

Analyse prospective du climat sur le bassin du Cher

Dans le cadre de l'analyse HMUC Cher



Août 2024

Suivi du document

Version	Auteur	Date
V1	Tristan Bourgeois	14/08/2024

Table des matières

I.	Introduction : qu'est-ce que le changement climatique	9
1.1	Qu'est-ce que la climatologie ?	9
1.2.	Qu'est-ce que l'effet de serre ?	10
1.3.	Quelles sont les origines du changement climatique actuel ?.....	10
1.4.	Le climat métropolitain : quelques chiffres.....	12
II.	Analyse rétrospective du climat.....	14
2.1	Objectifs et prérequis de l'analyse rétrospective	14
2.2.	Sources de données météorologiques mobilisées	15
2.2.1.	<i>Les postes Météo-France.....</i>	<i>15</i>
2.2.2.	<i>Les Séries Quotidiennes de Références (SQR)</i>	<i>16</i>
2.2.3.	<i>Les Longues Séries Homogénéisées (LSH)</i>	<i>17</i>
2.2.4.	<i>Les données SAFRAN</i>	<i>18</i>
2.2.5.	<i>Synthèse sur les données météorologiques et leur utilisation</i>	<i>19</i>
2.3.	Sources de données mobilisées pour l'analyse des régimes hydrologiques et piézométriques	19
2.3.1.	<i>Les données hydrologiques</i>	<i>19</i>
2.3.2.	<i>Les données piézométriques</i>	<i>22</i>
2.4.	Méthodes de traitement pour l'analyse rétrospective	24
2.4.1.	<i>Principaux indicateurs calculés</i>	<i>24</i>
2.4.2.	<i>Méthodes de traitement et d'analyse</i>	<i>26</i>
III.	Analyse prospective du climat et des impacts sur les ressources	31
3.1	Objectifs et prérequis de l'analyse prospective.....	31
3.2.	Les données EXPLORE 2.....	33
3.2.1.	<i>Projections climatiques.....</i>	<i>33</i>
3.2.2.	<i>Projections hydrologiques</i>	<i>34</i>
3.3.	Sélection des projections climatiques.....	41
3.3.1.	<i>Eléments de méthode.....</i>	<i>41</i>
3.3.2.	<i>Résultats à l'échelle métropolitaine</i>	<i>41</i>
3.3.3.	<i>Résultats sur le bassin du Cher</i>	<i>42</i>
3.3.4.	<i>Identification d'une shortlist de modèles « Bassin du Cher ».....</i>	<i>44</i>
3.4.	Sélection des projections hydrologiques	45
3.4.1.	<i>Données disponibles sur le bassin.....</i>	<i>45</i>
3.4.2.	<i>Diagnostic et sélection des modèles hydrologiques</i>	<i>47</i>

Liste des tableaux

Tableau 1 : Masses d'eau souterraines et piézomètres associés.....	23
Tableau 2 : Principaux indicateurs climatiques analysés.....	24
Tableau 3 : Liste des principaux indicateurs hydrologiques et piézométriques analysés.....	25
Tableau 4 : Pré-sélection des simulations climatiques EXPLORE2 étendant l'ensemble DRAIS 2020.....	33
Tableau 5 : Descriptif des modèles hydrogéologiques spatialisés présents dans la plateforme AquifR.....	37
Tableau 6 : Nombre de mailles et superficie de chaque couche du MONA. En vert les couches pour lesquelles des restitutions EXPLORE2 sont disponibles.....	38
Tableau 7 : Caractéristiques des modèles d'hydrologie de surface utilisés dans le projet EXPLORE 2 (N : nombre de points simulés parmi les 611 points de référence).....	40
Tableau 8 : Caractéristiques des modèles d'hydrologie souterraine utilisés dans le projet EXPLORE 2 (N : nombre de points simulés parmi les 227 points de référence).....	40
Tableau 9 : Shortist des couples de modèles sur le bassin du Cher.....	44
Tableau 10 : Nombre de simulations disponibles pour les 32 points de restitution EXPLORE2 sélectionnés sur le bassin du Cher.....	45

Liste des figures

Figure 1 : Schéma explicatif de l'effet de serre.....	10
Figure 2: Evolution climatique mondiale historique et projetée.....	11
Figure 3 : Température moyenne annuelle : écart à la référence 1961 – 1990 en France métropolitaine.....	12
Figure 4 : Hausse des normales de température moyenne annuelle en France métropolitaine.....	13
Figure 5 : Postes METEO retenues avec des données quotidiennes.....	15
Figure 6 : Postes SQR et chroniques associées.....	16
Figure 7 : Postes météo avec Longues Séries Homogénéisées (LSH) sur le bassin du Cher... ..	17
Figure 8 : Maillage SAFRAN sur le bassin du Cher.....	18
Figure 9 : Utilisation des données pour l'analyse climatique.....	19
Figure 10 : Méthode de sélection des données hydrologiques.....	20
Figure 11 : Stations hydrométriques sélectionnées pour l'analyse rétrospective.....	21
Figure 12 : Piézomètres retenus sur le bassin pour l'analyse rétrospective.....	22
Figure 13 : Deux modes de représentation de la normale climatiques (haut : normale des températures mensuelles moyennes) et droite : normale de température moyenne sur la période 1990 -2020 pour les mailles SAFRAN du territoire.....	26
Figure 14 : Exemple de représentation des écarts à la référence des températures de la période 1990 - 2020 par rapport à la normale 1960 - 1990.....	27
Figure 15 : Indice des Pluies Standardisées sur la période 1990 - 2022.....	28
Figure 16 : Illustration de la pente de Sen (rouge).....	29
Figure 17 : Exemple de matrice de corrélation.....	30
Figure 18 : Courbes d'évolution des RCP (Sources : GIEC).....	31
Figure 19 : Réseau de référence pour le diagnostic des modèles (Sources : SAUQUET et al. (2022)).....	35
Figure 20 : Descriptif et contribution des réseaux identifiés à l'ensemble des points de simulations retenus dans Explore2 (Source :Sauquet et al., 2022).....	36

Figure 21 : Domaines spatiaux couverts par des modèles hydrogéologiques de la plateforme AquifFR.....	37
Figure 22 : A) Zone modélisée par le MONA et B) Vue 3D des 15 couches aquifères modélisées	38
Figure 23 : Points de simulation des niveaux piézométriques par modèle	39
Figure 24 : Diagramme de dispersion des couples de modèles climatiques EXPLORE2 sur le territoire métropolitain, analyse annuelle à l'horizon lointain pour le RCP 8.5 (Source : METEO France).....	42
Figure 25 : Diagramme de dispersion des couples de modèles climatiques EXPLORE2 sur le bassin du Cher, analyse annuelle à l'horizon lointain pour le RCP 8.5 (Source : AnteaGroup) .	43
Figure 26 : Localisation des sites de références EXPLORE2 pour l'hydrologie de surface sur le bassin du Cher.	46

Glossaire

ADAMONT et CFD-t : les méthodes ADAMONT et CFD-t sont utilisées en climatologie et en hydrologie pour projeter les impacts du changement climatique à l'échelle régionale, notamment dans les zones de montagne. Elles combinent des modèles climatiques globaux (GCM) avec des modèles régionaux (RCM) et des techniques de downscaling statistique pour affiner les projections climatiques, en tenant compte des particularités locales comme la topographie, notamment à l'échelle des mailles SAFRAN.

