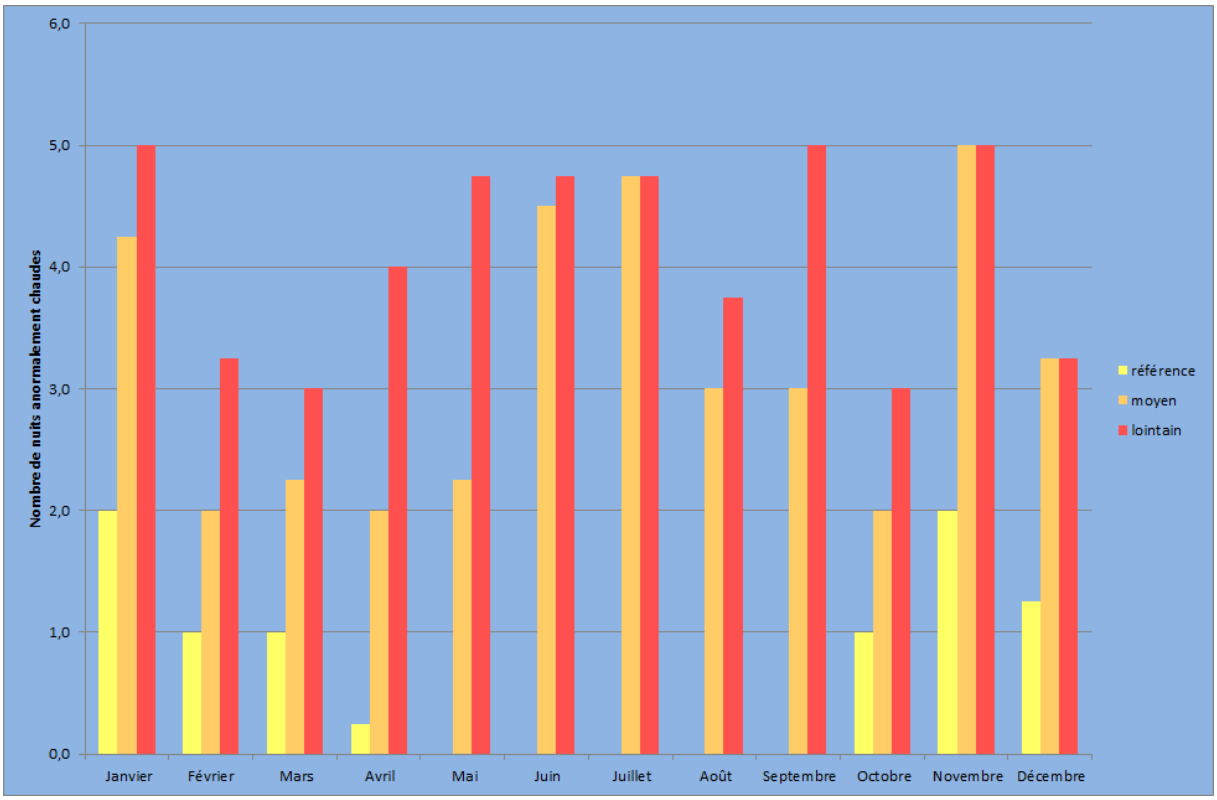


Figure 23a - nombre de nuits anormalement chaudes (NORTNHT) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5



Figure 23b - nombre de nuits anormalement chaudes (NORTNHT) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP8.5

3.3.7 Évolution prospective du nombre de nuits tropicales (NORTR)

Le nombre de nuits tropicales, définies comme les nuits au cours desquelles la température minimale reste **strictement supérieure à 20 °C**, constitue un indicateur particulièrement critique du point de vue du confort thermique et de la santé humaine (fig. 24a et 24b). Il traduit l'absence de rafraîchissement nocturne et la persistance de conditions chaudes, souvent associées à une augmentation des risques sanitaires lors des épisodes de chaleur prolongés.

Sur la période de référence (1951–2005), les nuits tropicales sont **quasi inexistantes** sur le territoire de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon. Elles sont absentes en hiver, au printemps et à l'automne, et n'apparaissent que de façon très marginale en été, avec en moyenne **moins de 2 nuits en juin** et environ **10 à 14 nuits en juillet et août**, traduisant un climat encore capable d'assurer un rafraîchissement nocturne relatif.

À l'horizon **H2 (2041–2070)**, une rupture nette est observée. Les nuits tropicales deviennent un phénomène estival marqué. En **juin**, leur nombre moyen atteint **environ 11 nuits**, tandis qu'en **juillet** et **août**, il progresse fortement pour atteindre respectivement **22 et 21 nuits**. Ces résultats indiquent que, durant ces mois, **près des deux tiers des nuits estivales** pourraient être tropicales, limitant fortement la récupération thermique nocturne.

À l'horizon **H3 (2070–2099)**, le signal s'amplifie encore. Les nuits tropicales s'installent durablement sur l'ensemble de l'été et commencent à s'étendre aux marges de la saison chaude. En **juin**, leur nombre atteint environ **9,5 nuits**, tandis qu'en **juillet** et **août**, il culmine à **21 et 22,5 nuits** respectivement. En **septembre**, des nuits tropicales apparaissent également, avec en moyenne **5,5 nuits**, traduisant un **allongement significatif de la période concernée**.

Ainsi, à l'horizon de la fin du XXIe siècle, les nuits tropicales deviennent une composante structurelle du climat estival du territoire, avec des périodes prolongées sans rafraîchissement nocturne. Cette évolution constitue un facteur majeur de vulnérabilité, tant pour les populations (fatigue thermique, risques sanitaires accrus) que pour les milieux naturels, en renforçant le stress hydrique et thermique déjà observé en journée.

Combinée à l'augmentation des nuits anormalement chaudes et des jours de forte chaleur, la hausse des nuits tropicales confirme l'installation d'un **régime thermique estival plus intense, plus durable et plus contraignant**, préparant le terrain à des épisodes de chaleur prolongés et à des vagues de chaleur plus fréquentes et plus longues, analysées dans la section suivante.

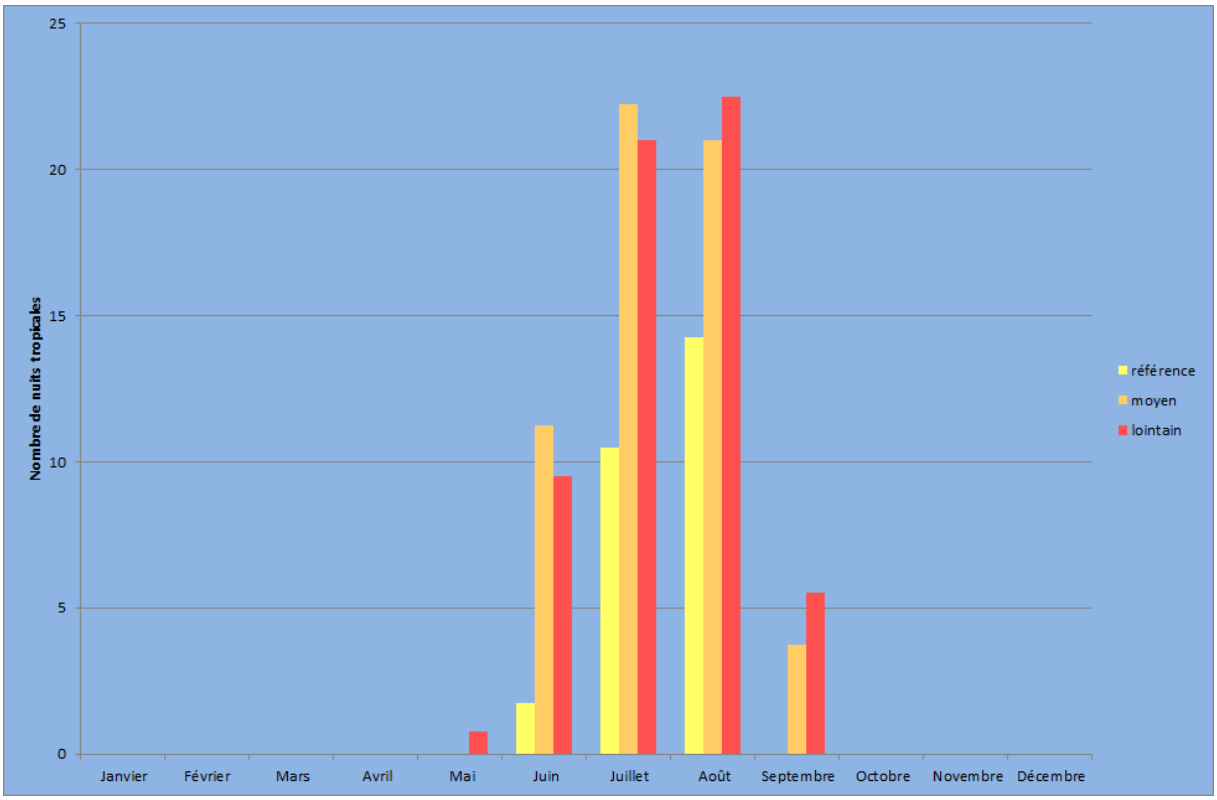


Figure 24a - nombre de nuits tropicales (NORTR) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5

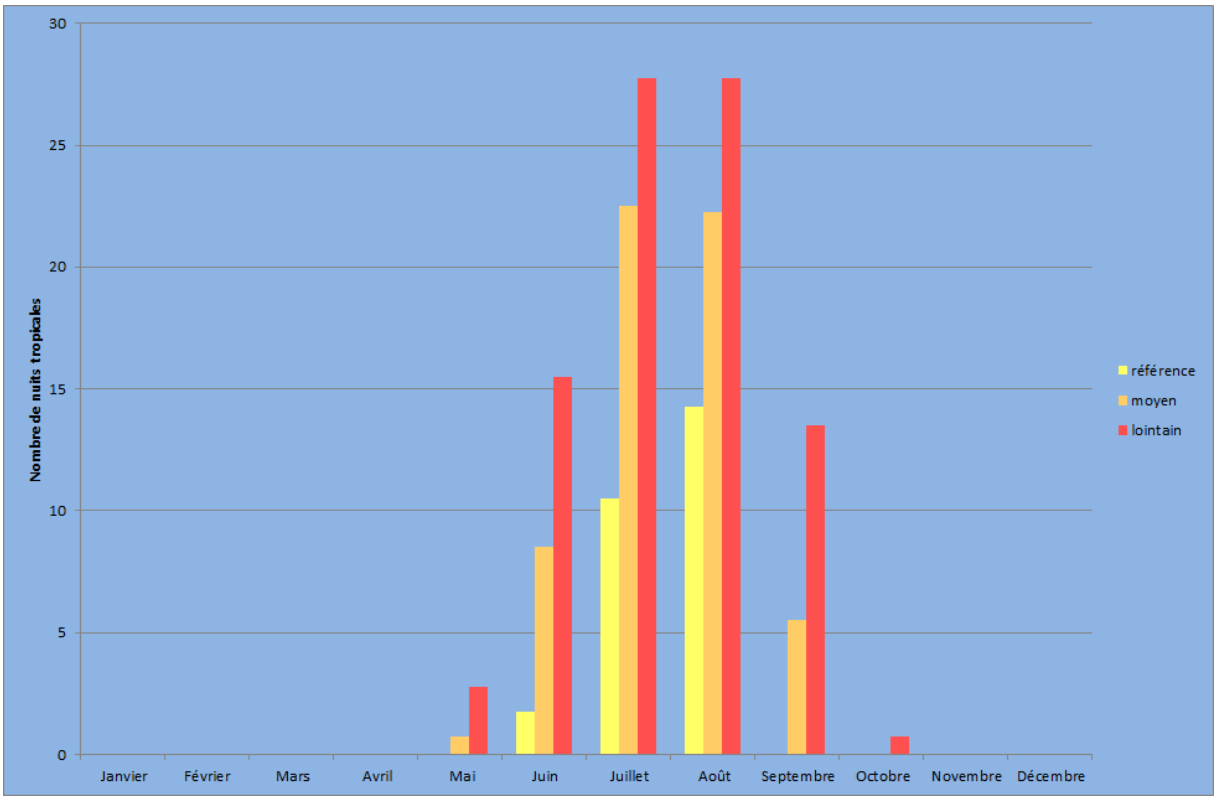


Figure 24b - nombre de nuits tropicales (NORTR) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP8.5

3.3.8 Évolution prospective du nombre de jours appartenant à une vague de chaleur (NORTXHWD)

Le nombre de jours appartenant à une vague de chaleur correspond aux journées intégrées dans des séquences de **fortes chaleurs persistantes**, définies ici par un dépassement durable des seuils thermiques sur plusieurs jours consécutifs (fig. 25a et 25b). Cet indicateur permet d'appréhender non seulement l'intensité des épisodes chauds, mais surtout leur **durée et leur continuité**, qui constituent des facteurs majeurs de vulnérabilité pour les populations, les activités et les milieux naturels.

Sur la période de référence (1951–2005), les vagues de chaleur sont **rares et peu structurées** sur le territoire. Les jours appartenant à de telles séquences sont quasi inexistants sur la majeure partie de l'année, avec des occurrences ponctuelles et limitées à quelques journées isolées, essentiellement entre mai et août. Cette situation reflète un climat encore caractérisé par des épisodes chauds courts, interrompus par des phases de rafraîchissement.

À l'horizon **H2 (2041–2070)**, une évolution nette apparaît. Les vagues de chaleur deviennent un phénomène estival identifiable, avec un nombre croissant de jours intégrés dans des séquences prolongées. Les mois de **mai à août** sont particulièrement concernés. En juin, le nombre moyen de jours appartenant à une vague de chaleur atteint environ **4,3 jours**, tandis qu'en juillet il s'élève à **3 jours** et en août à **2,3 jours**. Ces résultats traduisent une **augmentation de la durée moyenne des épisodes chauds**, au-delà de simples pics ponctuels.

À l'horizon **H3 (2070–2099)**, le signal se renforce encore et s'étend dans le temps. Les vagues de chaleur deviennent plus **fréquentes, plus longues et plus précoces**. En juin, le nombre moyen de jours appartenant à une vague de chaleur atteint **5 jours**, et reste élevé en juillet (**4 jours**). Des occurrences significatives apparaissent également en **mai** (≈ **3 jours**) et en **septembre** (≈ **3 jours**), illustrant un **élargissement de la saison des vagues de chaleur** vers le printemps et l'automne.

Par ailleurs, des journées intégrées à des vagues de chaleur apparaissent ponctuellement en hiver et en début de printemps à l'horizon H3, bien que de manière encore limitée, traduisant une variabilité accrue et des anomalies thermiques parfois persistantes en dehors de la période estivale.

Dans l'ensemble, l'évolution de NORTXHWD met en évidence une **mutation qualitative du régime thermique** : les épisodes de chaleur deviennent non seulement plus intenses, mais surtout plus **durables**, avec une capacité réduite du système climatique local à interrompre les séquences chaudes. Cette persistance accroît fortement les impacts sanitaires, la pression sur les ressources en eau, le stress sur la végétation et les risques associés aux incendies.

Cet indicateur constitue ainsi un élément central pour la compréhension des vulnérabilités futures du territoire. Il complète les analyses précédentes sur les températures extrêmes et nocturnes, et prépare la synthèse prospective des extrêmes thermiques, essentielle pour éclairer les stratégies d'adaptation à venir.



Figure 25a - nombre de jours appartenant à une vague de chaleur (NORTXHWD) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5



Figure 25b - nombre de jours appartenant à une vague de chaleur (NORTXHWD) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP8.5

3.3.9 Évolution prospective du nombre de jours de gel (NORTNFD)

Le nombre de jours de gel, défini comme les journées pour lesquelles la température minimale est inférieure à **0 °C**, constitue un indicateur clé de la rigueur hivernale et des contraintes thermiques froides (fig. 26). Son évolution prospective permet d'appréhender la disparition progressive des conditions hivernales marquées et leurs implications pour les milieux naturels, les activités agricoles et certains usages du territoire.

Sur la période de référence (1951–2005), les jours de gel sont encore présents de manière significative en hiver. Ils se concentrent principalement sur les mois de **janvier et février**, avec en moyenne **6,3 jours de gel en janvier** et **3,3 jours en février**. Des occurrences plus marginales sont également observées en décembre, traduisant un régime hivernal encore marqué par des températures négatives régulières.

À l'horizon **H2 (2041–2070)**, une diminution nette du nombre de jours de gel est observée. En janvier, la moyenne passe à environ **2 jours**, tandis qu'en février elle descend à **1 jour**. En décembre, le nombre moyen atteint **3 jours**, traduisant une persistance encore ponctuelle des gels en début d'hiver. En revanche, les mois de mars à novembre ne présentent pratiquement plus de jours de gel, confirmant un net raccourcissement de la période hivernale froide.

À l'horizon **H3 (2070–2099)**, le signal s'accentue fortement. Les jours de gel deviennent **très rares**, voire quasi inexistants. En janvier, leur nombre moyen chute à environ **1,3 jour**, et en février à **2,3 jours**. En décembre, il diminue également pour atteindre **1,5 jour**. Sur l'ensemble des autres mois de l'année, les jours de gel disparaissent totalement.

Ces résultats traduisent une **érosion marquée du climat hivernal froid** sur le territoire de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon. À l'horizon de la fin du XXIe siècle, les conditions de gel deviennent exceptionnelles et concentrées sur quelques journées isolées en cœur d'hiver. Cette évolution est cohérente avec l'augmentation observée des températures minimales et nocturnes.

La diminution des jours de gel aura des conséquences multiples : modification des cycles biologiques, perturbation des phases de dormance végétale, évolution des pressions parasitaires, mais aussi réduction de certains aléas liés au gel pour les activités humaines. Elle contribue toutefois à renforcer les contrastes saisonniers, avec des hivers plus doux mais des étés nettement plus contraignants sur le plan thermique.

Cet indicateur complète ainsi la lecture prospective des extrêmes thermiques en mettant en évidence une **double dynamique** : la disparition progressive des contraintes froides et l'intensification concomitante des contraintes chaudes.

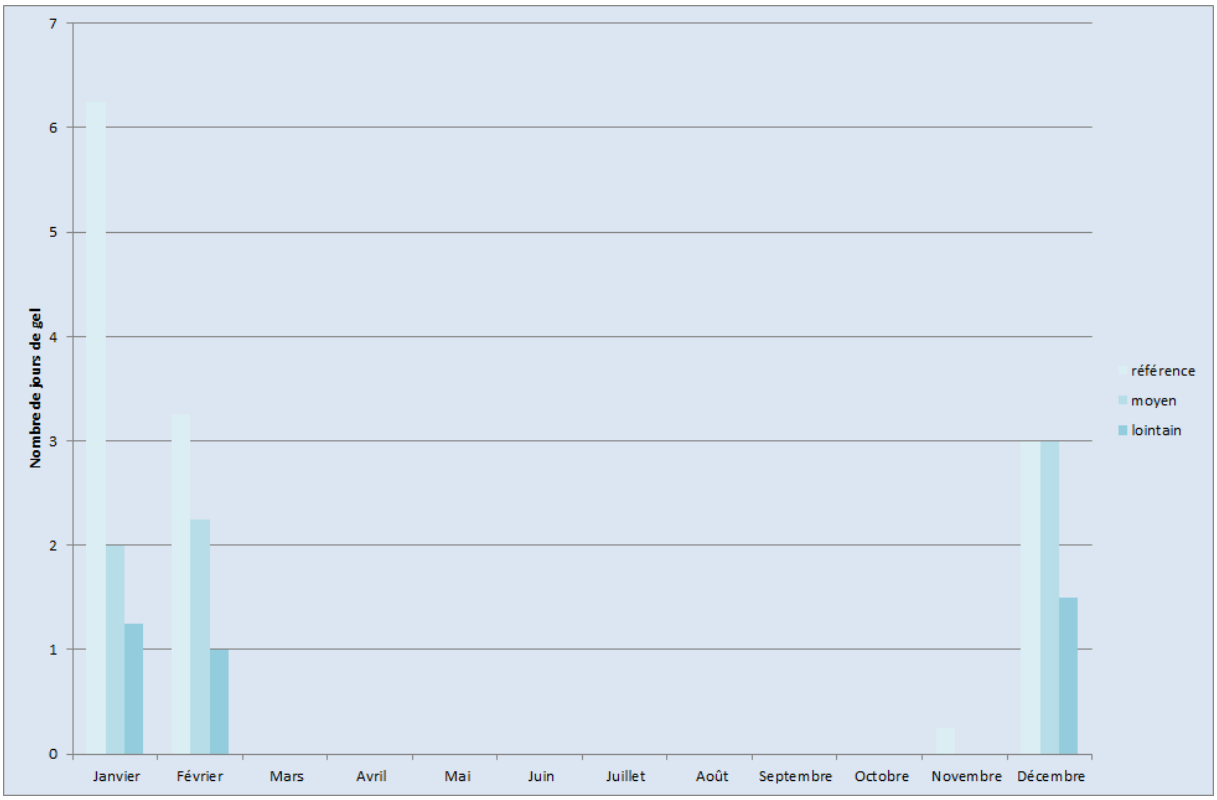


Figure 26a - nombre de jours de gel (NORTNFD) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5



Figure 26b - nombre de jours de gel (NORTNFD) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP8.5

3.3.10 Évolution prospective de l'amplitude thermique journalière (NORTRAV)

L'analyse prospective de l'amplitude thermique journalière (NORTRAV), définie comme la différence entre la température maximale et la température minimale quotidiennes, met en évidence une relative stabilité du signal, comparativement aux évolutions très marquées observées sur les températures moyennes et les extrêmes thermiques (fig. 27).

Sur la période de référence, l'amplitude thermique présente une saisonnalité marquée, avec des valeurs maximales en été (juillet–août) et minimales en hiver. Cette structure saisonnière est globalement conservée aux horizons H2 et H3, sans bouleversement majeur du cycle annuel. Les projections montrent toutefois de légères évolutions, variables selon les saisons :

- une augmentation modérée de l'amplitude thermique au printemps et en début d'été, liée à une hausse plus rapide des températures maximales que des minimales en début de saison chaude ;
- une stabilisation, voire une légère diminution estivale, suggérant que le réchauffement nocturne progresse à un rythme comparable à celui des températures diurnes lors des périodes les plus chaudes ;
- des variations hivernales limitées, avec une amplitude faible et peu évolutive, cohérente avec l'élévation conjointe des températures minimales et maximales.

Ainsi, contrairement aux indicateurs d'extrêmes, l'amplitude thermique journalière ne constitue pas un marqueur principal de l'intensification du changement climatique sur le territoire. Elle traduit plutôt une élévation parallèle des températures de jour et de nuit, confirmant que le signal dominant du changement climatique local réside davantage dans le rehaussement du niveau thermique global et l'augmentation des contraintes chaudes continues, que dans une amplification des contrastes journaliers.

Cette relative stabilité de l'amplitude thermique n'atténue cependant pas les impacts du réchauffement : elle souligne au contraire la perte progressive des périodes de fraîcheur nocturne, élément clé du confort thermique, de la récupération physiologique et du fonctionnement des écosystèmes.



Figure 27a - Amplitude thermique journalière (NORTRAV) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5



Figure 27b - Amplitude thermique journalière (NORTRAV) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP8.5

3.3.11 Synthèse prospective – Évolution des températures et des extrêmes thermiques

L'analyse prospective des variables thermiques issues des projections DRIAS met en évidence une **transformation profonde du régime thermique** sur le territoire de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon, affectant à la fois les températures moyennes, les extrêmes chauds et les conditions hivernales.

➢ **Un réchauffement généralisé et structurel**

À l'ensemble des horizons temporels considérés (H2 et H3), les températures moyennes, minimales et maximales augmentent de manière **cohérente, progressive et généralisée sur l'ensemble de l'année**. Le réchauffement est particulièrement marqué au printemps et en été, mais il concerne également les saisons intermédiaires et hivernales, traduisant une élévation durable du niveau thermique de fond.

Cette hausse se manifeste non seulement par une augmentation des températures moyennes, mais aussi par un **rehaussement des températures minimales**, signe d'un réchauffement nocturne prononcé. Ce signal est déterminant car il limite les capacités de récupération thermique, tant pour les écosystèmes que pour les populations humaines.

➢ **Une intensification nette des extrêmes chauds**

Les indicateurs relatifs aux extrêmes thermiques montrent une **accentuation très marquée des situations de chaleur intense** :

- le **nombre de jours de forte chaleur (TX35)**, quasi nul sur la période de référence, devient récurrent à partir de l'horizon H2 et s'intensifie encore à l'horizon H3, principalement en été mais également en fin de printemps et début d'automne ;
- les **jours anormalement chauds (TXND)** augmentent fortement et s'étendent sur une période de plus en plus longue de l'année, traduisant une banalisation des anomalies thermiques positives ;
- les **nuits anormalement chaudes (NORTNHT)** et les **nuits tropicales (NORTR)** connaissent une progression spectaculaire, notamment en juillet et août, mais aussi en juin et septembre à l'horizon lointain.

Ces évolutions traduisent un basculement progressif vers des **étés durablement contraignants**, marqués par des températures élevées de jour comme de nuit, avec des impacts directs sur le confort thermique, la santé humaine, les usages récréatifs et les milieux naturels.

➢ **Des vagues de chaleur plus fréquentes et plus longues**

Les projections montrent également une augmentation du nombre de jours appartenant à des **séquences de vagues de chaleur (NORTXHWD)**. Ces événements, encore ponctuels sur la période de référence, deviennent plus fréquents à l'horizon H2 et se renforcent à l'horizon H3,

avec des épisodes plus longs et plus intenses. Cette évolution suggère un changement de nature du risque thermique : il ne s'agit plus uniquement d'événements extrêmes ponctuels, mais de **situations de stress thermique durable**, susceptibles d'affecter durablement les systèmes naturels et sociaux.

- **Une disparition progressive du froid hivernal**

À l'inverse, les indicateurs liés au froid hivernal montrent une **diminution rapide et marquée** des contraintes thermiques froides. Le **nombre de jours de gel (NORTNFD)** chute fortement dès l'horizon H2 et devient très faible à l'horizon H3, limité à quelques journées isolées en cœur d'hiver. Cette évolution traduit une **érosion du climat hivernal** traditionnellement observé sur le territoire, avec des implications sur les cycles biologiques, la phénologie des espèces, les équilibres agroécologiques et certains risques naturels (gel tardif, dynamique des ravageurs).

- **Une recomposition profonde du régime thermique local**

Pris dans leur ensemble, ces résultats mettent en évidence une **double dynamique structurante** :

- une **disparition progressive des contraintes froides**,
- et une **intensification rapide et durable des contraintes chaudes**, tant diurnes que nocturnes.

Cette recomposition du régime thermique constitue un élément central du changement climatique à l'échelle de la Réserve de biosphère. Elle justifie pleinement l'intégration d'analyses spécifiques sur le **confort thermique**, les **vulnérabilités différenciées** et les **capacités d'adaptation** des territoires et des acteurs locaux, qui feront l'objet des sections suivantes du cahier climatique.

3.3.12. Évolution prospective du cumul de précipitations (NORRR)

L'analyse prospective du cumul mensuel des précipitations (NORRR) met en évidence une **recomposition saisonnière du régime pluviométrique**, plus qu'une évolution uniforme des volumes annuels (fig. 28a et 28b). Les projections indiquent une redistribution intra-annuelle marquée, caractéristique des climats méditerranéens en contexte de réchauffement climatique.

Sur la période de référence (1951–2005), les précipitations présentent un régime typiquement méditerranéen, avec des maximas en **automne** (septembre à novembre) et des cumuls plus modérés au printemps et en hiver. L'été apparaît déjà comme une saison relativement sèche, en particulier en juillet et août.

À l'horizon **H2 (2041–2070)**, le signal évolutif reste contrasté selon les saisons. Les cumuls hivernaux et printaniers montrent des variations limitées, sans tendance franche à la hausse ou à la baisse. En revanche, une **diminution des précipitations estivales** est observée, notamment en juin et juillet, traduisant un renforcement de la sécheresse estivale.

L'horizon **H3 (2070–2099)** accentue cette dynamique. Les mois d'été restent les plus déficitaires, avec des cumuls faibles et peu variables, confirmant l'installation d'étés durablement secs. À l'inverse, les mois d'**automne**, et plus particulièrement **septembre et octobre**, se

caractérisent par des **cumuls plus élevés et plus concentrés**, avec des valeurs projetées supérieures à celles de la période de référence. Le mois d'octobre se distingue notamment par une augmentation marquée des précipitations, suggérant une intensification des épisodes pluvieux automnaux.

Cette évolution traduit une **polarisation du régime pluviométrique**, avec une opposition renforcée entre :

- des étés plus secs, propices à l'aggravation des déficits hydriques et des tensions sur les ressources en eau ;
- des automnes plus arrosés, potentiellement associés à des épisodes de précipitations intenses, augmentant les risques de ruissellement rapide, d'érosion et de crues.

Ainsi, même en l'absence de tendance nette sur les cumuls annuels, le changement climatique modifie profondément la **temporalité des apports en eau**, avec des implications directes pour les écosystèmes, la gestion de l'eau, l'agriculture et la prévention des risques naturels sur le territoire de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon.

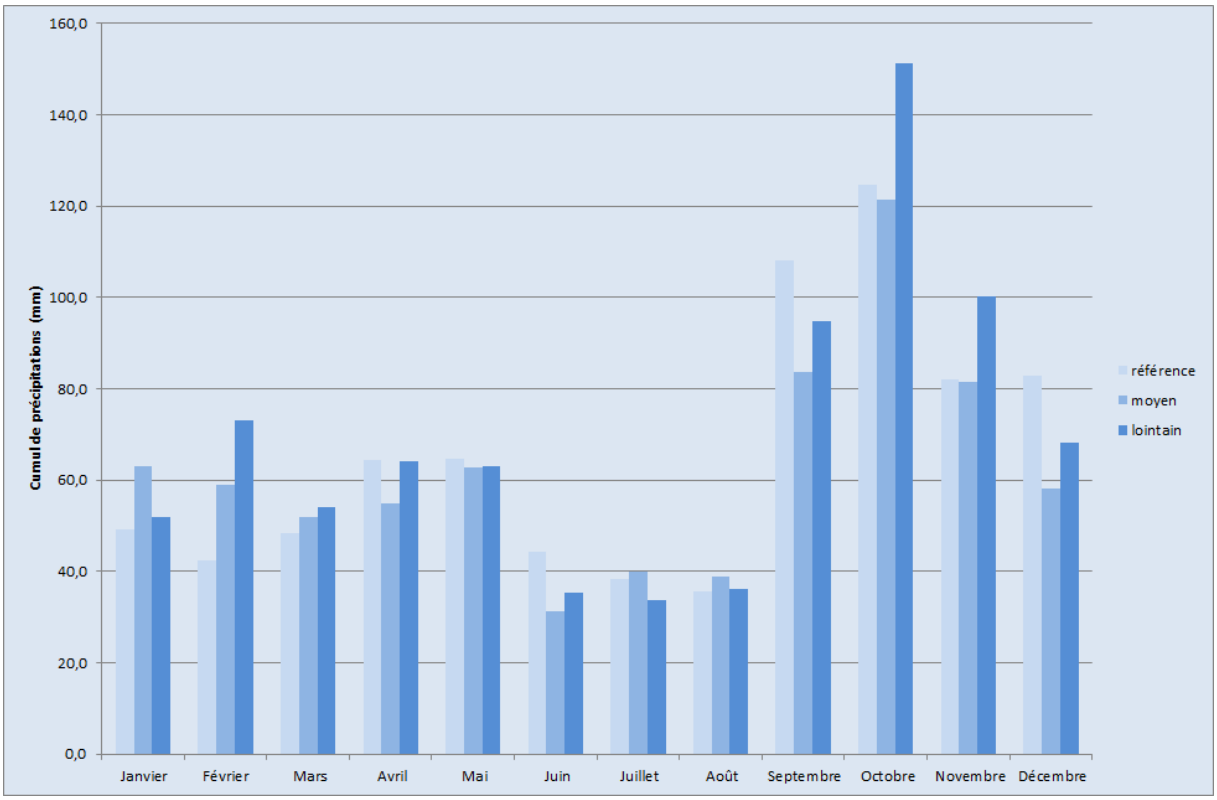


Figure 28a - cumul de précipitations (NORRR) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5

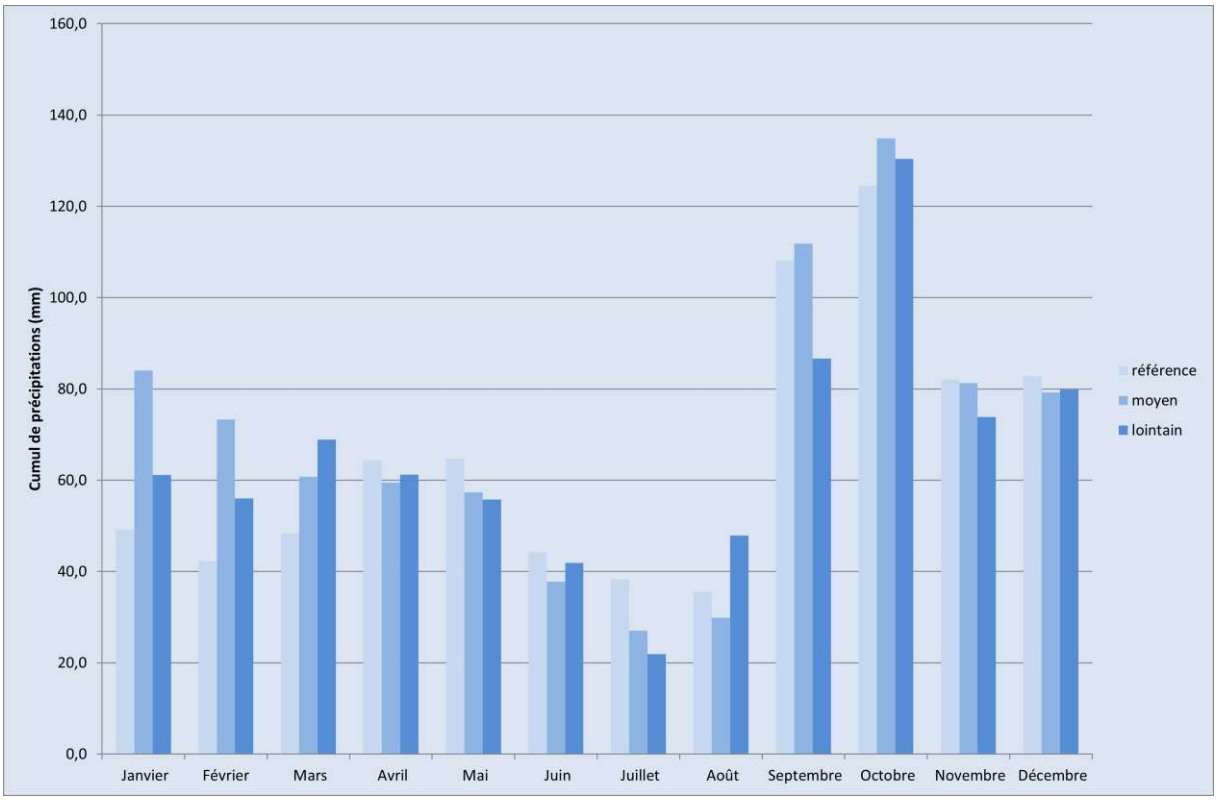


Figure 28b - cumul de précipitations (NORRR) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP8.5

3.3.13 Évolution prospective du nombre de jours de pluie (NORRR1MM)

L'indicateur NORRR1MM, correspondant au nombre moyen mensuel de jours de pluie (RR > 1 mm), permet de qualifier la **fréquence des épisodes pluvieux**, indépendamment des volumes cumulés (fig. 29a et 29b). Son analyse prospective complète utilement celle des cumuls de précipitations en mettant en évidence les évolutions de la répartition temporelle des pluies.

Sur la période de référence (1951–2005), le nombre de jours de pluie présente une saisonnalité marquée, avec des fréquences plus élevées au printemps et en automne, et un minimum estival net en juillet et août. Les mois d'octobre, avril et mai figurent parmi les plus arrosés en termes de fréquence.

À l'horizon **H2 (2041–2070)**, les projections indiquent des **évolutions modérées mais contrastées selon les saisons**. Une légère augmentation du nombre de jours de pluie est observée en hiver et au début du printemps, tandis que les mois estivaux conservent un nombre de jours pluvieux faible. Cette évolution suggère une **stabilité relative de la fréquence des pluies**, malgré les changements déjà observés sur les cumuls.

À l'horizon **H3 (2070–2099)**, le signal devient plus lisible. Les mois d'**été** (juin à août) montrent une **tendance à la diminution ou à la stagnation du nombre de jours de pluie**, confirmant l'installation d'étés durablement secs. À l'inverse, les mois d'**automne**, et en particulier **octobre et novembre**, conservent, voire renforcent, des fréquences de jours de pluie relativement élevées.

La comparaison avec l'évolution des cumuls de précipitations met en évidence une dynamique clé du changement climatique régional : **des pluies qui ne sont pas nécessairement plus fréquentes, mais plus concentrées dans le temps**, notamment en automne. Cette évolution suggère une augmentation de l'intensité moyenne des événements pluvieux, en cohérence avec l'augmentation observée des cumuls automnaux. Ainsi, l'évolution du nombre de jours de pluie confirme une **polarisation du régime pluviométrique**, avec :

- des périodes sèches plus longues en été,
- et des saisons intermédiaires et automnales marquées par des épisodes pluvieux plus intenses mais relativement peu nombreux.

Ces évolutions ont des implications majeures pour l'infiltration des sols, le ruissellement, la recharge des nappes et la gestion des risques hydrologiques sur le territoire de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon.

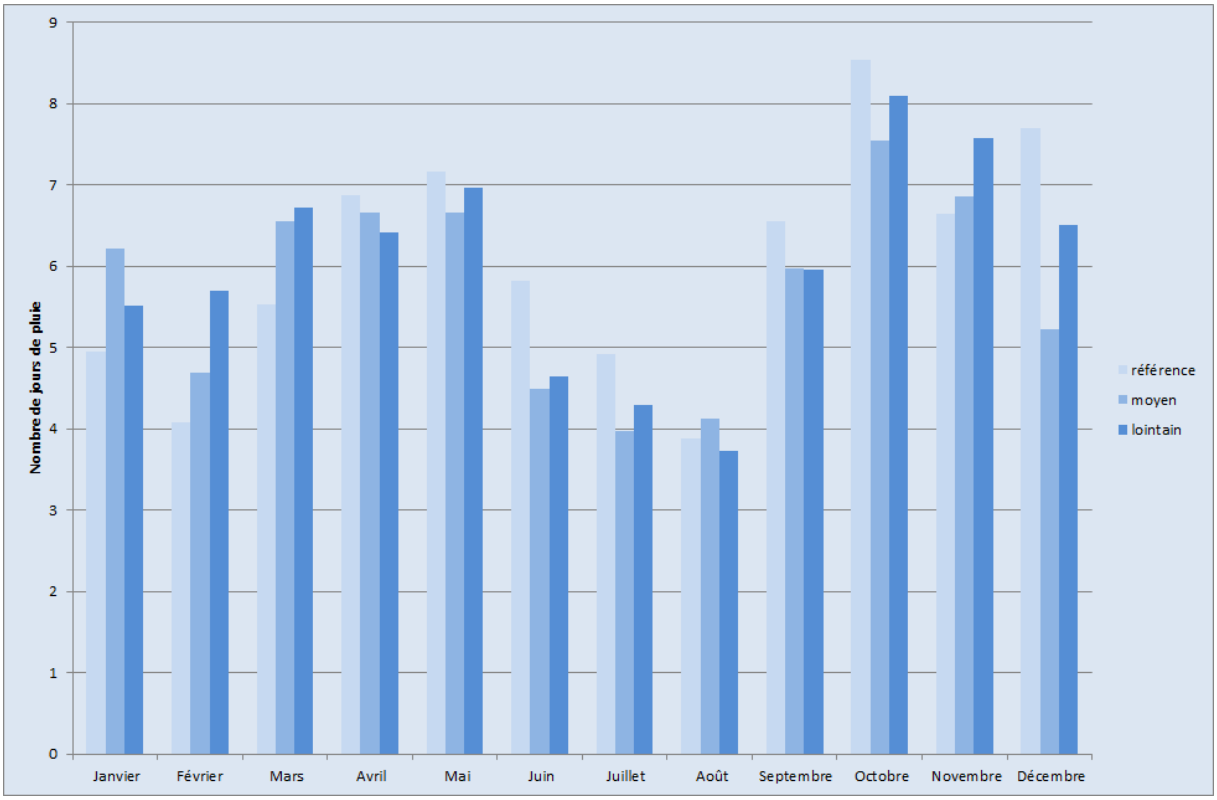


Figure 29a - Nombre de jours de pluie (NORRR1MM) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5

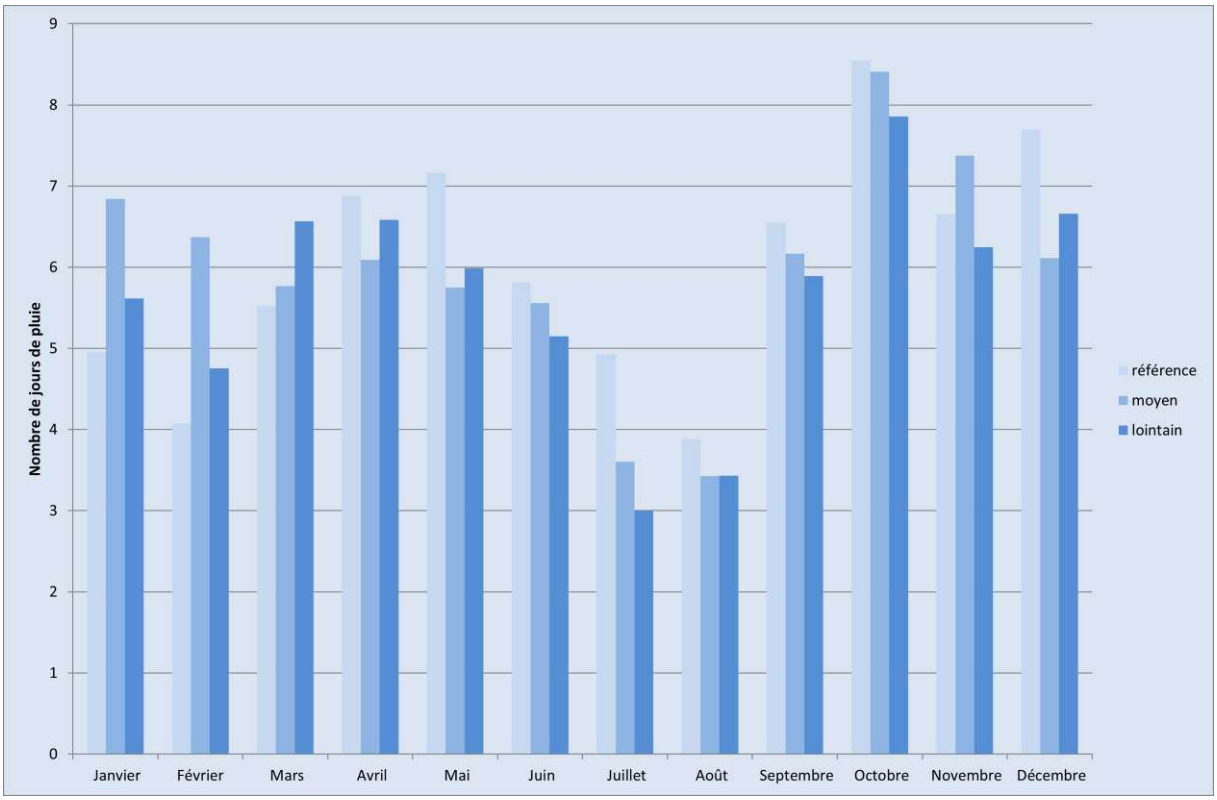


Figure 29b - Nombre de jours de pluie (NORRR1MM) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP8.5

3.3.14. Évolution prospective du nombre de jours de fortes précipitations (NORPN20MM)

L'indicateur NORPN20MM, correspondant au nombre moyen mensuel de jours présentant des précipitations supérieures à **20 mm**, permet de caractériser l'évolution des **événements pluvieux intenses**, susceptibles de générer des phénomènes de ruissellement rapide, d'érosion et de crues soudaines (fig. 30a et 30b). Sur la période de référence (1951–2005), les jours de fortes précipitations sont **rares et fortement saisonniers**. Ils se concentrent quasi exclusivement sur les mois d'**automne**, en particulier **septembre, octobre et novembre**, avec des occurrences très faibles voire nulles le reste de l'année.

À l'horizon **H2 (2041–2070)**, la structure saisonnière de ces événements est globalement conservée, mais une **augmentation de leur fréquence moyenne** apparaît à l'automne. Le mois d'**octobre** se distingue notamment, avec une hausse du nombre de jours de fortes précipitations par rapport à la période de référence.

À l'horizon **H3 (2070–2099)**, le signal devient plus marqué. Les jours de fortes précipitations restent concentrés sur l'automne, mais leur **fréquence moyenne augmente**, en particulier en **octobre**, où l'indicateur atteint ses valeurs maximales. Cette évolution confirme une **intensification des épisodes pluvieux automnaux**, même en l'absence d'une augmentation généralisée du nombre de jours de pluie.

La combinaison des résultats sur les cumuls de précipitations (NORRR), le nombre de jours de pluie (NORRR1MM) et les jours de fortes précipitations (NORPN20MM) met en évidence une évolution structurante du régime pluviométrique : **des pluies moins fréquentes mais plus intenses**, concentrées sur des périodes plus courtes.

Les valeurs absolues de l'indicateur NORPN20MM peuvent paraître faibles, mais elles traduisent des moyennes climatologiques mensuelles calculées sur des périodes de 30 ans et sur des mailles spatiales étendues. Elles n'en demeurent pas moins révélatrices d'une augmentation relative de la fréquence des événements pluvieux les plus intenses, concentrés principalement en automne. Cette dynamique accroît les risques de ruissellement, de crues rapides et d'érosion des sols, tout en limitant l'efficacité de la recharge des nappes et des sols. Elle constitue un enjeu majeur pour la gestion de l'eau, la prévention des risques naturels et l'adaptation des usages du territoire de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon.

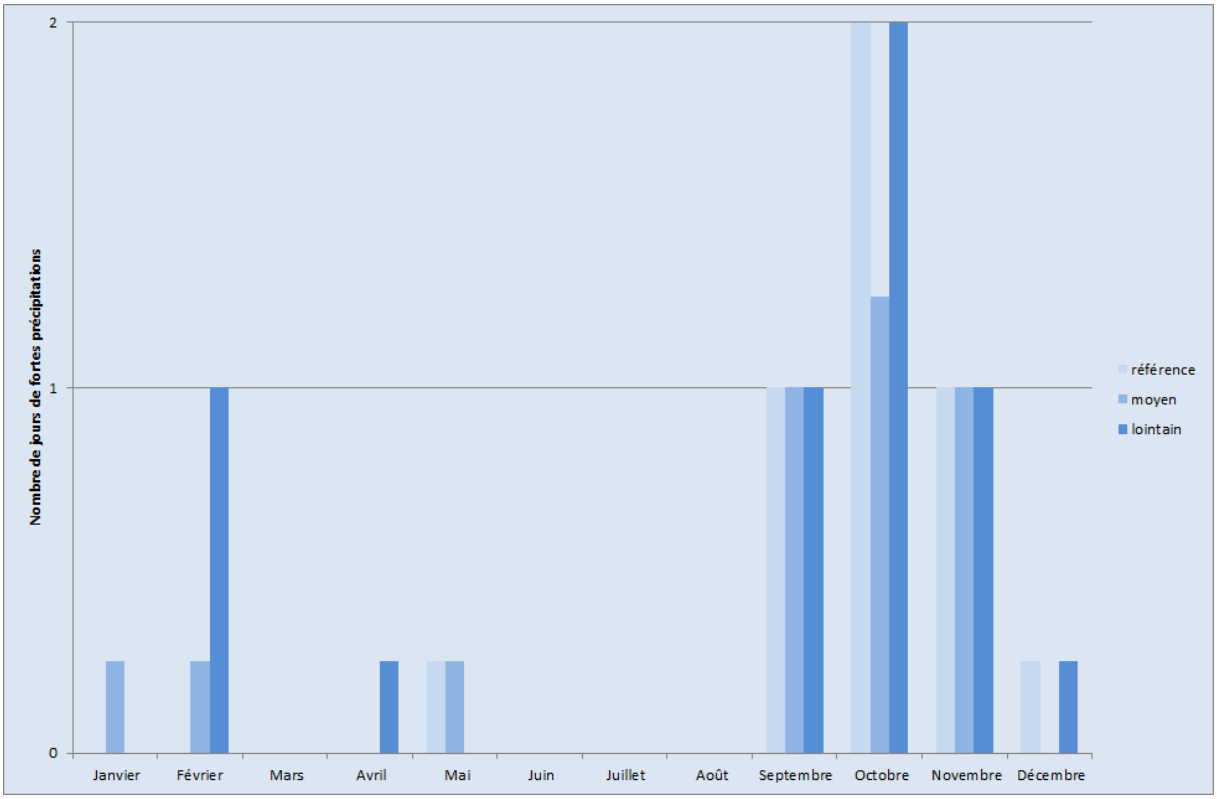


Figure 30a - nombre de jours de fortes précipitations (NORPN20MM) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5

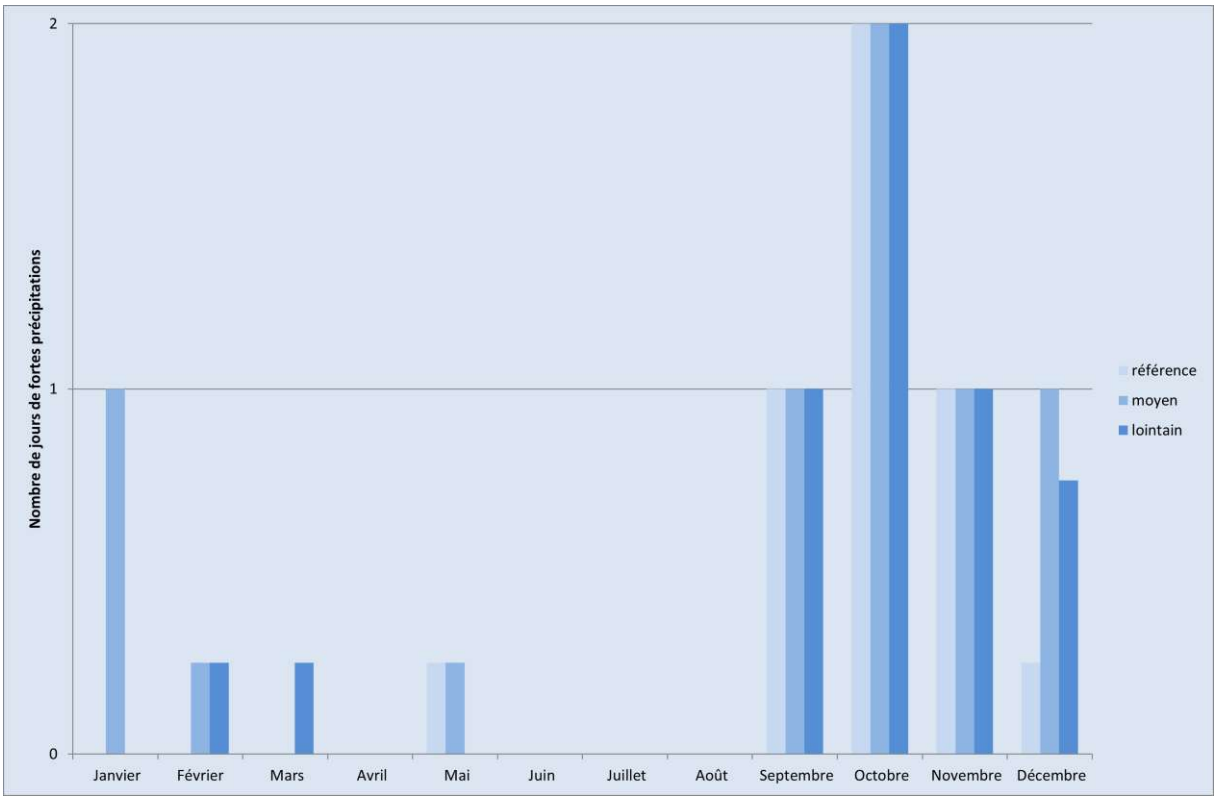


Figure 30b - nombre de jours de fortes précipitations (NORPN20MM) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP8.5

3.3.15 – NORPXCWD : nombre maximum de jours de pluie consécutifs

L'indicateur NORPXCWD renseigne sur la **durée maximale des séquences pluvieuses continues** (jours consécutifs avec RR > 1 mm) à l'échelle mensuelle (fig. 31). Il constitue un bon proxy des **périodes de sols durablement humides**, susceptibles de favoriser la saturation des sols, le ruissellement prolongé et certains processus d'érosion, en particulier dans les contextes karstiques et méditerranéens.

Les résultats montrent que, **quelle que soit l'échéance temporelle considérée**, les valeurs de NORPXCWD demeurent **relativement faibles**, généralement comprises entre **1 et 3 jours consécutifs**, avec une faible variabilité saisonnière. Les séquences les plus longues apparaissent préférentiellement :

- au **printemps (avril–mai)**,
- et surtout en **automne (octobre–novembre)**, période déjà identifiée comme structurante dans le régime pluviométrique méditerranéen.

À l'horizon intermédiaire (H2, 2041–2070) comme à l'horizon lointain (H3, 2070–2099), **aucune augmentation marquée de la durée maximale des séquences pluvieuses continues n'est observée**. Les valeurs projetées restent globalement proches de la période de référence, avec des écarts faibles et non systématiques selon les mois.

Cette stabilité apparente de NORPXCWD contraste avec :

- l'augmentation projetée des **cumuls pluviométriques automnaux** (NORRR),
- et la légère hausse de la fréquence des **jours de fortes précipitations** (NORPN20MM).

Elle suggère que l'évolution future du régime des pluies sur le territoire de la réserve de biosphère des gorges du Gardon ne se traduirait pas par des épisodes pluvieux plus longs, mais plutôt par des **événements plus intenses et plus concentrés dans le temps**, caractéristiques du changement climatique en contexte méditerranéen.

En ce sens, l'indicateur NORPXCWD contribue à affiner le diagnostic : **le risque hydrologique futur semble davantage lié à l'intensification ponctuelle des pluies qu'à l'allongement des périodes humides continues**.

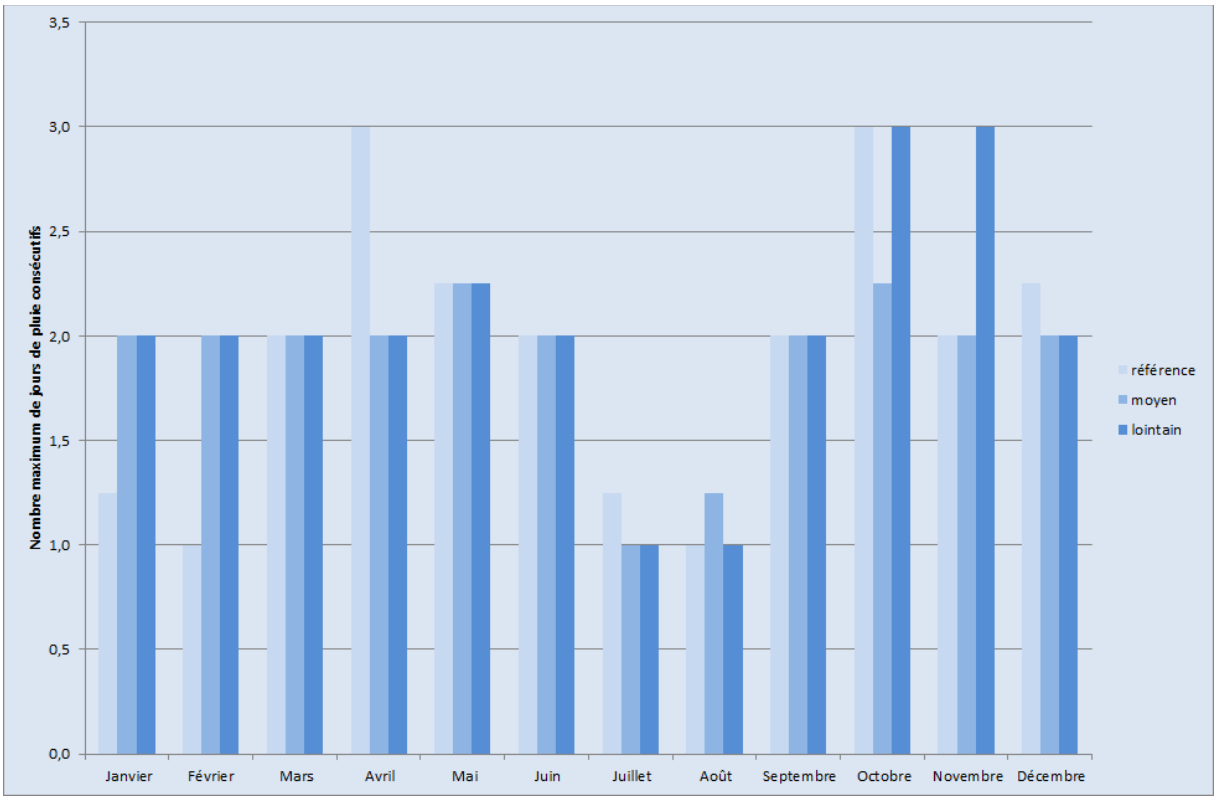


Figure 31a - Nombre maximum de jours de pluie consécutifs NORPXCWD à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5

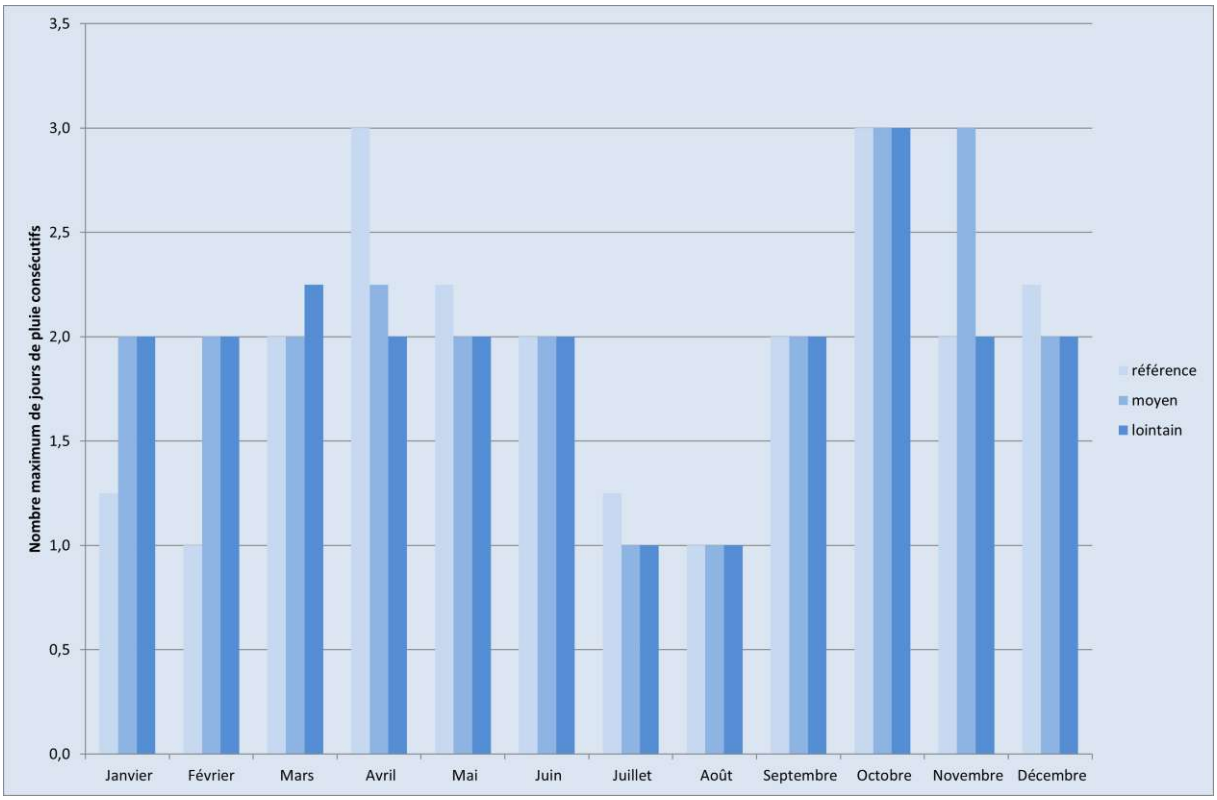


Figure 31b - Nombre maximum de jours de pluie consécutifs NORPXCWD à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP8.5

3.3.16 – NORPXCDD : durée maximale des périodes de sécheresse

L'indicateur **NORPXCDD** correspond au **nombre maximal de jours consécutifs sans précipitation significative (RR < 1 mm)**, calculé à l'échelle mensuelle (fig. 32a et 32b). Il permet de caractériser l'**intensité des séquences sèches**, indépendamment des cumuls annuels, et constitue un indicateur central pour l'analyse des **contraintes hydriques**, de la disponibilité en eau des sols et du stress exercé sur les écosystèmes et les usages. Sur la période de référence (1951–2005), les valeurs de NORPXCDD mettent en évidence une **saisonnalité marquée des périodes de sécheresse**, avec :

- des durées maximales élevées en **été**, en particulier en **juillet et août** (environ 12 à 13 jours consécutifs),
- des valeurs également significatives en **hiver**, traduisant l'existence de séquences sèches hivernales parfois longues en climat méditerranéen,
- et des durées plus faibles au **printemps**.

À l'horizon intermédiaire (H2, 2041–2070), une **augmentation nette de la durée maximale des périodes sèches estivales** est observée. En juillet et août, les valeurs atteignent en moyenne **15 à 17 jours consécutifs sans pluie**, soit un allongement de plusieurs jours par rapport à la période de

référence. Cette évolution traduit un **renforcement de la sécheresse estivale**, en cohérence avec les projections climatiques méditerranéennes.

À l'horizon lointain (H3, 2070–2099), cette tendance se **confirme et se stabilise à des niveaux élevés**. Les durées maximales de sécheresse estivale demeurent supérieures à celles de la période de référence, avec des valeurs comprises entre **16 et 17 jours consécutifs**, et une extension de durées sèches significatives vers la **fin de l'été et le début de l'automne** (septembre).

L'augmentation projetée de NORPXCDD doit être interprétée conjointement avec :

- la **stabilité relative du nombre de jours de pluie consécutifs** (NORPXCWD),
- et l'augmentation de l'intensité des précipitations lorsqu'elles surviennent (NORPN20MM).

Cette combinaison traduit une évolution vers un régime climatique caractérisé par une **alternance plus marquée entre périodes sèches prolongées et épisodes pluvieux courts mais intenses**, renforçant les tensions sur les ressources en eau, les sols et les milieux naturels du territoire de la réserve de biosphère des gorges du Gardon.



Figure 32a - Durée maximale (jours) des périodes de sécheresse (NORPXCDD) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5



Figure 32b - Durée maximale (jours) des périodes de sécheresse (NORPXCDD) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP8.5

3.3.17 – NORTPSPI : temps passé en sécheresse météorologique

L'indicateur **NORTPSPI** exprime la **proportion du temps passée en situation de sécheresse météorologique**, sans unité, et constitue un indicateur synthétique du **déséquilibre hydrique** (fig. 33). Contrairement aux indicateurs fondés sur des seuils journaliers (séquences sèches, jours de pluie ou événements extrêmes), le TPSPI permet d'appréhender la **persistance globale des conditions sèches** au cours du temps.

Sur la période de référence (1951–2005), les valeurs de NORTPSPI restent globalement modérées, comprises entre **0,10 et 0,15** selon les mois. Les niveaux les plus faibles sont observés au **printemps**, tandis que les valeurs les plus élevées apparaissent déjà en **été** et en **automne**, traduisant une saisonnalité nette de la sécheresse météorologique sur le territoire.

À l'horizon intermédiaire (H2, 2041–2070), une **augmentation généralisée du temps passé en sécheresse météorologique** est observée sur l'ensemble de l'année. Les valeurs atteignent fréquemment **0,20 à 0,24**, avec une accentuation marquée :

- en **été (juillet–août)**,
- et en **automne (septembre–novembre)**.

À l'horizon lointain (H3, 2070–2099), cette tendance se **renforce nettement**. Le NORTPSPI atteint des valeurs proches de **0,25**, signifiant qu'environ **un quart du temps mensuel est**

passé en conditions de sécheresse météorologique, y compris en dehors de la période estivale stricte. L'augmentation est particulièrement marquée en automne et en hiver, traduisant une extension saisonnière de la sécheresse.

Cet indicateur synthétique confirme et renforce les enseignements issus des autres variables prospectives :

- allongement des séquences sèches maximales (NORPXCDD),
- absence d'augmentation des séquences pluvieuses continues (NORPXCWD),
- intensification ponctuelle des pluies sans compensation durable du déficit hydrique.

Pris ensemble, ces résultats indiquent une évolution vers un climat caractérisé par une sécheresse plus fréquente, plus persistante et plus diffuse dans l'année, constituant un facteur de pression majeur sur les ressources en eau, les écosystèmes et les usages du territoire de la réserve de biosphère des gorges du Gardon.

