

# Étude Hydrologie Milieux Usages Climat - HMUC

SAGE Loire en Rhône Alpes

## Rapport volet Climat

Juin 2024

Porteur de l'étude :

**Loire**  
LE DÉPARTEMENT

Avec le soutien financier de :



Bureau d'étude :

  
**antea**group

# Sommaire

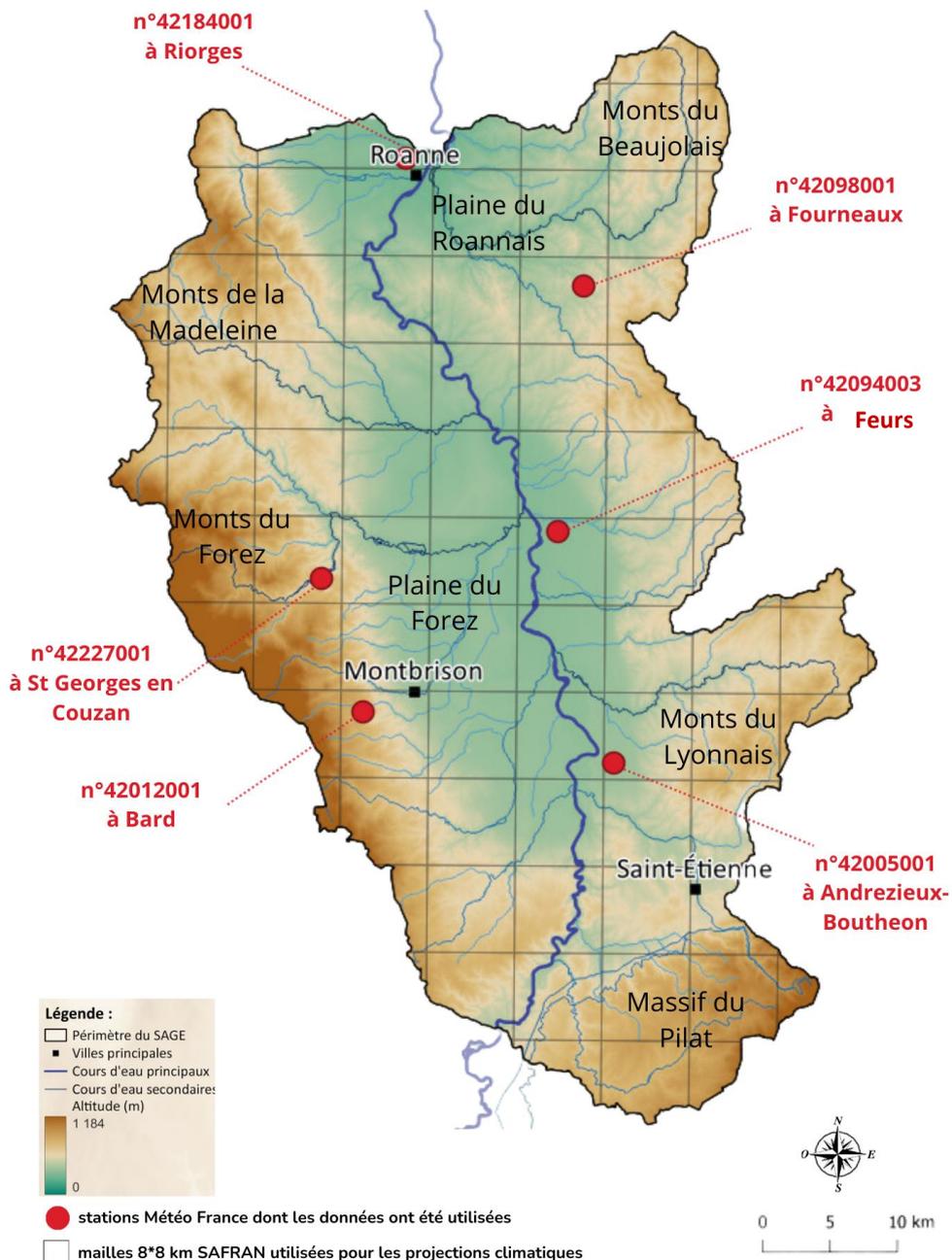
1. Les données mobilisées.....	3
2. Qu'est-ce que le changement climatique ? .....	5
2.1. Qu'est-ce que la climatologie ?.....	5
2.2. Qu'est-ce que l'effet de serre ? .....	5
2.3. Quelles origines au changement climatique actuel ? .....	6
2.4. D'où viennent les projections climatiques ? .....	7
2.5. La description du climat actuel .....	10
3. L'évolution du climat sur le périmètre du SAGE LRA .....	12
3.1. Caractéristique du climat « actuel » .....	12
3.2. Evolution de la température .....	14
3.3. Evolution de la pluviométrie .....	19
3.4. Evolution de l'évapotranspiration.....	31
4. Evolution du bilan hydrique .....	32
4.1. Bilan hydrique d'un bassin .....	32
5. L'évolution des sécheresses .....	34
5.1. Les différents types de sécheresse .....	34
5.2. Les projections de sécheresses météorologiques.....	36
5.3. Les projections d'humidité des sols .....	36
6. Impacts du changement climatique sur l'hydrologie.....	38
6.1. Quel lien entre changement climatique et ressource en eau ? .....	38
6.2. Comment l'évolution de l'hydrologie a-t-elle été modélisée sur le bassin LRA ?.....	42
6.3. Les résultats des simulations de débits futurs.....	47
6.4. Les résultats d'évolution de la thermie des cours d'eau .....	59
Synthèse des tendances climatiques .....	60

# 1. Les données mobilisées

Les données mobilisées pour traiter le volet « climat » de l'étude HMUC sont les suivantes :

- 1** **Les données DIGITALIS SYLVAE (AgroParisTech)** disponibles sur la normale climatique de 1961-1990 pour établir des cartes de spatialisation des cumuls pluviométriques et des températures moyennes sur le périmètre du SAGE Loire en Rhône Alpes – les normales ne sont pas actuelles, mais ces données permettent de visualiser les différentes zones climatiques du bassin ;
  
- 2** **De longues séries homogénéisées mensuelles (période de 30 ans à minima)** sur les différentes stations Météo France disponibles. Analyser les évolutions climatiques à partir de mesures météorologiques exige de disposer de séries climatologiques suffisamment longues et dont les valeurs soient comparables dans le temps, ce qui nécessite un travail statistique d'homogénéisation des chroniques. Nous avons repris ces données pour établir les normales climatiques et étudier les tendances d'évolutions climatiques sur la période passée ;  
  
*Graphiques disponibles : évolution au pas de temps annuel et mensuel des paramètres de températures moyennes, minimales et maximales et de précipitations sur les postes météo disposant de longues séries homogénéisées, et analyse de tendance.*
  
- 3** **Les données SAFRAN**, qui sont des données issues de l'ensemble des observations de surface et modélisées (réanalyse) exprimées au pas de temps journalier et à l'échelle de mailles de 8\*8 km<sup>2</sup>. Le jeu de données contient 7 paramètres climatiques depuis 1959. Ces données permettent de calculer des normales climatiques mais surtout de disposer d'une donnée climatique robuste et spatialisée utile aux travaux de modélisation hydrologique ;
  
- 4** **Les simulations climatiques disponibles sur le portail DRIAS ont permis de renseigner sur les projections en climat futur.** Ces données sont spatialisées à l'échelle des mailles 8\*8 km (identiques aux mailles SAFRAN), il s'agit de chroniques journalières de différents paramètres (pluie, température, ETP, ...) couvrant la période 1985-2100. Les données DRIAS ont permis de caractériser l'évolution du climat à horizon moyen et lointain et ont également été mobilisées pour les modélisations hydrologiques en climat futur. *Les données mobilisées (nombre de simulations, scénarios etc) et méthodes sont détaillés plus en avant du présent document.*
  
- 5** **Les simulations hydrologiques issues du modèle SIM2** disponibles sur le portail DRIAS-Eau ont été mises à disposition dans le cadre du projet national Explore 2. SIM2 est un modèle hydro-climatique maillé de MétéoFrance. Les simulations climatiques issues du portail DRIAS ont été injectées dans le modèle qui a produit des chroniques hydrologiques en climat futur. Les résultats sont disponibles au niveau des stations hydrométriques drainant de grands bassins versant, en l'occurrence plusieurs stations sur la Loire au sein du périmètre LRA.

La carte ci-dessous localise les stations Météo France dont les données mesurées et corrigées ont été utilisées dans cette étude (longues séries homogénéisées). La grille des mailles SAFRAN 8\*8 km pour lesquelles les projections climatiques sont construites est présentée.



## 2. Qu'est-ce que le changement climatique ?

### 2.1. Qu'est-ce que la climatologie ?

Contrairement à la météorologie qui étudie les phénomènes atmosphériques observables, c'est-à-dire le « temps qu'il fait », la climatologie – ou science du climat - s'intéresse aux conditions atmosphériques moyennes pouvant caractériser une région donnée pendant une période donnée (températures, précipitations, humidité, etc.), afin de dégager des tendances climatiques. Une trentaine d'années d'observations sont nécessaires pour définir les caractéristiques d'ordre climatique et les évolutions.

Ainsi, un « changement climatique », ou « dérèglement climatique », correspond à une modification durable du climat global de la Terre ou de ses divers climats régionaux. Il s'agira donc de variations à long terme de la température et des modèles météorologiques. **Le changement climatique ne se traduit pas que par la hausse des températures**, qui ne sont que le début des dérèglements ; la Terre étant un système où tout est lié.

Il peut s'agir de variations naturelles, dues par exemple à celles du cycle solaire ou à des éruptions volcaniques massives. Cependant, depuis les années 1800, les activités humaines constituent la cause principale du changement climatique réchauffant le globe plus vite que jamais auparavant, essentiellement en raison de la combustion de combustibles fossiles comme le charbon, le pétrole et le gaz.

Actuellement, les conséquences observées du changement climatique sont notamment les sécheresses intenses, les pénuries d'eau, les graves incendies, l'élévation du niveau de la mer, les inondations, la fonte des glaces polaires, les tempêtes catastrophiques et le déclin de la biodiversité.

*Un organisme intergouvernemental dédié : le GIEC*

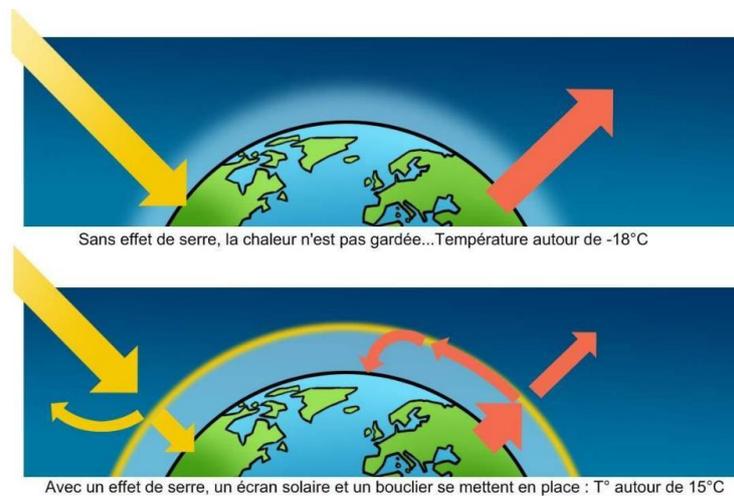


*Le GIEC est un organisme intergouvernemental ouvert à tous les pays membres de l'ONU. Il évalue l'état des connaissances sur l'évolution du climat, ses causes, ses impacts et les possibilités de limiter l'ampleur du réchauffement. Ses rapports synthétisent les publications de milliers de chercheurs qui analysent, modélisent et quantifient les changements climatiques et leurs impacts.*

### 2.2. Qu'est-ce que l'effet de serre ?

**L'effet de serre est un processus naturel et essentiel à la vie car il permet de maintenir une température moyenne autour de 15°C.** Certains composants gazeux présents majoritairement de manière naturelle dans l'atmosphère captent une part de l'énergie thermique (la chaleur) renvoyée vers l'espace par la Terre. **On les appelle les « gaz à effet de serre » (GES).** La concentration de GES est de plus en plus importante dans l'atmosphère terrestre : les émissions d'origine anthropique se sont intensifiées depuis la période industrielle. La chaleur est donc davantage maintenue autour de la

Terre, ce qui cause un réchauffement planétaire. Dès lors, les activités anthropiques accentuent l'effet de serre.



## 2.3. Quelles origines au changement climatique actuel ?

**Le climat de la Terre a évolué à de nombreuses reprises depuis sa formation**, alternant entre des périodes froides (cycles glaciaires) et des périodes plus chaudes (cycles interglaciaires). Les scientifiques ont découvert que depuis environ 3 millions d'années a lieu une augmentation de la variabilité climatique avec une intensification de l'alternance entre les cycles.

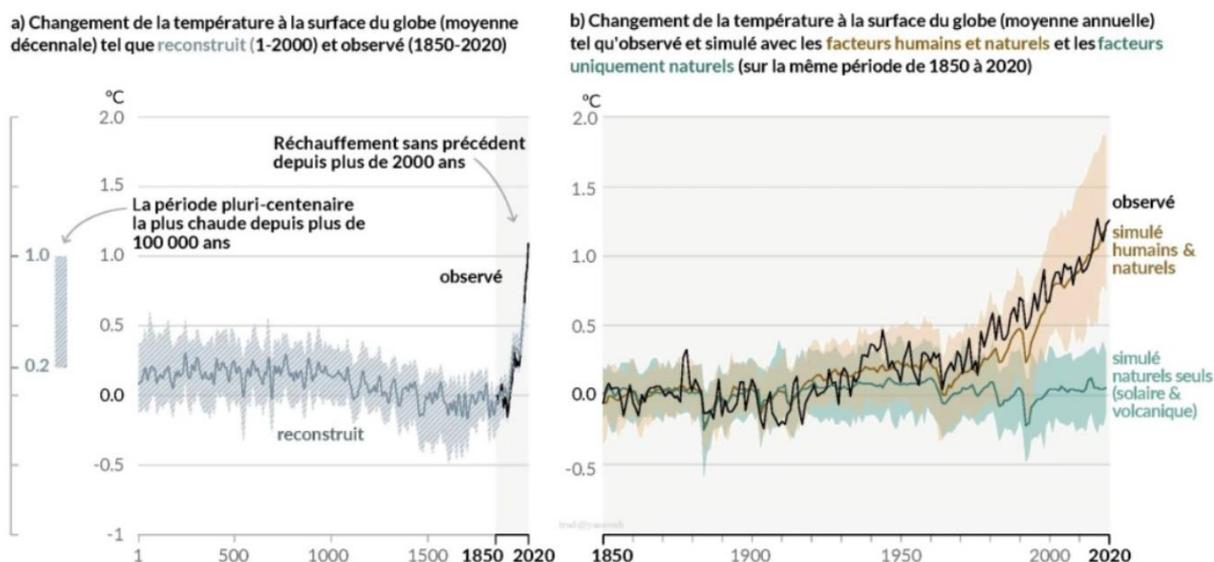
**Ainsi, la planète a déjà subi plusieurs évolutions de climat mais ces évolutions n'ont jamais été aussi brutales qu'actuellement.**

La dernière période glaciaire a connu son point culminant il y a 20 000 ans. Actuellement, nous sommes dans une période interglaciaire. Cependant, **les phénomènes naturels en jeu ne peuvent pas expliquer à eux seuls le réchauffement actuel de la planète : les activités humaines sont les principales responsables du réchauffement climatique. En effet, la température à la surface du globe est actuellement supérieure de 1.1°C par rapport à la température enregistrée dans les années 1800, avant la révolution industrielle.** Ainsi, la période interglaciaire en cours pourrait être prolongée plus longtemps que prévu avec l'effet des activités humaines.

Ce qui est exceptionnel avec le changement climatique actuel n'est pas tant l'amplitude, pourtant significative, que la rapidité extrême à laquelle les concentrations en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère augmentent. Le premier tome du 6<sup>ème</sup> rapport du GIEC (2021) rappelle qu'en 2019, les concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub> recensées étaient les plus élevées sur une période d'au moins 2 millions d'années et qu'entre 1850-1900 et 2010-2019, la température moyenne globale a augmenté de + 1,07°C. Néanmoins, l'augmentation des températures est variable selon les régions : les océans se réchauffent moins vite que les terres et l'équateur se réchauffe moins vite que les pôles.

*Ci-dessous, le graphique a) issu du 6ème rapport montre que la température actuelle est plus élevée que lors de la dernière période la plus chaude enregistrée depuis 100 000 ans. Avant cela, il faut remonter à l'ère interglaciaire (=chaude) précédente (125 000 ans) pour retrouver une température aussi élevée.*

*Le graphique b) compare l'évolution climatique simulée sans impact de l'activité humaine sur le climat (sans émission de GES) et avec l'impact de l'activité humaine.*



Source : GIEC (rapport AR6 – 2021)

Au niveau des projections climatiques, le 6<sup>ème</sup> rapport du GIEC conclut que la température à la surface du globe continuera d'augmenter au moins jusqu'au milieu du siècle, quel que soit le scénario d'émissions envisagé. Le réchauffement planétaire dépassera les 2°C au cours du XXI<sup>ème</sup> siècle, à moins que des réductions considérables des émissions de CO<sub>2</sub> et d'autres gaz à effet de serre n'interviennent dans les prochaines décennies, et qu'elles soient enclenchées immédiatement.

Le niveau de la mer devrait s'élever pendant des siècles en raison du réchauffement continu des océans profonds et de la fonte des calottes glaciaires. Au cours des deux mille prochaines années, le niveau moyen de la mer augmentera d'environ 2 à 6 m, si le réchauffement est limité à 2° ; et de 19 à 22 m avec un réchauffement de 5°.

## 2.4. D'où viennent les projections climatiques ?

### La modélisation climatique

Modéliser, c'est construire une représentation d'un phénomène afin d'être en mesure de comprendre, d'étudier ou d'expliquer plus facilement ce dernier. On peut traduire la modélisation climatique comme la traduction numérique des principaux processus physiques, géophysiques, chimiques et biologiques qui régissent le système climatique dans le but d'obtenir une représentation simplifiée du système terrestre.

Pour modéliser le climat sous l'effet des changements climatiques, il faut inclure dans le modèle, ce qu'on appelle des forçages climatiques. Ces forçages sont des perturbations d'origine extérieure au système climatique qui impactent son bilan radiatif, telles que les émissions et les concentrations des gaz à effet de serre et des aérosols. À partir d'un ensemble d'hypothèses d'évolutions des perturbations de ces émissions et concentrations, à l'horizon 2100 des trajectoires possibles d'évolutions appelées profils RCP (Representative Concentration Pathways) ont été établis par le GIEC.

Dans le cadre de cette étude, nous nous appuyons sur les 4 RCP ci-après qui présentent des trajectoires possibles des paramètres climatiques en fonction de l'évolution des émissions (hypothèses).

*Qu'est-ce que le "bilan radiatif de la Terre" ?*



*Le bilan radiatif de la Terre quantifie la différence entre l'énergie reçue et perdue par le système climatique terrestre, au niveau de l'atmosphère, du sol et des océans. Lorsque le bilan est nul, la température moyenne de notre planète reste stable.*

Les 4 RCP ci-dessous présentent des évolutions possibles à l'horizon 2100 en fonction de l'évolution des émissions. Leur numéro correspond au forçage de bilan radiatif atteint en 2100. Plus la valeur du bilan radiatif est élevée, plus le système terre-atmosphère gagne en énergie et se réchauffe. **Dans le cadre de l'étude, nous retiendrons les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 pour le volet climatique et uniquement le RCP 8.5 pour le volet hydrologie future.** Le RCP 2.6 est considéré comme dépassé et le RCP 6 a été peu modélisé ; il n'est d'ailleurs pas disponible sur le portail DRIAS.

### Les scénarios d'évolutions des émissions de GES (scénarios RCP) :

**Scénario RCP 2.6** : Il s'agit du scénario le plus optimiste construit par le GIEC. Il considère une forte diminution des émissions de gaz à effet de serre avec un pic culminant avant 2050. Il permettrait de conserver un écart à la température moyenne sur le globe inférieur à 2°C et serait le seul qui permettrait le respect de l'accord de Paris.

⇒ **Scénario le plus optimiste à très faible émissions avec un point culminant avant 2050.**

**Scénario RCP 4.5** : C'est le scénario dit moyen-bas considérant une stabilisation des émissions de gaz à effet de serre avant la fin du 21<sup>ème</sup> siècle à un niveau faible.

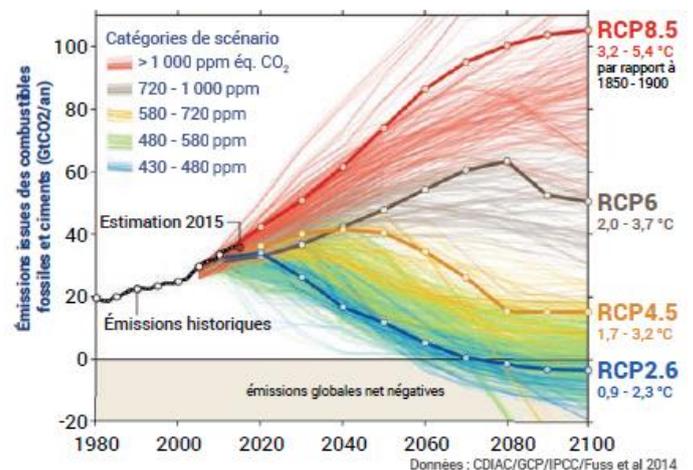
⇒ **Scénario avec stabilisation des émissions avant la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle à un niveau faible.**

**Scénario RCP 6** : C'est le scénario dit moyen-haut considérant une stabilisation des émissions actuelles de gaz à effet de serre avant la fin du 21<sup>ème</sup> siècle à un niveau moyen.

⇒ **Scénario avec stabilisation des émissions avant la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle à un niveau moyen.**

**Scénario RCP 8.5** : Il s'agit du scénario le plus pessimiste considérant une absence de politique de diminution des émissions de gaz à effet de serre. Les émissions de gaz à effet de serre continuent d'augmenter et entraînent des conséquences catastrophiques.

⇒ **On ne change rien. Les émissions de GES continuent d'augmenter au rythme actuel. C'est le scénario le plus pessimiste.**



Source : Global Carbon Project cité dans rapport DRIAS 2020

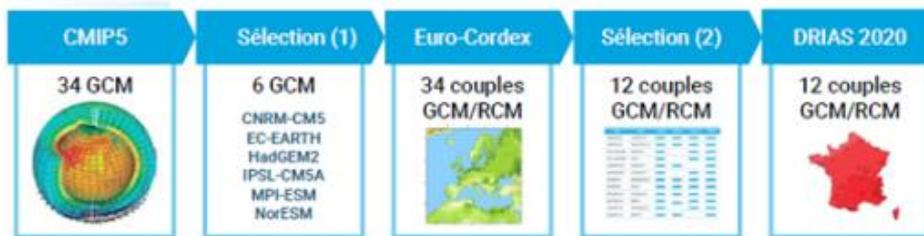
## D'un modèle global à un modèle régional

Les scénarios d'émissions RCP sont donc utilisés en entrée de modèles climatiques établis à l'échelle de la planète (= modèles climatiques globaux ou GCM). Les résultats peuvent différer d'un modèle à l'autre, car ils ne reprennent pas tous les mêmes hypothèses : certains phénomènes ne sont pas encore parfaitement maîtrisés (par exemple la nébulosité).

La résolution des modèles globaux (200 km) est cependant insuffisante pour représenter les phénomènes météorologiques locaux et les événements extrêmes. **Il faut donc opérer une descente d'échelle, qui consiste en l'utilisation de modèles climatiques régionaux (RCM) beaucoup plus fins.**

## Les projections disponibles sur le portail DRIAS

Le portail DRIAS géré par Météo France met à disposition un jeu de données de 19 couples de modèles globaux et régionaux (12 au moment du traitement du volet « Climat » en 2020). Ces simulations ont ensuite été corrigées afin d'éliminer les biais par rapport aux observations locales. En l'occurrence, les jeux de données historiques ont été corrigés avec les données SAFRAN (correction de la distribution des données simulées). Les projections intègrent les scénarios d'émission de gaz à effet de serre.



À partir de ces modèles climatiques, des projections climatiques peuvent être générées suivant les différents scénarios d'émissions de GES (les RCP). Ces projections climatiques constituent alors un scénario climatique qui renvoie à une **description possible du climat futur**.

Pour en savoir plus : [portail DRIAS](#)



**Ces projections climatiques sont de la "génération" du 5ème rapport du GIEC.** Les projections du 6ème rapport sont plus précises, mais ne sont pas disponibles publiquement en version corrigée à la date de publication de ce rapport. Avec ces projections, le signal d'évolution de la température et des précipitations est inchangé, mais l'incertitude est réduite et l'ampleur du réchauffement plus important.

## 2.5. La description du climat actuel

### Les normales climatiques

**Les normales climatiques sont des statistiques permettant de caractériser le climat sur un lieu donné pour une période donnée.** Les normales climatiques sont établies à partir d'une chronique de 30 ans de données et sont mises à jour tous les 10 ans (règles de l'OMM – Organisation Météorologique Mondiale).