CMIP : le CMIP, ou *Coupled Model Intercomparison Project* (projet d'inter comparaison des modèles couplés), est une initiative internationale regroupant des chercheurs et institutions du monde entier pour comparer et analyser les performances des modèles climatiques. L'objectif principal du CMIP est de fournir une base standardisée pour évaluer et améliorer la précision des modèles climatiques qui simulent l'évolution du climat terrestre. Le CMIP facilite la comparaison des résultats entre différents modèles et aide à comprendre les incertitudes dans les projections climatiques futures. Le CMIP est organisé en phases (CMIP1, CMIP2, etc.), chacune correspondant à un ensemble d'expériences spécifiques. Par exemple, la **phase CMIP6** a été utilisée pour informer les travaux du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) dans son sixième rapport d'évaluation (AR6).

ETP : évapotranspiration potentielle.

GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental pour l'Evolution du Climat.

GCM : « *Global Circulation Model* » ou Modèles Climatiques Globaux.

OMM : Organisation Mondiale de Météorologie.

LSH : Longues Séries Homogénéisées.

RCM : « *Regional Circulation Model* » ou Modèles Climatiques Régionaux.

Couple de modèles climatiques : un couple de modèle correspond au forçage d'un modèle régional (RCM) par un modèle global (GCM). Un couple est désigné comme suit : GCM / RCM (ex : CNRM-CM5/ALADIN63 ou CNRM – CM5 est le modèle global et ALADIN63 est le modèle régional).

RCP : « *Representative Concentration Pathways* » ou Profils d'Emission de Gaz à Effet de Serre. Les dénominations correspondent aux forçages radiatifs exercés à la surface terrestre en W/m² (Ex : RCP 8.5 : + 8,5 W/m²).

RR : cumuls de précipitations.

SAFRAN : le Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige est un système de réanalyse météorologique développé par Météo-France. Il fournit des données atmosphériques à haute résolution (maille de 8km de côté), telles que la température, les précipitations, l'humidité, le vent et la radiation, en temps réel ou pour des périodes passées. SAFRAN est particulièrement utilisé en climatologie, hydrologie et pour l'étude des conditions de neige dans les régions montagneuses, où il est combiné avec des modèles de neige et d'hydrologie comme CROCUS et MODCOU pour simuler l'évolution du manteau neigeux et des ressources en eau.

SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux.

SCHAPI : Le Système Hydrologique pour l'Aide à la Prévision des Inondations est un système développé pour améliorer la prévision et la gestion des inondations en France. Il s'agit d'un outil

de modélisation hydrologique et hydraulique qui intègre des données météorologiques en temps réel, des informations sur le terrain, et des modèles hydrologiques pour prévoir les débits des rivières et les niveaux d'eau, notamment en période de crue.

SQR : Séries Quotidiennes de Références.

SPI : « *Standardized Precipitation Index* ou Indice des Pluies Standardisées.

TM : Température Moyenne.

TN : Température Minimale.

TX : Température Maximale.

Objectifs de la note

Cette note technique présente de manière pédagogique et synthétique les données mobilisées dans le cadre de la présente étude ainsi que les différentes méthodes appliquées.

Cette note est structurée autour des deux grandes phases de l'étude :

- La phase d'analyse du climat passé ou analyse « **rétrospective** » qui vise à caractériser le climat des 30 dernières années et son évolution sur le bassin ;
- La phase d'analyse **prospective** dont l'objectif est, sur la base de projections hydro-climatiques ; de caractériser les évolutions des paramètres climatiques clés sous différentes trajectoires de changement du climat, et l'impact de ces évolutions sur les ressources en eau.

Pour chacune de ces phases, des sources de données différentes et des méthodes de traitement adaptées ont été mises en place. Ces sources de données sont définies et les méthodes détaillées dans ce document.

Ces résultats constituent un ensemble cohérent, répondant à l'objectif du volet climat de l'analyse HMUC.

Ces résultats sont exprimés à l'échelle des 4 périmètres de SAGE définis sur le bassin du Cher :

- Cher amont ;
- Cher aval ;
- Yèvre – Auron ;
- Sauldre.

L'objectif de cette note est de fournir des éléments de compréhension aux lecteurs des fiches de synthèse.

I. Introduction : qu'est-ce que le changement climatique

1.1 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'observation 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 constitue que l'origine des dérèglements ; la terre étant un système où tout est lié.

Les paramètres climatiques connaissent des variations naturelles, dues par exemple à celles du cycle solaire, ou à des éruptions volcaniques massives. Depuis les années 1800, les activités humaines (essentiellement la combustion de combustibles fossiles : charbon, pétrole et gaz) constituent la cause principale de l'évolution du climat, avec un réchauffement plus rapide que jamais auparavant.

Actuellement, les conséquences du changement climatique s'observent à travers des sécheresses intenses, des pénuries d'eau, de graves incendies, l'élévation du niveau de la mer, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des inondations, la fonte des glaces polaires 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.

1.2. 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 terrestre autour de 15°C. Il est lié à la présence dans l'atmosphère de gaz qui captent une part de l'énergie thermique (la chaleur) renvoyée vers l'espace par la Terre. **On les appelle « 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. **Les activités anthropiques accentuent l'effet de serre.**

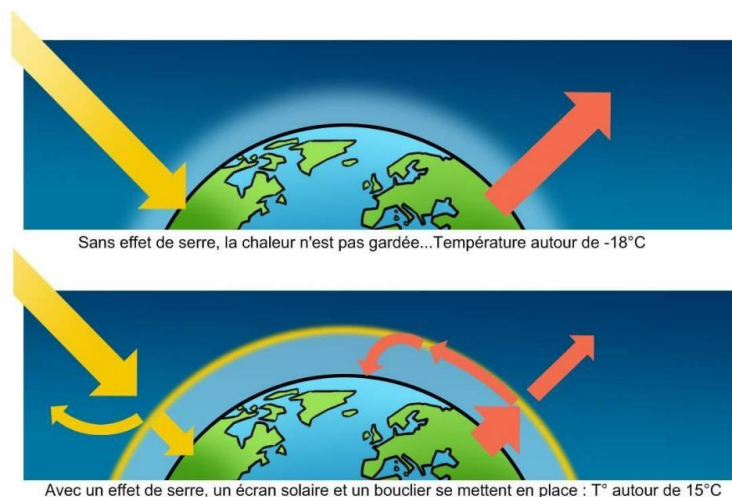


Figure 1 : Schéma explicatif de l'effet de serre
(Source : [Le réchauffement climatique : c'est quoi ? \(cafe-sciences.org\)](http://Le réchauffement climatique : c'est quoi ? (cafe-sciences.org)))

1.3. Quelles sont les origines du 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, une augmentation de la variabilité climatique, avec une intensification de l'alternance entre les cycles, s'est mise en place.

Ainsi, la planète a déjà subi plusieurs évolutions de climat mais ces évolutions n'ont jamais été aussi brutales que celle observée aujourd'hui.

La dernière période glaciaire a connu son point culminant il y a 20 000 ans. Actuellement, nous sommes dans une période interglaciaire. **Les phénomènes naturels ne peuvent pas expliquer à eux seuls le réchauffement actuel de la planète : le principal responsable du réchauffement climatique est l'Homme. La température à la surface du globe est actuellement supérieure de 1,1°C 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 CO₂ dans l'atmosphère augmentent. Le premier tome du 6^{ème} rapport du GIEC (2021) rappelle qu'en 2019, les concentrations atmosphériques de CO₂ 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 6^{ème} rapport du GIEC 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.