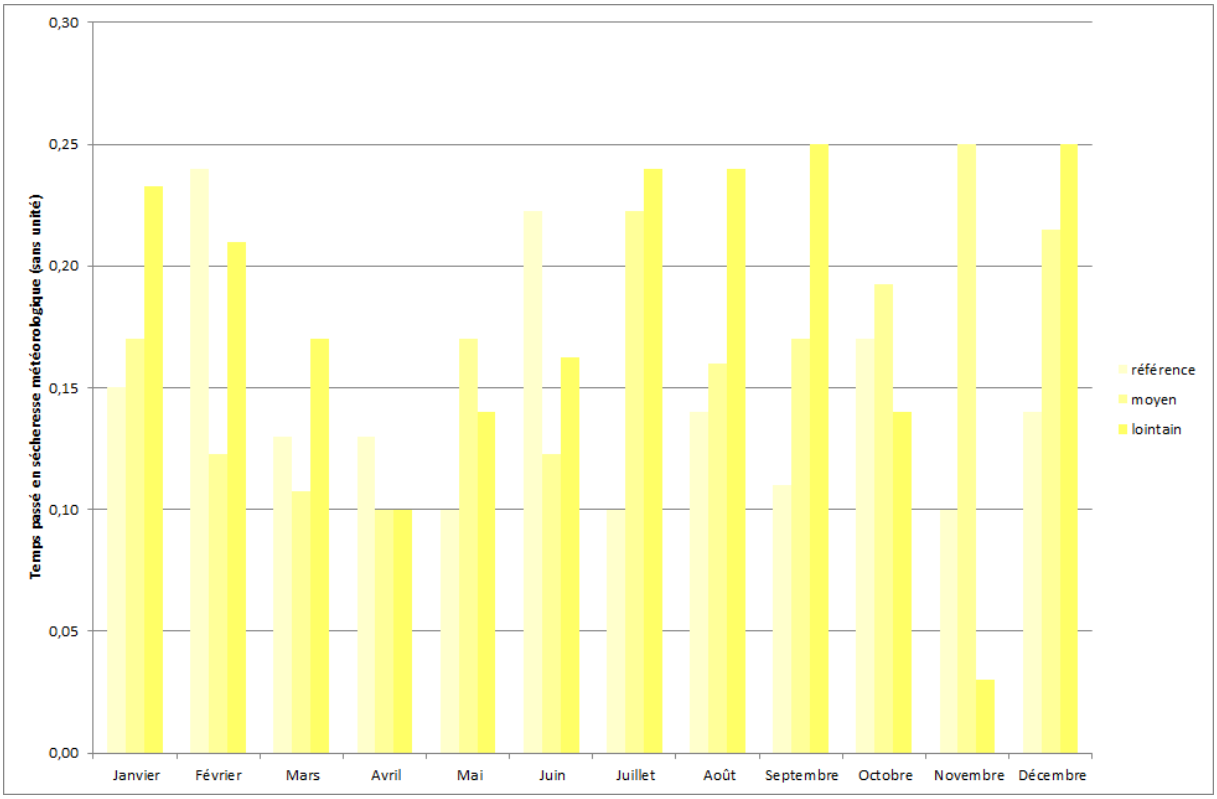


Figure 33a - Temps passé en sécheresse météorologique (sans unité) NORTPSPI à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5

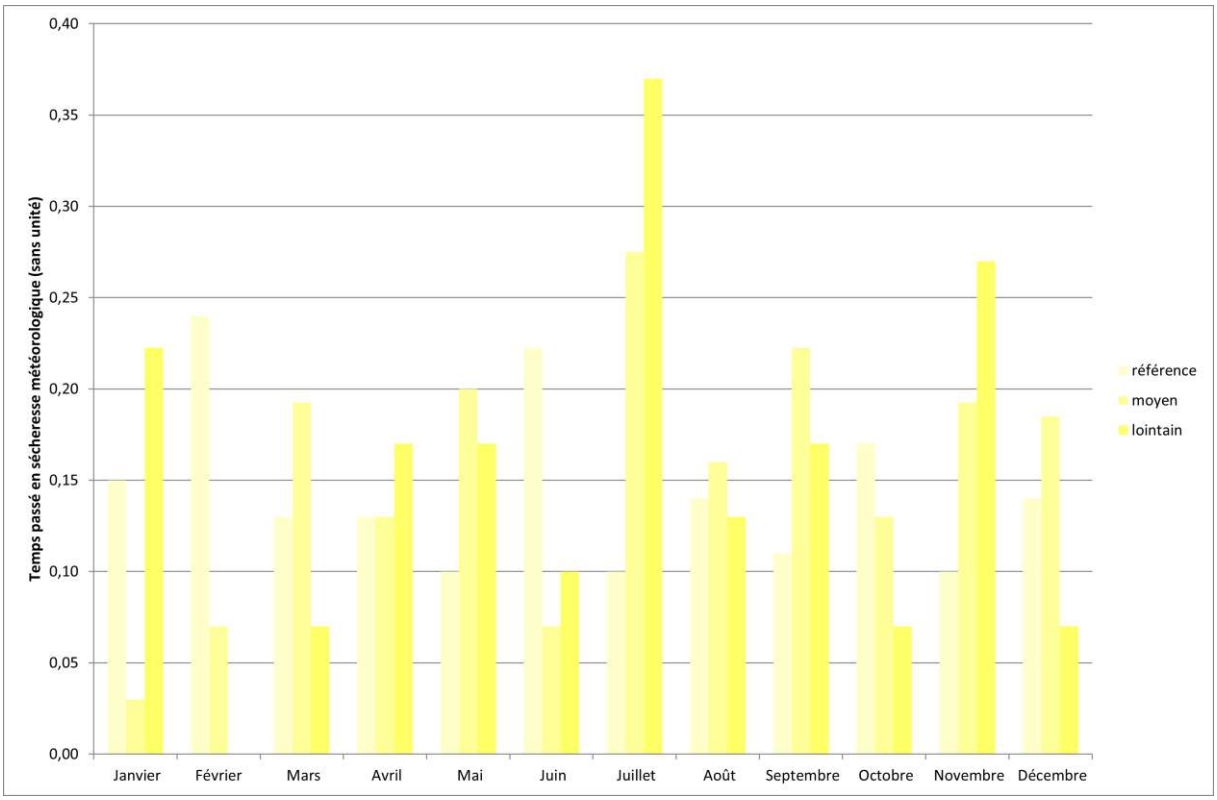


Figure 33b - Temps passé en sécheresse météorologique (sans unité) NORTPSPI à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP8.5

3.3.18 – NORETPC : cumul de l'évapotranspiration potentielle (méthode de Hargreaves)

L'indicateur **NORETPC** correspond au **cumul mensuel de l'évapotranspiration potentielle (ETP)**, estimée selon la **méthode de Hargreaves (mm)** (fig. 34). Il représente la **demande atmosphérique en eau**, indépendamment de la disponibilité réelle de la ressource, et constitue un indicateur clé de la **pression climatique exercée sur les sols, la végétation et les ressources hydriques**.

Sur la période de référence (1951–2005), le cycle annuel de l'ETP est marqué par une forte saisonnalité. Les valeurs restent modérées en hiver (environ **30 à 40 mm/mois**), augmentent rapidement au printemps, puis culminent en **été**, avec des maximas atteignant **160 à 180 mm/mois** en juillet–août. Cette dynamique est caractéristique d'un climat méditerranéen à forte contrainte estivale.

À l'horizon intermédiaire (H2, 2041–2070), une **augmentation généralisée de l'ETP** est observée sur l'ensemble de l'année, mais elle est particulièrement marquée :

- au **printemps**, avec une accélération précoce de la demande évaporative,
- et en **été**, où les cumuls mensuels dépassent régulièrement **170 mm**, traduisant une intensification de la contrainte climatique sur les milieux.

À l'horizon lointain (H3, 2070–2099), l'augmentation de l'ETP devient encore plus nette. Les valeurs estivales atteignent voire dépassent **180 mm/mois**, tandis que les mois de transition (mai, septembre, octobre) présentent également des niveaux d'ETP comparables aux maxima actuels. Cette évolution traduit :

- un **allongement de la période de forte demande évaporative**,
- et une **intensification du déficit climatique potentiel**, y compris en dehors de l'été strict.

La hausse de l'évapotranspiration potentielle, combinée :

- à l'absence d'augmentation significative des cumuls pluviométriques,
- à la persistance de séquences sèches,
- et à l'augmentation du temps passé en sécheresse météorologique (NORTPSPI),

conduit à un **déséquilibre hydrique structurel croissant**. Celui-ci constitue un facteur de vulnérabilité majeur pour les écosystèmes, les usages agricoles, la ressource en eau et, plus largement, la résilience du territoire de la réserve de biosphère des gorges du Gardon face au changement climatique.



Figure 34a - Cumul de l'évapotranspiration potentielle (méthode de Hargreaves ; mm) NORETPC à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5

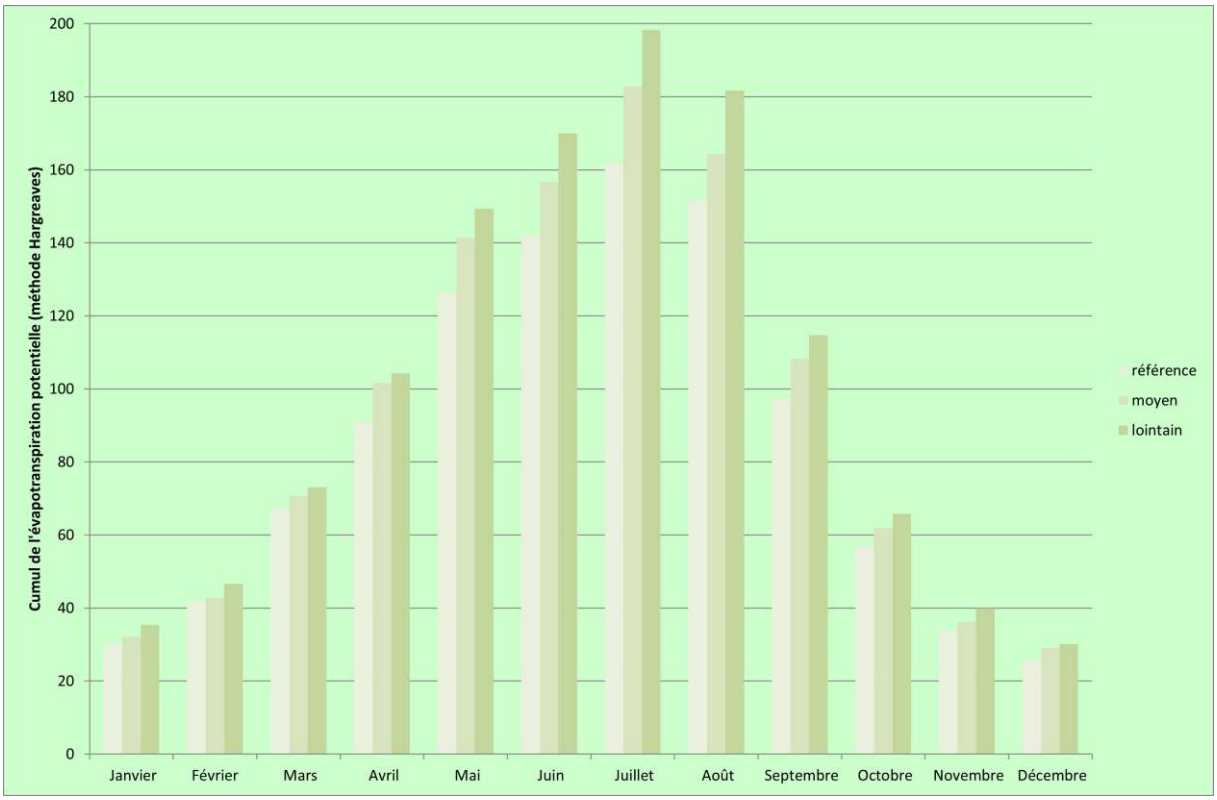


Figure 34b - Cumul de l'évapotranspiration potentielle (méthode de Hargreaves ; mm) NORETPC à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP8.5

3.3.19 Synthèse – Évolutions climatiques futures sur le territoire de la Réserve de biosphère (scénarios DRiAS RCP4.5)

L'analyse prospective conduite à partir des données **DRIAS 2020**, selon le modèle **CNRM-CM5 / ALADIN63**, met en évidence une **transformation profonde et systémique du climat** de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon au cours du XXIe siècle. Les évolutions projetées, comparées à la période de référence (1951–2005), s'expriment de manière cohérente à l'ensemble des horizons étudiés (2041–2070 et 2070–2099), avec une **accentuation nette des signaux climatiques dans le scénario lointain**.

- **Un réchauffement généralisé et fortement saisonnalisé**

Les températures moyennes, minimales et maximales augmentent **en toutes saisons**, avec un signal particulièrement marqué au printemps et en été.
Le réchauffement est **plus prononcé pour les températures minimales**, traduisant une **réduction du rafraîchissement nocturne**, facteur déterminant pour le confort thermique, la santé humaine et le fonctionnement des écosystèmes.

Les mois estivaux (juin à août) connaissent des températures moyennes désormais comparables à celles observées historiquement dans des contextes climatiques plus méridionaux, confirmant un **glissement progressif vers des conditions thermiques plus chaudes et plus persistantes**.

- **Une intensification des extrêmes thermiques**

Les indicateurs relatifs aux fortes chaleurs (TX35, TXND), aux nuits anormalement chaudes (NORTNHT) et aux nuits tropicales (NORTR) montrent une **augmentation nette de la fréquence et de la durée des situations extrêmes**, en particulier en été mais également en intersaison. Les vagues de chaleur (NORTXHWD), bien que toujours concentrées sur quelques mois, deviennent **plus longues et plus récurrentes**, renforçant les risques pour la biodiversité, les usages agricoles, les activités de plein air et la santé des populations. En parallèle, le **nombre de jours de gel (NORTNFD)** diminue fortement, voire tend à devenir marginal hors hiver, traduisant une **perte progressive des conditions froides structurantes** pour certains cycles biologiques et hydrologiques.

Le tableau suivant propose une lecture synthétique des principales évolutions liées à l'intensification de la chaleur et de leurs implications écologiques et territoriales à l'échelle de la Réserve de biosphère (tableau 4).

Évolution climatique observée/projetée	Traduction climatique	Effets écologiques et sanitaires potentiels	Enjeux pour le territoire
Augmentation des températures moyennes et maximales (TAV, TXAV, NORTAV)	Élévation du niveau thermique général, étés plus chauds	Accélération des cycles biologiques, stress thermique accru pour la végétation	Adaptation des pratiques agricoles et gestion des milieux
Augmentation des températures minimales	Réduction du rafraîchissement nocturne	Diminution de la récupération physiologique (faune, flore, humains)	Risques sanitaires accrus, inconfort thermique nocturne
Augmentation des jours anormalement chauds (TXND)	Fréquence accrue de conditions thermiques élevées	Stress hydrique accru, perturbation des fonctions physiologiques végétales	Pression accrue sur la ressource en eau et les écosystèmes

Augmentation des nuits tropicales (TR, NORTR)	Chaleur persistante sur 24h	Stress thermique continu, mortalité accrue pour certaines espèces sensibles	Vulnérabilité des populations, enjeux d'adaptation du bâti
Allongement et intensification des vagues de chaleur (TXHWD, NORTXHWD)	Épisodes de chaleur plus longs et plus fréquents	Dépérissement végétal, baisse de résilience des écosystèmes	Gestion des risques (santé, incendies, tourisme, travail)
Augmentation des jours de fortes chaleurs (TX35)	Dépassement plus fréquent de seuils critiques	Dégradation des conditions de vie pour la faune et la flore	Adaptation des usages (horaires, activités, aménagements)
Couplage chaleur / sécheresse	Intensification de l'évapotranspiration	Assèchement des sols, stress hydrique chronique	Tension sur la ressource en eau, conflits d'usage
Réduction du contraste thermique saisonnier	Étés plus longs, intersaisons plus chaudes	Allongement des périodes de stress thermique	Reconfiguration des calendriers agricoles et touristiques

Tableau 4 : principales évolutions liées à l'intensification de la chaleur et implications écologiques et territoriales

- Une raréfaction fonctionnelle du froid

  - Lecture quantitative des évolutions hivernales

Les projections climatiques issues des scénarios DRIAS mettent en évidence une évolution cohérente et progressive du régime thermique hivernal sur le territoire. L'augmentation des températures moyennes mensuelles hivernales (NORTAV) s'accompagne d'une diminution du nombre de jours de gel (NORTNFD), observée dès l'horizon moyen et renforcée à l'horizon lointain. Cette évolution ne traduit pas uniquement une réduction de la fréquence du gel, mais une transformation plus globale des conditions hivernales, caractérisée par :

- une élévation du niveau thermique moyen,
- une réduction de la durée cumulée des périodes froides,
- et une moindre persistance des séquences de gel.

Autrement dit, le signal climatique hivernal s'exprime moins par la disparition immédiate des extrêmes froids que par une modification progressive de leur occurrence et de leur intensité, traduisant un basculement vers des hivers plus doux et moins structurants sur le plan thermique (en langage commun, cela pourrait se traduire par « on n'a plus d'hiver »).

- Impacts sur les principales formations végétales de la réserve

Garrigues et formations xérophiles

Les formations de garrigue, dominées par des espèces méditerranéennes xérophiles, *sont a priori* bien adaptées à des conditions chaudes et sèches. Toutefois, la réduction de la contrainte hivernale pourrait modifier les équilibres écologiques internes de ces milieux. La diminution des épisodes de froid limite en effet certains mécanismes de régulation naturelle, notamment vis-à-vis des ravageurs et pathogènes, dont la mortalité hivernale pourrait diminuer. Par ailleurs, des hivers plus doux peuvent favoriser une activité végétative précoce, augmentant la sensibilité aux épisodes de gel tardif, toujours possibles dans le contexte climatique local. À plus long terme, ces évolutions pourraient conduire à une recomposition progressive des communautés végétales, avec un renforcement des espèces les plus thermophiles et une modification des dynamiques de concurrence (Quézel et Médail, 2003 ; Giorgi et Lionello, 2008).

Chênaies (vertes et pubescentes)

Les formations forestières, en particulier les chênaies vertes et pubescentes, pourraient être affectées de manière plus contrastée. D'une part, l'élévation des températures hivernales peut réduire les contraintes thermiques pesant sur certaines espèces, favorisant leur croissance et leur expansion. D'autre part, la diminution du cumul de froid hivernal peut perturber certains processus physiologiques, notamment les mécanismes de dormance et de reprise végétative. Cette évolution pourrait entraîner des décalages phénologiques, avec des phases de débourrement plus précoces, augmentant la vulnérabilité aux gels tardifs (Morin et al., 2010 ; Allen et al., 2010). Elle pourrait également favoriser certaines espèces méditerranéennes au détriment d'espèces plus tolérantes au froid, contribuant à une évolution progressive de la composition des peuplements.

Ripisylves et milieux riverains du Gardon et des autres cours d'eau de la réserve

Les formations riveraines, fortement dépendantes des conditions hydriques, pourraient être affectées de manière indirecte mais significative. L'adoucissement des hivers, combiné à une augmentation des températures sur l'ensemble de l'année, peut accentuer les phénomènes d'évapotranspiration et modifier les bilans hydriques, en interaction avec les évolutions des précipitations et des débits. Par ailleurs, la réduction des épisodes de froid hivernal peut favoriser le développement de certains organismes (ravageurs, espèces invasives), susceptibles d'affecter la santé et la résilience de ces écosystèmes. Dans ce contexte, les ripisylves apparaissent comme des milieux particulièrement sensibles aux effets combinés du réchauffement thermique et des contraintes hydrologiques (Tabacchi et al., 2000 ; Stella et al., 2013 ; Rivaes et al., 2012).

Ainsi, l'évolution du climat hivernal sur le territoire ne se traduit pas par une disparition du froid, mais par une atténuation progressive de son rôle écologique. Cette "raréfaction fonctionnelle" du froid constitue un facteur de transformation silencieux mais structurant des écosystèmes, susceptible d'affecter à la fois les cycles biologiques, les interactions entre espèces et la résilience globale des formations végétales.

Le tableau suivant propose une lecture synthétique des principales évolutions climatiques hivernales et de leurs implications écologiques potentielles à l'échelle du territoire (tableau 5).

Évolution climatique observée/projetée	Traduction climatique	Effets écologiques potentiels	Enjeux pour le territoire
Augmentation des températures hivernales (NORTAV)	Hivers plus doux, élévation du niveau thermique moyen	Accélération des cycles biologiques, reprise végétative plus précoce	Désynchronisation des cycles, sensibilité accrue aux aléas
Diminution du nombre de jours de gel (NORTNFD)	Réduction de la fréquence et de la durée des épisodes froids	Baisse de la mortalité hivernale des ravageurs et pathogènes	Risques accrus pour la santé des peuplements végétaux
Maintien possible d'épisodes de gel ponctuels	Persistance d'événements froids mais moins fréquents	Vulnérabilité accrue des végétaux en phase active (gel tardif)	Risques de dommages ponctuels mais potentiellement sévères
Réduction du cumul de froid hivernal	Atténuation de la contrainte thermique saisonnière	Perturbation des mécanismes de dormance et de vernalisation	Déséquilibres physiologiques, impacts sur la reproduction végétale
Réchauffement global du régime thermique	Modification progressive des conditions écologiques de référence	Avantage aux espèces thermophiles, recomposition des communautés	Évolution des paysages et des équilibres écologiques

Tableau 5 : principales évolutions climatiques hivernales et implications écologiques potentielles

(vernalisation : processus physiologique induit par le froid, conférant à une plante sa capacité de floraison)

➢ Des précipitations annuelles globalement stables mais plus contrastées

Les cumuls annuels de précipitations (NORRR) n'affichent pas de baisse systématique marquée, mais leur répartition saisonnière évolue. En effet, les projections suggèrent :

- une relative stabilité hivernale,
- une fragilisation des apports printaniers et estivaux,
- et une concentration accrue des pluies en automne, souvent associée à des épisodes plus intenses mais plus ponctuels.

Les indicateurs de fréquence (NORRR1MM) et d'intensité (NORPN20MM) confirment que les jours de fortes précipitations restent peu nombreux, mais susceptibles de se concentrer sur quelques épisodes courts, typiques du régime méditerranéen.

➢ Un allongement et une intensification des périodes sèches

Les indicateurs de sécheresse (NORPXCDD, NORTPSPI) révèlent une augmentation nette de la durée et de la récurrence des périodes sans pluie, notamment en été et au début de l'automne. Le territoire est ainsi exposé à des séquences sèches plus longues, parfois interrompues par des épisodes pluvieux intenses mais insuffisants pour reconstituer durablement les réserves hydriques.

Cette dynamique est particulièrement préoccupante pour :

- les milieux naturels sensibles (garrigues, zones forestières, ripisylves),
- l'agriculture,
- la ressource en eau,
- et le risque incendie.

➢ Une hausse marquée de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

Le cumul de l'évapotranspiration potentielle (NORETPC, en mm) augmente fortement à l'ensemble des horizons futurs, sous l'effet combiné de la hausse des températures et de l'allongement de la saison chaude.

Cette augmentation de l'ETP accentue le déséquilibre du bilan hydrique climatique, en amplifiant les déficits estivaux, même en l'absence de baisse marquée des précipitations annuelles. Elle constitue un signal clé de l'aridification progressive du territoire.

➢ Une trajectoire climatique convergente vers des conditions plus contraignantes

Pris dans leur ensemble, les indicateurs analysés convergent vers un climat plus chaud, plus contrasté, plus sec en été et plus exigeant pour les systèmes naturels et humains. La combinaison :

- du **réchauffement**,
- de la **multiplication des extrêmes thermiques**,
- de **l'allongement des périodes sèches**,
- et de **l'augmentation de l'ETP**,

dessine une trajectoire climatique qui **renforce la vulnérabilité structurelle du territoire**, tout en posant les bases d'une réflexion stratégique sur l'adaptation, la gestion de l'eau, la préservation des milieux et le confort thermique.

Le tableau suivant propose une lecture synthétique des évolutions du **régime des précipitations**, des **périodes sèches et de l'évapotranspiration**, ainsi que de leurs **implications hydrologiques et territoriales** (tableau 6).

Évolution climatique observée/projetée	Traduction climatique	Effets hydrologiques et écologiques potentiels	Enjeux pour le territoire
Stabilité relative des précipitations annuelles (NORRR)	Volume annuel global peu modifié	Illusion de stabilité hydrique	Risque de sous-estimation des tensions sur la ressource
Modification de la répartition saisonnière	Moins de pluie au printemps/été, concentration en automne	Décalage entre apports et besoins hydriques	Difficulté de recharge des sols et des nappes en période critique
Concentration des précipitations en épisodes intenses (NORPN20MM)	Pluies plus brutales et ponctuelles	Ruissellement accru, infiltration réduite	Risques accrus d'érosion, de crues rapides et faible recharge efficace
Stabilité du nombre de jours de pluie (NORRR1MM)	Fréquence peu modifiée mais distribution différente	Précipitations moins efficaces pour les milieux	Déséquilibre entre fréquence et utilité hydrologique
Allongement des périodes sèches (NORPXCDD, NORTPSPI)	Séquences sans pluie plus longues	Assèchement prolongé des sols, stress hydrique accru	Pression sur les écosystèmes, l'agriculture et la ressource en eau

Augmentation de l'évapotranspiration potentielle (NORETPC)	Demande climatique en eau plus forte	Déficit hydrique accentué, même sans baisse des pluies	Intensification de l'aridification du territoire
Couplage chaleur / sécheresse	Effet combiné température + déficit hydrique	Stress physiologique accru pour la végétation	Risques accrus de dépérissement et d'incendies
Décorrélation pluie / disponibilité en eau	Pluie ≠ recharge effective	Moindre efficacité des épisodes pluvieux	Nécessité d'une gestion fine et anticipée de l'eau

Tableau 6 : évolutions du régime des précipitations, des périodes sèches et de l'évapotranspiration, et implications hydrologiques et territoriales

Pris ensemble, ces éléments mettent en évidence une transformation conjointe du régime thermique et hydrique, conduisant à un renforcement des contraintes climatiques et à une recomposition progressive des équilibres écologiques et territoriaux. Il convient de rappeler que ces évolutions sont projetées dans le cadre du scénario RCP 4.5 ; elles représentent ainsi un scénario intermédiaire et non le cas le plus pessimiste envisagé par les projections climatiques actuelles. Ce scénario sera confronté au RCP 8.5 dans la suite de cette étude, dans la partie consacrée aux types de climat de Köppen-Geiger et à leurs évolutions sur le territoire de la réserve de biosphère.

Les analyses précédentes ont permis de caractériser de manière fine les évolutions passées et futures du climat sur le territoire de la réserve de biosphère, tant du point de vue des températures que du régime des précipitations et des processus de sécheresse. Si ces indicateurs constituent des éléments essentiels pour comprendre les dynamiques climatiques à l'œuvre, ils ne traduisent qu'indirectement les conditions réellement vécues par les populations et les écosystèmes.

Dans cette perspective, il apparaît nécessaire de compléter l'analyse par une approche centrée sur le confort thermique, intégrant simultanément plusieurs variables météorologiques et leur interaction avec le corps humain. L'indice UTCI (Universal Thermal Climate Index) permet précisément de dépasser la seule lecture des températures de l'air, en rendant compte du stress thermique effectivement ressenti.

La partie suivante s'attache ainsi à analyser l'évolution du confort thermique sur le territoire, en lien avec les transformations climatiques mises en évidence précédemment, avant d'élargir la réflexion aux grands types climatiques et à leurs recompositions spatiales.

4 – Évolution du confort thermique (indice UTCI)

Les analyses climatiques menées jusqu'à présent ont permis de caractériser finement les évolutions des températures, des précipitations et des processus de sécheresse sur la réserve de biosphère des gorges du Gardon. Si ces indicateurs constituent des descripteurs essentiels du changement climatique, ils ne traduisent toutefois qu'imparfaitement les conditions de confort ou de stress thermique réellement ressenties par les populations humaines.

Afin d'appréhender cette dimension vécue du climat, la présente section s'appuie sur l'indice UTCI (Universal Thermal Climate Index), qui intègre conjointement la température de l'air, l'humidité, le vent et le rayonnement pour évaluer la contrainte thermique exercée sur le corps humain. L'UTCI correspond ainsi à la température de l'air d'un environnement de référence produisant une réponse physiologique équivalente à celle générée par les conditions météorologiques observées.

L'évolution du confort thermique est analysée sur la période 1970–2025, à partir des réanalyses ERA5-HEAT (Di Napoli et al., 2021) du programme Copernicus (ECMWF – annexe 1)[3]. Deux périodes contrastées de l'année ont été retenues : le mois de juillet, représentatif des conditions estivales et des situations de stress thermique chaud, et le mois de février, caractéristique des conditions hivernales et du stress thermique froid. Pour chaque année, l'indice UTCI a été extrait à partir de la maille ERA5 qui recouvre la majeure partie de la réserve de biosphère (coordonnées 4,48E - 43,9N), afin d'obtenir une valeur représentative à l'échelle du territoire (fig. 35).

[3] https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/derived-utci-historical?tab=overview

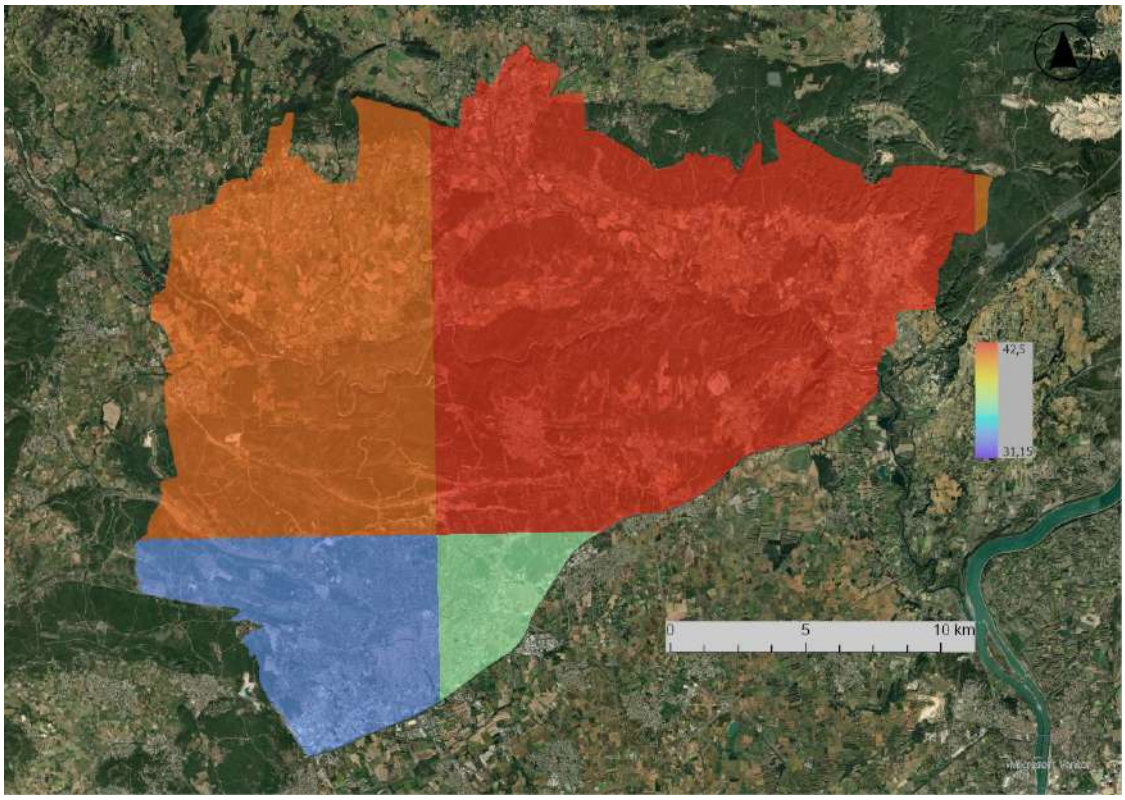


Figure 35 – UTCI max (chaleur ressentie en degrés) de juillet 2025 sur le territoire de la réserve

Les tendances temporelles de l'UTCI ont été évaluées à l'aide du test non paramétrique de Mann-Kendall, complété par l'estimation de la pente de Sen, permettant de quantifier l'intensité et la direction des évolutions observées. Cette approche vise à identifier les transformations progressives du confort thermique, tant en été qu'en hiver, et à mettre en évidence l'émergence éventuelle de conditions de stress thermique plus fréquentes ou plus intenses. L'analyse de l'UTCI constitue ainsi une étape clé dans le diagnostic climatique du territoire, en reliant les évolutions climatiques objectivées aux enjeux de santé, de bien-être et d'adaptation des sociétés et des écosystèmes.

4.1 Analyse du confort thermique (UTCI) estival (1970 – 2025)

L'évolution du confort thermique estival sur la réserve de biosphère des gorges du Gardon a été analysée à partir de l'indice UTCI max pour le mois de juillet, sur la période 1970–2025, à partir des données de réanalyse ERA5-HEAT. L'indice UTCI permet d'appréhender le climat ressenti par l'être humain en intégrant, au-delà de la température de l'air, les effets combinés du rayonnement, de l'humidité et du vent (fig. 36).

Le graphique met en évidence une augmentation nette et continue du stress thermique estival depuis le début des années 1970. Les valeurs maximales d'UTCI observées en juillet montrent une tendance haussière marquée, traduisant un glissement progressif vers des conditions de stress thermique fort à très fort. Alors que, durant les années 1970 et 1980, les maxima d'UTCI se situaient majoritairement entre 36 et 39 °C, les décennies récentes se

caractérisent par des valeurs fréquemment supérieures à 40 °C, avec plusieurs étés atteignant ou dépassant 42–43 °C.

Cette évolution est confirmée par les tests statistiques de tendance. Le **test de Mann-Kendall** met en évidence une tendance monotone positive significative ($\tau = 0{,}339$), associée à une p-value unilatérale inférieure à 0,0001, largement en-deçà du seuil de significativité retenu ($\alpha = 0{,}05$). La **pente de Sen**, estimée à +0,055 °C par an, indique une augmentation régulière et persistante de l'UTCI maximal de juillet sur l'ensemble de la période étudiée. À l'échelle de cinq décennies, cette pente correspond à une hausse cumulée de l'ordre de +2,5 à +3 °C du stress thermique estival ressenti.

La comparaison avec la moyenne glissante sur cinq ans des températures maximales de juillet mesurées à la station de Nîmes-Courbessac montre une cohérence forte entre le réchauffement de l'air et l'évolution de l'UTCI. Toutefois, l'augmentation de l'indice UTCI apparaît plus marquée que celle de la température seule, soulignant l'effet amplificateur des composantes radiatives et hygrométriques dans le contexte méditerranéen estival.

L'ensemble de ces résultats met en évidence une **dégradation progressive mais structurelle du confort thermique estival** sur le territoire, avec une intensification des situations potentiellement critiques pour la santé humaine. Cette dynamique renforce la vulnérabilité des populations, des activités de plein air et des écosystèmes, et constitue un enjeu majeur pour l'adaptation locale face au changement climatique.

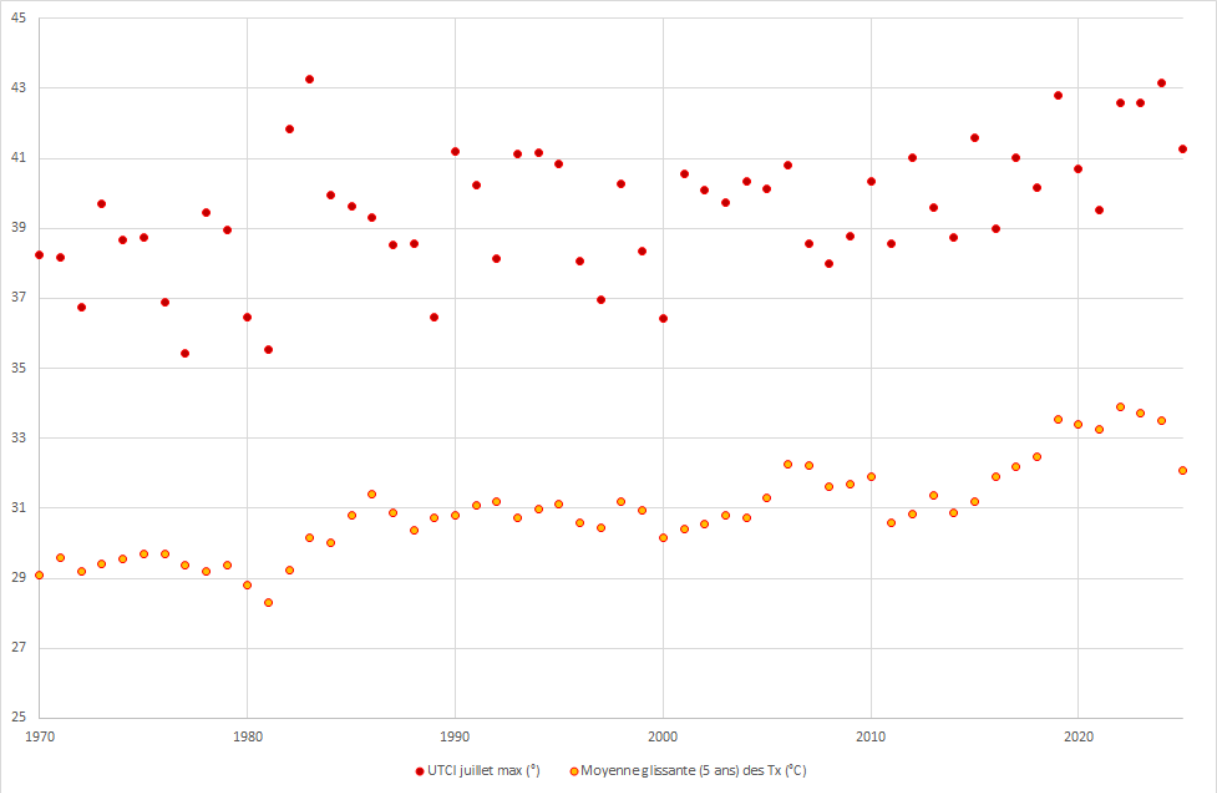


Figure 36 – UTCI maximal de juillet (°UTCI) et moyenne glissante des températures maximales de juillet (°C) enregistrées à la station de Nîmes-Courbessac de 1970 à 2025

4.2 – Analyse du confort thermique hivernal (UTCI) : une évolution plus modérée et contrastée

L'analyse conduite pour le mois de février révèle un **signal de réchauffement hivernal bien plus atténué**, tant en amplitude qu'en robustesse statistique (fig. 37). Le test de Mann-Kendall indique une tendance positive significative (τ = **0,224**, p-value = **0,015**, α = 0,05), mais sensiblement plus faible que celle observée en été.

Sur le plan climatique et biophysique, plusieurs éléments ressortent clairement :

- les **valeurs maximales d'UTCI en février augmentent**, traduisant un adoucissement progressif des conditions hivernales ;
- toutefois, cette hausse reste **contenue dans des classes de stress thermique faibles à modérées**, très éloignées des seuils critiques observés en été ;
- la moyenne glissante des températures minimales de février montre une augmentation graduelle, mais sans rupture marquée ni accélération récente comparable à celle de juillet.

Autrement dit, **le confort thermique hivernal s'améliore**, mais sans basculement brutal du régime thermique ressenti. Le réchauffement hivernal agit davantage comme un **facteur de réduction du froid contraignant** que comme un générateur de nouveaux stress.

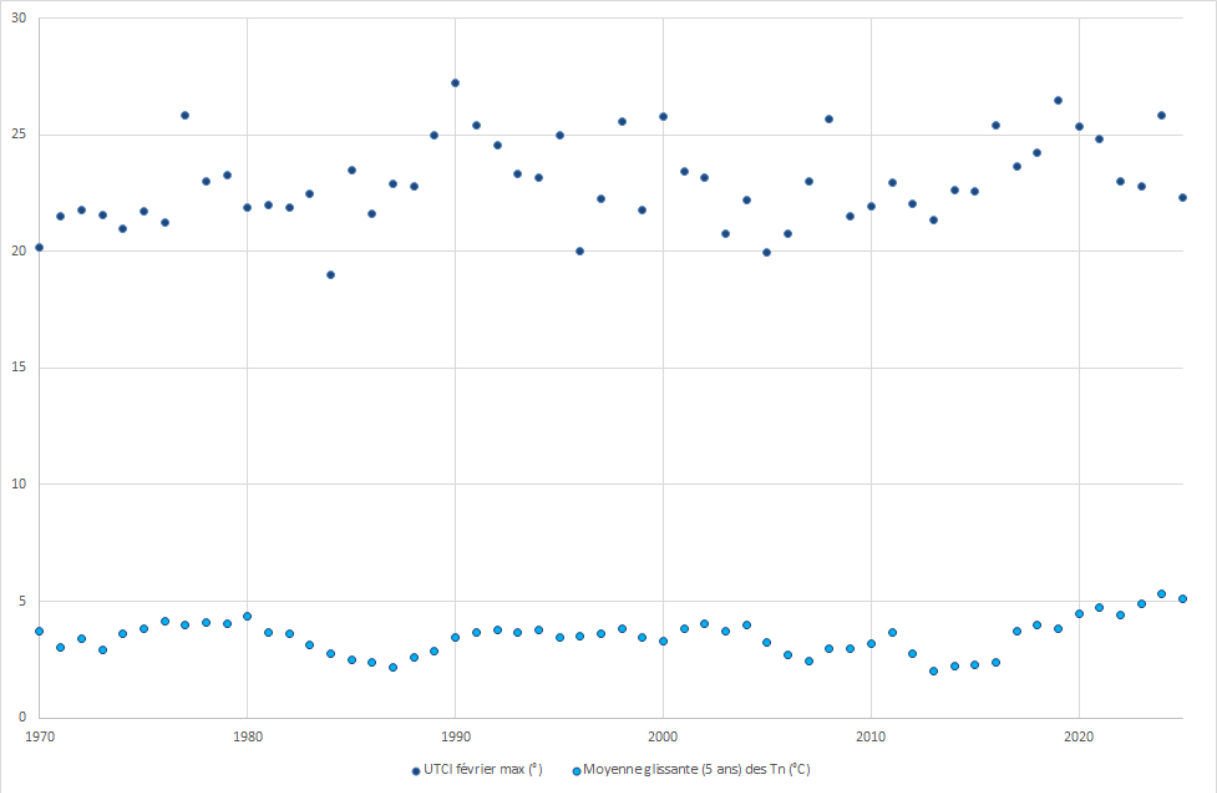


Figure 37 – UTCI maximal de février (°UTCI) et moyenne glissante des températures maximales de février (°C) enregistrées à la station de Nîmes-Courbessac de 1970 à 2025

➢ Une asymétrie saisonnière très marquée du signal UTCI

La confrontation directe des analyses estivales et hivernales met en évidence une **asymétrie forte du changement climatique ressenti** :

- en **été**, le réchauffement se traduit par une **augmentation rapide, continue et statistiquement très robuste** du stress thermique, avec un impact direct sur le confort humain, la santé, les usages touristiques et les milieux naturels ;
- en **hiver**, l'évolution est réelle mais **nettement plus modérée**, et ses effets relèvent davantage d'un déplacement des conditions thermiques vers des situations plus clémentes que d'une apparition de nouveaux risques.

Cette dissymétrie confirme que, dans le contexte méditerranéen des gorges du Gardon, **le changement climatique est avant tout un changement de l'été**, et plus précisément du **climat ressenti en période chaude**.

➢ Vers une lecture par classes UTCI : du signal thermique à l'expérience humaine

Ces résultats invitent logiquement à dépasser l'analyse continue de l'UTCI pour s'intéresser à sa **traduction en classes de stress thermique**, telles que définies par l'indice UTCI (absence de stress, stress modéré, fort, très fort).

Le passage à une analyse catégorielle permet :

- de **qualifier concrètement l'expérience humaine du climat**, au-delà des valeurs moyennes ;
- d'identifier les **seuils de bascule** vers des situations de stress thermique critiques ;
- de relier plus directement les évolutions climatiques aux enjeux sanitaires, sociaux et territoriaux.

➢ Transition conceptuelle : du climat ressenti au climat structurel et urbain

L'UTCI constitue ainsi un **chaînon central** entre plusieurs niveaux de lecture du système climatique :

- le **climat ressenti**, via l'UTCI et ses classes de stress thermique ;
- le **climat structurel**, appréhendé à travers les types climatiques de **Köppen-Geiger**, qui traduisent les régimes thermiques et pluviométriques de long terme ;
- le **climat local et urbain**, analysé ensuite à l'aide des **Local Climate Zones (LCZ)**, qui permettent d'intégrer la structure des paysages, de l'urbanisation et des couvertures de sol.

Cette articulation ouvre la voie à une lecture intégrée du changement climatique, depuis ses **fondements climatiques globaux**, jusqu'à ses **manifestations locales et vécues**, au cœur même des territoires.

4.3 Analyse du confort thermique par classes UTCI

4.3.1 Méthodologie de classification du confort thermique à partir de l'indice UTCI

Afin de faciliter l'interprétation territoriale de l'évolution du confort thermique, les valeurs de l'indice UTCI ont été analysées non seulement de manière continue (valeurs maximales, tendances temporelles), mais également à travers une **approche par classes de stress thermique**.

L'UTCI (Universal Thermal Climate Index) est un indice biométéorologique continu, exprimé en degrés Celsius équivalents, qui traduit la réponse physiologique du corps humain à une combinaison de paramètres atmosphériques (température de l'air, vent, humidité et rayonnement). S'il permet une analyse fine des conditions de confort ou d'inconfort thermique, son interprétation sur des séries temporelles longues et à l'échelle territoriale gagne en lisibilité lorsqu'il est associé à des classes synthétiques de stress thermique.

Dans cette étude, les classes UTCI standards ont été **regroupées en un nombre limité de catégories fonctionnelles**, afin de :

- réduire la variabilité interannuelle liée aux extrêmes ponctuels,
- mieux identifier les changements de régime thermique ressenti,
- rester cohérent avec les capacités d'adaptation observées dans les contextes méditerranéens,
- faciliter la mise en lien avec les enjeux territoriaux (santé, usages, biodiversité, gestion des espaces).

Ce regroupement ne constitue pas une redéfinition de l'indice UTCI, mais une **agrégation raisonnée des classes officielles**, largement utilisée dans les travaux récents portant sur l'analyse climatologique du confort thermique (Błażejczyk etal., 2010). En effet, pour Di Napoli et al., 2021, « UTCI classes should be interpreted in relation to regional climatic contexts and acclimatization".

Cinq classes de confort et de stress thermique ont ainsi été retenues :

- **Classe 1 – Stress thermique froid (UTCI < 9 °C)**

  Cette classe regroupe l'ensemble des situations de stress thermique lié au froid, de léger à fort. Elle correspond principalement aux conditions hivernales et traduit des contraintes physiologiques, écologiques et d'usage des espaces extérieurs.

- **Classe 2 – Confort thermique (9 ≤ UTCI < 26 °C)**

Cette classe correspond à des conditions thermiques jugées globalement confortables pour l'organisme humain, sans stress thermique significatif. Elle constitue une classe pivot, dont l'évolution temporelle est particulièrement informative sur la dégradation ou l'amélioration du confort thermique saisonnier.

- Classe 3 – Stress thermique modéré à la chaleur (26 ≤ UTCI < 32 °C)

  Cette classe traduit un inconfort thermique perceptible, associé à une fatigue physiologique croissante et à la nécessité d'adaptations comportementales (ombrage, hydratation, réduction des efforts). Elle est caractéristique des contextes estivaux méditerranéens.

- Classe 4 – Stress thermique fort (32 ≤ UTCI < 38 °C)

  Cette classe correspond à des conditions de stress thermique marqué, associées à des risques sanitaires accrus et à des impacts potentiels sur les écosystèmes et les usages du territoire. Elle marque un changement de nature du confort thermique estival.

- Classe 5 – Stress thermique très fort à extrême (UTCI ≥ 38 °C)
  Cette classe regroupe les situations de stress thermique sévère, susceptibles d'engendrer des effets sanitaires graves et une désorganisation des activités humaines et biologiques. Son apparition et son augmentation en fréquence constituent un indicateur fort du changement climatique ressenti.

L'utilisation de ce jeu de classes permet une lecture homogène et comparative du confort thermique entre saisons (février / juillet), entre périodes temporelles, et prépare une mise en perspective cohérente avec les analyses ultérieures portant sur les types de climats (Köppen-Geiger) et les structures spatiales du climat local (zones climatiques locales – LCZ).

4.3.2 Évolution des classes UTCI estivales (juillet, 1970–2025)

L'analyse de l'évolution des classes de stress thermique issues de l'indice UTCI pour le mois de juillet met en évidence une transformation profonde et progressive du confort thermique estival sur la réserve de biosphère des gorges du Gardon depuis 1970 (fig. 38). Contrairement à l'hiver (cf. § ci-dessous), où les changements restent marginaux et ponctuels, l'été révèle un changement de régime thermique ressenti, marqué par une intensification nette des situations de stress thermique fort à extrême.

Sur la période 1970–1979, les conditions estivales se répartissent exclusivement entre les classes de stress thermique fort (classe 4 : 32–38 °C) et de stress thermique très fort à extrême (classe 5 : ≥ 38 °C). La classe 4 représente alors encore une part significative des situations estivales, traduisant des étés déjà contraignants mais laissant subsister des marges de tolérance physiologique et d'adaptation comportementale.

Les décennies **1980–1989** et **1990–1999** marquent une première inflexion notable. La part relative de la classe 5 augmente sensiblement, tandis que la classe 4 recule. Cette évolution témoigne d'une montée en fréquence des épisodes de stress thermique sévère, sans toutefois constituer encore un basculement total du régime estival.

Le changement devient pleinement structurant à partir des années **2000–2009**, période durant laquelle la classe 5 devient largement dominante. Le stress thermique très fort ne relève plus d'événements exceptionnels, mais tend à s'imposer comme la condition estivale de référence. Cette dynamique s'accentue encore sur les périodes **2010–2019** et **2020–2025**, où les étés analysés relèvent quasi exclusivement, voire totalement, de la classe 5.

Ainsi, l'évolution des classes UTCI estivales met en évidence une **disparition progressive des situations de stress thermique "modéré" ou "intermédiaire" au profit d'un régime dominé par des niveaux de contrainte physiologique élevés**. Ce glissement traduit un changement qualitatif du climat ressenti, au-delà d'une simple augmentation des valeurs moyennes ou extrêmes de l'UTCI.

Ces résultats confirment que le réchauffement climatique se manifeste en été non seulement par une intensification des maxima thermiques, mais aussi par une **reconfiguration du confort thermique**, avec des implications directes pour la santé humaine, les usages des espaces extérieurs, la biodiversité et les dynamiques territoriales. Ils constituent également un point d'ancrage essentiel pour la mise en perspective avec les analyses suivantes, portant sur les types climatiques de Köppen-Geiger et sur les structures spatiales du climat local, notamment à travers les zones climatiques locales (LCZ).

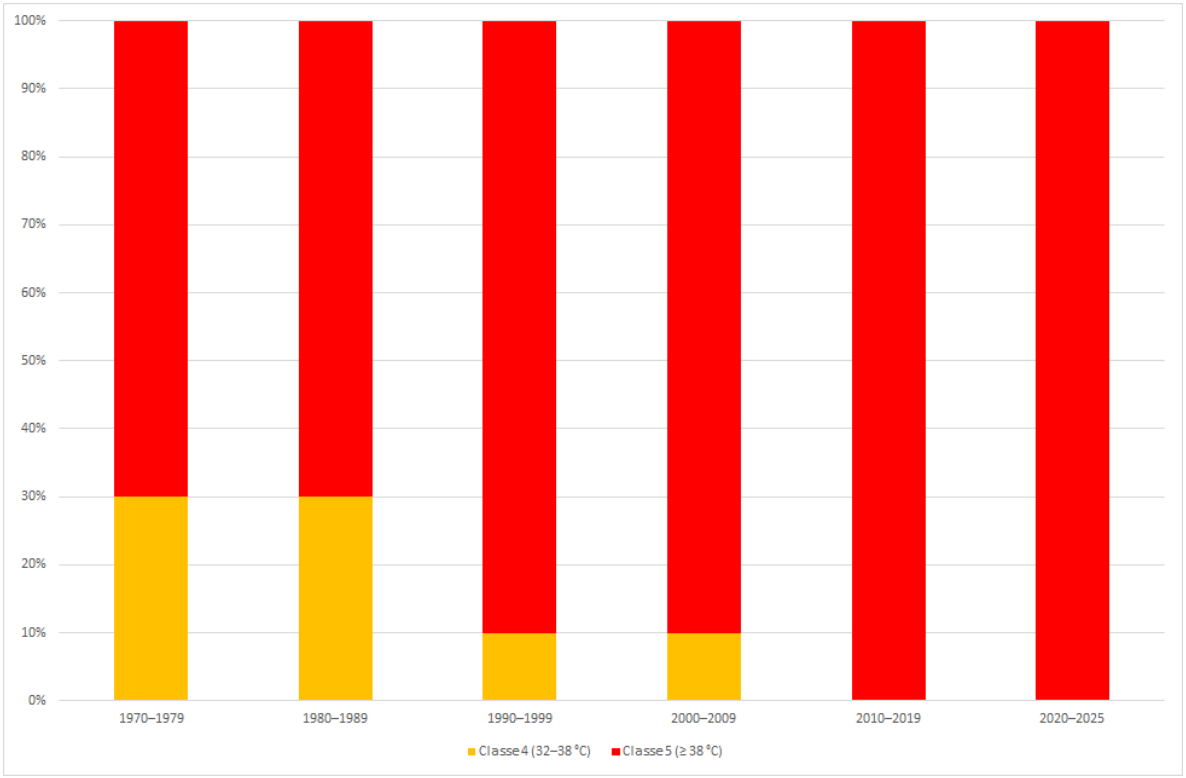


Figure 38 – Indice de confort thermique UTCImax par classes par décennies pour juillet (%)

4.3.3 – Évolution des classes UTCI hivernales (février, 1970–2025)

L'analyse de l'évolution des classes de confort thermique issues de l'indice UTCI pour le mois de février révèle une dynamique sensiblement différente de celle observée en période estivale (fig. 39). Si une tendance au réchauffement hivernal est bien identifiable dans les valeurs continues de l'UTCI, sa traduction en termes de classes de stress thermique demeure plus modérée et progressive.

Sur l'ensemble de la période **1970–1979** et **1980–1989**, les conditions hivernales de février se caractérisent quasi exclusivement par la **classe 2 – confort thermique (9–26 °C UTCI)**. Cette domination traduit des situations globalement non stressantes d'un point de vue biométéorologique, malgré des conditions pouvant rester fraîches sur le plan strictement thermique. Les occurrences relevant de la **classe 3 – stress thermique modéré à la chaleur (26–32 °C UTCI)** sont alors inexistantes.

À partir de la décennie **1990–1999**, une première évolution apparaît avec l'introduction ponctuelle de situations relevant de la classe 3. Cette émergence reste toutefois limitée et ne modifie pas encore la structure dominante du régime hivernal, toujours largement gouverné par des conditions de confort thermique. Les périodes **suivantes** confirment cette tendance à une diversification progressive des classes hivernales, avec une augmentation relative, bien que modérée, des situations de stress thermique modéré. La classe 2 demeure cependant largement majoritaire, indiquant que le réchauffement hivernal se traduit davantage par un **glissement vers des hivers plus doux** que par une véritable installation de conditions de stress thermique. Contrairement à l'été, aucun basculement de régime n'est observé : les classes de stress thermique fort ou très fort demeurent absentes en février, et le confort thermique hivernal reste la norme dominante.

Cette évolution souligne une **forte asymétrie saisonnière du changement climatique ressenti**. Alors que l'été connaît une transformation radicale des classes UTCI, marquée par la généralisation du stress thermique sévère, l'hiver évolue selon une logique d'adoucissement progressif, sans franchissement de seuils critiques comparables. Le signal hivernal apparaît ainsi plus diffus, moins brutal, et davantage lisible à travers les tendances continues que par les classes elles-mêmes.

Ces résultats confirment que l'impact du changement climatique sur le confort thermique est fortement saisonnalisé, et que les enjeux sanitaires, écologiques et territoriaux associés au stress thermique se concentrent prioritairement sur la période estivale. Cette dissociation saisonnière prépare logiquement la transition vers une lecture plus structurelle du climat régional, à travers l'analyse des types climatiques (Köppen-Geiger) et des configurations locales du climat, notamment en contexte urbain et périurbain via les zones climatiques locales (LCZ).

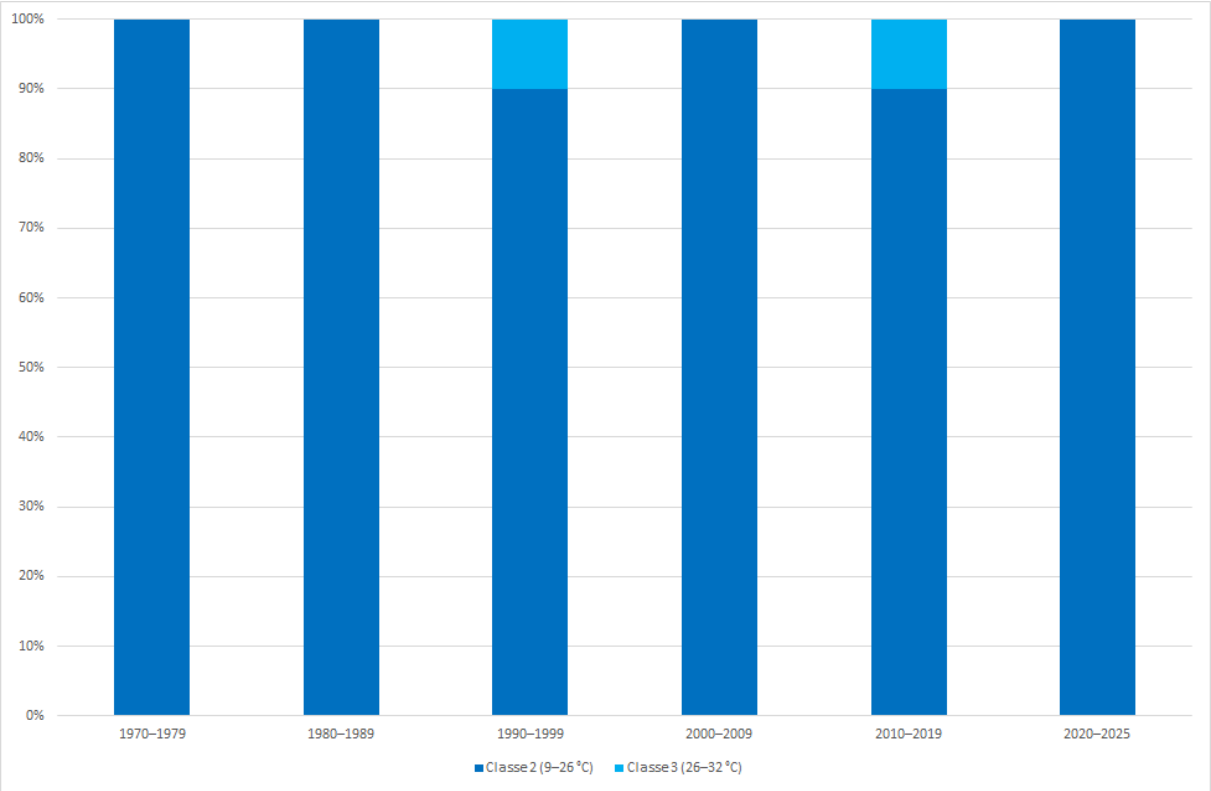


Figure 39 – Indice de confort thermique UTCI max par classes par décennies pour février (%)

4.3.4. Synthèse transversale de l'évolution du confort thermique (UTCI, 1970–2025)

L'analyse croisée des évolutions du confort thermique estival (juillet) et hivernal (février) met en évidence une transformation profonde mais asymétrique du climat ressenti sur le territoire de la réserve de biosphère des gorges du Gardon au cours de la période 1970–2025.

En été, l'indice UTCI révèle une dynamique de réchauffement net, statistiquement significative, caractérisée non seulement par une augmentation des valeurs maximales, mais surtout par une **restructuration progressive des classes de stress thermique**. Alors que les décennies 1970 et 1980 restent majoritairement dominées par des situations de stress thermique fort (classe 4), les périodes récentes voient s'imposer une **fréquence croissante, puis dominante, des situations de stress thermique très fort à extrême (classe 5)**. Ce basculement traduit un changement de régime du confort thermique estival, marqué par une intensification des contraintes physiologiques, une réduction des marges d'adaptation comportementale et une augmentation potentielle des risques sanitaires et écologiques.

À l'inverse, l'évolution hivernale du confort thermique apparaît plus modérée et structurellement différente. Bien que les tendances statistiques indiquent un réchauffement hivernal significatif, celui-ci se traduit principalement par un **glissement interne au sein des classes de confort**, avec une légère augmentation des situations relevant du stress thermique modéré (classe 3), sans remise en cause de la domination persistante de la classe de confort

thermique (classe 2). Aucun basculement de régime n'est observé en hiver : les classes de stress thermique fort ou très fort demeurent absentes en février sur l'ensemble de la période étudiée.

Cette dissymétrie saisonnière constitue un résultat central du diagnostic. Elle montre que le changement climatique se manifeste avant tout par une accentuation des extrêmes estivaux, tandis que l'hiver évolue vers des conditions plus douces sans franchir de seuils critiques en termes de stress thermique. Le climat ressenti devient ainsi de plus en plus contrasté, avec une polarisation croissante entre des étés fortement contraignants et des hivers globalement confortables.

Au-delà des valeurs absolues, l'approche par classes UTCI permet de mettre en évidence un changement qualitatif du rapport au climat, directement perceptible pour les populations, les écosystèmes et les usages du territoire. Elle constitue ainsi une étape charnière entre l'analyse climatique classique et les approches intégrant la dimension humaine, sanitaire et territoriale du changement climatique.

L'analyse du confort thermique à partir de l'indice UTCI met ainsi en évidence une transformation marquée du climat ressenti sur le territoire, caractérisée par une intensification nette des contraintes estivales et une évolution plus modérée des conditions hivernales. Si cette approche permet de qualifier finement l'expérience thermique humaine du changement climatique, elle appelle désormais une mise en perspective à des échelles plus structurelles et spatialisées. Les évolutions observées du climat ressenti s'inscrivent en effet dans des dynamiques climatiques de fond, qui peuvent être appréhendées à travers l'analyse des types de climats de Köppen-Geiger, puis précisées par l'étude des structures locales du climat, notamment à l'aide des zones climatiques locales (LCZ). Cette articulation entre climat perçu, climat structurel et climat urbain constitue une étape essentielle pour comprendre la complexité des trajectoires climatiques à l'œuvre sur le territoire de la réserve de biosphère des gorges du Gardon.

5. Évolution des types de climat : lecture structurelle du changement climatique (classification de Köppen-Geiger)

Après l'analyse du climat observé et du climat ressenti à travers les indicateurs thermiques et l'indice UTCI, ce chapitre propose un changement d'échelle de lecture du changement climatique. Il vise à appréhender les évolutions climatiques non plus uniquement à travers des variables ou des seuils physiologiques, mais à travers des **types de climat**, c'est-à-dire des régimes climatiques cohérents combinant températures et précipitations.

Pour ce faire, le diagnostic s'appuie sur la **classification climatique de Köppen-Geiger**, largement utilisée à l'échelle internationale pour caractériser et comparer les climats dans le monde (Kottek et al., 2006). Cette approche permet de répondre à une question centrale pour les territoires : **le changement climatique conduit-il à un simple réchauffement du climat existant, ou à un changement de type de climat ?**

Appliquée au territoire de la réserve de biosphère des gorges du Gardon, cette **lecture typologique** permet de replacer les évolutions observées du climat ressenti (stress thermique estival, adoucissement hivernal) dans un cadre plus structurel et de long terme. Elle offre ainsi une grille de lecture particulièrement adaptée aux enjeux de planification territoriale, de gestion des milieux naturels, d'agriculture, de ressources en eau et de santé.

L'analyse repose sur les données climatiques issues de la plateforme **DRIAS 2020** (Météo-France - **annexe 1**), selon deux trajectoires d'émissions contrastées (**RCP 4.5 et RCP 8.5**), afin d'illustrer la sensibilité des trajectoires climatiques du territoire aux choix globaux en matière d'émissions de gaz à effet de serre. Les résultats mettent en évidence des évolutions différenciées selon les scénarios, soulignant l'importance stratégique de cette lecture pour l'anticipation et l'adaptation.

5.1 La classification de Köppen-Geiger : un outil simple pour comprendre les changements de climat

La classification de **Köppen-Geiger** est un système de typologie climatique qui classe les climats du globe en fonction de critères simples et mesurables :

- les **températures moyennes mensuelles**,
- la **répartition saisonnière des précipitations**,
- et les **seuils thermiques et hydriques déterminants pour les écosystèmes**.

Chaque type de climat est défini par une combinaison de lettres. Par exemple, le climat actuellement dominant dans le sud de la France est généralement classé **Csa**, correspondant à

un climat tempéré à été chaud et sec (climat méditerranéen). Une note de synthèse explicative sur la détermination des types de climat est fournie en annexe 3.

➢ Pourquoi utiliser Köppen-Geiger dans ce diagnostic ?

- Parce qu'il permet une lecture synthétique et lisible des évolutions climatiques, compréhensible par des non-spécialistes.
- Parce qu'il traduit le changement climatique en termes de changement de régime, et pas seulement d'augmentation de température.
- Parce qu'il est largement utilisé dans les travaux scientifiques et les diagnostics territoriaux, facilitant les comparaisons régionales et internationales.

➢ Une approche adaptée mais non exhaustive

La classification de Köppen-Geiger ne vise pas à décrire finement les microclimats ou les phénomènes extrêmes. Elle fournit en revanche une vision structurelle du climat, particulièrement pertinente pour analyser des trajectoires à moyen et long terme.

Dans cette étude, elle est utilisée comme outil de mise en perspective des analyses précédentes (climat observé, climat ressenti et en complément d'approches plus fines, notamment celles portant sur le confort thermique (UTCI) et, dans la suite du diagnostic, sur les zones climatiques locales (LCZ).

L'objectif n'est donc pas de remplacer les analyses détaillées, mais de proposer une lecture hiérarchisée et cohérente du changement climatique, allant du climat perçu par les populations jusqu'aux transformations structurelles des régimes climatiques.

5.2. Méthodologie et données mobilisées (DRIAS, RCP 4.5 / RCP 8.5)

L'analyse de l'évolution des types de climat sur le territoire de la réserve de biosphère des gorges du Gardon repose sur les données climatiques produites par la plateforme nationale DRIAS 2020, pilotée par Météo-France. Cette plateforme met à disposition des projections climatiques régionalisées issues des travaux internationaux du GIEC, adaptées au contexte français.

➢ Données climatiques utilisées

Les projections mobilisées dans ce diagnostic sont issues du modèle climatique :

- CNRM-CERFACS – CNRM-CM5,
- régionalisé par le modèle CNRM-ALADIN63.