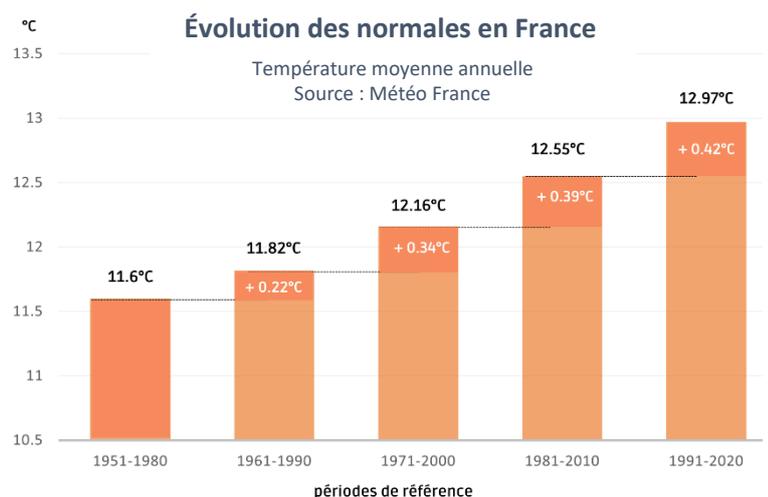
La normale 1990-2020 ne présente pas pour autant le climat « normal » d'aujourd'hui, **puisqu'elle intègre des températures moyennes plus élevées causées par le changement climatique.**

Depuis 2022, Météo France a calculé de nouvelles normales climatiques sur la période de référence 1991-2020. Elles sont représentatives d'un climat centré sur les années autour de 2005 et présenteront encore un léger biais par rapport à la période actuelle.

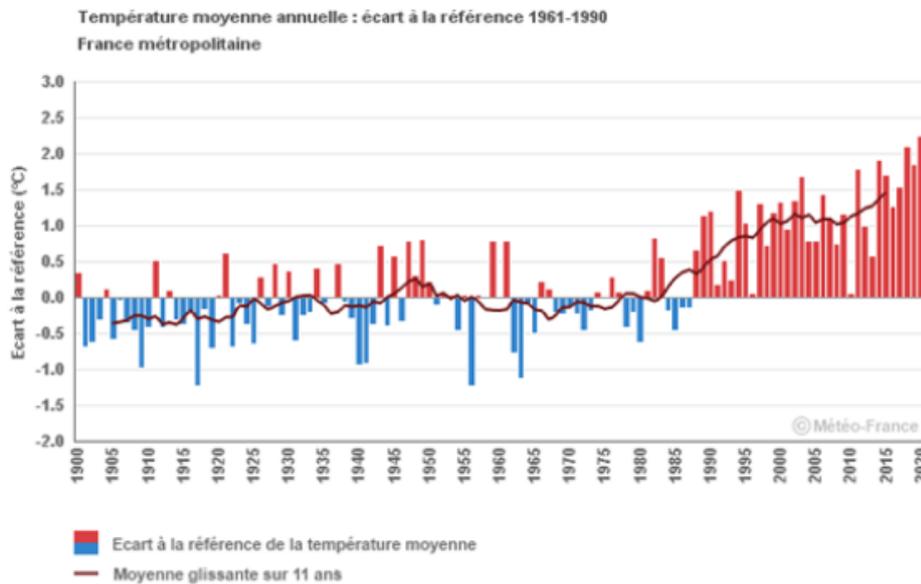
### Quelques tendances à l'échelle nationale

Depuis 1900, la température **moyenne du globe a augmenté d'environ 1 °C** et celle de la **France métropolitaine de plus de 1,5 °C** : toutes les parties de la planète ne se réchauffent pas au même rythme et en particulier **la hausse de la température des terres est plus élevée que celle des océans.**

En raison d'une forte variabilité naturelle, **la température moyenne** peut, certaines années, être plus basse que celle des années précédentes. Mais cette variabilité interne du climat ne cache pas l'évolution de fond : **une tendance marquée à la hausse des températures.**



*Le graphique illustre la hausse des normales de températures moyennes annuelles par période de référence climatique*



Le graphique illustre la hausse des températures moyennes à l'échelle de la France métropolitaine par rapport à la période de référence 1961-1990.

Depuis 1990, la température moyenne annuelle mesurée est supérieure à celle de la période de référence 1961-1990.

**Pour la pluviométrie**, à l'exception de quelques régions de l'Est de la France ou proches de la Méditerranée marquée par l'intensification des pluies, les tendances sont peu marquées, en particulier si l'on observe les longues chroniques de pluviométrie.

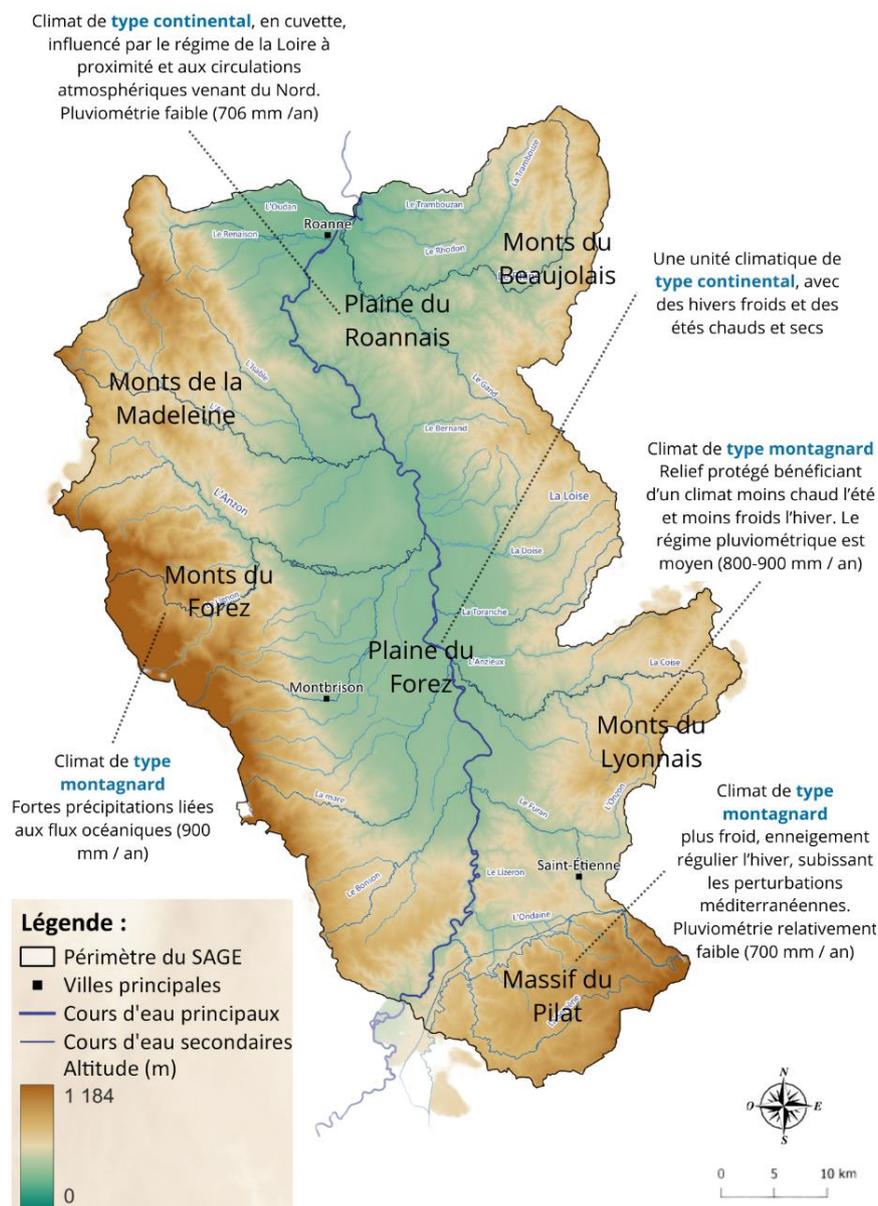
**En termes d'indicateurs d'extrêmes climatiques**, les vagues de chaleur sont devenues plus fréquentes et plus intenses selon Météo France. Il est également observé une intensification des pluies extrêmes dans la région méditerranéenne française (notamment les épisodes cévenols). En revanche, aucune tendance marquée ne se dégage sur l'évolution des tempêtes.

À partir des données **d'humidité des sols depuis 1959**, une chronologie des événements de sécheresse du sol superficiel a pu être établie par Météo France. Depuis 2003, 13 années sur les 20 ont observé une sécheresse des sols notable. Avant, seulement six sécheresses des sols ont marqué le climat français en 40 ans. Ainsi, une accentuation de **l'extension spatiale des sécheresses du sol** superficiel est observée depuis les années 1990.

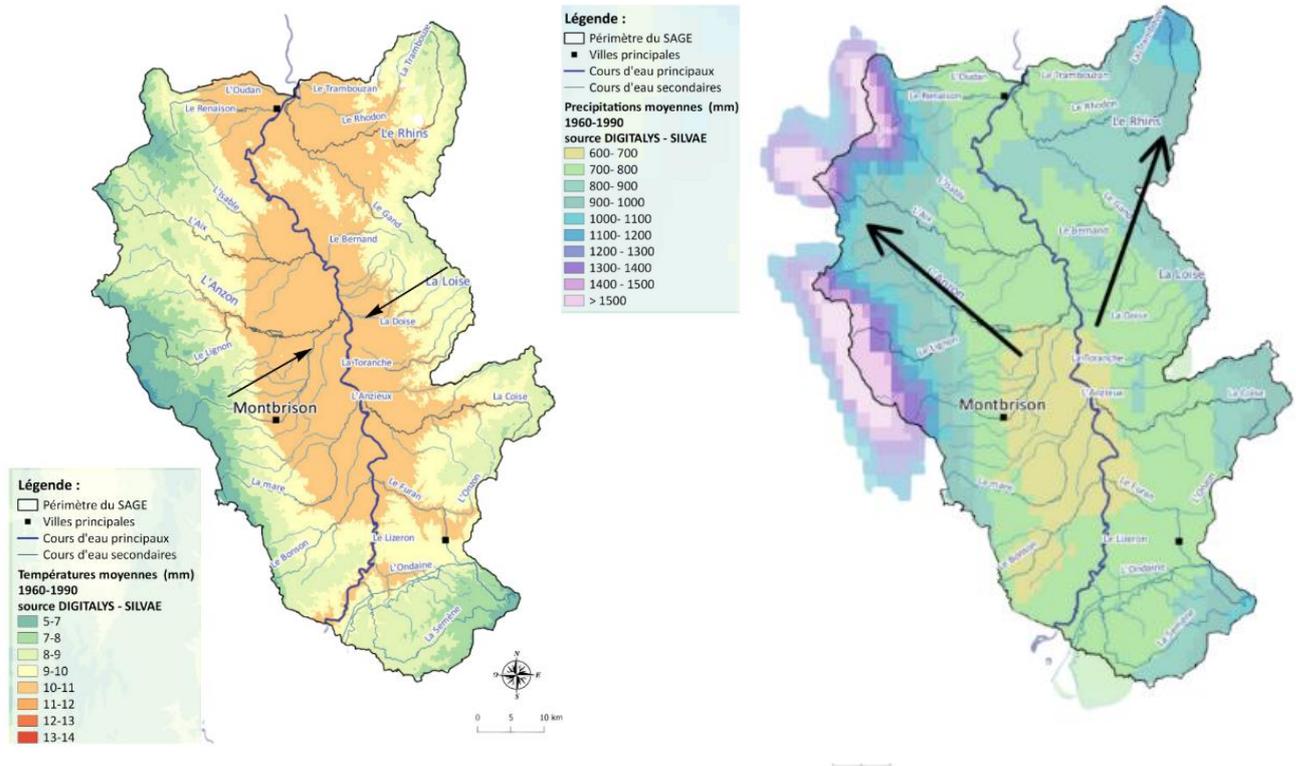
## 3. L'évolution du climat sur le périmètre du SAGE LRA

### 3.1. Caractéristique du climat « actuel »

Le territoire du SAGE LRA appartient au Massif-Central, délimitant deux plaines intramontagnardes (Roannais et Forez). Le climat est semi-continental avec des influences montagnardes sur les parties amont des bassins versants. Sur les monts, les étés sont doux et courts mais les hivers rigoureux, avec la présence prolongée de neige. Les précipitations sont importantes, dépendant généralement d'effets locaux. En plaine, les précipitations sont faibles, notamment en raison de la présence des Monts du Forez qui bloque les vents humides (climat d'abri) et les étés sont chauds, avec de légères influences méditerranéennes qui remontent du sud.



Pour cartographier le climat actuel, les données DIGITALYS SYLVAE (AgroParisTech) ont été utilisées. Elles sont disponibles par mailles et représentent la normale climatique de 1961-1990 à l'échelle nationale. En comparaison avec les températures de la normale 1990-2020, les valeurs sont légèrement inférieures ce qui nécessitent une attention particulière à leur interprétation.



Carte des normales de températures moyennes sur la période  
passée 1960 -1990– DIGITALIS SYLVAE

Carte des normales des précipitations annuelles sur la période passée 1960 -  
1990 à l'échelle du SAGE LRA – DIGITALIS SYLVAE

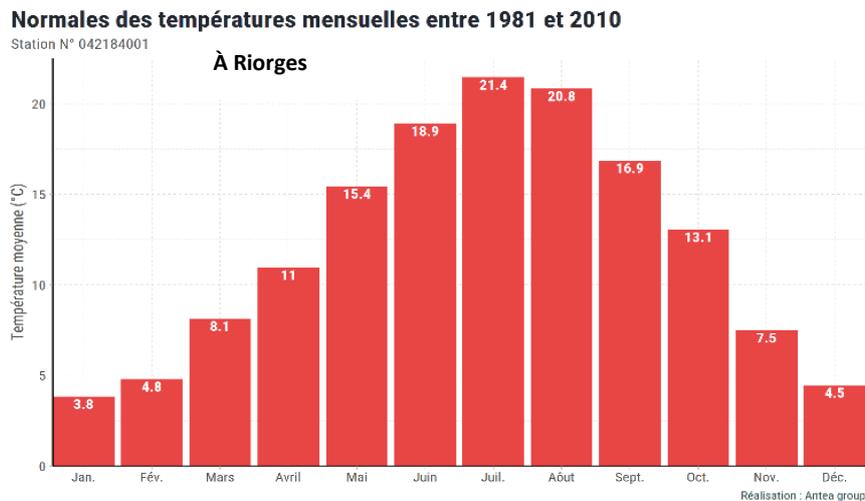
Les températures suivent un **gradient croissant des extrémités latérales Est et Ouest vers le centre, visible sur les cartes ci-dessous**. Ce gradient est corrélé au relief du territoire, la vallée au centre et les hautes altitudes aux extrémités latérales. Les températures moyennes annuelles sont plus élevées dans la plaine que sur les monts du Forez, de la Madeleine et du Pilat, aux altitudes élevées, ainsi que des monts du Lyonnais.

La répartition des cumuls de pluies suit également un gradient décroissant des extrémités latérales Est et Ouest vers le centre, visible sur la carte ci-dessus. Ce gradient est corrélé au relief du territoire : les plaines du Roannais et du Forez au centre et les hautes altitudes aux extrémités. Les précipitations moyennes sont donc bien plus élevées sur les monts, en particulier ceux du Forez et de la Madeleine, qu'en plaine qui bénéficie d'un climat d'abri : elle est moins exposée aux vents et aux précipitations arrêtée par le relief à l'ouest.

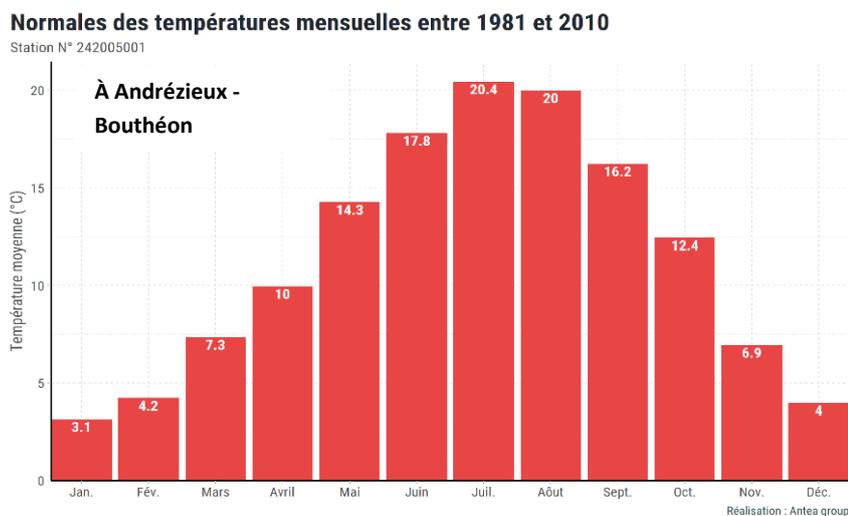
## 3.2. Évolution de la température

### 3.2.1. Normales de température

A la station située à **Riorges** (n°042184001) dans la plaine du Roannais, les normales mensuelles de températures sur la période 1981-2010 oscillent entre **3.8°C en période hivernale** à **21.4°C en période estivale**. Les températures maximales s'établissent autour de 27.7°C en été et de 9.3°C en hiver. Les températures minimales se situent quant à elles autour de 0°C en hiver et 15.2°C en été.



A la station située **Andrézieux-Bouthéon** (n°142005001) au Sud de la plaine du Forez, les normales de températures sur la période 1981-2010 oscillent entre **3.7°C en période hivernale**, à **19.4°C au plus chaud de la période estivale**. Les températures maximales s'établissent autour de 26.7°C en été et de 8.4°C en hiver. Les températures minimales se situent quant à elle autour de -1°C en hiver et 14.2°C en été.



## 3.2.2. Évolution passée des températures

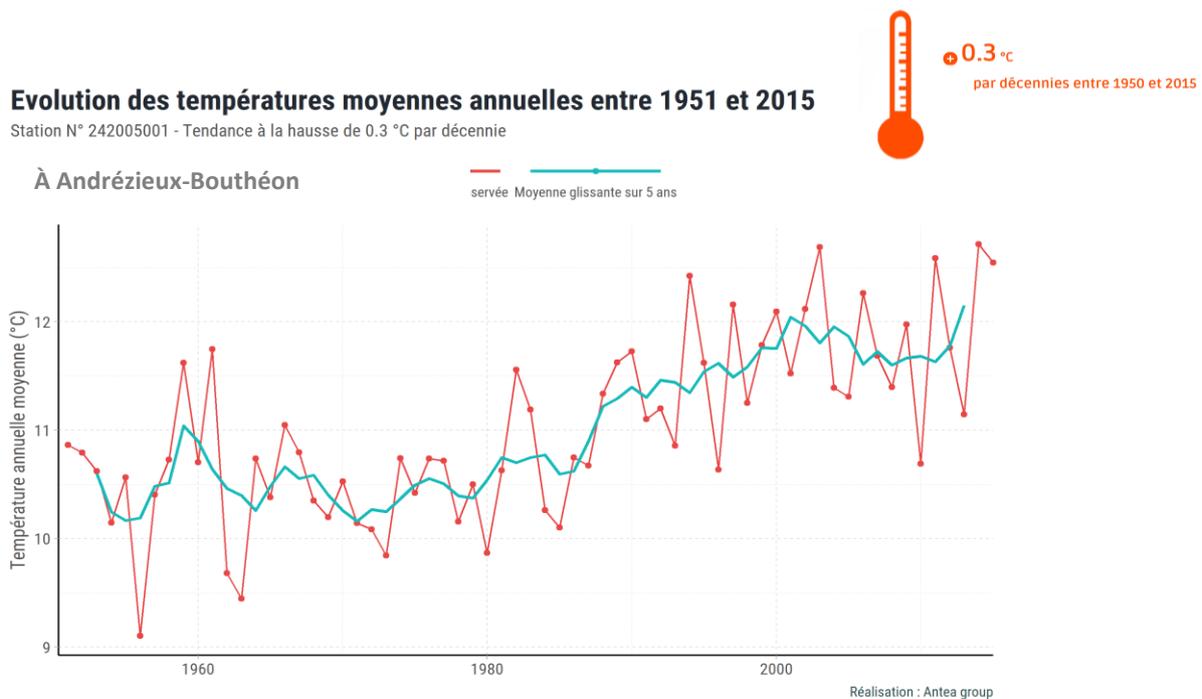
### Station d'Andrézieux-Bouthéon

Les graphiques ci-dessous illustrent l'évolution des températures moyennes annuelles à la station d'Andrézieux-Bouthéon entre 1951 et 2015 (fin de la chronique homogénéisée disponible) et l'écart de cette évolution par rapport à la normale climatique mesurée sur la période 1961 – 1990 (=11.4°C). Un net réchauffement depuis le début de la chronique de données mobilisé est observé.

En effet, **une tendance à la hausse de +0.3°C par décennie des températures moyennes** est observée dans le sud de la plaine du Forez par rapport à la normale climatique observée à cette station sur la période 1961-1990.

**La tendance est identique sur les autres stations météorologiques du périmètre et se poursuit entre 2015 et 2022.**

L'examen des tendances mensuelles montre une tendance à la hausse plus marquée en période estivale et automnale.



### 3.2.3. Évolution future des températures - projection

Les valeurs représentées sur les graphiques sont issues des projections DRIAS (voir plus haut dans le rapport). Les résultats de l'ensemble des mailles analysées ont été moyennés à l'échelle du SAGE LRA afin de disposer d'une valeur intégratrice.

À l'échelle annuelle, l'ensemble des projections disponibles sur le portail du DRIAS montrent une nette augmentation des températures au cours du XIX<sup>ème</sup> siècle sur le périmètre du SAGE Loire en Rhône Alpes.

**Le signal d'augmentation des températures, déjà enregistré sur l'ensemble des stations météorologiques du territoire, est tout autant marqué au sein des projections climatiques.** Les températures minimales et maximales suivent une tendance à la hausse ; le signal est davantage marqué pour les températures maximales.

En fin de siècle, la hausse de température va drastiquement varier en fonction du scénario d'émissions de gaz à effet de serre avec un écart de valeur de + 2 °C entre les deux scénarios (+ 4,2 °C pour le RCP 8.5 et + 2,2 °C pour le RCP 4.5). Les valeurs ci-dessous présentent l'évolution des températures à horizon fin de siècle par rapport à la période de référence 1975-2005.