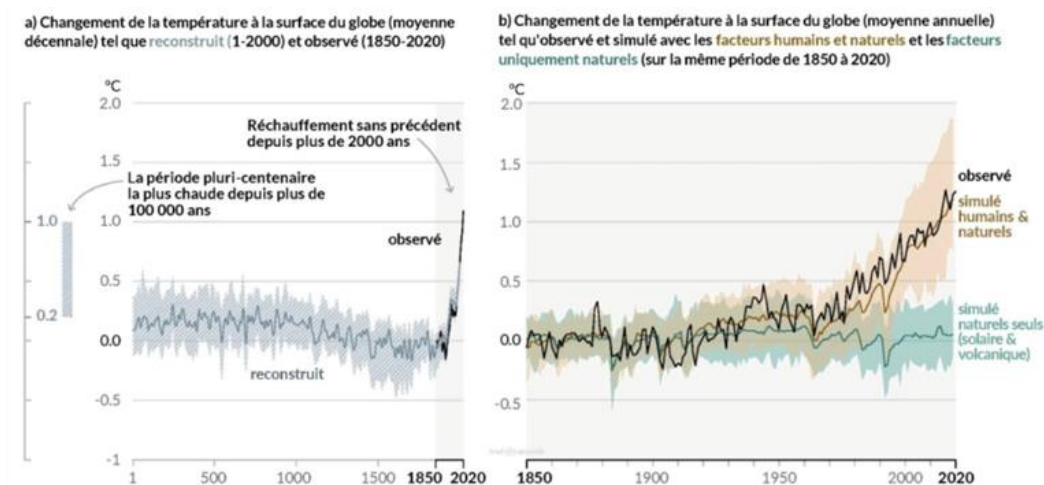


Figure 2: Evolution climatique mondiale historique et projetée

Au niveau des projections climatiques, le 6^{ème} 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^{ème} siècle, à moins que des réductions considérables des émissions de CO₂ 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°.

1.4. Le climat métropolitain : quelques chiffres

➤ 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.

La figure 3 illustre la hausse des températures moyennes à l'échelle de la France métropolitaine par rapport à la période de référence 1961-1990.

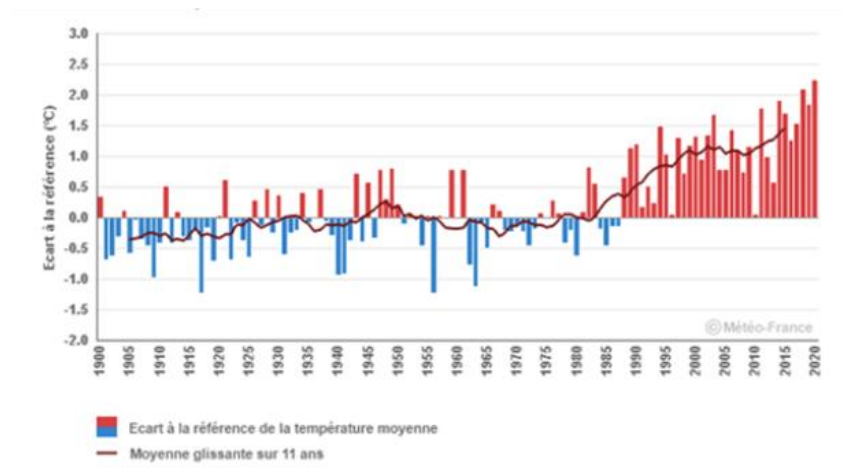


Figure 3 : Température moyenne annuelle : écart à la référence 1961 – 1990 en France métropolitaine (Source : Météo France)

➤ 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.

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, marquées 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.

A 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.

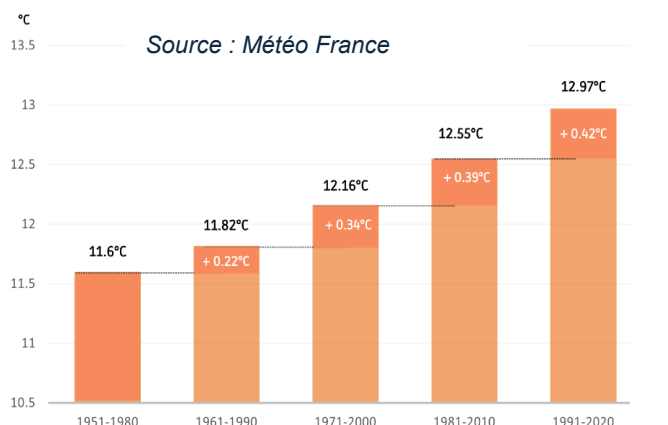


Figure 4 : Hausse des normales de température moyenne annuelle en France métropolitaine

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

II. Analyse rétrospective du climat

2.1 Objectifs et prérequis de l'analyse rétrospective

L'analyse rétrospective du climat vise deux objectifs principaux :

- La **caractérisation du climat** sur la période passée et sa variabilité au regard des paramètres climatiques principaux ;
- **L'analyse de l'évolution des paramètres climatiques** sur la période passée (voir ci-dessous) par le biais du calcul de tendances d'évolution.

Des indicateurs climatiques sont calculés pour les 3 paramètres climatiques clés :

- Les températures moyennes (TM), minimales (TN) et maximales (TX) ;
- Les cumuls de pluies (RR) ;
- L'évapotranspiration (ETP).



*A noter : l'évapotranspiration n'est pas un paramètre directement mesuré, mais calculé à partir de plusieurs paramètres climatiques selon la formule utilisée. Dans le cas de la formule de **Penman-Monteith**, qui est la plus couramment utilisée compte tenu de sa précision, les paramètres suivants sont pris en compte : température de l'air, vent à 2m, humidité relative, pression atmosphérique et rayonnement solaire.*

➤ **Quelle période analyse-t-on quand on parle de climat passé ?**

Lorsque l'on parle de climat de manière générale, on estime qu'une évolution est pertinente et scientifiquement valable si elle est analysée sur une période d'au moins **30 ans**. En ce qui concerne le climat passé, nous nous intéressons à deux périodes :

- **La période 1990-2022**, qui permet de voir les évolutions sur les 30 dernières années, est la période principalement analysée ;
- **La période 1950-2022**, qui permet de mettre en exergue les évolutions depuis le début de l'ère industrielle. Cette période sera également analysée à titre informatif.

La comparaison de ces deux périodes permet de identifier des tendances d'autant plus marquées (ou non) sur les 30 dernières années (1990-2022) par rapport à une étude plus longue du climat (1950-2022).

2.2. Sources de données météorologiques mobilisées

Dans le cadre de l'analyse rétrospective, différents indicateurs climatiques (températures moyennes, minimales ou maximales, cumuls de précipitations, ETP, ...) seront calculés afin de caractériser le climat (normales climatiques) et d'analyser les tendances des d'évolution.

Pour cela, différentes données sources de données sont mobilisées.

2.2.1. Les postes Météo-France

Il existe **53 postes météo en activités** sur le bassin. En fonction des caractéristiques (emprise de la chronique, stabilité du poste, paramètres suivis, ...) de chaque poste, différents types de données sont produites par Météo-France¹.