Ces données fournissent des séries climatiques cohérentes de températures et de précipitations, nécessaires à la détermination des types de climat selon la classification de Köppen-Geiger. Dans un but de cohérence méthodologique, ces données sont ainsi issues de la même source que celles utilisées dans le chapitre 3 portant sur les analyses historiques et

prospectives. Les analyses ont été réalisées à partir de plusieurs mailles climatiques couvrant le territoire de la réserve de biosphère, afin de prendre en compte sa diversité topographique et géographique. Les valeurs utilisées correspondent à des moyennes spatiales représentatives du territoire étudié.

➢ Périodes temporelles analysées

Trois périodes de référence ont été retenues :

- une période de référence historique (1951–2005), servant de point de comparaison,
- une période future à l'horizon milieu de siècle (2041–2070),
- une période future à l'horizon fin de siècle (2070–2099).

Cette approche permet d'analyser non seulement les tendances, mais aussi les changements potentiels de régime climatique à moyen et long terme.

➢ Scénarios climatiques considérés

Pour avancer de manière coordonnée sur le sujet de l'adaptation au changement climatique, la France s'est dotée d'une trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC). Dans le scénario retenu, le réchauffement mondial se poursuit et atteint environ +4 °C en moyenne sur la France. Ce scénario prend en compte les politiques mondiales en place pour limiter les émissions de gaz à effet de serre et les engagements supplémentaires des États tels qu'exprimés dans leurs contributions nationales dans le cadre de l'Accord de Paris. Cette trajectoire correspond à un niveau de réchauffement élevé mais plausible, cohérent avec les projections les plus chaudes issues des scénarios climatiques du GIEC, tel que le RCP8.5, sans constituer pour autant un scénario d'émissions en tant que tel. Elle est utilisée dans ce diagnostic comme référence pour l'analyse des impacts et l'anticipation des besoins d'adaptation. À des fins complémentaires et de comparaison, le scénario RCP4.5, correspondant à une stabilisation intermédiaire des émissions à l'échelle mondiale, est également mobilisé. Enfin, un scénario médian, le « RCP6.5 » est également proposé. Trois scénarios d'évolution des émissions de gaz à effet de serre ont ainsi été analysés :

- RCP 4.5 : scénario de stabilisation des émissions à l'échelle mondiale, correspondant à la mise en œuvre de politiques climatiques intermédiaires.
- RCP 8.5 : scénario d'émissions élevées, caractérisé par l'absence de réduction significative des émissions.
- En outre, afin de proposer une trajectoire moyenne entre ces deux scénarios, un scénario RCP6.5 a été construit à partir des données quotidiennes de températures et de précipitations des scénarios 4.5 et 8.5.

Le recours à ces deux trajectoires contrastées permet d'illustrer la sensibilité des types de climat aux choix globaux d'émissions, et de mettre en évidence les écarts potentiels entre des trajectoires climatiques maîtrisées et non maîtrisées, pour les températures moyennes (fig. 40),

les températures minimales (fig. 41), les températures maximales (fig. 42) ainsi que les précipitations annuelles (fig. 43).

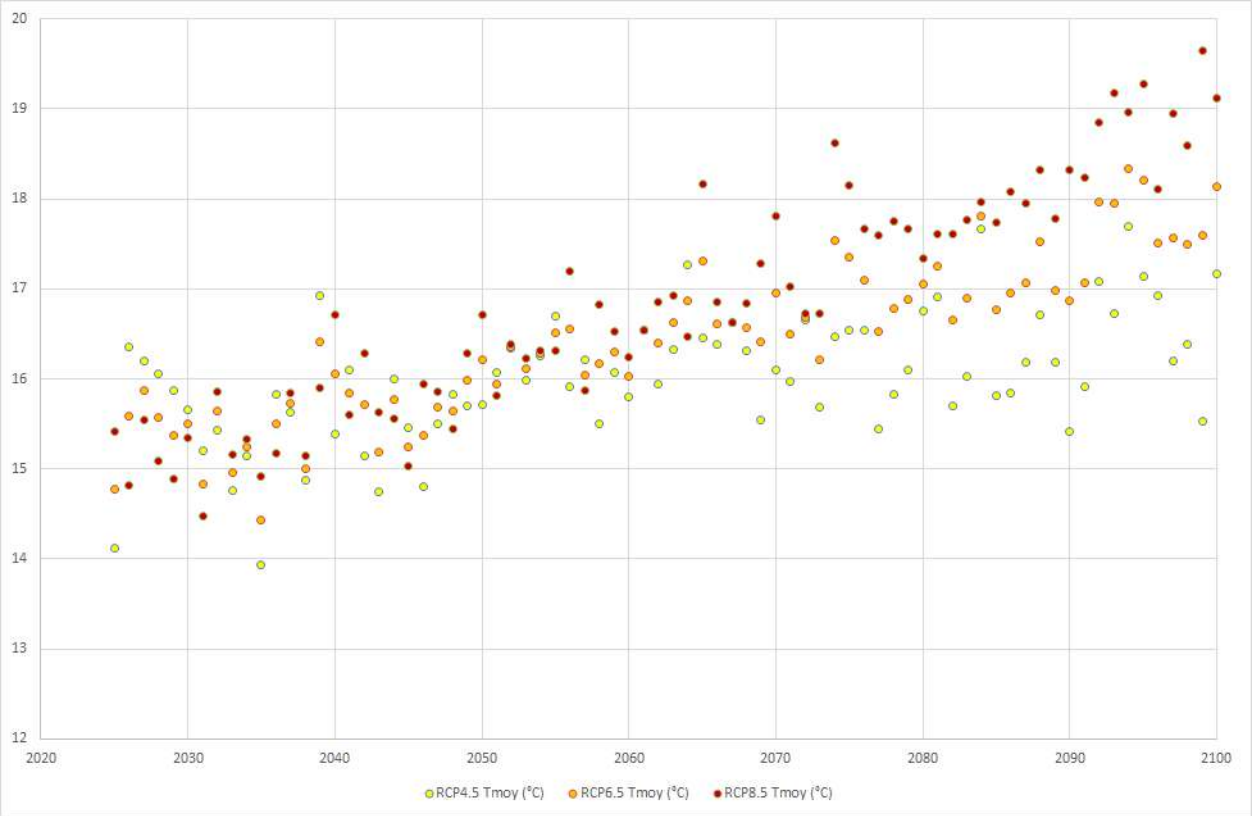


Figure 40 - températures moyennes annuelles sur la réserve en fonction des RCP4.5, RCP6.5 et RCP8.5

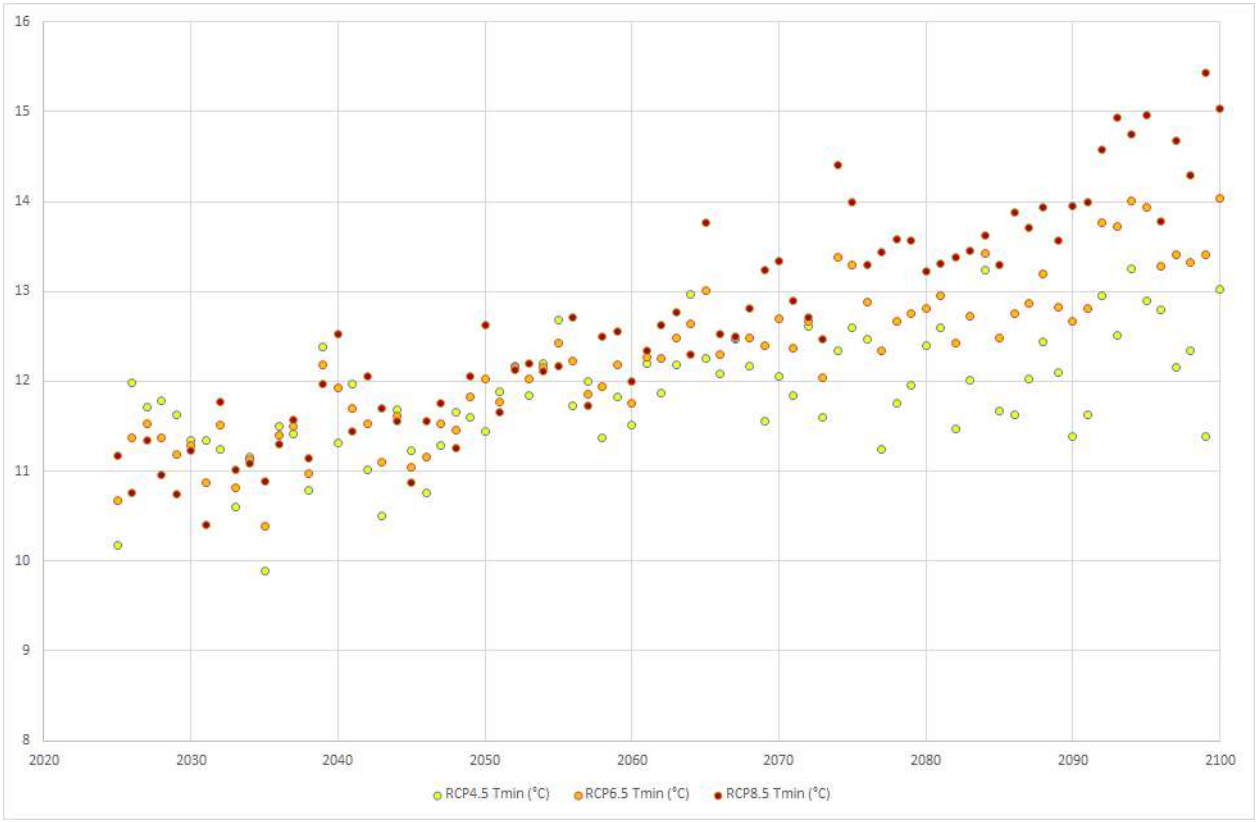


Figure 41 - températures minimales annuelles sur la réserve en fonction des RCP4.5, RCP6.5 et RCP8.5

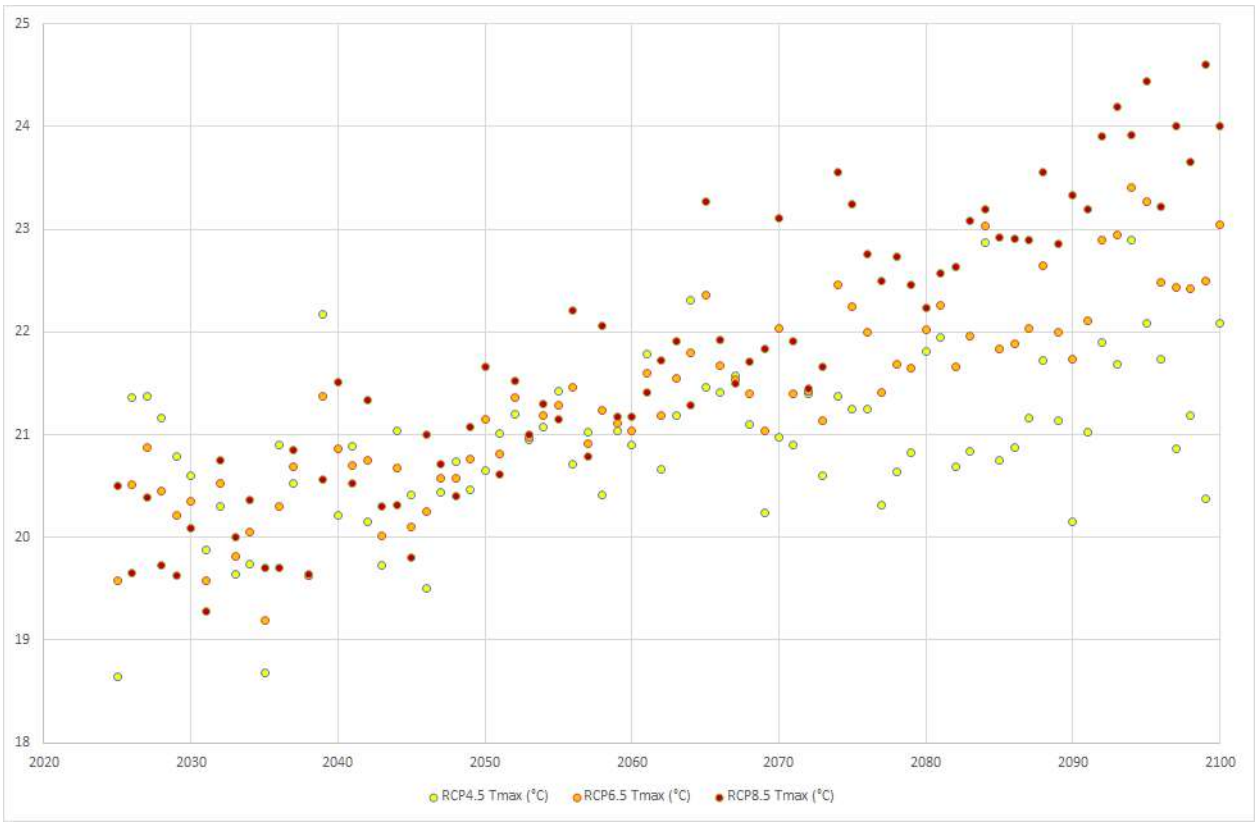


Figure 42 - températures maximales annuelles sur la réserve en fonction des RCP4.5, RCP6.5 et RCP8.5

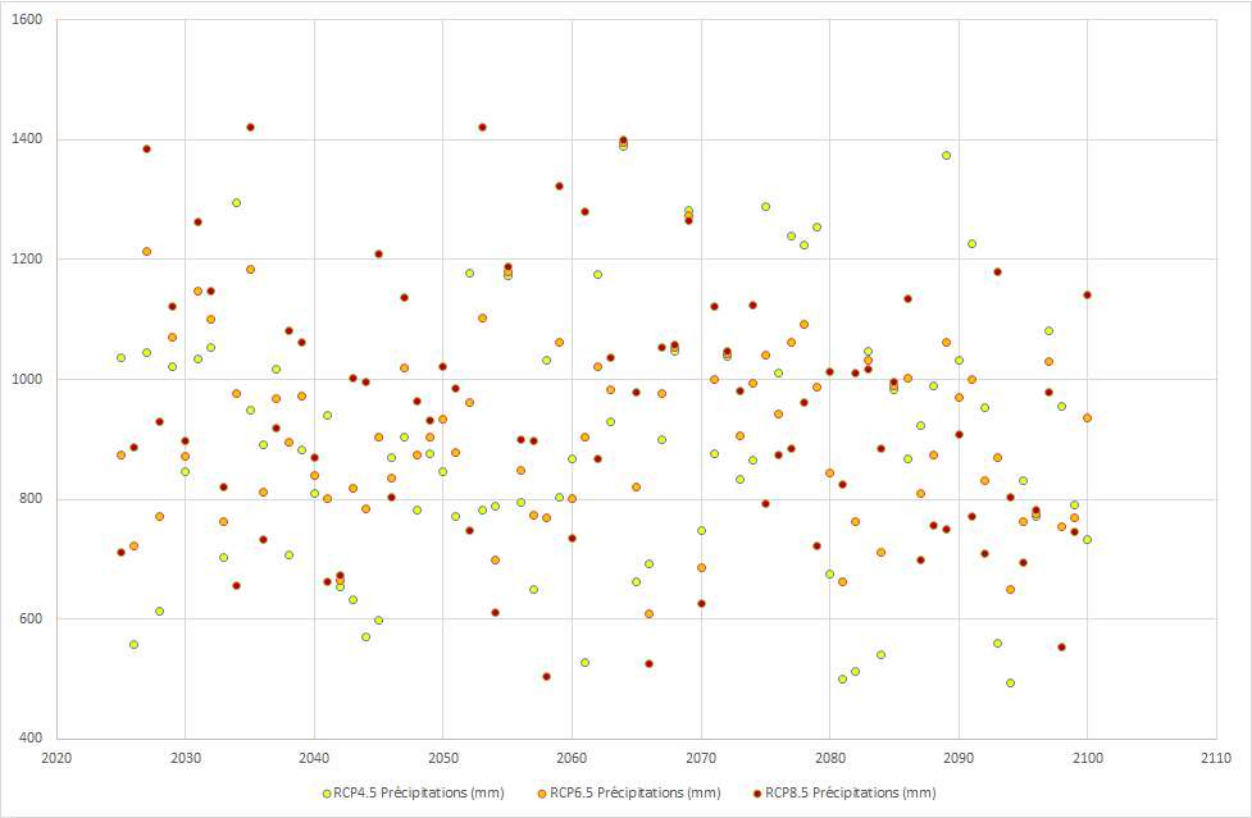


Figure 43 - précipitations annuelles sur la réserve en fonction des RCP4.5, RCP6.5 et RCP8.5

➢ Application de la classification de Köppen-Geiger

À partir des séries de températures et de précipitations issues de DRIAS, les critères de la classification de Köppen-Geiger ont été appliqués de manière homogène sur l'ensemble des périodes et scénarios. Cette démarche garantit la comparabilité des résultats entre périodes historiques et futures.

L'analyse porte ainsi sur :

- l'identification des types de climat dominants sur le territoire pour chaque période, depuis 1950
- la mise en évidence des **transitions climatiques potentielles** selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5,
- la comparaison des trajectoires climatiques associées à chaque scénario.

Cette méthodologie permet de replacer les évolutions du climat observées et ressenties dans un cadre typologique structurant, directement mobilisable pour la compréhension des enjeux territoriaux et l'anticipation des stratégies d'adaptation.

5.3- Evolution historique des types de climat (1950 – 2025)

L'analyse de l'évolution historique des types de climat sur la réserve de biosphère des gorges du Gardon, fondée sur la classification de Köppen-Geiger appliquée aux données climatiques de 1950 à 2025, met en évidence une **dominance nette et ancienne du climat méditerranéen**, ainsi qu'un **renforcement progressif de ses caractéristiques les plus sèches** (fig. 44).

➢ **Une prédominance structurelle du climat méditerranéen (Csa)**

Contrairement à une lecture qui pourrait suggérer une transition récente vers le climat méditerranéen, les résultats montrent que le type **Csa (climat méditerranéen à été chaud et sec)** constitue **le régime climatique largement dominant sur l'ensemble de la période étudiée**.

Dès les années 1950, le Csa est majoritaire et s'impose comme le cadre climatique de référence du territoire, traduisant :

- des étés structurellement chauds,
- une saison estivale marquée par un déficit hydrique,
- une forte sensibilité aux variations interannuelles des précipitations.

Cette dominance historique confirme l'ancrage méditerranéen du territoire et fournit une base essentielle pour interpréter les évolutions récentes et futures.

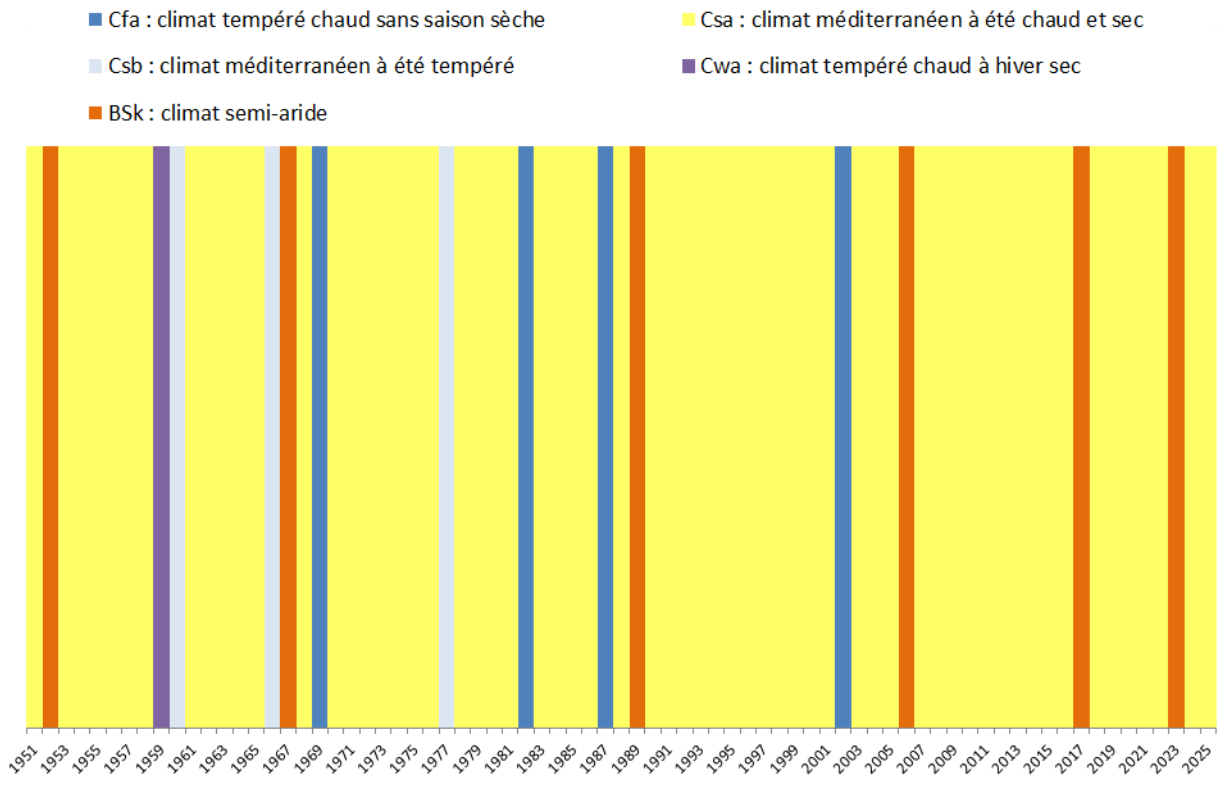


Figure 44 – Types de climats de Köppen-Geiger sur le territoire de la biosphère (1950 – 2025)

➢ Une variabilité interannuelle révélatrice de tensions climatiques

Si le Csa domine très largement, la série met en évidence des occurrences ponctuelles de types climatiques alternatifs, révélatrices de la variabilité climatique et des tensions hydroclimatiques croissantes :

- Cfa (climat tempéré chaud sans saison sèche) apparaît de manière sporadique (1968, 1981, 1986, 2001), traduisant des années légèrement plus humides ou une atténuation temporaire de la sécheresse estivale.
- Csb (climat méditerranéen à été tempéré) est observé ponctuellement (1959, 1965, 1976), reflétant des étés plus modérés en température.
- Cwa (climat tempéré chaud à hiver sec) n'apparaît qu'une seule fois (1958), constituant un cas isolé sans signification structurelle.
- BSk (climat semi-aride) est identifié à plusieurs reprises (1951, 1966, 1988, 2005, 2016, 2022), signalant des années marquées par un déficit hydrique plus prononcé et une accentuation des conditions de sécheresse.

Ces occurrences, bien que minoritaires, traduisent une augmentation progressive de la variabilité hydroclimatique, en particulier à partir de la fin du XXe siècle.

➢ Un signal clair de renforcement de l'aridité climatique

L'apparition répétée du type BSk au cours des décennies récentes constitue un élément particulièrement important. Elle ne traduit pas encore un basculement durable vers un climat semi-aride, mais indique que le territoire frôle régulièrement les seuils de classification aride, sous l'effet combiné :

- de l'augmentation des températures,
- de l'intensification de l'évapotranspiration,
- de la variabilité accrue des précipitations.

Cette dynamique est pleinement cohérente avec les résultats précédents sur :

- l'augmentation du stress thermique estival (UTCI),
- l'allongement des périodes sèches,
- la hausse de l'évapotranspiration potentielle.

➢ Une stabilité apparente, mais un régime sous contrainte

Ainsi, la période 1950–2025 se caractérise par :

- une **stabilité typologique dominante du climat Csa**,
- une **variabilité interannuelle croissante**,
- des **incursions de plus en plus fréquentes vers des conditions semi-arides**.

Cette stabilité apparente ne doit donc pas être interprétée comme une absence de changement climatique, mais plutôt comme le signe d'un **régime méditerranéen déjà installé, soumis à un processus d'intensification**.

Cette trajectoire historique constitue un point d'ancrage essentiel pour l'analyse prospective. Elle suggère que les scénarios futurs ne conduiront pas à une simple transition typologique, mais potentiellement à une **radicalisation du climat méditerranéen**, voire à des basculements vers des régimes plus arides selon les trajectoires d'émissions (RCP 4.5 et RCP 8.5), qui constituent les prochains paragraphes de cette étude.

5.4 – Évolution prospective des types de climat selon les scénarios RCP 4.5 et 6.5 (2025–2100)

Après l'analyse de l'évolution historique des types de climat sur la seconde moitié du XX^{e} siècle et le début du XXI^{e} siècle, cette section vise à examiner les trajectoires climatiques futures de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon à partir des projections issues du jeu de données DRIAS, dans le cadre du scénario RCP 4.5, et issues des moyennes quotidiennces RCP4.5 et RCP8.5 afin d'envisager un scénario RCP6.5 adapté localement au climat de la réserve de biosphère, moins optimiste mais proche des émissions actuelles et de leurs futurs à moyen terme.

Le scénario RCP 4.5 correspond à une trajectoire de stabilisation intermédiaire des concentrations de gaz à effet de serre, supposant la mise en œuvre progressive de politiques climatiques limitant l'augmentation du forçage radiatif à +4,5 W/m² à l'horizon 2100. Il constitue, à ce titre, un scénario de référence fréquemment mobilisé par les décideurs pour explorer des futurs climatiques plausibles, sans hypothèse extrême de rupture ni d'inaction totale.

L'analyse repose sur l'attribution annuelle d'un type de climat selon la classification de Köppen-Geiger pour la période 2025–2100. Contrairement à une approche fondée sur des moyennes multi-décennales, ce choix méthodologique permet de mettre en évidence la **stabilité ou la variabilité interannuelle des régimes climatiques**, ainsi que l'éventuelle apparition de types de climat transitoires.

Pour les deux scénarios, les résultats mettent en évidence une **domination quasi continue du climat méditerranéen à été chaud (Csa)** sur l'ensemble de la période considérée (fig. 45 et 46). Les occurrences ponctuelles d'autres types climatiques (Cfa ou BSk) apparaissent comme

marginales et isolées, sans structuration temporelle durable. Cette configuration traduit une **consolidation du régime méditerranéen** plutôt qu'une transition progressive vers un nouveau type climatique dominant.

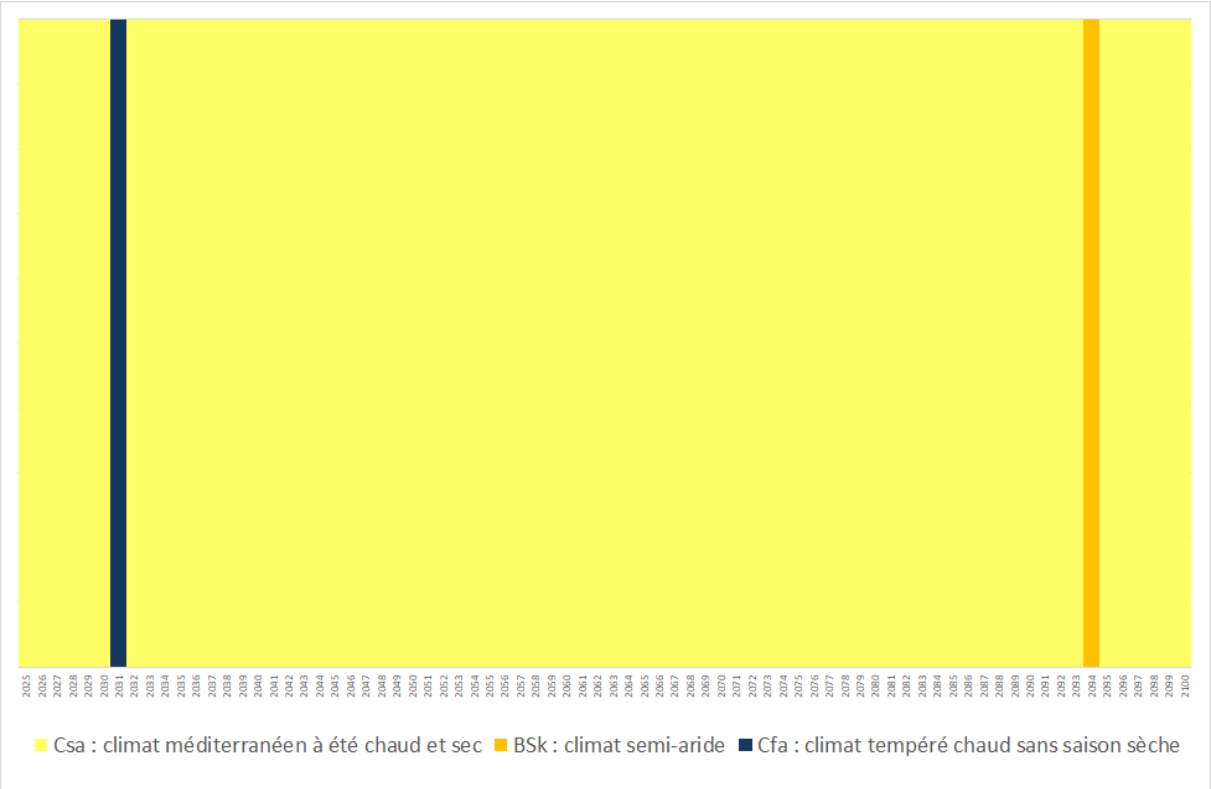


Figure 45- Types de climats projetés de Köppen-Geiger sur le territoire de la biosphère sous le scénario RCP 4.5 (2025 – 2100)

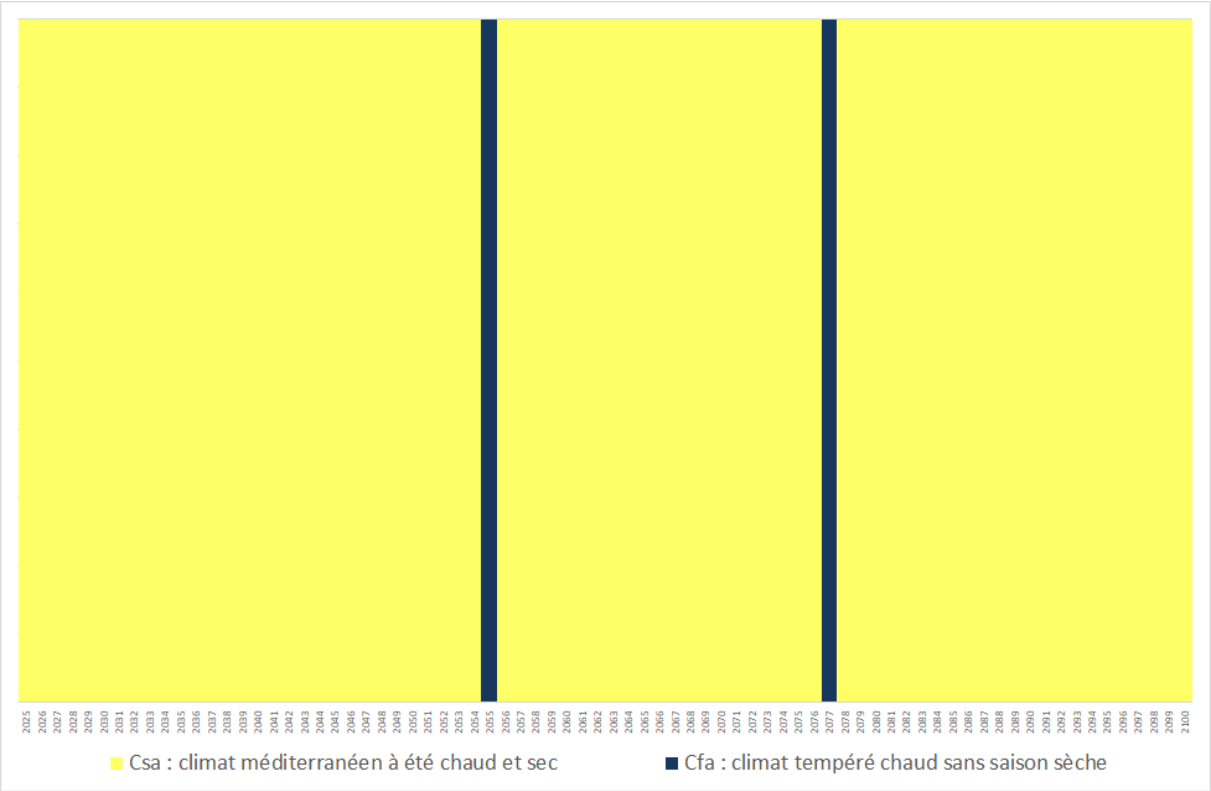


Figure 46 - Types de climats projetés de Köppen-Geiger sur le territoire de la biosphère sous le scénario RCP 6.5 (2025 – 2100)

Ainsi, sous les scénario RCP 4.5 et RCP6.5, le changement climatique ne se manifeste pas par une succession rapide de régimes distincts, mais par une **stabilisation renforcée du climat méditerranéen**, suggérant un ancrage durable de ses caractéristiques thermiques et hydriques sur le territoire. Cette évolution prospective prolonge et amplifie les tendances observées sur la période historique récente, tout en limitant, dans ce scénario, l'émergence d'un climat de type semi-aride structurant.

Cette lecture fournit un point de comparaison essentiel avec le scénario RCP 8.5, qui sera analysé dans la section suivante et permettra d'évaluer dans quelle mesure l'intensité du forçage climatique modifie non seulement les conditions thermiques, mais également la nature même du régime climatique dominant.

5.5 – Évolution des types de climat selon le scénario RCP 8.5 : vers un basculement climatique majeur

Contrairement au scénario RCP 4.5, qui conduit principalement à une intensification du climat méditerranéen existant, le scénario RCP 8.5 révèle une **transformation structurelle profonde du climat régional** à l'échelle de la réserve de biosphère des Gorges du Gardon (fig. 47). L'analyse conjointe des classifications annuelles et des normales glissantes de 30 ans met en évidence **un changement de régime climatique**, dépassant le simple réchauffement thermique.

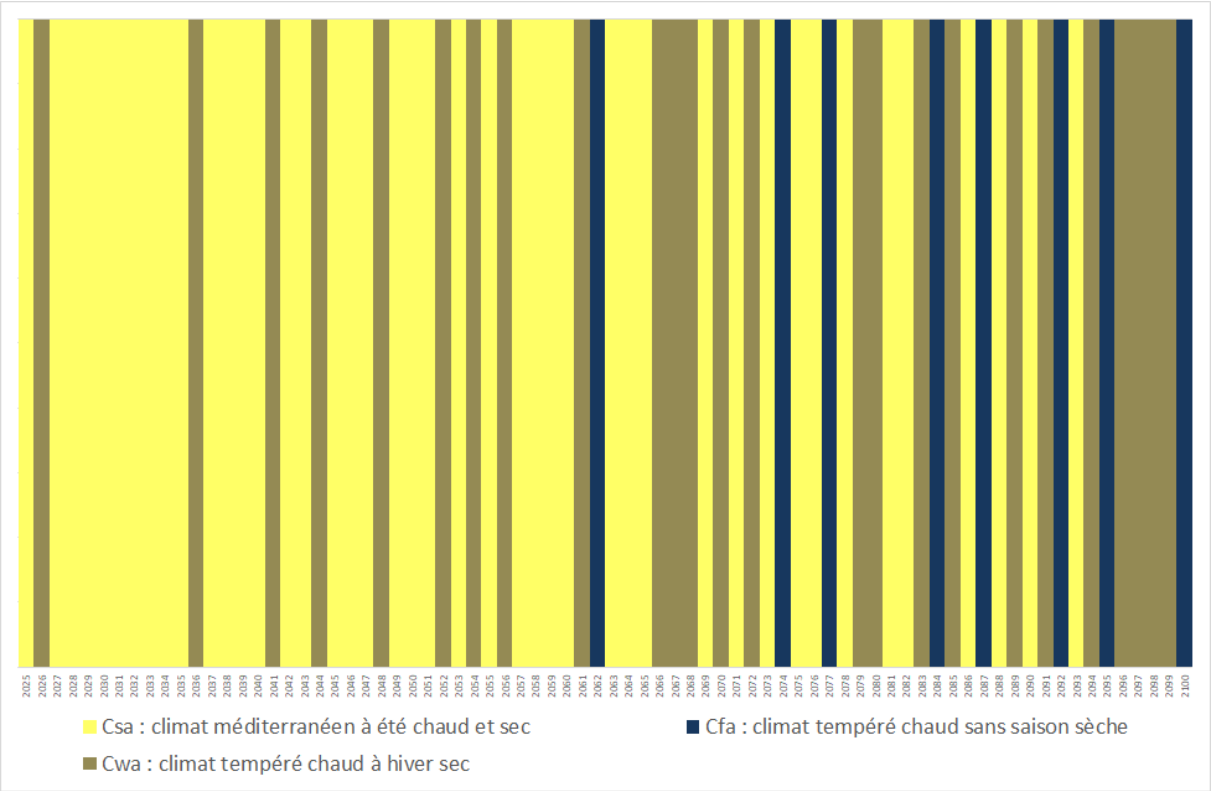


Figure 47 - Types de climats projetés de Köppen-Geiger sur le territoire de la biosphère sous le scénario RCP 8.5 (2025 – 2100)

5.5.1 Lecture annuelle : une instabilité croissante mais trompeuse

À l'échelle annuelle, la succession des types de climat (Csa, Cwa, Cfa) apparaît fortement fluctuante à partir du milieu du XXIe siècle. Cette variabilité interannuelle est toutefois **largement dominée par le bruit climatique**, et ne permet pas, à elle seule, d'identifier clairement les transitions de fond.

C'est précisément pour dépasser cette limite qu'a été mobilisée une analyse par **normales glissantes de 30 ans**, seule à même de révéler l'évolution du climat de fond au sens du système de Köppen-Geiger. Il s'agit d'une méthode rigoureuse pour capter le **changement climatique de fond** tout en s'affranchissant de la variabilité interannuelle (tableau 7).

Année Centrale	Période de 30 ans	Tmoy de la Période (°C)	Climat de Köppen	Détails de la classification
2040	2025-2054	16.8	**Csa**	Méditerranéen à été chaud
2045	2030-2059	17.1	**Csa**	Méditerranéen à été chaud
2050	2035-2064	17.5	**Csa**	Méditerranéen à été chaud
2055	2040-2069	18.1	**Csa**	Méditerranéen à été chaud

2060	2045-2074	18.8	Cwa	Changement : Subtropical à hiver sec
2065	2050-2079	19.4	Cwa	Subtropical à hiver sec
2070	2055-2084	20.0	Cwa	Subtropical à hiver sec
2075	2060-2089	20.4	Cfa	Changement : Subtropical humide
2080	2065-2094	20.8	Cfa	Subtropical humide
2085	2070-2099	21.2	Cfa	Subtropical humide

Tableau 7 - Classification de Köppen pour le climat de fond centré sur chaque année, de 2040 à 2085, tous les 5 ans, par normales glissantes (ou fenêtres mobiles de 30 ans) (Par exemple, pour l'année 2040, nous avons utilisé les normales climatiques calculées sur la période 2025-2054)

5.5.2 Analyse par normales glissantes : mise en évidence des basculements climatiques

L'analyse des fenêtres mobiles de 30 ans, centrées tous les cinq ans entre 2040 et 2085, met en évidence **une trajectoire climatique en trois phases successives**, caractéristique du scénario RCP 8.5.

- **Phase 1 – Stabilité apparente (jusqu'aux environs de 2055)**

Jusqu'à la période centrée sur 2040–2069, le climat de fond reste classé **Csa (méditerranéen à été chaud)**. Cette stabilité apparente masque toutefois une **augmentation continue des températures moyennes**, sans remise en cause immédiate du régime saisonnier des précipitations. À ce stade, le comportement du RCP 8.5 reste comparable à celui observé sous le RCP 4.5.

- **Phase 2 – Premier basculement : Csa → Cwa (vers 2060)**

Autour de l'année centrale **2060**, correspondant à la normale 2045–2074, un premier basculement est observé vers le type **Cwa (subtropical à hiver sec)**. Ce changement marque une rupture majeure :

- la **sécheresse estivale méditerranéenne**, critère fondamental du climat Csa, **n'est plus respectée en moyenne climatique**,
- les hivers deviennent significativement plus doux,
- le régime pluviométrique saisonnier se réorganise.

Ce basculement ne traduit donc pas seulement un réchauffement, mais une **désarticulation du fonctionnement méditerranéen classique**, notamment du rôle structurant de l'été sec. Une

diminution des précipitations hivernales pourraient également conduire à une augmentation des feux de forêts durant cette période.

➢ Phase 3 – Second basculement : Cwa → Cfa (vers 2075)

Un second changement, encore plus structurant, intervient vers **2075** (normale 2060–2089), avec l'installation durable du type **Cfa (subtropical humide, sans saison sèche marquée)**. Ce climat est défini par :

- une **température moyenne du mois le plus froid supérieure à 0 °C**,
- un **été chaud** (maintien du code *a*),
- surtout, l'**absence de saison sèche significative**, ni estivale ni hivernale.

Ce stade final correspond à une **perte totale de l'identité méditerranéenne du climat**, au profit d'un **régime subtropical humide**, comparable à ceux observés dans le sud-est des États-Unis ou en Chine orientale.

5.5.3 Interprétation globale : un changement climatique de nature, pas seulement d'intensité

L'analyse par normales glissantes montre clairement que, sous le scénario RCP 8.5, **l'impact majeur ne réside pas uniquement dans l'augmentation des températures**, mais dans une **reconfiguration profonde du régime des précipitations**. En effet, le système de Köppen-Geiger, fondé sur des seuils bioclimatiques liés à la végétation et aux équilibres hydriques, met en évidence que :

- la **sécheresse estivale méditerranéenne disparaît à partir du milieu du siècle**,
- le climat bascule successivement de **Csa → Cwa → Cfa**,
- cette trajectoire traduit une **tropicalisation progressive du climat**, incompatible avec les équilibres écologiques, agricoles et hydrologiques actuels du territoire.

Sous le scénario RCP 8.5, la réserve de biosphère des Gorges du Gardon ne connaît pas une simple aggravation du climat méditerranéen, mais une **sortie complète de ce régime climatique** au cours de la seconde moitié du XXIe siècle. C'est un **changement de climat**, au sens strict, et non une simple intensification des conditions actuelles.

5.6 – Synthèse : trajectoires climatiques contrastées et basculements de régime

L'analyse de l'évolution des types de climat selon la classification de Köppen-Geiger met en évidence des **trajectoires climatiques fortement contrastées** selon les scénarios d'émissions considérés. Au-delà des différences d'intensité du réchauffement, les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 conduisent à des **changements de nature distincte du climat régional**, avec des implications majeures pour les écosystèmes, les usages du territoire et les stratégies d'adaptation.

5.6.1 Deux scénarios, deux futurs climatiques

Sous le **scénario RCP 4.5**, le climat de la réserve de biosphère des Gorges du Gardon demeure globalement ancré dans le type **Csa (méditerranéen à été chaud)** tout au long du XXIe siècle.

Les analyses par normales glissantes montrent une **augmentation progressive des températures moyennes**, mais sans remise en cause durable des critères fondamentaux du climat méditerranéen, en particulier la présence d'une saison sèche estivale marquée. Les transitions ponctuelles observées à l'échelle annuelle relèvent principalement de la variabilité interannuelle et ne traduisent pas un basculement du climat de fond.

À l'inverse, le **scénario RCP 8.5** révèle une **trajectoire de rupture**, caractérisée par une succession de basculements climatiques irréversibles à l'échelle des normales de 30 ans. Le climat régional quitte progressivement le domaine méditerranéen pour évoluer vers des régimes subtropicaux, d'abord à hiver sec (Cwa), puis humides sans saison sèche (Cfa).

5.6.2 Une lecture dynamique du changement climatique

L'approche par normales glissantes met en évidence que le changement climatique ne s'exprime pas de manière linéaire, mais selon des **seuils critiques**, propres au système de classification de Köppen-Geiger. Ces seuils agissent comme des **points de bascule**, au-delà desquels l'organisation saisonnière du climat se reconfigure.

Dans le cas du RCP 8.5, deux basculements majeurs sont identifiés :

- **vers 2060** : perte du régime méditerranéen (Csa → Cwa), liée à la disparition de la sécheresse estivale moyenne ;
- **vers 2075** : installation d'un climat subtropical humide (Cfa), marquant une transformation profonde du fonctionnement climatique régional.

Ce processus illustre que le changement climatique ne se limite pas à un réchauffement progressif, mais peut conduire à une **recomposition complète des régimes climatiques**, avec des conséquences systémiques. Cette lecture synthétique permet de relier le **climat ressenti** (UTCI : chapitre précédent), le **climat structurel** (Köppen-Geiger : le chapitre actuel), et, dans la suite du rapport, le **climat local** (LCZ : chapitre suivant). Elle prépare ainsi une compréhension intégrée des enjeux d'adaptation, en montrant que tous les futurs climatiques ne se valent pas et que les choix d'émissions conditionnent non seulement l'intensité, mais la **nature même du climat futur**.

6. Les zones climatiques locales (LCZ) de la réserve à l'épreuve des températures de surface (LST)

6.1 – Températures de surface et structures urbaines : du climat régional au climat local vécu

Les analyses précédentes ont mis en évidence une évolution marquée du climat régional et du climat ressenti sur la réserve de biosphère des gorges du Gardon, tant à travers les tendances thermiques observées que via les indicateurs biométéorologiques (UTCI) et les changements de types de climat (Köppen-Geiger). Ces approches, fondées sur des données atmosphériques, décrivent toutefois un climat "de référence", à une échelle spatiale relativement homogène, qui ne rend pas compte de la forte hétérogénéité thermique observée à l'échelle locale.

Or, le réchauffement climatique ne s'exprime pas de manière uniforme dans l'espace. Il est fortement modulé par les caractéristiques de surface : nature des sols, couverture végétale, densité bâtie, matériaux, topographie ou encore présence d'eau. Ces facteurs structurent des microclimats contrastés, qui conditionnent directement l'exposition réelle des populations, des écosystèmes et des usages aux chaleurs estivales ou aux froids hivernaux.

Dans cette perspective, l'analyse des **températures de surface (Land Surface Temperature – LST)** constitue un complément essentiel aux approches climatiques précédentes. Contrairement aux températures de l'air, la LST mesure la réponse thermique directe des surfaces au rayonnement solaire et aux propriétés physiques des milieux. Elle permet ainsi d'identifier finement les gradients spatiaux de chaleur, les contrastes entre milieux urbanisés, agricoles, forestiers ou naturels, ainsi que les secteurs présentant une sensibilité particulière au réchauffement.

Ce chapitre propose donc une analyse croisée entre les **températures de surface issues des satellites Landsat (5, 7 et 9 – annexe 1)** et les **zones climatiques locales (Local Climate Zones – LCZ)**, telles que définies par le Cerema et ajustées à l'échelle du territoire d'étude (**annexe 1**). Cette approche vise à relier le climat régional et le climat ressenti aux structures spatiales du territoire, en identifiant les configurations urbaines et paysagères les plus exposées aux excès thermiques.

L'analyse se concentre sur deux périodes clés du cycle annuel :

- **l'été (juillet / août)**, afin de caractériser les intensités et les disparités des îlots de chaleur de surface,
- **l'hiver (janvier / février)**, pour analyser les contrastes thermiques en période froide et la persistance éventuelle de signatures urbaines.

Les températures de surface ont été extraites pour les dates présentant une couverture nuageuse minimale et correspondant à un passage des satellites proche du zénith, afin de limiter les effets liés aux ombres et à l'angle solaire. À partir de ces données, des moyennes interannuelles ont été calculées pour analyser les gradients spatiaux, ainsi que des écarts à la moyenne afin d'identifier les secteurs se réchauffant plus fortement que le contexte général.

Ce croisement **LST – LCZ** permet ainsi de passer d'une lecture climatique globale à une compréhension fine du **climat urbain et paysager**, ouvrant la voie à des réflexions opérationnelles en matière d'aménagement, de végétalisation, d'adaptation au changement climatique et de gestion des vulnérabilités thermiques à l'échelle locale.

6.2 – Données et méthodologie : caractérisation des températures de surface et croisement avec les LCZ

6.2.1. La température de surface (LST) : un indicateur du climat local vécu

La température de surface (Land Surface Temperature – LST) correspond à la température radiative des surfaces terrestres observée par satellite. Elle traduit la manière dont les sols, les matériaux urbains et la végétation absorbent, stockent et restituent l'énergie solaire. À ce titre, elle constitue un indicateur particulièrement pertinent pour analyser les contrastes thermiques à l'échelle locale.

Contrairement à la température de l'air mesurée à 2 mètres, la LST ne décrit pas directement le ressenti physiologique humain, mais elle permet d'identifier les **sources spatiales de chaleur** et les **structures amplificatrices ou atténuatrices du réchauffement** (sols artificialisés, zones végétalisées, surfaces minérales, plans d'eau). Elle est ainsi largement utilisée pour l'étude des îlots de chaleur urbains, des gradients thermiques paysagers et des dynamiques de réchauffement différencié.

Dans le cadre de cette étude, la LST est mobilisée comme un **indicateur structurel du climat local**, complémentaire aux analyses atmosphériques et biométéorologiques présentées dans les chapitres précédents.

6.2.2. Données satellitaires Landsat mobilisées

Les températures de surface ont été extraites à partir des images satellitaires Landsat[4] issues des missions **Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8 et Landsat 9**, couvrant la période **2010–2025**. Ces satellites offrent une résolution spatiale adaptée à l'analyse des contrastes thermiques locaux et des structures urbaines et paysagères.

Afin de garantir la comparabilité des données :

- seules les images présentant une **faible couverture nuageuse** ont été retenues,

[4] https://earthexplorer.usgs.gov/

- les acquisitions ont été sélectionnées à des dates correspondant à un passage proche du zénith solaire, afin de limiter les effets liés aux ombres portées et aux variations d'angle d'illumination,
- pour les années 2011 et 2012, seul Landsat 7 était exploitable mais présentait le problème bien connu du module défectueux des scanlines (off depuis le 31 mai 2003), qui ne fournit qu'une couverture partielle des zones étudiées,
- deux périodes saisonnières ont été analysées :
    - l'été (juillet – août), période de stress thermique maximal,
    - l'hiver (janvier – février), période de contrastes thermiques faibles mais structurants.

Pour chaque saison, l'ensemble des scènes disponibles a été utilisé afin de calculer des moyennes interannuelles de LST, permettant de s'affranchir de la variabilité météorologique ponctuelle et de mettre en évidence des structures spatiales robustes (tableaux 8 et 9).

année	mois	jour
2010	juillet	6
2011	juillet	1
2012	juillet	26
2013	juillet	5
2014	juillet	17
2015	juillet	20
2016	juillet	29
2017	juillet	16
2018	juillet	19
2019	juillet	22
2020	juillet	17
2021	juillet	29
2022	juillet	22
2023	juillet	17
2024	juillet	20
2025	août	7

Tableau 8 – Dates des scènes estivales des satellites Landsat utilisés dans cette étude

année	mois	jour
2010	février	3
2011	février	6
2012	février	10
2013	février	19
2014	janvier	22
2015	février	10
2016	février	4
2017	février	22
2018	février	25
2019	février	5
2020	février	15
2021	février	17
2022	février	12
2023	février	8
2024	février	11
2025	février	28

Tableau 9 - Dates des scènes hivernales des satellites Landsat utilisés dans cette étude en été

6.2.3. Construction des indicateurs thermiques spatiaux

À partir des températures de surface extraites, deux types d'indicateurs ont été construits :

- les températures de surface moyennes, utilisées pour analyser les gradients thermiques spatiaux et comparer les niveaux absolus de chaleur entre secteurs,
- les écarts à la moyenne territoriale, calculés pour chaque pixel, afin d'identifier les zones se réchauffant plus fortement que le contexte général.

Cette double approche permet de distinguer :

- les secteurs structurellement chauds ou frais,
- des zones présentant une sensibilité thermique particulière, indépendamment du niveau moyen de température.

6.3 – Gradients thermiques et disparités spatiales des températures de surface

6.3.1 Organisation spatiale des températures de surface en été

L'analyse des températures de surface estivales issues des images Landsat met en évidence une organisation spatiale très marquée des contrastes thermiques à l'échelle de la réserve de biosphère des gorges du Gardon. Les cartes de LST moyenne et d'écart à la moyenne pour l'année 2024 offrent une lecture complémentaire des dynamiques thermiques : la première renseigne sur le niveau thermique absolu, tandis que la seconde met en lumière les zones en surchauffe ou en atténuation relative, indépendamment du signal régional moyen.

Les températures de surface moyennes estivales révèlent un gradient spatial structuré selon trois grands ensembles (fig. 48) :

- Au sud de la réserve, dans le prolongement de l'agglomération nîmoise, les valeurs de LST les plus élevées dominent. Ce secteur cumule plusieurs facteurs explicatifs : artificialisation des sols, forte inertie thermique des surfaces bâties et minérales, et continuité fonctionnelle avec le tissu urbain. Ce signal confirme l'influence diffuse de l'urbanisation sur les marges méridionales de la réserve.

- À l'opposé, les secteurs centraux et septentrionaux, correspondant au cœur topographique et écologique des gorges du Gardon, présentent globalement des températures de surface plus modérées. Les formations forestières, la topographie encaissée et la moindre artificialisation jouent ici un rôle régulateur évident, limitant l'accumulation de chaleur en surface malgré des conditions estivales favorables à l'échauffement.

- Un troisième ensemble se distingue nettement au nord-ouest de la réserve, où apparaissent des zones de températures élevées associées aux espaces agricoles ouverts. L'absence de couvert arboré dense, la nature des sols et la forte exposition au rayonnement solaire expliquent ces valeurs élevées, qui contrastent avec les secteurs forestiers adjacents. La présence du camp d'entraînement militaire, caractérisé par de vastes surfaces peu végétalisées, contribue également à ce signal thermique renforcé.

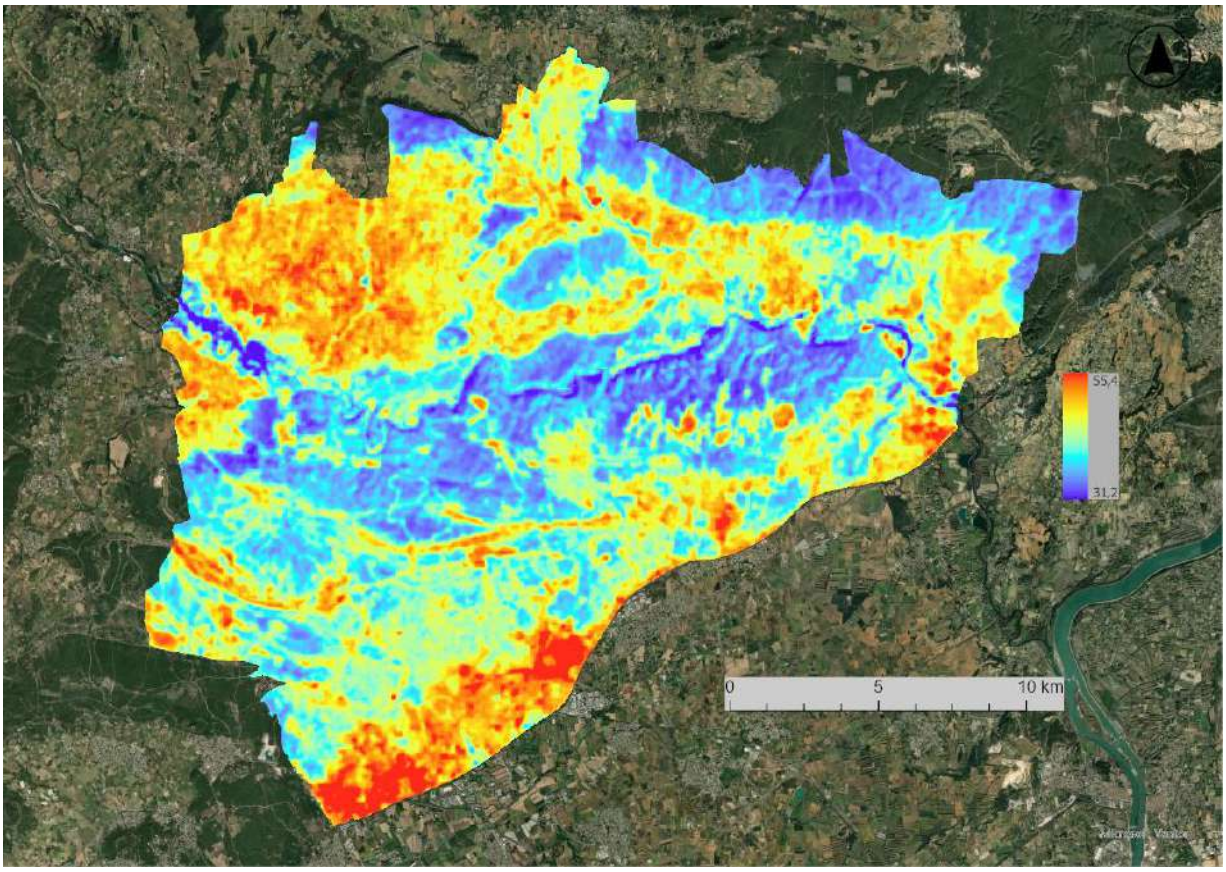


Figure 48 – Moyenne des températures de surface estivales (2010 – 2025) (source : Landsat)

La carte des écarts à la moyenne (fig. 49) affine cette lecture en mettant en évidence les secteurs qui se réchauffent davantage que la moyenne de la réserve pour l'année considérée. Elle montre que certaines zones du cœur de la réserve, bien que relativement plus fraîches en valeur absolue, présentent des anomalies positives notables. Ce résultat suggère un **réchauffement relatif de secteurs jusque-là thermiquement plus stables**, ce qui constitue un signal particulièrement important du point de vue écologique et fonctionnel.

À l'inverse, certains espaces agricoles ou forestiers affichent des écarts négatifs ou proches de la moyenne, traduisant une réponse thermique plus atténuée cette année-là. Cette dissociation entre niveau thermique absolu et anomalie relative souligne l'intérêt de mobiliser conjointement ces deux indicateurs pour identifier non seulement les "points chauds" structurels, mais aussi les **zones émergentes de vulnérabilité thermique**.

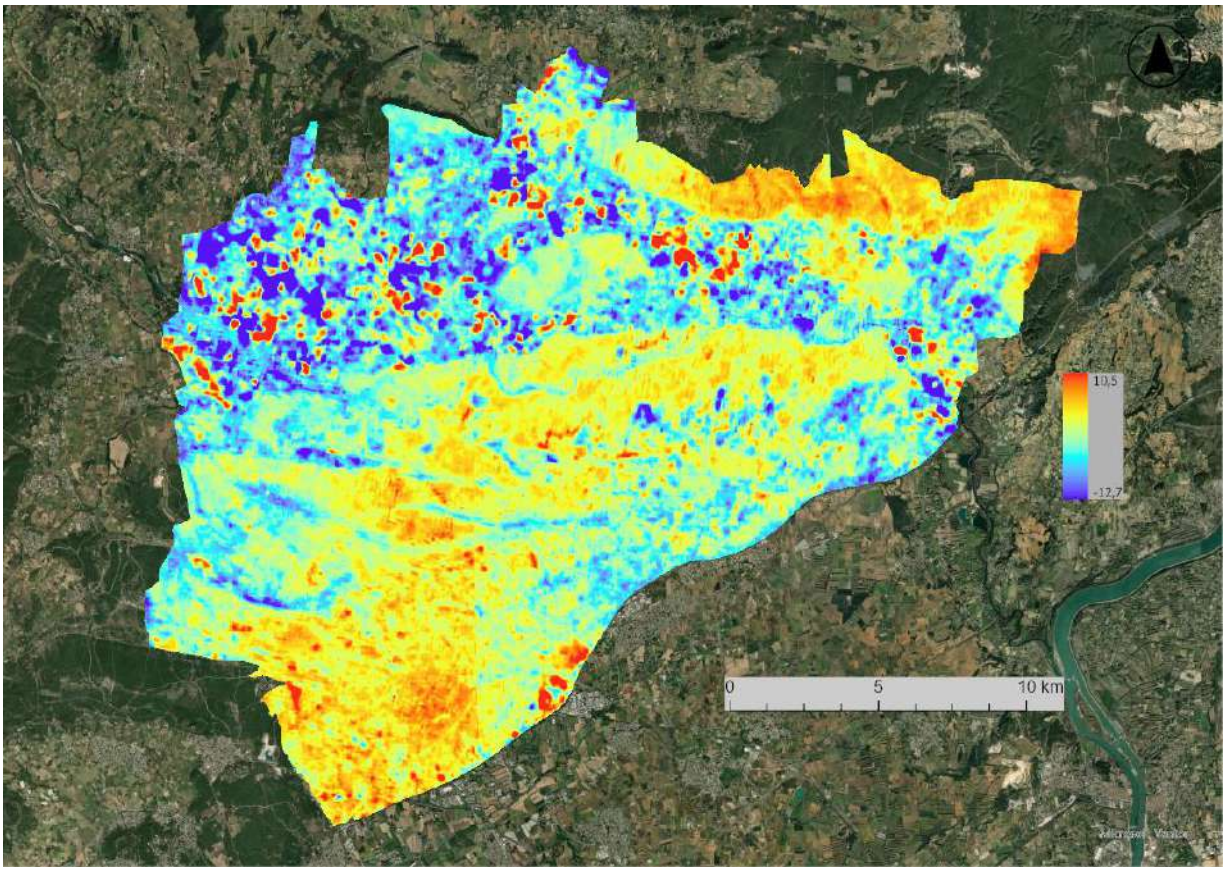


Figure 49 – Ecart à la moyenne des températures de surface estivales (2010 – 2025) (source : Landsat)

Dans l'ensemble, ces résultats confirment que l'organisation spatiale des températures de surface estivales au sein de la réserve ne relève pas d'un simple gradient nord–sud, mais résulte de l'interaction complexe entre occupation du sol, structure paysagère, topographie et héritage des dynamiques d'artificialisation (fig. 50). Ils constituent une base robuste pour l'analyse croisée avec les zones climatiques locales (LCZ), développée dans la suite de ce chapitre.

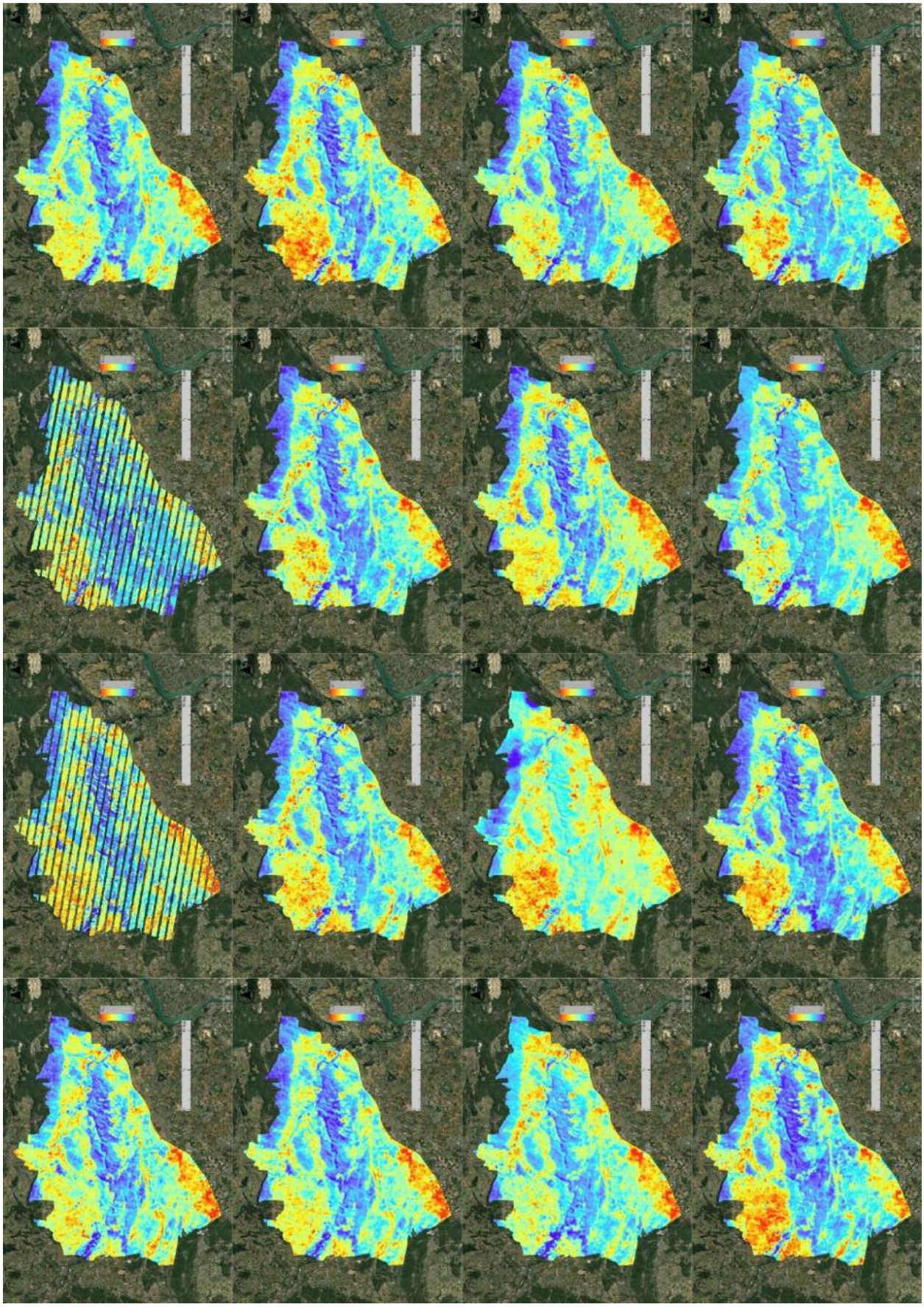


Figure 50 – Organisation spatiale des températures de surface estivales de 2010 (en haut à gauche) à 2025 (en bas à droite) (source : Landsat). Comme il peut l'être constaté, l'année 2019 présente des nuages et n'a pas été inclus dans les études.