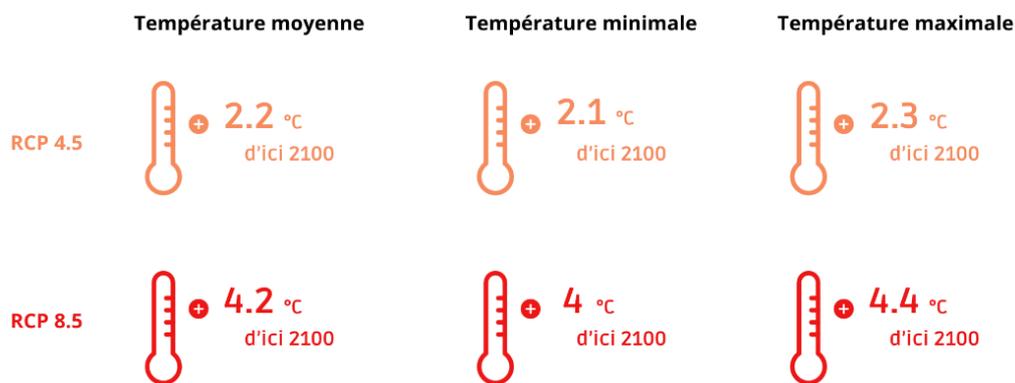
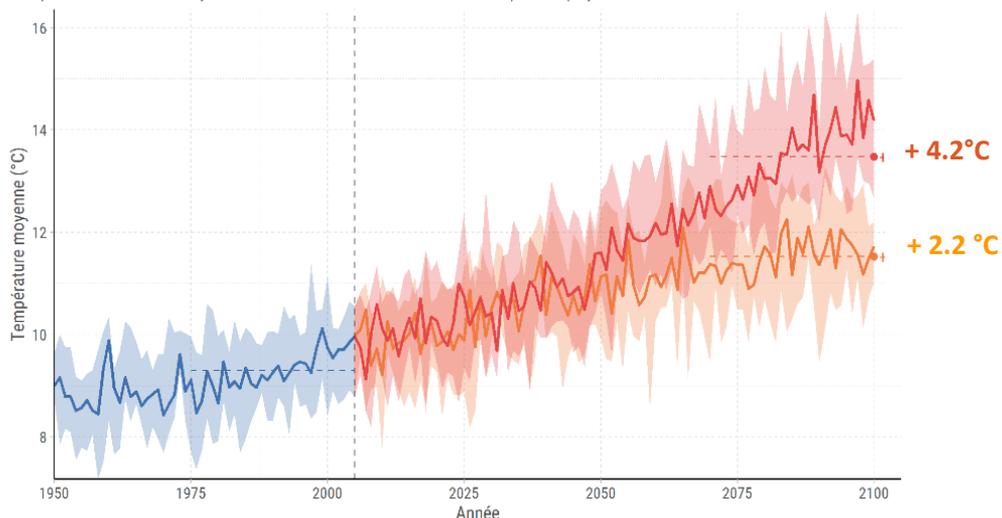


Figure 1 Évolution projetée en climat futur à horizon lointain 2100 de la température moyenne, minimale et maximale par scénario (RCP 4.5 et RCP 8.5) | Source : DRIAS

#### Evolution de l'indicateur : Température moyenne entre 1950 et 2100

Comparaison des valeurs moyennes 1975-2005 avec les valeurs 2070-2100 pour les projections RCP4.5 et RCP8.5



Source des données : DRIAS (Météo France)  
Réalisation des calculs : Antea group

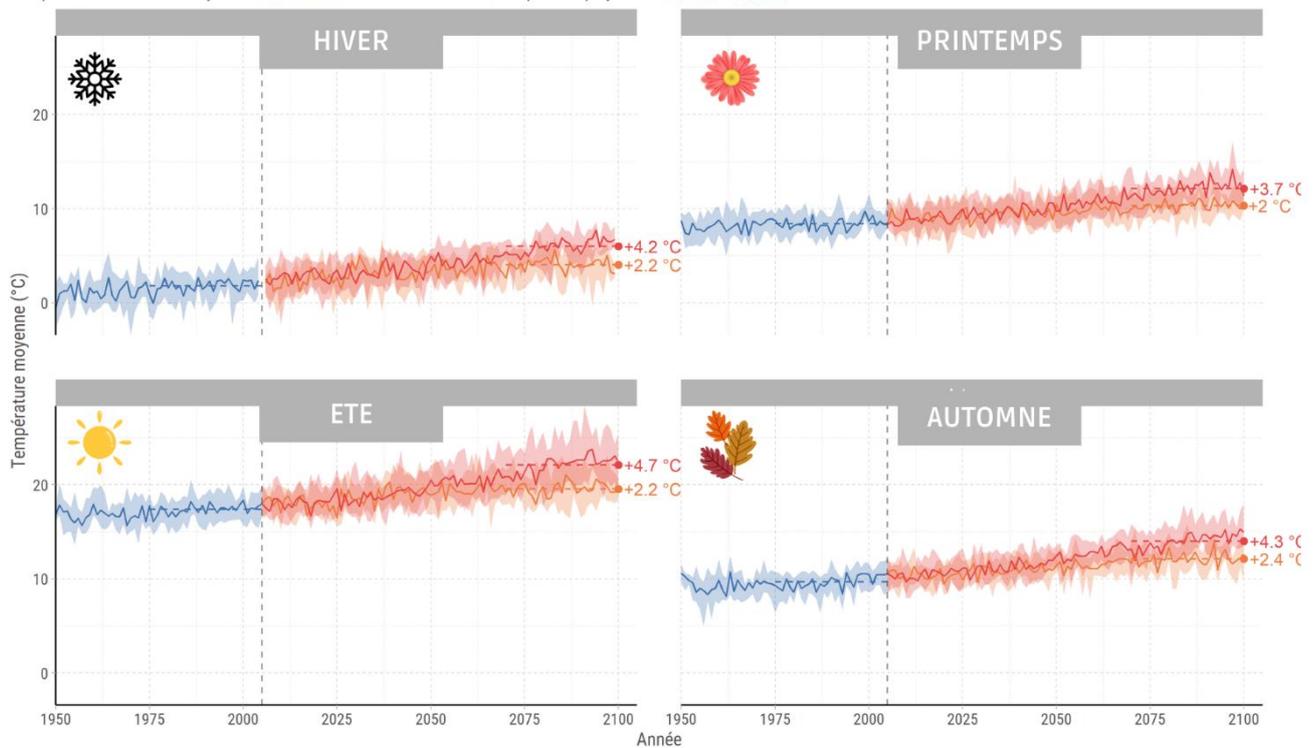


Pour aider à la lecture des graphiques, un écart de température fin de siècle a été indiqué. Il compare la moyenne des températures 2070 - 2100 avec la moyenne 1975 - 2005. Sur le graphique, la courbe correspond à la valeur médiane des modèles. Les halos autour de la courbe représentent la gamme des valeurs possibles.

À l'échelle saisonnière, les graphiques ci-dessous des projections de températures mettent en évidence que la hausse attendue en fin de siècle est importante quelle que soit la saison par rapport à la période de référence 1975-2005. La hausse serait néanmoins plus marquée en période estivale et automnale.

### Evolution de l'indicateur : Température moyenne entre 1950 et 2100

Comparaison des valeurs moyennes 1975-2005 avec les valeurs 2070-2100 pour les projections RCP4.5 et RCP8.5



Source des données : DRIAS (Météo France)  
Réalisation des calculs : Antea group

Enfin en termes de répartition géographique des tendances d'évolution, on observe une homogénéité à l'échelle du périmètre, les °C de hausse de température observés sur chaque maille du territoire étant très proches. La hausse des températures serait néanmoins légèrement plus intense au niveau dans les zones de relief du bassin (Monts du Forez, Monts du Lyonnais et Massif du Pilat) : il est établi que les températures augmentent plus vite en montagne (sans que les processus en place soient pour l'instant précisément identifiés).

La hausse globale des températures (moyennes, maximales et minimales) se traduira également par une multiplication des journées chaudes et des journées présentant des températures extrêmes dites jours de forte chaleur. Une augmentation des températures, notamment en période hivernale, signifie également un recul progressif du froid et du gel.

*Le tableau ci-dessous rend compte à l'horizon lointain 2100 de l'écart entre des indicateurs climatiques liés à l'augmentation de la température sur la période de référence (1975-2005) et à un horizon lointain (2070-2100). Est représentée la moyenne des écarts projetés.*

		Horizon lointain (2070-2100)										
		Écart à la période de référence 1975 - 2005										
		RCP 4.5					RCP8.5					
Période passée (référence 1975-2005)												
		Annuel	Hiver	Printemps	Été	Automne	Annuel	Hiver	Printemps	Été	Automne	Annuel
<b>Nombre de jours chaud</b> (T°max > 25°)	28	0	+2.9	+13.7	+5.9	+22.4	0	+6.5	+29.9	+12.9	+48.7	
<b>Nombre de jours de fortes chaleurs</b> (T°max > 35°)	1	0	+0.2	+1.5	+0.8	+1.7	0	+0.6	+6	+1.4	+6.8	
<b>Nombre de jours de gel</b> (T°min ≤ 0°)	74	-17.8	-7.2	0	-5.6	-30.2	-29.6	-10.6	0	-7.6	-48.8	

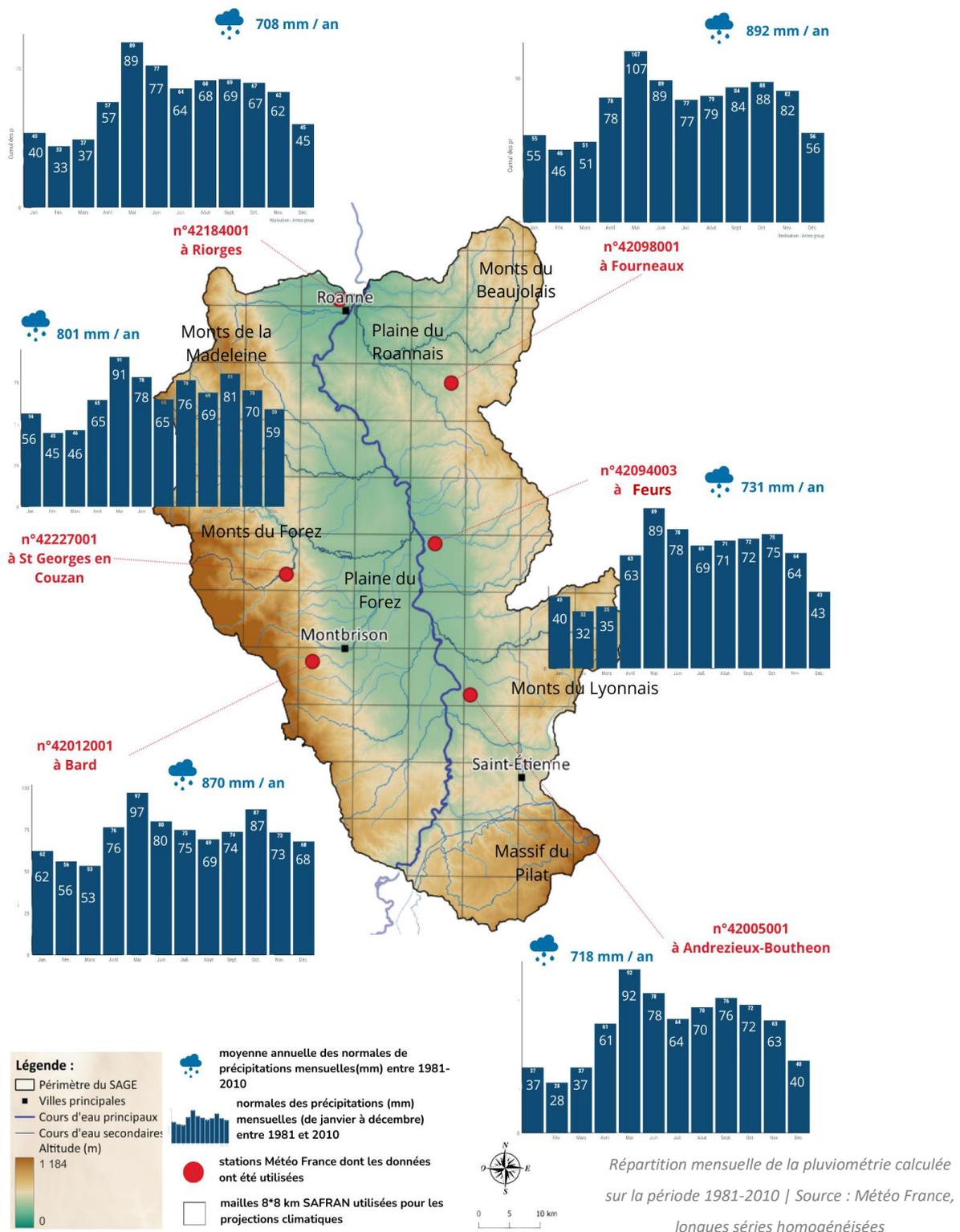
#### À RETENIR SUR L'ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES :

- De 1951 à 2015, l'augmentation de la température moyenne annuelle est de + 0.3 à + 0.4°C par décennie à l'échelle du bassin LRA ;
- Les tendances actuelles de hausse des températures se confirment et s'accroissent avec des différences d'intensité selon le scénario d'émission de GES choisi. À horizon 2100, une hausse entre +2.2°C et +4.2°C de la température moyenne annuelle est projetée à l'échelle du bassin LRA par rapport à la référence 1975-2005 ;
- La hausse des températures est homogène à l'échelle du bassin, malgré des disparités géographiques de l'ordre de quelques dixièmes de degrés (hausse plus importante sur les zones d'altitude). Cette évolution est cohérente avec celle observée en période passée à l'échelle de la région Auvergne Rhône Alpes (Oracle 2023) ;
- Cette hausse se traduira par des événements climatiques extrêmes plus fréquents et intenses (canicules, ...) et par une hausse des jours chauds et de fortes à chaleur et une baisse des jours de gel.

### 3.3. Évolution de la pluviométrie

#### 3.3.1. Les normales climatiques | Pluviométrie

La moyenne de précipitations annuelles agrégées sur le périmètre pour la période 1981-2010 est d'environ 790 mm. Les précipitations sont réparties sur toute l'année avec des cumuls mensuels de 28 à 107 mm, une pluviométrie plus importante d'avril à novembre et un pic en mai. En altitude, les cumuls pluviométriques sont plus élevés (voir cartographie en partie 2 du rapport).



### 3.3.2. Évolution passée | Pluviométrie

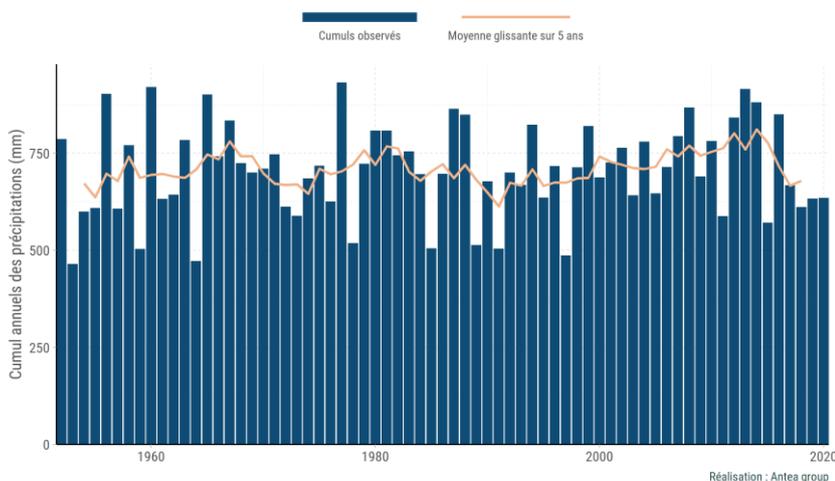
En ce qui concerne les précipitations, l'examen des longues chroniques homogénéisées de Météo France (les seules indiquées pour examiner les tendances liées au changement climatique) ne montre **aucune tendance significative d'évolution à l'échelle annuelle ou mensuelle**. C'est le cas sur une très large partie du territoire français. Il faut noter que les variations interannuelles importantes des cumuls pluviométriques rendent difficile la détection d'une tendance. On observe ainsi une alternance des décennies plutôt sèches et des décennies plus humides, liées à la variabilité interne du climat. Si la décennie actuelle est plutôt sèche, cela n'autorise pas (à ce stade) à dire qu'il y a une tendance à la baisse, les tests de tendance devant être établis sur une longue période, au moins 50 ans

Les graphiques ci-dessous représentent les longues chroniques homogénéisées de cumul pluviométrique sur 3 des stations du périmètre de l'étude.

Les cumuls pluviométriques annuels se répartissent suivant le relief du territoire, avec des précipitations plus faibles en plaines (inférieures en moyenne à 750 mm) et plus élevées sur les monts, notamment le Mont du Forez et du Beaujolais où les précipitations avoisines les 1 000 mm / an.

#### Evolution des cumuls de précipitations annuels entre 1950 et 2020

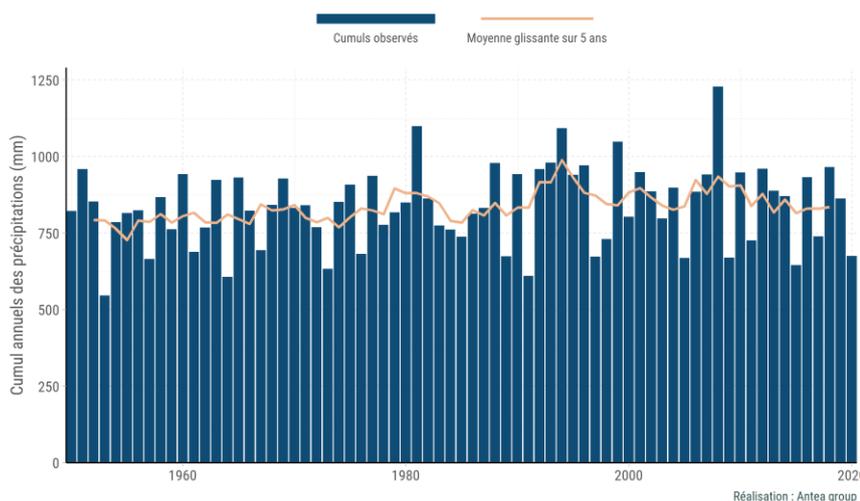
Station N° 042184001 - Pas de tendance



À Riorges, dans le  
Roannais

#### Evolution des cumuls de précipitations annuels entre 1950 et 2020

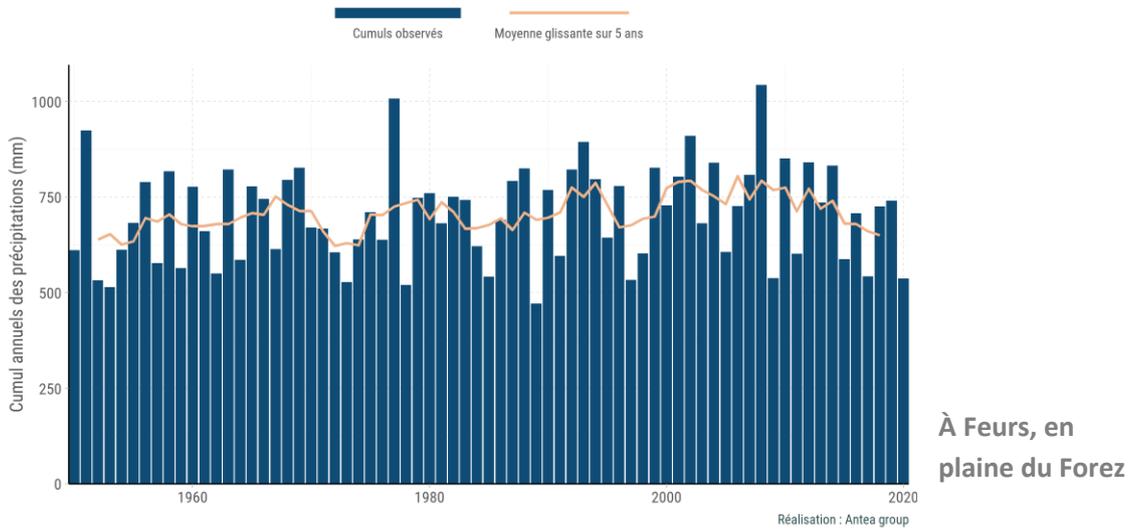
Station N° 042012001 - Pas de tendance



À Bars, vers les  
Monts du Forez

### Evolution des cumuls de précipitations annuels entre 1950 et 2020

Station N° 042094003 - Pas de tendance



Les cumuls mensuels, disponibles dans le dossier de graphiques de l'étude, ne montrent pas non plus de tendance significative (des tests de tendance ont été effectués au pas de temps mensuel sur chacune des stations).

**Aucun des indicateurs d'intensification des pluies ne montre de tendance significative d'évolution sur la période historique** ; pour l'instant c'est plutôt au sein de la région méditerranéenne que cette tendance est statistiquement établie (épisodes cévenols et autres).

En revanche, ce n'est pas parce que les précipitations évoluent peu que cela n'aura pas d'incidence sur l'hydrologie : les précipitations efficaces évoluent à la baisse en période estivale (cf. chapitre 9.2 page 49).

## 3.3.3. Évolution des années sèches et humides

### 3.3.3.1. Qualification des années sèches et humides

**Les sécheresses** sont des événements climatiques exceptionnels et caractérisant un déficit en eau sur une période relativement longue. Ce sont des phénomènes naturels qui surviennent généralement à la suite d'une période prolongée sans précipitation, le plus souvent en période estivale. Les milieux aquatiques comme les sols peuvent être affectés par ce manque d'eau temporaire, dont l'intensité est susceptible d'être accentuée par les activités humaines.

*Sont distinguées les **sécheresses météorologiques** qui correspondent à un déficit de précipitations sur une longue période des **sécheresses des sols** qui résultent d'un déficit d'eau contenue dans les sols (réserve utile) durant la saison de végétation (printemps/été). Elle est d'autant plus intense lorsque l'évapotranspiration est importante. En fin les **sécheresses hydriques** qui correspondent à un déficit de débit des cours d'eau, des niveaux bas des nappes ou retenues, sur une période ou une année pendant laquelle les débits sont très inférieurs à la moyenne d'une période de référence.*



L'indice de précipitations normalisées (SPI), mis au point par les scientifiques américains McKee et al. En 1993, est un indicateur permettant de rendre compte de la **sécheresse météorologique**.

Cet indice permet de **qualifier sur une série temporelle les années sèches ou humides**. Cette qualification permet d'identifier les **années marquées par des déficits ou des excédents de précipitations**. Il s'agit d'un indice de probabilité qui repose sur les précipitations et permet donc de mesurer la sécheresse météorologique. Les probabilités sont standardisées de sorte qu'un IPS de 0 indique un cumul de précipitation médian (par rapport à une climatologie moyenne de référence, calculée sur 30 ans). Les écarts indiquent alors des années plus ou moins humides ou sèches à de multiples échelles de temps : l'indice est négatif pour les sécheresses météorologiques (déficit de précipitations sur durée par rapport à une période de référence), et positif pour les conditions très humides (Mc Kee et al., 1993) (précipitations abondantes). Pour chaque gamme de valeur d'indice, une catégorie de sécheresse météorologique est définie (légère, modérée, grande ou extrême).

Ces échelles de temps traduisent les incidences de la sécheresse météorologique sur la disponibilité des différents types de ressources en eau. L'humidité du sol réagit relativement vite aux anomalies de précipitations, tandis que les eaux souterraines, le débit des cours d'eau et les volumes stockés dans les réservoirs sont sensibles aux anomalies de précipitations à long terme.

Il est ainsi important de noter que la période sur laquelle porte l'indice SPI variera en fonction du type de sécheresse faisant l'objet des analyses : un indice SPI sur 1 à 2 mois pour une sécheresse météorologique, sur 1 à 6 mois pour une sécheresse agricole et sur 6 à 24 mois voire plus pour une sécheresse hydrologique (source : Organisation Météorologique Mondiale).

**Dans le cadre de cette étude, nous utilisons donc l'indicateur IPS « Indice Pluviométrique Standardisé » à une échelle de temps annuelle (12 mois) de 1950 à 2020.** À cette échelle, l'indice SPI fournit une représentation des régimes de précipitations à longue échéance en établissant la comparaison entre les précipitations sur une période de 12 mois consécutifs et celles enregistrées sur la même série de 12 mois consécutifs de toutes les années pour lesquelles les relevés sont disponibles.

**Les valeurs des indices SPI établis pour une période relativement longue « tendent à graviter autour de zéro à moins qu'une tendance humide ou sèche bien distincte ne soit installée » (OMM).**

### 3.3.3.2. Évolution des années sèches et humides depuis 1950

L'analyse de la qualification des années sèches et humides a été réalisée à partir des données des longues séries homogénéisées fournies par Météo-France sur la période 1985-2018 pour les stations de Bard, de Riorges et d'Andrézieux-Bouthéon. L'indicateur a été calculé sur les années civiles.

Les années 1953 et 1964 sont qualifiées d'extrêmement sèches sur les stations rive gauche. Les années 1964, 1978, 1985, 1989, 1991, 1997 sont quant à elles qualifiées de très sèches sur les stations de Riorges et Andrézieux-Bouthéon. 2015 ressort en très sèche sur les secteurs des Monts du Forez (Bard).

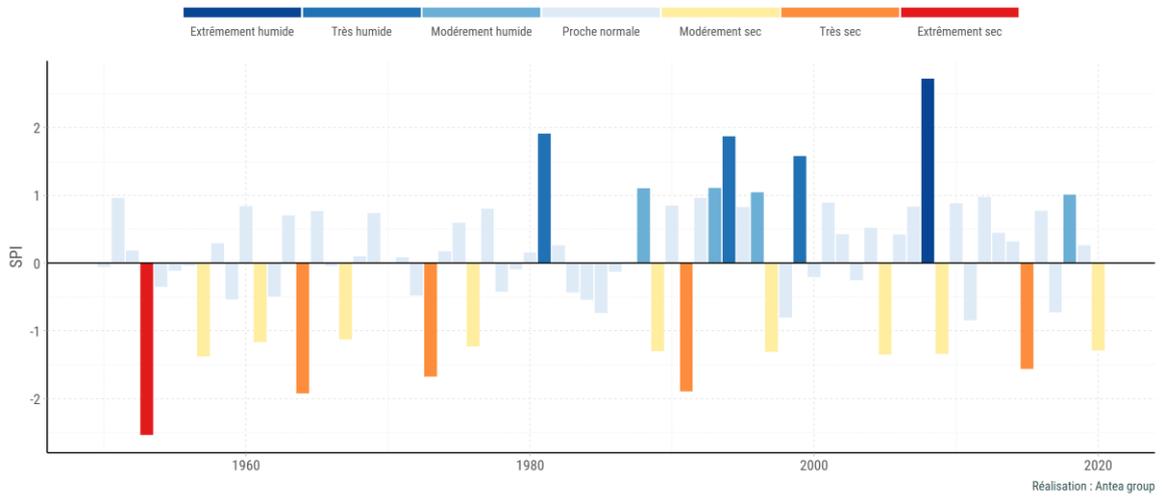
Sur la dernière décennie, les années sèches sont 2015, 2017 et 2020.

À contrario, les années 1994, 1999, 2008 et 2013 ont été qualifiées de très humides à extrêmement humides (2008 pour la station de Bard).