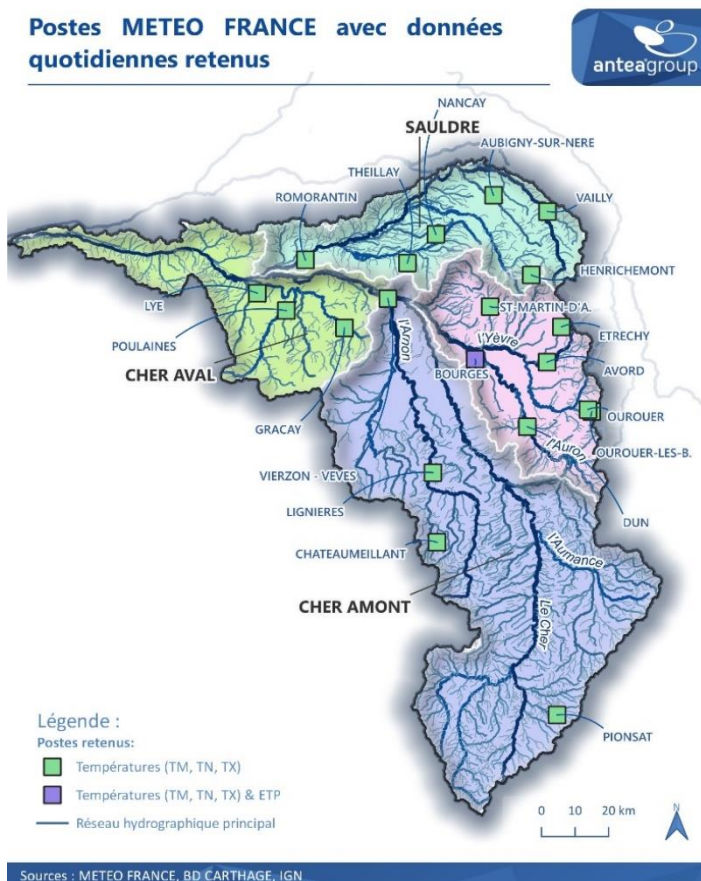
Parmi ces postes en activité, **20 postes** présentent des chroniques « de **données quotidiennes** » sur les périodes ciblées, pour un ou plusieurs paramètres clés.

Seul le poste de Bourges est associé à des chroniques d'évapotranspiration (ETP).

Selon Météo-France, ces chroniques de paramètres climatiques ont été soumises à un contrôle climatologique.

Les caractéristiques des chroniques associées aux postes retenus sont présentées en **ANNEXE 1**.

Figure 5 : Postes météo retenus avec des données quotidiennes



Ces postes météorologiques, en fonction des caractéristiques mentionnées, peuvent également être associés à Séries Quotidiennes de Référence (SQR) et / ou à des Longues Séries Homogénéisées (LSH) (voir ci-après)

¹ <https://meteo.data.gouv.fr/>

2.2.2. Les Séries Quotidiennes de Références (SQR)

Les Séries Quotidiennes de Références (SQR) sont des **séries quotidiennes** généralement disponibles pour **3 paramètres climatiques** : Températures maximales (TX) et Minimales (TN) et pluie (RR) sur des périodes relativement longues.

Ces données ont été contrôlées par Météo-France sur la base de différents critères (complétude, stabilité du poste, ...).

Sur le bassin du Cher, **14 postes** météorologiques disposent de ces chroniques SQR avec :

- 12 postes associées à des chroniques de pluies uniquement ;
- 2 postes (Bourges et Avord) présentant l'ensemble des paramètres.

Pour chaque poste, les chroniques disponibles permettent de couvrir les deux périodes ciblées, avec néanmoins quelques lacunes. Les caractéristiques des postes SQR du bassin sont présentées en **ANNEXE 2**.

Postes météo avec Séries Quotidiennes de Référence (SQR) sur le bassin du Cher et chroniques associées

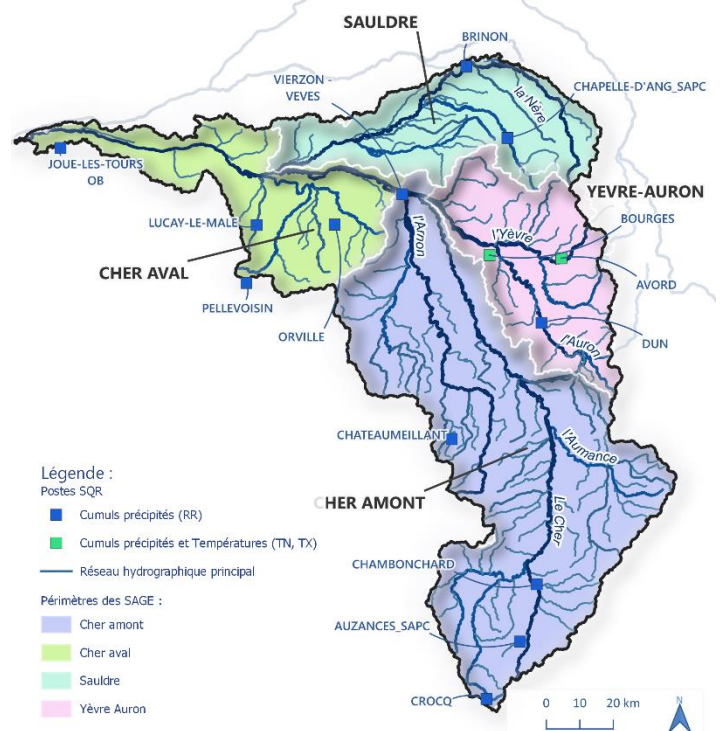


Figure 6 : Postes SQR et chroniques associées

Sources : METEO FRANCE, BD CARTHAGE



Ces chroniques journalières permettent le calcul d'indicateurs dits « nombre de jours » (ex : nombre de jours de sécheresse, de pluies intenses ou extrêmes, ...) et l'analyse des tendances d'évolution associées.

2.2.3. Les Longues Séries Homogénéisées (LSH)

Les Longues Séries Homogénéisées (LSH) sont des **séries mensuelles**, mesurées au droit des postes météorologiques qui ont fait l'objet de correction par homogénéisation statistique (correction des données mensuelles à partir des 5 postes météo les plus proches). De ce fait, les chroniques LSH **n'ont pas de lacunes** et sont disponibles sur des périodes relativement longues pour les paramètres climatiques clés (Températures Minimales (TN) et maximales (TX) et pluies (RR))

Sur le bassin du Cher, **30 postes** météorologiques disposent de Longues Séries Homogénéisées :

- 26 postes avec des chroniques mensuelles de cumuls précipités (RR) ;
- 3 postes avec l'ensemble des paramètres (RR, TN et TX)
- 1 poste avec des chroniques de pluies (RR) et de Températures Minimal (TN).

Compte tenu de la correction statistique opérée sur les chroniques LSH, l'ensemble des chroniques sont complètes sur la période 1950 – 2022.

Postes météo avec des Longues Séries Homogénéisées (LSH)

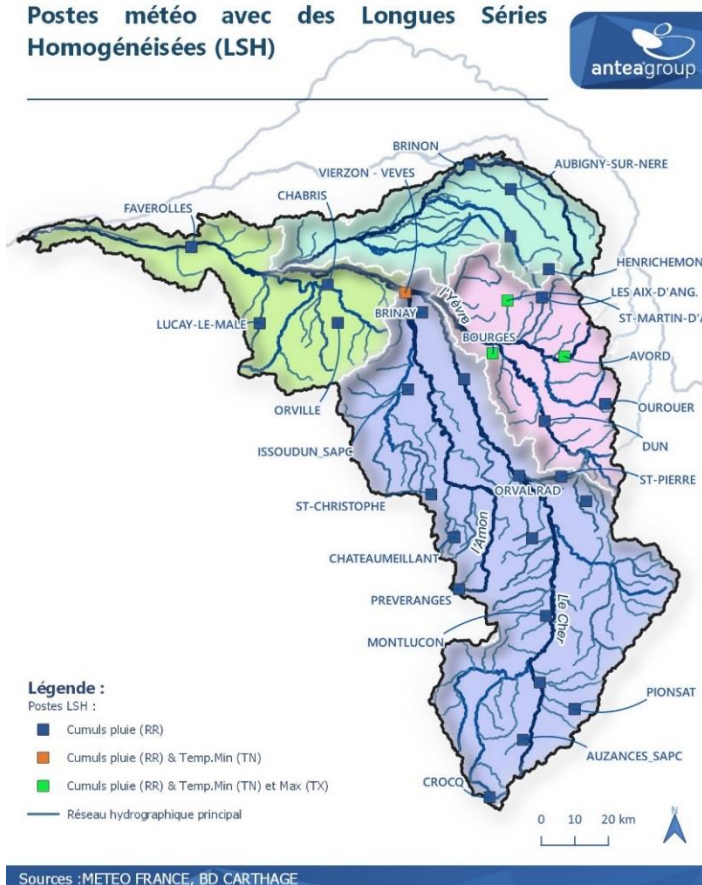


Figure 7 : Postes météo avec Longues Séries Homogénéisées (LSH) sur le bassin du Cher



Ces chroniques sont utilisées pour la caractérisation du climat (normales climatiques) et l'analyse des tendances d'évolutions climatiques. En effet, compte tenu des corrections apportées par Météo-France, les chroniques LSH constituent la source de données à privilégier pour l'analyse des tendances.