6.3.2. Organisation spatiale des températures de surface en hiver

L'analyse hivernale des températures de surface met en évidence une organisation spatiale nettement différente de celle observée en été, tout en révélant des structures territoriales remarquablement persistantes. La carte des **températures de surface moyennes hivernales** (Fig. 51), calculée à partir des passages Landsat disponibles entre 2010 et 2023, fait apparaître un contraste marqué entre les espaces topographiquement contraints du cœur de la réserve et ses marges plus anthropisées. Les années 2022, 2024 et 2025, affectées par des conditions d'acquisition défavorables en termes de couverture nuageuse, ont été volontairement exclues du calcul afin de garantir la robustesse des résultats.

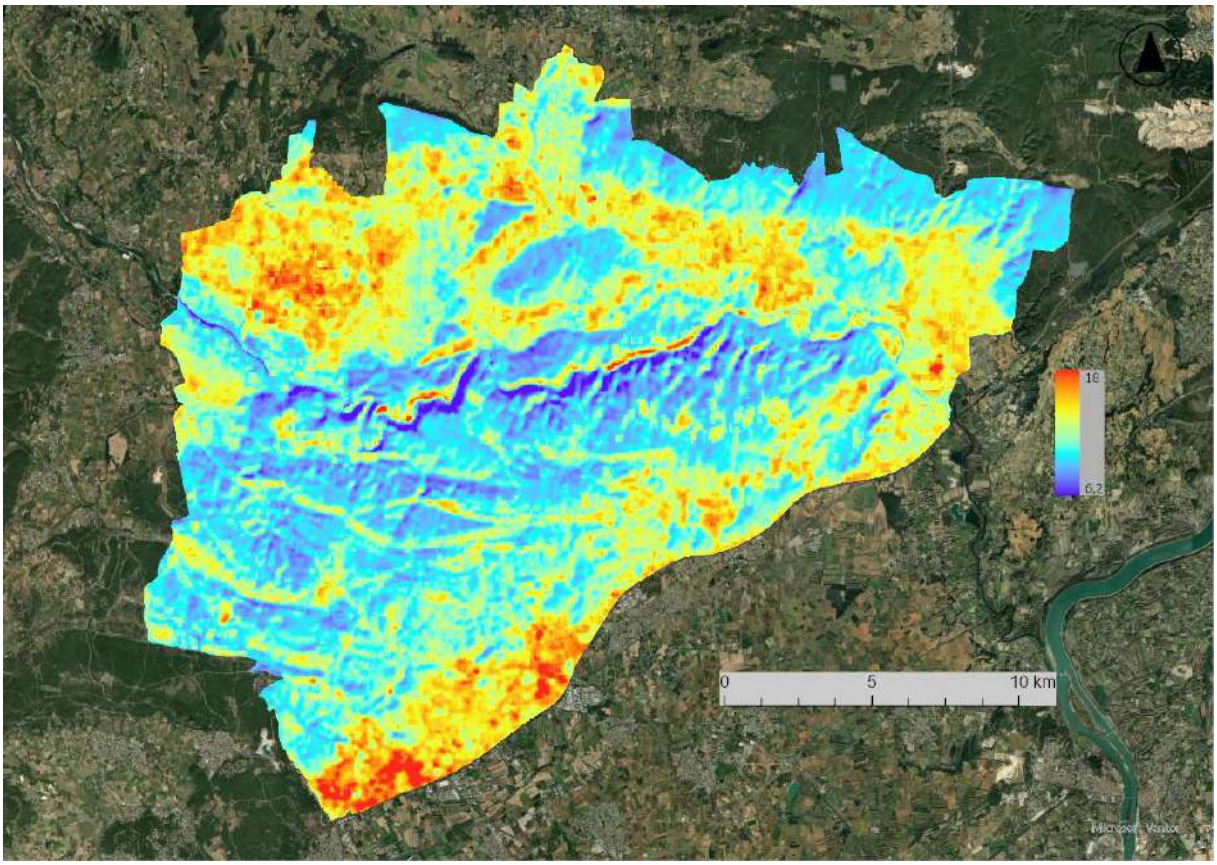


Figure 51 - Moyenne des températures de surface hivernales (2010 – 2025) (source : Landsat)

Les secteurs centraux de la réserve, correspondant aux reliefs karstiques, aux espaces densément boisés et aux vallées encaissées, se distinguent par des températures de surface systématiquement plus basses. Ces zones froides structurent une véritable épine dorsale thermique orientée globalement est–ouest, qui épouse étroitement les formes du relief et le réseau hydrographique. Cette organisation suggère un rôle déterminant de la topographie, de l'ombrage hivernal, de la densité de biomasse et de l'inertie thermique des formations naturelles dans le contrôle des températures de surface en saison froide.

À l'inverse, les marges sud, nord-ouest et est de l'emprise étudiée présentent des températures plus élevées, en particulier dans les secteurs agricoles ouverts et à proximité des espaces urbanisés. Le sud de la réserve, en contact avec l'agglomération nîmoise, conserve ainsi

une signature thermique relativement plus chaude, même en hiver. Cette configuration traduit à la fois une moindre contrainte topographique, une exposition plus favorable au rayonnement solaire et l'influence des surfaces artificialisées ou faiblement végétalisées.

L'analyse des écarts à la moyenne hivernale pour l'année 2023 (Fig. 52) permet d'affiner cette lecture spatiale en mettant en évidence les zones de sur- ou sous-réchauffement relatif. Contrairement à l'été, les anomalies hivernales apparaissent plus diffuses et moins intensément contrastées. Néanmoins, certains secteurs se singularisent : des anomalies positives persistent sur les marges agricoles et urbanisées, tandis que les zones centrales de la réserve affichent majoritairement des écarts négatifs, confirmant leur rôle de noyaux de fraîcheur hivernale.

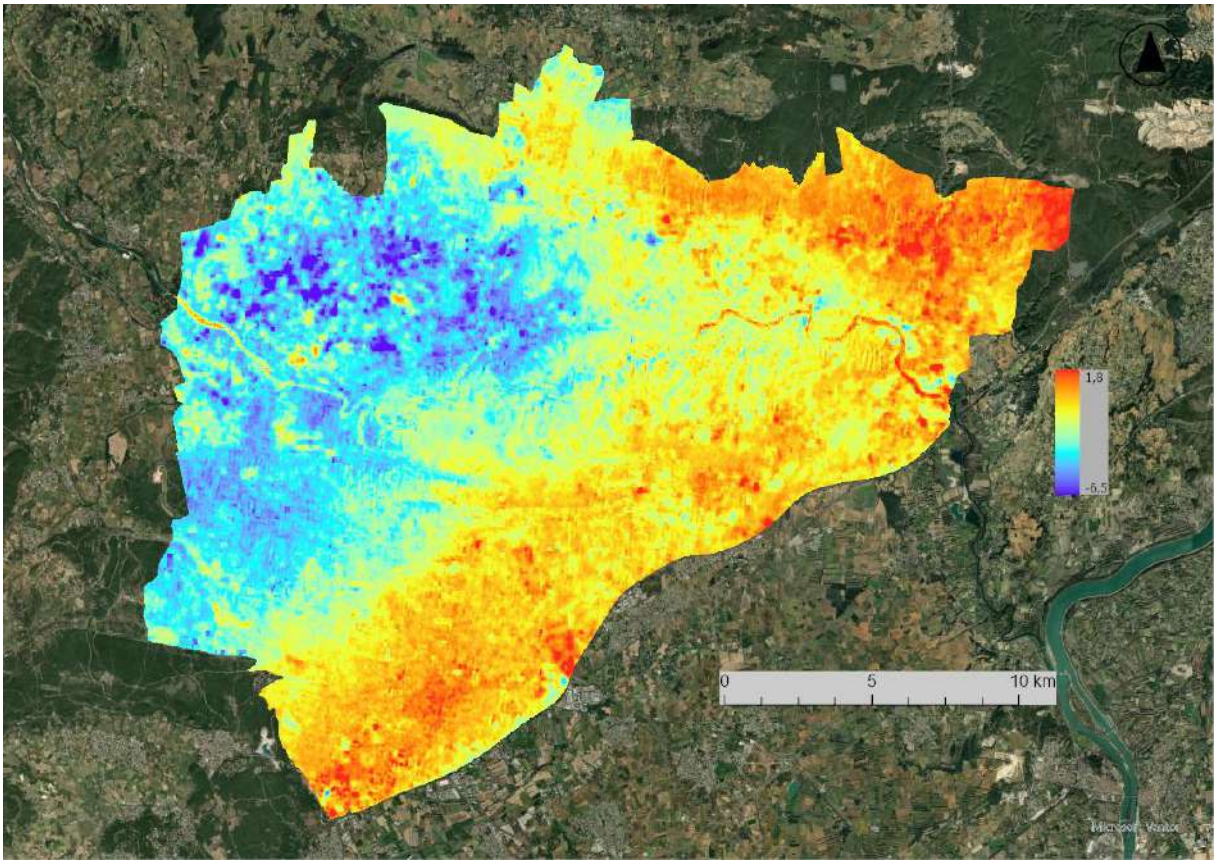


Figure 52 - Ecart à la moyenne des températures de surface hivernales (2010 – 2025) (source : Landsat)

Dans l'ensemble, l'hiver révèle donc une organisation thermique plus fortement contrainte par les facteurs physiques structurants — relief, occupation du sol, exposition — que par les dynamiques d'urbanisation (fig. 53). Cette relative stabilité spatiale contraste avec la variabilité estivale et souligne le caractère saisonnier des processus de différenciation thermique. Elle constitue un point d'appui essentiel pour la mise en relation, dans les sections suivantes, des températures de surface hivernales avec les zones climatiques locales (LCZ), afin d'évaluer la capacité de ces dernières à rendre compte des contrastes thermiques observés en saison froide.

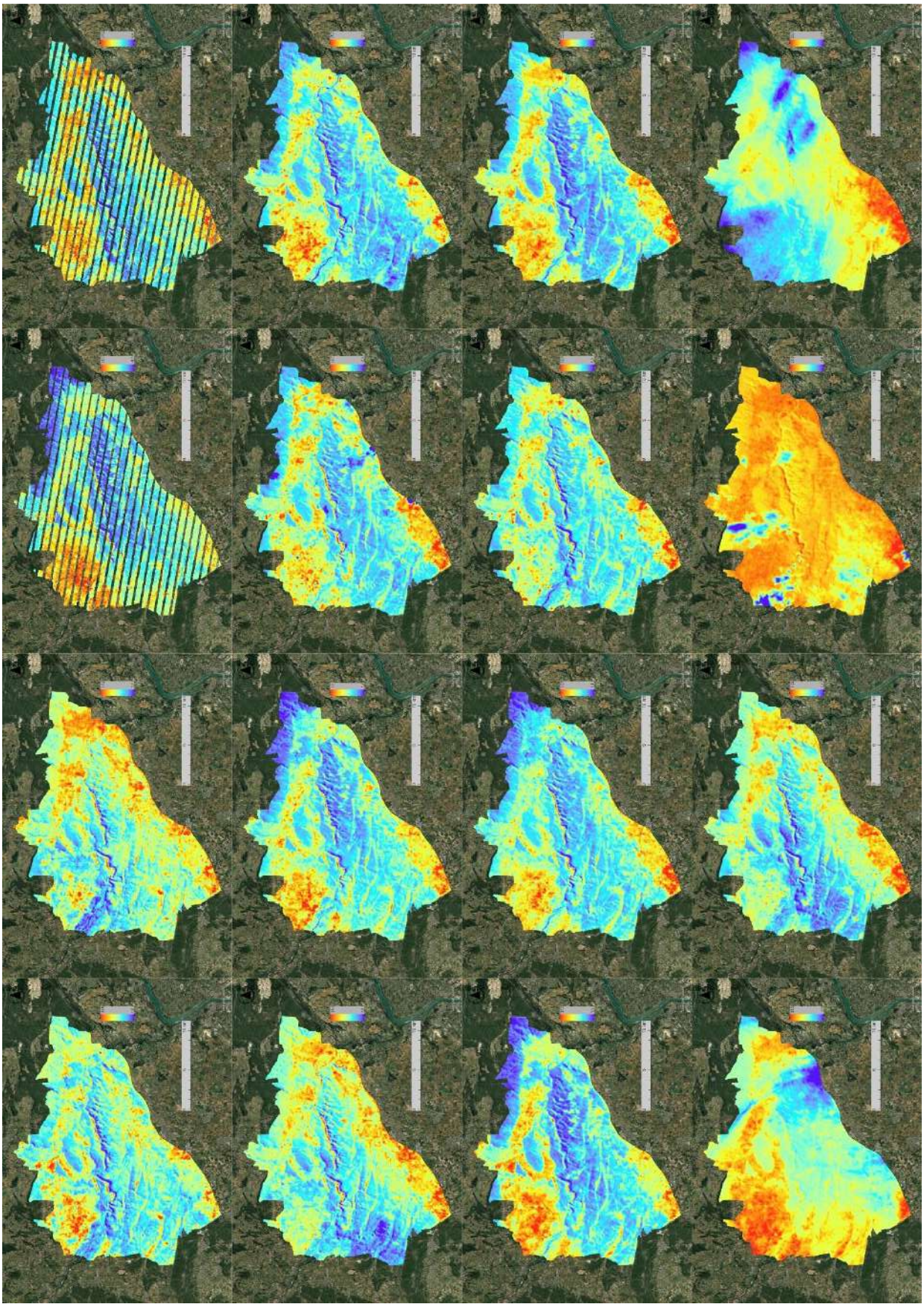


Figure 53 – Organisation spatiale des températures de surface hivernales de 2010 (en haut à gauche) à 2025 (en bas à droite) (source : Landsat). Comme il peut l'être constaté, les années 2022, 2024 et 2025 présente des nuages et n'a pas été inclus dans les études.

6.3.3 Synthèse intermédiaire et transition vers l'analyse par LCZ

L'analyse conjointe des organisations spatiales estivales et hivernales des températures de surface met en évidence une structuration thermique robuste de la réserve, dont les logiques diffèrent toutefois sensiblement selon la saison. En été, les contrastes thermiques sont marqués et fortement polarisés, révélant des gradients spatiaux intenses et des secteurs particulièrement sensibles au réchauffement de surface. À l'inverse, en hiver, la distribution des températures apparaît plus homogène, davantage contrainte par les facteurs physiques structurants du territoire — relief, exposition, occupation du sol — que par les dynamiques anthropiques.

Malgré ces différences saisonnières, plusieurs constantes spatiales se dégagent. Le cœur de la réserve se distingue par des températures de surface systématiquement plus faibles, tant en été qu'en hiver, confirmant son rôle de noyau de relative fraîcheur à l'échelle du territoire. À l'opposé, les marges agricoles et urbanisées, en particulier au sud, au nord-ouest et à l'est, présentent des signatures thermiques plus élevées et une plus grande propension aux anomalies positives, traduisant une sensibilité accrue aux conditions météorologiques et à l'occupation du sol.

Ces résultats soulignent que les températures de surface ne se distribuent pas de manière aléatoire, mais s'inscrivent dans des configurations spatiales cohérentes, héritées à la fois des caractéristiques physiques du milieu et des formes d'anthropisation. Ils invitent dès lors à interroger la capacité des zones climatiques locales (LCZ) à rendre compte de ces contrastes thermiques observés, et à évaluer dans quelle mesure cette typologie permet de discriminer les comportements thermiques de surface, en été comme en hiver. C'est précisément l'objet de la section suivante, consacrée au croisement des températures de surface Landsat avec les LCZ de la réserve.

6.4 – Températures de surfaces (LST) vs zones climatiques locales (LCZ) : approche croisée

6.4.1 Principe des zones climatiques locales (LCZ) et réalisation sur le territoire de la réserve

Dans la suite de cette étude, les températures de surface seront croisées avec la cartographie des **zones climatiques locales (Local Climate Zones – LCZ)**. Les LCZ constituent une typologie standardisée des environnements urbains et naturels, fondée sur des critères morphologiques, fonctionnels et de couverture du sol (densité bâtie, hauteur des bâtiments, imperméabilisation, végétation, etc. – fig. 54). Elles offrent un cadre particulièrement pertinent pour relier les signatures thermiques observées par satellite aux caractéristiques physiques du territoire. Le croisement **LST – LCZ** a permis :

- de comparer les niveaux de température de surface entre types de milieux,
- d'identifier les LCZ les plus contributrices aux excès thermiques estivaux,
- d'analyser la persistance ou l'atténuation des contrastes thermiques en hiver.

Cette approche intégrée permet ainsi de relier le **climat régional**, le **climat local de surface** et les **structures territoriales**, préparant une lecture opérationnelle des enjeux d'adaptation et d'aménagement.

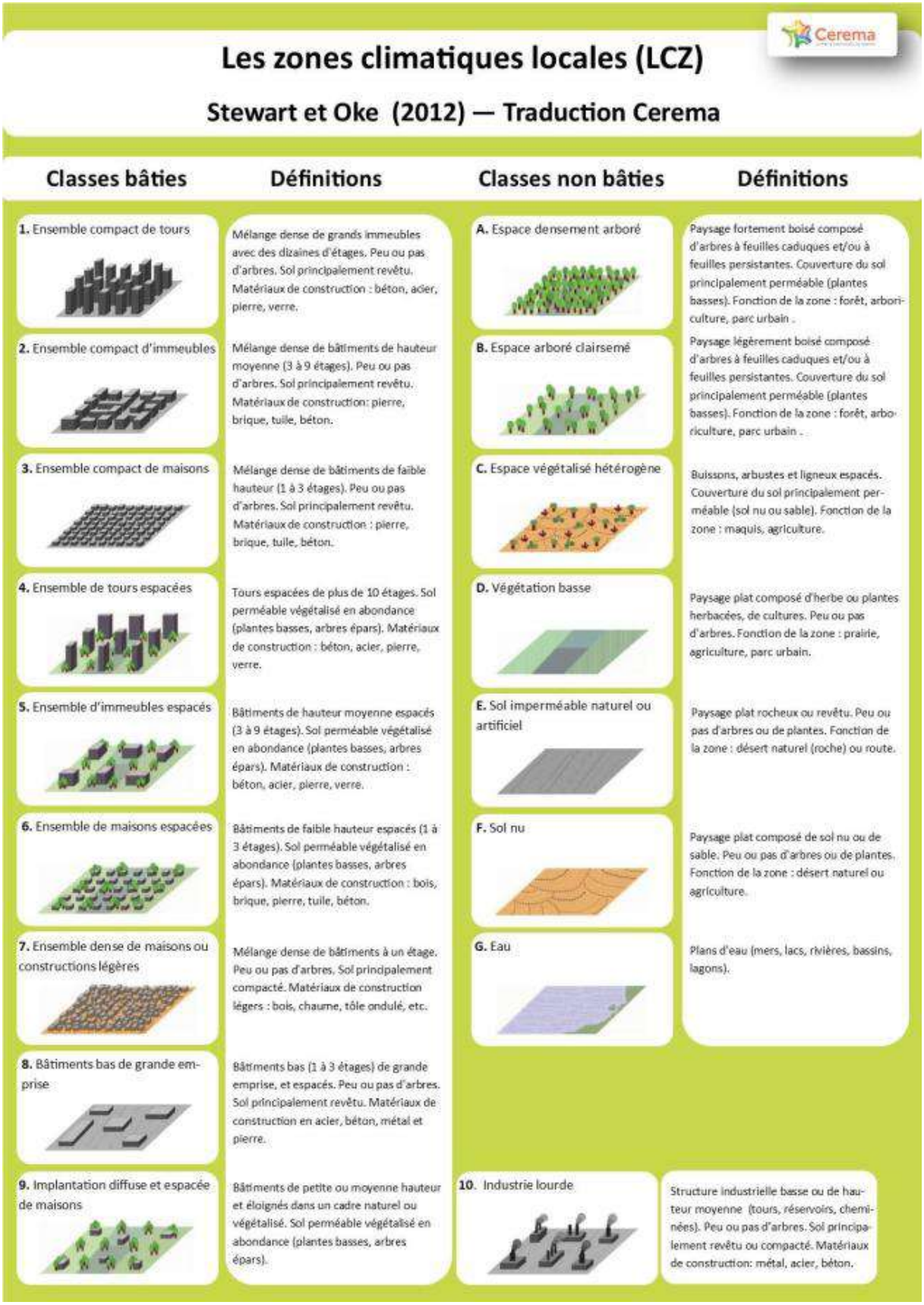


Figure 54 - Définition des typologies LCZ (source : Cerema, 2025)

La cartographie utilisée dans le cadre de cette étude est celle issue des travaux du Cerema[5]. Elle a cependant été complétée à l'échelle de la réserve de biosphère des gorges du Gardon car toute la partie nord d'Uzès est absente. En effet, le Cerema n'ayant traité que les aires urbaines, la totalité de la réserve de biosphère n'est pas couverte (seules les agglomérations de Nîmes et Arles sont présentes). La partie Nord est manquante et a fait l'objet d'une digitalisation par photo-interprétation qui a nécessité la création de plus de 200 polygones associés chacun à une LCZ (fig. 55).

[5] https://cartagene.cerema.fr/portal/apps/dashboards/08066acd23974111be1584a5761fd6b9

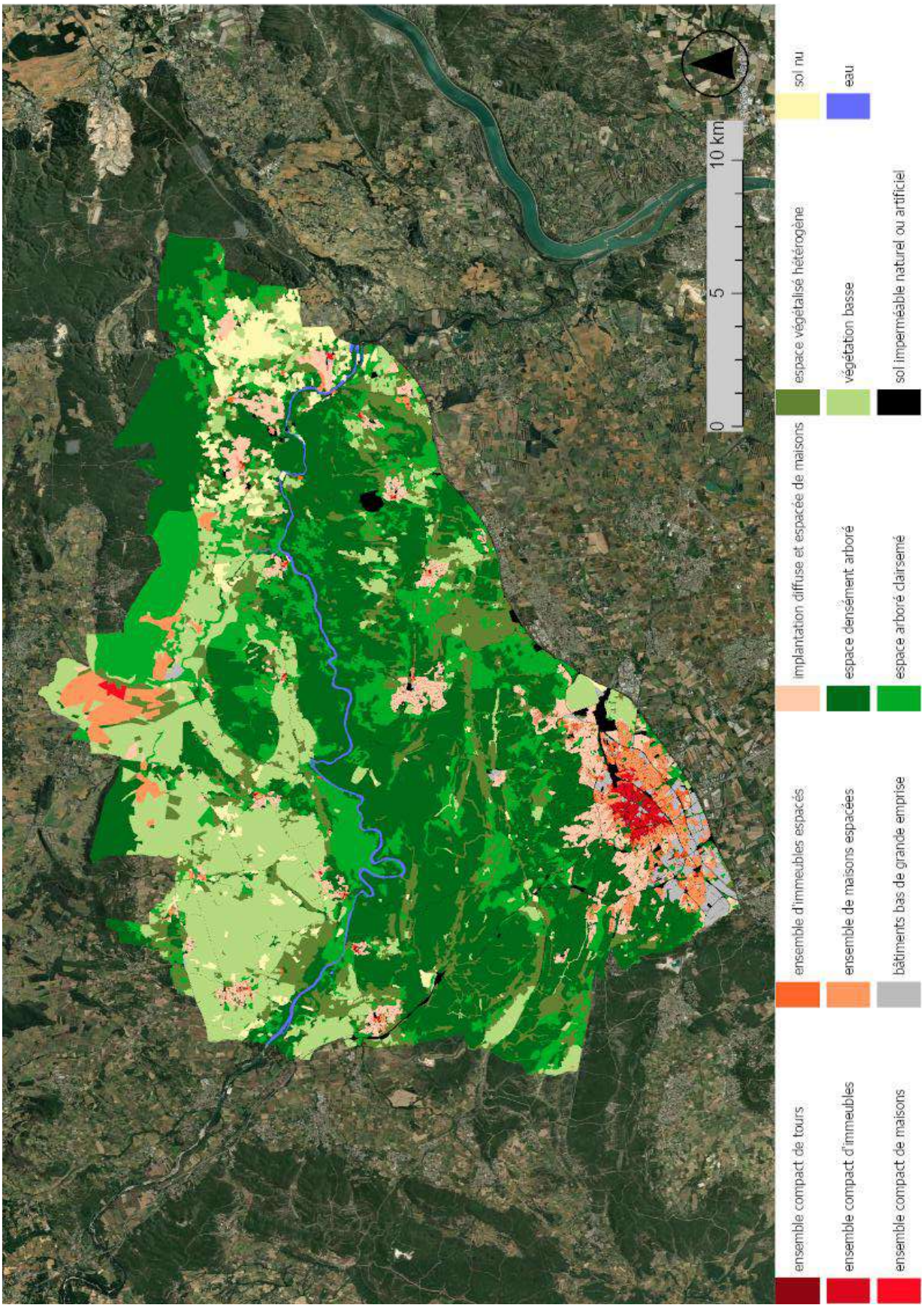


Figure 55 - Zones climatiques locales (LCZ) de la réserve de biosphère des gorges du Gardon (source : adaptée du Cerema)

Néanmoins, il convient de souligner certaines limites inhérentes à la cartographie des zones climatiques locales mobilisée dans cette étude. La classification produite par le Cerema repose en grande partie sur des méthodes supervisées et semi-automatisées, qui, bien qu'efficaces à large échelle, peuvent conduire localement à des polygones dont la cohérence morphologique ou fonctionnelle est imparfaite. Dans certains cas, les entités cartographiées agrègent des surfaces hétérogènes, ou au contraire correspondent à des polygones de taille très réduite, insuffisants pour caractériser pleinement une LCZ au sens conceptuel du terme.

Ces petites entités spatiales, parfois issues de découpages fins ou contraints par les données d'entrée, sont susceptibles de refléter davantage des microclimats locaux que des zones climatiques locales stricto sensu, lesquelles sont théoriquement définies pour représenter des ensembles morphologiquement homogènes à une échelle suffisante. Par ailleurs, l'absence initiale de traitement des espaces non urbains a nécessité une reconstitution manuelle par photo-interprétation, qui, bien que plus qualitative, introduit une part inévitable de subjectivité dans l'attribution des classes.

Ces limites n'invalident pas l'approche LCZ, largement reconnue pour sa robustesse et sa comparabilité internationale, mais invitent à une lecture prudente des résultats, en particulier pour les classes peu représentées ou spatialement fragmentées. Elles justifient également le recours à des analyses statistiques agrégées par type de LCZ, privilégiant les tendances générales plutôt que l'interprétation ponctuelle de polygones isolés.

6.4 – Croisement des températures de surface (LST) et des zones climatiques locales (LCZ) en été

Le croisement des températures de surface estivales avec la cartographie des zones climatiques locales met en évidence des contrastes thermiques très marqués entre types de milieux, confirmant le rôle déterminant de la morphologie urbaine, de la densité bâtie et de la couverture du sol dans la structuration du champ thermique de surface (fig. 56).

Les résultats montrent tout d'abord un gradient thermique urbain très net, directement lié à la compacité et à la verticalité du bâti. Les ensembles bâtis les plus denses et les plus hauts présentent les températures de surface les plus élevées, traduisant une forte capacité d'absorption et de stockage de l'énergie solaire. À l'inverse, la diminution progressive de la hauteur des bâtiments et de la densité du tissu urbain s'accompagne d'une baisse régulière des LST. Cette hiérarchie thermique est particulièrement lisible entre les ensembles compacts, les tissus d'immeubles espacés puis les implantations diffuses de maisons, illustrant de façon très claire l'effet combiné de la densité bâtie, de la rugosité urbaine et de la part de surfaces perméables.

Un résultat saillant concerne les bâtiments bas de grande emprise, qui apparaissent comme les entités les plus chaudes de l'ensemble des LCZ étudiées. Cette signature thermique élevée, bien connue dans la littérature, s'explique par l'importance des surfaces artificialisées horizontales (toitures, parkings, voiries associées), souvent peu ombragées, faiblement ventilées

et dotées de matériaux à forte inertie thermique. Ce type de LCZ constitue ainsi un contributeur majeur aux excès thermiques estivaux, malgré une hauteur bâtie limitée.

Les espaces végétalisés présentent, quant à eux, un comportement thermique contrasté mais cohérent avec leur structure. Les espaces densément arborés sont nettement plus frais que les espaces arborés clairsemés, eux-mêmes plus frais que les espaces à végétation basse. Ce gradient thermique décroissant avec l'augmentation de la biomasse souligne le rôle central de l'ombrage, de l'évapotranspiration et de la rugosité végétale dans la régulation des températures de surface. À l'inverse, la végétation basse, bien que naturelle, affiche des températures relativement élevées en période estivale, traduisant une exposition directe au rayonnement solaire et une capacité de rafraîchissement plus limitée, notamment en contexte de stress hydrique.

Les sols nus et les surfaces imperméabilisées, qu'elles soient naturelles ou artificielles, présentent également des températures de surface élevées, comparables à celles de certains tissus urbains peu denses. Ces résultats rappellent que l'absence de couverture végétale constitue un facteur thermique pénalisant, indépendamment du caractère urbain ou non des surfaces concernées.

Enfin, sans surprise, les surfaces en eau apparaissent comme les plus fraîches de l'ensemble des LCZ, confirmant leur rôle majeur de régulation thermique locale en période estivale, tant par leur forte inertie thermique que par les flux latents associés à l'évaporation.

Dans l'ensemble, cette analyse met en évidence une hiérarchisation thermique très robuste des LCZ en été, dominée par un continuum allant des formes urbaines denses et fortement artificialisées vers les milieux végétalisés les plus structurés. Elle confirme la pertinence du cadre LCZ pour interpréter spatialement les températures de surface et fournit une base solide pour identifier, à l'échelle de la réserve de biosphère, les milieux les plus exposés aux excès thermiques estivaux, ainsi que les leviers d'atténuation potentiels liés à la végétalisation, à la désimperméabilisation et à la morphologie urbaine. Une analyse similaire centrée uniquement sur les LCZ présents à l'intérieur du site classé de la réserve de biosphère a également été menée. Les résultats sont similaires à l'étude conduite sur l'ensemble du site de la réserve et confirment ainsi les résultats précédents et l'intérêt de l'utilisation des LCZ pour déterminer les zones les plus impactées par les températures de surface les plus élevées.

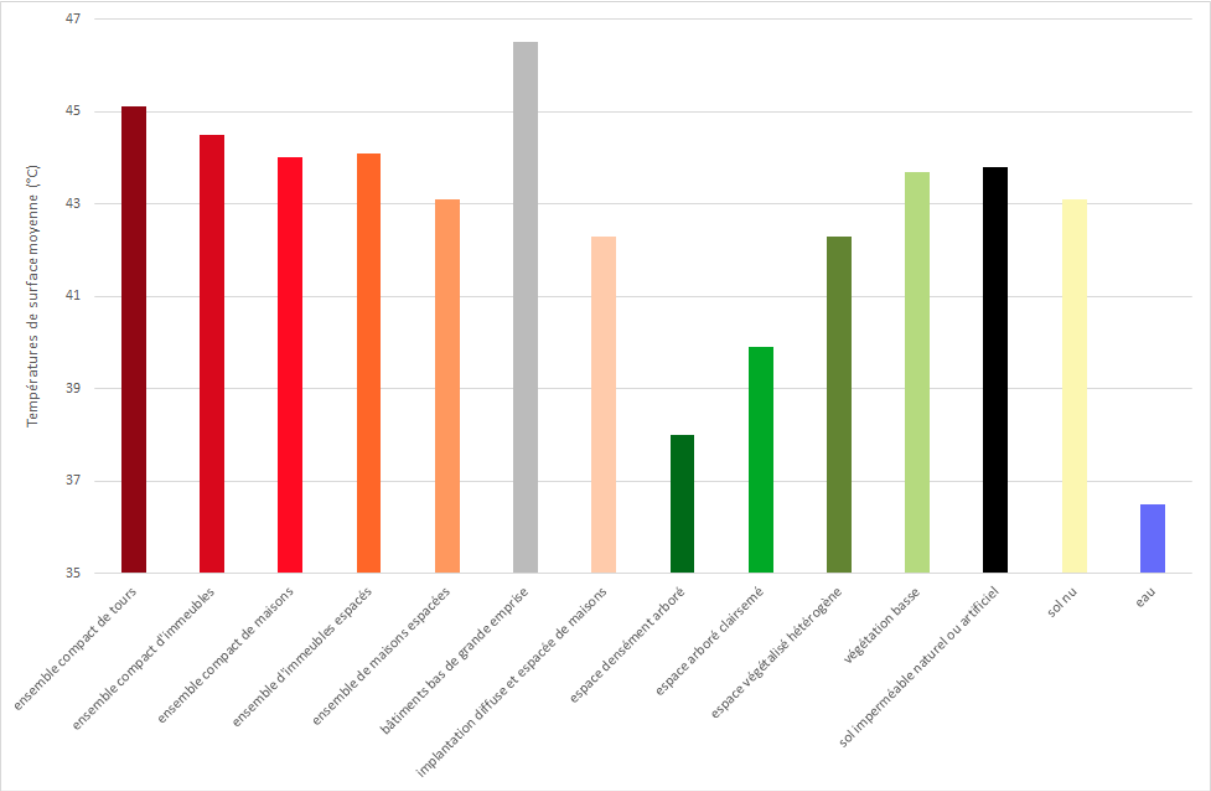


Figure 56 - Températures de surface moyenne en été (°C ; 2010 - 2025) des zones climatiques locales (LCZ) de la réserve

6.5 Analyse des écarts à la moyenne des températures de surface estivales en 2024 par LCZ

L'analyse des écarts à la moyenne des températures de surface en 2024 met en évidence un **réchauffement généralisé de l'ensemble des zones climatiques locales**, sans exception (fig. 57). Quelle que soit la nature du milieu – urbain, naturel ou semi-naturel – toutes les LCZ présentent des anomalies thermiques positives, traduisant le caractère exceptionnel de la saison estivale 2024 à l'échelle de la réserve de biosphère.

Les **LCZ du bâti** concentrent les écarts les plus élevés. Les ensembles compacts d'immeubles et de maisons, ainsi que les ensembles d'immeubles espacés, enregistrent les hausses de LST les plus marquées, dépassant fréquemment +2 °C par rapport à la moyenne. Cette surchauffe confirme le rôle amplificateur des surfaces artificialisées en contexte de canicule ou d'été chaud, où l'inertie thermique des matériaux, la faible évapotranspiration et l'accumulation diurne de chaleur conduisent à des anomalies particulièrement fortes.

Les **bâtiments bas de grande emprise** se distinguent également par des écarts à la moyenne élevés, comparables à ceux des tissus urbains denses. Ce résultat souligne une nouvelle fois que la hauteur du bâti ne constitue pas, à elle seule, un facteur protecteur face aux excès thermiques, lorsque l'artificialisation horizontale domine largement.

Plus préoccupant encore, les **espaces densément arborés**, habituellement identifiés comme des milieux thermiquement protecteurs, enregistrent une augmentation des

températures de surface supérieure à +1,5 °C. Ce signal fort suggère une **dégradation partielle de la fonction de rafraîchissement des couverts arborés** lors d'épisodes estivaux intenses, probablement liée à des phénomènes de stress hydrique, de fermeture stomatique et à une diminution de l'évapotranspiration effective. Autrement dit, même les milieux végétalisés les plus structurés ne sont plus totalement à l'abri des anomalies thermiques en contexte de réchauffement climatique accentué.

Les autres espaces végétalisés (arbres clairsemés, végétation basse) ainsi que les sols nus et les surfaces imperméabilisées présentent des hausses plus modérées, mais néanmoins systématiques, confirmant le caractère diffus et spatialement généralisé du signal de réchauffement.

Enfin, les **surfaces en eau**, bien que restant les milieux les plus frais en valeur absolue, n'échappent pas à cette dynamique, avec une anomalie thermique positive qui témoigne d'une élévation généralisée du niveau thermique de surface.

Dans l'ensemble, cette analyse des écarts à la moyenne révèle que l'été 2024 ne se caractérise pas uniquement par une intensification des contrastes thermiques classiques entre LCZ, mais par une **élévation simultanée du socle thermique de tous les milieux**, y compris ceux traditionnellement considérés comme les plus résilients. Ce constat renforce l'idée que les stratégies d'adaptation fondées sur la seule présence de végétation devront être complétées par une gestion fine de l'eau, des sols et des structures territoriales pour rester pleinement efficaces à l'avenir.

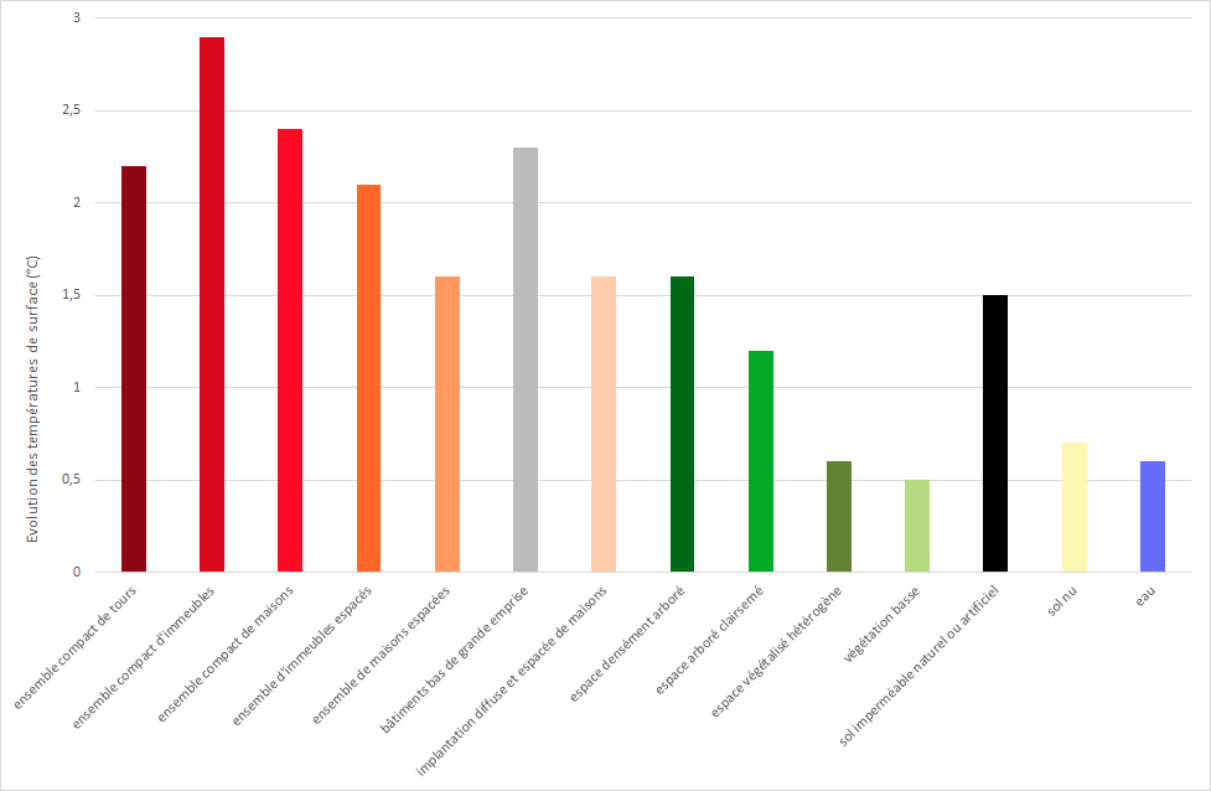


Figure 57 – Evolution des températures de surface (°C) des zones climatiques locales de 2024 par rapport à la moyenne 2010-2025

6.6 – Croisement des températures de surface (LST) et des zones climatiques locales (LCZ) en hiver

L'analyse hivernale du croisement entre les températures de surface et les zones climatiques locales met en évidence des **hiérarchies thermiques globalement similaires à celles observées en été**, mais avec des **contrastes nettement atténués**. Ce résultat est cohérent avec les analyses précédentes des LST hivernales (§ 6.3), qui montraient déjà une organisation spatiale moins marquée et des amplitudes thermiques réduites en saison froide (fig. 58).

Les **LCZ du bâti** restent, en moyenne, les milieux les plus chauds en hiver. Les ensembles compacts de tours, d'immeubles et de maisons, ainsi que les ensembles d'immeubles espacés, conservent des températures de surface supérieures à celles des milieux végétalisés. Toutefois, les écarts entre ces différentes formes urbaines sont moins prononcés qu'en été, traduisant une **réduction de l'effet amplificateur de la morphologie urbaine** lorsque l'ensoleillement est plus faible et que les flux radiatifs sont limités.

Les **bâtiments bas de grande emprise** apparaissent de nouveau parmi les LCZ les plus chaudes, confirmant que l'artificialisation extensive et la dominance des surfaces minérales constituent des facteurs structurants du signal thermique, y compris en hiver. Néanmoins, leur avantage thermique relatif par rapport aux autres formes bâties est plus modéré que durant la saison estivale.

Les **espaces végétalisés** présentent, comme en été, des températures de surface plus basses que les zones urbanisées, avec un gradient cohérent selon la densité de biomasse. Les espaces densément arborés restent les plus frais parmi les LCZ terrestres, suivis des espaces arborés clairsemés puis de la végétation basse. Toutefois, les différences entre ces catégories sont réduites, suggérant que la capacité de régulation thermique de la végétation est **moins différenciante en hiver**, lorsque l'évapotranspiration est limitée et que la phénologie végétale joue un rôle atténué.

Les **sols nus** et les **sols imperméabilisés naturels ou artificiels** occupent une position intermédiaire, avec des températures proches de celles de certaines LCZ végétalisées peu denses. Cette convergence thermique souligne que, en hiver, la nature du couvert du sol pèse davantage que la complexité morphologique sur les contrastes de LST.

Enfin, les **surfaces en eau** demeurent les plus fraîches, confirmant leur rôle thermique spécifique lié à leur forte inertie, même si leur différentiel par rapport aux autres LCZ est moins marqué qu'en été.

Dans l'ensemble, cette analyse hivernale montre que si la **structure thermique relative des LCZ est globalement conservée tout au long de l'année**, son expression saisonnière varie fortement. L'hiver agit comme un **facteur d'homogénéisation thermique**, atténuant les contrastes sans les faire disparaître. Ce résultat renforce l'intérêt d'une lecture saisonnalisée des

LCZ, indispensable pour appréhender finement les enjeux climatiques locaux et adapter les stratégies d'aménagement aux dynamiques thermiques réelles du territoire.

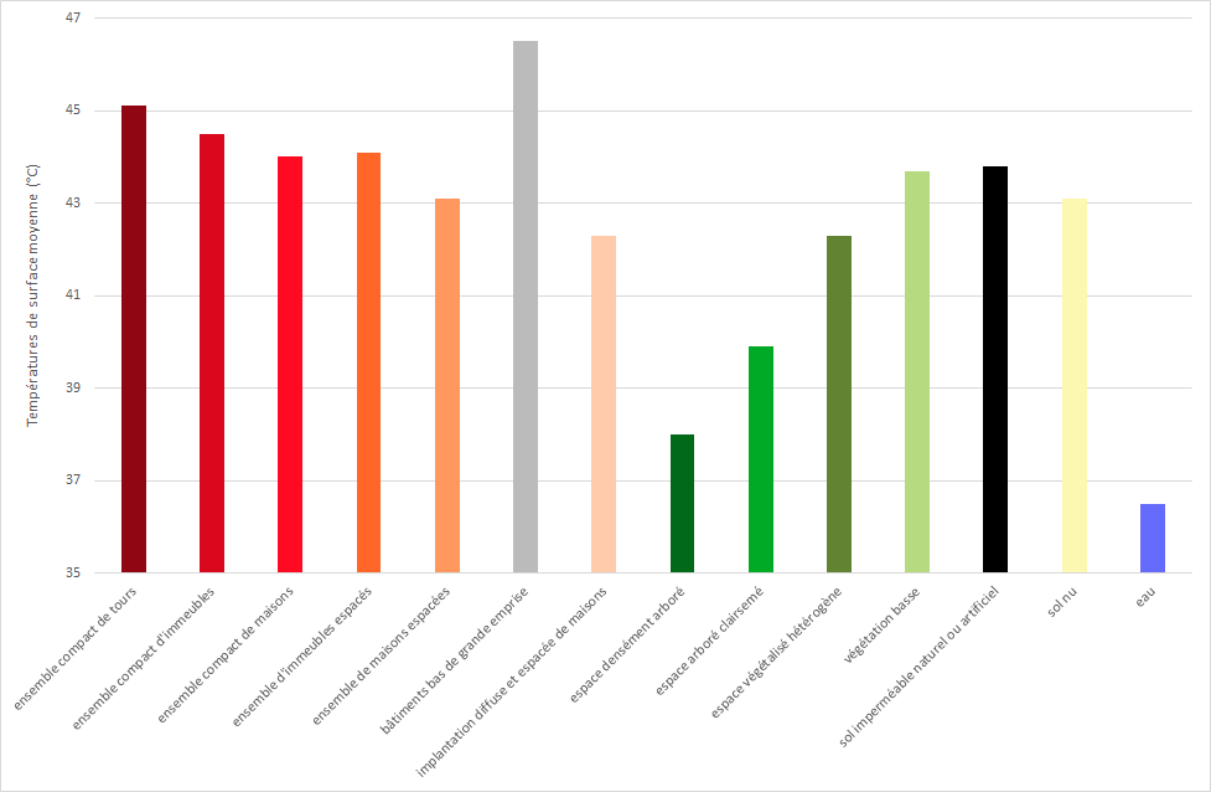


Figure 58 - Températures de surface moyenne en hiver (°C ; 2010 - 2025) des zones climatiques locales (LCZ) de la réserve

6.7 – Mise en perspective : des structures thermiques robustes aux enjeux d'adaptation territoriale

Le croisement des températures de surface avec les zones climatiques locales met en évidence un résultat central : **les contrastes thermiques observés sont avant tout structurés par l'organisation physique et fonctionnelle du territoire**, et ce de manière remarquablement stable, quelle que soit la saison considérée. Si l'intensité des écarts varie fortement entre l'été et l'hiver, la hiérarchie thermique des LCZ demeure globalement constante, traduisant le rôle déterminant de la morphologie urbaine, de la nature des matériaux et de la couverture végétale dans la régulation des températures de surface.

En période estivale, cette structuration se traduit par une **amplification marquée des contrastes**, particulièrement au sein des LCZ bâties les plus denses et des surfaces artificialisées de grande emprise. Les formes urbaines compactes, combinant forte imperméabilisation, inertie thermique élevée et faible présence de végétation, apparaissent comme les principaux contributeurs aux excès thermiques. À l'inverse, les milieux végétalisés, et en particulier les espaces densément arborés, jouent un rôle d'atténuation thermique clairement identifiable, bien que non homogène selon la densité de biomasse et la continuité spatiale des formations végétales.

En hiver, l'analyse montre une atténuation générale des écarts thermiques, sans remise en cause de cette organisation relative. La réduction de l'ensoleillement, la baisse de l'évapotranspiration et la moindre activation des mécanismes de surchauffe urbaine conduisent à une homogénéisation partielle des températures de surface. Toutefois, la persistance de différences entre LCZ souligne que les caractéristiques structurelles du territoire continuent d'influencer le signal thermique, même en dehors des périodes de stress climatique estival.

Cette stabilité relative des hiérarchies thermiques, combinée à une variabilité saisonnière de leur intensité, constitue un enseignement majeur pour les politiques d'adaptation. Elle suggère que les leviers d'action sont bien identifiés et spatialement localisables : limitation de l'artificialisation extensive, maîtrise des formes bâties les plus défavorables, renforcement et densification des continuités végétales, et valorisation du rôle régulateur de certains milieux naturels. À l'inverse, l'élévation des températures observée y compris dans des LCZ réputées plus résilientes, comme les espaces densément arborés, rappelle que ces dispositifs ne constituent pas une solution suffisante en eux-mêmes et doivent être pensés dans une approche systémique.

Ainsi, l'approche croisée LST - LCZ dépasse le simple constat thermique pour offrir un outil de lecture territoriale stratégique, capable de relier climat de surface, structures paysagères et dynamiques d'aménagement. Elle prépare le terrain à une réflexion intégrée sur l'adaptation au changement climatique, fondée non seulement sur la réduction des extrêmes, mais aussi sur la transformation progressive des formes urbaines et rurales à l'échelle locale.

6.8- Conclusion du chapitre 6 : l'apport du regard croisé entre LST et LCZ

Ce chapitre met en évidence une organisation spatiale des températures de surface fortement structurée par les caractéristiques physiques et fonctionnelles du territoire. À travers l'analyse multi-temporelle des LST et leur croisement avec les zones climatiques locales, il apparaît que la morphologie urbaine, le degré d'artificialisation et la couverture végétale constituent les principaux déterminants des contrastes thermiques observés, bien davantage que les seules conditions météorologiques ponctuelles.

En été, les différences entre LCZ sont marquées et hiérarchisées : les tissus bâtis denses et les surfaces artificialisées concentrent les températures de surface les plus élevées, tandis que les milieux végétalisés et aquatiques jouent un rôle d'atténuation thermique clairement identifiable. En hiver, ces contrastes s'atténuent sans disparaître, confirmant la robustesse des structures thermiques du territoire et la permanence de l'influence des formes d'occupation du sol sur le climat de surface.

L'analyse des écarts à la moyenne met en évidence un réchauffement généralisé de l'ensemble des LCZ, y compris des milieux réputés plus résilients, soulignant les limites des seuls mécanismes naturels de régulation face à l'intensification du changement climatique. Ces résultats confirment que la vulnérabilité thermique n'est pas uniforme, mais étroitement liée aux choix d'aménagement et aux trajectoires territoriales passées.

Ainsi, le croisement LST–LCZ apparaît comme un outil particulièrement pertinent pour objectiver les interactions entre structures territoriales et dynamiques climatiques locales. Il fournit un cadre d'analyse opérationnel pour identifier les secteurs les plus exposés, hiérarchiser les enjeux et éclairer les stratégies d'adaptation, ouvrant la voie à une réflexion plus large sur la transformation des territoires face au réchauffement climatique.

Les analyses développées dans le chapitre 6 ont mis en évidence une différenciation thermique marquée du territoire, étroitement liée aux formes d'occupation du sol, à l'artificialisation et à la structure de la végétation. Ces contrastes de températures de surface, persistants dans le temps et amplifiés lors des périodes estivales, constituent un signal précoce des vulnérabilités climatiques locales, en particulier dans les espaces naturels et semi-naturels soumis à un stress thermique croissant.

Dans ce contexte, l'augmentation des températures de surface, y compris au sein des milieux végétalisés, pose directement la question de l'évolution des risques associés au changement climatique, au premier rang desquels figure le risque de feux de forêt. Le chapitre suivant prolonge ainsi l'analyse en mobilisant les données issues de la chaîne DRIAS–NORIF afin d'évaluer l'évolution du danger incendie sur le territoire de la réserve de biosphère des gorges du Gardon, depuis la période de référence actuelle jusqu'aux horizons 2030 et 2050. Il s'agit de replacer les dynamiques thermiques observées à l'échelle locale dans une lecture prospective des risques, à la fois climatique et territoriale.

7 – Évolution du risque de feux de forêt à l'échelle de la réserve de biosphère

Les feux de forêt constituent aujourd'hui l'un des principaux risques climatiques pesant sur les territoires méditerranéens, tant par leurs impacts environnementaux que par leurs conséquences humaines, économiques et paysagères. Longtemps considérée comme secondaire ou ponctuelle dans certaines parties du territoire, la question du risque incendie tend désormais à s'inscrire dans une dynamique structurelle, sous l'effet combiné du réchauffement climatique, de l'évolution de la végétation et des usages du sol.

Les résultats présentés dans les chapitres précédents ont mis en évidence une hausse généralisée des températures de surface et un stress thermique croissant, y compris au sein des espaces végétalisés. Ces évolutions constituent des facteurs aggravants majeurs du danger de feux de forêt, en favorisant l'assèchement des combustibles, l'allongement des périodes à risque et la propagation potentielle des incendies. Dans ce contexte, l'anticipation de l'évolution du danger incendie devient un enjeu central pour l'adaptation et la gestion durable du territoire de la réserve de biosphère des gorges du Gardon.

Ce chapitre vise ainsi à analyser l'évolution du risque de feux de forêt à partir des données issues de la base BDIFF (Base de données sur les incendies de forêts en France – annexe 1) et de la chaîne DRIAS–NORIF, en comparant la situation actuelle à des projections climatiques aux horizons 2030 et 2050. L'objectif est double : caractériser les tendances futures du danger incendie à l'échelle de la réserve et fournir des éléments d'aide à la décision pour les acteurs de la gestion des espaces naturels, de l'aménagement et de la prévention des risques. Cette approche prospective permet d'inscrire la problématique des feux de forêt dans une lecture territoriale intégrée, en cohérence avec les dynamiques climatiques et environnementales mises en évidence précédemment.

7.1 – Données et méthodologie : analyse du danger de feux de forêt à partir de la base BDIFF et de la chaîne DRIAS–NORIF

7.1.1 – Base de données BDIFF et méthode d'exploitation

En complément des indicateurs prospectifs issus de DRIAS–NORIF, l'analyse du risque de feux de forêt s'appuie sur les données historiques de la Base de Données sur les Incendies de Forêts (BDIFF), mise à disposition par le ministère de l'Agriculture. Cette base recense, à l'échelle nationale, les départs de feux, leurs dates, leurs localisations ainsi que les surfaces parcourues, ventilées par grands types de couvert (forêt, maquis–garrigues, surfaces non boisées).

Les données ont été extraites via le portail en ligne[6] pour la période **2010–2025**, en sélectionnant uniquement les enregistrements situés à l'intérieur du périmètre de la Réserve de biosphère des gorges du Gardon. Cette extraction spatiale permet de constituer une base cohérente et strictement territorialisée, adaptée à une analyse locale des dynamiques incendiaires.

À partir de cette base, plusieurs indicateurs simples ont été produits :

- le nombre annuel de feux,
- la surface totale parcourue par année,
- la répartition des surfaces brûlées selon le type de couvert (forêt, maquis et garrigues, surfaces non boisées),
- la distribution saisonnière des départs de feu à l'échelle mensuelle.

Il est à noter que la BDIFF signale une **perte de données pour l'année 2010** à la suite d'un incident technique, ainsi qu'une **absence de données pour 2011**. Ces lacunes ont été prises en compte dans l'analyse et n'ont pas été interprétées comme des années sans incendie. L'exploitation des données repose ainsi principalement sur la période 2013–2024, suffisamment longue pour dégager des ordres de grandeur et des régularités dans les dynamiques observées.

Cette approche rétrospective vise moins à identifier des tendances statistiques robustes qu'à **contextualiser le risque incendie** sur le territoire, en mettant en évidence la variabilité interannuelle, la saisonnalité des feux et le rôle prépondérant des formations de végétation méditerranéennes. Elle constitue un socle indispensable pour interpréter les projections de risque futur et éclairer les enjeux opérationnels de prévention et de gestion.

7.1.2 Chaîne de traitement Drias – NORIF et analyse prospective à l'échelle de la réserve

L'analyse prospective du risque de feux de forêt présentée dans ce chapitre repose sur l'exploitation des indicateurs issus de la chaîne climatique **DRIAS – NORIF**, développée sous l'égide de **Météo-France**, et plus précisément l'**indice NORIFM40_yr** qui représente le **nombre de jours avec une sensibilité Feu Météo Élevée** (i.e. IFM >= 40) . Cette chaîne de traitement vise à traduire les évolutions climatiques projetées en indicateurs opérationnels de danger incendie, directement mobilisables pour l'analyse territoriale et la planification de l'adaptation.

➢ Principe général de l'indicateur NORIFM40_yr

L'indicateur **NORIFM40_yr** (Niveau Opérationnel du Risque Incendie de Forêt) est un indice synthétique de danger climatique de feux de forêt. Il est construit à partir de variables

[6] https://bdiff.agriculture.gouv.fr/

météorologiques clés influençant l'inflammabilité des combustibles et la propagation potentielle des incendies, notamment :

- la température de l'air,
- les précipitations,
- l'humidité,
- et, selon les configurations, des paramètres liés à la sécheresse des sols et de la végétation.

NORIFM40_yr ne décrit pas l'occurrence réelle des feux, mais le niveau de danger climatique, c'est-à-dire la probabilité que les conditions météorologiques et hydriques soient favorables au déclenchement et à la propagation d'un incendie. Il constitue ainsi un indicateur pertinent pour analyser les tendances de fond liées au changement climatique, indépendamment des facteurs humains ou opérationnels (allumage, gestion forestière, moyens de lutte).

➢ Données climatiques mobilisées

Les calculs s'appuient sur les projections climatiques issues du portail DRIAS, fondées sur le modèle climatique CNRM-CERFACS – CNRM-CM5 / CNRM-ALADIN63, déjà mobilisé dans les analyses climatiques précédentes, garantissant une cohérence méthodologique à l'échelle de l'ensemble du diagnostic. Trois horizons temporels sont considérés dans le cadre de cette étude :

- une période de référence correspondant au climat actuel (1991–2020),
- un horizon 2030,
- un horizon 2050,

Cela permet d'évaluer l'évolution progressive du danger incendie à court et moyen terme. Les résultats sont analysés à l'échelle spatiale de la réserve de biosphère des gorges du Gardon, par agrégation des mailles DRIAS couvrant le territoire.

➢ Démarche d'analyse retenue

L'approche méthodologique adoptée repose sur une comparaison diachronique structurée :

1. caractérisation de l'état actuel du danger climatique de feux de forêt, servant de référence territoriale ;
2. analyse des évolutions projetées aux horizons 2030 et 2050 ;
3. mise en perspective des résultats avec les dynamiques climatiques locales mises en évidence dans les chapitres précédents (températures, sécheresse, stress thermique, structures paysagères).

Cette démarche vise à dépasser une lecture strictement climatique pour inscrire le risque de feux de forêt dans une lecture territoriale intégrée, en cohérence avec les enjeux de gestion des espaces naturels, de prévention et d'adaptation au changement climatique.

7.2 – Le niveau actuel du risque de feu de forêt sur la réserve

7.2.1 - par le prisme de la base de données BDIFF

L'analyse des données issues de la base BDIFF sur la période 2013–2024 met en évidence une forte variabilité interannuelle de l'activité incendiaire sur le territoire, tant en nombre de feux qu'en surfaces parcourues (fig. 59). Le nombre annuel de feux reste globalement modéré, sans tendance temporelle nette, avec des années plus actives (2016, 2017, 2019, 2022) alternant avec des années très calmes, voire sans événement recensé (2021).

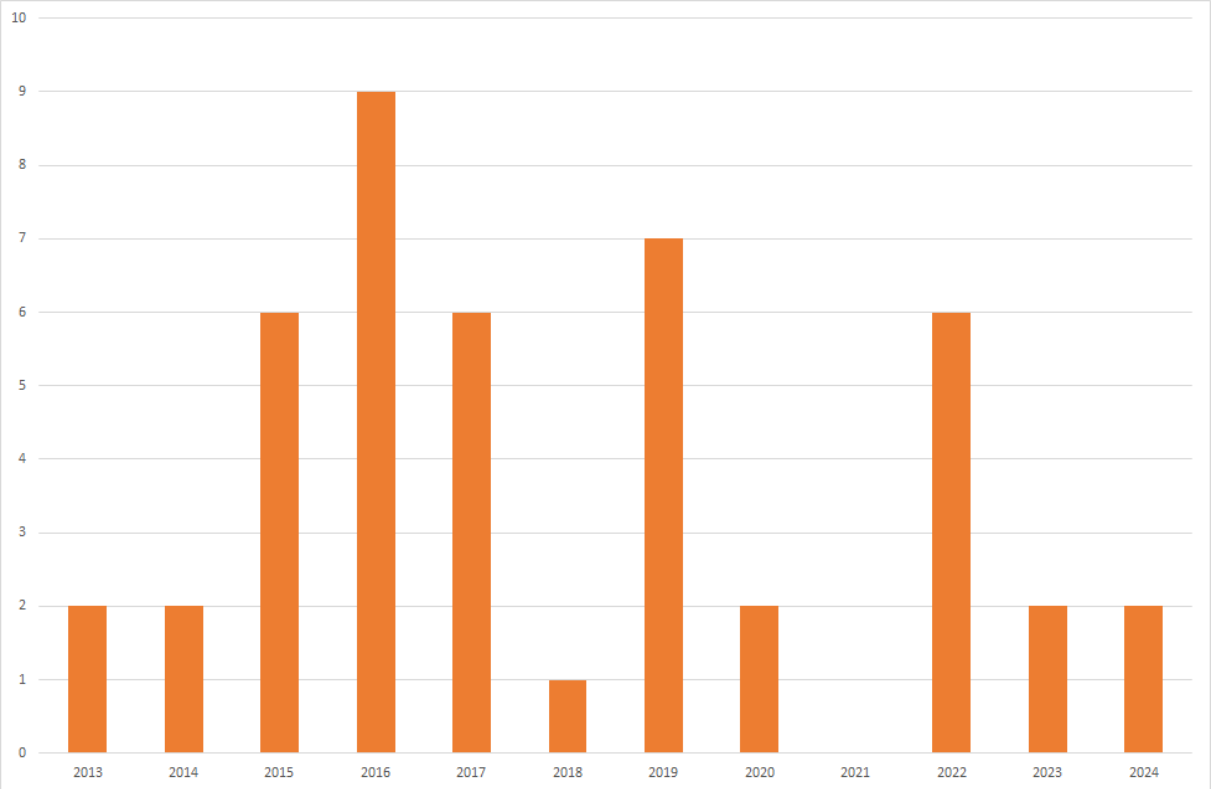


Figure 59 - nombre de feux annuels sur le territoire de la réserve (source : BDIFF)

Cette absence de tendance est encore plus marquée pour les surfaces brûlées, dominées par quelques années extrêmes (2017 et surtout 2022) concentrant l'essentiel des superficies parcourues, ce qui confirme un régime de feux largement gouverné par des événements ponctuels de forte intensité plutôt que par une augmentation progressive et régulière du risque (fig. 60).

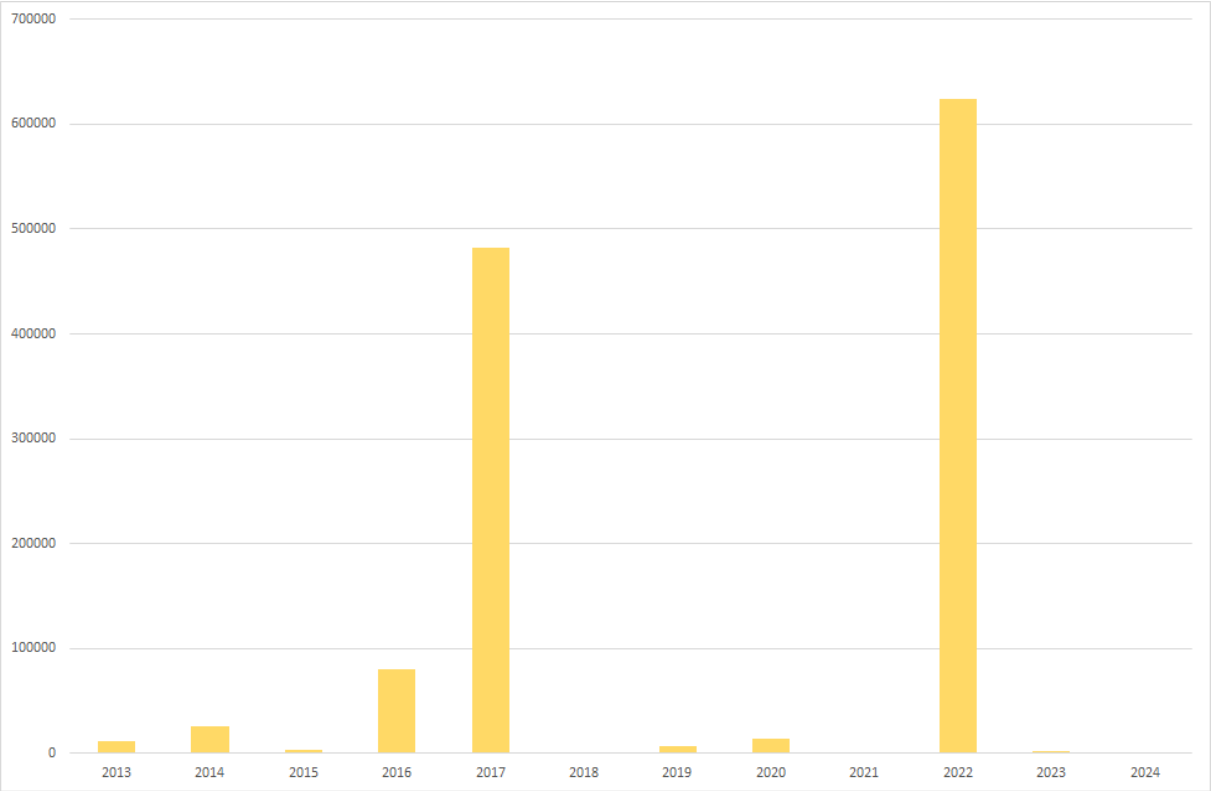


Figure 60 – Superficies brulées annuellement(m²) sur le territoire de la réserve (source : BDIFF)

La nature des surfaces affectées est très majoritairement constituée de maquis et de garrigues, qui représentent la part dominante des superficies brûlées chaque année, loin devant les surfaces forestières et les espaces non boisés (fig. 61). Ce résultat est cohérent avec la structure paysagère et la continuité des formations de végétation méditerranéenne, particulièrement inflammables en période estivale.