### Précipitations annuelles standardisées entre 1950 et 2020

Station N° 042012001

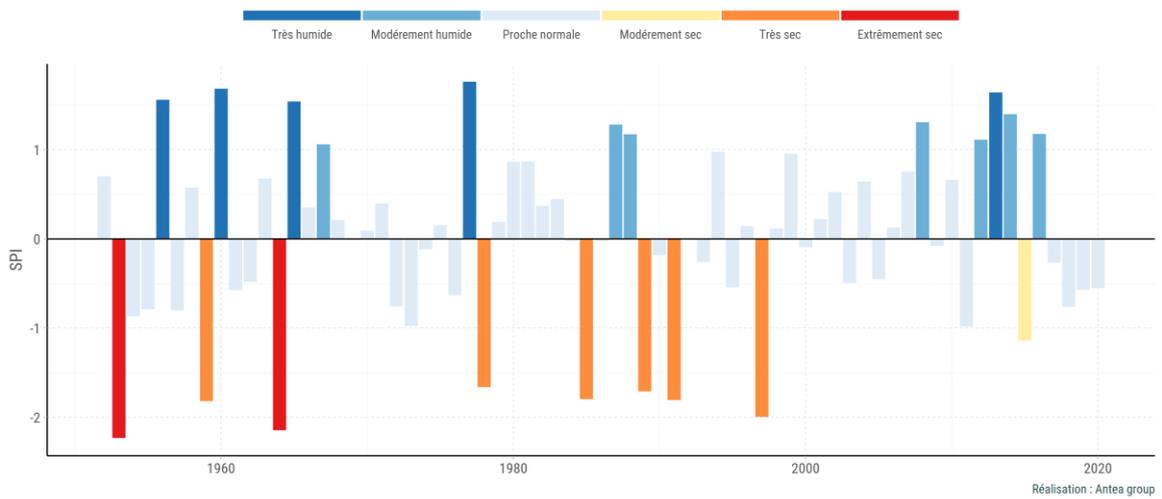
#### A Bard, en amont de Montbrison



### Précipitations annuelles standardisées entre 1950 et 2020

Station N° 042184001

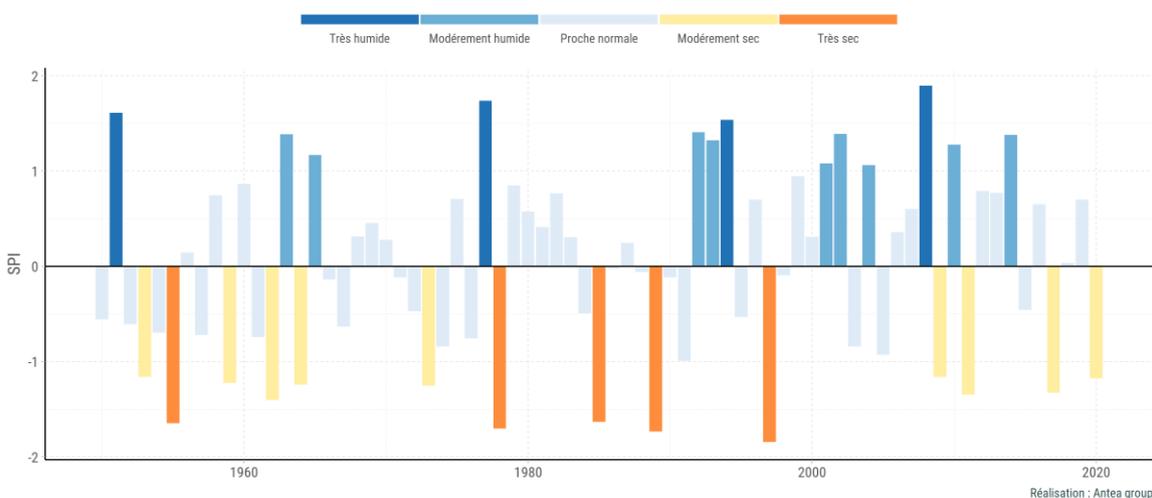
#### À Riorges, à proximité de Roanne



### Précipitations annuelles standardisées entre 1950 et 2020

Station N° 142005001

### À Andrézieux-Bouthéon



### 3.3.3.3. Évolution des mois secs et humides depuis 1950

*Graphique page suivante*

L'étude des sécheresses météorologiques à l'échelle mensuelle permet de distinguer pour chaque année les mois secs et les mois humides, chaque mois étant évalué selon la normale climatique de ce mois-là. Elle permet donc de mieux identifier les années jugées difficiles en matière de gestion de la ressource : sécheresse prolongée en période de recharge des têtes de bassin en fin d'hiver / printemps ou forte sécheresse météorologique en période estivale, les cours d'eau du périmètre étant très dépendants des précipitations faute de gros stockage en soutien. Le paramètre des températures serait néanmoins à considérer également sur le bassin : conjugué à de faibles précipitations, les très fortes températures sont synonymes de sécheresses des sols intenses et d'étiages sévères.

**En effet, il convient de ne pas confondre les épisodes de sécheresse météorologique (basés sur la pluviométrie) et les canicules (basées sur les températures).** À titre d'exemple, l'année 2003 a été caniculaire mais les cumuls pluviométriques étaient globalement dans la moyenne, sauf les mois de mai et de juin, qualifiés de secs. Le déficit sur ces deux mois en entrée de période estivale, associés aux températures très élevées ont néanmoins eu un impact sur les niveaux de sécheresse des sols et sur les niveaux de pluies efficaces, ces épisodes sont donc également impactant pour la ressource en eau.

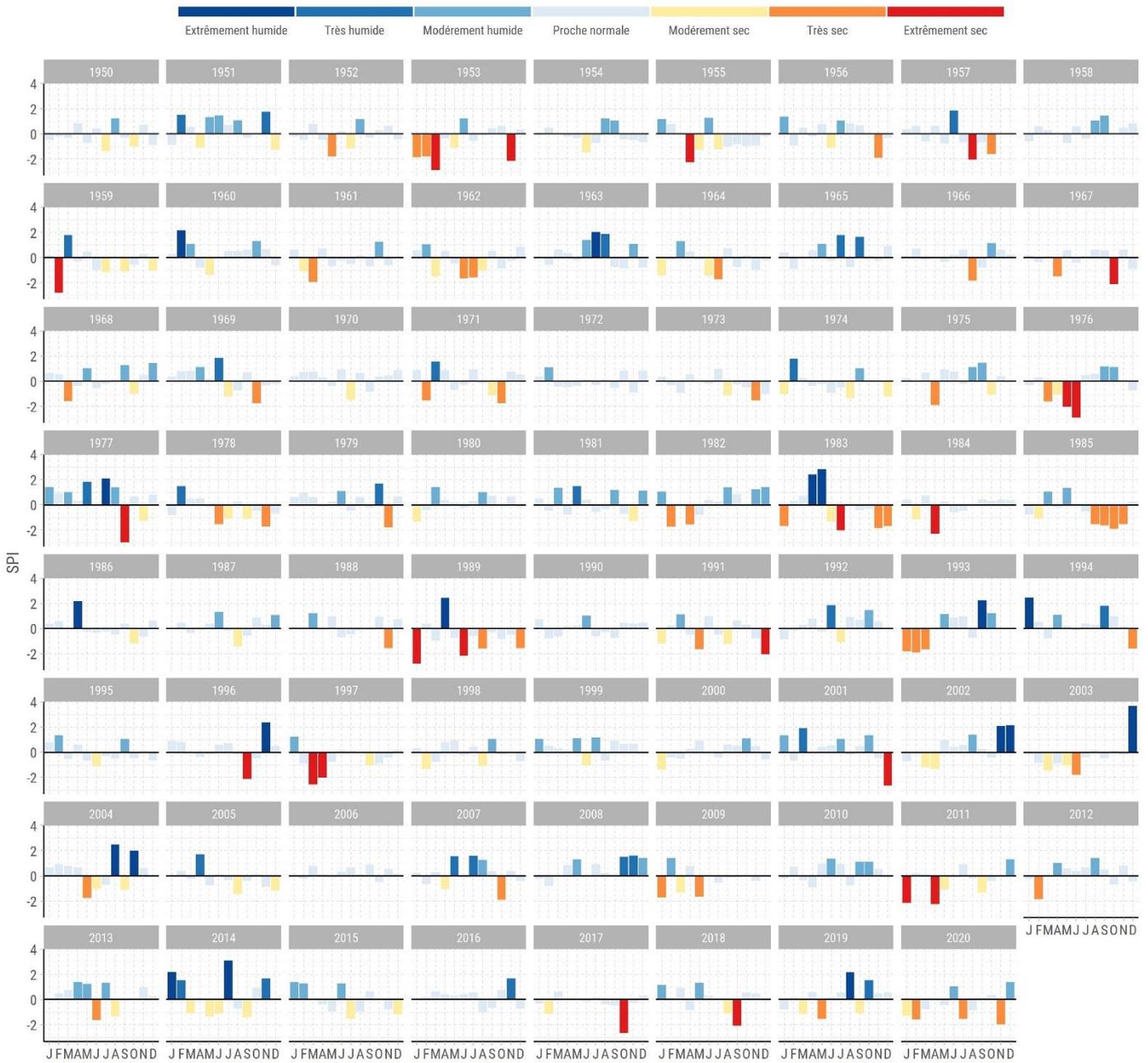
Aussi, certaines années présentées comme sèches ne présentent pas de mois particulièrement déficitaire en précipitations : parfois ce sont les faibles déficits de précipitations tout au long de l'année qui, cumulés, classifient l'année en année sèche.

La période 1989 -1991 considérée comme « une des plus sévères des cinquante dernières années en termes de déficits d'humidité du sol et de précipitations » par Météo-France est également bien visible avec plusieurs mois qualifiés dans les classes les plus extrêmes (« très sec » ou « extrêmement sec ») ; de même que la sécheresse historique de 1976.

## Précipitations mensuelles standardisées (1 mois) entre 1950 et 2020

Station N° 142005001

À Andrézieux-Bouthéon

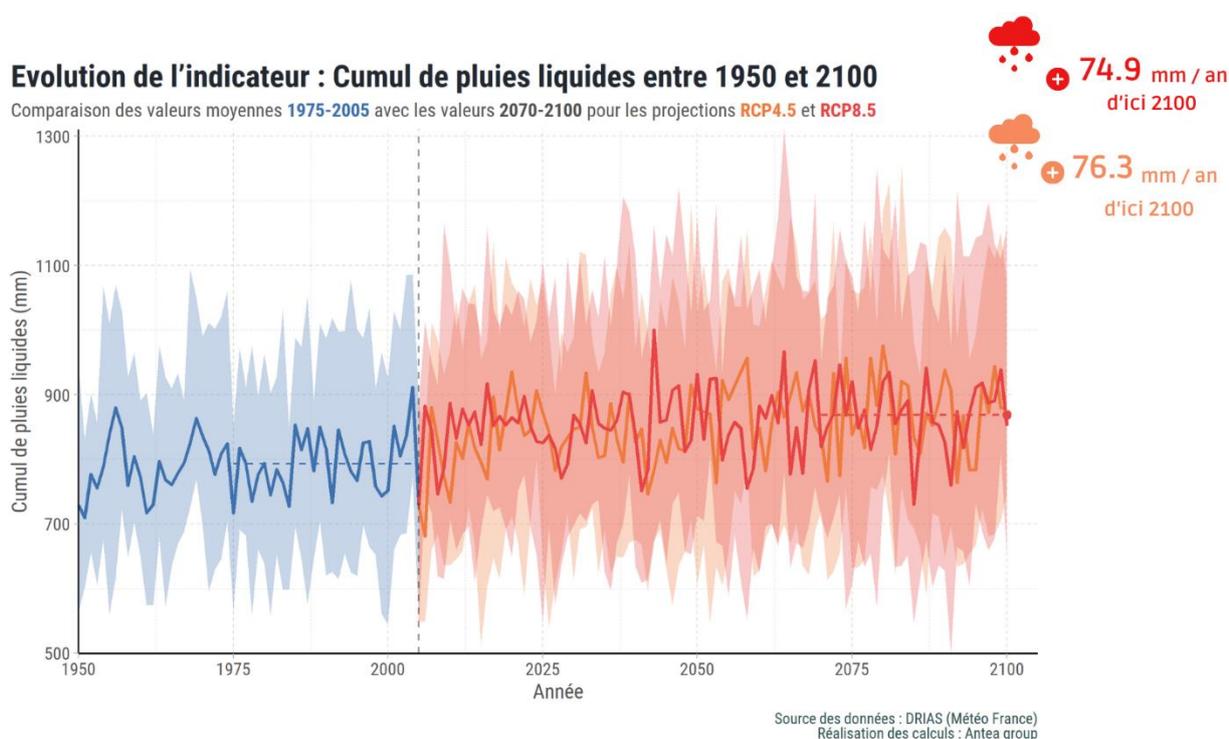


### 3.3.4. Évolution future de la pluviométrie | projections

Les valeurs représentées sur les graphiques sont issues des projections DRIAS (voir plus haut dans le rapport). Les résultats de l'ensemble des mailles analysées ont été moyennés à l'échelle du SAGE LRA afin de disposer d'une valeur intégratrice.

#### 3.3.4.1. Précipitations liquides

À l'échelle annuelle, les deux scénarios d'émission de gaz à effets de serre montrent un signal à la hausse des cumuls annuels de précipitations liquides, en valeur médiane, à l'horizon lointain 2100.



La hausse des précipitations liquides est en partie liée à la baisse des précipitations neigeuses au cours du prochain siècle.

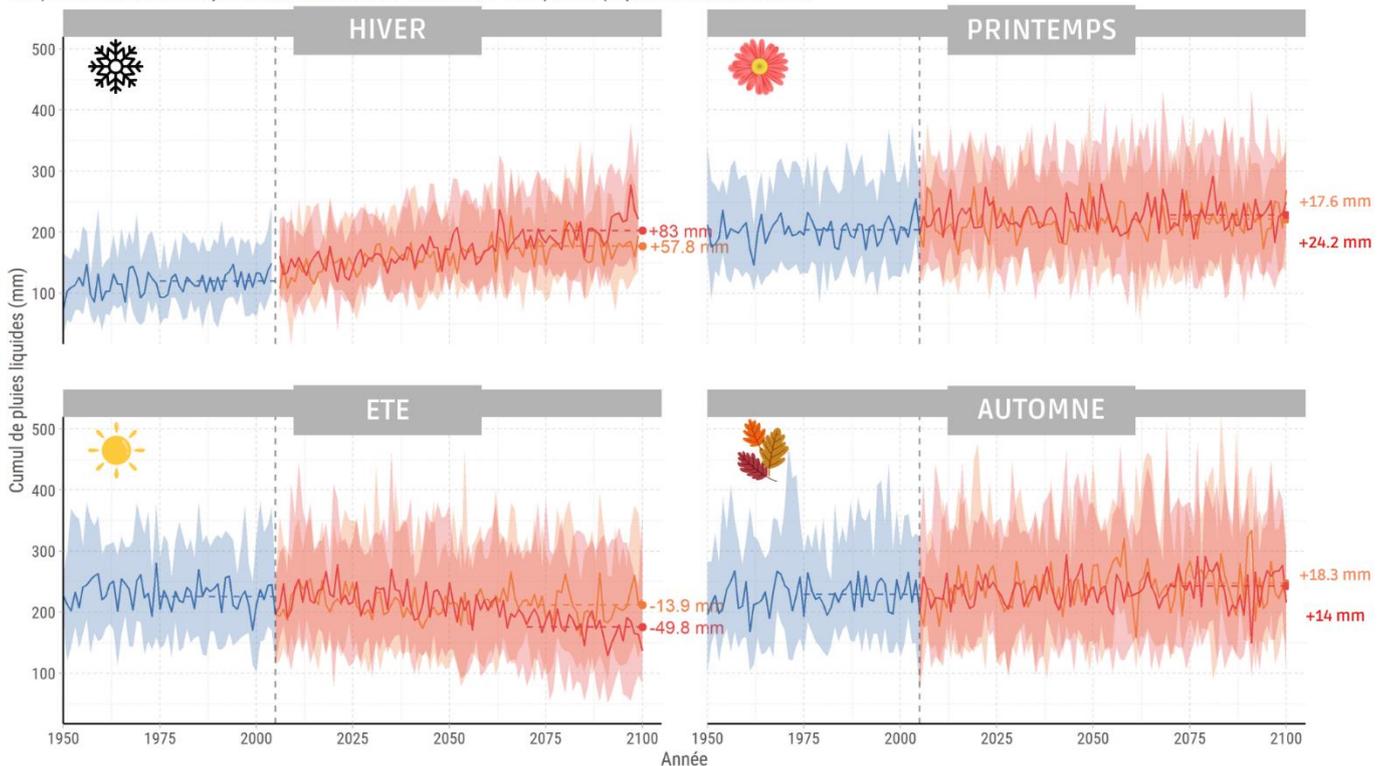


Pour aider à la lecture des graphiques, un écart de température fin de siècle a été indiqué. Il compare la moyenne des températures 2070 - 2100 avec la moyenne 1975 - 2005. Sur le graphique, la courbe correspond à la valeur médiane des modèles. Les halos autour de la courbe représentent la gamme des valeurs possibles.

À l'échelle saisonnière, les projections montrent une évolution de la répartition des pluies au cours de l'année. Une **baisse de la pluviométrie estivale** (- 50 mm en 2100 avec le scénario RCP 8.5 soit - 20%) est donc projetée en fin de siècle, alors que les **précipitations hivernales seraient en hausse** : jusqu'à + 83 mm en 2100 en scénario RCP 8.5 soit + 30%. **Les évolutions sont moins marquées au printemps et en automne.**

## Evolution de l'indicateur : Cumul de pluies liquides entre 1950 et 2100

Comparaison des valeurs moyennes 1975-2005 avec les valeurs 2070-2100 pour les projections RCP4.5 et RCP8.5

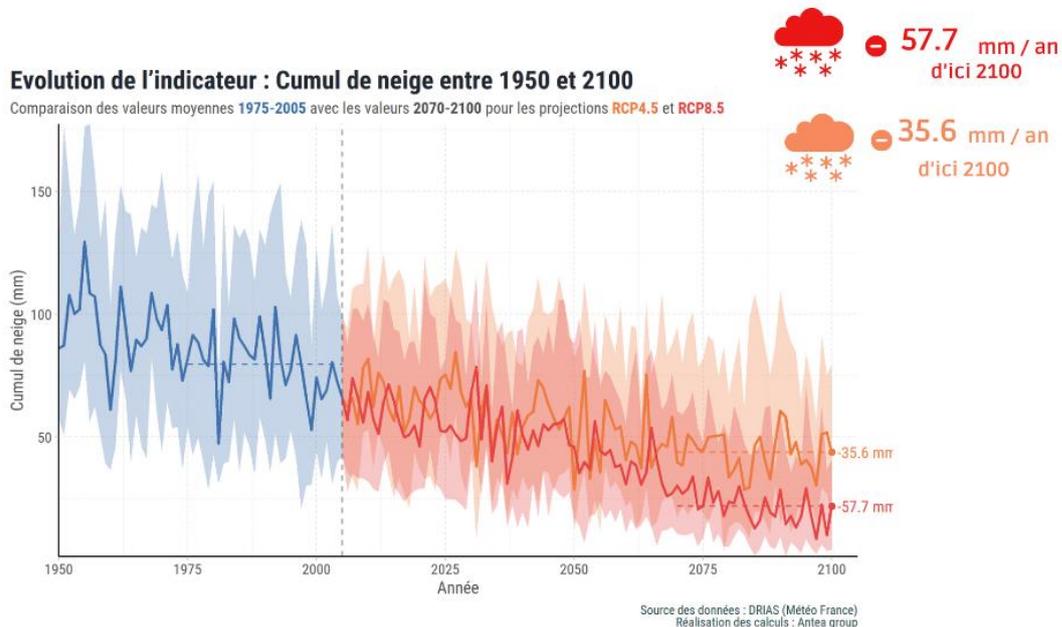


Source des données : DRIAS (Météo France)  
Réalisation des calculs : Antea group

**La dynamique est similaire sur l'ensemble des mailles du territoire, sans distinction géographique marquée.**

**En climat futur, les modèles font aussi état d'une intensification des épisodes pluvieux,** qui se traduisent par un moins grand nombre de jours de pluies et des cumuls de pluie plus important concentrés sur moins de jours. La multiplication d'épisodes intenses aura un impact sur les pluies efficaces : globalement, de faibles précipitations sur une longue période permettent une meilleure infiltration des eaux de pluies que les averses orageuses qui favorisent les ruissellements de surface.

### 3.3.4.2. Les précipitations neigeuses



L'enneigement est directement lié aux conditions de températures et de précipitations. L'augmentation des températures de l'air entraîne une diminution de l'épaisseur de neige au sol, de l'étendue des surfaces enneigées et de la durée d'enneigement (fonte rapide du manteau neigeux). Les secteurs de montagne sont particulièrement sensibles à ces modifications. Le suivi de l'enneigement sur les dernières décennies opéré par Météo France montre des signaux à la baisse de l'enneigement à basse altitude (< 1 500m), surtout en début et fin de saison ; et de remontée de l'altitude de la limite pluie / neige (isotherme 0°).

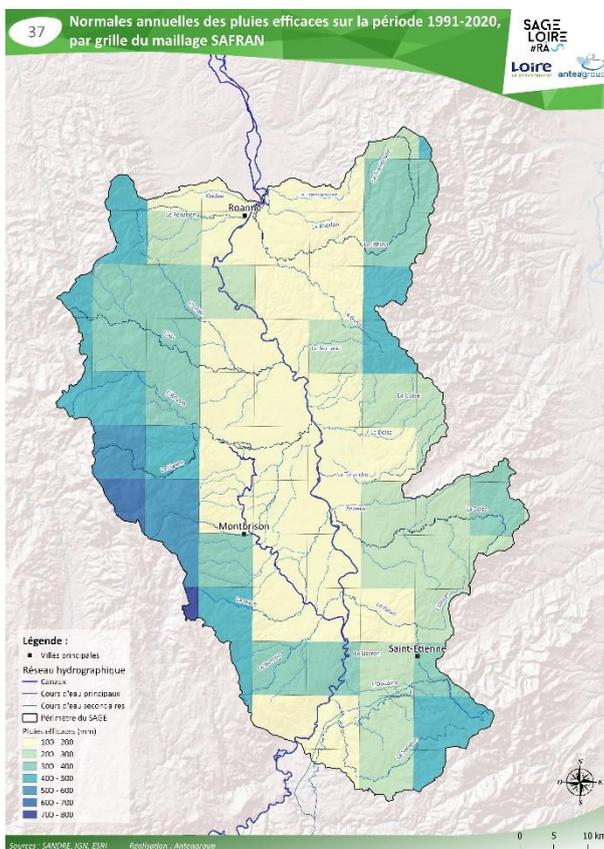
**En climat futur, les modèles montrent un signal à la baisse des cumuls de neige avec en fin de siècle des cumuls 2 à 4 fois moins importants en fonction du niveau de réchauffement.**

### 3.3.4.3. Les pluies efficaces



*Ce sont les précipitations efficaces qui permettent, lorsque toutes les conditions sont réunies, de recharger les nappes souterraines et qui alimentent les cours d'eau et les milieux aquatiques. Elles correspondent à la fois à la différence entre la pluviométrie et l'évapotranspiration : cette eau qui n'est pas évaporée s'infiltrera vers les nappes ou ruissellera vers les cours d'eau, les canaux, les étangs, etc.*

C'est donc l'eau disponible pour l'écoulement et la recharge des nappes. Elles sont logiquement moins élevées au printemps et en été, la période où les plantes utilisent cette eau pour leur croissance, et la retournent vers l'atmosphère par transpiration. C'est ainsi que l'automne / hiver est appelée période de recharge durant l'année hydrologique, car c'est là que les aquifères et rivières peuvent se remplir.



La carte ci-contre représente les cumuls de pluies efficaces annuels moyens sur la période de référence 1991-2020 sur le bassin Loire en Rhône Alpes. Les pluies efficaces varient de 150 mm dans la plaine à 700 mm sur les reliefs en raison de la pluviométrie beaucoup plus élevée. Sur le périmètre du SAGE, au vu du contexte géologique, une majorité de ces pluies efficaces vont ruisseler et alimenter les cours d'eau.

À titre indicatif à l'échelle de la métropole et sur la période de référence 1981-2010, la moyenne annuelle des pluies efficaces est d'environ 185 mm / an.

**En climat futur, les projections font état d'une légère augmentation des précipitations efficaces en lien avec l'évolution des précipitations hivernales. En revanche les précipitations efficaces estivales, déjà très faibles, diminueront encore.**

Généralement, il est identifié que cette évolution permet la sécurisation de la recharge hivernale des nappes,

cependant sur le bassin de la Loire en Rhône Alpes, compte tenu du contexte géologique, il n'y a pas de nappe capacitive et **c'est plutôt la régularité des précipitations qui permet le remplissage continu des petits réservoirs de têtes de bassin versant.** En outre, la baisse des pluies efficaces hors période hivernale risque d'accentuer le déficit hydrique en période estivale voire automnale, ce qui fragilisera l'hydrologie du territoire en période de basses eaux.