2.2.4. Les données SAFRAN

Les données SAFRAN sont issues d'une **réanalyse des observations** de surface spatialisées à l'échelle de mailles régulières de 8 km de côté (soit 64 km²). Le jeu de données contient 7 paramètres climatiques exprimés au pas de temps journalier sur la période 1956 - 2023 .

276 mailles SAFRAN intersectent tout ou partie du bassin du Cher. Les chroniques journalières sont disponibles pour chacune de ces mailles sur la période mentionnée plus haut.

Maillage SAFRAN sur le bassin du Cher

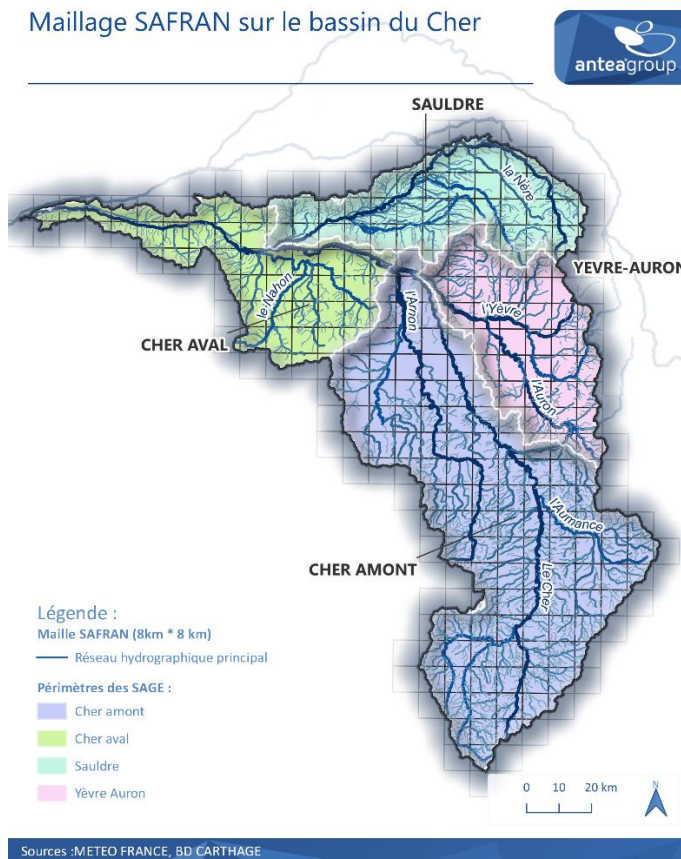


Figure 8 : Maillage SAFRAN sur le bassin du Cher



Les données SAFRAN sont principalement utilisées pour l'analyse de la variabilité des principaux paramètres climatiques à l'échelle d'un territoire (normales climatiques par maille). Ces données sont également mobilisées pour l'analyse de l'évapotranspiration, qui est un paramètres rarement disponible au droit des postes météo.

2.2.5. Synthèse sur les données météorologiques et leur utilisation

L'ensemble des données ainsi que leur utilisation dans le cadre de l'étude sont présentés dans le schéma ci-dessous.

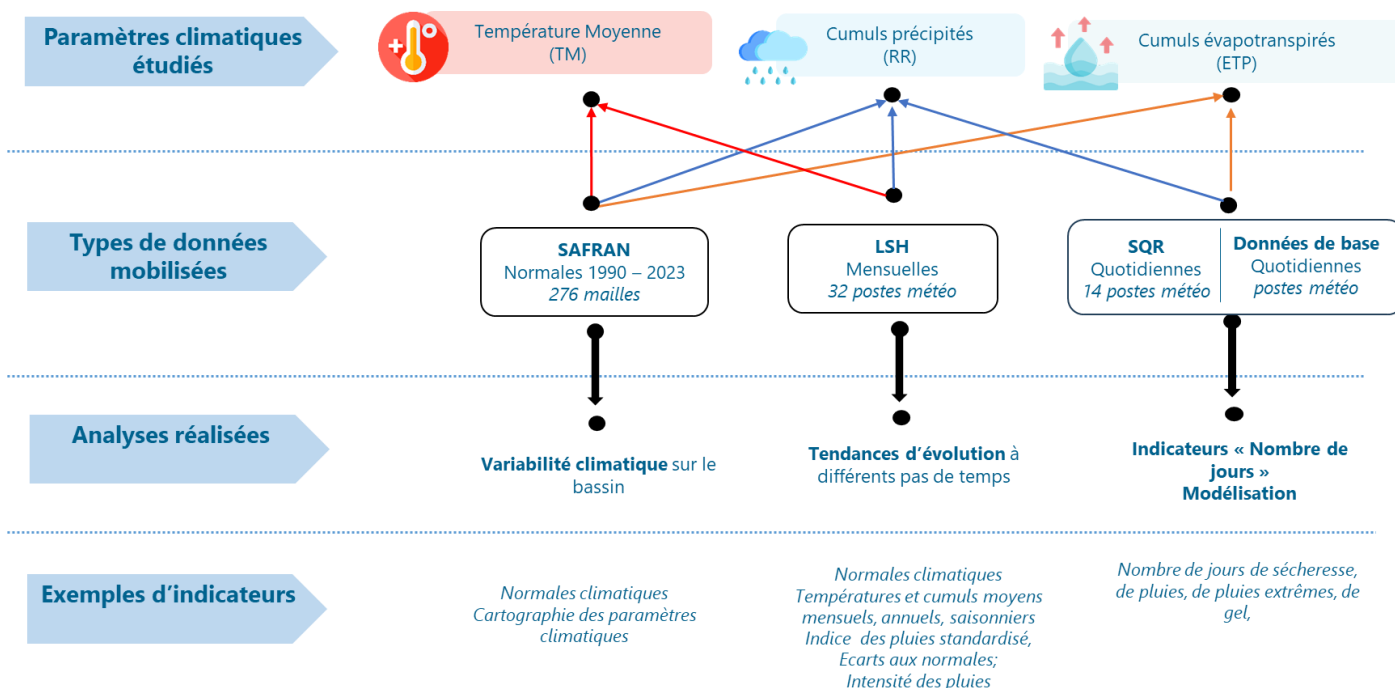


Figure 9 : Utilisation des données pour l'analyse climatique (Source : Anteagroup, 2024)

2.3. Sources de données mobilisées pour l'analyse des régimes hydrologiques et piézométriques

2.3.1. Les données hydrologiques

Les données hydrologiques associées aux stations hydrométriques du territoire sont extraites via l'API Hydrométrie d'Hub'Eau². Pour chaque station, des chroniques de débit journaliers (QJM) sont extraites.