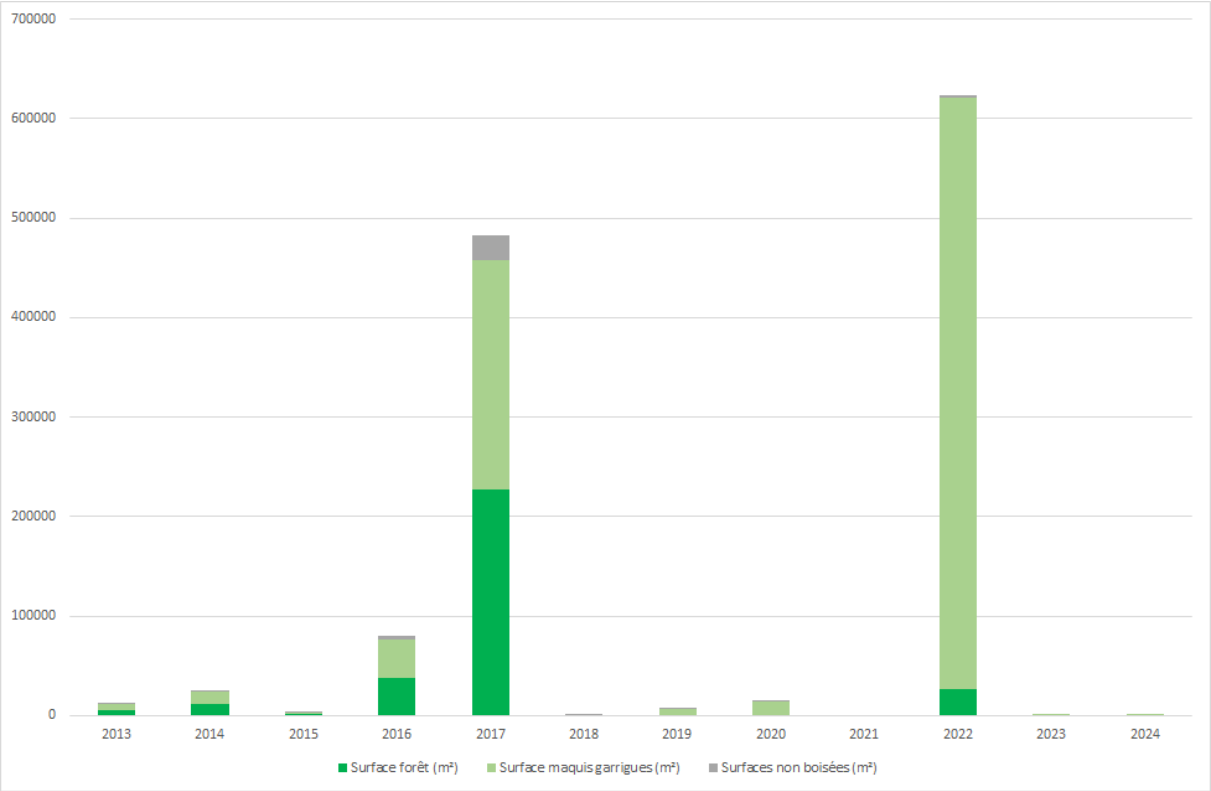


Figure 61 – Types de surfaces brulées annuellement(m²) sur le territoire de la réserve (source : BDIFF)

La répartition saisonnière des feux confirme par ailleurs une forte concentration estivale, avec près de 70 % des départs de feu observés en juillet et août, traduisant le rôle central des conditions météorologiques estivales (sécheresse, chaleur, vent) dans le déclenchement et la propagation des incendies (fig. 62). Enfin, l'absence de données pour 2010 et 2011, liée à un incident technique signalé dans la BDIFF, n'affecte pas la lecture globale des dynamiques récentes mais rappelle la nécessité d'interpréter ces résultats à l'échelle des ordres de grandeur et des tendances générales plutôt que dans une logique strictement statistique.

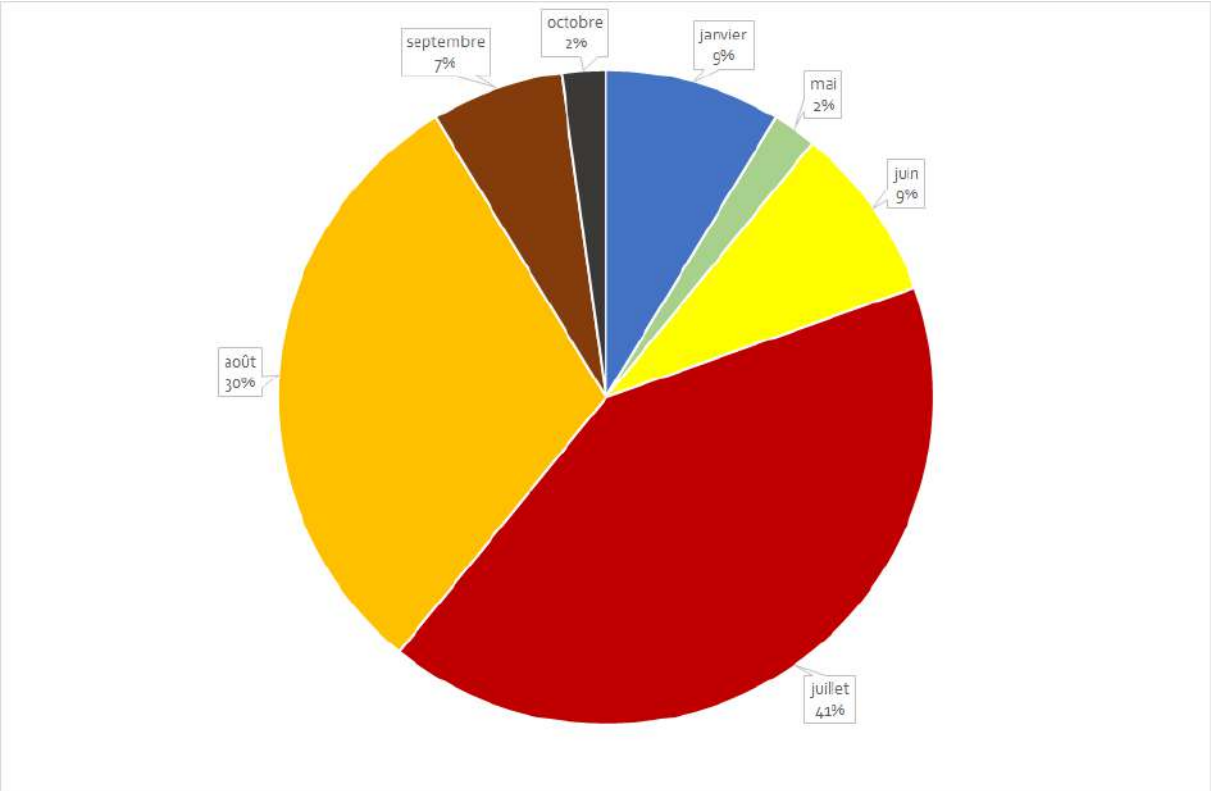


Figure 62 – répartition mensuelle des feux de forêts (2010 – 2024)

La BDIFF présente plusieurs atouts majeurs pour l'analyse du risque incendie à l'échelle locale, comme nous venons de le présenter. Elle constitue une source institutionnelle homogène, pérenne et documentée, permettant de retracer les principaux événements incendiaires sur une période relativement longue. La présence d'informations sur les surfaces parcourues et sur les types de milieux affectés offre une lecture fine des enjeux écologiques et paysagers, particulièrement pertinente dans un territoire méditerranéen dominé par les maquis et garrigues.

Cependant, son exploitation à l'échelle d'un territoire restreint comme la réserve de biosphère présente également certaines limites. Les effectifs de feux restent faibles d'une année à l'autre, ce qui limite la robustesse des analyses statistiques et rend les séries très sensibles à quelques événements majeurs. De plus, la base ne permet pas toujours de saisir la diversité des dynamiques locales (conditions météorologiques fines, pratiques de gestion, contextes d'interface habitat–forêt), ni de distinguer précisément les mécanismes de déclenchement. Enfin, les lacunes ponctuelles de la base (années manquantes ou données perdues) invitent à une lecture prudente des tendances temporelles.

Ainsi, la BDIFF doit être envisagée comme un outil de contextualisation historique du risque incendie plutôt que comme un instrument prédictif à part entière. Son intérêt réside pleinement dans sa mise en regard avec des indicateurs climatiques et prospectifs, tels que ceux issus de DRIAS–NORIF, afin d'articuler passé observé et futurs possibles, et qui font l'objet de la prochaine partie.

7.2.2 – et sous l'angle de l'indicateur NORIFM40_yr

Le niveau actuel de risque de feu de forêt, évalué à partir de l'indicateur **NORIF de référence**, met en évidence une **exposition déjà marquée de l'ensemble de la réserve** de biosphère des gorges du Gardon, avec toutefois des contrastes spatiaux nets. Les valeurs observées se situent majoritairement dans des classes intermédiaires à élevées, traduisant des conditions climatiques et environnementales déjà favorables au déclenchement et à la propagation des incendies (fig. 63).

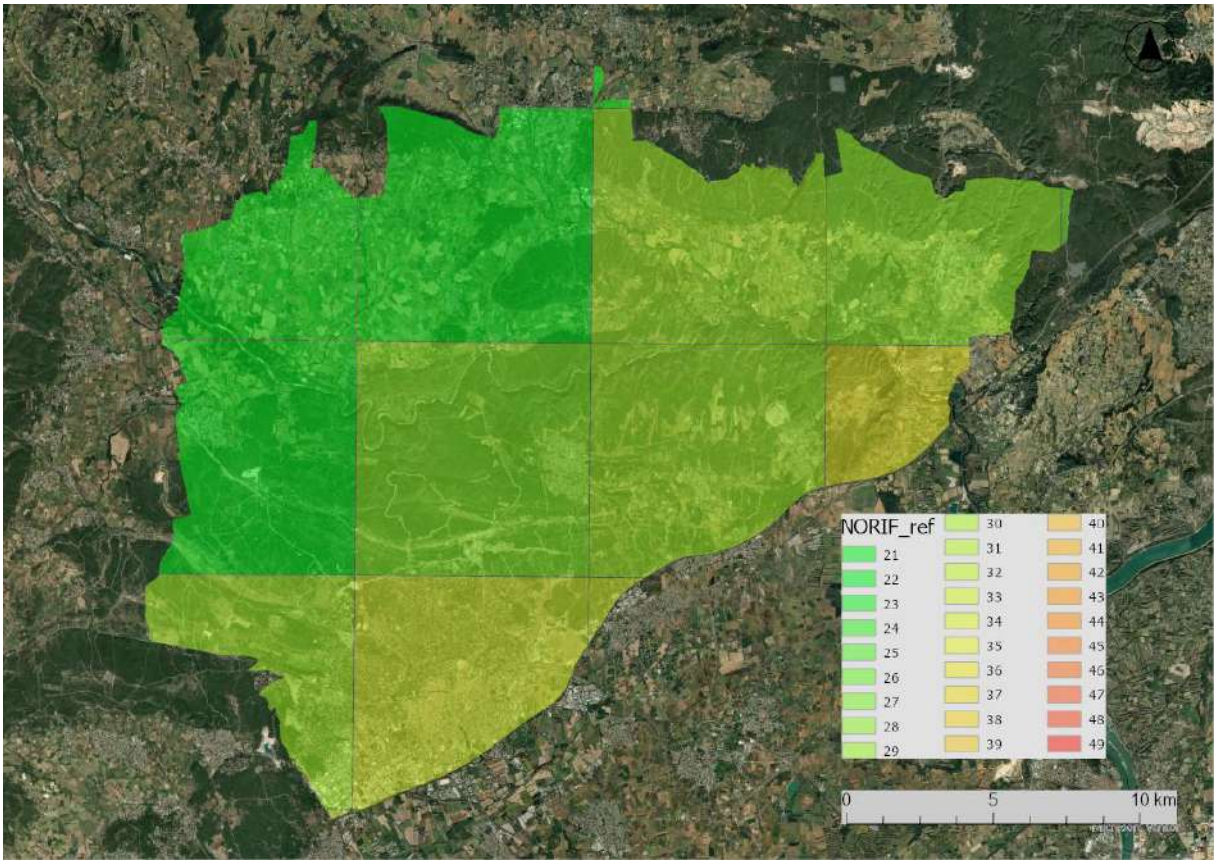


Figure 63 – Spatialisation du risque feu de forêt actuel (indice NORIF Drias)

Un **gradient spatial nord-ouest – sud-est** se dégage clairement. Les secteurs occidentaux et nord-occidentaux de la réserve présentent des niveaux de risque relativement plus faibles, cohérents avec des contextes plus forestiers, localement plus humides et moins soumis aux fortes contraintes thermiques estivales. À l'inverse, les parties orientales et sud-orientales affichent des **indices NORIF plus élevés**, traduisant une **combinaison défavorable de chaleur**, de **sécheresse** et de **pression anthropique**, en lien avec des paysages plus ouverts, des **interfaces habitat-forêt** plus nombreuses et une proximité accrue des **zones urbanisées et agricoles**.

La vallée du Gardon apparaît comme un **espace charnière**, où le risque est **globalement** intermédiaire mais spatialement **hétérogène**. Cette variabilité reflète la **juxtaposition** de milieux contrastés (versants boisés, garrigues, espaces agricoles, zones habitées), soulignant le rôle déterminant de l'occupation du sol et de la structure paysagère dans la **modulation locale du risque incendie.**

Cet état actuel constitue ainsi un **point de référence essentiel** : il montre que le territoire n'est pas dans une situation de faible risque "de fond", mais **déjà engagé dans une dynamique de vulnérabilité** aux feux de forêt. Cette situation rend d'autant plus cruciale l'analyse des évolutions projetées à l'horizon **2030 et 2050**, afin d'anticiper les zones de bascule, de hiérarchiser les secteurs prioritaires et d'orienter les stratégies de prévention, d'aménagement et de gestion des milieux.

Cet état des lieux du risque actuel constitue un **socle de référence indispensable** pour appréhender les évolutions à venir. Il permet désormais d'évaluer, à partir des projections climatiques, **l'intensification et la redistribution spatiale du risque de feu de forêt à moyenne échéance (2030) et à plus long terme (2050)**, et d'identifier les secteurs où les enjeux de prévention et d'adaptation deviendront prioritaires.

7.3 Risque à moyenne échéance (2030) et à plus long terme (2050) sur le territoire

À l'horizon **2030**, les projections issues de l'indice **NORIF** indiquent un **changement d'échelle du risque de feu de forêt** sur l'ensemble de la réserve de biosphère des gorges du Gardon (fig. 64). Alors que l'état actuel reste majoritairement marqué par des niveaux faibles à modérés, la carte 2030 met en évidence une **généralisation des classes de risque intermédiaire à élevé**, en particulier sur la moitié orientale et méridionale du territoire. Les secteurs déjà identifiés comme sensibles aujourd'hui – interfaces forêt-agriculture et franges périurbaines au sud et à l'est – basculent vers des niveaux de danger plus marqués, traduisant une augmentation conjointe de la combustibilité de la végétation et de la fréquence des conditions météorologiques propices aux départs de feu. Le gradient ouest–est devient plus net, avec un est de la réserve entrant précocement dans des configurations de risque élevé.

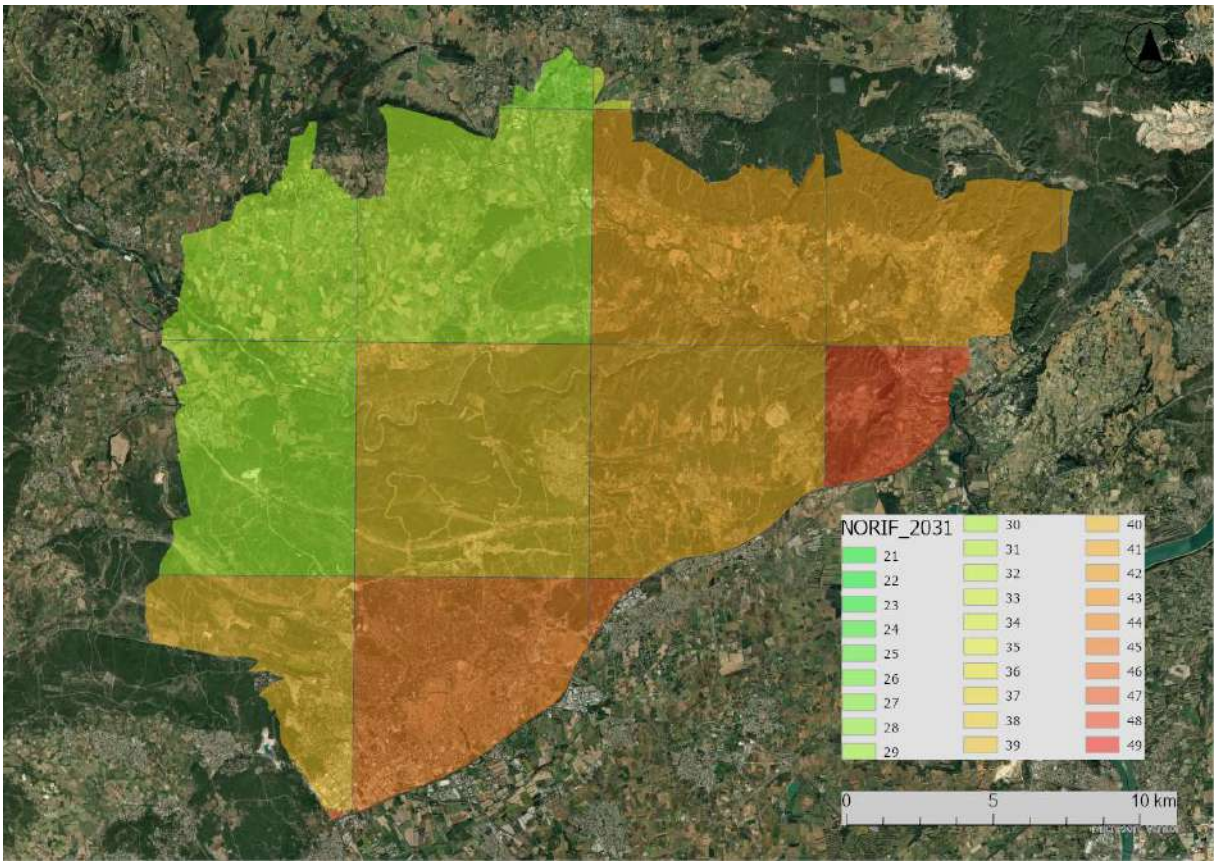


Figure 64 - Spatialisation du risque feu de forêt à l'horizon 2030 (indice NORIF Drias)

À l'horizon **2050**, cette dynamique s'amplifie nettement et s'inscrit dans une **logique de basculement structurel** du régime de risque (fig. 65). La carte 2050 montre une **extension spatiale des niveaux élevés à très élevés de NORIF**, en particulier sur la partie sud-est de la réserve, mais également une montée en risque de secteurs jusque-là relativement préservés, notamment au centre et au sud-ouest. Le risque ne se limite plus à des zones ponctuelles : il devient **diffus, continu et durable**, suggérant une perte progressive des effets amortisseurs liés à la topographie, à la couverture végétale ou aux usages agricoles traditionnels. Cette évolution traduit un territoire qui, à l'horizon 2050, pourrait fonctionner sous un **nouveau régime de feu**, caractérisé par une saisonnalité plus longue, une inflammabilité accrue et une réduction des fenêtres favorables à la lutte.

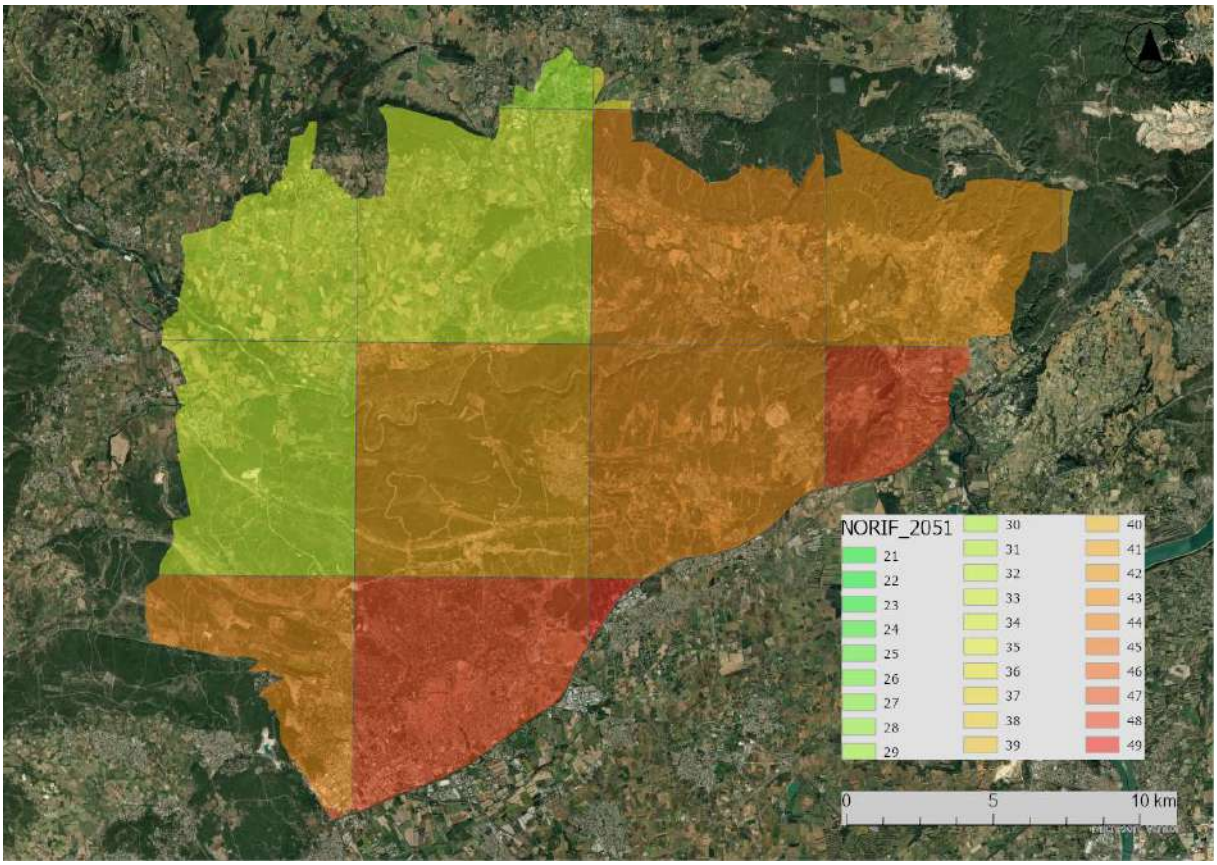


Figure 65 - Spatialisation du risque feu de forêt à l'horizon 2050 (indice NORIF Drias)

La comparaison entre 2030 et 2050 met ainsi en évidence une **accélération non linéaire du risque**, où la décennie 2030 apparaît comme une phase charnière. Les transformations projetées ne relèvent pas d'un simple renforcement des contrastes existants, mais bien d'une **recomposition spatiale du risque**, posant des enjeux majeurs en matière de prévention, d'aménagement du territoire et de gestion des interfaces. Ces résultats soulignent la nécessité d'anticiper dès à présent des stratégies d'adaptation différenciées, intégrant à la fois la protection des espaces naturels, la sécurisation des zones habitées et l'évolution des pratiques sylvo-agricoles.

7.4 – Synthèse opérationnelle : messages clés pour les gestionnaires

Les analyses issues de la base BDIFF mais surtout les projections de l'indice **NORIFM40_yr**, appliquées au territoire de la réserve de biosphère des gorges du Gardon, mettent en évidence une **augmentation nette, progressive et spatialement structurée du risque de feu de forêt**, qui appelle des réponses anticipées et différenciées (fig. 66).

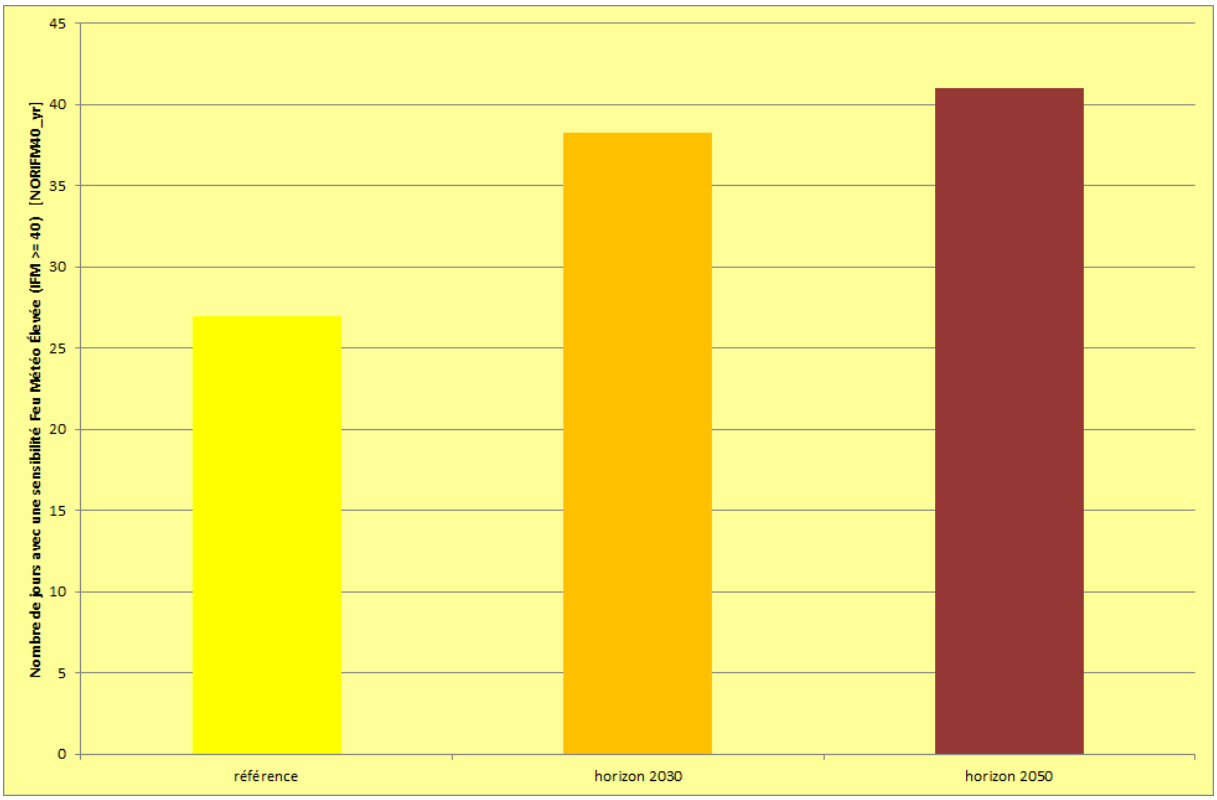


Figure 66 - Nombre de jours avec une sensibilité Feu Météo Élevée (IFM >= 40) [NORIFM40_yr]

➢ Un changement d'échelle du risque dès 2030

À l'horizon 2030, le risque de feu de forêt ne se limite plus à des secteurs isolés : il devient **structurel** sur une grande partie du territoire. Les niveaux de danger intermédiaires à élevés se généralisent, en particulier sur les franges orientales et méridionales, marquant une entrée précoce dans des configurations climatiques et biophysiques favorables aux départs et à la propagation des incendies.

➢ 2050 : vers un risque diffus et permanent

À plus long terme, l'horizon 2050 correspond à un **basculement vers un régime de feu plus contraignant**, caractérisé par :

- une extension spatiale des niveaux de risque élevés à très élevés,
- une continuité accrue des zones exposées,
- une réduction des effets protecteurs liés à la topographie, à la végétation ou aux usages agricoles traditionnels.

Le risque devient alors **moins localisable, plus durable et plus difficile à contenir**.

➢ Des secteurs prioritaires clairement identifiés

Les cartes mettent en évidence plusieurs zones à enjeux majeurs :

- les **interfaces forêt–agriculture et forêt–urbanisation**, particulièrement au sud et à l'est de la réserve,
- les secteurs de végétation continue, où l'augmentation de la sécheresse estivale accroît la combustibilité,
- les zones déjà marquées par des températures de surface élevées, en cohérence avec les résultats du chapitre 6.

Ces secteurs doivent être considérés comme **prioritaires en matière de prévention et de gestion**.

➢ Anticiper plutôt que subir : un enjeu de temporalité

La décennie 2020–2030 apparaît comme une **fenêtre d'action déterminante**. Les évolutions projetées suggèrent que les stratégies uniquement réactives deviendront insuffisantes. Une montée en puissance des actions de prévention est nécessaire avant que le risque ne s'installe durablement à des niveaux élevés.

➢ Des leviers d'action à articuler à l'échelle territoriale

Les résultats plaident pour une approche intégrée combinant :

- la **gestion de la végétation** (discontinuités, mosaïques, entretien ciblé),
- l'**adaptation de l'aménagement** et de l'urbanisation en zone exposée,
- le renforcement de la **culture du risque** auprès des acteurs locaux,
- l'articulation entre politiques climatiques, forestières et de prévention des incendies.

En ce sens, la réserve de biosphère apparaît comme un **territoire pilote pertinent** pour expérimenter des stratégies d'adaptation au feu de forêt, fondées sur l'anticipation climatique et la gestion différenciée des milieux.

7.5 - Conclusion du chapitre 7 – Évolution du risque de feu de forêt sur le territoire

L'analyse du risque de feu de forêt à partir de l'indice **NORIF**, fondée sur les données climatiques DRIAS, met en évidence une **augmentation nette et progressive de la dangerosité incendie** sur l'ensemble du territoire de la réserve de biosphère des gorges du Gardon. Cette évolution s'inscrit dans une trajectoire cohérente avec les transformations climatiques observées et projetées, notamment l'augmentation des températures et l'accentuation des périodes sèches.

L'état actuel révèle un territoire déjà structurellement exposé, avec des contrastes spatiaux marqués mais un socle de risque bien installé. À l'horizon 2030, le risque franchit un premier seuil critique, avec une généralisation des niveaux de danger intermédiaires à élevés, tandis que l'horizon 2050 correspond à un changement de régime, caractérisé par l'extension et la continuité des zones à risque élevé à très élevé.

Ces évolutions confirment que le risque de feu de forêt ne constitue plus un aléa ponctuel ou saisonnier, mais bien un facteur structurant du fonctionnement futur du territoire, affectant les milieux naturels, les activités agricoles, les espaces urbanisés et les interfaces entre ces différents systèmes.

En mettant en évidence la dynamique spatiale et temporelle du risque, ce chapitre souligne l'importance d'une anticipation à moyen et long terme, fondée sur la prévention, l'aménagement et la gestion des milieux, plutôt que sur des réponses uniquement curatives. Il fournit ainsi un cadre d'analyse robuste pour intégrer le risque incendie dans les stratégies territoriales d'adaptation au changement climatique, à l'échelle de la réserve comme à celle des politiques publiques locales.

Si l'analyse du risque de feu de forêt met en évidence le rôle central des conditions climatiques et de l'état de la végétation dans la dynamique des incendies, elle souligne également l'importance déterminante de la ressource en eau comme facteur structurant de la vulnérabilité des milieux. La disponibilité hydrique conditionne en effet à la fois la vigueur de la végétation, son inflammabilité et la capacité des écosystèmes à résister aux épisodes de sécheresse prolongée. Dans cette perspective, l'étude des dynamiques historiques des niveaux de nappes souterraines constitue un complément indispensable à l'analyse des risques climatiques et naturels. Le chapitre suivant est ainsi consacré à l'évolution des hauteurs de nappe sur le territoire de la réserve, afin d'éclairer les interactions entre climat, eau et risques, et de renforcer la lecture intégrée des enjeux d'adaptation.

8. Analyse de l'évolution historique du niveau des nappes et des débits : enjeux environnementaux et territoriaux

Au-delà des dynamiques atmosphériques et de surface analysées dans les chapitres précédents, la compréhension du fonctionnement hydrologique du territoire constitue un enjeu central pour appréhender les trajectoires climatiques et environnementales de la réserve de biosphère des gorges du Gardon. Les nappes souterraines jouent en effet un rôle structurant, à la fois comme **réservoirs de régulation hydrologique**, comme **soutien d'étiage des cours d'eau**, et comme **ressource stratégique pour les écosystèmes et les usages humains**.

Dans un contexte méditerranéen marqué par une forte variabilité interannuelle, des sécheresses estivales récurrentes et une intensification des épisodes extrêmes, le suivi des niveaux piézométriques permet d'évaluer la **résilience hydrique du territoire**. Les nappes karstiques, particulièrement présentes dans le bassin du Gardon, réagissent rapidement aux apports pluviométriques mais sont également sensibles aux déficits prolongés, ce qui en fait des indicateurs pertinents des tensions hydrologiques à moyen et long terme.

Ces dynamiques hydrogéologiques ont des répercussions directes sur le fonctionnement écologique des cours d'eau, mais aussi sur des usages emblématiques du territoire. Le **niveau du Gardon conditionne en effet la pratique du canoë-kayak**, l'accessibilité et la qualité des **sites de baignade**, ainsi que l'attractivité touristique globale de la réserve, notamment en période estivale. Les étiages sévères ou prolongés peuvent ainsi fragiliser simultanément les milieux aquatiques, les activités récréatives et l'économie locale.

Dans cette perspective, l'analyse historique des niveaux de nappes, appuyée sur les chroniques piézométriques issues de la base **Météeau nappes (BRGM – annexe 1)** et du piézomètre de référence du **Pont Saint-Nicolas**, vise à caractériser les régimes hydrologiques passés, leur variabilité saisonnière et interannuelle, ainsi que les situations de tension ou de recharge exceptionnelle. Cette approche permet d'apporter un éclairage complémentaire aux analyses climatiques et de risques menés précédemment, en inscrivant la question de l'eau souterraine au cœur des enjeux d'adaptation du territoire.

Cette première **analyse hydrologique souterraine** sera complétée avec une étude de 4 cours d'eau de la réserve de biosphère (les **Seynes** à Uzès, le ruisseau de la **Braune** à La Calmette, le **Gardon** à Dions et le **Bourdic** à Sainte-Anastasie) à l'aide de la base **ONDE** (Observatoire National des Etiages - **annexe 1**), coordonné par l'Office français de la biodiversité (OFB). Ce dispositif a pour vocation d'analyser **l'état d'écoulement des cours d'eau** par des **observations de terrain**, principalement en été.

Enfin, afin de compléter l'analyse proposée à l'aide des bases Météeau nappes et Ondes, une **analyse historique** et **prospective** des débits du Gard à Sanilhac-Sagries (station de La

Baume) sera réalisée à partir des projections hydrologiques issues de la plateforme DRIAS-Eau (annexe 1).

8.1 Données et méthodologie – Analyse des niveaux de nappes souterraines à l'aide de Météeau nappes.

L'analyse de l'évolution historique des niveaux de nappes souterraines s'appuie sur les données issues de la plateforme Météeau nappes[7], développée par le BRGM, qui constitue aujourd'hui la référence nationale pour l'accès, la visualisation et l'exploitation des chroniques piézométriques. Cette plateforme agrège les données du Système d'Information sur les Eaux Souterraines (ADES) et met à disposition des séries temporelles validées, accompagnées d'outils de représentation et d'indicateurs synthétiques.

À l'échelle de la réserve de biosphère des gorges du Gardon, le piézomètre BSS002DMVK (09395X0065/NICOLA), situé au Pont Saint-Nicolas, a été retenu comme point de référence. Bien qu'unique sur le périmètre étudié, ce piézomètre présente une forte pertinence hydrogéologique et territoriale. Implanté dans le bassin du Gardon, il est représentatif du fonctionnement des aquifères karstiques locaux et de leur interaction avec le réseau hydrographique de surface. Sa localisation en aval du bassin versant en fait par ailleurs un bon indicateur des dynamiques hydrologiques intégrées à l'échelle du territoire.

Les chroniques exploitées couvrent une période longue, de 1997 à 2025, ce qui permet d'analyser à la fois la variabilité saisonnière des niveaux d'eau et leur évolution interannuelle sur près de trois décennies. Les données utilisées sont exclusivement des données validées ou en cours de validation, conformément aux standards de qualité du portail ADES.

Plusieurs types d'indicateurs ont été mobilisés afin de proposer une lecture multi-échelles du fonctionnement de la nappe :

- les côtes piézométriques journalières, qui permettent d'appréhender la réactivité de l'aquifère aux événements météorologiques et aux phases de recharge rapide ;
- les côtes piézométriques mensuelles, utilisées pour lisser la variabilité à court terme et mettre en évidence les tendances saisonnières ;
- les profondeurs de nappe, exprimées par rapport au repère de mesure, qui traduisent le même signal hydrologique sous un angle plus directement interprétable en termes de disponibilité de la ressource ;
- l'indice de position statistique (IPS) et les graphiques de niveau d'eau médian relatif, qui situent chaque année ou chaque mois par rapport à une distribution de référence (niveaux très hauts à très bas), facilitant ainsi l'identification des situations atypiques ou extrêmes.

[7] https://app.meteeaunappes.brgm.fr/desktop

Des analyses statistiques de tendance (tests de Mann-Kendall et estimation de la pente de Sen) ont également été réalisées sur les séries annuelles. Ces tests n'ont pas mis en évidence de tendance monotone significative à la hausse ou à la baisse des niveaux de nappes sur la période étudiée. En revanche, ils confirment une **forte variabilité interannuelle**, marquée par l'alternance d'années à niveaux exceptionnellement bas et d'années à recharge élevée.

Enfin, afin d'illustrer concrètement cette variabilité, des années contrastées ont été analysées plus finement, notamment **2023**, caractérisée par des niveaux bas à très bas, et **2024**, marquée par des niveaux globalement élevés. Cette approche comparative permet de replacer les dynamiques observées dans une perspective opérationnelle, en lien avec les usages, les écosystèmes et les enjeux de gestion de l'eau sur le territoire.

8.2 Fonctionnement saisonnier et variabilité interannuelle des niveaux de nappes

L'analyse des chroniques piézométriques du piézomètre du Pont Saint-Nicolas met en évidence un **fonctionnement saisonnier très marqué**, caractéristique des aquifères karstiques méditerranéens, ainsi qu'une **variabilité interannuelle élevée**, sans tendance monotone significative sur le long terme.

8.2.1 - Un cycle saisonnier net, piloté par la recharge hivernale et l'étiage estival

À l'échelle annuelle, les niveaux de nappe présentent une dynamique récurrente et bien structurée. Les phases de **recharge** s'observent principalement entre l'automne et le printemps, avec une remontée progressive des niveaux piézométriques, parfois ponctuée de pics rapides en réponse à des épisodes pluvieux intenses. Ces remontées peuvent être brutales à l'échelle journalière, traduisant la forte réactivité du système karstique et son lien étroit avec les précipitations et les écoulements de surface (fig. 67 et 68).

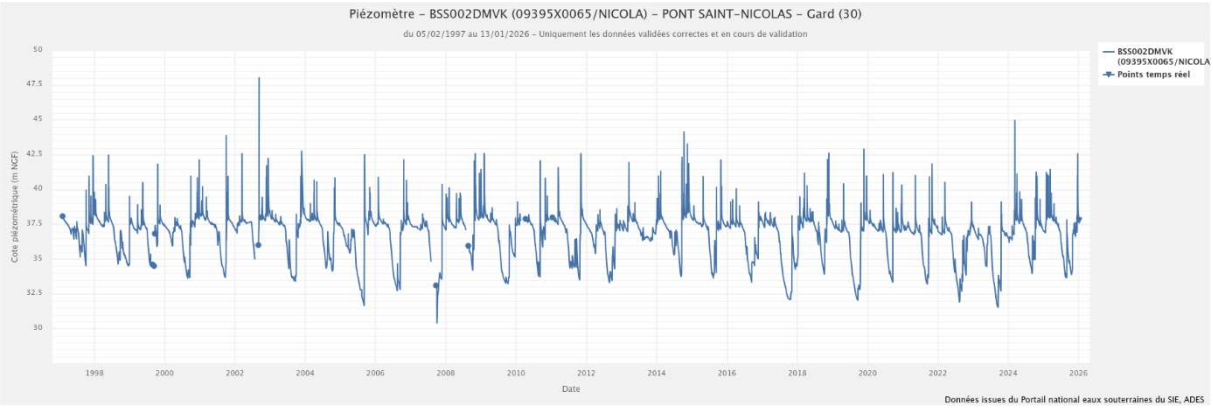


Figure 67 - Profondeur piézométrique journalière au Pont Saint-Nicolas de 1997 à 2025 (source : Météoeau BRGM)

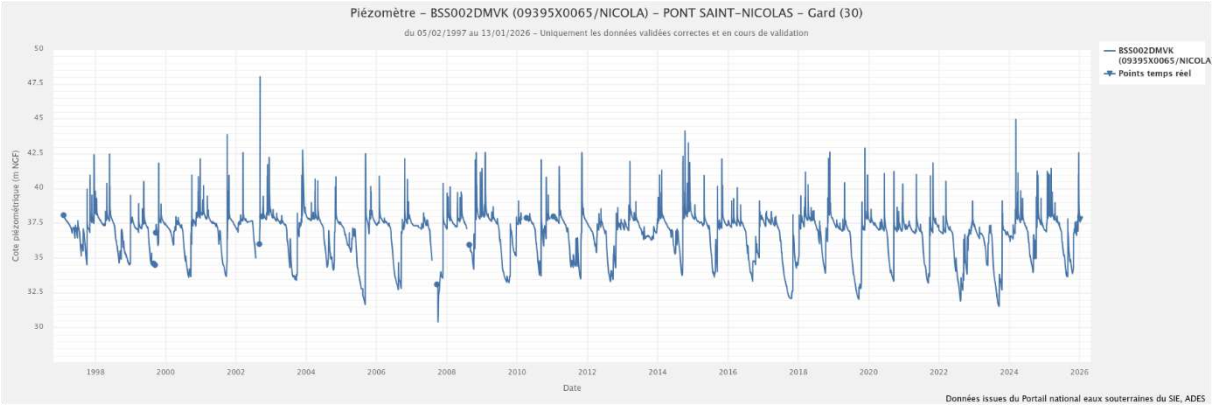


Figure 68 - Côte piézométrique journalière au Pont Saint-Nicolas de 1997 à 2025 (source Météoeau BRGM)

À l'inverse, la période estivale est systématiquement marquée par une phase de vidange de l'aquifère. Les niveaux de nappe diminuent de manière quasi continue entre la fin du printemps et la fin de l'été, atteignant généralement leurs valeurs minimales entre août et septembre (fig. 69 et 70). Cette baisse résulte de la combinaison de plusieurs facteurs : déficit pluviométrique estival, forte évapotranspiration, diminution de la recharge efficace et maintien des usages anthropiques. Les graphiques de profondeurs de nappe confirment cette dynamique, avec un approfondissement progressif du niveau piézométrique en été, suivi d'une remontée plus ou moins rapide à l'automne selon les conditions météorologiques de l'année considérée.

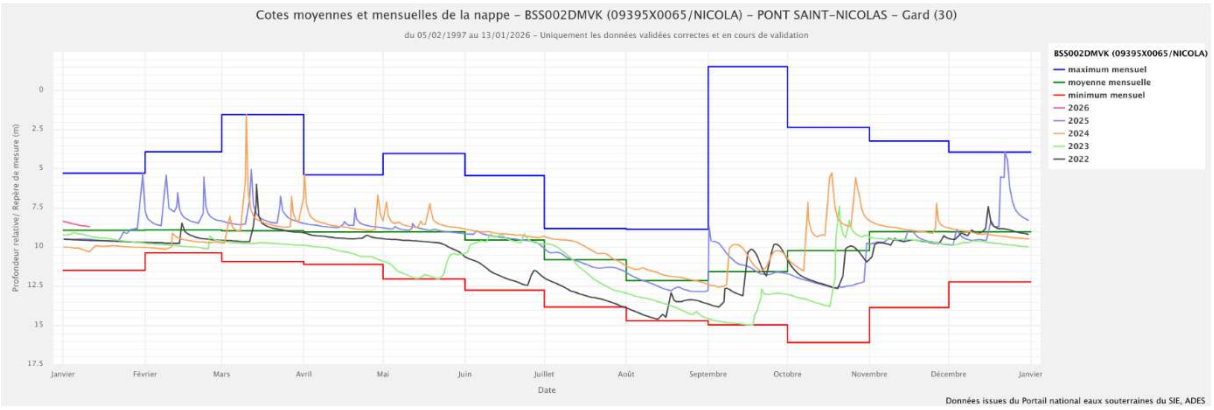


Figure 69 - Profondeur piézométrique mensuelles au Pont Saint-Nicolas de 1997 à 2025 (source Météoeau BRGM)

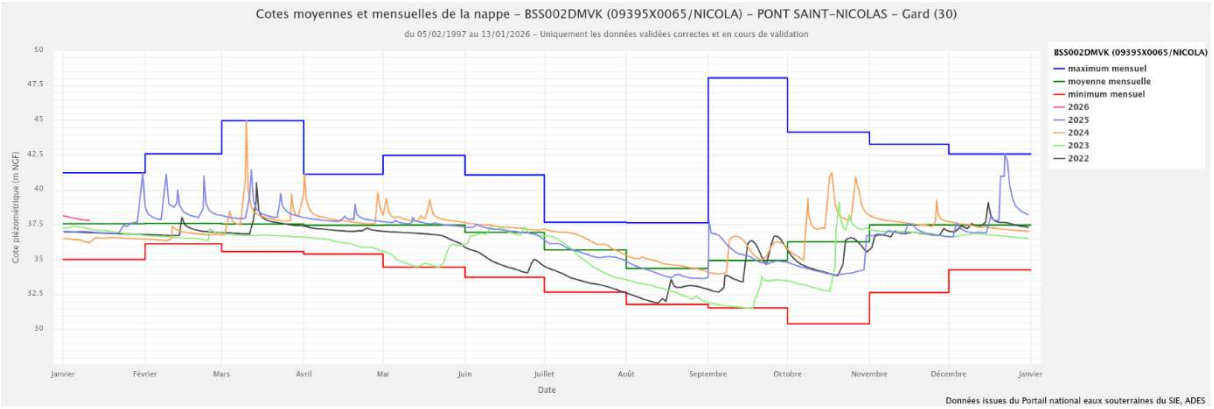


Figure 70 - Côte piézométrique mensuelles au Pont Saint-Nicolas de 1997 à 2025 (source Météoeau BRGM)

8.2.2 Une forte variabilité interannuelle, dominée par des années contrastées

Si le cycle saisonnier est stable dans sa structure, son **amplitude varie fortement d'une année à l'autre**. Les chroniques montrent une alternance marquée entre des années à niveaux élevés, proches ou supérieurs à la médiane de référence, et des années à niveaux bas, voire très bas, traduisant une sensibilité importante du système aux conditions climatiques annuelles (fig. 71).

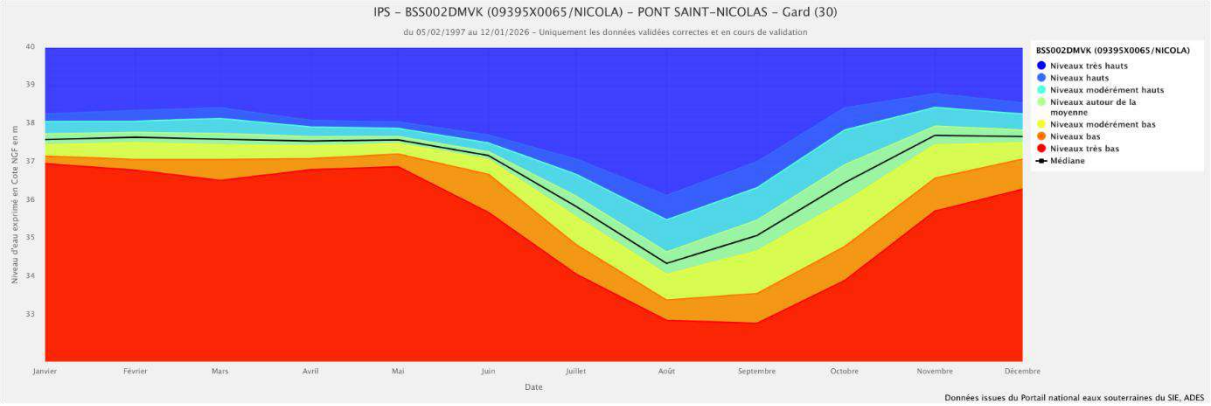


Figure 71 – Niveau d'eau médian au Pont Saint-Nicolas de 1997 à 2025 et positionnement par rapport à l'indice de position statistique (IPS) (source Météoeau BRGM)

Certaines années se distinguent par une recharge hivernale efficace et durable, permettant d'atteindre des niveaux qualifiés de *hauts* à *très hauts* sur les graphiques de niveaux d'eau médians relatifs. À l'inverse, d'autres années sont caractérisées par une recharge déficitaire, une descente rapide vers l'étiage et des niveaux estivaux durablement bas, voire exceptionnellement bas.

L'exemple des années **2023** et **2024** illustre particulièrement bien cette variabilité. L'année 2023 se singularise par des niveaux majoritairement situés dans les classes *bas* à *très bas*, avec un étiage estival marqué et prolongé (fig. 72 et 73). À l'opposé, l'année 2024 présente des niveaux globalement plus élevés, avec une recharge efficace permettant de maintenir la nappe autour ou au-dessus de la médiane sur une large partie de l'année.

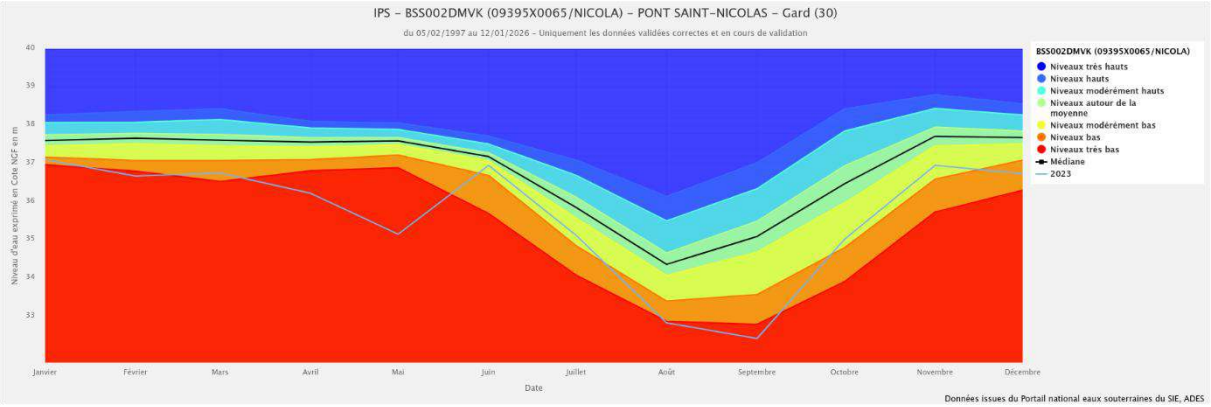


Figure 72 - Niveau d'eau de l'année 2023 au Pont Saint-Nicolas de 1997 à 2025 et positionnement par rapport à l'indice de position statistique (IPS) (source Météoeau BRGM)

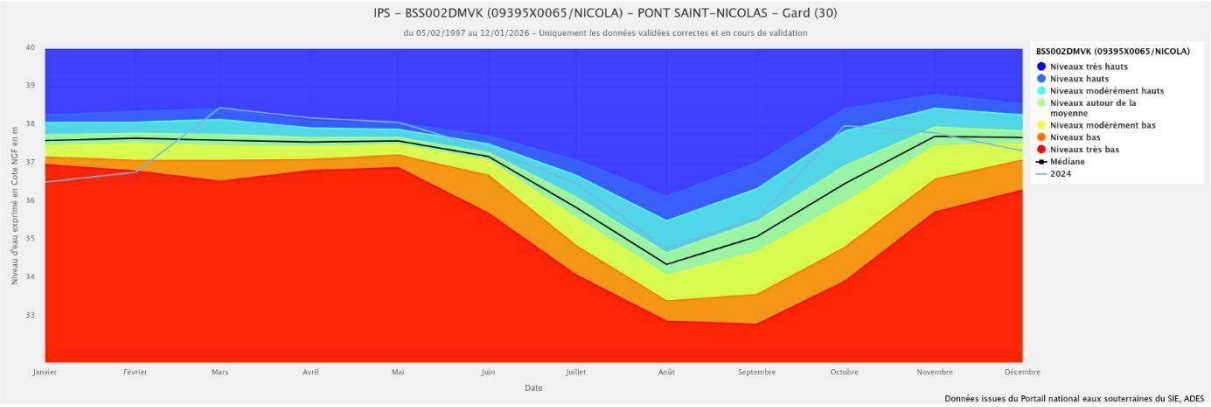


Figure 73 - Niveau d'eau de l'année 2024 au Pont Saint-Nicolas de 1997 à 2025 et positionnement par rapport à l'indice de position statistique (IPS) (source Météoeau BRGM)

8.2.3 Absence de tendance de fond mais accentuation des situations extrêmes

Les tests statistiques de tendance appliqués aux séries annuelles ne mettent pas en évidence de tendance significative à la baisse ou à la hausse des niveaux de nappes sur la période étudiée. Cette absence de tendance linéaire ne doit toutefois pas masquer une évolution qualitative importante : la succession rapide d'années hydrologiquement contrastées, avec des alternances marquées entre déficits et excédents.

Cette variabilité accrue constitue un enjeu majeur pour la gestion de la ressource en eau. Elle complique l'anticipation des situations de tension estivale, renforce la vulnérabilité des milieux aquatiques et accentue les conflits potentiels entre usages (écologiques, touristiques, agricoles). Elle souligne également le rôle central des conditions de recharge hivernale dans la résistance (l'inverse de la vulnérabilité) et la résilience hydrologique du territoire.

8.3- Années contrastées et situations hydrologiques extrêmes : enseignements des années 2023 et 2024

L'analyse détaillée des années 2023 et 2024 met en lumière deux configurations hydrologiques opposées, particulièrement éclairantes pour comprendre la vulnérabilité du territoire face à la variabilité climatique actuelle. Ces deux années illustrent non seulement la sensibilité du système aquifère aux conditions météorologiques, mais aussi les impacts directs sur les milieux naturels et les usages socio-économiques associés au Gardon et à ses nappes d'accompagnement.

8.3.1 - 2023 : une année de basses eaux structurelles et de tensions hydrologiques

L'année 2023 se caractérise par des niveaux de nappe durablement faibles, avec une large partie de l'année située dans les classes *niveaux bas à très bas* par rapport à la médiane de référence. La recharge hivernale apparaît insuffisante pour reconstituer pleinement les réserves, conduisant à un étiage estival précoce, profond et prolongé.

Sur le plan environnemental, ces conditions renforcent la pression sur les écosystèmes aquatiques. La baisse du soutien d'étiage affecte les débits du Gardon, fragilise les habitats piscicoles, accentue le réchauffement de l'eau et dégrade les conditions physico-chimiques favorables à la biodiversité. Les zones humides et les milieux rivulaires, fortement dépendants des niveaux de nappe, voient leur fonctionnement altéré, avec des effets potentiellement durables en cas de répétition de telles années.

Du point de vue socio-économique, une année comme 2023 constitue un signal d'alerte fort. Les usages récréatifs liés à l'eau — en particulier la pratique du canoë, la baignade et plus largement l'attractivité touristique estivale du Gardon — sont directement impactés par la faiblesse des niveaux d'eau et la discontinuité des écoulements. À cela s'ajoutent des contraintes accrues sur les usages agricoles et sur l'alimentation en eau, renforçant la nécessité de mesures de restriction et de gestion de crise.

8.3.2 - 2024 : une année de recharge efficace et de fonctionnement hydrologique favorable

À l'inverse, l'année 2024 illustre une situation hydrologique globalement plus favorable. Les niveaux piézométriques se situent majoritairement autour ou au-dessus de la médiane, traduisant une recharge hivernale plus efficace et une meilleure capacité de l'aquifère à soutenir les débits en période estivale.

Sur le plan environnemental, ces conditions permettent un fonctionnement plus résilient des milieux aquatiques, avec un soutien d'étiage plus efficace, une meilleure continuité écologique et une atténuation des stress thermiques sur la faune et la flore aquatiques. Les échanges nappes–cours d'eau sont favorisés, contribuant à maintenir des conditions hydrologiques compatibles avec le bon état écologique des milieux.

Du point de vue des usages, une année comme 2024 offre un contexte plus sécurisant pour les activités touristiques et de loisirs liées à l'eau. La fréquentation estivale peut se maintenir dans de meilleures conditions, tout en réduisant la pression sur la ressource et le recours à des mesures de restriction strictes.

8.3.3 - Un territoire confronté à l'alternance rapide des extrêmes

La comparaison entre 2023 et 2024 souligne un enseignement central : l'enjeu principal n'est pas tant une évolution progressive et linéaire des niveaux de nappes, que la succession rapide d'années hydrologiquement très contrastées. Cette alternance accroît la difficulté de gestion de la ressource en eau, tant pour les gestionnaires que pour les acteurs économiques et les usagers.

Dans un contexte de changement climatique, cette variabilité interannuelle renforcée constitue un facteur de vulnérabilité majeur pour le territoire de la réserve de biosphère. Elle appelle à des stratégies d'adaptation fondées non seulement sur la gestion des situations de pénurie, mais aussi sur la capacité à tirer parti des années favorables pour reconstituer des

marges de sécurité hydrologiques, préserver les milieux naturels et sécuriser les usages à moyen terme.

8.4 Analyse des étiages de quatre cours d'eau de la Réserve de biosphère

8.4.1 Présentation de la base ONDE et cadre méthodologique

L'analyse des étiages s'appuie sur les données issues de la base ONDE[8] (Observatoire National Des Étiages), dispositif coordonné par l'Office français de la biodiversité (OFB). Le réseau ONDE vise à caractériser l'état d'écoulement des cours d'eau en période estivale, par des observations de terrain standardisées réalisées principalement entre les mois de mai et septembre. Les observations sont effectuées à une fréquence mensuelle sur des stations fixes, et reposent sur une typologie nationale simple distinguant quatre états hydrologiques :

– Écoulement visible : présence d'un écoulement continu observable ;

– Écoulement non visible : absence d'écoulement apparent en surface, mais présence d'eau dans le lit (flaques, écoulement hyporhéique supposé) ;

– Assec : absence d'eau dans le lit du cours d'eau ;

Cette approche qualitative présente plusieurs atouts comme une homogénéité nationale du protocole, une bonne comparabilité interannuelle et une sensibilité aux situations d'intermittence et d'assec estival.

Elle comporte toutefois des limites avec absence de mesure quantitative du débit (on reste sur de l'observation qualitative), une focalisation sur la période estivale même si des campagnes complémentaires peuvent être menées et une dépendance à l'observation visuelle qui peut varier en fonction des individus.

Dans le cadre du présent diagnostic, quatre stations ONDE situées sur le territoire de la Réserve de biosphère, jugées représentatives, ont été analysées (numéro de station dans la base ONDE entre parenthèses) :

– Les Seynes à Uzès (V7185016)

– Le ruisseau de Braune à La Calmette (V7170004)

– Le Gardon à Dions (V7170005)

– Le Bourdic à Sainte-Anastasie (V7170006)

La période étudiée s'étend de 2011 à 2025, correspondant à la disponibilité des données pour ces stations.

[8] https://onde.eaufrance.fr/

8.4.2 – Fréquence, intensité et structuration temporelle des étiages (2011–2025)

Les tableaux synthétiques présentés ci-après (tableaux 7 à 10) restituent, pour chaque station, **l'état d'écoulement observé** entre mai et septembre depuis 2011, selon la typologie ONDE. Cette représentation met en évidence une **différenciation nette des dynamiques d'étiage** entre les quatre cours d'eau étudiés.

➢ *Le Bourdic à Sainte-Anastasie : une intermittence structurelle devenue quasi systématique*

Le **Bourdic** apparaît comme le **cours d'eau le plus vulnérable du panel** (tableau 10). Dès 2011, des situations **d'assec** sont observées en **fin d'été**. **À partir de 2016–2017**, la fréquence et la durée des **assecs augmentent sensiblement**. Les années **2019, 2020, 2022 et 2023** se distinguent par des séquences continues **d'assec couvrant la majeure partie de l'été** (juillet à septembre), traduisant une absence prolongée d'écoulement superficiel. En 2022 et 2023 notamment, l'assec débute dès juin ou juillet et persiste jusqu'à septembre. Depuis la fin des années 2010, le Bourdic présente ainsi un **fonctionnement estival majoritairement intermittent**, avec disparition récurrente de l'écoulement en période chaude. Cette dynamique suggère un **système à faible inertie hydrologique**, particulièrement **sensible** à la **combinaison chaleur–sécheresse**.

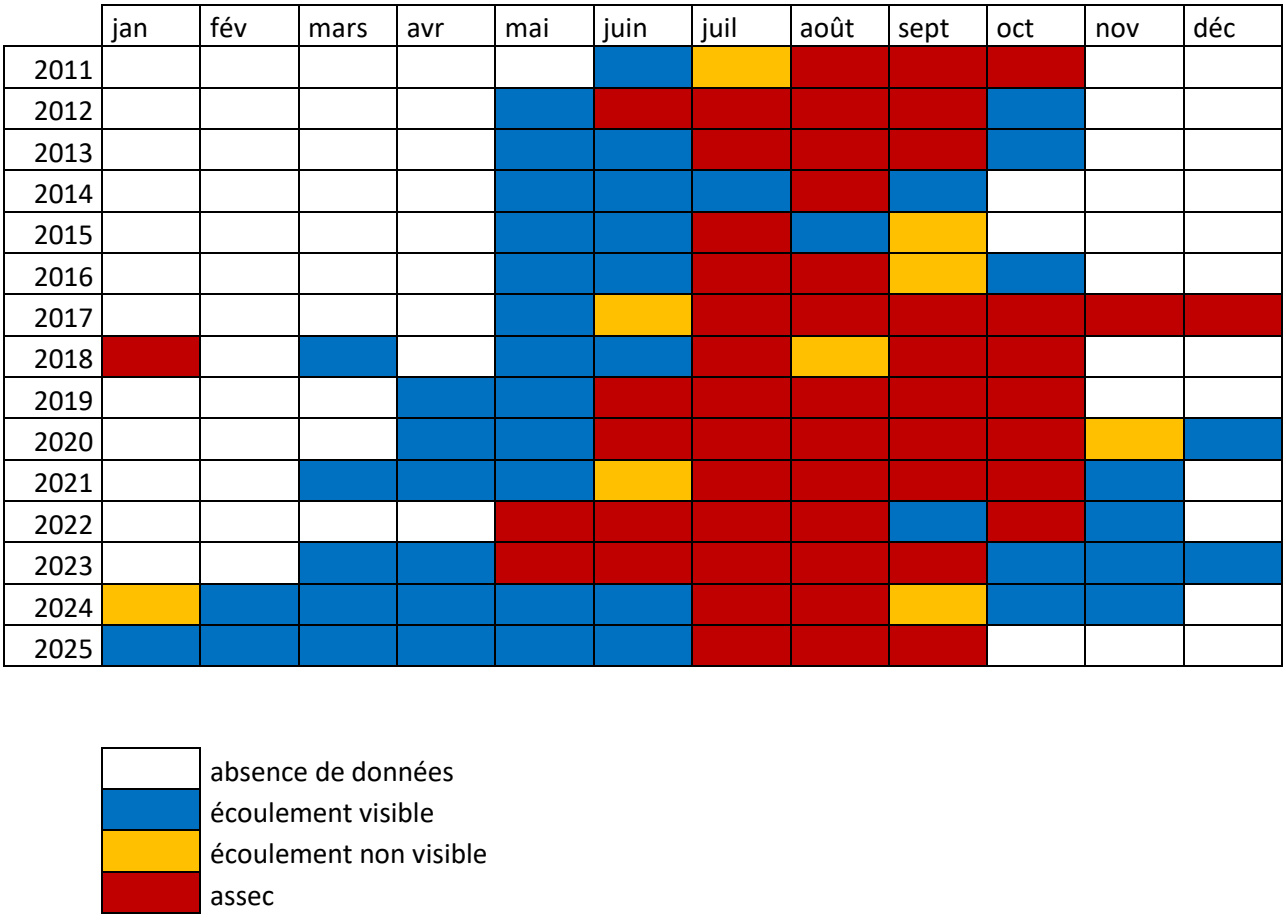


Tableau 10 – Type d'écoulement au Bourdic à Sainte-Anastasie de 2011 à 2025 (base de données ONDE)

➢ *Le Gardon à Dions : vers une intermittence estivale récurrente*

Le Gardon à Dions, cours d'eau principal du territoire, présente une dynamique différente mais néanmoins préoccupante (tableau 11). Entre 2011 et 2015, l'écoulement est majoritairement visible en période estivale, avec quelques épisodes ponctuels d'assec ou d'écoulement non visible.

À partir de 2017, une rupture apparaît : des assecs estivaux deviennent plus fréquents et plus étendus dans le temps. Les années 2019, 2022, 2023 et 2024 sont marquées par des situations d'assec couvrant plusieurs mois consécutifs.

Cette évolution traduit un affaiblissement du soutien d'étiage, probablement en lien avec la tension croissante sur les nappes et l'augmentation de l'évapotranspiration estivale (cf. parties précédentes ci-dessus). Le Gardon conserve une certaine inertie hydrologique, mais celle-ci semble désormais insuffisante pour maintenir un écoulement permanent lors des étés les plus chauds.