#### À RETENIR SUR L'ÉVOLUTION DES PRÉCIPITATIONS :

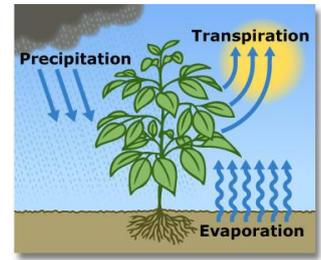
- Sur la période passée et à partir de longues chroniques pluviométriques, il n'y a pas de tendance significative d'évolution des précipitations, tant à l'échelle annuelle que mensuelle. La variabilité interne du climat prédomine toute tendance liée au changement climatique à ce stade.
- En climat futur néanmoins, les modèles font état d'une évolution de la répartition saisonnière des pluies avec une augmentation des précipitations hivernales et une baisse des précipitations estivales. Les cumuls annuels de pluie liquide sont en légère hausse (en partie en lien avec la baisse des précipitations neigeuses).
- Les cumuls neigeux en moyenne montagne (< 1500 m) ont diminué (épaisseur, durée d'enneigement) au cours des dernières décennies et les projections montrent une poursuite de cette tendance.
- Un signal à l'intensification des épisodes pluvieux est perceptible en climat futur, ce qui signifie dans le même temps une augmentation du nombre de jours consécutifs sans pluie.
- Les pluies efficaces hivernales devraient se maintenir, sans que cela permette de sécuriser l'alimentation en eau des cours d'eau compte tenu du contexte géologique du territoire.

### 3.4. Évolution de l'évapotranspiration



**Qu'est-ce que l'évapotranspiration ?**

Elle correspond à l'eau transpirée par le couvert végétal et évaporée des sols. Ce paramètre climatique impacte directement le développement de la végétation et les transferts d'eau vers les rivières et les nappes puisqu'il permet de calculer les pluies efficaces et le bilan hydrique.

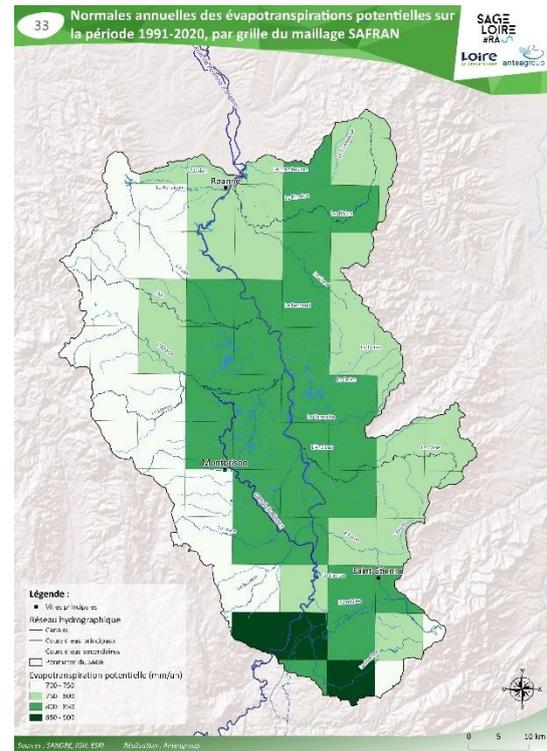


**L'évapotranspiration potentielle** correspond à la quantité maximale d'eau susceptible d'être évaporée sous un climat donné, avec un couvert végétal « standard ». Elle traduit la demande en eau de l'atmosphère. Cette demande n'est pas satisfaite lorsque les précipitations sont trop faibles (inférieure à cette ETP) et on parle alors de déficit hydrique.

**L'évapotranspiration réelle** correspond au volume d'eau effectivement évaporé des sols et transpiré par les plantes, en fonction de l'eau disponible dans la réserve utile des sols.

Les dernières décennies sont marquées par une hausse de l'évapotranspiration en France, à relier à l'augmentation des températures de l'air. L'ORCAE (observatoire régional du climat) fait état d'une hausse de 8% de l'ETP moyenne entre les périodes de 30 ans 1971-2000 et 1990-2020.

En climat futur, les modèles font état d'une hausse continue de l'évapotranspiration potentielle, jusqu'à 20% en fin de siècle avec le scénario RCP 8.5. Cette augmentation de l'ETP va engendrer une baisse des pluies efficace printanières, estivales (déjà très faibles) et automnales et générer un déficit hydrique plus important.

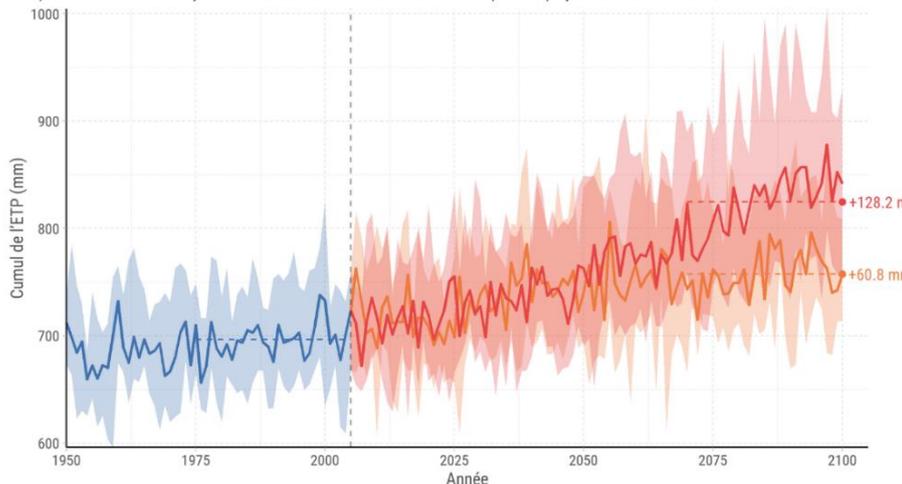


+ 128.2 mm / an d'ici 2100

+ 60.8 mm / an d'ici 2100

**Evolution de l'indicateur : Cumul de l'ETP entre 1950 et 2100**

Comparaison des valeurs moyennes 1975-2005 avec les valeurs 2070-2100 pour les projections RCP4.5 et RCP8.5



Source des données : DRIAS (Météo France)  
Réalisation des calculs : Antea group

## 4. Évolution du bilan hydrique

### 4.1. Bilan hydrique d'un bassin



Un bilan hydrique exprime l'équilibre des changements entre toutes les ressources en eau (précipitations, ruissellement) qui entrent dans un système et celles qui le quittent (évapotranspiration), par rapport à une zone et à une période temporelle. Cet équilibre évolue selon les saisons climatiques (hiver, été, automne et printemps), le couvert végétal et les activités humaines.

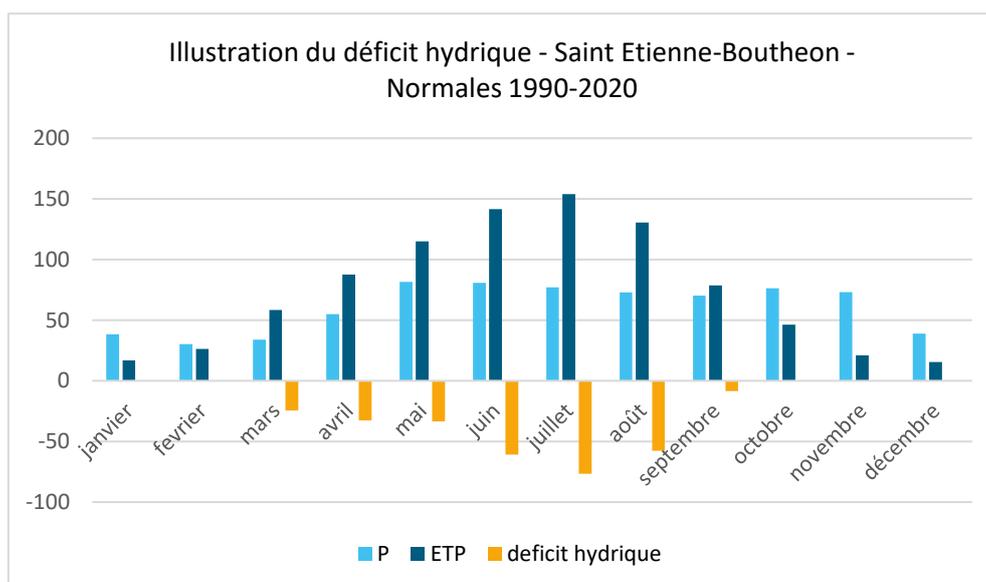
Ainsi, il permet de mesurer le stress hydrique et l'éventuel déficit hydrique notamment pour prévoir les sécheresses météorologiques ou à l'inverse, les inondations.

De manière **simplifiée**, le bilan hydrique est calculé par la différence entre les précipitations (P) et l'évapotranspiration potentielle (ETP). Un bilan hydrique plus robuste prend en compte la réserve utile du sol comme variable de stockage et l'évapotranspiration réelle (approchée à partir de l'ETP et des besoins en eau des couverts), et il est établi au pas de temps journalier.

$$\text{Bilan hydrique simplifié} = P - \text{ETP}$$

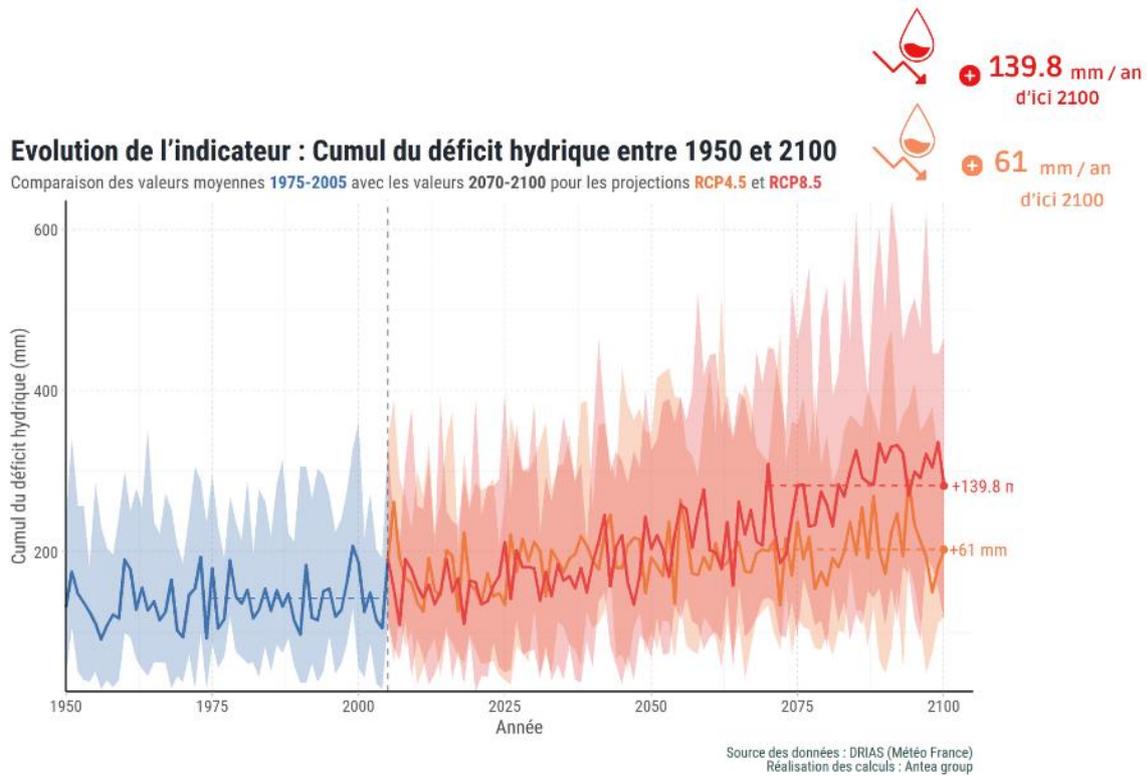
Le changement climatique engendrant une hausse de l'évapotranspiration, alors que les précipitations annuelles seraient constantes, le bilan hydrique va être impacté négativement, on parle alors de « déficit hydrique », concentré sur la période estivale principalement.

Le graphique ci-dessous donne un ordre de grandeur du déficit hydrique à la station de Saint-Etienne. Il a été calculé à partir des valeurs mensuelles, c'est donc une simplification / approximation. À noter que le déficit hydrique cumulé est plus important en plaine que sur les monts, plus arrosés et moins chauds (donc moins d'ETP).



Nous avons recalculé un bilan hydrique simplifié avec les chroniques P et ETP projetées issues du portail DRIAS. En cohérence avec les projections d'ETP et de pluviométrie, les cumuls de déficit

hydrique augmentent en climat futur, en lien la hausse de l'ETP et la baisse de la pluviométrie estivale. Le déficit se creuse en fin de siècle en scénario RCP 8.5.



## 5. L'évolution des sécheresses

### 5.1. Les différents types de sécheresse

#### Les trois types de sécheresses

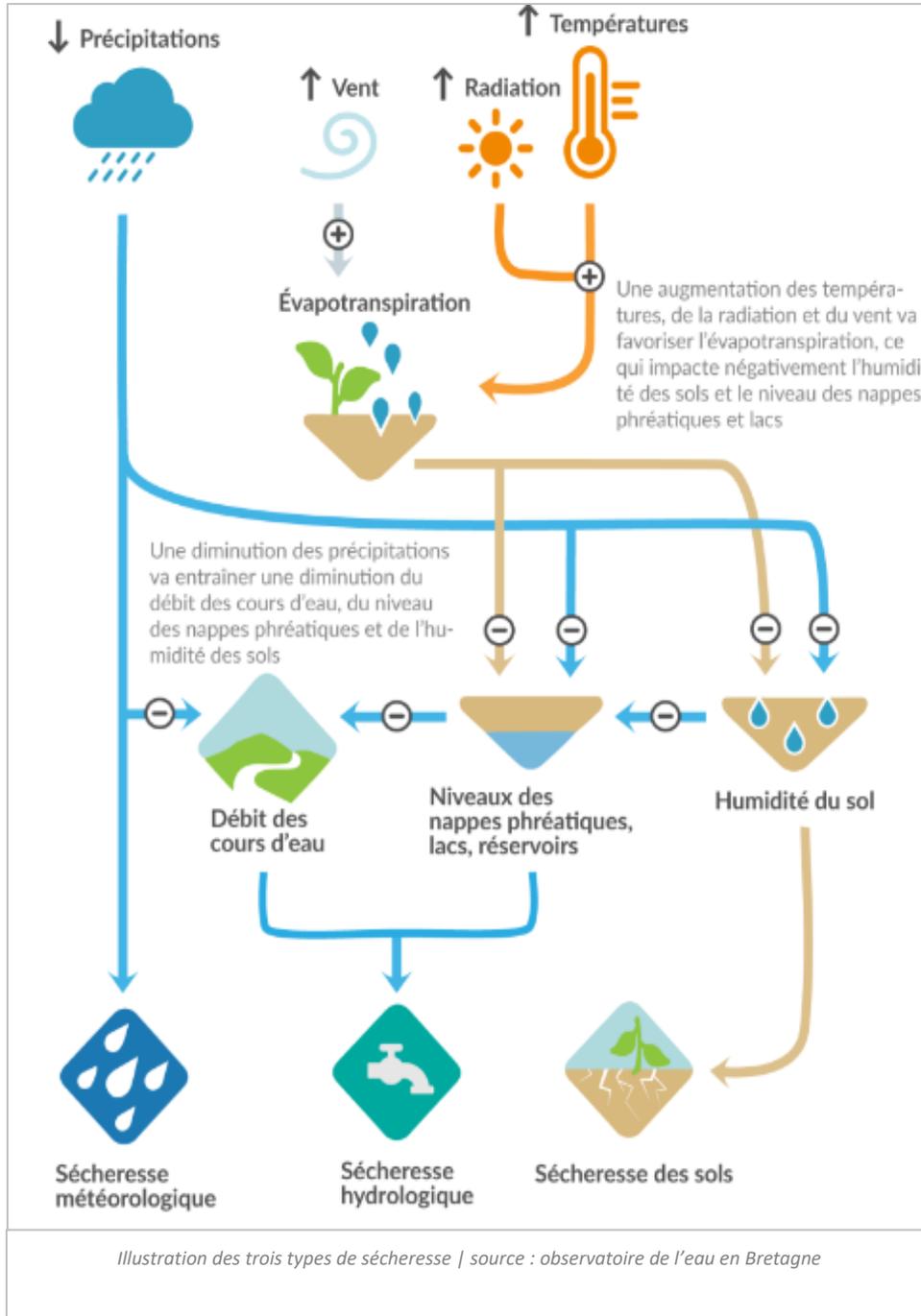
**Les sécheresses** sont des événements climatiques exceptionnels et caractérisant un déficit en eau sur une période relativement longue. Ce sont des phénomènes naturels qui surviennent généralement à la suite d'une période prolongée sans précipitation, le plus souvent en période estivale. Les milieux aquatiques comme les sols peuvent être affectés par ce manque d'eau temporaire, dont l'intensité est susceptible d'être accentuée par les activités humaines.



*Sont distinguées **les sécheresses météorologiques** qui correspondent à un déficit de précipitations sur une longue période des **sécheresses édaphiques (des sols)** qui résultent d'un déficit d'eau contenue dans les sols (réserve utile) durant la saison de végétation (printemps/été). Elle est d'autant plus intense lorsque l'évapotranspiration est importante. En fin les **sécheresses hydriques** qui correspondent à un déficit de débit des cours d'eau, des niveaux bas des nappes ou retenues, sur une période ou une année pendant laquelle les débits sont très inférieurs à la moyenne d'une période de référence.*

**Ces sécheresses sont interconnectées et s'alimentent les unes les autres, de manière plus ou moins rapide et forte selon les caractéristiques du territoire, et les activités humaines.**

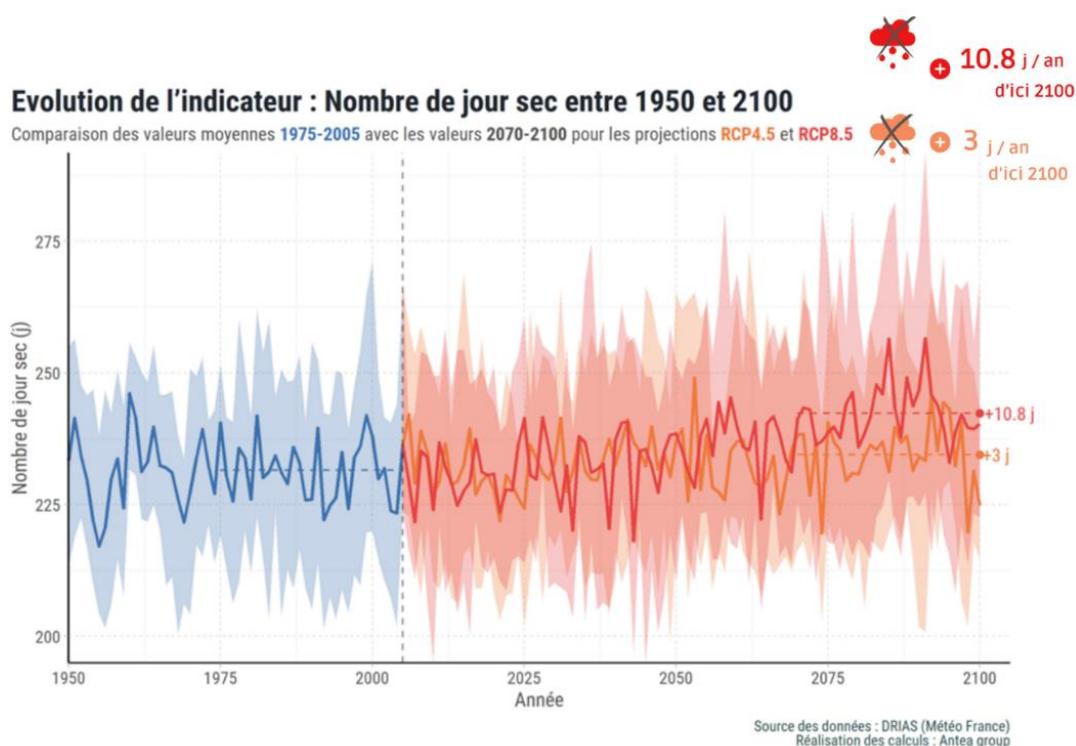
La combinaison d'un déficit pluviométrique et de températures élevées peut engendrer une sécheresse de la couche superficielle des sols. La nature du sol (notamment sa teneur en matière organique), et sa capacité à retenir l'eau pour qu'elle soit disponible pour les plantes (la réserve utile) vont aussi influencer sa tendance à entrer en sécheresse.



## 5.2. Les projections de sécheresses météorologiques

L'évolution de la répartition saisonnière des cumuls de précipitations et l'intensification des épisodes pluvieux va accentuer les sécheresses météorologiques.

Pour la projection en climat futur, l'indicateur d'évolution du **nombre de jour sec permet d'approcher l'évolution des sécheresses météorologiques**. Les modèles montrent ainsi un signal à la hausse du nombre de jours secs, avec une augmentation d'environ 11 jours / an de jour sec en fin de siècle, concentrés surtout en période estivale. **Plus que le chiffre, c'est la tendance qu'il faut retenir** : les modèles ont du mal à projeter l'évolution de la nébulosité (couverture nuageuse) et à retranscrire des épisodes extrêmes liés aux précipitations, qu'il s'agisse d'épisodes orageux intenses ou de sécheresse météorologique intense.



## 5.3. Les projections d'humidité des sols

La sécheresse des sols peut être causée par un déficit de précipitations, une évapotranspiration élevée et/ou des vents séchants.

Les résultats des modèles montrent une aggravation plus rapide et plus intense des événements liés au déficit d'humidité des sols qu'au déficit de précipitation. Les projections climatiques indiquent surtout que la France risque de connaître, au cours de la **seconde moitié du XXI<sup>ème</sup> siècle, des sécheresses des sols (= sécheresse agricole) quasi continues et de grande intensité, totalement inconnues dans le climat actuel. En effet, selon Météo France, l'assèchement des sols, évalué avec l'indicateur SWI (Soil Water Index | Indice d'Humidité des Sols), s'intensifiera à l'échelle de la métropole : + 25j de sol sec par an d'ici 2050.**

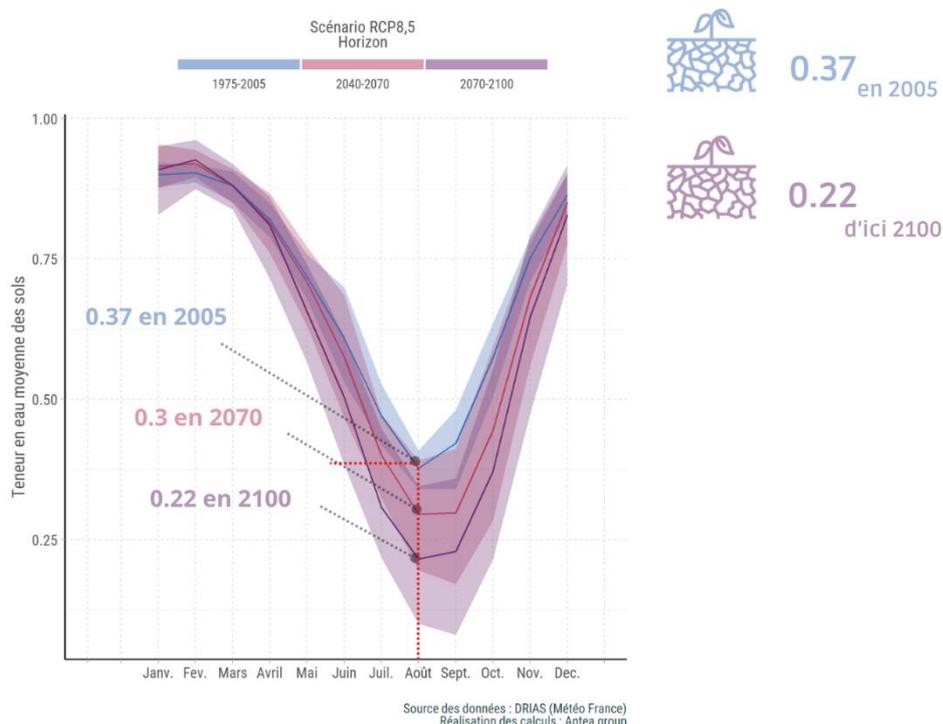
L'augmentation rapide du risque de sécheresse des sols s'explique en grande partie par une augmentation de l'évapotranspiration en surface directement liée à l'augmentation de la température

(Soubeyrou et al., 2012). Une étude de Boé et al., 2018 a montré que le temps passé en sécheresse des sols augmenterait de 30 % à 40 % à l'échelle de la France à horizon 2100. Le graphique ci-dessous illustre l'évolution de la teneur en eau des sols, établi à partir de l'indicateur SWI.



Le SWI (Soil Water Index) estime l'état de la réserve en eau du sol superficiel par rapport à la réserve utile, soit l'eau disponible pour les plantes. Cet indice varie entre 0 et 1, zéro étant un sol où les végétaux ne peuvent plus tirer d'eau (sol très sec) et 1 étant le stade où le sol est saturé d'eau et a atteint sa réserve utile. Cet indice permet de caractériser la sécheresse des sols.