De la même manière que pour les données climatiques, une **sélection des stations hydrométriques** est opérée sur la base des critères suivants :

- Représentativité spatiale du bassin du Cher ;
- Cohérence de l'emprise de suivi hydrométrique avec les périodes ciblées ;
- Robustesse des chroniques (validité) ;
- Respect des critères de complétude (taux de lacunes) fixés pour l'analyse. Les critères de complétude sont les suivants :
 - Seuil de complétude mensuel : 90 % ou 10 % de données manquantes autorisées (3 jours maximum) ;

² <https://hubeau.eaufrance.fr/page/api-hydrometrie>

- Une année est retenue si et seulement si les 12 mois de l'année affichent un seuil de complétude $\geq 90\%$.

Seuil :
90 %

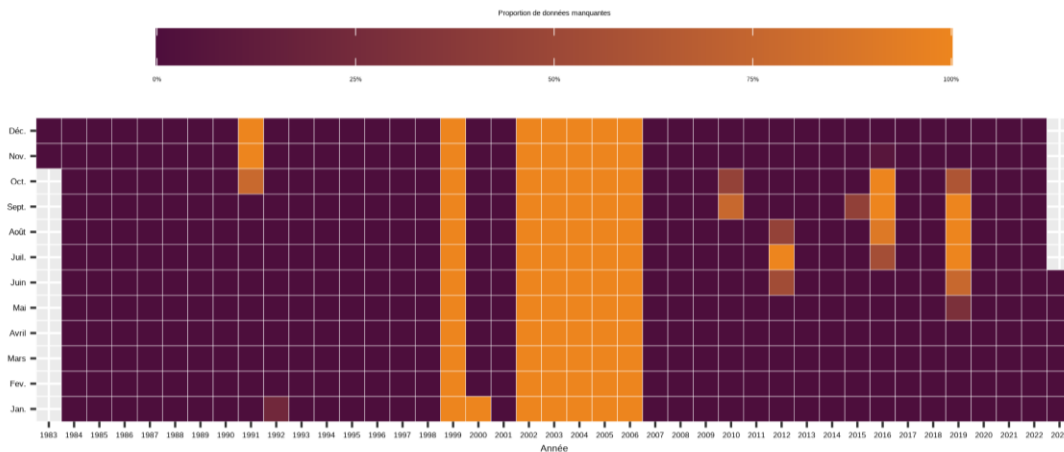
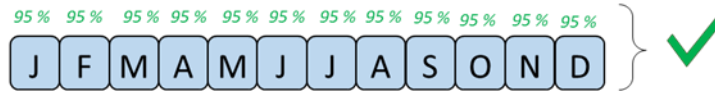
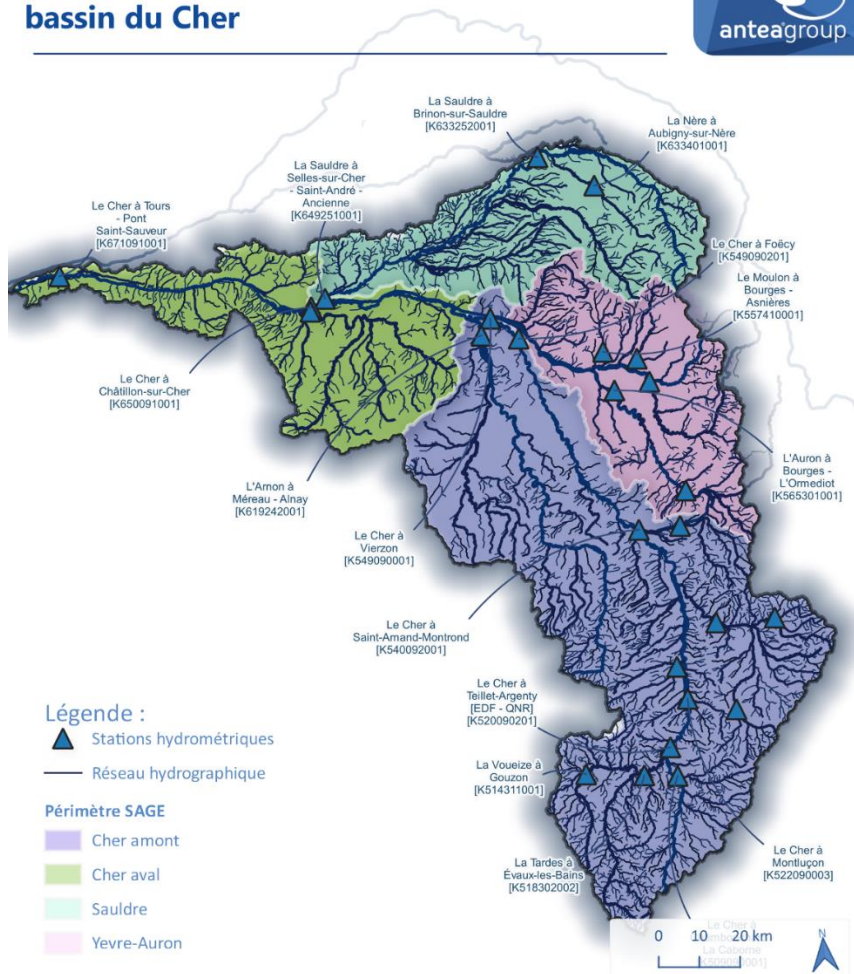


Figure 10 : Méthode de sélection des données hydrologiques

Sur le bassin du Cher, 91 stations hydrométriques sont implantées, dont 52 en activité aujourd'hui. Parmi ces stations, **25 stations hydrométriques** sont retenues sur la base des critères mentionnés plus haut.

Stations hydrométriques retenues sur le bassin du Cher



Sources : Hyroportail (Eau France), METEO FRANCE, BD CARTHAGE

Figure 11 : Stations hydrométriques sélectionnées pour l'analyse rétrospective

Deux périodes d'analyse permettent d'optimiser le nombre de stations retenues :

- Une **période historique 1965 – 2010**, pour laquelle 7 stations hydrométriques présentent des chroniques correspondant aux critères de sélection ;
- Une **période récente 1990 – 2022**, pour laquelle 14 stations hydrométriques pourront être analysées.

Les caractéristiques des stations hydrométriques retenues sont présentées en **ANNEXE 4**.

2.3.2. Les données piézométriques

Les chroniques piézométriques associées aux piézomètres du territoire sont extraites via l'API Piézométrie d'Hub'Eau³. Pour chaque piézomètre, des chroniques de niveau journalier sont extraites.

De la même manière que pour les données climatiques, une **sélection des piézomètres** est opérée sur les critères cités suivants :

- Représentativité des principaux aquifères du secteur ;
- Emprise cohérente avec les périodes analysées ;
- Complétude et robustesse des chroniques.

Sur le bassin du Cher, 79 piézomètres sont implantés parmi lesquels **37 piézomètres** ont été sélectionnés pour l'analyse rétrospective. Une période d'analyse unique, **1995 – 2023**, est identifiée à partir des critères de sélection.