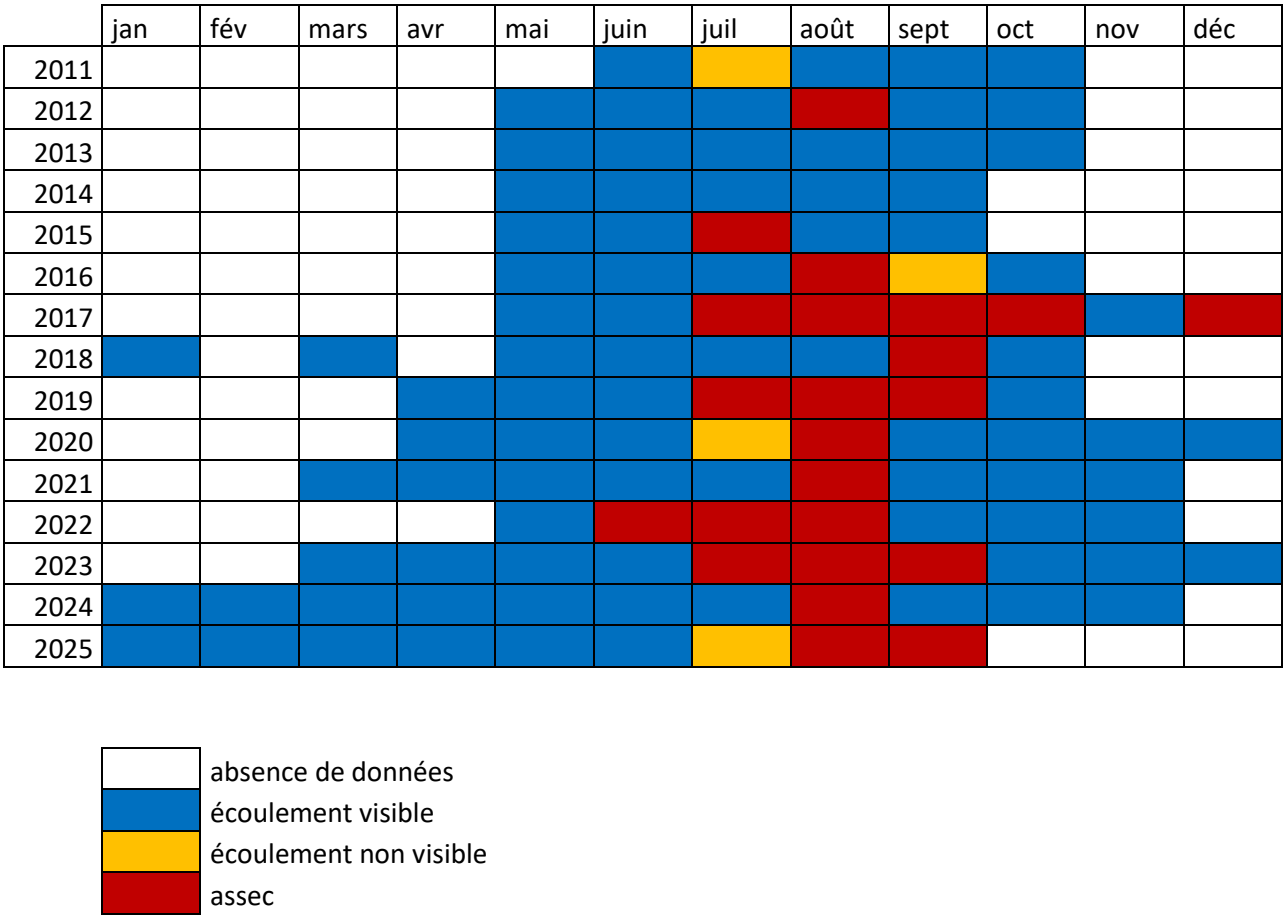


Tableau 11 - Type d'écoulement au Gardon à Dions de 2011 à 2025 (base de données ONDE)

➢ *Les Seynes à Uzès : une relative résilience avec épisodes ponctuels*

Les Seynes présentent, sur l'ensemble de la période, un écoulement majoritairement visible durant l'été (tableau 12). Les situations d'assec restent rares et ponctuelles (notamment

en 2019), et les épisodes d'écoulement non visible apparaissent principalement lors des années les plus sèches. La station ne montre pas, à ce stade, de basculement structurel vers l'intermittence. Elle peut ainsi être considérée comme relativement résistance au manque d'eau, bien que sensible lors des années exceptionnellement chaudes.

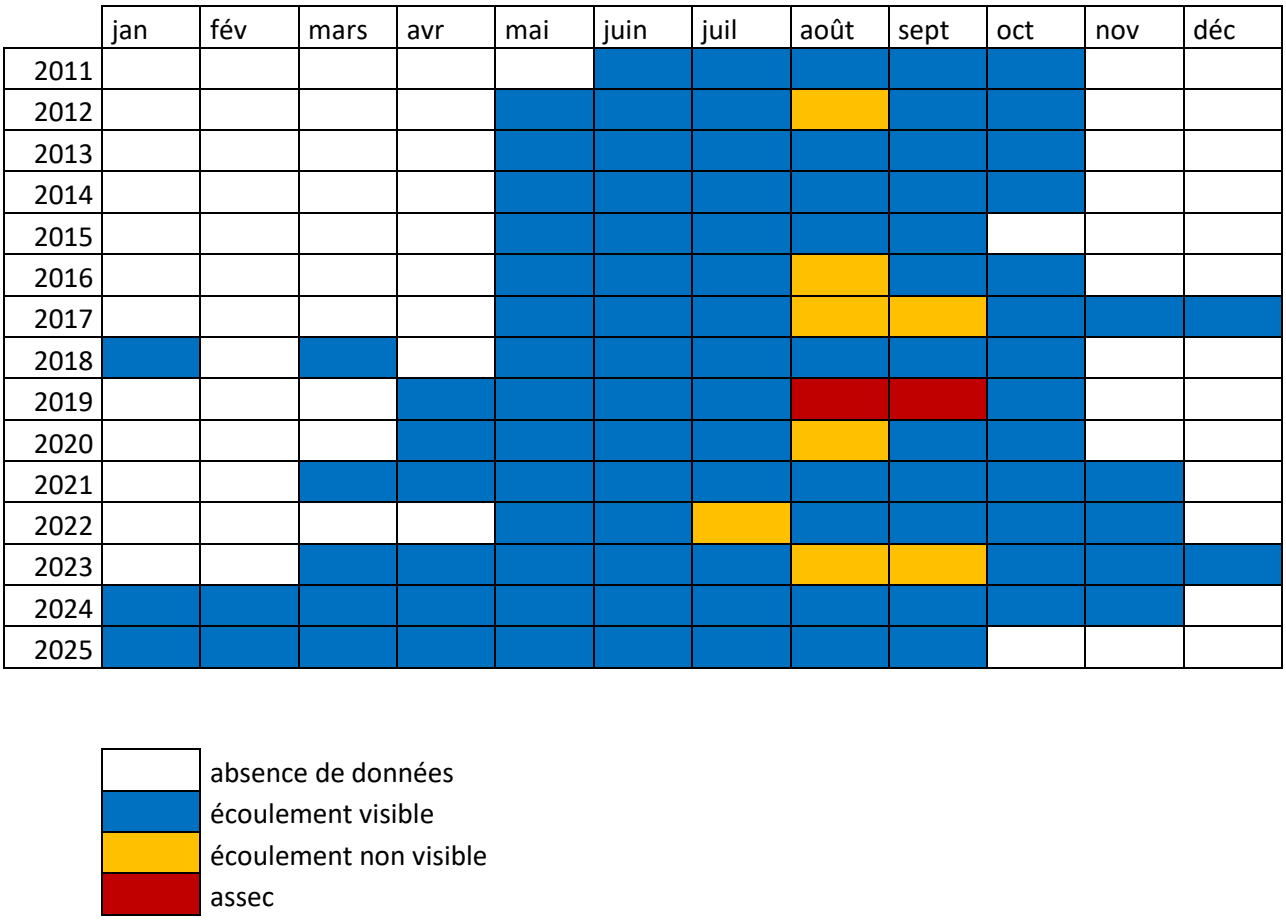


Tableau 12 - Type d'écoulement aux Seynes à Uzès de 2011 à 2025 (base de données ONDE)

- *Le ruisseau de Braune à La Calmette : intermittence partielle mais non généralisée*

Le ruisseau de Braune présente un fonctionnement intermédiaire. Les situations d'assec sont rares (2012), mais les épisodes d'écoulement non visible sont plus fréquents, notamment en 2019, 2020 et 2023 (tableau 13). Cette dynamique suggère une vulnérabilité modérée : le cours d'eau conserve un écoulement visible la plupart des étés, mais montre des signes de tension hydrologique lors des années les plus contraignantes.



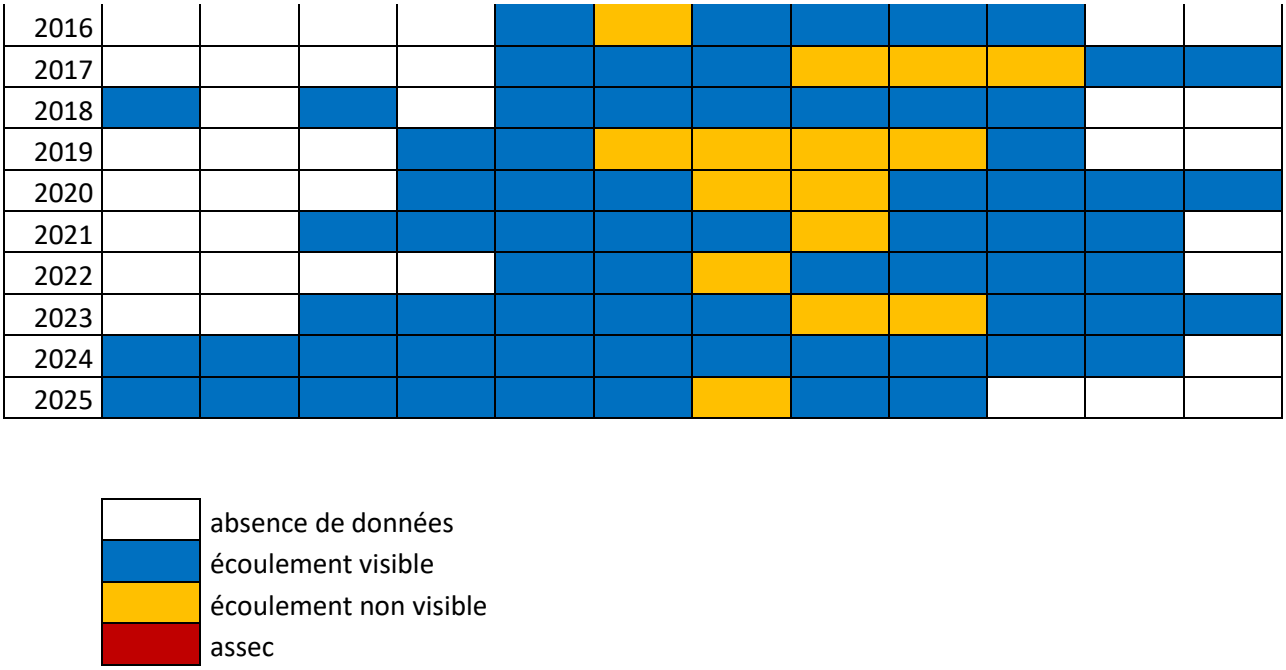


Tableau 13 - Type d'écoulement au ruisseau de Braune à La Calmette de 2011 à 2025 (base de données ONDE)

➢ *Lecture transversale : hiérarchie de vulnérabilité hydrologique*

L'analyse comparée des quatre stations met en évidence une hiérarchie claire :

– Vulnérabilité forte : Le Bourdic (intermittence estivale structurelle)

– Vulnérabilité croissante : Le Gardon à Dions (assecs récurrents depuis la fin des années 2010)

– Vulnérabilité modérée : Le ruisseau de Braune

– Vulnérabilité faible à ce stade : Les Seynes

Les années 2019, 2022 et 2023 apparaissent comme des années critiques communes, marquées par des assecs simultanés sur plusieurs stations. Ces années correspondent également à des étés caractérisés par une augmentation marquée des jours anormalement chauds (TXND), une multiplication des nuits tropicales (TR) et des vagues de chaleur prolongées (TXHWD -cf. parties précédentes ci-dessus).

Ainsi, si les cumuls annuels de précipitations ne présentent pas de tendance statistiquement significative sur la période 1970–2025, l'intensification thermique observée constitue un facteur d'aggravation des situations d'étiage, en particulier pour les cours d'eau à faible inertie hydrologique.

8.4.3 – Articulation entre niveaux de nappes et dynamiques d'étiage

L'analyse des stations ONDE met en évidence une **intensification des situations d'assec** sur certains cours d'eau du territoire depuis la fin des années 2010, en particulier sur le Bourdic et, dans une moindre mesure, sur le Gardon à Dions. Ces évolutions doivent être mises en perspective avec les dynamiques observées sur les nappes souterraines (cf. §8.2 et §8.3).

➢ *Le rôle du soutien d'étiage par les nappes*

Dans les systèmes hydrologiques méditerranéens, les **nappes** jouent un **rôle déterminant** dans le **maintien de l'écoulement estival**. En période sèche, l'alimentation des cours d'eau dépend largement du **drainage des nappes**, notamment dans les contextes karstiques caractéristiques du territoire des gorges du Gardon.

Lorsque les **niveaux piézométriques sont élevés en sortie d'hiver et au printemps**, le soutien d'étiage permet de **maintenir un écoulement visible** une partie de l'été. À **l'inverse**, lorsque la **recharge hivernale est insuffisante** ou que les **niveaux baissent précocement**, les **cours d'**eau les plus **sensibles** basculent vers **l'écoulement non visible**, puis vers **l'assec**.

Les **années 2019, 2022 et 2023**, identifiées comme **critiques dans l'analyse ONDE**, correspondent également à des **situations de tension marquée** sur les nappes, caractérisées par des **niveaux bas** et une **recharge limitée** (cf. § 8.2 et 8.3).

➢ *Une contrainte thermique amplificatrice*

L'analyse climatique présentée au **chapitre 3** montre une **augmentation significative** des **températures moyennes annuelles** (+0,21 °C/décennie), du **nombre de jours anormalement chauds** (+4,6 jours/décennie), des **nuits tropicales** ainsi que des **vagues de chaleur** prolongées. Même en **l'absence de tendance significative** sur les **cumuls annuels de précipitations**, cette **intensification** thermique modifie profondément les bilans hydriques avec :

- une **augmentation** de **l'évapotranspiration** potentielle
- un **assèchement** plus rapide des **sols** ;
- une **réduction** du **volume d'eau disponible** pour le **soutien d'étiage**
- un **allongement** de la **période de stress hydrique** estival

Ainsi, des **périodes sèches** d'une **durée comparable** à celles observées par le **passé** peuvent désormais **produire** des **effets hydrologiques plus sévères**, du fait de températures plus élevées.

➢ *Différenciation des réponses hydrologiques*

Les contrastes observés entre les quatre cours d'eau étudiés illustrent des niveaux d'inertie hydrologique différents :

– Le Bourdic, présentant une faible inertie, réagit rapidement aux déficits hydriques et à l'intensification thermique, avec des assecs estivaux devenus quasi systématiques ;

– Le Gardon à Dions conserve une capacité intégratrice liée à son bassin versant plus étendu, mais montre depuis la fin des années 2010 des épisodes d'intermittence estivale récurrents ;

– Les Seynes et le ruisseau de Braune apparaissent plus résistants à ce stade, bien que sensibles lors des années les plus chaudes.

Cette hiérarchie suggère que les petits affluents jouent un rôle de « sentinelles hydrologiques », révélant précocement les effets combinés des tensions sur les nappes et de l'augmentation des contraintes thermiques.

➢ *Vers une recomposition du régime hydrologique estival*

L'ensemble des éléments analysés (évolution des températures, tension sur les nappes, fréquence croissante des assecs sur certains cours d'eau, etc.) convergent vers l'hypothèse d'une recomposition progressive du régime hydrologique estival sur le territoire. Il ne s'agit pas d'une disparition généralisée des écoulements, mais d'un glissement vers une intermittence plus fréquente, une réduction de la durée d'écoulement visible et une sensibilité accrue aux étés exceptionnellement chauds.

Dans ce contexte, la gestion de la ressource en eau et la préservation des milieux aquatiques devront intégrer non seulement les volumes annuels de précipitations, mais également l'intensification thermique et ses effets sur les bilans hydriques saisonniers.

8.5 Évolution projetée des débits du Gard à Sanilhac-Sagries (La Baume)

Afin de compléter l'analyse des étiages observés présentée dans la section précédente, une analyse prospective des débits du Gard à Sanilhac-Sagries (station de La Baume - # 196 ; V718501801) a été réalisée à partir des projections hydrologiques issues de la plateforme DRIAS-Eau[9]. Les données utilisées proviennent du modèle hydrologique SIM2 forcé par le modèle climatique CNRM-CM5 / ALADIN63, pour la période historique (1951-2005) et pour les scénarios climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5 sur la période 2005-2100. L'analyse repose sur plusieurs indicateurs complémentaires permettant de caractériser l'évolution du fonctionnement hydrologique du bassin :

[9] https://www.drias-eau.fr/

- les débits moyens annuels,
- les débits minimaux annuels,
- le rapport entre débits minimal et moyen et le rapport entre débits hivernaux et estivaux,
- et l'évolution du régime hydrologique mensuel.

8.5.1 Évolution des débits moyens annuels

L'analyse des débits moyens annuels simulés ne met **pas en évidence d'effondrement généralisé des volumes d'eau à l'échelle annuelle** (fig. 74). Les **valeurs projetées** restent globalement du **même ordre de grandeur** que celles observées durant la période historique, et présentent même une **tendance à la hausse à partir du milieu du siècle** dans certaines simulations.

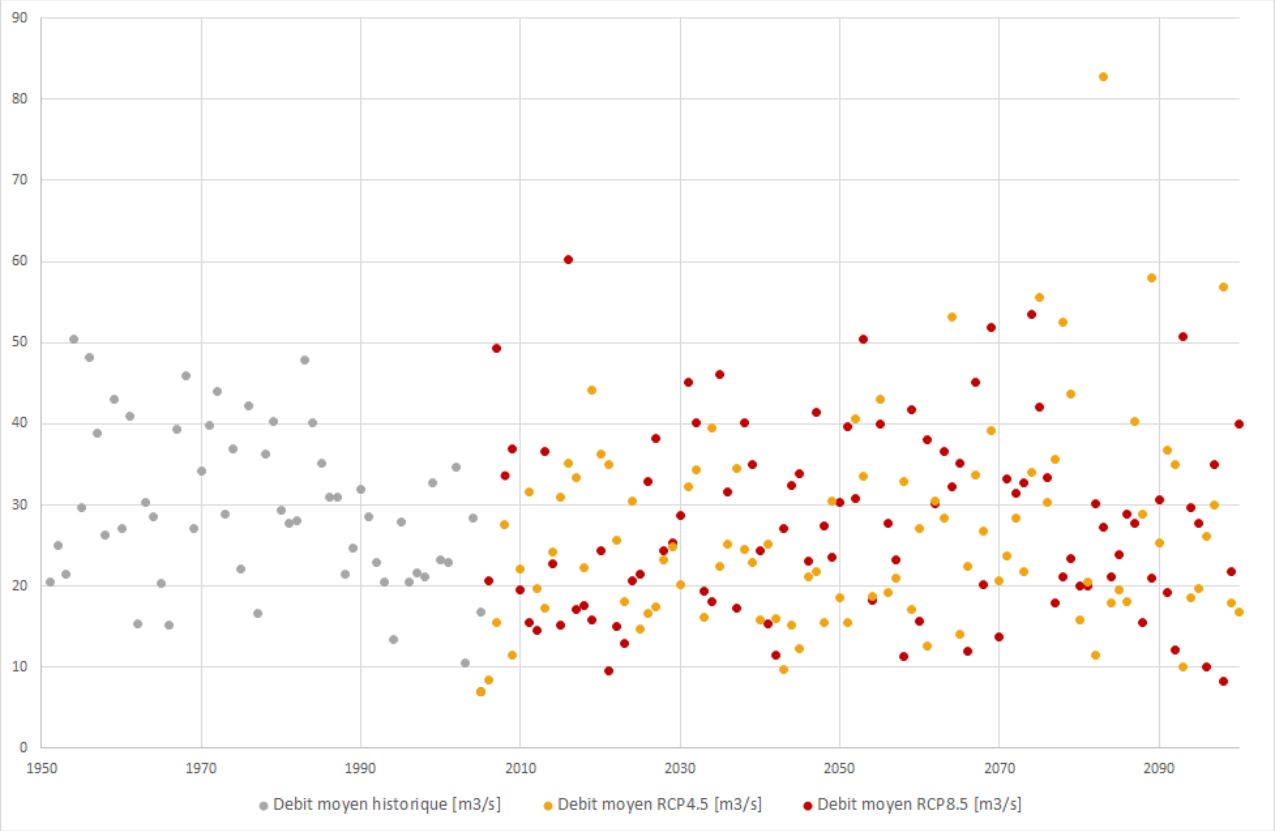


Figure 74 : débits moyens historique (1951-2005) et futurs (2005-2100) avec le RCP4.5 et le RCP8.5 (m^3/s)

Cette **évolution apparente** s'explique par **l'intensification** attendue des épisodes pluvieux **automnaux et hivernaux** dans les régions méditerranéennes. Ces événements, souvent associés aux **épisodes cévenols**, peuvent générer des volumes d'eau importants sur des périodes relativement courtes, contribuant à **maintenir des débits moyens annuels** relativement **élevés** malgré **l'augmentation des périodes sèches**. L'analyse des **moyennes glissantes sur cinq ans** (fig. 75) confirme cette tendance, tout en mettant en évidence une **variabilité interannuelle marquée**, caractéristique des **régimes hydrologiques méditerranéens**.

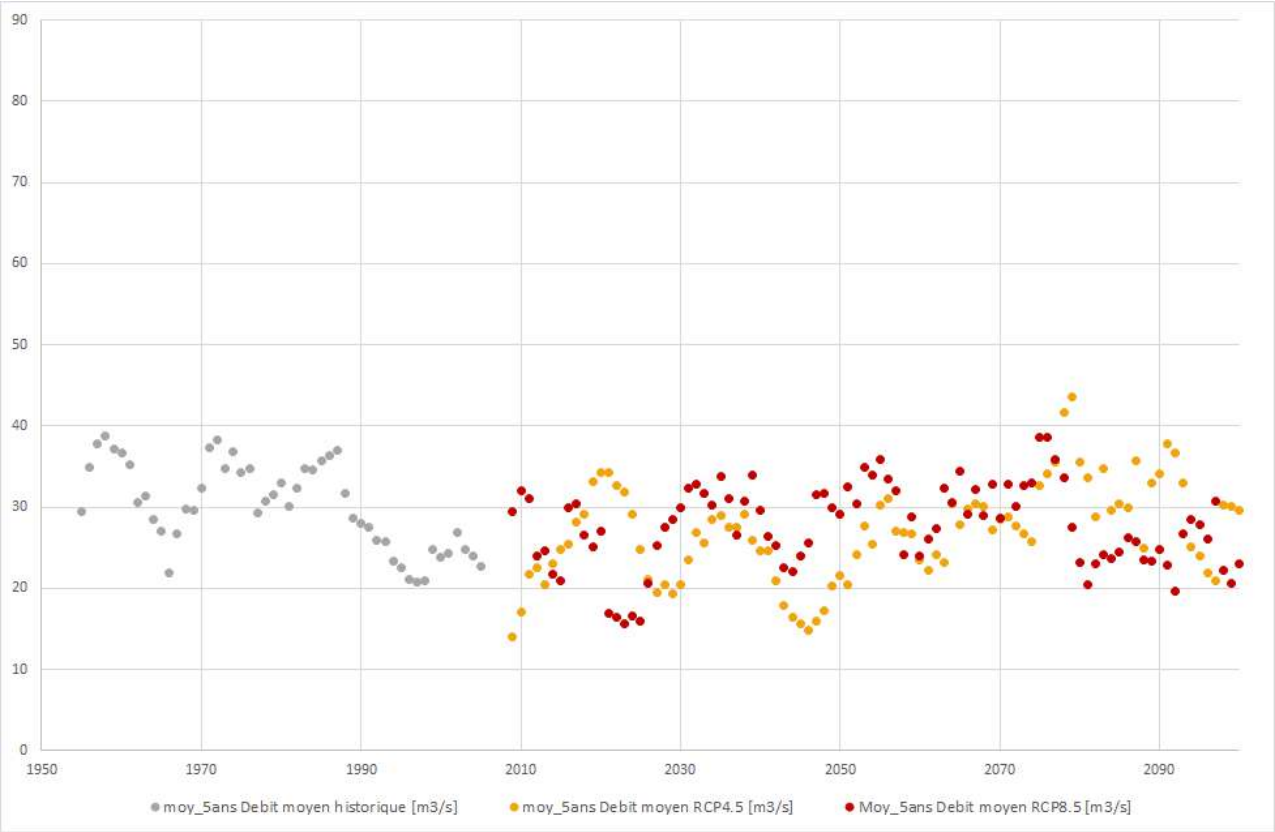


Figure 75 : moyennes glissantes sur 5 ans des débits moyens historique (1951-2005) et futurs (2005-2100) avec le RCP4.5 et le RCP8.5 (m^3/s)

8.5.2 Aggravation progressive des étiages

L'analyse des **débits minimaux annuels** révèle une **tendance globale à la diminution progressive des valeurs d'étiage** au cours du XXIe siècle (fig. 76). Cette évolution apparaît clairement dans les projections issues des scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5, avec une **variabilité interannuelle importante** mais une **tendance générale orientée à la baisse**, notamment sur les moyennes glissantes sur 5 ans (fig. 77).

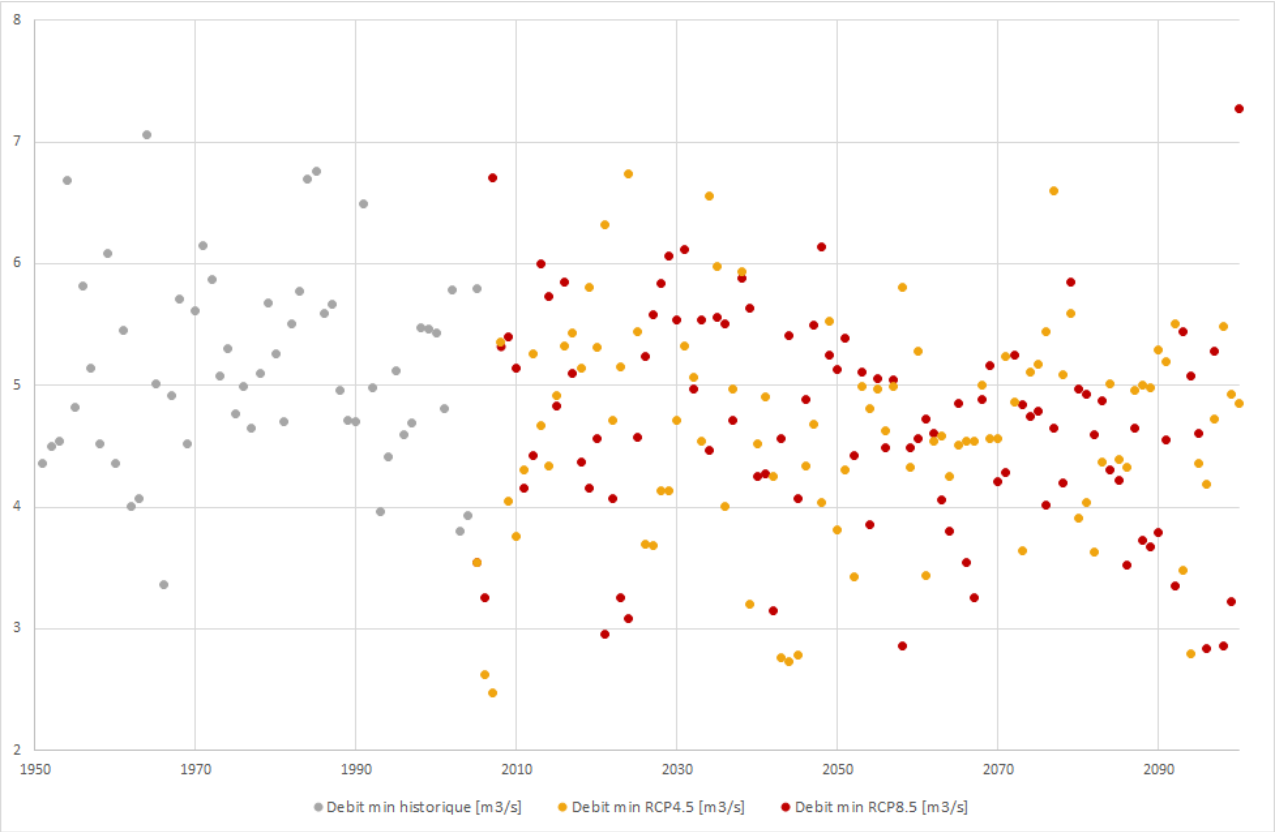


Figure 76 : débits minimaux historique (1951-2005) et futurs (2005-2100) avec le RCP4.5 et le RCP8.5 (m^3/s)

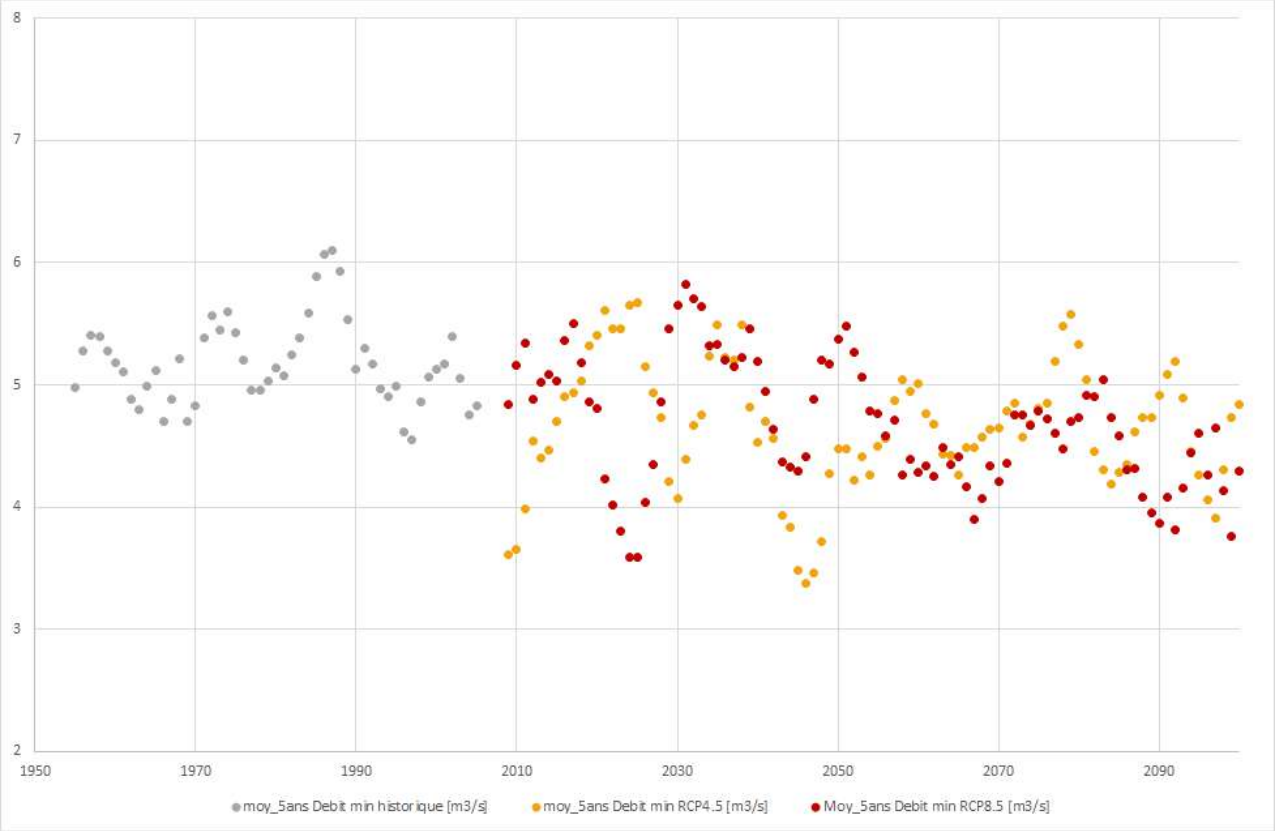


Figure 77 : moyennes glissantes sur 5 ans des débits minimaux historique (1951-2005) et futurs (2005-2100) avec le RCP4.5 et le RCP8.5 (m^3/s)

Afin de mieux caractériser cette évolution, le rapport entre **débit minimal annuel et débit moyen annuel (Qmin/Qmoy)** a été analysé (fig. 78). Cet indicateur permet **d'évaluer la sévérité relative des étiages** par rapport aux **volumes annuels disponibles**. Sur la période historique, ce ratio se situe généralement entre **0,12 et 0,25**, traduisant des étiages relativement modérés dans le contexte méditerranéen. À partir du **début du XXIe siècle**, les projections montrent une **tendance à la diminution** de ce ratio, indiquant que les **débits minimaux deviennent progressivement plus faibles relativement aux débits moyens annuels**.

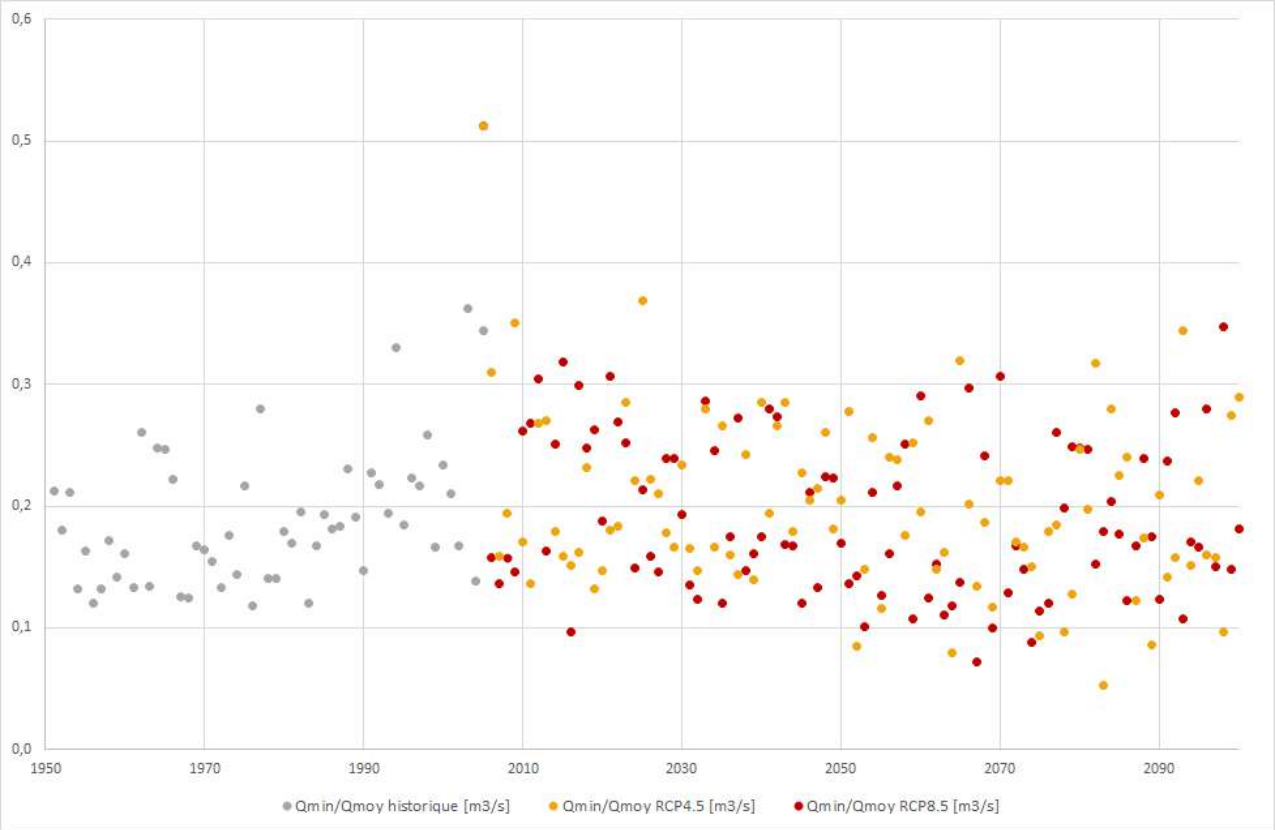


Figure 78 : ratio Qmin / Qmoy historique (1951-2005) et futurs (2005-2100) avec le RCP4.5 et le RCP8.5 (m³/s)

L'analyse des **moyennes glissantes sur cinq ans** (fig. 79) confirme cette évolution, en mettant en évidence une **baisse progressive du ratio Qmin/Qmoy** dès le début du XXIe siècle. Cette diminution traduit une **accentuation progressive de la sévérité des étiages**, cohérente avec **l'augmentation des températures** et de **l'évapotranspiration** dans les régions méditerranéennes.

Ainsi, même si les **volumes annuels ne diminuent pas** nécessairement de manière significative, la **part des débits** correspondant aux périodes de **basses eaux tend à se réduire**, ce qui renforce la **vulnérabilité hydrologique** du bassin durant la période estivale.

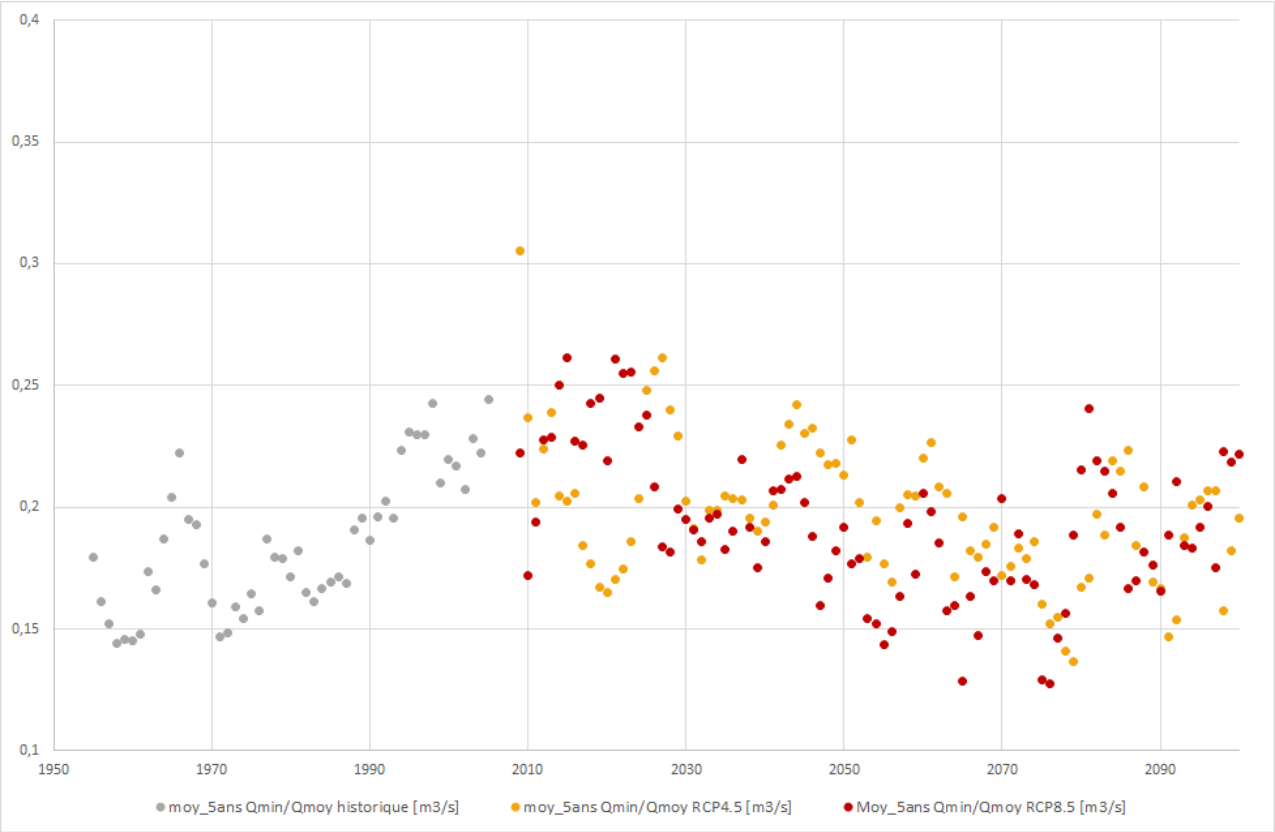


Figure 79 : moyennes glissantes sur 5 ans du ratio Qmin / Qmoy historique (1951-2005) et futurs (2005-2100) avec le RCP4.5 et le RCP8.5 (m³/s)

8.5.3 Renforcement de la saisonnalité hydrologique

L'évolution de la saisonnalité hydrologique a été analysée à partir du rapport entre les **débits hivernaux (décembre-janvier-février) et les débits estivaux (juin-juillet-août)**. Cet indicateur permet **d'évaluer le contraste saisonnier du régime hydrologique**.

Les résultats montrent une **augmentation progressive du ratio hiver/été au cours du XXIe siècle**, quel que soit le scénario climatique considéré (fig. 80). Alors que la période historique présente un ratio d'environ **4,5**, les projections indiquent une augmentation progressive pouvant atteindre près de **6 en fin de siècle**.

Cette évolution traduit un **renforcement du contraste saisonnier des débits**, caractérisé par :

- des **débits hivernaux** relativement **maintenus**,
- et des **débits estivaux proportionnellement plus faibles**.

Le saut le plus marqué apparaît à partir du **milieu du siècle**, en particulier dans le scénario **RCP 8.5**, où l'augmentation du ratio hiver/été intervient plus précocement. Cette évolution traduit une **redistribution progressive** des écoulements au cours de l'année, avec une **concentration accrue** des volumes d'eau durant la **saison humide**.

Ce phénomène correspond à une **évolution déjà observée** dans de nombreux **bassins méditerranéens**, où le **changement climatique** tend à **accentuer la saisonnalité hydrologique** en renforçant les **contrastes** entre **saisons humides** et saisons **sèches**.

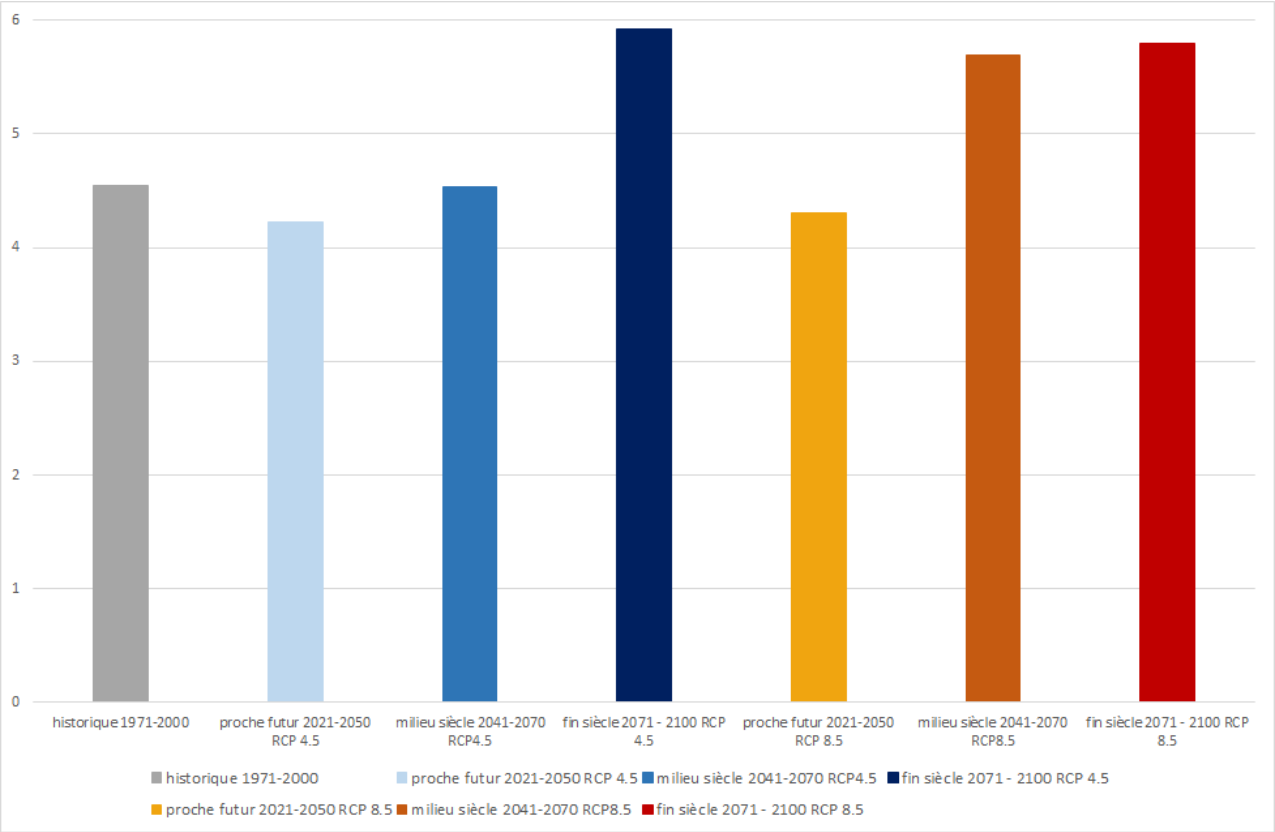


Figure 80 : rapport entre les débits hivernaux (décembre-janvier-février) et les débits estivaux (juin-juillet-août) pour les périodes historique (1951-2005) et futurs (2005-2100) avec le RCP4.5 et le RCP8.5

8.5.4 Transformation du régime hydrologique mensuel

L'analyse des **débits mensuels moyens** permet d'identifier plus précisément les **transformations saisonnières** du régime hydrologique du Gard à Sanilhac-Sagries (fig. 81). Ces débits ont été étudiés en 4 phases de normales de 30 ans et pour les RCP4.5 et RCP8.5 :

- historique 1971-2000
- proche futur 2021-2050
- milieu siècle 2041-2070
- fin siècle 2071 - 2100

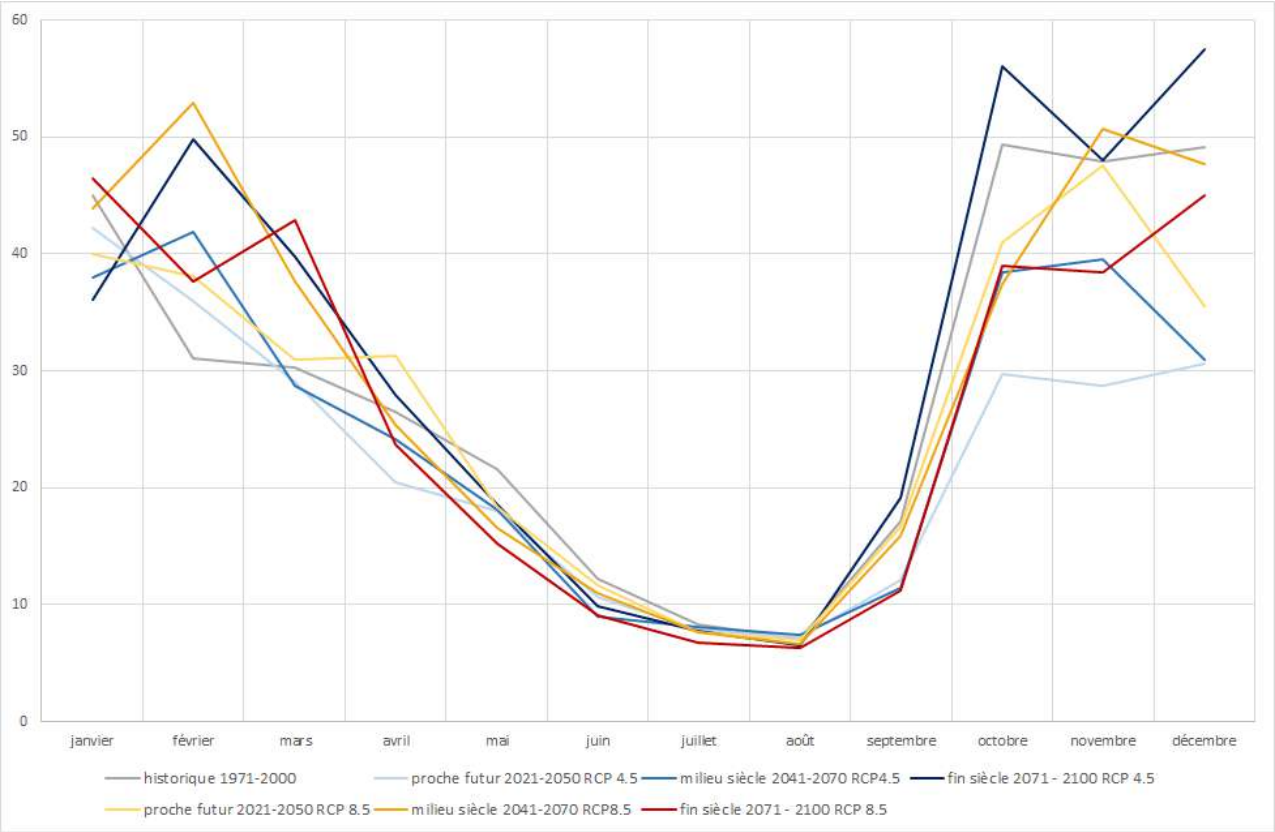


Figure 81 : débits mensuels moyens pour les périodes historique 1971-2000, proche futur 2021-2050, milieu siècle 2041-2070 et fin siècle 2071 – 2100, avec les RCP4.5 et RCP8.5

Pour plus de lisibilité et d'une manière complémentaire à la figure 81, les moyennes des RCP4.5 et RCP8.5 sont figurées sur la figure 82, toujours en regard de la période historique, à l'aide d'un graphique en radar.

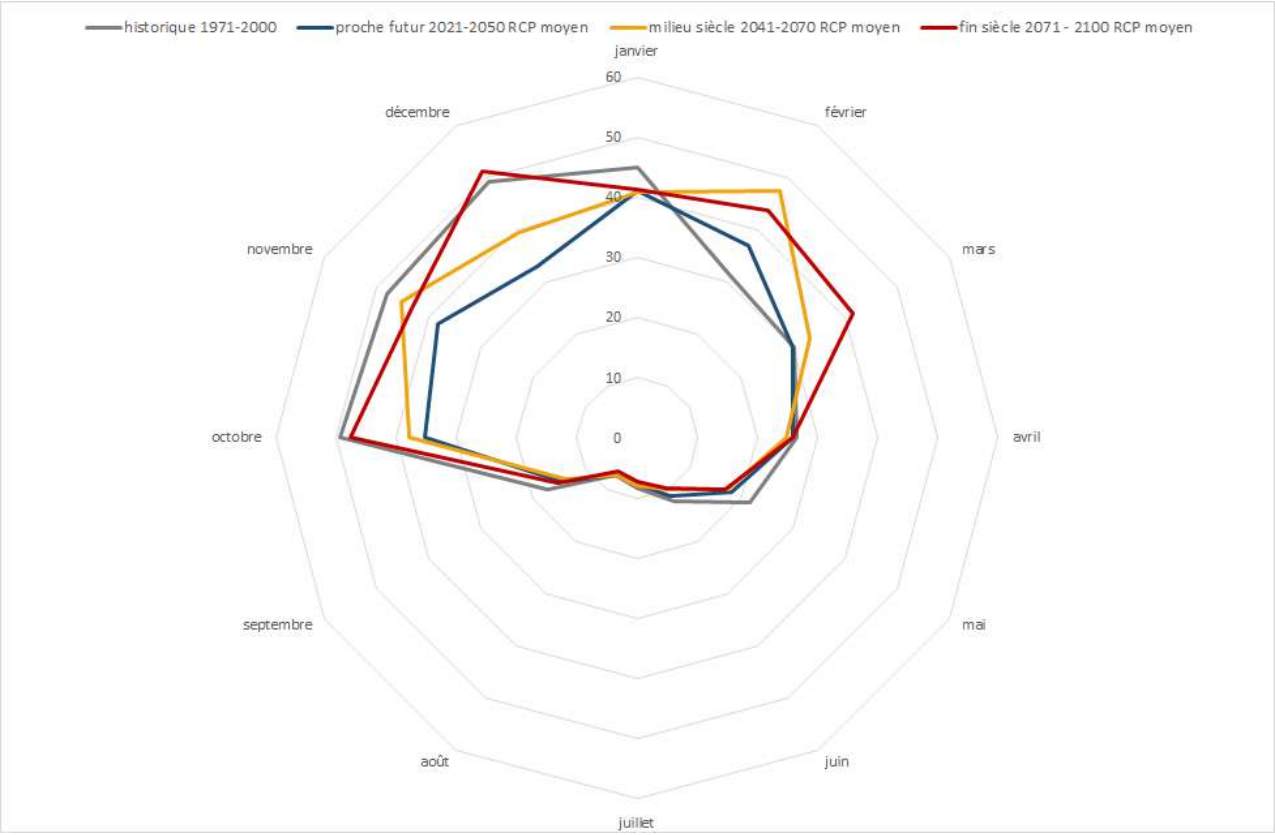


Figure 82 : débits mensuels moyens pour les périodes historique 1971-2000, proche futur 2021-2050, milieu siècle 2041-2070 et fin siècle 2071 – 2100, avec les moyennes des RCP4.5 et RCP8.5

Plusieurs évolutions caractéristiques apparaissent :

- Contrairement à une diminution uniforme des débits printaniers, les projections mettent en évidence une **reconfiguration intra-saisonnière du printemps hydrologique**. En effet, les débits tendent à **augmenter en fin d'hiver et au début du printemps**, notamment en février et en mars, traduisant une mobilisation plus précoce des écoulements. En revanche, cette dynamique s'accompagne d'une **stagnation, voire d'une légère diminution en fin de printemps**, particulièrement en mai. Cette évolution suggère un **glissement du pic printanier vers la fin de l'hiver**, suivi d'un **tarissement plus rapide** des écoulements au cours du **printemps avancé**.

- **Un maintien du minimum estival**, avec des débits très faibles durant les mois de juillet et août.

- **Un renforcement relatif des débits automnaux au fur et à mesure de l'avancée dans le 21ème siècle**, notamment en octobre et novembre, en lien avec l'intensification possible des épisodes méditerranéens.

Dans les **projections** de fin de siècle, ces évolutions conduisent à une **modification progressive de la forme du régime hydrologique annuel**. Les écoulements tendent à se **concentrer** davantage sur les **périodes automnale et hivernale**, tandis que la **période de basses eaux** estivales tend à **s'allonger** et à **s'intensifier**.

Cette évolution correspond à une transition vers un **régime hydrologique méditerranéen plus contrasté**, dans lequel la disponibilité en eau devient **plus dépendante d'événements pluvieux** intenses survenant principalement en **automne** et en **hiver**.

8.5.5 Un régime hydrologique méditerranéen plus contrasté

Pris ensemble, ces résultats indiquent que l'évolution future du Gard à Sanilhac-Sagries **ne se traduit pas par une diminution uniforme des débits**, mais plutôt par une **accentuation du contraste saisonnier du régime hydrologique**.

Dans ce contexte, les principaux changements attendus concernent :

- une **stabilité relative des volumes annuels**,
- une **augmentation de la variabilité interannuelle**,
- une **stagnation** voire une **aggravation progressive des étiages estivaux**,
- et une **concentration accrue des écoulements en automne et en fin d'hiver et début du printemps**.

Ces **transformations** correspondent aux évolutions attendues pour de nombreux bassins méditerranéens sous l'effet du **changement climatique**, caractérisées par un régime hydrologique plus **irrégulier** et plus **contrasté**.

8.6 Mise en perspective : niveaux de nappes et dynamiques climatiques et environnementales du territoire

Bien qu'aucun indicateur prospectif de type DRIAS ne soit aujourd'hui disponible pour les nappes et les ressources en eau souterraine, l'analyse croisée des résultats présentés dans les chapitres précédents permet de proposer une **lecture intégrée et cohérente des dynamiques hydrologiques observées** sur le territoire de la réserve de biosphère des gorges du Gardon. Les niveaux de nappes apparaissent ainsi comme un **indicateur de synthèse**, à la fois lent, intégré et révélateur des évolutions climatiques et environnementales en cours.

Les analyses climatiques (chapitre 3) montrent une **augmentation des températures**, une **intensification des périodes sèches** et une **hausse de l'évapotranspiration potentielle**, tandis que les précipitations deviennent plus irrégulières, avec une tendance à la concentration des pluies dans des épisodes plus intenses mais moins efficaces pour la recharge. Ces évolutions constituent un **contexte défavorable à la recharge durable des nappes**, en particulier dans les systèmes karstiques, où l'efficacité des pluies dépend fortement de leur saisonnalité et de leur intensité.

Les **évolutions des types de climat de Köppen-Geiger** (chapitre 5) apportent un éclairage prospectif essentiel pour interpréter les dynamiques hydrologiques observées. Sous le scénario RCP 4.5, le territoire reste majoritairement dominé par un climat de type **Cfa**, correspondant à

un climat tempéré chaud sans saison sèche marquée, proche des conditions méditerranéennes actuelles. Ce scénario prolonge ainsi un fonctionnement climatique relativement familier, sans rupture majeure dans la saisonnalité des précipitations, même si l'augmentation des températures et de l'évapotranspiration accentue la pression sur les ressources en eau.

En revanche, le scénario RCP 8.5 dessine une trajectoire climatique sensiblement différente. À partir du milieu du XXIe siècle, les projections indiquent une transition progressive vers des climats de type Cwa, caractérisés par des hivers plus secs, avant une évolution vers des conditions subtropicales de type Cfa à plus long terme. Cette séquence traduit moins un simple assèchement généralisé qu'une reconfiguration de la saisonnalité des pluies, avec un déplacement des périodes favorables à la recharge des nappes et une accentuation du contraste entre saisons humides et saisons sèches.

Cette évolution est particulièrement déterminante pour le fonctionnement hydrologique du territoire. Le passage transitoire par des climats à hiver sec (Cwa) constitue une phase critique pour la recharge des nappes, traditionnellement dépendante des pluies hivernales. Même lorsque le climat redevient de type Cfa en fin de période, les conditions thermiques plus élevées et la demande évaporative accrue limitent l'efficacité hydrologique des précipitations. Ainsi, les nappes restent exposées à une augmentation de la variabilité interannuelle, à des phases de basses eaux plus fréquentes et à une plus grande sensibilité aux successions d'années sèches.

Cette lecture fine des trajectoires climatiques souligne que les enjeux pour les ressources en eau ne relèvent pas uniquement de la quantité annuelle de pluie, mais bien de sa répartition saisonnière, de son intensité et de son articulation avec des températures de plus en plus élevées — autant de facteurs qui conditionnent directement la recharge, la résilience des nappes et le soutien des cours d'eau associés.

Les températures de surface (LST), analysées au chapitre 6, apportent un éclairage spatial complémentaire. L'augmentation des LST, en particulier sur les surfaces minérales, les sols nus et les formations végétales basses, traduit une augmentation de la demande évaporative et une perte d'efficacité des mécanismes naturels de régulation thermique et hydrique. Cette élévation des LST contribue indirectement à la baisse des niveaux de nappes, en accentuant les pertes par évapotranspiration et en limitant la persistance des écoulements de surface et du soutien d'étiage.

Les résultats relatifs au risque de feu de forêt (chapitre 7) s'inscrivent pleinement dans cette même trajectoire. L'augmentation du danger de feu, notamment à moyen et long terme, reflète l'assèchement progressif des sols et de la végétation, mais aussi la déconnexion croissante entre les périodes de recharge hydrologique et les périodes de forte demande climatique. Les années de basses eaux, comme 2023, apparaissent ainsi comme des années à risques cumulés : stress hydrique, vulnérabilité accrue des écosystèmes, pression sur les usages et exposition renforcée aux feux de forêt.

Dans ce contexte, l'absence de tendance statistiquement significative à long terme dans les niveaux de nappes ne doit pas masquer un signal essentiel : ce n'est pas tant une baisse linéaire des ressources en eau qui se dessine, qu'une **augmentation de la variabilité, de l'irrégularité et de la fréquence des situations extrêmes**. Les nappes jouent encore leur rôle de tampon, mais ce rôle devient plus fragile face à la répétition des épisodes de sécheresse, à l'élévation des températures et à la pression combinée des usages et des risques naturels.

Ainsi, les niveaux de nappes constituent un **chaînon central du récit climatique territorial**, reliant les évolutions atmosphériques, les dynamiques de surface, les risques naturels et les usages socio-économiques. Leur observation confirme la nécessité d'une approche intégrée de l'adaptation, articulant gestion de l'eau, aménagement du territoire, préservation des milieux naturels et anticipation des risques, dans un contexte où la résilience du système hydrologique devient un enjeu stratégique majeur pour l'avenir du territoire.

Les résultats issus de l'analyse prospective des débits du Gard à Sanilhac-Sagries (chapitre 8.5) viennent compléter et renforcer cette lecture intégrée du fonctionnement hydrologique du territoire. Ils montrent que, si les volumes annuels ne présentent pas de tendance nette à la baisse, la **distribution saisonnière** des écoulements évolue **significativement**. Les projections mettent en évidence une **accentuation du contraste saisonnier**, avec des **débits hivernaux globalement maintenus**, voire légèrement **renforcés**, et des **étiages estivaux** plus sévères. Cette évolution s'accompagne également d'un **déplacement temporel du régime hydrologique**, caractérisé par une **mobilisation** plus **précoce** des écoulements en **fin d'hiver** et un **tarissement** plus rapide à la **fin du printemps**. Par ailleurs, le renforcement relatif des débits automnaux suggère une **contribution accrue** des épisodes **pluvieux intenses**, dont l'efficacité pour la recharge des nappes reste toutefois **limitée**. Dans ce contexte, les cours d'eau apparaissent comme des **vecteurs de redistribution temporelle de la ressource**, reflétant directement les **transformations climatiques** en cours et contribuant à expliquer la **variabilité croissante** observée dans les niveaux de nappes.

8.7 – Mise en perspective : nappes, étiages et dynamiques climatiques du territoire

L'analyse des **niveaux de nappes** (base Météeau), celle des **états d'écoulement** des cours d'eau (base ONDE) et l'analyse des débits historiques et prospectifs du Gard à Sanilhac-Sagries (base Drias eau) permettent de croiser **deux dimensions complémentaires** du fonctionnement hydrologique territorial : la dynamique souterraine et sa traduction visible en surface.

➢ *Une cohérence temporelle entre tension des nappes et assecs estivaux*

Les années identifiées comme hydrologiquement critiques dans l'analyse des nappes (notamment 2019, 2022 et 2023) correspondent également à des situations d'assec simultanées sur plusieurs stations ONDE.

Cette concordance suggère un affaiblissement du soutien d'étiage en période estivale. Lorsque les niveaux piézométriques sont bas en sortie de printemps et que la recharge hivernale est limitée, les cours d'eau les plus sensibles basculent vers l'écoulement non visible puis l'assec en cas de prolongation des conditions sèches. La base ONDE fournit ainsi une matérialisation morphologique et écologique des tensions hydrogéologiques mises en évidence par Météeau.

Les résultats issus des projections hydrologiques (chapitre 8.5) apportent un éclairage complémentaire à cette cohérence observée. Ils montrent que les situations d'assec ne résultent pas uniquement de déficits pluviométriques ponctuels, mais s'inscrivent dans une évolution plus structurelle du régime hydrologique, marquée par une accentuation des étiages estivaux et une redistribution saisonnière des écoulements. Ainsi, les assecs observés ces dernières années peuvent être interprétés comme l'expression précoce de dynamiques appelées à se renforcer au cours du XXIe siècle.

➢ *Le rôle amplificateur de l'intensification thermique*

Le chapitre 3 a montré une augmentation statistiquement significative des températures moyennes annuelles, des jours anormalement chauds, des nuits tropicales et des vagues de chaleur prolongées. Même en l'absence de tendance nette sur les cumuls annuels de précipitations, cette intensification thermique modifie profondément les bilans hydriques saisonniers avec une augmentation de l'évapotranspiration, une dessiccation plus rapide des sols, une réduction des flux de soutien d'étiage et un allongement des périodes de stress hydrique.

Ainsi, des séquences sèches comparables à celles observées par le passé peuvent désormais produire des effets hydrologiques plus sévères en raison d'un contexte thermique plus contraignant. Le changement observé ne relève donc pas uniquement d'une modification des volumes de pluie, mais d'une recomposition énergétique du système hydrologique (probablement également lié à certains usages comme le pompage dans la nappe).

➢ *Une hiérarchie de vulnérabilité révélatrice des inerties hydrologiques*

Les contrastes observés entre les quatre cours d'eau étudiés permettent de distinguer différents niveaux de sensibilité. Le Bourdic présente une intermittence estivale désormais quasi systématique, traduisant une faible capacité de stockage et une réponse rapide aux déficits hydriques. Le Gardon à Dions conserve une inertie relative liée à son bassin versant plus étendu, mais montre depuis la fin des années 2010 des assecs récurrents lors des étés les plus chauds. Les

Seynes et le ruisseau de Braune apparaissent plus résilients à ce stade, bien que sensibles lors des années climatiquement extrêmes. Ces différences illustrent la notion d'inertie hydrologique.

➢ *La notion d'inertie hydrologique : un révélateur des tensions hydriques au sein de la réserve*

L'inertie hydrologique désigne la capacité d'un système hydrologique (bassin versant, nappe, cours d'eau) à amortir les variations climatiques et à maintenir un fonctionnement relativement stable malgré des conditions météorologiques défavorables. Elle dépend notamment :

– du volume de stockage souterrain (aquifères, karst) ;

– de la superficie et de la structure du bassin versant ;

– de la connectivité entre nappes et cours d'eau ;

– des usages et prélèvements éventuels.

Les systèmes à faible inertie réagissent rapidement aux déficits hydriques et aux hausses de température : ils constituent souvent des indicateurs précoces des tensions climatiques. En revanche, les systèmes à forte inertie présentent une réponse plus lente (mais peuvent connaître des ruptures brutales lorsque certains seuils sont franchis). L'analyse conjointe des nappes et des étiages sur le territoire des gorges du Gardon suggère une diminution progressive de la capacité d'amortissement estivale, en particulier pour les cours d'eau à faible inertie.

➢ *Vers une recomposition du régime hydrologique estival*

L'ensemble des analyses converge vers une évolution progressive du régime hydrologique estival avec une augmentation de la fréquence des assecs sur certains cours d'eau, une réduction de la durée d'écoulement visible et une sensibilité accrue aux étés exceptionnellement chauds. Il ne s'agit pas d'une disparition généralisée des écoulements, mais d'un glissement vers une intermittence plus fréquente et plus précoce dans la saison. Dans un contexte méditerranéen déjà caractérisé par une forte variabilité interannuelle, cette évolution constitue un signal structurant pour les milieux aquatiques, les usages de l'eau et la gestion adaptative du territoire.

Cette évolution s'inscrit dans une transformation plus large du fonctionnement hydrologique, caractérisée par une accentuation du contraste saisonnier des débits, mise en évidence par l'augmentation du ratio entre débits hivernaux et estivaux. Les projections indiquent en effet une concentration accrue des écoulements durant les périodes automnale et hivernale, tandis que les débits estivaux tendent à diminuer relativement aux volumes annuels. Ce décalage temporel du régime hydrologique, associé à une mobilisation plus précoce des écoulements en fin d'hiver et à un tarissement plus rapide au printemps, notamment en mai, contribue à fragiliser le soutien d'étiage et à accroître la probabilité d'assec en période estivale.