### Evolution de l'indicateur : Teneur en eau moyenne des sols par horizon temporel



Carte des écarts mensuels d'humidité des sols en nombre de jours où le SWI < 0.4 pour chaque horizon (1975-2005, 2040-2070, 2070-2100) par scénario RCP 8.5 | Données : DRIAS

À horizon lointain 2100 en scénario RCP 8.5, on observe une forte baisse de l'indice d'humidité des sols en période estivale, mais également automnale. Aussi, la valeur de l'indice observée au mois d'août en période passée 1975-2005 serait atteinte dès la mi-juin. Les sols seraient donc secs plus tôt, plus intensément et plus longtemps.

#### À RETENIR SUR LES SECHERESSES METEOROLOGIQUE ET DES SOLS

- Les sécheresses météorologiques devraient s'intensifier dans le futur avec un nombre plus élevé de jours secs, notamment en période estivale ;
- Les sécheresses des sols, aggravées par les sécheresses météorologiques et par la hausse des températures et de l'ETP, seront plus intenses, plus longues et rencontrées sur une période plus large (printemps et automne) ;
- Ces deux types de sécheresses impacteront l'hydrosystème, surtout dans le contexte LRA où les écoulements de surface sont prédominants et les stockages souterrains très limités. Elles impacteront également les activités humaines, en particulier l'activité agricole mais aussi piscicole (étangs du Forez) et la biodiversité aquatique et humide.

## 6. Impacts du changement climatique sur l'hydrologie

### 6.1. Quel lien entre changement climatique et ressource en eau ?

L'eau circule en circuit fermé depuis des milliards d'années à la surface de la planète.

Ce cycle de l'eau est permis par les différents phénomènes climatiques qui induisent l'évaporation, la condensation et la précipitation de l'eau.

Un changement des conditions climatiques va donc avoir un impact sur le cycle de l'eau, **en modifiant la répartition géographique des précipitations mais aussi en modifiant la disponibilité de la ressource stockée dans les réservoirs naturels** (rivières, nappes, glaciers...).

À l'échelle mondiale, on observe ainsi des changements survenus dans le cycle de l'eau, en lien avec le dérèglement climatique actuel : augmentation de la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère, modification de la configuration, de l'intensité et des extrêmes des précipitations (sur certaines régions du globe), diminution de la couverture neigeuse et fonte des glaces accrue, modification de l'humidité du sol et du ruissellement.

Les variations de débit des cours d'eau ainsi que des niveaux piézométriques **sont déterminés avant tout par les modifications du volume des précipitations**, de leur répartition dans le temps et par leur nature – neige ou pluie. Néanmoins, à pluviométrie constante - on a pu voir que si la variabilité des précipitations est importante sur le bassin, il n'y a pas de tendance particulière à la hausse ou la baisse - **l'évolution de l'évaporation influe également sur l'écoulement fluvial et la recharge des nappes.**

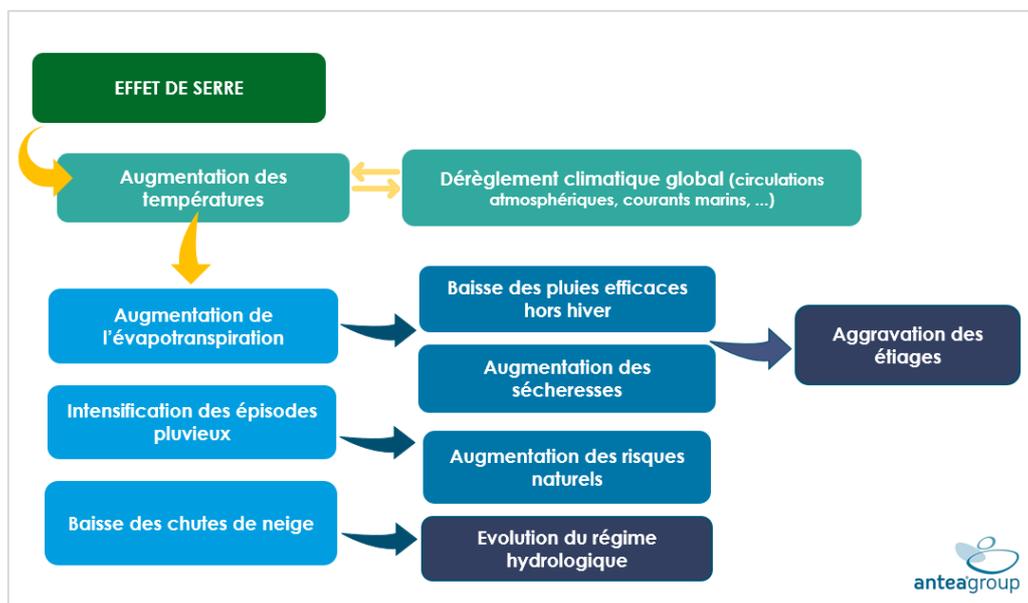


Figure 2 : Schéma – Impacts du changement climatique sur la ressource en eau.

Ainsi, à pluviométrie équivalente, la hausse des températures va accentuer le phénomène d'évapotranspiration et l'assèchement des sols, ce qui aggravera les déficits hydriques, en particulier pendant les périodes printanières et estivales ; et entrainera une baisse des débits rivières et, selon les contextes locaux, une baisse de la recharge des nappes.

**On retiendra également qu'à horizon 2050, l'année 2022 devient une année « moyenne », et non plus une année exceptionnelle.**

**Cela permet de mieux se projeter sur l'évolution attendue de l'hydrologie des cours d'eau.**

### 6.1.1. Impacts sur les besoins en eau des plantes

On sait que la demande climatique (c'est-à-dire la quantité d'eau transpirée par les couverts végétaux) augmente avec la hausse des températures, ce qui laisse penser que les plantes auront des besoins en eau plus importants avec l'effet du changement climatique.

Mais un autre phénomène est à prendre en compte : **les modifications de la teneur en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère**. Les plantes réduisent l'ouverture des stomates (= orifices qui mettent en communication l'eau contenue dans la plante avec l'atmosphère) lorsque la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère augmente ; la conséquence directe est une réduction de la transpiration et ainsi des besoins en eau de la plante.

**La hausse des températures affecte également de manière importante les cycles phénologiques des végétaux** (il s'agit des stades d'évolution de la plante, comme la floraison, par exemple), et conduit à un **avancement et à une réduction des cycles**.

Ce **raccourcissement des cycles** limite la période de photosynthèse et donc la consommation en eau par les plantes annuelles et/ou cultivées. Aussi, **l'avancement des cycles** dans le calendrier peut mettre certaines cultures à l'abri des sécheresses estivales.

Pour les plantes pérennes en revanche, la hausse des températures engendrant un allongement de la phase végétative, les plantes débouillant plus tôt au printemps et rentrant en dormance plus tard à la fin de l'automne : **la consommation en eau sera donc plus élevée**.

**En bref, le changement climatique produit des processus complexes et aux effets parfois antinomiques. Il est encore difficile de mesurer et de projeter précisément les évolutions induites, avec de fortes disparités selon les espèces de plantes (cultivées ou non), variétés, les contextes locaux....**

### 6.1.2. Impacts sur les milieux aquatiques et humides

Les conséquences des évolutions climatiques sur le fonctionnement des cours d'eau sont difficiles à prévoir car résultent de processus complexes opérant à diverses échelles spatiales et temporelles. **La diminution des débits a/aura néanmoins une incidence directe sur les régimes hydrologiques et les caractéristiques hydrauliques du chenal :**

- 1 Diminution de la vitesse d'écoulement ainsi que de la capacité des cours d'eau à mobiliser et transporter leur charge solide. **Le cycle de transport des sédiments est perturbé** avec une conséquence directe sur la diversité des habitats aquatiques et une tendance à la sédimentation du substrat ;
- 2 **Changement de régime hydrologique en particulier sur les parties aval des rivières** (évolution vers un système d'écoulement lentique / lent) qui s'accompagne de modifications physico-chimiques majeures, à travers l'apparition et l'amplification de phénomènes d'eutrophisation ;
- 3 Hauteurs d'eau qui diminuent avec des conséquences sur la **connectivité du chenal avec ses annexes hydrauliques** et notamment avec les zones humides. Cette déconnexion prive les cours d'eau de l'effet tampon et aggrave les situations d'étiages sévères ;
- 4 L'ensemble de ces modifications du milieu—conjuguées aux pressions anthropiques actuelles— a des conséquences sur la **diversité de la biocénose aquatique** puisque les facteurs majeurs structurant leur répartition -température, hauteur d'eau et habitats- sont modifiés. Ces changements de conditions seront particulièrement préjudiciables au maintien des populations de poissons migrateurs, déjà en difficulté. **Un phénomène de « glissement typologique » est par ailleurs déjà observé** : les espèces les plus sensibles se déplacent vers l'amont et sont remplacées par des espèces plus tolérantes ;
- 5 Il faut également noter le **risque d'assèchement des zones humides, surtout celles en têtes de bassin versant**, alors que dans un même temps l'augmentation de la température de l'eau modifie les cycles biogéochimiques et l'équilibre du milieu humide.

Sur le périmètre du SAGE LRA sont dénombrées de nombreuses zones humides, caractérisées par une hydromorphie des sols et de la végétation de type hygrophile.

**Les zones humides fournissent un grand nombre de services écosystémiques et socio-culturels** en contribuant : au maintien et à l'amélioration de la qualité de l'eau, à la régulation des régimes hydrologiques ou encore à la régulation du climat local et global (autoépuration des eaux, soutien hydrologique et d'étiage, recharge souterraine, réservoirs de biodiversité, puits de carbone, écrêtage des crues).

D'après le rapport du GIEC (2007), **les zones humides sont parmi les écosystèmes les plus vulnérables au changement climatique**, la dégradation et la perte de ces milieux étant plus rapides que celles de tout autre écosystème. En effet, la hausse de l'évapotranspiration, les modifications des paramètres chimiques de l'eau – entre autres - les menacent d'assèchement.

**Les modifications du fonctionnement hydrologique en lien avec le changement climatique pourraient impacter de manière importante la biodiversité et le fonctionnement de ces milieux.** Une réduction des niveaux d'eau pourrait induire une réduction de la surface totale de la zone humide, l'isolement de ces milieux vis-à-vis de leur ressource en eau ou encore des modifications dans la saisonnalité des cycles de période sèche et humide.



**Une étude complémentaire pilotée par la fédération de pêche de la Loire étudie sur les bassins du Lignon du Forez, de la Coise et de l'Aix les impacts des évolutions hydrologiques et climatiques sur les peuplements piscicoles de ces cours d'eau.**

---

**L'augmentation de la température de l'eau associée à une baisse des débits aura également des impacts sur la qualité physico-chimique des cours d'eau :**

- 1** Augmentation des concentrations des polluants dans les cours d'eau par effet de moindre dilution du fait de la baisse des débits ;
- 2** Augmentation du transfert des polluants stockés dans le sol (nitrates, pesticides, métaux) vers les cours d'eaux et les nappes souterraines engendrés par des phénomènes de lessivage importants qui surviendront lors d'évènements climatiques extrêmes ;
- 3** Diminution de la capacité auto épuratoire des cours d'eau du fait de l'augmentation de la température des eaux superficielles. Cette variation aura pour conséquence directe une baisse de la teneur en oxygène dissous dans le milieu.

## 6.2. Comment l'évolution de l'hydrologie a-t-elle été modélisée sur le bassin LRA ?

**1** Des **modélisations hydrologiques** ont été lancées sur l'ensemble des affluents disposant de chroniques désinfluencées aux stations hydrométriques (*voir travail de désinfluence présenté au COTECH n°5*).

Ces chroniques désinfluencées ont permis de caler **des modèles pluies-débits. Il s'agit des modèles GR4J ou GR6J, avec un module neige** ; accompagnés de **deux fonctions objectives, le KGE et le NSE** (= indicateur statistique qui synthétise les écarts entre valeur observée et simulée, c'est le score de performance que l'on veut maximiser).

Le couple modèle/fonction objective présentant la meilleure performance a été sélectionné pour chaque station). Les performances sont bonnes (KGE ou NSE > à 0,8).

Les données climatiques SAFRAN ont été mobilisées pour le calage des modèles, en moyennant les valeurs à l'échelle du bassin versant de la station hydrométrique (paramètres pluie, ETP, neige).

Le modèle a été calé sur une période de 20 ans, soit la période des données renaturalisées.

**2** Ensuite, **les modèles ont été forcés avec les projections climatiques** issues du portail DRIAS et présentées précédemment. 4 couples de modèles ont été sélectionnés pour ne pas démultiplier les chroniques de débits futurs, et uniquement avec le scénario d'émission de gaz à effet de serre RCP 8.5, comme préconisé par les chercheurs du projet Explore 2.



**On obtient des chroniques de débits jusqu'en 2100, à comparer aux périodes de référence qui ont été modélisées.**

Les 4 projections sont plutôt contrastées, cela faisait partie des critères du choix. Elles sont issues d'une pré-sélection réalisée par l'équipe d'Explore 2 en 2022 :

- **CERFACS-CNRM-CM5/ALADIN63** : *Évolution limitée > faible augmentation des températures (réchauffement limité), pas de grande évolution de la répartition de la pluviométrie, légère augmentation annuelle ;*
- **EC-EARTH/RACMO22E** : *Hausse des températures moyenne, pas d'évolution de la pluviométrie annuelle, faible évolution de la répartition saisonnière ;*
- **HadGEM2-ES/CCLM4-8-17** : *Chaud et saisons très contrastées pour la pluviométrie (très sec l'été et l'automne, pluvieux l'hiver, déficit pluviométrique global) ; Le plus impactant sur l'hydrologie d'étiage, baisse importante et peu de variabilité.*
- **M-MPI-ESM-LR/CCLM4-8-17** : *Faible augmentation des températures (réchauffement limité, notamment au printemps), évolution contrastée des précipitations selon les saisons (très forte hausse hivernale, très forte baisse estivale), cumul annuel stable.*

Cette pré-sélection a néanmoins évolué depuis l'automne dernier, avec l'introduction de couples de modèles supplémentaires (et qui correspondent plus aux projections du 6<sup>ème</sup> rapport), qui n'ont pas

été mobilisés dans le cadre de l'étude HMUC car publiés courant l'automne alors qu'ANTEA avait déjà réalisé les calculs et analyses. 2 des 4 projections utilisées pour la HMUC sont néanmoins toujours présentes dans la nouvelle présélection, dont la simulation HadGEM2-ED/ CCLM4-8-17 qui est la plus impactante sur l'hydrologie d'été et est intéressante sur le territoire car proche des phénomènes observés lors de la dernière décennie sur LRA (étés chauds et secs).

## >> Annuel

### Diagramme $\Delta T / \Delta P$ :

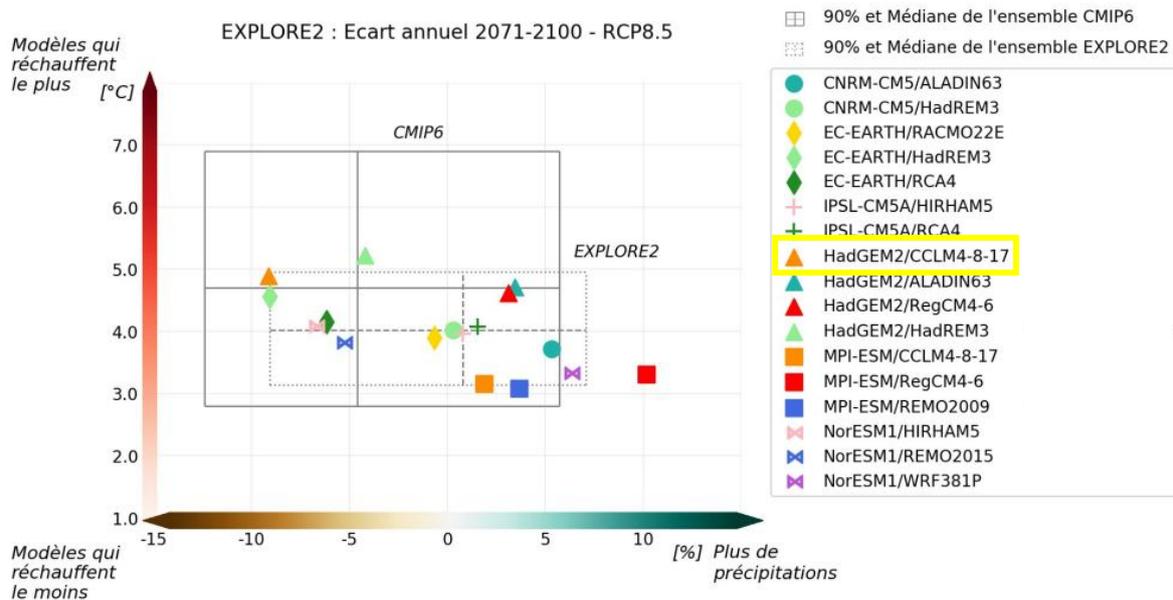


Figure 3 Aide à la sélection des modèles - source portail DRIAS

Seul le scénario d'émission de gaz à effet de serre RCP 8.5 a été retenu.



### Le RCP 4.5 est-il également un scénario « périmé » ?

Les données issues du 6ème rapport du GIEC montrent que les hausses de températures se situeraient (en valeur médiane et en scénario d'émission moyen) à mi-chemin entre les résultats des scénarios RCP 4.5 et 8.5 du 5ème rapport (= les données mobilisées pour la HMUC). C'est pour cela qu'on va qualifier le 4.5 d'optimiste et le 8.5 de tendanciel ; pas forcément par rapport au contenu socio-économique du scénario RCP mais plutôt par rapport aux résultats en termes de °C de réchauffement. Ainsi pour les projections concernant l'hydrologie on travaille maintenant uniquement avec le scénario RCP 8.5.

ANTEA rappelle que SAFRAN n'a été utilisé que pour le calage du modèle. Il ne s'agit pas de mélanger toutes les données, les projections issues du portail DRIAS doivent être comparées aux jeux de référence du portail DRIAS.

Enfin sur le fleuve Loire, les résultats présentés ne sont pas issus des modélisations d'ANTEA (ne disposant pas des données désinfluencées au pas de temps journalier étant donné qu'il y a des bassins et donc des influences en amont, ainsi que l'impact de Grangent) mais sont repris du projet EXPLORE 2, il s'agit des sorties du modèle physique SIM2. Il ne faut pas regarder les valeurs de débits mais uniquement comparer les périodes de références et les périodes projetées, car la modélisation n'a pas

pris en compte l'impact des barrages (et des autres usages). Pour autant, ces résultats permettent de renseigner sur l'évolution de la capacité de production du bassin versant, sans tenir compte de la gestion des débits avec les barrages ou autre.



### **Quelle différence entre les modélisations disponibles sur DRIAS-Eau (projet EXPLORE 2) et les modélisations réalisées dans le cadre de l'étude HMUC ?**

*Des simulations hydrologiques en climat futur ont été réalisées dans le cadre du projet EXPLORE 2, en mobilisant 8 modèles hydrologiques différents, forcées avec le jeu de simulations climatiques du portail DRIAS.*

*Ces simulations permettent de comparer l'hydrologie simulée sur la période de référence avec l'hydrologie simulée en période future. Outre le fait que le calendrier des productions EXPLORE 2 n'était pas connu précisément et que le cahier des charges HMUC incluait ce volet de modélisation hydro-climatique, on peut identifier plusieurs plus-values :*

- **Les modèles ont été calés avec les débits désinfluencés** dans le cadre de l'étude HMUC, ce qui permet un calage beaucoup plus précis. Les modèles du projet EXPLORE 2 ont été lancés en batterie et sont callés sur des stations influencées, ce qui fausse les valeurs de débit modélisées (mais permet tout de même d'étudier les évolutions de débits entre deux périodes). Grâce à ce calage sur débits désinfluencés, les valeurs des chroniques de débit futur sont « valables » et pourront être testées dans le modèle d'allocation de ressource et au profit du diagnostic.
- **Les modèles disponibles sur DRIAS-EAU sont nombreux (7)** et cela nécessite d'opérer un choix entre les différents modèles, afin de choisir le plus approprié au contexte hydrologique local. Dans le cadre de l'étude HMUC, c'est un modèle pluie-débit (GR) qui a été mobilisé, un modèle performant et adapté à ce type de contexte de socle où les ruissellements sont dominants et où il n'y a pas d'échange avec des nappes d'importance.

## Compléments techniques sur la modélisation

### Description des modèles

Le Cemagref (aujourd'hui INRAE) a commencé à développer au début des années 1980 des modèles hydrologiques (du Génie Rural – GR) permettant de faire le lien entre la lame d'eau précipitée sur un bassin versant et son débit à l'exutoire (Michel, 1983).

Bien que ces modèles soient parfois apparentés à des modèles conceptuels du fait de leur structure à réservoirs, ce sont en fait des modèles empiriques : leur construction s'est faite sur la base de grands jeux de données et en découvrant progressivement la structure permettant de reproduire au mieux le comportement hydrologique du bassin versant (c'est-à-dire sa réponse aux pluies).

GR4J est un modèle à quatre paramètres qui permet de simuler le débit à l'exutoire d'un bassin versant à partir de données d'entrée d'intensité de pluie et d'évapotranspiration potentielle au pas de temps journalier. Le modèle est constitué de deux réservoirs : un réservoir de production et un réservoir de routage. Le réservoir de production permet d'intercepter et de distribuer le volume de pluie entrant vers différents flux d'évapotranspiration, de pluie nette, et de percolation. La pluie nette et la

percolation sont divisées en deux flux dirigés (après transformation par un hydrogramme unitaire) vers le réservoir de routage et vers la rivière. Le réservoir de routage permet de simuler des échanges souterrains et d'alimenter le débit de la rivière en fonction du niveau d'eau dans ce réservoir (noté R1 sur le schéma ci-dessous). Les quatre paramètres de GR4J permettent de déterminer les capacités des deux réservoirs ainsi que les échanges souterrains et la durée de l'hydrogramme unitaire. GR6J prend en compte deux paramètres supplémentaires : le seuil de changement de signe de l'échange et le contrôle de la pente de décrue.

*X1(mm) : Capacité du réservoir de production (production store) ; X2(mm/j) : Coefficient d'échanges souterrains ; X3(mm) : Capacité du réservoir de routage (routing store) ; X4(j) : Temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 ; X5(mm) : Seuil de changement de signe de l'échange (ou fonction d'échange en eau améliorée) ; X6(mm) : Contrôle de la pente de décrue (ou fonction exponentielle).*

CemaNeige est un modèle journalier d'accumulation et de fonte de la neige à deux paramètres (un paramètre d'inertie thermique CT g du manteau et un facteur de fonte degré-jour Kf) développé dans le cadre des travaux de VALÉRY (2010). CemaNeige permet de simuler l'accumulation, le couvert et la fonte de neige à partir des données d'entrée de précipitations neigeuses et de température de l'air au pas de temps journalier. CemaNeige est appliqué, pour chaque bassin versant intermédiaire, sur cinq bandes d'altitude de même surface. La fonte de la neige est calculée en fonction du stock de neige accumulée, de l'état thermique du manteau neigeux, de la surface enneigée et de la température du jour. Les volumes de fonte du manteau neigeux et de précipitations liquides sont ensuite agrégés sur chaque bassin versant intermédiaire, puis injectés dans un modèle pluie-débit tel que GR4J.

Pour chaque bassin versant de rivière, la modélisation se fait en deux grandes étapes :

1. L'étape de calage-contrôle qui consiste à calibrer le modèle à partir des données observées (séries temporelles climatiques et données hydrométriques). Autrement dit, on cherche à optimiser les paramètres d'optimisation du modèle sur une période de calage afin de reproduire au mieux les chroniques observées sur une période de validation. Les performances du modèle hydrologique sont jugées grâce à une fonction objectif (critère de Nash, KGE, ...). La meilleure combinaison de paramètres sera recherchée pour chaque bassin versant.
2. L'étape de modélisation qui consiste, lorsque le modèle est calé, en l'utilisation de cette combinaison de paramètres pour simuler les débits futurs en forçant le modèle par les séries temporelles climatiques simulées (P et ETP). Ici nous avons repris les données SAFRAN.

### Performance des modèles

La performance des modèles est détaillée par station dans le tableau ci-dessous. On considère que le calage est bon à partir d'une valeur de 0,8, atteinte sur toutes les stations. Le Renaison présente la moins bonne performance en raison de la courte période de fonctionnement de la station hydrométrique.