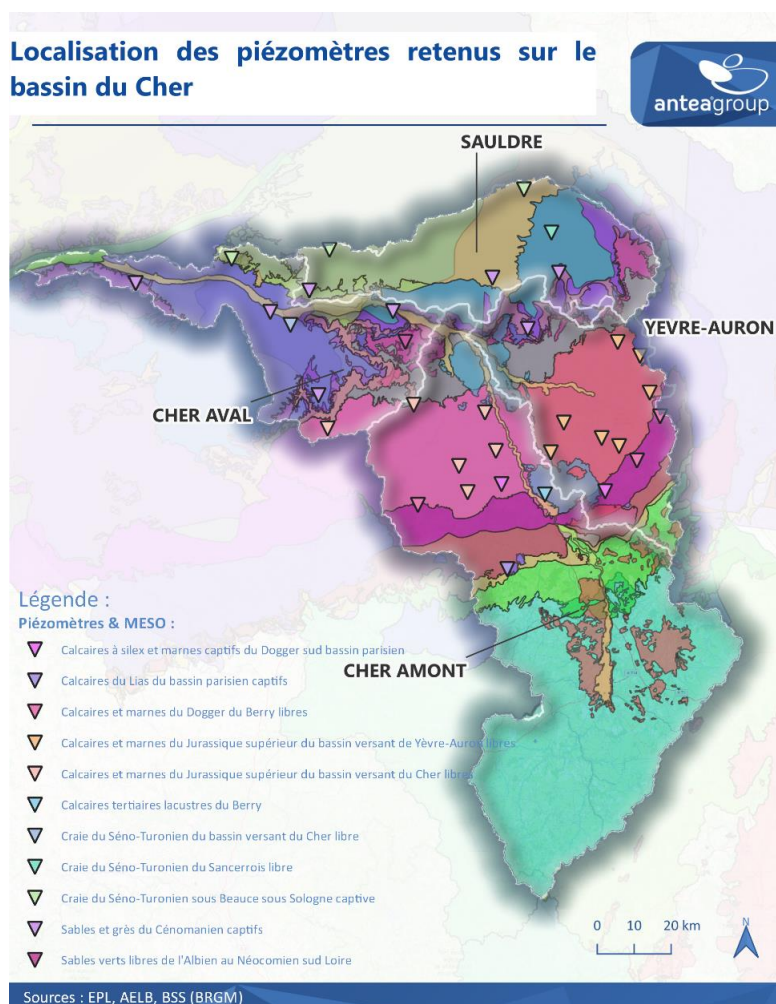


Figure 12 : Piézomètres retenus sur le bassin pour l'analyse rétrospective

Ces piézomètres sont représentatifs de 11 masses d'eau souterraines localisées sur le bassin.

³ <https://hubeau.eaufrance.fr/page/api-piezometrie>

Tableau 1 : Masses d'eau souterraines et piézomètres associés

SAGE	MESO	Nombre de piézomètres retenus	Total
Cher amont	Calcaires à silex et marnes captifs du Dogger sud bassin parisien	1	10
	Calcaires du Lias du bassin parisien captifs	1	
	Calcaires et marnes du Dogger du Berry libres	1	
	Calcaires et marnes du Jurassique supérieur du bassin versant du Cher libres	5	
	Calcaires tertiaires lacustres du Berry	1	
	Non renseigné	1	
Cher aval	Calcaires et marnes du Jurassique supérieur du bassin versant du Cher libres	1	9
	Craie du Séno-Turonien du bassin versant du Cher libre	2	
	Craie du Séno-Turonien sous Beauce sous Sologne captive	1	
	Sables et grès du Cénomaniens captifs	4	
	Sables verts libres de l'Albien au Néocomien sud Loire	1	
Sauldre	Craie du Séno-Turonien du Sancerrois libre	1	6
	Craie du Séno-Turonien sous Beauce sous Sologne captive	2	
	Sables et grès du Cénomaniens captifs	3	
Yèvre-Auron	Calcaires à silex et marnes captifs du Dogger sud bassin parisien	1	12
	Calcaires et marnes du Dogger du Berry libres	2	
	Calcaires et marnes du Jurassique supérieur du bassin versant de Yèvre-Auron libres	7	
	Sables et grès du Cénomaniens captifs	1	
	Non renseigné	1	

2.4. Méthodes de traitement pour l'analyse rétrospective

2.4.1. Principaux indicateurs calculés

Les principaux **indicateurs climatiques** sont listés et définis ci-dessous :

Tableau 2 : Principaux indicateurs climatiques analysés

Famille	Nom	Acronyme	Description	Unité	Fréquence
Température	Température moyenne quotidienne	TM	Moyenne des TM quot de la période	°C	Mensuel / Saisonnier / Annuel
	Température minimale quotidienne	TN	Moyenne des TN quot de la période	°C	Mensuel / Saisonnier / Annuel
	Température maximale quotidienne	TX	Moyenne des TX quot de la période	°C	Mensuel / Saisonnier / Annuel
	Nombre de jours en vagues de chaleur	TXHWD	Nb j où Tx quot > = normale quot + 5°C, pdt plus de 5 jours consécutifs	jours	Mensuel / Saisonnier / Annuel
	Nombre de journées estivales	FNE	Nb j où Tx quot > 25°C	jours	Mensuel / Saisonnier / Annuel
	Nombre de jours de fortes chaleurs	FNC	Nb j où Tx quot >= 35°C	jours	Mensuel / Saisonnier / Annuel
Précipitations	Cumul précipitations	RR	Cumul sur la période des PR quot	mm	Mensuel / Saisonnier / Annuel
	Précipitations quotidiennes moyennes	RR moy	Moyenne des PR quot de la période	mm/jour	Mensuel / Saisonnier / Annuel
	Précipitations moyennes efficaces	Peff	Pluies totales - ETP	mm/ jour	Mensuel / Saisonnier / Annuel
	Nombre de jours de pluie	RR1MM	Nb j où PR quot > = 1 mm	jours	Mensuel / Saisonnier / Annuel
	Nombre de jours de fortes précipitations	RR1MM	Nb j où PR quot > = 20 mm	jours	Mensuel / Saisonnier / Annuel
	Période de sécheresse	PXCDD	Max du nb j consécutifs où RR quotidiennes < 1 mm	jours	Mensuel / Saisonnier / Annuel
	Précipitations quotidiennes intenses	PQ90	q90 des précipitations totales quotidiennes	mm	Annuel
	Précipitations quotidiennes extrêmes	PQ99	q99 des précipitations totales quotidiennes	mm	Saisonnier / Annuel
	Nombre de jours de précipitations extrêmes	RRR99	Nb jours avec RR > q99	jours	Saisonnier / Annuel
	Indice des Pluies Standardisées	SPI		sans	Mensuel / Saisonnier / Annuel

ETP	Évapotranspiration potentielle (Penmann-Monteith)	ETP	Cumul sur la période des évapotranspiration potentielle quotidiennes de la période	mm	Mensuel / Saisonnier / Annuel
------------	--	------------	--	----	-------------------------------

Les principaux indicateurs hydrologiques et piézométriques calculés sont définis ci-dessous :

Tableau 3 : Liste des principaux indicateurs hydrologiques et piézométriques analysés

Période hydrologique	Indicateur	Abréviation	Source de données	Calcul
Régime hydrologique	Module	QA	Débits moyens journaliers	Moyenne des débits journaliers sur la période considérée (ex : 1990 – 2023)
	Débit Moyen Annuel	QMA	Débits moyens journaliers	Moyenne des débits journaliers sur l'année considérée (ex : 2017)
	Débit Moyen Mensuel	QMM	Débits moyens journaliers	Moyenne des débits sur le mois considéré (ex : Septembre)
	Débit Moyen Mensuel	QMM inter	Débit Moyen Mensuel	Moyenne des QMM d'un mois donné sur la période considérée (ex : septembre sur 1990 – 2023)
Etiage	Débit mensuel Minimal Annuel	QMNA	Débit Moyen Mensuel	QMNA = min(QMM) pour une année donnée
	Débits Minimums Consécutifs sur 3/7/10/30 jours	VCNx	Débits journaliers	Valeurs de débits journaliers minimales observées chaque année sur 3/7/10/30 jours consécutifs
Piézométrie	Niveaux moyens annuels	HMA	Niveaux journaliers	Moyenne des niveaux moyens journaliers sur la période considérée
	Niveaux moyens mensuels	HMM	Niveaux journaliers	Moyenne des niveaux moyens mensuel sur la période considérée
	Niveaux mensuels minimums annuels	HMNA	Niveaux mensuelx	HMNA = min (HMM) pour une année donnée

2.4.2. Méthodes de traitement et d'analyse

Plusieurs méthodes de traitement ou indicateurs spécifiques ont été appliqués sur les chroniques climatiques.