8.8 Mise en perspective : fonctionnement karstique et implications hydrologiques

L'interprétation des dynamiques hydrologiques observées sur le territoire de la réserve de biosphère des gorges du Gardon, à l'aide des diverses techniques d'études et bases de données variées mais complémentaires, exposées dans les paragraphes précédents (bases Météeau Nappes, Ondes et Drias Eau), nécessite de prendre en compte le rôle structurant des systèmes karstiques, qui constituent l'un des principaux réservoirs en eau du secteur. Ces aquifères, notamment développés dans les formations calcaires urgoniennes, assurent une part essentielle du soutien d'étiage des cours d'eau, en particulier durant la période estivale (BRL Ingénierie, 2020).

Le fonctionnement de ces systèmes karstiques se caractérise toutefois par une inertie hydrologique relativement faible (BRL Ingénierie, 2020). La circulation de l'eau y est rapide, les capacités de stockage limitées dans le temps et la restitution fortement dépendante des conditions de recharge hivernale et printanière. Une part importante des volumes infiltrés durant la saison humide est ainsi restituée précocement, ce qui limite la disponibilité de la ressource en période d'étiage.

Dans ce contexte, la recharge des aquifères karstiques repose en grande partie sur les infiltrations directes liées aux précipitations, mais également sur les pertes des cours d'eau, en particulier celles du Gardon. Ce fonctionnement établit une forte interdépendance entre écoulements de surface et dynamiques souterraines. Toute diminution des débits en période de basses eaux, qu'elle soit liée à un déficit pluviométrique ou à une augmentation de l'évapotranspiration, se traduit mécaniquement par une réduction de la recharge karstique.

Les évolutions climatiques mises en évidence dans les chapitres précédents, caractérisées par une élévation des températures, une augmentation de la demande évaporative et une modification de la saisonnalité des précipitations, sont susceptibles d'affecter directement ce fonctionnement. L'allongement et l'intensification des périodes d'étiage limitent les échanges nappe-rivière et réduisent la recharge effective des aquifères, tandis que la concentration des pluies en épisodes plus intenses peut diminuer leur efficacité d'infiltration.

Ainsi, les systèmes karstiques apparaissent comme particulièrement sensibles aux évolutions climatiques en cours. Leur rôle central dans le soutien des débits estivaux en fait à la fois un élément clé de la résistance et de la résilience hydrologique du territoire et un facteur de vulnérabilité. Cette double caractéristique souligne l'importance d'une approche intégrée des ressources en eau, prenant en compte les interactions étroites entre climat, écoulements de surface et dynamiques souterraines.

8.9 – Synthèse du chapitre 8 : évolution des niveaux de nappes et débit pour une reconfiguration des enjeux territoriaux

L'analyse des chroniques piézométriques du piézomètre de référence du Pont Saint-Nicolas met en évidence un fonctionnement hydrologique globalement stable à l'échelle pluriannuelle, mais marqué par une variabilité saisonnière et interannuelle de plus en plus contrastée, en lien étroit avec les conditions climatiques récentes.

Sur le plan statistique, les tests de tendance ne révèlent aucune évolution significative à long terme du niveau moyen des nappes sur la période étudiée. Cette absence de tendance ne doit toutefois pas masquer une réalité plus opérationnelle : la succession d'années hydrologiquement très contrastées, avec des épisodes de basses eaux plus fréquents, plus marqués et parfois plus prolongés, notamment en fin d'été.

Cette variabilité accrue s'inscrit dans une évolution plus large du fonctionnement hydrologique du territoire, mise en évidence par l'analyse des débits. Les projections montrent en effet une recomposition de la saisonnalité des écoulements, avec des débits hivernaux globalement maintenus, voire renforcés, et des étiages estivaux plus marqués. Cette dissymétrie croissante entre saisons humides et saisons sèches contribue à accentuer les situations de tension hydrique observées en période estivale, même en l'absence de diminution significative des volumes annuels.

Le fonctionnement saisonnier de la nappe reste ainsi caractérisé par :

- une recharge hivernale et printanière, fortement dépendante des pluies efficaces,
- suivie d'une décrue estivale prononcée, amplifiée par l'évapotranspiration élevée et la faible recharge estivale typique du climat méditerranéen.

À cette structuration saisonnière s'ajoute un décalage progressif du régime hydrologique, caractérisé par une mobilisation plus précoce des écoulements en fin d'hiver et un tarissement plus rapide au printemps. L'augmentation du ratio entre débits hivernaux et estivaux traduit ainsi un renforcement du contraste saisonnier, qui constitue un signal robuste des transformations en cours du système hydrologique.

Les exemples récents de 2023 (année déficitaire) et 2024 (année excédentaire) illustrent clairement cette variabilité. Ils montrent que le système hydrogéologique reste capable de se recharger efficacement après une année humide, mais qu'il est également très sensible aux successions d'années sèches, avec des niveaux atteignant rapidement des seuils bas, voire très bas.

Ces dynamiques hydrologiques ont des implications directes pour le territoire de la réserve de biosphère :

- sur le plan environnemental, les niveaux bas prolongés fragilisent les écosystèmes aquatiques et rivulaires du Gardon, ainsi que les zones humides associées ;

- sur le plan socio-économique, ils conditionnent fortement les usages estivaux du cours d'eau (canoë, baignade, attractivité touristique), mais aussi la disponibilité de la ressource en eau pour certains usages locaux ;
- sur le plan du risque, les niveaux de nappes bas contribuent indirectement à l'augmentation de la vulnérabilité aux feux de forêt, en renforçant l'état de sécheresse des sols et de la végétation.

Ces effets sont d'autant plus marqués que les systèmes hydrologiques locaux présentent des niveaux d'inertie contrastés. Les cours d'eau à faible capacité de stockage réagissent rapidement aux déficits hydriques, conduisant à des assecs précoces, tandis que les systèmes plus inertiels amortissent temporairement ces variations, au prix d'une sensibilité accrue aux successions d'années sèches.

Enfin, l'absence d'indicateurs prospectifs directs sur les nappes dans les scénarios climatiques (type DRIAS) renforce l'intérêt d'une lecture croisée avec les autres résultats du rapport : augmentation des températures, élévation des LST, modification de la saisonnalité des précipitations, allongement des périodes sèches et intensification du risque de feux de forêt.

Les projections hydrologiques confirment cette lecture en montrant que les évolutions futures ne se traduisent pas nécessairement par une baisse généralisée des débits, mais par une redistribution temporelle de la ressource, moins favorable au soutien des étiages. Cette évolution renforce la cohérence entre les signaux climatiques, hydrologiques et écologiques observés à l'échelle du territoire. Ensemble, ces signaux convergent vers un stress hydrique estival accru, même en l'absence de tendance linéaire observable sur les niveaux moyens de nappes et des débits.

En synthèse, le principal enjeu pour les décennies à venir n'est pas tant une baisse continue des nappes qu'une reconfiguration du fonctionnement hydrologique, marquée par une augmentation de l'irrégularité, un renforcement des contrastes saisonniers et une intensification des situations extrêmes. Cette évolution rend la gestion de l'eau plus complexe, plus réactive et plus dépendante des conditions climatiques interannuelles, plaidant pour une approche anticipatrice, intégrée et territorialisée de la ressource en eau à l'échelle de la réserve de biosphère.

Si l'analyse des niveaux de nappes renseigne sur le fonctionnement hydrologique de fond du territoire, elle ne permet toutefois pas d'appréhender directement la manière dont les milieux réagissent, année après année, aux conditions climatiques observées. Pour compléter cette lecture, il est nécessaire de s'intéresser aux états de surface, tels qu'ils sont observables par télédétection.

Le chapitre suivant propose ainsi une analyse des indices spectraux issus des images satellitaires (NDVI, NDMI, UI, NDBaI), afin d'examiner si les contraintes climatiques récentes se traduisent par des transformations mesurables de la couverture végétale, de l'humidité des

surfaces ou de l'artificialisation, ou si elles relèvent avant tout d'une variabilité interannuelle réversible, sans modification structurelle durable des milieux.

9 – Ce qui varie sans se transformer : lecture climatique des indices spectraux de surface (NDVI, NDMI, UI, NDBaI)

L'analyse des niveaux de nappes a mis en évidence une hydrologie globalement stable à long terme, mais marquée par une variabilité interannuelle accrue, étroitement dépendante des conditions climatiques. Cette lecture hydrogéologique, indispensable pour comprendre le fonctionnement de fond du territoire, gagne toutefois à être complétée par une observation directe des **états de surface**, qui constituent l'interface la plus immédiate entre le climat, les milieux et les usages.

Dans cette perspective, la télédétection satellitaire offre des outils particulièrement adaptés pour analyser, sur le long terme, les réponses biophysiques du territoire aux contraintes climatiques. Les **indices spectraux** dérivés des images Landsat (**annexe 1**) permettent ainsi de caractériser l'activité de la végétation (NDVI), l'état hydrique des surfaces (NDMI), le degré d'artificialisation (UI) et la présence de surfaces nues ou minérales (NDBaI), à partir de séries temporelles homogènes couvrant la période 2010–2025.

L'objectif de ce chapitre est double. Il s'agit, d'une part, d'examiner si les évolutions climatiques récentes se traduisent par des **transformations structurelles mesurables** de la couverture du sol et des états de surface à l'échelle de la réserve de biosphère. D'autre part, il s'agit de distinguer ce qui relève de **dynamiques durables** de ce qui correspond à une **variabilité interannuelle fortement contrainte par les conditions météorologiques**, sans modification pérenne des milieux.

Les analyses menées, combinant **approches diachroniques classiques** et **outils spatio-temporels avancés** (*Space Time Cube* et *Emerging Hot Spot Analysis*), montrent que les indices étudiés ne présentent **pas de tendances significatives à long terme**, mais une **variabilité marquée d'une année à l'autre**. Ce résultat, loin de constituer une limite, apporte un éclairage essentiel sur la **nature des pressions climatiques actuelles** : celles-ci affectent fortement le fonctionnement saisonnier et interannuel des surfaces, sans pour autant induire, à ce stade, de reconfiguration majeure de l'occupation du sol.

Ce chapitre propose ainsi une lecture complémentaire et transversale du diagnostic climatique, en mettant en évidence un territoire dont les structures restent globalement stables, mais dont les **fonctionnements écologiques et biophysiques deviennent de plus en plus sensibles aux aléas climatiques**, préfigurant des vulnérabilités futures en cas de poursuite ou d'intensification du changement climatique.

9.1 – Données et méthodologie

L'analyse des indices spectraux repose sur les **mêmes images satellitaires Landsat** que celles mobilisées pour l'étude des températures de surface (LST), afin de garantir une **homogénéité temporelle et spatiale** des observations. Les données utilisées couvrent la période

2010–2025 et proviennent des satellites Landsat 5, 7, 8 et 9, pour des dates de passage identiques à celles retenues pour l'analyse thermique, et sélectionnées selon des critères stricts de couverture nuageuse.

Contrairement à la LST, qui nécessite l'utilisation des produits de niveau 2 (Level-2 Surface Temperature), les indices spectraux ont été calculés à partir des produits Collection 2 – Level 1, correspondant aux réflectances spectrales calibrées au sommet de l'atmosphère. Ce choix est adapté à l'analyse relative des états de surface et permet une comparaison cohérente des indices dans le temps, dès lors que les mêmes chaînes de traitement sont appliquées à l'ensemble des images.

Les indices spectraux ont été calculés à partir des bandes multispectrales des capteurs Landsat, puis agrégés spatialement à l'échelle du territoire de la réserve de biosphère. Comme pour les LST, des valeurs moyennes annuelles ont été produites, ainsi que des analyses exploratoires de la variabilité interannuelle. Des outils d'analyse spatio-temporelle (Space Time Cube et *Emerging Hot Spot Analysis*) ont également été mobilisés afin de tester l'existence de dynamiques spatiales persistantes ou émergentes.

➢ Indices mobilisés et finalités

Quatre indices spectraux complémentaires ont été retenus, chacun apportant un éclairage spécifique sur l'état et le fonctionnement des surfaces :

- NDVI – Normalized Difference Vegetation Index

  Cet indice, fondé sur le contraste entre le proche infrarouge et le rouge, permet de caractériser l'activité photosynthétique et la densité de la végétation. Il constitue un indicateur de référence pour suivre la vigueur de la couverture végétale et ses variations interannuelles, en lien notamment avec les conditions climatiques.

- NDMI – Normalized Difference Moisture Index

  Basé sur les bandes proche et moyen infrarouge, le NDMI renseigne sur l'état hydrique de la végétation et des sols. Il est particulièrement sensible aux situations de stress hydrique et permet de relier les états de surface aux dynamiques de sécheresse ou de recharge hydrique.

- UI – Urban Index

  L'indice d'urbanisation met en évidence les surfaces artificialisées et minérales, en exploitant les contrastes spectraux caractéristiques des matériaux urbains. Il permet d'appréhender le degré d'artificialisation et son éventuelle évolution dans le temps.

- NDBaI – Normalized Difference Bareness Index

  Cet indice vise à détecter les surfaces nues ou faiblement végétalisées, telles que sols minéraux, affleurements rocheux ou terrains dégradés. Il est particulièrement utile pour

analyser les dynamiques de dénudation ou de dégradation des surfaces, notamment dans des contextes méditerranéens soumis à des contraintes climatiques fortes.

L'utilisation conjointe de ces indices complétés par leurs moyennes et leurs écart-types permettent ainsi de couvrir un large spectre de conditions de surface, allant de la végétation dense aux surfaces minérales et urbanisées, et de distinguer les réponses biophysiques liées aux conditions climatiques interannuelles d'éventuelles transformations structurelles du territoire.

9.2 – Analyse de l'évolution du NDVI sur la période 2010–2025

L'analyse de l'indice de végétation normalisé (NDVI) sur la période 2010–2025 met en évidence une forte stabilité structurelle de l'organisation spatiale de la couverture végétale à l'échelle du territoire de la réserve de biosphère (fig. 83 et 84). Les cartes annuelles, ainsi que la carte moyenne issue de l'ensemble des dates disponibles, révèlent une distribution cohérente et récurrente des valeurs de NDVI, fortement conditionnée par les grands ensembles paysagers (massifs forestiers, vallées, plateaux agricoles, secteurs urbanisés).

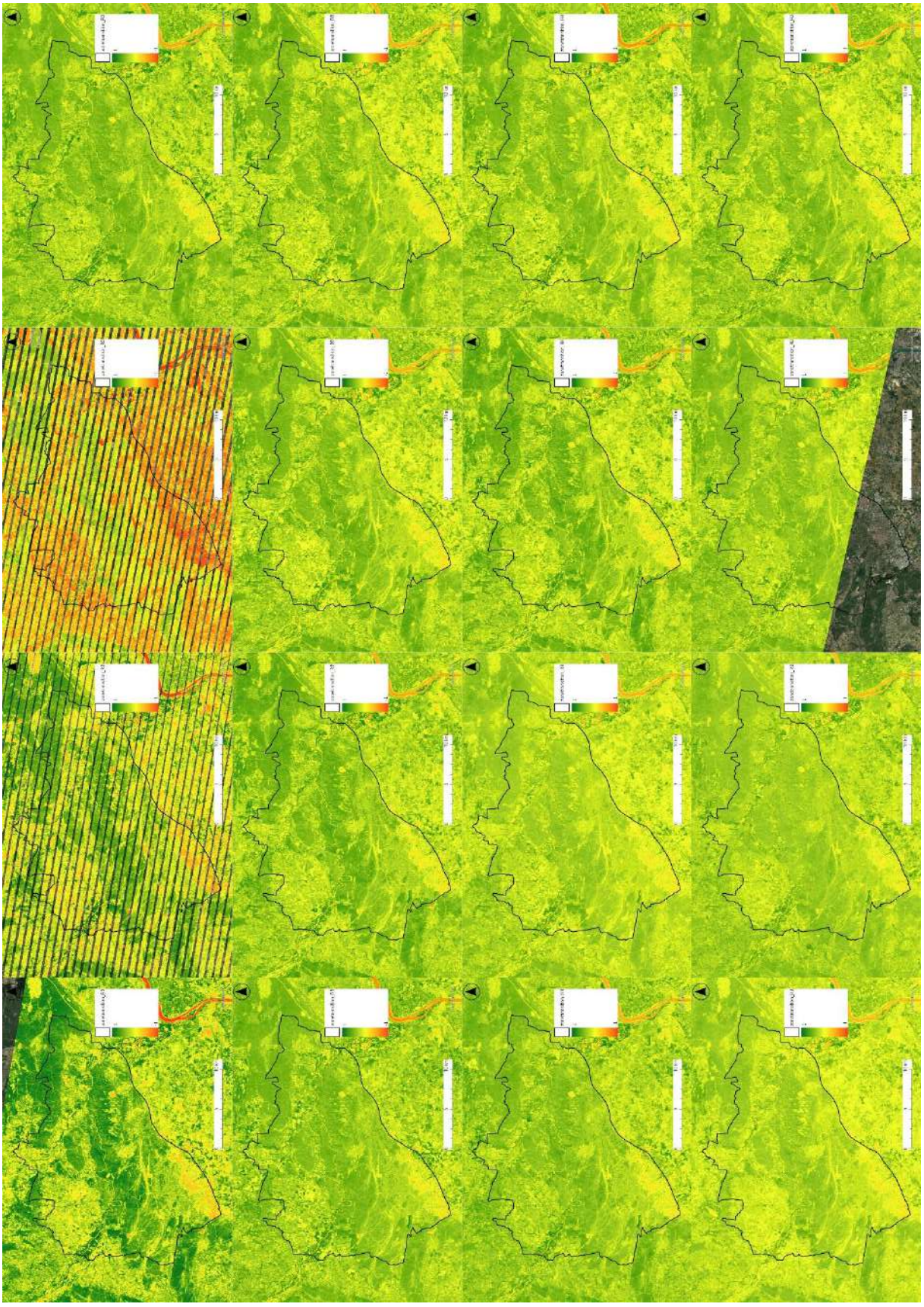


Figure 83 - Organisation spatiale de l'indice de végétation NDVI estival de 2010 (en haut à gauche) à 2025 (en bas à droite) (source : Landsat)

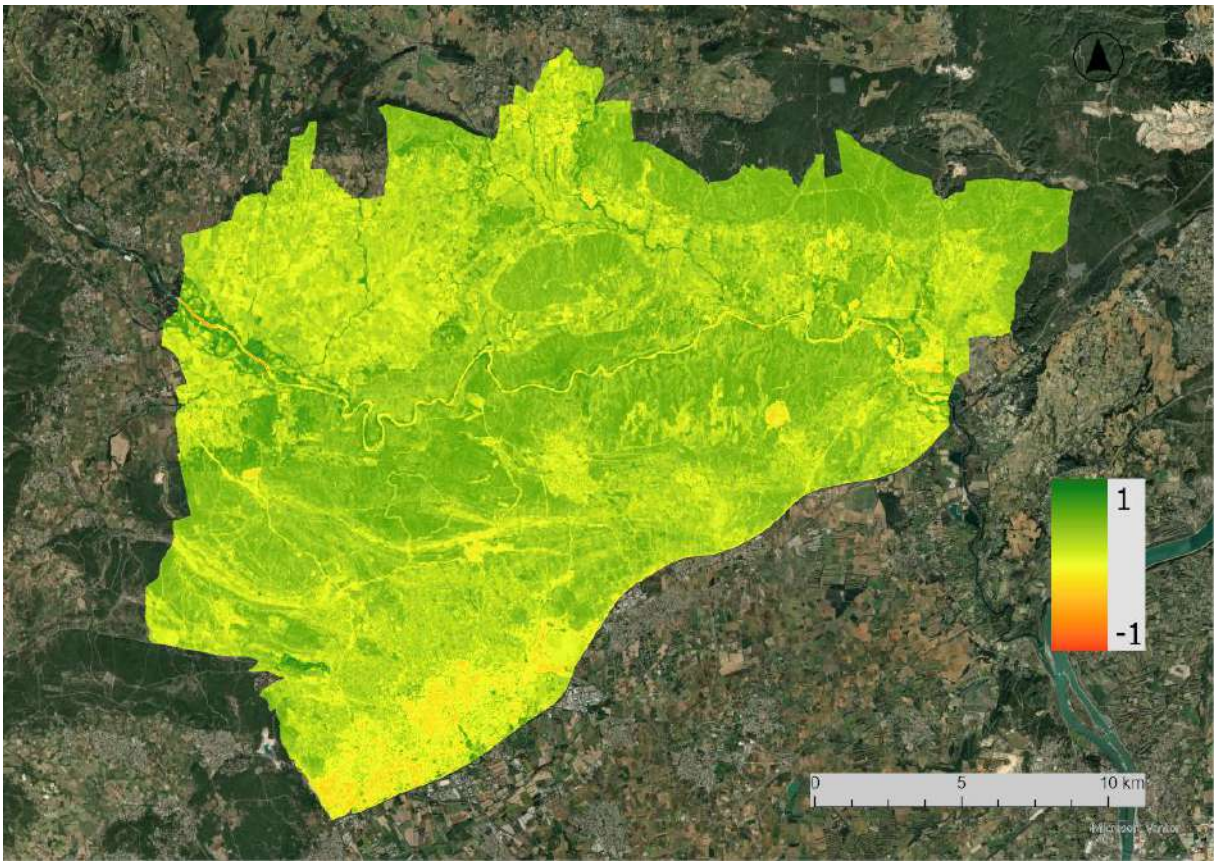


Figure 84 - Indice de végétation NDVI estival moyen de 2010 à 2025

Aucune tendance temporelle nette – à la hausse ou à la baisse – n'est détectée sur la période étudiée. Les tests exploratoires de tendance, tout comme l'inspection visuelle des chroniques spatialisées, ne mettent pas en évidence de signal d'évolution progressive, traduisant une transformation durable de l'occupation du sol ou de la structure de la couverture végétale. Ce résultat suggère une relative stabilité des usages et des formations végétales, en cohérence avec le statut de protection et les dynamiques territoriales connues du site.

En revanche, cette stabilité moyenne masque une variabilité interannuelle marquée, clairement révélée par l'analyse de l'écart-type du NDVI (fig. 85). Les valeurs élevées d'écart-type se concentrent principalement sur les zones de mosaïques agricoles, les interfaces forêt–agriculture et certains secteurs de transition paysagère, tandis que les massifs forestiers continus présentent une variabilité plus faible. Cette distribution spatiale indique que les fluctuations observées du NDVI sont moins liées à des changements structurels qu'à une sensibilité différenciée des couverts végétaux aux conditions climatiques annuelles.

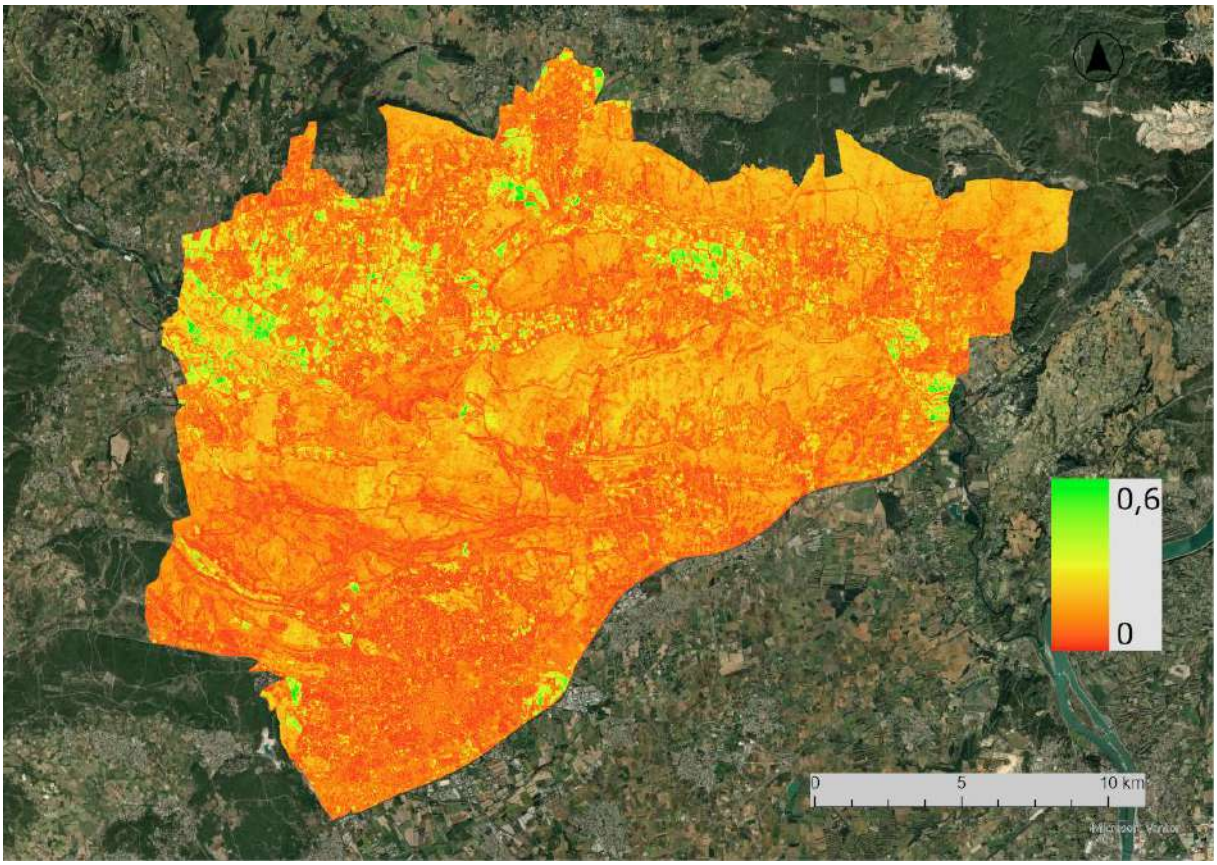


Figure 85 – Ecart-type de l'indice de végétation NDVI estival de 2010 à 2025

Les années contrastées en termes de précipitations, de sécheresse estivale et de bilan hydrique se traduisent ainsi par des réponses marquées du NDVI, sans pour autant modifier durablement l'organisation spatiale du signal. Le NDVI apparaît donc ici comme un **indicateur de réactivité climatique** plutôt que comme un marqueur de transformation des usages du sol. Cette lecture est cohérente avec les résultats obtenus précédemment sur les températures de surface (LST – chapitre 6) et sur le fonctionnement hydrologique (chapitre 8), qui soulignent eux aussi une augmentation de la variabilité interannuelle sans rupture franche des régimes moyens.

En synthèse, l'évolution du NDVI sur le territoire de la réserve entre 2010 et 2025 témoigne d'un système végétal globalement stable dans sa structure, mais **de plus en plus dépendant des conditions météorologiques et climatiques annuelles**, en particulier dans les espaces déjà soumis à des contraintes hydriques ou à une forte variabilité saisonnière. Ce constat constitue une base solide pour l'analyse croisée avec les autres indices spectraux (NDMI, UI, NDBaI), qui permettront de préciser les rôles respectifs de l'eau, de l'artificialisation et de la minéralité dans les dynamiques observées.

9.3 – Évolution du NDMI : variabilité hydrique de la végétation et sensibilité climatique

L'indice NDMI (Normalized Difference Moisture Index) permet d'appréhender les variations du contenu en eau de la végétation et des sols superficiels, en combinant les bandes

proche infrarouge (NIR) et infrarouge à ondes courtes (SWIR – fig. 86). À la différence du NDVI, davantage centré sur l'activité photosynthétique, le NDMI est particulièrement sensible aux conditions hydriques récentes et aux stress liés au déficit en eau.

Les cartes annuelles du NDMI, produites pour la période 2010–2025 à partir des mêmes images Landsat estivales que pour la LST et le NDVI, révèlent une forte variabilité interannuelle, mais aucune trajectoire directionnelle nette à l'échelle de la période étudiée. Les contrastes observés d'une année à l'autre apparaissent avant tout corrélés aux conditions climatiques saisonnières (printemps plus ou moins humides, intensité et précocité des sécheresses estivales), plutôt qu'à des transformations structurelles du couvert végétal.

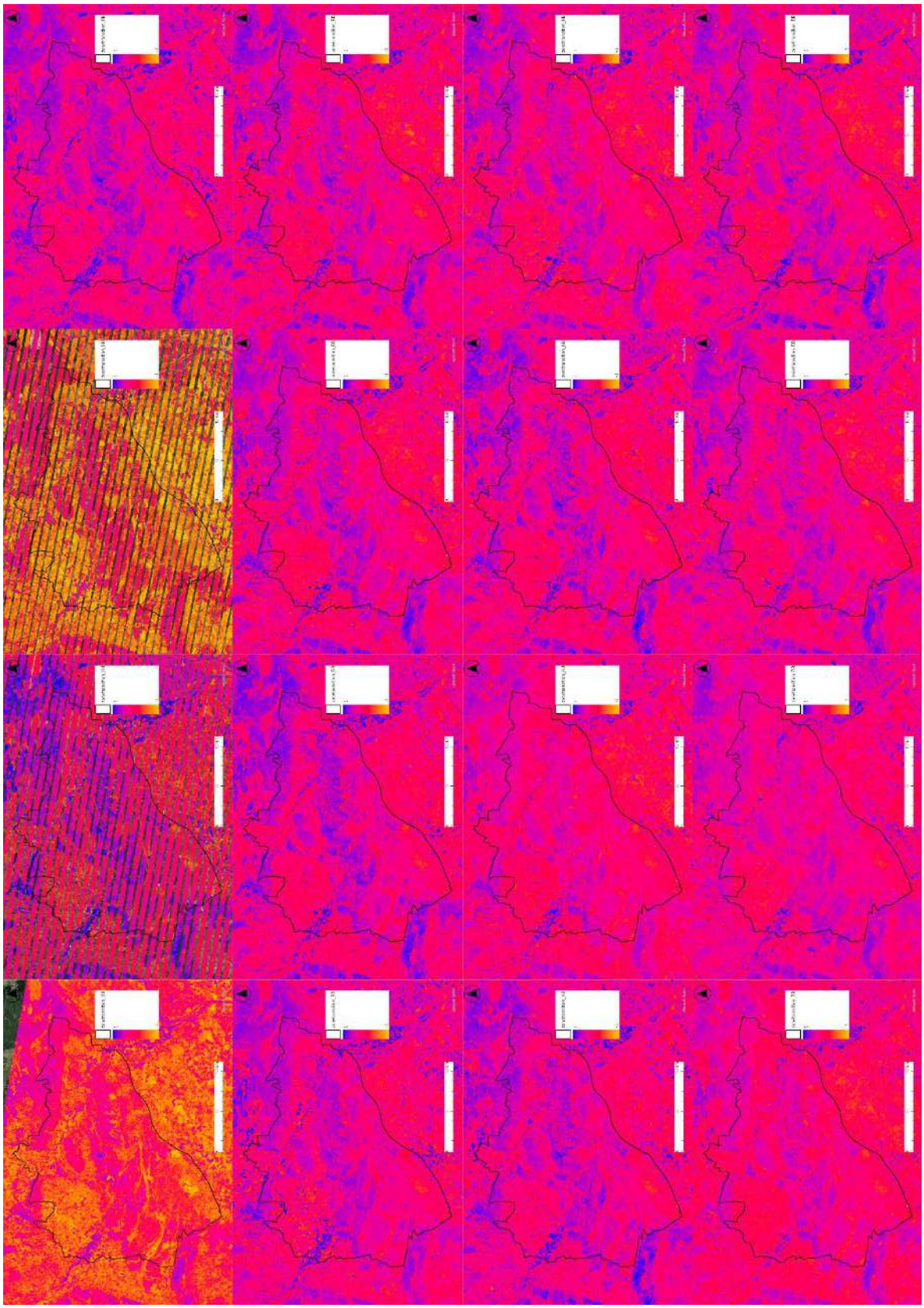


Figure 86 - Organisation spatiale de l'indice d'humidité des sols estival NDMI de 2010 (en haut à gauche) à 2025 (en bas à droite) (source : Landsat)

La mosaïque temporelle du NDMI met en évidence une organisation spatiale relativement stable des zones plus humides et plus sèches :

- les fonds de vallées, ripisylves et secteurs en contact avec les grands axes hydrologiques conservent des valeurs de NDMI systématiquement plus élevées ;
- les plateaux, garrigues et secteurs à sols peu profonds présentent des valeurs plus faibles et une sensibilité accrue aux conditions de sécheresse estivale.

La carte moyenne du NDMI sur l'ensemble de la période confirme cette structuration territoriale, suggérant un fonctionnement hydrique récurrent du système sol–végétation (fig. 87). Elle ne met pas en évidence de dégradation progressive ou de dessèchement généralisé, mais plutôt un équilibre dynamique fortement contraint par le contexte climatique méditerranéen.

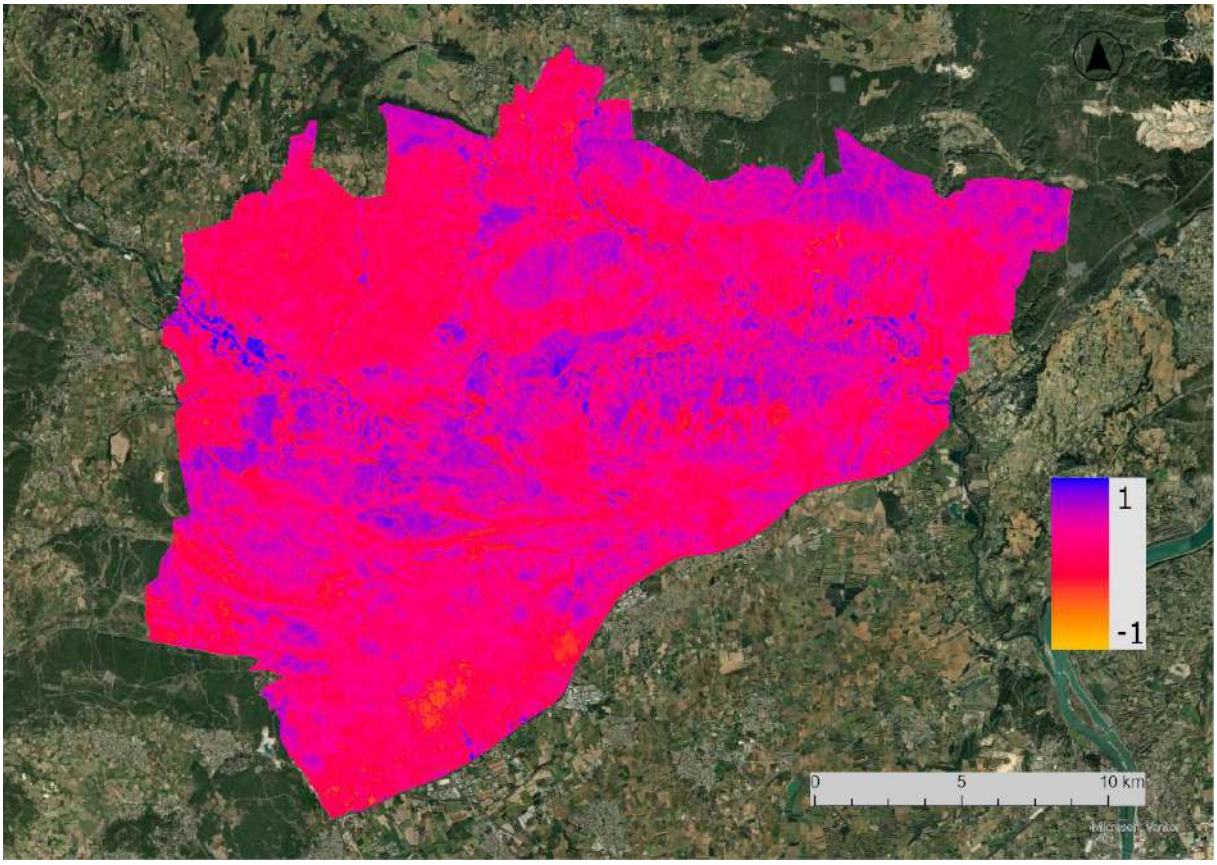


Figure 87 - Indice d'humidité des sols estival NDMI moyen de 2010 à 2025

L'analyse de l'écart-type du NDMI apporte toutefois un éclairage essentiel (fig. 88). Les zones affichant les plus fortes variabilités correspondent principalement :

- aux interfaces entre milieux agricoles et naturels,
- aux secteurs de transition topographique,
- et aux espaces végétalisés sensibles aux déficits hydriques rapides (prairies, cultures, formations herbacées).

Ces espaces apparaissent comme les plus réactifs aux fluctuations climatiques interannuelles, traduisant une **vulnérabilité hydrique fonctionnelle** plutôt qu'un changement d'occupation du sol. Ainsi, à l'image du NDVI, le NDMI révèle un territoire **stable dans sa structure**, mais **hautement dépendant des conditions météorologiques annuelles**, avec des réponses rapides aux épisodes secs ou humides. Cette lecture conforte l'idée que, sur la période considérée, les dynamiques observées relèvent davantage d'une **variabilité climatique accrue** que d'une transformation durable des milieux.

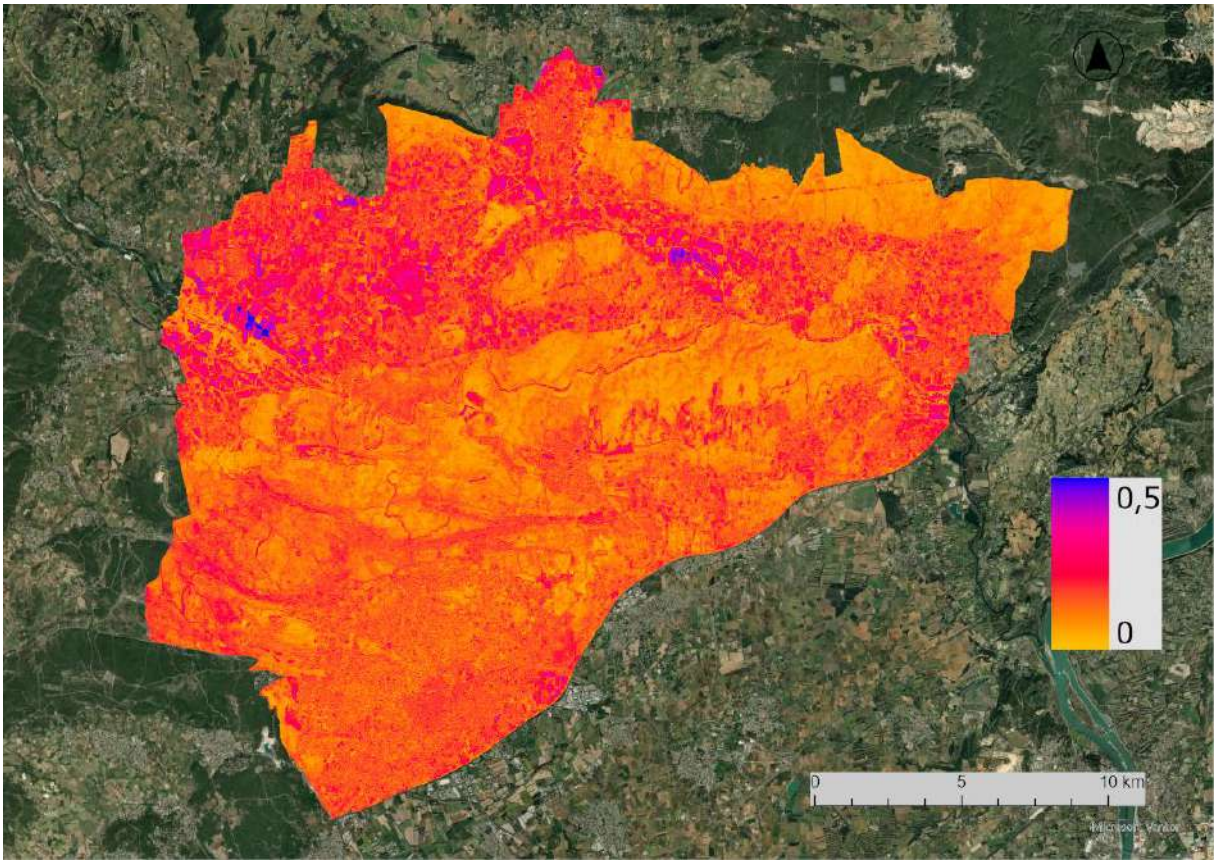


Figure 88 - Ecart-type de l'indice d'humidité des sols estival NDMI de 2010 à 2025

9.4 – Évolution spatio-temporelle de l'indice d'urbanisation (UI)

L'analyse spatio-temporelle de l'indice d'urbanisation (UI) sur la période 2010–2025 met en évidence une **forte stabilité structurelle des surfaces artificialisées** à l'échelle du territoire de la réserve de biosphère (fig. 89). La mosaïque annuelle révèle des motifs spatiaux remarquablement constants d'une année à l'autre, traduisant l'absence de dynamiques d'urbanisation rapides ou de ruptures majeures dans l'occupation du sol sur la période étudiée.

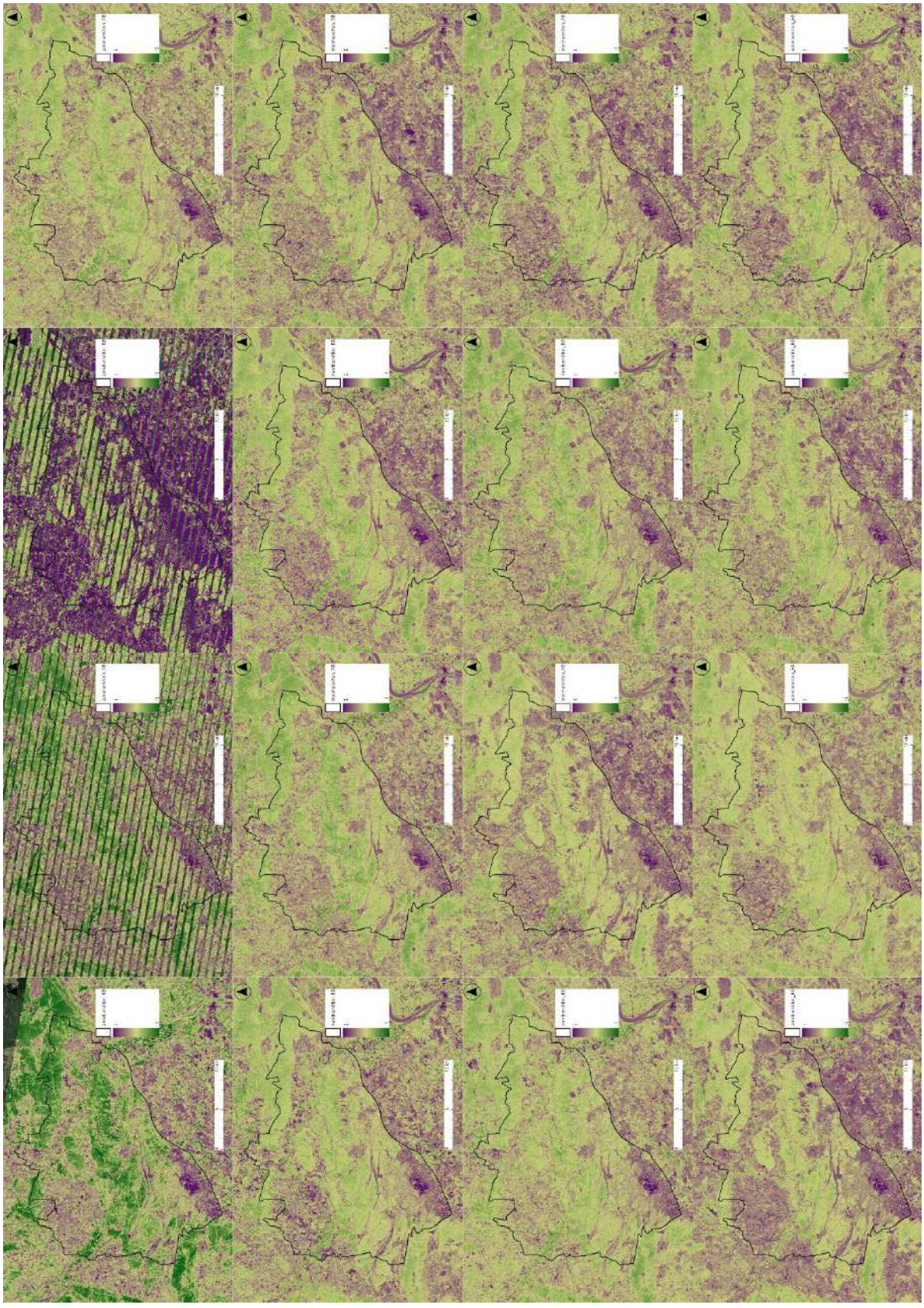


Figure 89 - Organisation spatiale de l'indice d'urbanisation estival UI de 2010 (en haut à gauche) à 2025 (en bas à droite) (source : Landsat)

Les valeurs élevées de l'UI se concentrent de manière persistante dans les secteurs urbanisés et périurbains situés en périphérie du territoire, en particulier le long des principaux axes de circulation et à proximité des pôles urbains régionaux (fig. 90). À l'inverse, le cœur du territoire de la réserve, majoritairement composé de milieux naturels et semi-naturels, présente des valeurs faibles et homogènes de l'indice, confirmant le caractère peu artificialisé et relativement préservé de ces espaces.

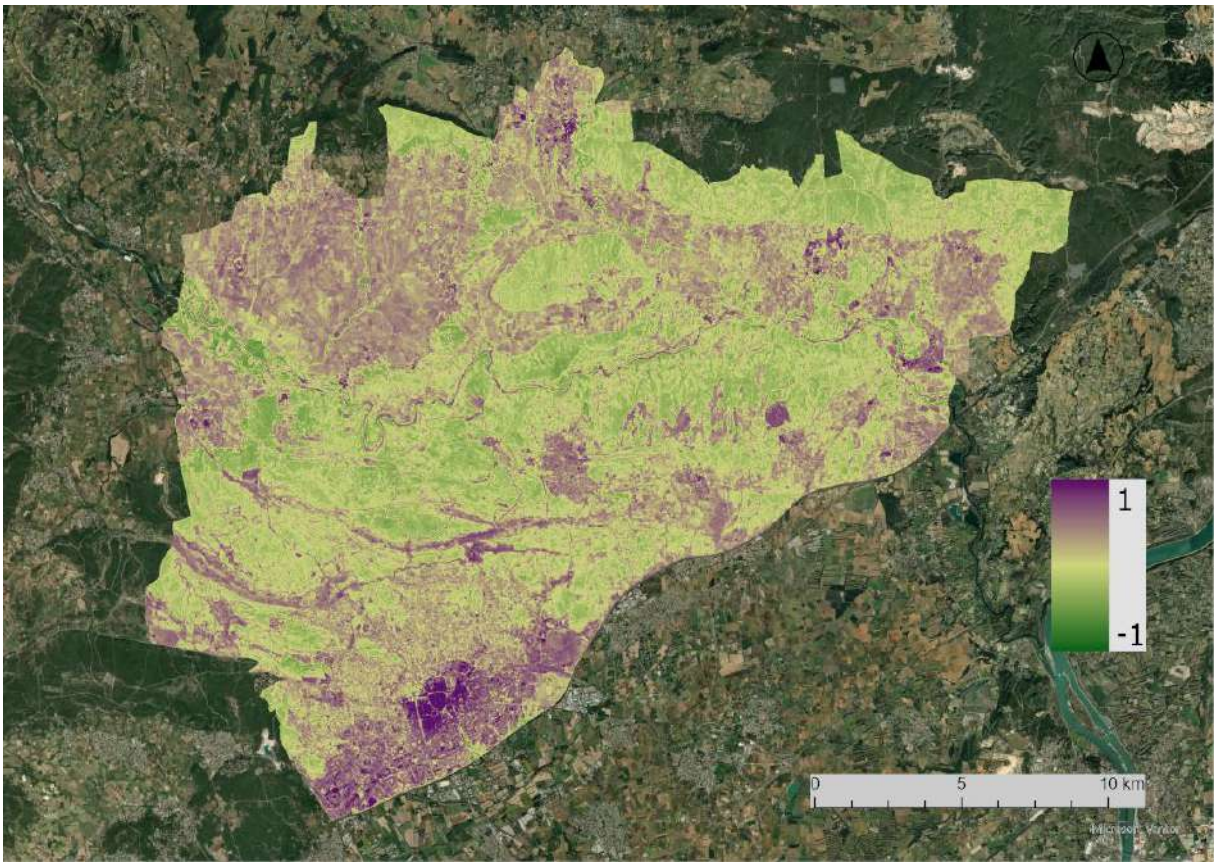


Figure 90 - Indice d'urbanisation estival moyen (UI) de 2010 à 2025

Les fluctuations interannuelles observées dans l'UI restent limitées et spatialement diffuses. Elles ne traduisent pas des processus d'urbanisation progressifs mais relèvent plutôt de variabilités liées aux conditions d'acquisition des images satellitaires (géométrie d'éclairement, humidité des sols, phénologie de la végétation, état des surfaces agricoles) susceptibles d'influencer la réponse spectrale des surfaces. Cette interprétation est confortée par l'absence de tendance significative mise en évidence par les analyses statistiques temporelles.

L'écart-type de l'UI souligne néanmoins certains secteurs plus sensibles aux variations spectrales, notamment dans les zones de transition entre espaces agricoles, friches, sols nus temporaires et bâti diffus (fig. 91). Ces espaces intermédiaires apparaissent comme les principaux contributeurs à la variabilité de l'indice, sans pour autant traduire une artificialisation durable ou irréversible.

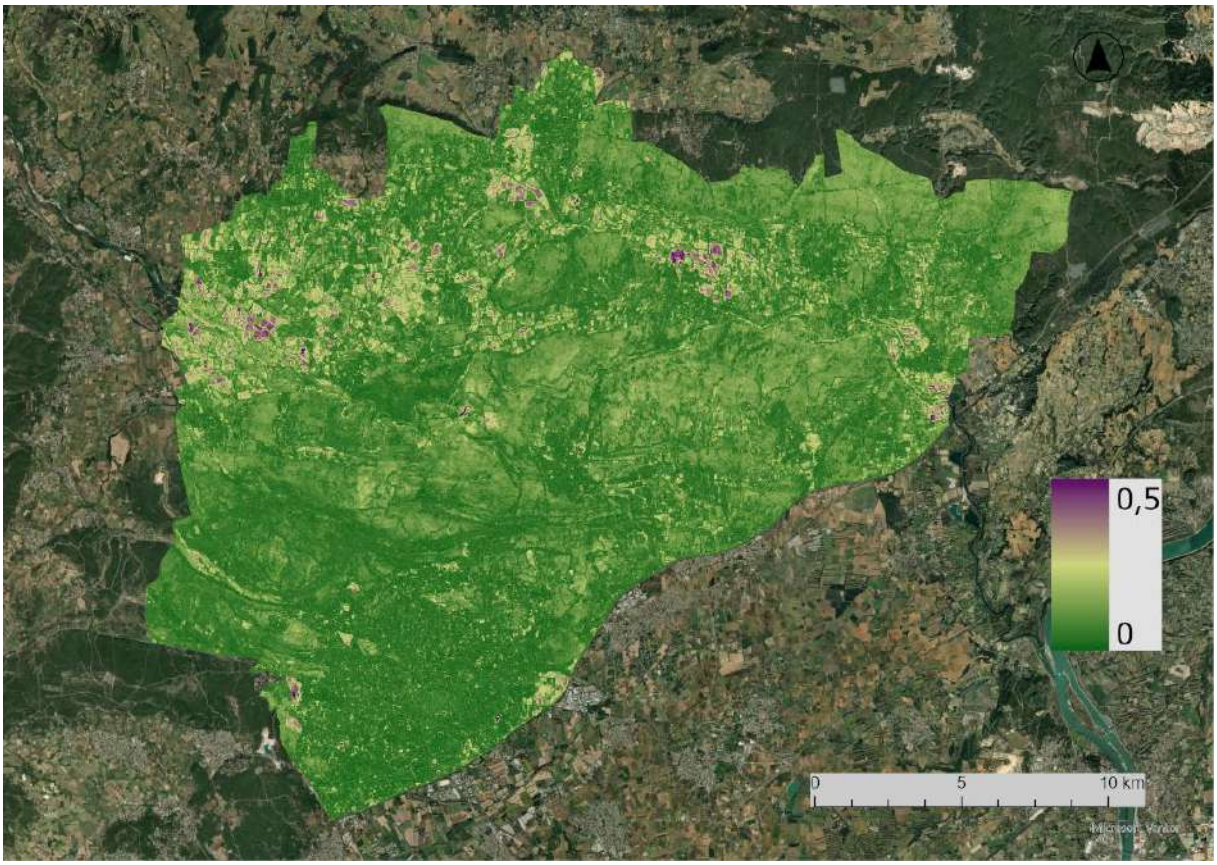


Figure 91 - Ecart-type de l'indice d'urbanisation estival (UI) de 2010 à 2025

Dans ce contexte, l'UI se révèle moins comme un indicateur de changement rapide que comme un marqueur de structure territoriale, reflétant la stabilité des formes urbaines et l'absence de pression anthropique forte au sein du périmètre de la réserve. Cette relative inertie contraste avec la variabilité observée pour d'autres indices spectraux (NDVI, NDMI) et pour les indicateurs climatiques, soulignant que les dynamiques environnementales récentes du territoire sont avant tout pilotées par le climat et les conditions hydro-météorologiques, davantage que par des transformations profondes de l'occupation du sol.

9.5 – Analyse spatio-temporelle du NDBaI

Le NDBaI (*Normalized Difference Bareness Index*) vise à caractériser les surfaces nues ou faiblement végétalisées, telles que les sols minéraux, affleurements rocheux, terrains agricoles à nu ou espaces dégradés (fig. 92). Dans des contextes méditerranéens soumis à de fortes contraintes climatiques, cet indice constitue un outil pertinent pour analyser les dynamiques de dénudation des sols, les contrastes saisonniers persistants et, plus largement, les formes de pression exercées sur les surfaces végétalisées.

La mosaïque temporelle du NDBaI sur la période 2010–2025 met en évidence une structuration spatiale très marquée des surfaces à dominante minérale, relativement stable dans le temps. Les valeurs élevées de l'indice se concentrent principalement dans les zones de plateaux, de piémonts et d'espaces agricoles ouverts, tandis que les valeurs plus faibles correspondent aux secteurs plus densément végétalisés, notamment les massifs forestiers et les fonds de vallée. Cette organisation spatiale traduit avant tout des contrastes structurels liés à l'occupation du sol et aux conditions biophysiques, plutôt que des transformations rapides.

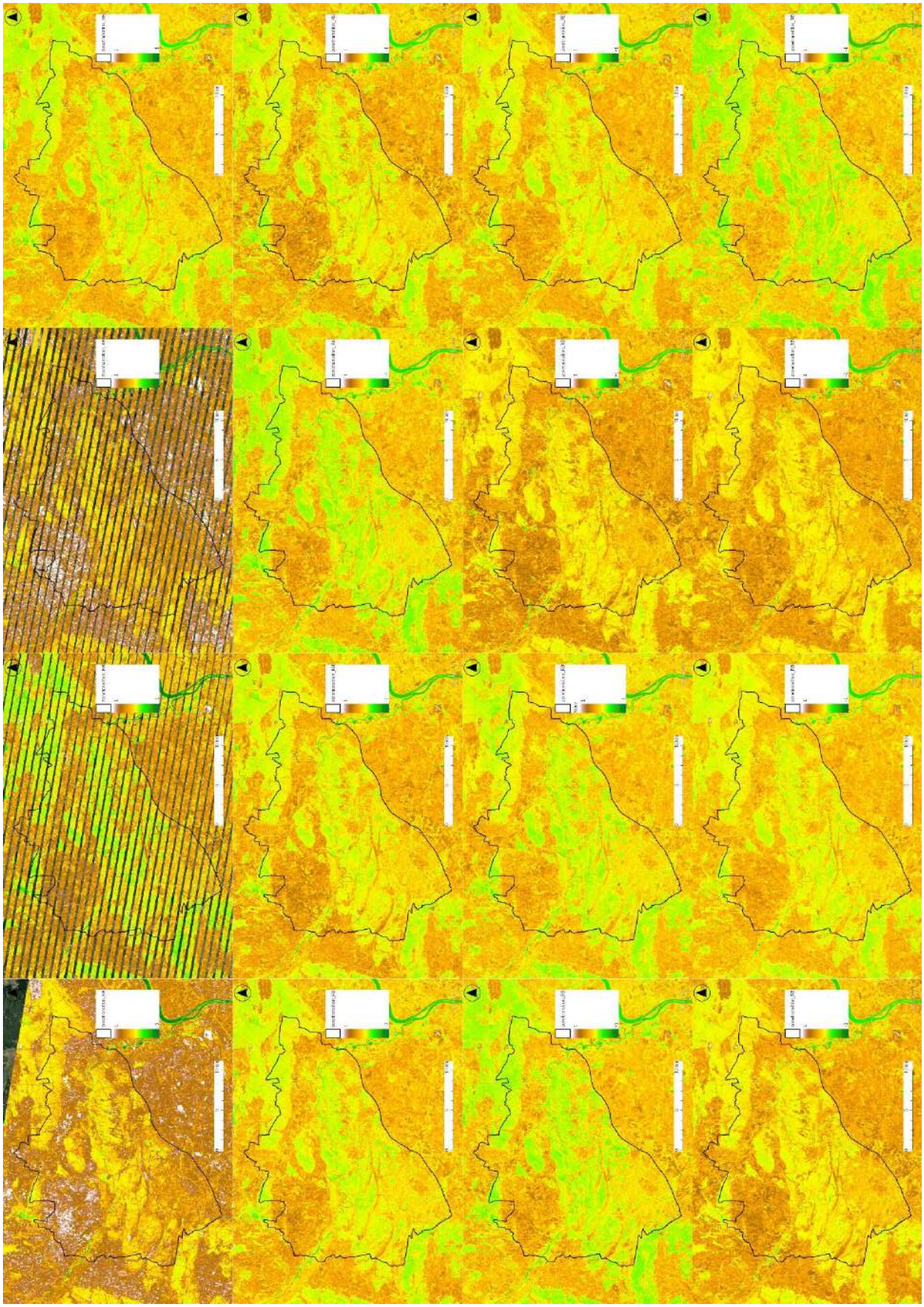


Figure 92 - Organisation spatiale de l'indice de sols nus estival NDBaI de 2010 (en haut à gauche) à 2025 (en bas à droite) (source : Landsat)

L'analyse de la moyenne du NDBaI confirme cette stabilité globale, en révélant une dominance de valeurs intermédiaires à élevées sur une large partie du territoire, caractéristique d'un paysage largement minéral ou faiblement couvert (fig. 93). À l'inverse, les zones à faible NDBaI apparaissent de manière cohérente et continue dans les secteurs forestiers et ripariens, soulignant le rôle structurant de la végétation pérenne.

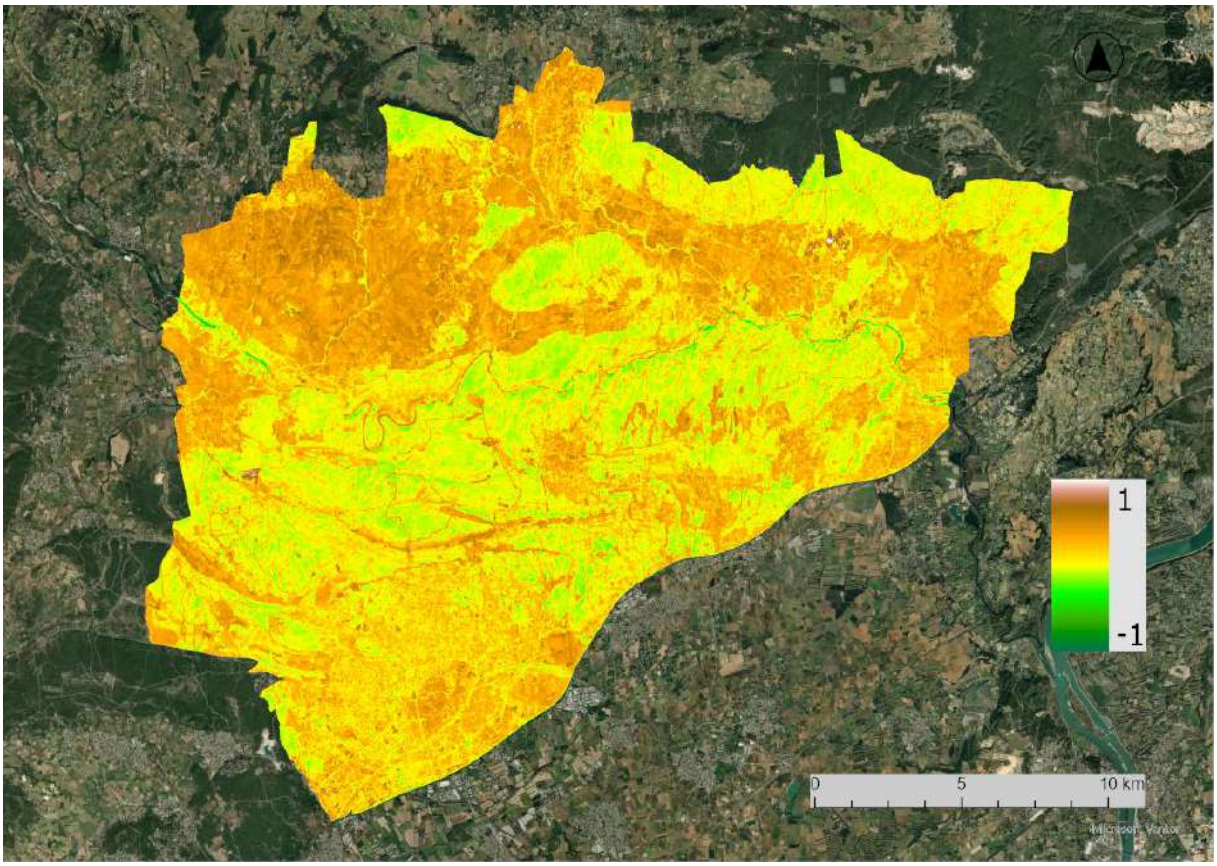


Figure 93 - Indice de sol nu estival moyen (NDBaI) de 2010 à 2025

L'écart-type du NDBaI reste globalement modéré sur l'ensemble de la période, indiquant une variabilité temporelle limitée (fig. 95). Les secteurs présentant une variabilité plus marquée correspondent principalement aux espaces agricoles et aux zones de transition, où l'alternance entre sols nus et couverts végétaux génère des fluctuations interannuelles perceptibles. En revanche, les espaces forestiers et les zones minérales permanentes montrent une grande stabilité du signal.

Ainsi, le NDBaI renseigne efficacement sur la persistance et la distribution spatiale des surfaces nues ou faiblement végétalisées, ainsi que sur leur variabilité temporelle limitée. Ces résultats soulignent le caractère principalement structurel des processus de dénudation observés à l'échelle du territoire étudié, et complètent utilement les analyses menées à partir d'indices davantage centrés sur la végétation ou l'urbanisation.

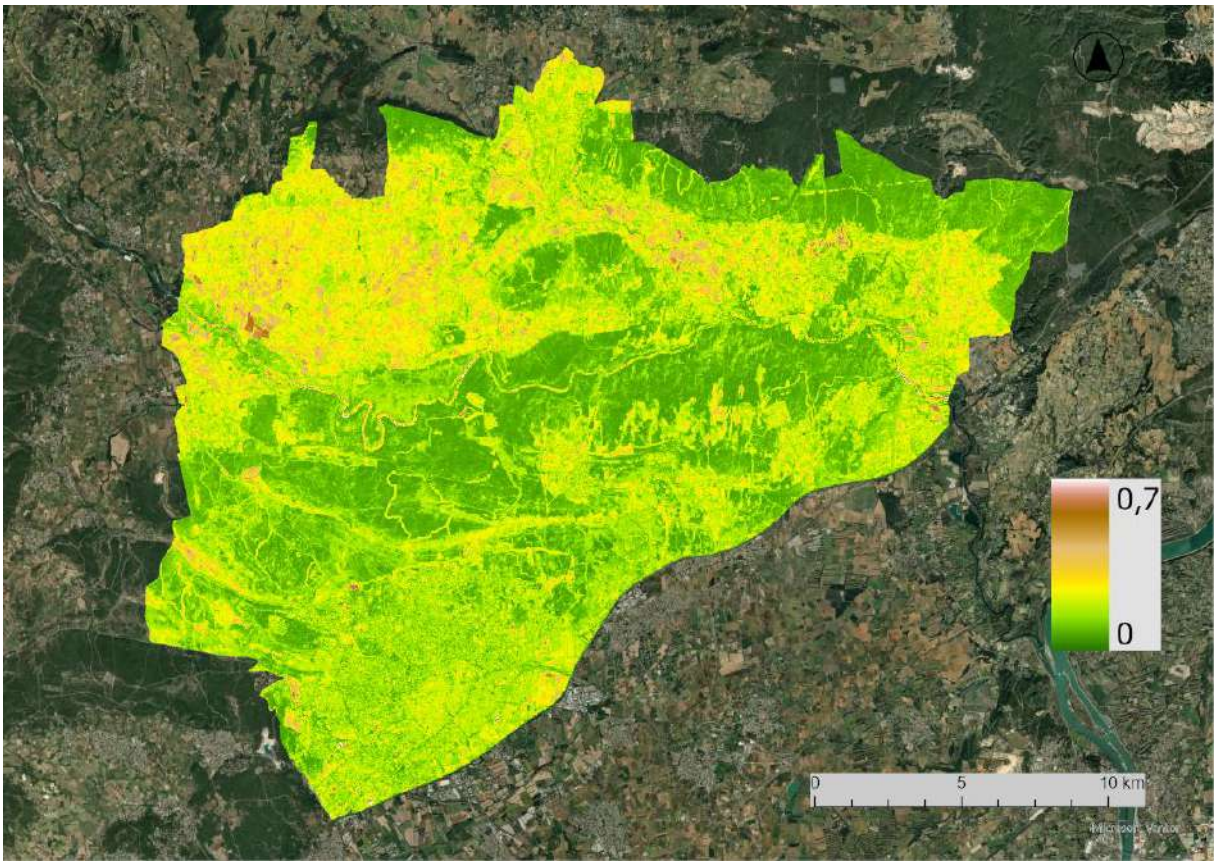


Figure 94 - Ecart-type de l'indice de sol nu estival (NDBaI) de 2010 à 2025

9.6 Exploitation des outils d'analyse spatio-temporelle d'ArcGIS et limites observées

En complément des analyses raster menées sur les indices d'urbanisation (UI) et de zones bâties (NDBaI), plusieurs outils d'analyse spatio-temporelle proposés par ArcGIS Pro ont été mobilisés afin d'identifier d'éventuelles tendances ou ruptures significatives dans l'évolution de l'artificialisation. Parmi ceux-ci figurent notamment les outils de détection de tendances temporelles, d'analyse de points chauds spatio-temporels et de structuration des données sous forme de *Space Time Cube*.