Station	Code station	Modèle hydrologique	Fonction objective	Performance modèle
---------	--------------	---------------------	--------------------	--------------------

<b>La Toranche à Saint-Cyr-les-Vignes</b>	K070451001	CemaNeigeGR4J	KGE[Q]	0,94
<b>Le Rhins à Saint-Cyr-de-Favières [Pont Mordon]</b>	K098301001	CemaNeigeGR4J	KGE[Q]	0,93
<b>Le Lignon à Poncins - Le Bourg</b>	K077322001	CemaNeigeGR4J	KGE[Q]	0,93
<b>Le Gand à Neaux</b>	K097401001	CemaNeigeGR4J	KGE[Q]	0,92
<b>Le Lignon à Boën</b>	K075321001	CemaNeigeGR4J	KGE[Q]	0,92
<b>L'Anzon à Débats-Rivière-d'Orpra - Cotes</b>	K074401001	CemaNeigeGR4J	KGE[Q]	0,92
<b>La Coise à Saint-Médard-en-Forez - Moulin Brûlé</b>	K067331001	CemaNeigeGR6J	KGE[Q]	0,90
<b>L'Aix à Saint-Germain-Laval</b>	K081302001	CemaNeigeGR4J	KGE[Q]	0,90
<b>Le Gourtarou [Chanasson] à Civens</b>	K072451001	CemaNeigeGR6J	KGE[Q]	0,87
<b>Le Vizezy à Essertines-en-Châtelneuf - La Guillanche - Ancienne</b>	K076331001	CemaNeigeGR6J	KGE[Q]	0,86
<b>Le Rhodon à Perreux</b>	K100451001	CemaNeigeGR6J	KGE[Q]	0,86
<b>L'Oudan à Riorges</b>	K093701001	GR6J	KGE[Q]	0,85
<b>La Mare à Saint-Marcellin-en-Forez - Vérines</b>	K064311001	CemaNeigeGR6J	KGE[Q]	0,83
<b>Le Renaison à Renaison - Ancienne</b>	K092401001	CemaNeigeGR4J	KGE[Q]	0,81

## 6.3. Les résultats des simulations de débits futurs

### 6.3.1. Évolution des débits des affluents de la Loire

#### 6.3.1.1. En période d'été

**La variabilité des résultats est importante en fonction des modèles.**

Néanmoins, quel que soit le modèle climatique considéré, **en climat futur, les débits d'été (QMNA) sont en baisse sur la totalité des stations modélisées**, avec 2 tendances à retenir :

- Si d'importantes tendances à la baisse sont observées à horizon 2050, l'aggravation de la tendance à horizon fin de siècle est nette avec des baisses des débits d'été allant jusqu'à -40% sur certains affluents à horizon 2070.
- Assez rapidement (dès les années 2040) seront atteintes des valeurs de QMNA qui n'ont pas été rencontrées pendant la période de référence simulée par le modèle. Dans les prochaines décennies, des valeurs de débits autrefois peu probables (voire jamais mesurées historiquement) seront de plus en plus régulièrement observables. Sur une partie des cours d'eau du bassin, il est possible d'imaginer que cela conduise à des régimes hydrologiques intermittents en période estivale.

**La baisse des débits sera donc particulièrement sensible en période de basses eaux, impactant les milieux aquatiques et usages de l'eau.**

Les simulations rendent également compte d'un allongement de l'été, qui se déclenche plus précocement au printemps et s'allonge vers l'automne. Cela va dans le sens des observations hydrologiques des dernières décennies et en particulier des dernières années marquées par la sécheresse, comme celle de l'année 2022.

Pour rappel, les conditions climatiques de l'été 2022 sont une illustration des conditions moyennes à horizon 2050, et illustrent ce à quoi l'on peut s'attendre en termes d'impact sur la ressource en eau à cet horizon.

À noter également que la simulation climatique HadGEM2/CCLM4-8-17, qui rend compte d'un climat futur chaud et très sec en été (il est pour autant dans la médiane des hausses de températures au vu du 6<sup>ème</sup> rapport, mais un peu plus sec que la médiane avec une saisonnalité très marquée des pluies), rend compte d'une chute importante des débits estivaux. Au vu de la situation hydrologique de 2020, 2022 et 2023 sur le bassin, caractérisés par un climat estival très chaud et sec, ces résultats doivent être regardés avec intérêt en vue d'une politique d'adaptation ambitieuse. *Pour autant, il convient de rappeler que chacune des simulations étudiées se situe dans la gamme des possibles.*

**Trois cas sont présentés ci-dessous pour illustration, l'ensemble des graphiques et analyses étant disponibles pour chaque station modélisée dans les fiches UG.**

## Illustration sur la Mare :

Évolution des débits de la station **La Mare à Saint-Marcellin-en-Forez - Vérines (n°K064311001)** pour le scénario **RCP 8.5** en moyenne glissante de 10 ans

Indicateur : QMNA (Débit moyen mensuel le plus bas de l'année)

Modèle hydrologique : CemaNeigeGR6J KGE (0.83)



— QMNA5 humide = 0.25 m<sup>3</sup>/s  
— QMNA biennal = 0.16 m<sup>3</sup>/s  
— QMNA5 sec = 0.11 m<sup>3</sup>/s

}

Débit mesuré à la station

Évolution des débits de la station **La Mare à Saint-Marcellin-en-Forez - Vérines (n°K064311001)** pour le scénario **RCP 8.5**

Indicateur : QMNA (Débit moyen mensuel le plus bas de l'année)

Modèle hydrologique : CemaNeigeGR6J KGE (0.83)

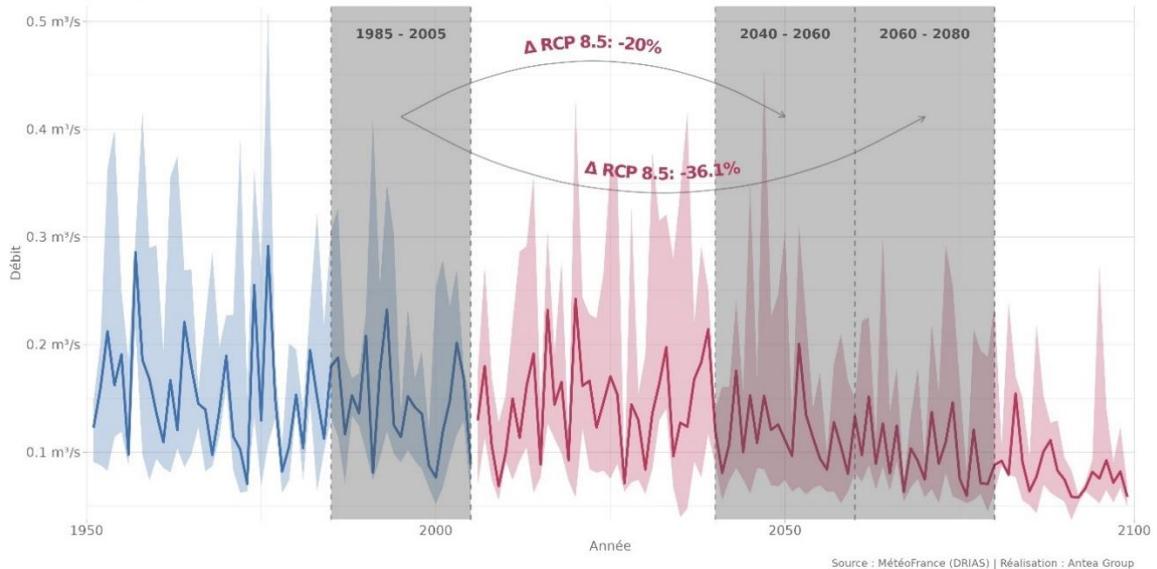


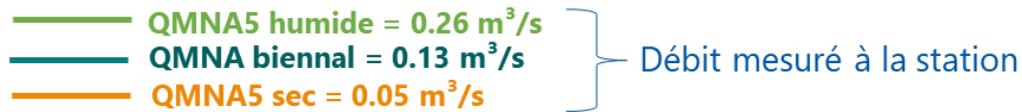
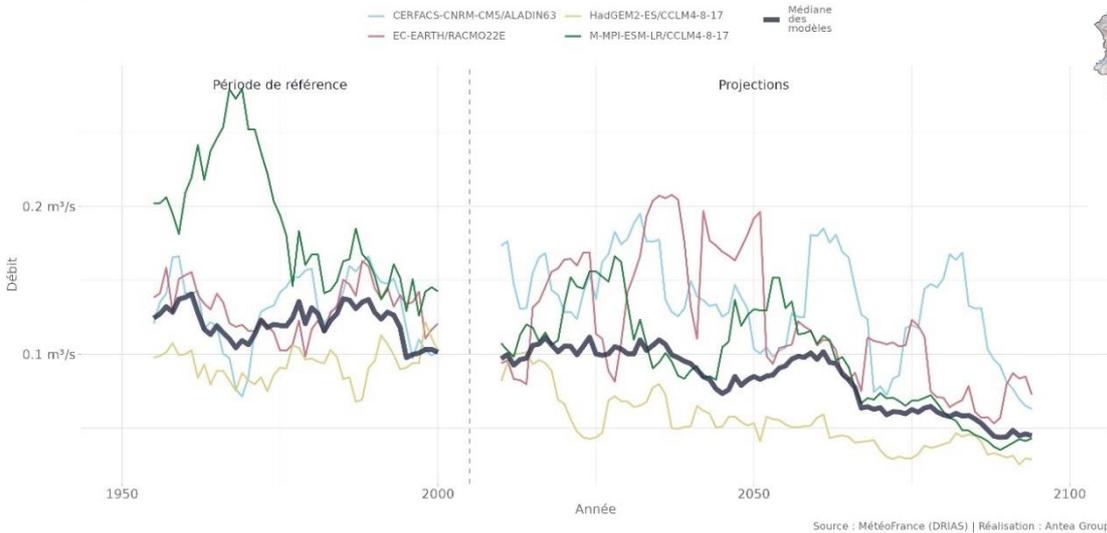
Figure 4 Évolution des débits d'étiage (QMNA) sur la Mare

## Illustration sur La Coise

Évolution des débits de la station **La Coise à Saint-Médard-en-Forez - Moulin Brûlé (n°K067331001)** pour le scénario **RCP 8.5** en moyenne glissante de 10 ans

Indicateur : QMNA (Débit moyen mensuel le plus bas de l'année)

Modèle hydrologique : CemaNeigeGR6J KGE (0.90)



Évolution des débits de la station **La Coise à Saint-Médard-en-Forez - Moulin Brûlé (n°K067331001)** pour le scénario **RCP 8.5**

Indicateur : QMNA (Débit moyen mensuel le plus bas de l'année)

Modèle hydrologique : CemaNeigeGR6J KGE (0.90)

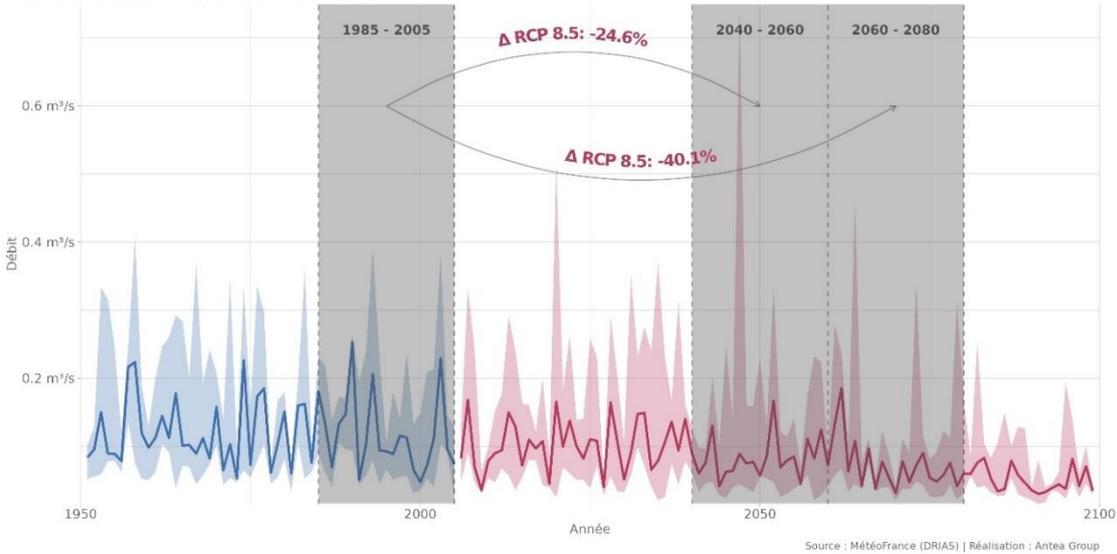


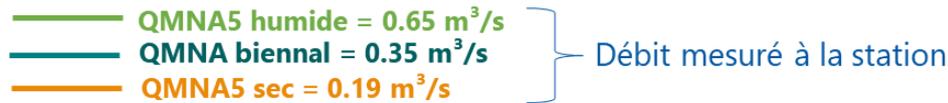
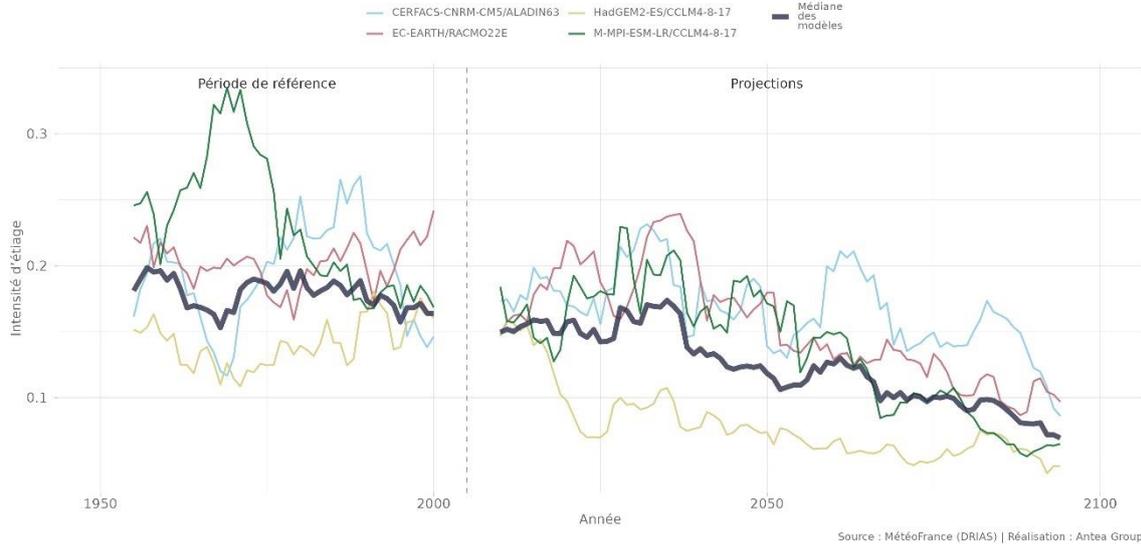
Figure 5 Évolution des débits d'été (QMNA) sur la Coise

## Illustration sur l'Aix

Évolution des débits de la station **L'Aix à Saint-Germain-Laval (n°K081302001)** pour le scénario **RCP 8.5** en moyenne glissante de 10 ans

Indicateur : Intensité d'étiage (Intensité d'étiage (QMNA/QA))

Modèle hydrologique : CemaNeigeGR4J KGE (0.90)



Évolution des débits de la station **L'Aix à Saint-Germain-Laval (n°K081302001)** pour le scénario **RCP 8.5**

Indicateur : QMNA (Débit moyen mensuel le plus bas de l'année)

Modèle hydrologique : CemaNeigeGR4J KGE (0.90)

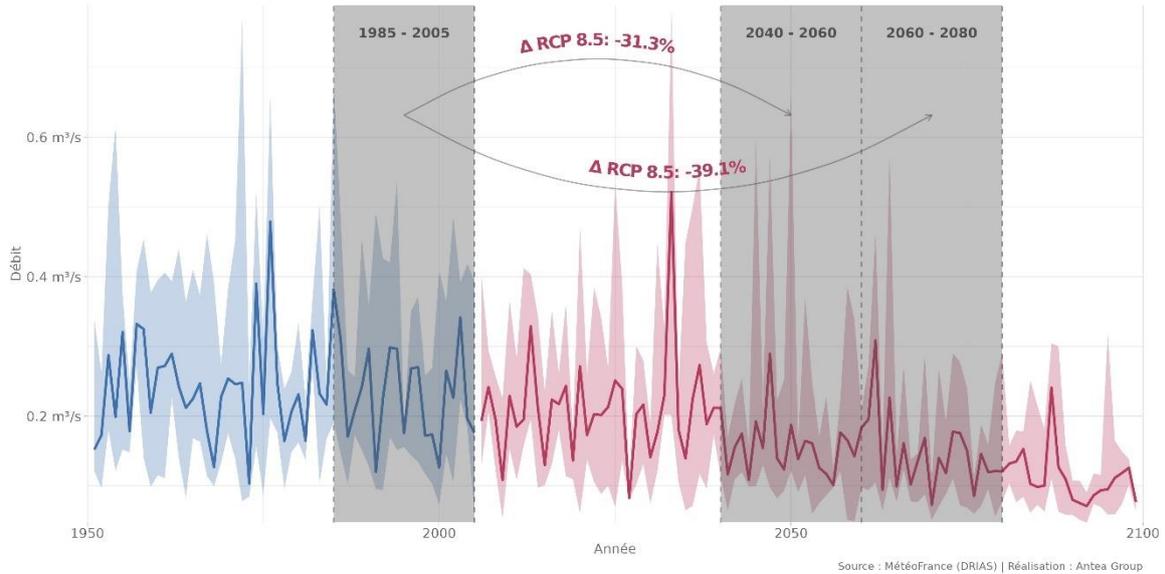


Figure 6 Évolution des débits d'étiage (QMNA) sur l'Aix

### 6.3.1.2. En période de hautes eaux

En période de hautes eaux, dont nous avons rendu compte à partir de l'indicateur du Q90 (débits supérieurs au quantile 90 de classification des débits ; caractérisant plus ou moins une crue annuelle), la dynamique varie fortement en fonction des simulations climatiques. La plupart tablent néanmoins sur une hausse des précipitations hivernales et donc des débits de crue hivernaux. La variabilité naturelle en lien avec la pluviométrie de l'année est néanmoins importante comme le montre les graphiques.

Évolution des débits de la station **La Mare à Saint-Marcellin-en-Forez - Vérines (n°K064311001)** pour le scénario **RCP 8.5** en moyenne glissante de 10 ans

Indicateur : Q90 (Débit de crue)

Modèle hydrologique : CemaNeigeGR6J KGE (0.83)



Figure 7 Projection des régimes de hautes eaux (ici le Q90, débit de crue annuelle) sur la Mare

Évolution des débits de la station **La Coise à Saint-Médard-en-Forez - Moulin Brûlé (n°K067331001)** pour le scénario **RCP 8.5** en moyenne glissante de 10 ans

Indicateur : Q90 (Débit de crue)

Modèle hydrologique : CemaNeigeGR6J KGE (0.90)



Figure 8 Projection des régimes de hautes eaux (ici le Q90, débit de crue annuelle) sur la Coise

Évolution des débits de la station **L'Aix à Saint-Germain-Laval (n°K081302001)** pour le scénario **RCP 8.5** en moyenne glissante de 10 ans

Indicateur : Q90 (Débit de crue)

Modèle hydrologique : CemaNeigeGR4] KGE (0.90)

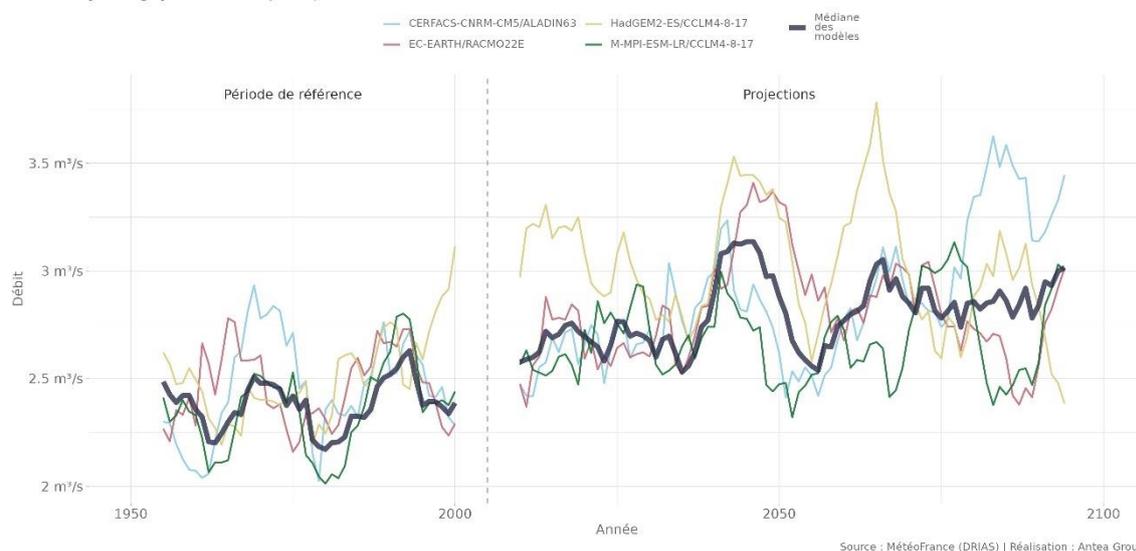


Figure 9 Projection des régimes de hautes eaux (ici le Q90, débit de crue annuelle) sur l'Aix

### 6.3.1.3. En débit médian

Les résultats concernant les débits médian montrent une absence de tendance franche. Les deux tendances de hausse des débits hivernaux et de baisse des débits estivaux s'annulent et l'hydraulicité annuelle est peu impactée. En effet, il a été développé plus haut que la pluviométrie annuelle changeait peu, ainsi les pluies efficaces et donc l'hydraulicité annuelle des cours d'eau est peu impactée. Ce paramètre n'aura cependant que peu d'incidence en termes de préservation du bon fonctionnement des cours d'eau puisque les populations aquatiques sont plutôt structurées par l'hydrologie d'étiage et de hautes eaux.

### 6.3.1.4. Bilan sur le régime hydrologique annuel

Le régime hydrologique évolue fortement en climat futur avec une baisse des débits d'étiage en période estivale et également en période automnale ; et une hausse des débits hivernaux en lien avec les projections à la hausse des précipitations hivernales et la disparition de la neige. À ce titre, en particulier sur les affluents rive gauche, on observe une baisse du soutien des débits printaniers qui était assurée par la fonte du manteau neigeux.

Évolution du régime annuel moyen de la station **La Mare à Saint-Marcellin-en-Forez - Vérines (n°K064311001)** pour le scénario **RCP 8.5**

Scénario **RCP 8.5** sur la période 2060-2080 et **les valeurs historiques** sur 1985-2005

Modèle hydrologique : CemaNeigeGR6J KGE (0.83)

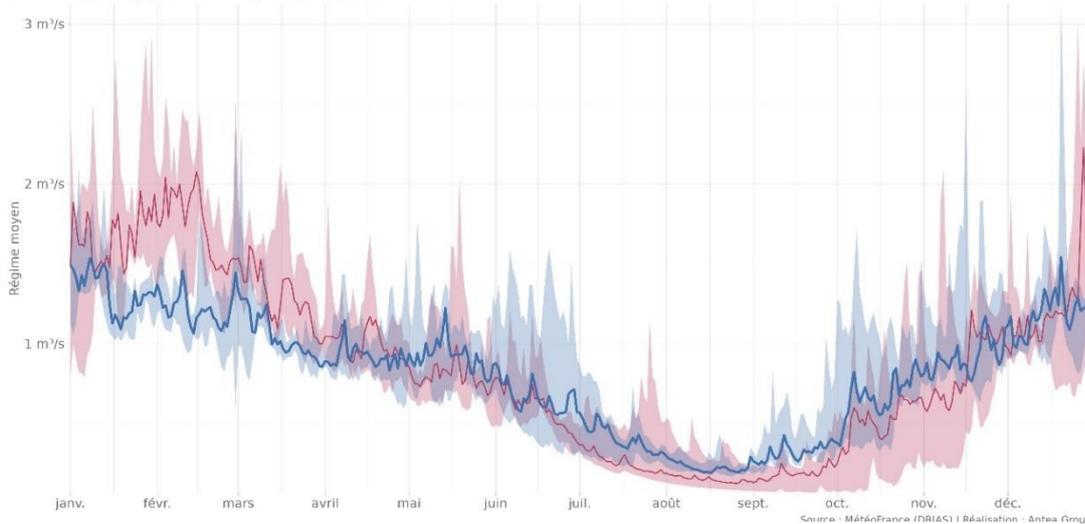


Figure 10 Projection du régime hydrologique de la Mare

Évolution du régime annuel moyen de la station **La Coise à Saint-Médard-en-Forez - Moulin Brûlé (n°K067331001)** pour le scénario **RCP 8.5**

Scénario **RCP 8.5** sur la période 2060-2080 et **les valeurs historiques** sur 1985-2005

Modèle hydrologique : CemaNeigeGR6J KGE (0.90)

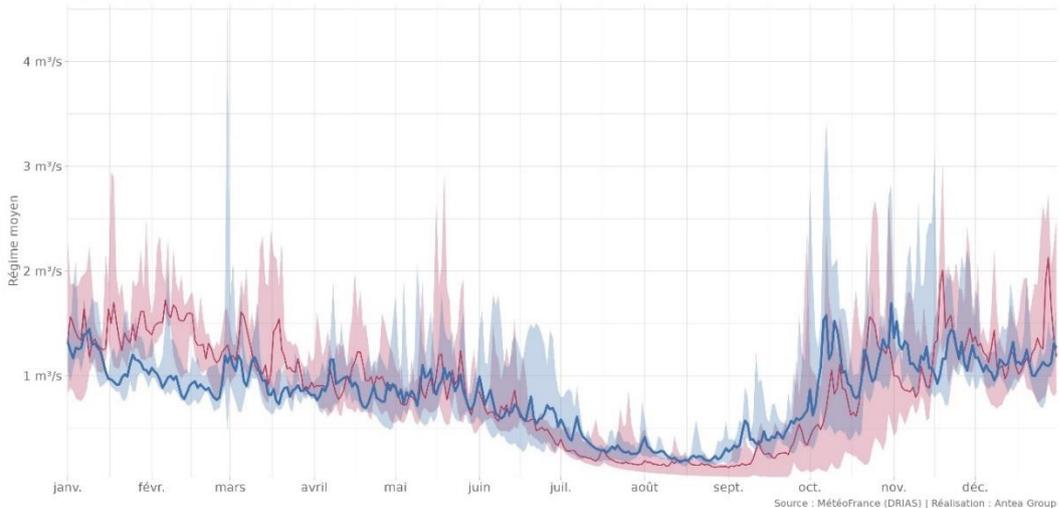


Figure 11 Projection du régime hydrologique de la Coise

Évolution du régime annuel moyen de la station **L'Aix à Saint-Germain-Laval (n°K081302001)** pour le scénario **RCP 8.5**

Scénario **RCP 8.5** sur la période 2060-2080 et **les valeurs historiques** sur 1985-2005

Modèle hydrologique : CemaNeigeGR4J KGE (0.90)

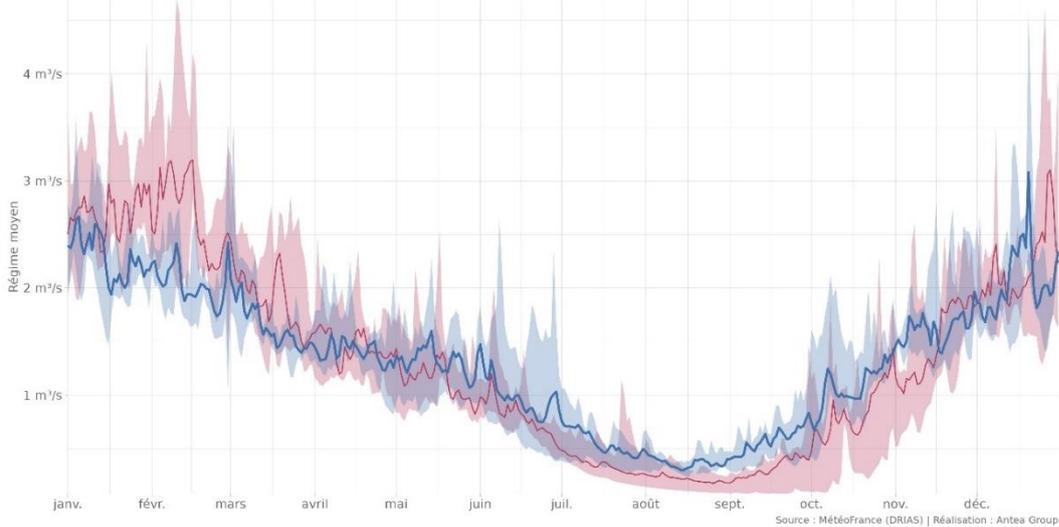


Figure 12 Projection du régime hydrologique de l'Aix

Évolution du régime annuel moyen de la station **Le Lignon à Boën (n°K075321001)** pour le scénario **RCP 8.5**

Scénario **RCP 8.5** sur la période 2060-2080 et **les valeurs historiques** sur 1985-2005

Modèle hydrologique : CemaNeigeGR4J KGE (0.92)

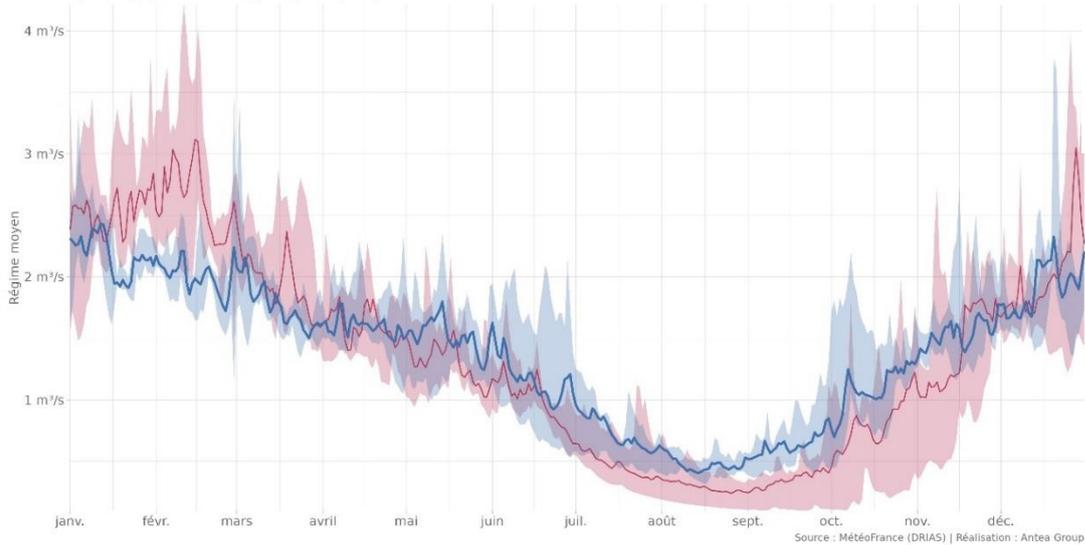


Figure 13 Projection du régime hydrologique du Lignon

## À RETENIR VOLET HYDRO

- **À l'échelle du bassin versant les résultats sont très homogènes**, les fonctionnements hydrologiques étant *globalement* assez proches ;
- **Le signal à la baisse des débits d'étiage est extrêmement net**, d'autant plus marqué avec les simulations climatiques se situant dans la gamme chaude et sèche. Les étiages seront plus intenses, mais aussi plus longs, s'allongeant sur la période automnale. Il faut également se préparer à la multiplication des situations d'intermittence des débits en période estivale ;
- L'intensité de la baisse des débits d'étiage à horizon 2050 et surtout fin de siècle fait craindre la **multiplication des situations d'intermittence des débits** en situation estivale ;
- Il y a de l'incertitude sur les débits de crue compte tenu d'une variabilité (naturelle) importante, néanmoins la tendance à horizon fin de siècle montre **une hausse des débits de crue annuelle et des crues significatives (plus difficile à modéliser) seraient plus fréquentes et intenses** au vu de l'évolution de la pluviométrie hivernale plus soutenue et plus intense ;
- **Les débits médians sont stables**, en raison des tendances qui « s'annulent » entre hautes eaux et basses eaux ;
- **Le calendrier hydrologique évolue** avec plus d'hydraulicité hivernale mais une baisse des débits estivaux. Ainsi, la recharge pluviométrique devrait se maintenir en période hivernale mais le déficit estival se creusera ;
- Ce diagnostic est cohérent avec les observations de la dernière décennie en condition climatique chaude et sèche, le bassin étant très réactif aux sécheresses météorologiques et aux températures élevées.



**L'ensemble des graphiques et analyses à la station sont disponibles dans les fiches UG et dans le dossier de restitutions graphiques de l'étude.**

## 6.3.2. Évolution des débits sur la Loire

Sur la Loire, nous n'avons pas désinfluencé et modélisé les débits que cela a été réalisé sur les affluents, car ce travail aurait nécessité de prendre en compte tout l'amont du bassin – hors territoire d'étude et étudié dans le cadre d'études HMUC spécifiques.

Néanmoins, nous disposons de résultats issus de l'étude nationale EXPLORE 2, qui a modélisé en plusieurs points du territoire des débits en situation de climat futur (projections climatiques issues du portail DRIAS, celles que nous avons également mobilisé dans la présente étude HMUC).

Les résultats présentés sont issus du modèle hydrologique SIM2. **Attention**, ce modèle et donc ces projections **ne prennent pas en compte l'impact des barrages sur la Loire** ; les projections permettent malgré tout d'identifier l'évolution naturelle de l'hydrologie de la Loire en amont du territoire d'étude et de la capacité de production hydrologique de l'amont du bassin, qui impactera la gestion des ouvrages. Il faut surtout observer l'évolution en % entre les différents horizons temporels.

Les simulations hydrologiques SIM2 DRIAS-2020 ont été produites dans le cadre de l'exercice international EURO-CORDEX. Le modèle hydrologique SIM2 de Météo-France est un modèle à base physique, distribué sur la France, et intégrant le modèle Surfex-Isba (évapotranspiration réelle, humidité du sol, drainage et ruissellement, etc.), et le modèle hydrogéologique Modcou. Le modèle physique SIM2 a été forcé avec les 12 simulations climatiques du portail DRIAS (x 2 RCP), ce qui permet de disposer de 24 chroniques de débits simulés jusqu'en 2100.

Plusieurs stations sont disponibles sur la Loire au sein du périmètre LRA mais elles présentent les mêmes dynamiques, nous présentons donc les résultats sur la station de Bas en Basset.

À Bas-en-Basset, en entrée du périmètre du SAGE LRA, l'évolution des débits pseudo-naturels de la Loire en climat futur est à la baisse en période d'étiage (ici l'évolution de l'indicateur QMNA, soit le débit mensuel le plus bas de l'année). La baisse est aux alentours des 45-50% à horizon 2050 avec le RCP 8.5 (celui à retenir, comme présenté précédemment).

Évolution des débits de la station **Bas-En-Basset (n°193)** pour les scénarios **RCP 4,5 & RCP 8,5**

Indicateur : QMNA (Débit moyen mensuel le plus bas de l'année)

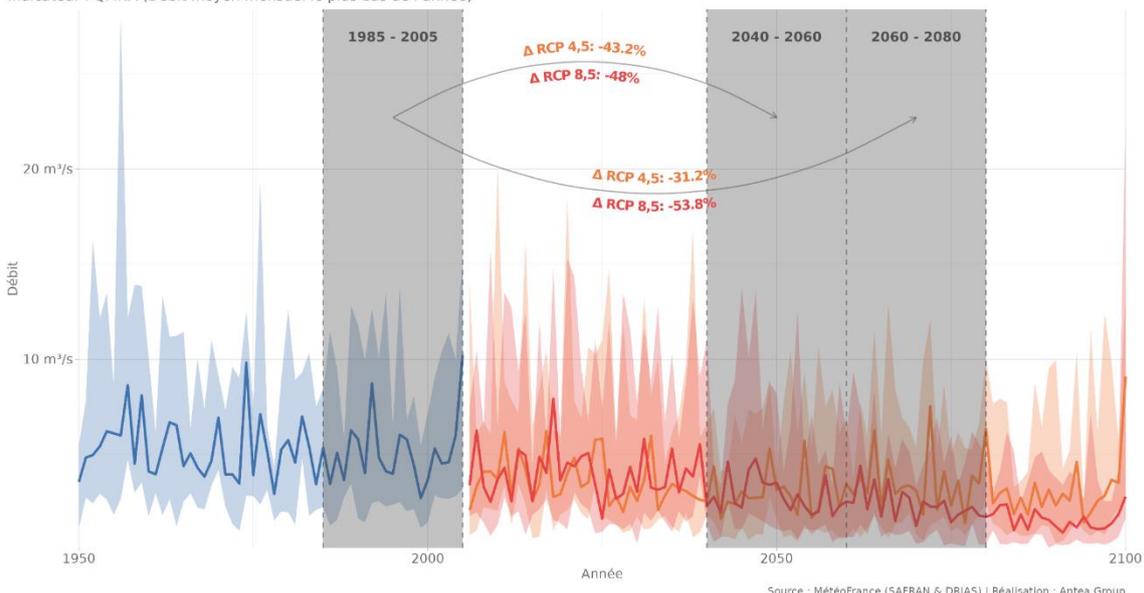


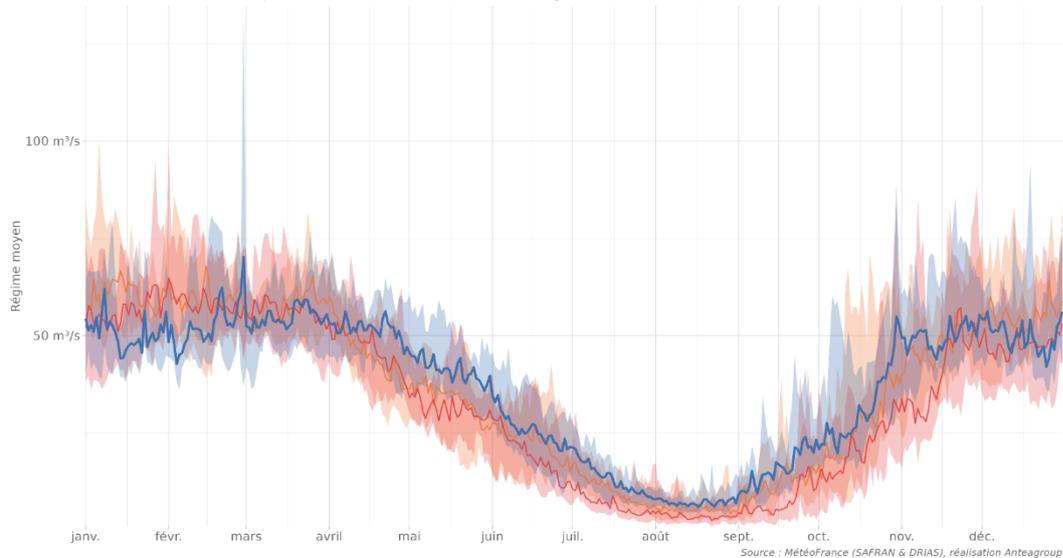
Figure 14 Évolution projetée des débits sur la Loire - données issues du modèle SIM2

Le calendrier hydrologique évoluerait également fortement, avec une hausse des débits hivernaux et une importante baisse le reste de l'année : printemps, été et automne.

*Attention cependant, le modèle, calé sur les stations, peut être biaisé par l'incidence de la gestion des barrages sur l'hydrologie du cours d'eau. Les résultats sur la Loire sont donc à manipuler avec précaution.*

Évolution du régime annuel moyen pour la station **Bas-En-Basset (n°193)** pour les scénarios **RCP 4,5** & **RCP 8,5**

Scénarios **RCP 4,5** & **RCP 8,5** sur la période 2060-2080 et **les valeurs historiques** sur 1985-2005



### 6.3.3. Quels impacts attendus sur les eaux souterraines ?

Il est très difficile de se prononcer sur l'évolution du niveau de la nappe du Forez, le fonctionnement de la nappe n'étant pas encore bien connu, et faisant l'objet d'investigation pour mieux l'appréhender. En particulier, la géographie de la nappe et son lien avec la nappe alluviale de la Loire est difficile à définir à ce stade.

Il est possible d'esquisser les quelques tendances suivantes à partir des pistes de fonctionnement de la nappe dégagées par le BRGM. Si la nappe est principalement alimentée par recharge hivernale et par la Loire, alors son alimentation serait plutôt garantie. Si en revanche elle dépend plutôt des affluents rive gauche et d'une recharge hors période hivernale, la situation pourrait être plus complexe.

La nappe de la plaine du Forez [serait] alimentée par :

- Recharge → Stabilité recharge hivernale
- Pertes de la Loire → Stabilité dans le périmètre en lien avec barrage/ débit réservé ?
- Pertes des autres cours d'eau → Baisse des apports

Figure 15 Possibles évolutions des différents composants de la recharge de la nappe du Forez

Il faut également souligner que les niveaux de nappe ont été identifiés comme étant légèrement à la baisse ces dernières années très sèches, sur certains piézomètres de captages d'eau potable mais aussi au travers les retours d'irriguant agricole disposant de forages individuels.

Piézomètre	Niveau moyen	P value global	Chronique lissée	Tendance globale	Significativité globale	Périodes	Tendances avec ruptures
<b>BSS001TEQZ</b> <small>06967X0046/CLEPPE</small> Cleppé – Bord du bois	324,1 m	0.0354		↘ -5.7 cm/an	significatif	avr. 1991 - avr. 2008 avr. 2008 - oct. 2017	↗ +2.9 cm/an ↘ -24.1 cm/an
<b>BSS001TESR</b> <small>06967X0100/F</small> Cleppé - STEP	325,1 m	0.0010		↘ -8.5 cm/an	significatif	avr. 1991 - juin 2008 juin 2008 - mai 2023	↗ +2.6 cm/an ↘ -14.9 cm/an
<b>BSS001UMVM</b> <small>07203X0168/PZ</small> Chalain le Comtal	339,2 m	0.0000		↘ -5.2 cm/an	significatif	déc. 2005 - mars 2016 mars 2016 - mai 2023	↘ -2.8 cm/an ↘ -9.5 cm/an
<b>BSS001UMZE</b> <small>07204X0084/PZ</small> Montrond les bains	354,9 m	0.0075		↗ +4.9 cm/an	significatif	déc. 2005 - juil. 2011 juil. 2011 - janv. 2017	↗ +10.4 cm/an ↘ -9.2 cm/an
<b>BSS001UNAB</b> <small>07204X0105/F</small> Saint-André-le-Puy – sous chemin	356,2 m	0.0198		↘ -2.9 cm/an	significatif	déc. 2005 - août 2016 août 2016 - mai 2023	↗ +5.9 cm/an ↘ -6.6 cm/an

Figure 16 Tests de tendances sur les piézomètres de la nappe du Forez

## 6.4. Les résultats d'évolution de la thermie des cours d'eau

L'un des autres impacts majeurs du changement climatique sur les cours d'eau est la modification du régime thermique des eaux des rivières et milieux humides.

*La température d'un cours d'eau résulte à la fois de la température initiale de l'eau, et des échanges thermiques avec l'environnement (rayonnements, chaleur sensible, énergie perdue par évaporation, etc.). Elle dépend alors de paramètres météorologiques tels que le vent, le rayonnement, la température et l'humidité de l'air. C'est un critère déterminant de la qualité physique, chimique et biologique des rivières. Un réchauffement aura des conséquences sur des paramètres chimiques de l'eau tels que le pH ou l'oxygène dissous, sur le cycle de vie des organismes aquatiques (éclosion des œufs, croissance, reproduction, etc.) ainsi que sur l'amplitude des relations avec les nappes.*



La température de la Loire a déjà augmenté d'environ 0,8°C en moyenne annuelle et estivale au cours du siècle dernier. Cette élévation montre un signal d'accentuation depuis la fin des années 1980 (Moatar et Gaillard, 2006).

**Un net réchauffement des eaux est projeté en climat futur.** À l'échelle du bassin de la Loire, le modèle thermique simule une augmentation de la température de 2,2°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ) en milieu de siècle et de 2,9°C ( $\pm 0,7^\circ\text{C}$ ) en fin de siècle (Beaufort et Moatar, 2015).

« L'augmentation de la température est en partie due à la diminution des débits et donc de la profondeur des cours d'eau ce qui va diminuer l'inertie thermique des cours d'eau et accentuer les températures maximales en été » (Beaufort et Moatar, 2015).

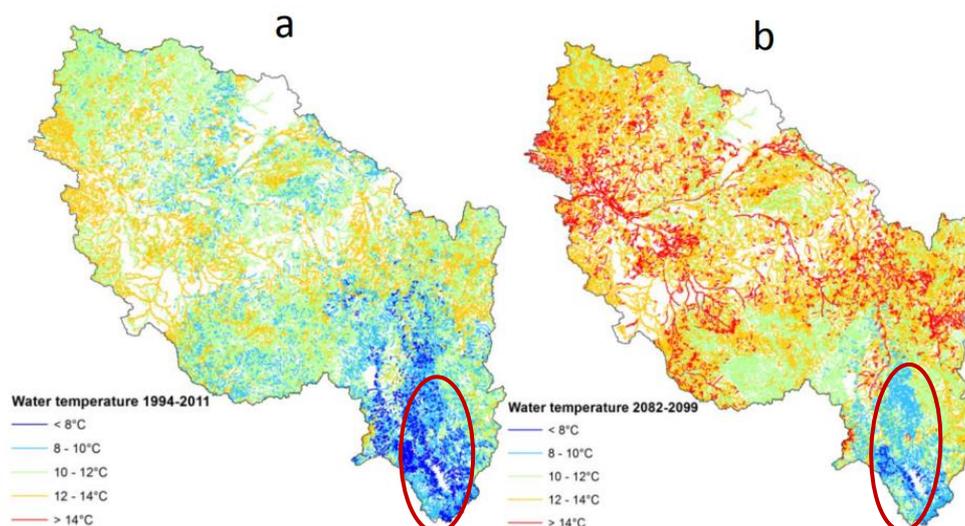


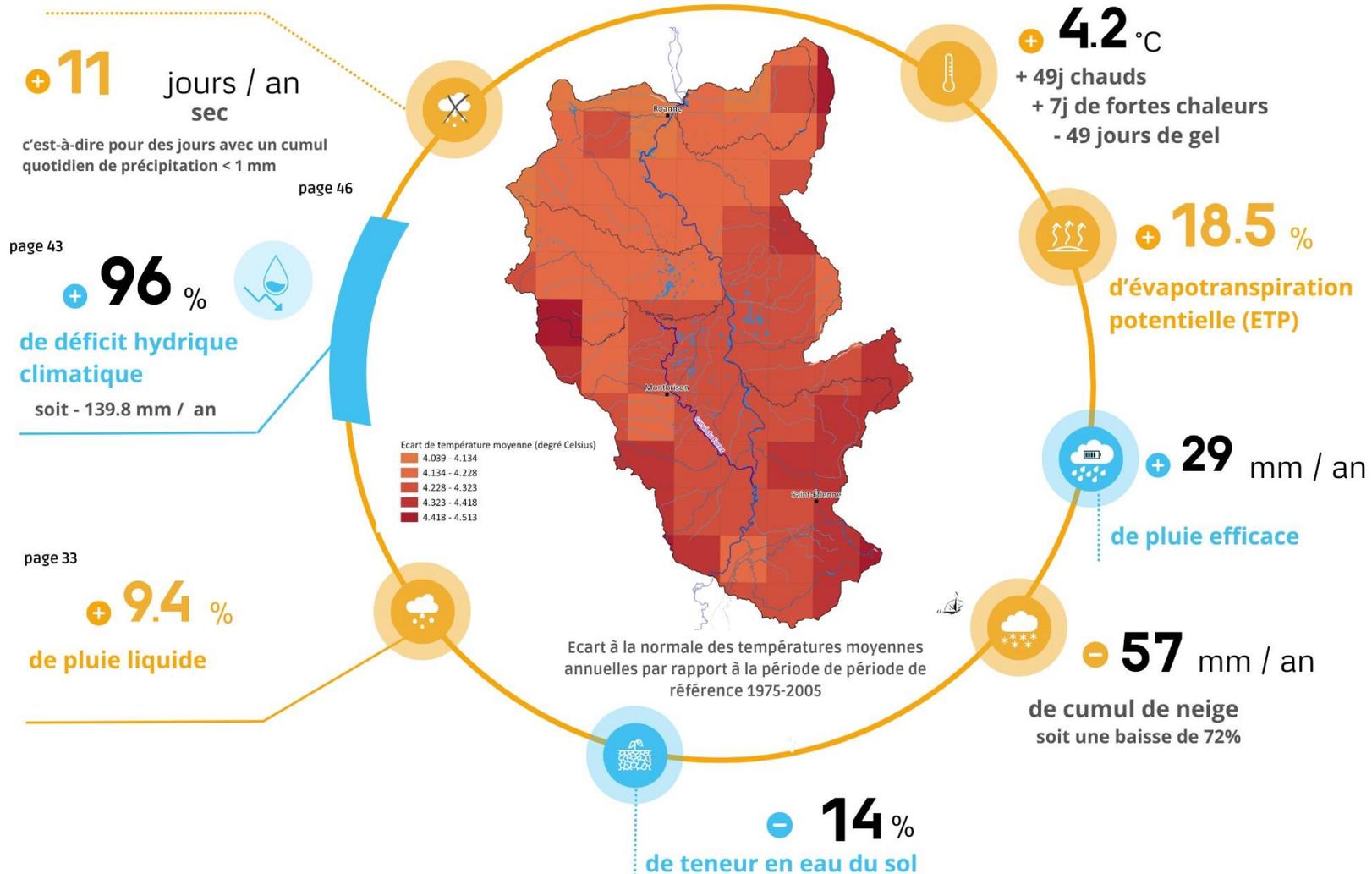
Figure 17 : Température moyenne interannuelle simulée avec le modèle T-NET sur le bassin de la Loire en comparant la période 1994-2011 (a) à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (2082-2099) (b) selon 13 projections climatiques de scénario A1B (IPCC, 2007, cité dans Beaufort et Moatar, 2015).



**L'évolution de la thermie des cours d'eau est renseignée pour chaque station de suivi de la fédération de pêche 42 au sein des fiches UG, dans le volet « milieux aquatiques ».**

# Synthèse des tendances climatiques

Evolution des indicateurs climatiques et du cycle de l'eau en climat futur annuel à horizon lointain 2100 \*



\*en scénario RCP 8.5 par rapport à la période de référence 1975-2005