Toutefois, malgré différents paramétrages (résolution spatiale, pas de temps annuel, emprise d'étude et seuils statistiques), ces traitements n'ont pas permis de mettre en évidence des évolutions spatio-temporelles statistiquement significatives. Les résultats indiquent une forte stabilité globale des signaux urbains sur la période étudiée, en particulier dans les espaces déjà urbanisés, ainsi qu'une variabilité trop diffuse et progressive dans les zones de transition pour être captée par des approches basées sur la détection de ruptures ou de concentrations spatio-temporelles.

Ces limites soulignent à la fois la nature graduelle et continue des dynamiques d'urbanisation sur le territoire étudié et la sensibilité de ces outils à des phénomènes plus brutaux ou fortement contrastés. Elles confirment ainsi la pertinence d'une approche fondée sur l'analyse

diachronique d'indices spectraux, mieux adaptée à la mise en évidence de dynamiques lentes et diffuses.

9.7- Discussion de synthèse – Apports croisés des indices spectraux

L'analyse conjointe des quatre indices spectraux mobilisés dans ce travail — NDVI, NDMI, UI et NDBaI — permet d'appréhender de manière fine et complémentaire les dynamiques spatio-temporelles du territoire étudié. Chacun de ces indices renseigne une facette spécifique des systèmes de surface, tandis que leur lecture croisée offre une compréhension intégrée des interactions entre végétation, humidité, artificialisation et minéralité des sols.

Le NDVI constitue un indicateur central de l'état et de la dynamique de la couverture végétale. Son analyse met en évidence des contrastes spatiaux marqués entre les secteurs forestiers, les espaces agricoles et les zones artificialisées, ainsi qu'une variabilité interannuelle liée aux conditions climatiques et aux pratiques d'occupation du sol. Le NDVI apparaît ainsi particulièrement pertinent pour caractériser la réponse de la végétation aux contraintes environnementales, mais aussi pour identifier les zones les plus sensibles aux épisodes de stress.

Le NDMI complète cette lecture en apportant une information spécifique sur le contenu en eau de la végétation et des sols superficiels. Là où le NDVI renseigne principalement la biomasse et la vigueur végétale, le NDMI permet de distinguer des situations de stress hydrique, parfois peu visibles dans les seuls signaux de verdure. La combinaison NDVI–NDMI s'avère ainsi essentielle pour différencier une baisse de productivité végétale liée à un déficit hydrique d'une simple variabilité phénologique ou structurelle, ce qui est particulièrement crucial dans un contexte méditerranéen soumis à des sécheresses récurrentes.

L'Urban Index (UI) apporte, quant à lui, une lecture spécifique des processus d'artificialisation. Contrairement aux indices centrés sur la végétation, l'UI met en évidence la distribution spatiale et l'évolution des surfaces bâties et imperméabilisées. Son analyse révèle une forte stabilité spatiale de l'urbanisation existante, ainsi que des dynamiques (très) localisées d'extension ou de densification. L'UI se distingue par sa capacité à isoler le signal urbain de celui des sols nus ou agricoles, souvent confondus dans les analyses basées uniquement sur le NDVI.

Le NDBaI complète ce dispositif en ciblant explicitement les surfaces nues ou faiblement végétalisées. Il permet d'identifier les espaces minéraux, qu'ils soient d'origine naturelle (affleurements rocheux, plateaux calcaires) ou liés aux pratiques anthropiques (sols agricoles à nu, terrains dégradés). À la différence de l'UI, le NDBaI ne renseigne pas l'urbanisation en tant que telle, mais plutôt la minéralité et la variabilité des couvertures non végétalisées. Sa faible variabilité temporelle sur les surfaces structurellement minérales contraste avec les fluctuations observées dans les espaces agricoles, soulignant l'intérêt de cet indice pour distinguer dynamiques structurelles et variations conjoncturelles.

Pris isolément, chacun de ces indices présente des limites interprétatives. En revanche, leur mobilisation conjointe permet de lever de nombreuses ambiguïtés. Par exemple, une baisse du NDVI peut correspondre aussi bien à une artificialisation (confirmée par l'UI), à une dénudation

temporaire des sols (mise en évidence par le NDBaI) ou à un stress hydrique (révélé par le NDMI). Cette lecture croisée renforce considérablement la robustesse de l'interprétation spatiale et temporelle des dynamiques observées.

En définitive, l'approche multi-indices adoptée dans ce travail offre une vision intégrée des transformations des surfaces, en articulant processus biophysiques et anthropiques. Elle constitue un cadre méthodologique solide pour l'analyse des territoires méditerranéens, où la complexité des interactions entre climat, végétation, usages du sol et urbanisation nécessite des outils capables de dépasser une lecture mono-indicateur.

L'analyse croisée des indices spectraux de surface (NDVI, NDMI, UI et NDBaI) met en évidence une caractéristique centrale du territoire étudié : la relative stabilité structurelle des occupations du sol, combinée à une forte variabilité interannuelle des états de surface, principalement pilotée par les conditions climatiques.

Contrairement à ce que pourrait suggérer une lecture exclusivement centrée sur les changements d'occupation du sol, les résultats montrent que les signaux spectro-temporels observés traduisent davantage des réponses fonctionnelles des surfaces — végétation, humidité, sols nus — que de véritables transformations structurelles du territoire. Les fluctuations du NDVI et du NDMI témoignent ainsi de la sensibilité des couverts végétaux aux aléas hydroclimatiques, tandis que la stabilité de l'UI et du NDBaI souligne la permanence des formes d'artificialisation et des grands ensembles minéraux.

Ces résultats font écho aux chapitres précédents consacrés au climat, aux températures de surface (LST), aux ressources en eau souterraine et au risque de feu de forêt, en soulignant un point commun majeur : le changement climatique se manifeste ici moins par une transformation rapide des paysages que par une intensification de leur variabilité et de leur vulnérabilité fonctionnelle.

Cette convergence des diagnostics, issus d'approches et d'indicateurs distincts, plaide pour une lecture intégrée des dynamiques territoriales, attentive non seulement aux changements visibles, mais aussi aux déséquilibres progressifs, aux seuils de fonctionnement et aux tensions croissantes entre climat, milieux et usages. Elle ouvre naturellement la voie à une conclusion générale visant à mettre en perspective l'ensemble des résultats et à interroger les enjeux d'adaptation et de gestion durable du territoire étudié dans un contexte de changement climatique.

Conclusion générale : un territoire méditerranéen confronté à l'intensification des contraintes climatiques

Ce diagnostic climatique de la **réserve de biosphère des gorges du Gardon** s'est appuyé sur une approche résolument intégrée, combinant **analyses climatiques historiques**, **projections climatiques**, **indicateurs bioclimatiques**, **températures de surface**, **typologies territoriales**, **données de risques naturels** et **indices spectraux issus de la télédétection**. L'objectif n'était pas uniquement de documenter le changement climatique, mais d'en qualifier les **formes**, les **rythmes** et les **implications territoriales concrètes**.

L'ensemble des résultats converge vers un constat central : **le changement climatique est déjà pleinement à l'œuvre sur le territoire**, non pas tant sous la forme de transformations brutales et visibles du paysage, mais à travers une **intensification progressive des contraintes thermiques, hydrologiques et écologiques**, et une **augmentation de la variabilité interannuelle**, qui complexifie la gestion des milieux et des usages.

10.1- Un réchauffement avéré, dissymétrique et fonctionnellement structurant

L'analyse climatique historique met en évidence une **hausse nette et statistiquement significative des températures**, particulièrement marquée pour les **températures maximales**, la **fréquence des fortes chaleurs**, les **nuits chaudes** et les **indicateurs de vagues de chaleur**. Ce réchauffement n'est pas homogène : il se caractérise par une **forte dissymétrie saisonnière**, avec un signal estival beaucoup plus marqué que le signal hivernal.

Cette dissymétrie se retrouve dans l'analyse du **confort thermique (UTCI)**. Les résultats montrent une **dégradation rapide et continue du confort estival**, avec une augmentation des situations de **stress thermique fort à très fort**, tandis que l'hiver évolue davantage vers des conditions plus douces, sans basculement vers des régimes de stress comparables. Le signal thermique est donc **asymétrique**, renforçant les tensions estivales sur les milieux, les populations et les usages.

10.2- Des trajectoires climatiques contrastées selon les scénarios

Les projections climatiques issues de **DRIAS** confirment ces tendances et permettent d'en apprécier la portée à moyen et long terme. Sous le **RCP 4.5**, le territoire s'inscrit dans une **continuité du climat méditerranéen**, avec une accentuation des contraintes thermiques mais sans rupture majeure des régimes climatiques de fond. En revanche, le **RCP 8.5** révèle des **basculements climatiques structurels**, mis en évidence par l'analyse des **types de climat de Köppen-Geiger** à l'aide de normales glissantes.

Cette dernière approche montre un passage progressif du **climat méditerranéen (Csa)** vers des climats **subtropicaux (Cwa puis Cfa)**, non pas sous l'effet exclusif de la température, mais principalement en raison de la **perte de la sécheresse estivale caractéristique**. Ce résultat souligne

un point essentiel : **le changement climatique futur ne se résume pas à un réchauffement**, mais à une **reconfiguration des régimes hydroclimatiques**, aux implications écologiques et territoriales profondes.

10.3- Températures de surface et structures territoriales : un climat local différencié

Le croisement des **températures de surface (LST)** avec les **zones climatiques locales (LCZ)** apporte une lecture fine des **inégalités thermiques spatiales**. Les résultats montrent une organisation thermique fortement liée aux **structures physiques du territoire** : densité bâtie, hauteur des bâtiments, artificialisation, couverture végétale et présence de l'eau.

Les milieux urbanisés et minéralisés présentent systématiquement les **températures de surface les plus élevées**, tandis que les espaces végétalisés et aquatiques jouent un rôle d'**atténuation thermique**, même si leur efficacité relative diminue lors des étés les plus chauds. En hiver, ces contrastes persistent mais sont **nettement atténués**, confirmant le rôle amplificateur de la chaleur estivale. Cette analyse confirme que le climat local n'est pas un simple reflet du climat régional : il est **fabriqué par le territoire lui-même**, par ses formes, ses usages et ses choix d'aménagement.

10.4- Ressources en eau et risques de feux de forêt : vers une gestion sous contrainte accrue

L'étude des **niveaux de nappes** montre l'absence de tendance linéaire à long terme, mais met en évidence une **variabilité interannuelle de plus en plus marquée**, avec une alternance rapide entre années excédentaires et déficitaires. Cette instabilité hydrologique constitue un enjeu majeur pour les **milieux aquatiques**, les **usages touristiques** et les **écosystèmes dépendants des débits d'étiage**.

Le diagnostic sur les **feux de forêt**, fondé sur les données **BDIFF** et les indicateurs **NORIF**, complète ce tableau en montrant que le territoire est déjà exposé à un **risque structurel**, principalement concentré sur les **maquis et garrigues**, et appelé à s'intensifier à moyen et long terme sous l'effet combiné de la chaleur, de la sécheresse et de la disponibilité du combustible.

10.5- Indices spectraux : stabilité structurelle, variabilité fonctionnelle

Enfin, l'analyse des **indices spectraux de surface** (NDVI, NDMI, UI, NDBaI) révèle un résultat particulièrement éclairant : **l'absence de transformation structurelle majeure des occupations du sol** sur la période étudiée. Ni l'urbanisation, ni la dénudation des sols ne montrent de tendance significative.

En revanche, ces indices mettent en évidence une **forte variabilité interannuelle**, directement corrélée aux conditions climatiques. La végétation et l'humidité des surfaces réagissent fortement aux années sèches ou humides, confirmant que le changement climatique

agit ici principalement comme un **facteur de déstabilisation fonctionnelle**, plus que comme un moteur immédiat de transformation paysagère.

10.6- Enseignements transversaux et enjeux pour l'action

Pris ensemble, ces résultats dessinent un diagnostic clair : **le territoire de la réserve de biosphère des gorges du Gardon n'est pas en mutation brutale, mais en tension croissante**. Le changement climatique s'y manifeste par :

- une **intensification des extrêmes thermiques**,
- une **dégradation du confort thermique estival**,
- une **instabilité hydrologique présentant une très forte variabilité annuelle mais sans présenter de signaux alarmants**,
- une **augmentation des risques liés aux feux de forêts**,

Le changement climatique se manifeste également par une **fragilisation fonctionnelle des milieux**, sans modification massive de leur structure. C'est-à-dire une al**tération progressive de la capacité des milieux à remplir leurs fonctions écologiques, hydrologiques et climatiques**, sous l'effet de contraintes climatiques accrues :

- Fonction hydrologique :

Les milieux aquatiques et rivulaires restent présents, mais leur fonctionnement devient plus irrégulier (alternance d'années très humides et très sèches, étiages plus contraignants), ce qui affecte la continuité écologique, les habitats aquatiques et les usages (canoë, baignade).

- Fonction bioclimatique :

Les espaces végétalisés continuent à jouer un rôle de régulation thermique, mais leur efficacité relative diminue lors des étés extrêmes, comme le montrent la hausse des LST, la variabilité du NDVI et du NDMI et la dégradation du confort thermique estival.

- Fonction écologique :

Les écosystèmes (forêts, garrigues, maquis) ne disparaissent pas, mais deviennent plus sensibles aux stress cumulés (chaleur, sécheresse, incendies), avec une réduction possible de leur résilience face aux chocs répétés.

- Fonction de service (au sens des services écosystémiques) :

Les milieux continuent à fournir des services (refroidissement, loisirs, biodiversité, paysage), mais de manière plus intermittente, plus incertaine, et parfois plus coûteuse à maintenir.

Ces constats plaident pour une stratégie d'adaptation fondée sur la **préservation des régulations naturelles**, la **réduction des vulnérabilités locales**, et une **lecture fine des interactions entre climat, milieux et usages**. Plus que jamais, l'enjeu n'est pas seulement de s'adapter à un

climat plus chaud, mais de gérer un territoire devenu plus variable, plus incertain et plus exigeant en matière d'anticipation.

Références

Allen, C. D., et al., 2010 - A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. Forest Ecology and Management, 259(4), 660–684.

Beck HE, Zimmermann NE, McVicar TR, Vergopolan N, Berg A, Wood EF, 2018. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. Sci Data. 2018 Oct 30;5:180214. doi: 10.1038/sdata.2018.214. Erratum in: Sci Data. 2020 Aug 17;7(1):274. doi: 10.1038/s41597-020-00616-w. PMID: 30375988; PMCID: PMC6207062.

Błażejczyk, K., Broede, P., Fiala, D., Havenith, G., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B. & Kunert, A., 2010. Principles of the New Universal Thermal Climate Index (UTCI) and its Application to Bioclimatic Research in European Scale. Miscellanea Geographica, 14(1), 2010. 91-102. https://doi.org/10.2478/mgrsd-2010-0009

BRL Ingénierie, 2020. *Eau et Climat 3.0 : Préparons l'avenir. Étude de gestion des ressources en eau face au changement climatique – Rapport de phases 1 et 2 : Diagnostic*. Montpellier : BRL Ingénierie.

Cerema, 2025 - Cartographie nationale de données de zones climatiques locales, Exploitation de l'imagerie satellite SPOT 2022

Di Napoli C, Barnard C, Prudhomme C, Cloke HL, Pappenberger, 2021. F. ERA5-HEAT: A global gridded historical dataset of human thermal comfort indices from climate reanalysis. *Geosci. Data J.* 8: 2–10. https://doi.org/10.1002/gdj3.102

Giorgi, F., Lionello, P., 2008 - Climate change projections for the Mediterranean region. Global and Planetary Change, 63(2–3), 90–104.

IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

Kendall, M. G., 1975 - *Rank Correlation Methods*. Griffin, London.

Kottek M., Jürgen Grieser, Christoph Beck, Bruno Rudolf, and Franz Rubel. - 2006. "World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated." Meteorologische Zeitschrift 15 (3): 259–63

Mann, H. B., 1945 - *Nonparametric tests against trend*. Econometrica, 13(3), 245–259.

Morin, X., Roy, J., Sonié, L., & Chuine, I., 2010 - Changes in leaf phenology of three European oak species in response to experimental climate change.

Global Change Biology, 16, 1633–1645.

Quézel, P., Médail, F., 2003 - Ecology and biogeography of Mediterranean ecosystems in the Mediterranean Basin. Elsevier.

Rivaes, R., Rodríguez-González, P. M., Albuquerque, A., Pinheiro, A. N., & Ferreira, M. T., 2012 - Climate change impacts on Mediterranean riparian vegetation. Proceedings IPWE 2012

Sen, P. K. - 1968. *Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau*. Journal of the American Statistical Association, 63(324), 1379–1389.

Stella, J. C., Rodríguez-González, P. M., Dufour, S., & Bendix, J., 2013 - Riparian vegetation research in Mediterranean-climate regions: common patterns and ecological processes. Hydrobiologia, 719, 291–315.

Strohmenger L.; Collet L.; Andréassian V.; Corre L.; Rousset F., 2024 - Thirel G.. Köppen–Geiger climate classification across France based on an ensemble of high-resolution climate projections. Comptes Rendus. Géoscience, Volume 356, pp. 67-82. doi: 10.5802/crgeos.263

Tabacchi, E., Lambs, L., Guilloy, H., Planty-Tabacchi, A. M., Muller, E., & Décamps, H., 2000 - Impacts of riparian vegetation on hydrological processes.

Hydrological Processes, 14(16–17), 2959–2976. https://doi.org/10.1002/1099-1085(200011/12)14:16/17

Ulbrich, U., May, W., Li, L., Lionello, P., Pinto, J. G., & Somot, S. - 2006. *The Mediterranean climate change under global warming*. In P. Lionello, P. Malanotte-Rizzoli & R. Boscolo (Eds.), *Mediterranean* (Developments in Earth and Environmental Sciences, Vol. 4, pp. 399–415). Elsevier

United Nations Environment Programme - 2025. Summary for Policymakers. Mediterranean Quality Status Report: The state of the Mediterranean Sea and Coast from 2018-2023. Athens, Greece.

Yue, S., Pilon, P., Phinney, B., & Cavadias, G. - 2002. *The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series*. Hydrological Processes, 16, 1807–1829.

Annexe 1 – Tableau synthétique des sources de données

Ce tableau recense d'une manière pratique les différentes **sources de données** mobilisées dans ce diagnostic climatique.

Source de données	Nature	Usage dans le diagnostic	Chapitre	Site
DRIAS 2020	Données climatiques régionalisées	Variables climatiques historiques et projections (RCP4.5 / 8.5)	3 et 5	https://www.drias-climat.fr
DRIAS-Eau	Projections hydrologiques	Débits, étiages, évolution des régimes hydrologiques	8	https://www.drias-eau.fr
Météeau nappes	Niveaux de nappes	Suivi piézométrique, variabilité hydrologique	8	https://www.meteau.fr
ONDE	Étiages des cours d'eau	Suivi des assecs et états d'écoulement	8	https://onde.eaufrance.fr
ERA5-HEAT	Réanalyse climatique	Calcul UTCI (confort thermique)	4	https://cds.climate.copernicus.eu
BDIFF	Incendies de forêt	Analyse du risque incendie	7	https://www.promethee.com
Landsat	Données satellitaires	LST, NDVI, NDMI, UI, NDBaI	6 et 9	https://earthexplorer.usgs.gov
Local Climate Zone	Cartographie des zones climatiques locales	Analyse des contrastes thermo-urbains et croisement avec les températures de surface (LST)	6	https://www.data.gouv.fr/datasets/cartographie-des-zones-climatiques-locales-lcz-des-88-aires-urbaines-de-plus-de-50-000-habitants-de-france-metropolitaine

Annexe 2 – Principaux modèles climatiques régionaux (RCM) disponibles via DRIAS

Les projections climatiques disponibles sur la plateforme DRIAS reposent sur l'utilisation de **modèles climatiques régionaux** (RCM), eux-mêmes forcés par des modèles climatiques globaux (GCM). Ces modèles permettent de simuler les évolutions climatiques à une **échelle spatiale fine**, tout en intégrant les incertitudes liées aux choix de modélisation.

Modèle régional (RCM)	Modèle global (GCM) associé	Institution	Spécificités principales	Points forts	Limites
CNRM-ALADIN63	CNRM-CM5	Météo-France / CNRM	Modèle atmosphérique régional couplé, développé en France	Très bonne représentation du climat méditerranéen, cohérence avec données nationales	Peut lisser certains extrêmes locaux
KNMI-RACMO22E	EC-EARTH	KNMI (Pays-Bas)	Modèle régional robuste largement utilisé en Europe	Bonne représentation des précipitations et de la variabilité atmosphérique	Moins spécialisé sur les contextes méditerranéens
IPSL-WRF381P	IPSL-CM5A	IPSL (France)	Version régionalisée du modèle WRF	Bonne résolution spatiale, flexible pour analyses fines	Sensibilité aux paramétrisations physiques
SMHI-RCA4	EC-EARTH	SMHI (Suède)	Modèle régional très utilisé dans les projets européens (EURO-CORDEX)	Robustesse, intercomparabilité multi-modèles	Résolution parfois insuffisante pour effets locaux fins
ICTP-RegCM4-6	HadGEM2-ES / autres	ICTP (Italie)	Modèle régional open-source largement diffusé	Adaptabilité, large usage scientifique	Résultats dépendants des configurations
CLMcom-CCLM4-8-17	EC-EARTH / MPI	Consortium CLM (Allemagne)	Modèle COSMO-CLM régional	Bonne représentation des processus atmosphériques	Complexité d'interprétation

DMI-HIRHAM5	EC-EARTH	DMI (Danemark)	Modèle couplant dynamique atmosphérique et processus de surface	Bonne simulation des interactions sol-atmosphère	Moins utilisé en contexte méditerranéen
GERICS-REMO2015	MPI-ESM	GERICS (Allemagne)	Modèle REMO régional	Bonne cohérence climatique à grande échelle	Moins précis sur certains extrêmes locaux

Le choix du modèle **CNRM-ALADIN63** dans le cadre de cette étude s'appuie notamment sur sa **pertinence** pour le **territoire français** et sa **capacité** à **représenter** les dynamiques climatiques **méditerranéennes**.

📖 Et pour aller plus loin… :

- **Météo-France (2020).** *Les nouvelles projections climatiques de DRIAS 2020.* Disponible sur : https://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf
- **EURO-CORDEX.** *EURO-CORDEX – Coordinated Downscaling Experiment for Europe.* Disponible sur : https://euro-cordex.net
- **Météo-France.** *Fiches techniques DRIAS-2020 – modèles régionaux (ALADIN63, RACMO22E, RCA4, CCLM4-8-17, HIRHAM5, REMO2015).* Disponible sur : https://www.drias-climat.fr/
- **Evin, Guillaume, Somot, Samuel & Hingray, Benoît (2021).** *Balanced estimate and uncertainty assessment of European climate change using the EURO-CORDEX ensemble. Earth System Dynamics*, 12, 1543–1569. Disponible sur : https://esd.copernicus.org/articles/12/1543/2021/
- **Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL).** *Modélisation climatique régionale (WRF et modèles couplés).* Disponible sur : https://www.ipsl.fr
- **Giorgi, Filippo et al. (2012).** *RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. Climate Research*. Disponible sur : https://doi.org/10.3354/cr01018
- **CORDEX.** *CORDEX – Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment.* Disponible sur : https://cordex.org

Annexe 3 – Détermination synthétique des types de climat de Köppen

📘 La classification climatique de Köppen-Geiger

La classification climatique de Köppen-Geiger constitue l'un des systèmes les plus utilisés au monde pour caractériser les climats. Élaborée au début du XXe siècle par le climatologue allemand Wladimir Köppen, puis mise à jour par Rudolf Geiger, elle repose sur une idée simple : **le climat peut être décrit à partir de ses effets sur la végétation** (Kottek et al., 2006).

🌎 Un système fondé sur température et précipitations

Cette classification repose sur deux variables climatiques fondamentales :

- les **températures** (moyennes, minimales et maximales),
- les **précipitations** (quantité annuelle et répartition saisonnière).

À partir de ces données, chaque zone du globe est associée à un type de climat selon des seuils définis (par exemple température du mois le plus froid ou cumul annuel des précipitations). A titre d'exemple, les conditions de typologie de climat pour le territoire de la réserve sont fournies *en italique* ci-dessous)

🔠 Une classification en trois niveaux (3 lettres)

Chaque climat est défini par une combinaison de **trois lettres**, traduisant successivement :

1. **Le type de climat principal** (fig. 95)
    - A : équatorial (chaud et humide)
    - B : aride (sec)
    - C : tempéré *(−3 °C < T min. mensuelle < +18 °C)*
    - D : continental (hivers froids)
    - E : polaire

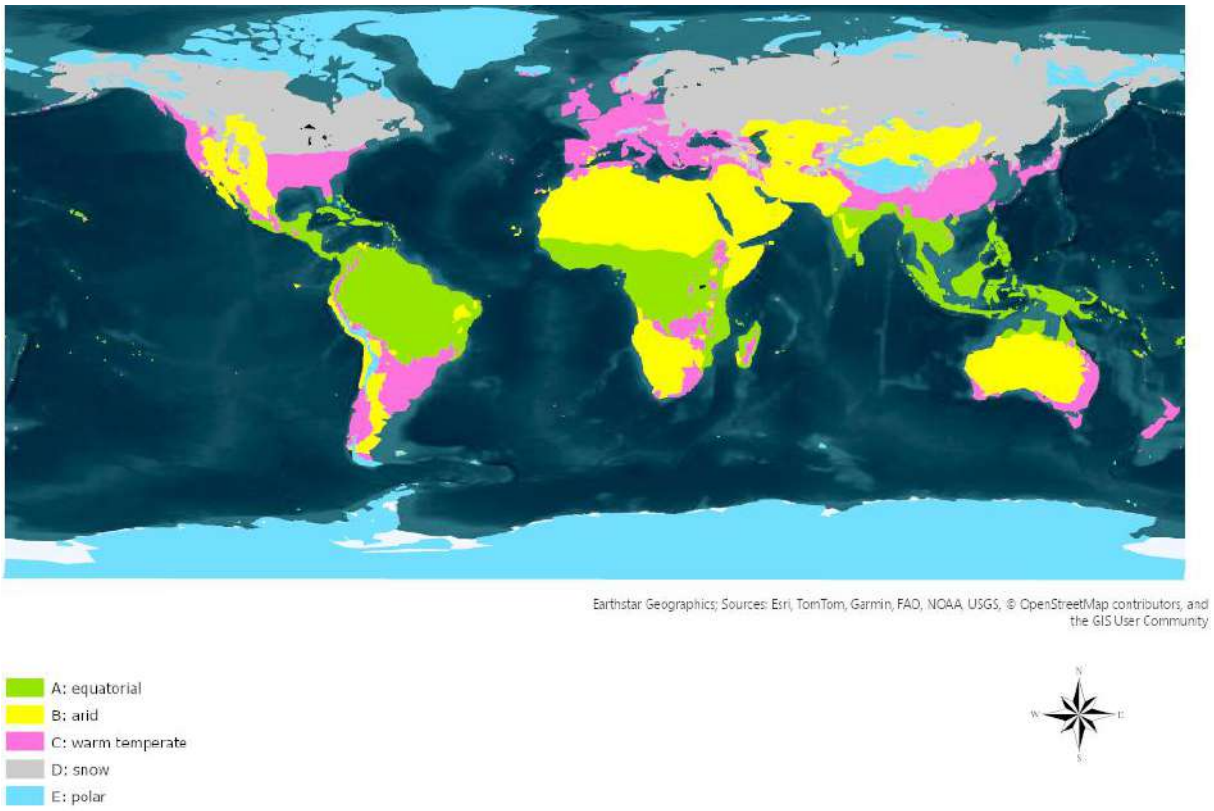


Figure 95 – les grands types de climats mondiaux d'après la méthode de Köppen-Geiger (données issues de Kottek et al., 2006)

2. **Le régime de précipitations** (fig. 96)
    - s : été sec (*Psmin < Pwmin, Pwmax > 3 Psmin et Psmin < 40 mm*)
    - w : hiver sec (*pas « s » et Pwmin < Psmin et Psmax > 10 Pwmin*)
    - f : humide toute l'année (*ni Cs ni Cw*)
    - m : mousson
    - (S/W pour les climats arides : steppe ou désert)

Avec *Psmin : Précipitation mensuelle minimum du mois d'été (avril à sept.)*
Psmax : Précipitation mensuelle maximum du mois d'été (avril à sept.)
Pwmin : Précipitation mensuelle minimum du mois d'hiver (oct. à mars)
Pwmax : Précipitation mensuelle maximum du mois d'hiver (oct. à mars)

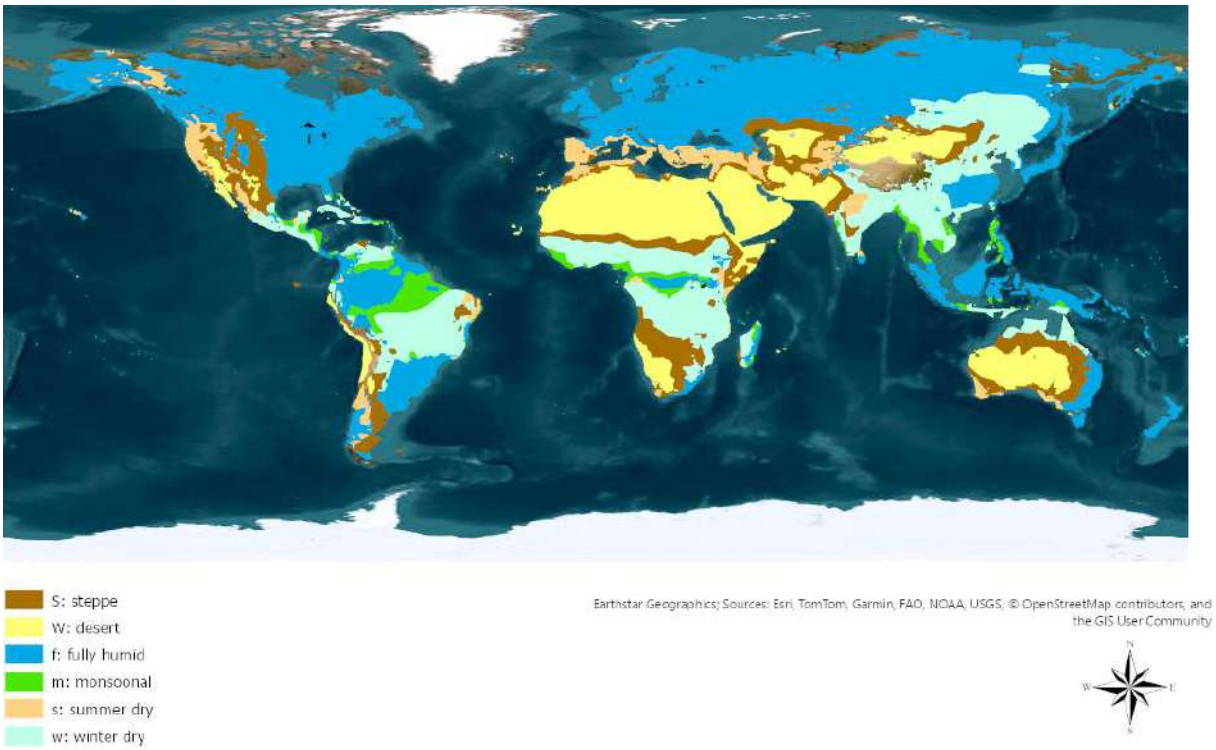


Figure 96 - les régimes pluviométriques mondiaux d'après la méthode de Köppen-Geiger (données issues de Kottek et al., 2006)

3. **Le régime thermique** (fig. 97)
    - a : été chaud (*Tmax* ≥ +22 °C)
    - b : été tempéré (*pas « a » et au moins 4 Tmon* ≥ +10 °C)
    - c : été frais
    - d : hiver très froid
    - h / k : chaud ou froid pour les climats arides

Avec *Tmax : Température moyenne mensuelle maximale*
Tmon : Température moyenne mensuelle

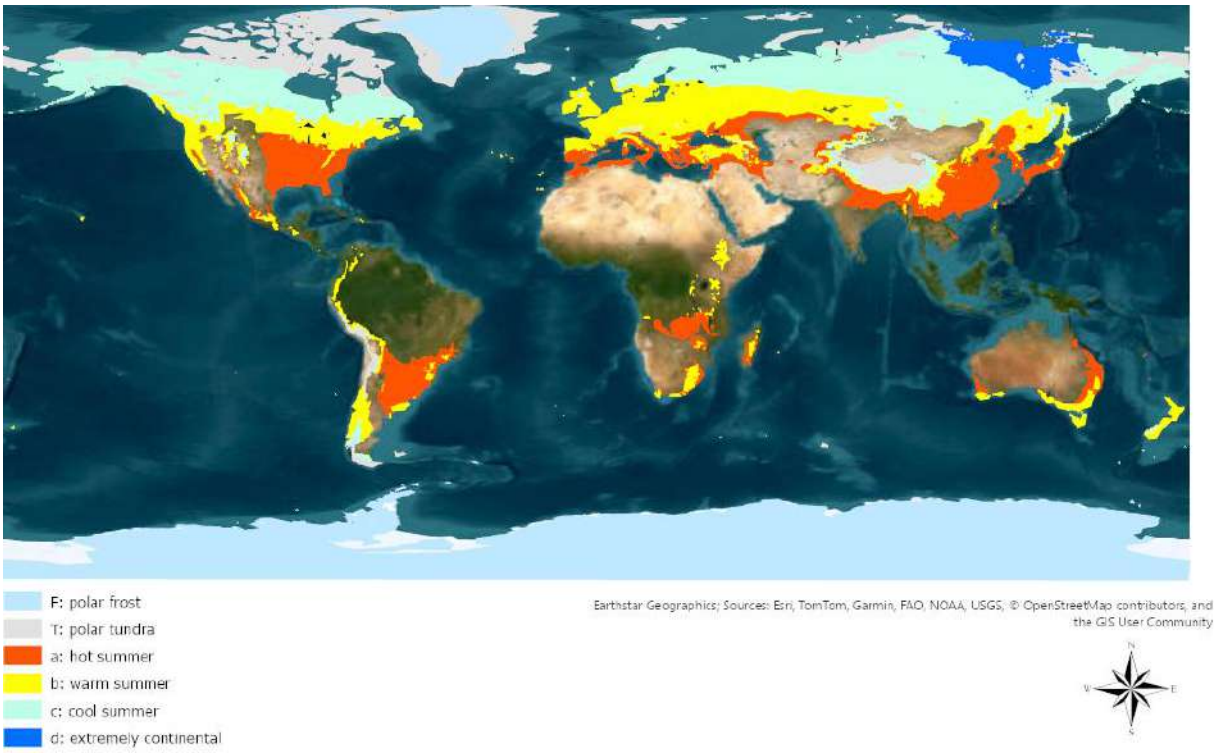


Figure 97 - les régimes thermiques mondiaux d'après la méthode de Köppen-Geiger (données issues de Kottek et al., 2006)

👉 Il suffit ensuite de combiner les trois lettres (le cas échéant) pour obtenir le type de climat de Köppen-Geiger (fig. 98). Par exemple :

- **Csa** = climat tempéré à été chaud et sec (méditerranéen)
- **BWh** = climat désertique chaud

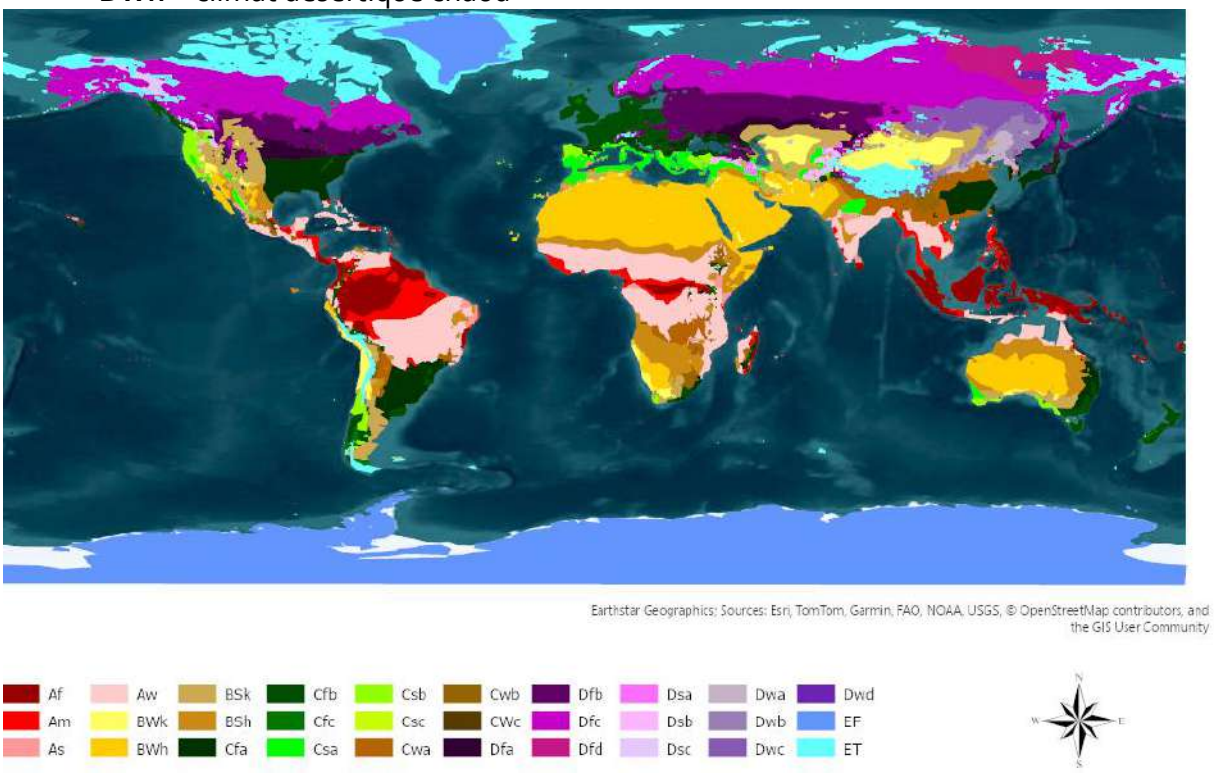


Figure 98 - les types de climats mondiaux d'après la méthode de Köppen-Geiger (données issues de Kottek et al., 2006)

⚙️ Une méthode de classification hiérarchisée

La détermination du type de climat suit une logique progressive :

1. Identifier les climats polaires (E) puis arides (B),
2. distinguer ensuite les climats tropicaux (A), tempérés (C) et continentaux (D),
3. préciser enfin les régimes de précipitations et de température.

Pour les climats arides, un **seuil d'aridité (Pth)** est calculé en fonction de la température et de la saisonnalité des pluies, permettant de distinguer les steppes des déserts.

🌱 Un outil simple mais puissant

La classification de Köppen-Geiger présente plusieurs atouts majeurs :

- elle offre une **lecture synthétique et spatialisée du climat**,
- elle permet de **comparer les climats à l'échelle mondiale**,
- elle constitue un **outil pédagogique très efficace**,
- elle est largement utilisée en climatologie, en géographie, en écologie ou dans l'agriculture.

🔄 Un outil toujours actuel dans le contexte du changement climatique

Bien qu'ancienne, cette classification reste aujourd'hui très utilisée. Les versions récentes, fondées sur des données climatiques actualisées, permettent :

- d'observer les **déplacements des zones climatiques**,
- d'illustrer les **transformations climatiques en cours et futures**,
- et de rendre visibles des **basculements de régime climatique** à l'échelle des territoires. Cela a fait l'objet du chapitre 5 du diagnostic climatique.

Elle constitue ainsi un **outil particulièrement pertinent pour l'analyse des impacts du changement climatique**, notamment dans les diagnostics territoriaux tel que celui de la réserve de biosphère des Gorges du Gardon (cf. chapitre 5).

Tables des figures

Figure 1 - (a) : types actuels de climats de Köppen-Geiger à l'échelle mondiale (1980-2016) et (b) types de climats futures (2071-2100) (sources : Beck et al., 2018)..... 13
Figure 2 – Mailles Drias couvrant le territoire de la réserve de biosphère. Les mailles 4950, 4951, 4807 et 4808 ont été utilisées dans le cadre de cette étude..... 18
Figure 3– TAV : Température moyenne journalière (°C) (mailles Drias 4950, 4951, 4807 et 4808)..... 22
Figure 4– TNAV : Température minimale journalière (°C) (mailles Drias 4950, 4951, 4807 et 4808)..... 23
Figure 5– TXAV : Température maximale journalière (°C) (mailles Drias 4950, 4951, 4807 et 4808)..... 25
Figure 6– TX35 : Nombre de jours de fortes chaleur (TX>35°C) (jour(s)) (mailles Drias 4950, 4951, 4807 et 4808) 26
Figure 7– TXND Nombre de jours anormalement chauds (T>Tx_ref + 5°C) (mailles Drias 4950, 4951, 4807 et 4808) 28
Figure 8– TNHT Nombre de nuits anormalement chaudes (T>Tn_ref + 5°C) (mailles Drias 4950, 4951, 4807 et 4808) 30
Figure 9 – TR Nombre de nuits tropicales (Température minimale journalière supérieure à 20 °C) (mailles Drias 4950, 4951, 4807 et 4808) 32
Figure 10 – TXHWD Nombre de jours d'une vague de chaleur T>Tx_ref + 5°C dans une séquence de plus de 5 jours consécutifs (jour(s)) (mailles Drias 4950, 4951, 4807 et 4808).. 34
Figure 11 – TRAV Amplitude thermique journalière (°C) (mailles Drias 4950, 4951, 4807 et 4808)..... 35
Figure 12 – TNFD Nombre de jours de gel (mailles Drias 4950, 4951, 4807 et 4808) 37
Figure 13 – RR Cumul annuel de précipitations (mm) (mailles Drias 4950, 4951, 4807 et 4808) 39
Figure 14 – RR1mm Nombre annuel de jours avec une précipitation supérieure ou égale à 1 mm (mailles Drias 4950, 4951, 4807 et 4808) 41
Figure 15 – PN20MM Nombre de jours de fortes précipitations (mailles Drias 4950, 4951, 4807 et 4808) 42
Figure 16 - PXCWD Nombre maximum de jours pluvieux consécutifs (mailles Drias 4950, 4951, 4807 et 4808) 43
Figure 17 – PXCDD Durée maximale des périodes sèches (mailles Drias 4950, 4951, 4807 et 4808)..... 45
Figure 18a – Températures moyennes mensuelles (NORTAV) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5 51
Figure 19a – Températures minimales mensuelles (NORTNAV) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5... 53
Figure 20a – Températures maximales mensuelles (NORTXAV) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5... 55

Figure 21a – Nombre de jours de forte chaleur (NORTX35) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5 57
Figure 22a – Nombre de jours normalement chauds (NORTTXND) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5... 59
Figure 23a - nombre de nuits anormalement chaudes (NORTNHT) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5... 61
Figure 24a - nombre de nuits tropicales (NORTR) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5 63
Figure 25a - nombre de jours appartenant à une vague de chaleur (NORTXHWD) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5 65
Figure 26a - nombre de jours de gel (NORTNFD) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5 67
Figure 27a - Amplitude thermique journalière (NORTRAV) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5 69
Figure 28a - cumul de précipitations (NORRR) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5 72
Figure 29a - Nombre de jours de pluie (NORRR1MM) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5 74
Figure 30a - nombre de jours de fortes précipitations (NORPN20MM) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5..... 76
Figure 31a - Nombre maximum de jours de pluie consécutifs NORPXCWD à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5..... 78
Figure 32a - Durée maximale (jours) des périodes de sécheresse (NORPXCDD) à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5..... 80
Figure 33a - Temps passé en sécheresse météorologique (sans unité) NORTPSPI à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5 82
Figure 34a - Cumul de l'évapotranspiration potentielle (méthode de Hargreaves ; mm) NORETPC à la période de référence (1951–2005) et aux horizons H2 (2041–2070) et H3 (2070–2099) avec le scénario RCP4.5 84
Figure 36 – UTCI max (chaleur ressentie en degrés) de juillet 2025 sur le territoire de la réserve..... 94
Figure 36 – UTCI maximal de juillet (°UTCI) et moyenne glissante des températures maximales de juillet (°C) enregistrées à la station de Nîmes-Courbessac de 1970 à 2025..... 95
Figure 37 – UTCI maximal de février (°UTCI) et moyenne glissante des températures maximales de février (°C) enregistrées à la station de Nîmes-Courbessac de 1970 à 2025 96

Figure 38 – Indice de confort thermique UTCImax par classes par décennies pour juillet (%) 100
Figure 39 – Indice de confort thermique UTCI max par classes par décennies pour février (%) 102
Figure 40 - températures moyennes annuelles sur la réserve en fonction des RCP4.5, RCP6.5 et RCP8.5 107
Figure 41 - températures minimales annuelles sur la réserve en fonction des RCP4.5, RCP6.5 et RCP8.5 108
Figure 42 - températures maximales annuelles sur la réserve en fonction des RCP4.5, RCP6.5 et RCP8.5 108
Figure 43 - précipitations annuelles sur la réserve en fonction des RCP4.5, RCP6.5 et RCP8.5 109
Figure 44 – Types de climats de Köppen-Geiger sur le territoire de la biosphère (1950 – 2025) 110
Figure 45- Types de climats projetés de Köppen-Geiger sur le territoire de la biosphère sous le scénario RCP 4.5 (2025 – 2100) 113
Figure 46 - Types de climats projetés de Köppen-Geiger sur le territoire de la biosphère sous le scénario RCP 6.5 (2025 – 2100) 114
Figure 47 - Types de climats projetés de Köppen-Geiger sur le territoire de la biosphère sous le scénario RCP 8.5 (2025 – 2100) 115
Figure 48 – Moyenne des températures de surface estivales (2010 – 2025) (source : Landsat) 124
Figure 49 – Ecart à la moyenne des températures de surface estivales (2010 – 2025) (source : Landsat) 125
Figure 50 – Organisation spatiale des températures de surface estivales de 2010 (en haut à gauche) à 2025 (en bas à droite) (source : Landsat). Comme il peut l'être constaté, l'année 2019 présente des nuages et n'a pas été inclus dans les études. 126
Figure 51 - Moyenne des températures de surface hivernales (2010 – 2025) (source : Landsat) 127
Figure 52 - Ecart à la moyenne des températures de surface hivernales (2010 – 2025) (source : Landsat) 128
Figure 53 – Organisation spatiale des températures de surface hivernales de 2010 (en haut à gauche) à 2025 (en bas à droite) (source : Landsat). Comme il peut l'être constaté, les années 2022, 2024 et 2025 présente des nuages et n'a pas été inclus dans les études. 129
Figure 54 - Définition des typologies LCZ (source : Cerema, 2025) 132
Figure 55 - Zones climatiques locales (LCZ) de la réserve de biosphère des gorges du Gardon (source : adaptée du Cerema) 134
Figure 56 - Températures de surface moyenne en été (°C ; 2010 - 2025) des zones climatiques locales (LCZ) de la réserve 137
Figure 57 – Evolution des températures de surface (°C) des zones climatiques locales de 2024 par rapport à la moyenne 2010-2025 138

Figure 58 - Températures de surface moyenne en hiver (°C ; 2010 - 2025) des zones climatiques locales (LCZ) de la réserve 140
Figure 59 - nombre de feux annuels sur le territoire de la réserve (source : BDIFF) 146
Figure 60 – Superficies brulées annuellement(m²) sur le territoire de la réserve (source : BDIFF) 147
Figure 61 – Types de surfaces brulées annuellement(m²) sur le territoire de la réserve (source : BDIFF) 148
Figure 62 – répartition mensuelle des feux de forêts (2010 – 2024) 149
Figure 63 – Spatialisation du risque feu de forêt actuel (indice NORIF Drias) 150
Figure 64 - Spatialisation du risque feu de forêt à l'horizon 2030 (indice NORIF Drias) 152
Figure 65 - Spatialisation du risque feu de forêt à l'horizon 2050 (indice NORIF Drias) 153
Figure 66 - Nombre de jours avec une sensibilité Feu Météo Élevée (IFM >= 40) [NORIFM40_yr] 154
Figure 67 - Profondeur piézométrique journalière au Pont Saint-Nicolas de 1997 à 2025 (source : Météoeau BRGM) 159
Figure 68 - Côte piézométrique journalière au Pont Saint-Nicolas de 1997 à 2025 (source Météoeau BRGM) 160
Figure 69 - Profondeur piézométrique mensuelles au Pont Saint-Nicolas de 1997 à 2025 (source Météoeau BRGM) 160
Figure 70 - Côte piézométrique mensuelles au Pont Saint-Nicolas de 1997 à 2025 (source Météoeau BRGM) 160
Figure 71 – Niveau d'eau médian au Pont Saint-Nicolas de 1997 à 2025 et positionnement par rapport à l'indice de position statistique (IPS) (source Météoeau BRGM) 161
Figure 72 - Niveau d'eau de l'année 2023 au Pont Saint-Nicolas de 1997 à 2025 et positionnement par rapport à l'indice de position statistique (IPS) (source Météoeau BRGM) 161
Figure 73 - Niveau d'eau de l'année 2024 au Pont Saint-Nicolas de 1997 à 2025 et positionnement par rapport à l'indice de position statistique (IPS) (source Météoeau BRGM) 162
Figure 74 : débits moyens historique (1951-2005) et futurs (2005-2100) avec le RCP4.5 et le RCP8.5 (m^3/s) 171
Figure 75 : moyennes glissantes sur 5 ans des débits moyens historique (1951-2005) et futurs (2005-2100) avec le RCP4.5 et le RCP8.5 (m^3/s) 172
Figure 76 : débits minimaux historique (1951-2005) et futurs (2005-2100) avec le RCP4.5 et le RCP8.5 (m^3/s) 173
Figure 77 : moyennes glissantes sur 5 ans des débits minimaux historique (1951-2005) et futurs (2005-2100) avec le RCP4.5 et le RCP8.5 (m^3/s) 173
Figure 78 : ratio Qmin / Qmoy historique (1951-2005) et futurs (2005-2100) avec le RCP4.5 et le RCP8.5 (m^3/s) 174
Figure 79 : moyennes glissantes sur 5 ans du ratio Qmin / Qmoy historique (1951-2005) et futurs (2005-2100) avec le RCP4.5 et le RCP8.5 (m^3/s) 175

Figure 80 : rapport entre les débits hivernaux (décembre-janvier-février) et les débits estivaux (juin-juillet-août) pour les périodes historique (1951-2005) et futurs (2005-2100) avec le RCP4.5 et le RCP8.5 176
Figure 81 : débits mensuels moyens pour les périodes historique 1971-2000, proche futur 2021-2050, milieu siècle 2041-2070 et fin siècle 2071 – 2100, avec les RCP4.5 et RCP8.5... 177
Figure 82 : débits mensuels moyens pour les périodes historique 1971-2000, proche futur 2021-2050, milieu siècle 2041-2070 et fin siècle 2071 – 2100, avec les moyennes des RCP4.5 et RCP8.5 178
Figure 83 - Organisation spatiale de l'indice de végétation NDVI estival de 2010 (en haut à gauche) à 2025 (en bas à droite) (source : Landsat) 191
Figure 84 - Indice de végétation NDVI estival moyen de 2010 à 2025..... 192
Figure 85 – Ecart-type de l'indice de végétation NDVI estival de 2010 à 2025..... 193
Figure 86 - Organisation spatiale de l'indice d'humidité des sols estival NDMI de 2010 (en haut à gauche) à 2025 (en bas à droite) (source : Landsat) 195
Figure 87 - Indice d'humidité des sols estival NDMI moyen de 2010 à 2025 196
Figure 88 - Ecart-type de l'indice d'humidité des sols estival NDMI de 2010 à 2025 197
Figure 89 - Organisation spatiale de l'indice d'urbanisation estival UI de 2010 (en haut à gauche) à 2025 (en bas à droite) (source : Landsat) 198
Figure 90 - Indice d'urbanisation estival moyen (UI) de 2010 à 2025..... 199
Figure 91 - Ecart-type de l'indice d'urbanisation estival (UI) de 2010 à 2025 200
Figure 92 - Organisation spatiale de l'indice de sols nus estival NDBaI de 2010 (en haut à gauche) à 2025 (en bas à droite) (source : Landsat) 202
Figure 93 - Indice de sol nu estival moyen (NDBaI) de 2010 à 2025..... 203
Figure 94 - Ecart-type de l'indice de sol nu estival (NDBaI) de 2010 à 2025..... 204
Figure 95 – les grands types de climats mondiaux d'après la méthode de Köppen-Geiger (données issues de Kottek et al., 2006)..... 217
Figure 96 - les régimes pluviométriques mondiaux d'après la méthode de Köppen-Geiger (données issues de Kottek et al., 2006)..... 218
Figure 97 - les régimes thermiques mondiaux d'après la méthode de Köppen-Geiger (données issues de Kottek et al., 2006)..... 219
Figure 98 - les types de climats mondiaux d'après la méthode de Köppen-Geiger (données issues de Kottek et al., 2006)..... 219

Tables des tableaux

Tableau 1– Variables climatiques analysées dans le cadre de l'étude historique 19
Tableau 2 – Synthèse des paramètres de position des variables et tendances associées..... 46
Tableau 3- variables étudiées dans le cadre de l'analyse prospective 49
Tableau 4 : principales évolutions liées à l'intensification de la chaleur et implications écologiques et territoriales 87
Tableau 5 : principales évolutions climatiques hivernales et implications écologiques potentielles..... 89
Tableau 6 : évolutions du régime des précipitations, des périodes sèches et de l'évapotranspiration, et implications hydrologiques et territoriales..... 92
Tableau 7 - Classification de Köppen pour le climat de fond centré sur chaque année, de 2040 à 2085, tous les 5 ans, par normales glissantes (ou fenêtres mobiles de 30 ans) (Par exemple, pour l'année 2040, nous avons utilisé les normales climatiques calculées sur la période 2025-2054)..... 116
Tableau 8 – Dates des scènes estivales des satellites Landsat utilisés dans cette étude..... 121
Tableau 9 - Dates des scènes hivernales des satellites Landsat utilisés dans cette étude en été 122
Tableau 10 – Type d'écoulement au Bourdic à Sainte-Anastasie de 2011 à 2025 (base de données ONDE) 165
Tableau 11 - Type d'écoulement au Gardon à Dions de 2011 à 2025 (base de données ONDE) 166
Tableau 12 - Type d'écoulement aux Seynes à Uzès de 2011 à 2025 (base de données ONDE) 167
Tableau 13 - Type d'écoulement au ruisseau de Braune à La Calmette de 2011 à 2025 (base de données ONDE) 168

Tables des matières

1. INTRODUCTION ET CADRAGE : UN RECIT CLIMATIQUE AU SERVICE D'UN TERRITOIRE VIVANT 9

2. CONTEXTE CLIMATIQUE MULTISCALAIRE : DU CHANGEMENT GLOBAL AUX SPECIFICITES TERRITORIALES 11

2.1. Le changement climatique à l'échelle mondiale 11

2.2. L'Europe et le bassin méditerranéen : un "hotspot" climatique 11

3. ANALYSE DES VARIABLES CLIMATIQUES ET DES INDICATEURS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE TERRITOIRE DE LA RESERVE DE BIOSPHERE 15

3.1. Principes généraux et choix méthodologiques 15

3.2 Analyse historique des variables climatiques (1970–2024) 16

3.2.1 Données et périmètre d'analyse 16
3.2.2 Variables climatiques analysées 19
3.2.3 Méthodes d'analyse des tendances 20
3.2.4 Objectifs de l'analyse 20
3.2.5 Les indicateurs de température 21
3.2.6 Les indicateurs de précipitations 38

3.3 Analyse prospective des variables climatiques à partir des projections DRIAS 48

3.3.1. Évolution prospective de la température moyenne (NORTAV) 50
3.3.2 Évolution prospective de la température minimale (NORTNAV) 52
3.3.3 Évolution prospective de la température maximale (NORTXAV) 54
3.3.4. Évolution prospective du nombre de jours de forte chaleur (NORTX35) 56
3.3.5 Évolution prospective du nombre de jours anormalement chauds (NORTXND) 58
3.3.6. Évolution prospective du nombre de nuits anormalement chaudes (NORTNHT) 60
3.3.7 Évolution prospective du nombre de nuits tropicales (NORTR) 62
3.3.8 Évolution prospective du nombre de jours appartenant à une vague de chaleur (NORTXHWD) 64
3.3.9 Évolution prospective du nombre de jours de gel (NORTNFD) 66
3.3.10 Évolution prospective de l'amplitude thermique journalière (NORTRAV) 68
3.3.11 Synthèse prospective – Évolution des températures et des extrêmes thermiques 70
3.3.12. Évolution prospective du cumul de précipitations (NORRR) 71
3.3.13 Évolution prospective du nombre de jours de pluie (NORRR1MM) 73
3.3.14. Évolution prospective du nombre de jours de fortes précipitations (NORPN20MM) 75
3.3.15 – NORPXCWD : nombre maximum de jours de pluie consécutifs 77
3.3.16 – NORPXCDD : durée maximale des périodes de sécheresse 79
3.3.17 – NORTPSPI : temps passé en sécheresse météorologique 81
3.3.18 – NORETPC : cumul de l'évapotranspiration potentielle (méthode de Hargreaves) 83
3.3.19 Synthèse – Évolutions climatiques futures sur le territoire de la Réserve de biosphère (scénarios DRiAS RCP4.5) 85

4 – ÉVOLUTION DU CONFORT THERMIQUE (INDICE UTCI) 93

4.1 Analyse du confort thermique (UTCI) estival (1970 – 2025) 94

4.2 – Analyse du confort thermique hivernal (UTCI) : une évolution plus modérée et contrastée 96

4.3 Analyse du confort thermique par classes UTCI 98
4.3.1 Méthodologie de classification du confort thermique à partir de l'indice UTCI 98
4.3.2 Évolution des classes UTCI estivales (juillet, 1970–2025) 99
4.3.3 – Évolution des classes UTCI hivernales (février, 1970–2025) 101
4.3.4. Synthèse transversale de l'évolution du confort thermique (UTCI, 1970–2025) 102

5. ÉVOLUTION DES TYPES DE CLIMAT : LECTURE STRUCTURELLE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE (CLASSIFICATION DE KÖPPEN-GEIGER) 104

5.1 La classification de Köppen-Geiger : un outil simple pour comprendre les changements de climat 104

5.2. Méthodologie et données mobilisées (DRIAS, RCP 4.5 / RCP 8.5) 105

5.3 - Evolution historique des types de climat (1950 – 2025) 110

5.4 – Évolution prospective des types de climat selon les scénarios RCP 4.5 et 6.5 (2025–2100) 112

5.5 – Évolution des types de climat selon le scénario RCP 8.5 : vers un basculement climatique majeur 114
5.5.1 Lecture annuelle : une instabilité croissante mais trompeuse 115
5.5.2 Analyse par normales glissantes : mise en évidence des basculements climatiques 116
5.5.3 Interprétation globale : un changement climatique de nature, pas seulement d'intensité 117

5.6 – Synthèse : trajectoires climatiques contrastées et basculements de régime 117
5.6.1 Deux scénarios, deux futurs climatiques 118
5.6.2 Une lecture dynamique du changement climatique 118

6. LES ZONES CLIMATIQUES LOCALES (LCZ) DE LA RESERVE A L'EPREUVE DES TEMPERATURES DE SURFACE (LST) 119

6.1 – Températures de surface et structures urbaines : du climat régional au climat local vécu 119

6.2 – Données et méthodologie : caractérisation des températures de surface et croisement avec les LCZ .. 120
6.2.1. La température de surface (LST) : un indicateur du climat local vécu 120
6.2.2. Données satellitaires Landsat mobilisées 120
6.2.3. Construction des indicateurs thermiques spatiaux 122

6.3 – Gradients thermiques et disparités spatiales des températures de surface 122
6.3.1 Organisation spatiale des températures de surface en été 122
6.3.2. Organisation spatiale des températures de surface en hiver 127
6.3.3 Synthèse intermédiaire et transition vers l'analyse par LCZ 130

6.4 – Températures de surfaces (LST) vs zones climatiques locales (LCZ) : approche croisée 131
6.4.1 Principe des zones climatiques locales (LCZ) et réalisation sur le territoire de la réserve 131

6.4 – Croisement des températures de surface (LST) et des zones climatiques locales (LCZ) en été 135

6.5 Analyse des écarts à la moyenne des températures de surface estivales en 2024 par LCZ 137

6.6 – Croisement des températures de surface (LST) et des zones climatiques locales (LCZ) en hiver 139

6.7 – Mise en perspective : des structures thermiques robustes aux enjeux d'adaptation territoriale 140

6.8 - Conclusion du chapitre 6 : l'apport du regard croisé entre LST et LCZ..... 141

7 – ÉVOLUTION DU RISQUE DE FEUX DE FORET A L'ECHELLE DE LA RESERVE DE BIOSPHERE 143

7.1 – Données et méthodologie : analyse du danger de feux de forêt à partir de la base BDIFF et de la chaîne DRIAS–NORIF 143

7.1.1 – Base de données BDIFF et méthode d'exploitation 143

7.1.2 Chaîne de traitement Drias – NORIF et analyse prospective à l'échelle de la réserve 144

7.2 – Le niveau actuel du risque de feu de forêt sur la réserve 146

7.2.1 - par le prisme de la base de données BDIFF..... 146

7.2.2 – et sous l'angle de l'indicateur NORIFM40_yr 150

7.3 Risque à moyenne échéance (2030) et à plus long terme (2050) sur le territoire 151

7.4 – Synthèse opérationnelle : messages clés pour les gestionnaires 153

7.5 - **Conclusion du chapitre 7 – Évolution du risque de feu de forêt sur le territoire..... 155**

8. ANALYSE DE L'EVOLUTION HISTORIQUE DU NIVEAU DES NAPPES ET DES DEBITS : ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX ET TERRITORIAUX 157

8.1 Données et méthodologie – Analyse des niveaux de nappes souterraines à l'aide de Météeau nappes. 158

8.2 Fonctionnement saisonnier et variabilité interannuelle des niveaux de nappes 159

8.2.1 - Un cycle saisonnier net, piloté par la recharge hivernale et l'étiage estival..... 159

8.2.2 Une forte variabilité interannuelle, dominée par des années contrastées 161

8.2.3 Absence de tendance de fond mais accentuation des situations extrêmes..... 162

8.3 - Années contrastées et situations hydrologiques extrêmes : enseignements des années 2023 et 2024 . 162

8.3.1 - 2023 : une année de basses eaux structurelles et de tensions hydrologiques 162

8.3.2 - 2024 : une année de recharge efficace et de fonctionnement hydrologique favorable..... 163

8.3.3 - Un territoire confronté à l'alternance rapide des extrêmes..... 163

8.4 Analyse des étiages de quatre cours d'eau de la Réserve de biosphère 164

8.4.1 Présentation de la base ONDE et cadre méthodologique 164

8.4.2 – Fréquence, intensité et structuration temporelle des étiages (2011–2025) 165

8.4.3 – Articulation entre niveaux de nappes et dynamiques d'étiage 169

8.5 Évolution projetée des débits du Gard à Sanilhac-Sagries (La Baume) 170

8.5.1 Évolution des débits moyens annuels 171

8.5.2 Aggravation progressive des étiages 172

8.5.3 Renforcement de la saisonnalité hydrologique 175
8.5.4 Transformation du régime hydrologique mensuel 176
8.5.5 Un régime hydrologique méditerranéen plus contrasté 179

8.6 Mise en perspective : niveaux de nappes et dynamiques climatiques et environnementales du territoire 179

8.7 – Mise en perspective : nappes, étiages et dynamiques climatiques du territoire 181

8.8 Mise en perspective : fonctionnement karstique et implications hydrologiques 184

8.9 – Synthèse du chapitre 8 : évolution des niveaux de nappes et débit pour une reconfiguration des enjeux territoriaux 185

9 – CE QUI VARIE SANS SE TRANSFORMER : LECTURE CLIMATIQUE DES INDICES SPECTRAUX DE SURFACE (NDVI, NDMI, UI, NDBAI) 188

9.1 – Données et méthodologie 188

9.2 – Analyse de l'évolution du NDVI sur la période 2010–2025 190

9.3 – Évolution du NDMI : variabilité hydrique de la végétation et sensibilité climatique 193

9.4 – Évolution spatio-temporelle de l'indice d'urbanisation (UI) 197

9.5 – Analyse spatio-temporelle du NDBaI 201

9.6 Exploitation des outils d'analyse spatio-temporelle d'ArcGIS et limites observées 204

9.7 - Discussion de synthèse – Apports croisés des indices spectraux 205

CONCLUSION GENERALE : UN TERRITOIRE MEDITERRANEEN CONFRONTE A L'INTENSIFICATION DES CONTRAINTES CLIMATIQUES 207

10.1 - Un réchauffement avéré, dissymétrique et fonctionnellement structurant 207

10.2 - Des trajectoires climatiques contrastées selon les scénarios 207

10.3 - Températures de surface et structures territoriales : un climat local différencié 208

10.4 - Ressources en eau et risques de feux de forêt : vers une gestion sous contrainte accrue 208

10.5 - Indices spectraux : stabilité structurelle, variabilité fonctionnelle 208

10.6 - Enseignements transversaux et enjeux pour l'action 209

RÉFÉRENCES 211

ANNEXE 1 – TABLEAU SYNTHETIQUE DES SOURCES DE DONNEES 213

ANNEXE 2 – PRINCIPAUX MODELES CLIMATIQUES REGIONAUX (RCM) DISPONIBLES VIA DRIAS 214

ANNEXE 3 – DETERMINATION SYNTHETIQUE DES TYPES DE CLIMAT DE KÖPPEN.....216

TABLES DES FIGURES.....221

TABLES DES TABLEAUX 226

TABLES DES MATIERES.....227