➤ **Calcul des normales climatiques :**

La **normale climatique** est une moyenne statistique qui peut être calculée sur les différents paramètres climatiques (température, précipitations, ...) sur une **période de 30 ans** (comme défini par l'Organisation météorologique mondiale (OMM)). Elle fournit une référence standardisée, afin de comparer les conditions climatiques actuelles avec celles du passé.

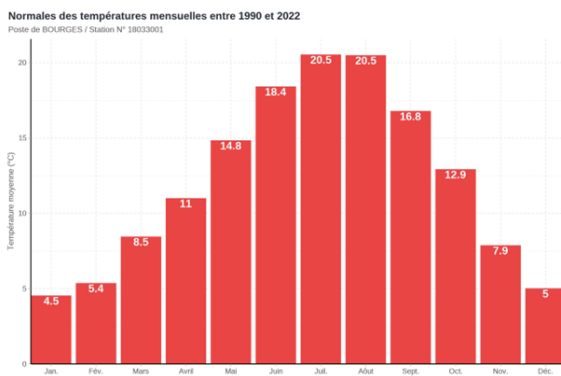
Les normales climatiques sont utilisées pour **évaluer les tendances à long terme** dans le climat d'une région mais aussi pour identifier des anomalies climatiques/



Par exemple, la période de référence la plus récente utilisée est 1990-2020, mais des normales climatiques pour d'autres périodes comme 1960-1990 sont également utilisées pour faire des comparaisons historiques.

Les normales climatiques peuvent s'exprimer à différents pas de temps :

- Sur une période de référence comme cité plus haut (1990 – 2020) ;
- Par mois, pour représenter l'évolution moyenne mensuelle d'un paramètre.



Normales des températures moyennes (TM) sur les mailles SAFRAN
Période 1990 - 2020

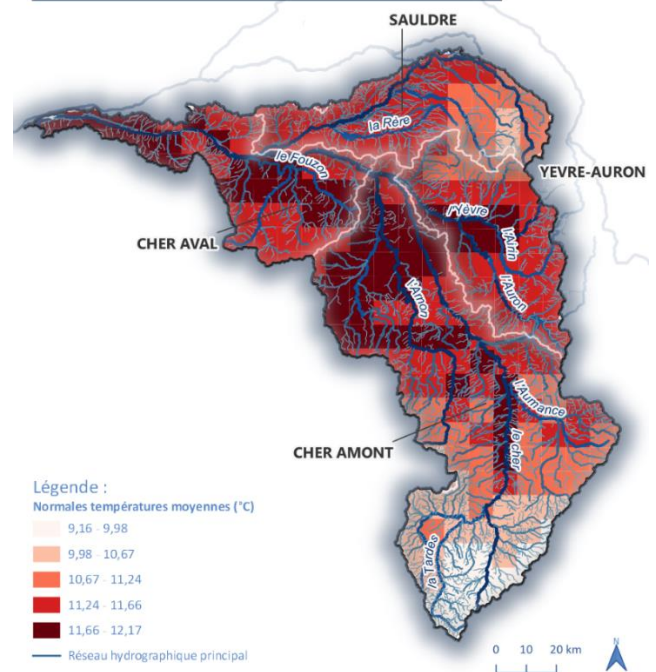


Figure 13 : Deux modes de représentation de la normale climatiques (haut : normale des températures mensuelles moyennes) et droite : normale de température moyenne sur la période 1990 -2020 pour les mailles SAFRAN du territoire

Sources :METEO FRANCE, BD CARTHAGE

➤ **Calcul des écarts à la référence :**

L'écart à la référence permet de **comparer les valeurs climatiques observées** à un moment donné (températures, précipitations,) **avec les normales climatiques** d'une période ciblée. L'écart est calculé en soustrayant la valeur de la normale climatique à la valeur observée et s'interprète comme suit :

- Un **écart positif** indique que la valeur observée est supérieure à la normale, suggérant des conditions plus chaudes (pour les températures) ou plus humides (pour les précipitations) que la moyenne ;
- Un **écart négatif** indique que la valeur observée est inférieure à la normale, suggérant des conditions plus froides ou plus sèches que la moyenne.

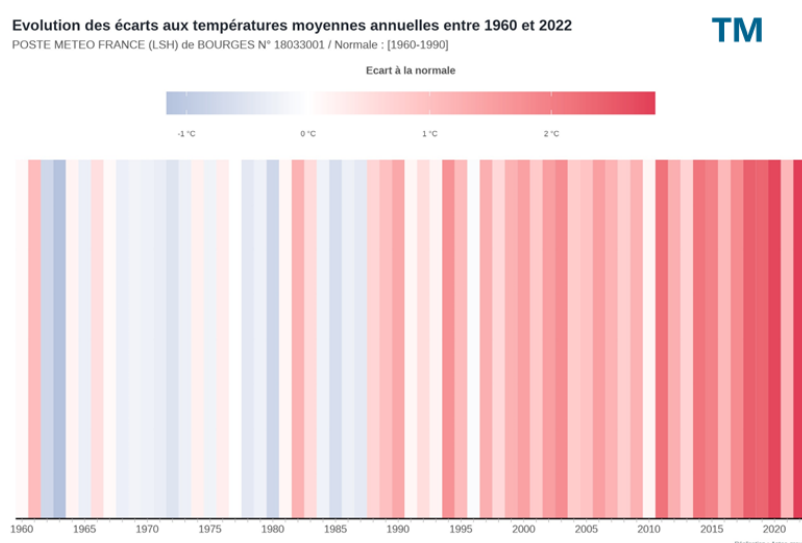


Figure 14 : Exemple de représentation des écarts à la référence des températures de la période 1990 - 2020 par rapport à la normale 1960 - 1990



Les écarts à la référence sont utilisés pour comprendre les anomalies climatiques, identifier des événements extrêmes, et communiquer sur les conditions météorologiques actuelles par rapport aux moyennes historiques.

➤ **Calcul de l'Indice des Pluies Standardisé (IPS) :**

L'Indice des Précipitations Standardisé (ou SPI, pour *Standardized Precipitation Index* en anglais) est un indicateur souvent utilisé pour la gestion des ressources en eau, afin d'évaluer et de comparer les anomalies des précipitations dans une région donnée. Il permet **de quantifier les déficits ou excès de précipitations par rapport à une période de référence**, et est couramment utilisé pour identifier et surveiller les sécheresses ou les périodes de pluviométrie excessive.

Le SPI est calculé sur une période de référence d'une durée souvent équivalente à **30 ans**. Les données de précipitations sont généralement ajustées (calcul moyenne de l'écart type) pour suivre une distribution normale puis le SPI est calculé comme suit :

$$SPI = \frac{\text{Précipitation Observée} - \text{Moyenne de la période de référence}}{\text{Ecart type de la période de référence}}$$

Le SPI s'interprète comme suit :

- Un **SPI de 0** signifie que les précipitations sont proches de la normale ;
- Un **SPI négatif** indique un déficit de précipitations, avec des valeurs de -1, -1,5, -2, etc., correspondant à des conditions de plus en plus sèches (jusqu'à la sécheresse extrême) ;
- Un **SPI positif** indique un excès de précipitations, avec des valeurs de +1, +1,5, +2, etc., indiquant des conditions de plus en plus humides (jusqu'à des pluies exceptionnellement abondantes).

Précipitations annuelles standardisées entre 1990 et 2022

Poste de LES AIX-D'ANG. / Station N° 18003003

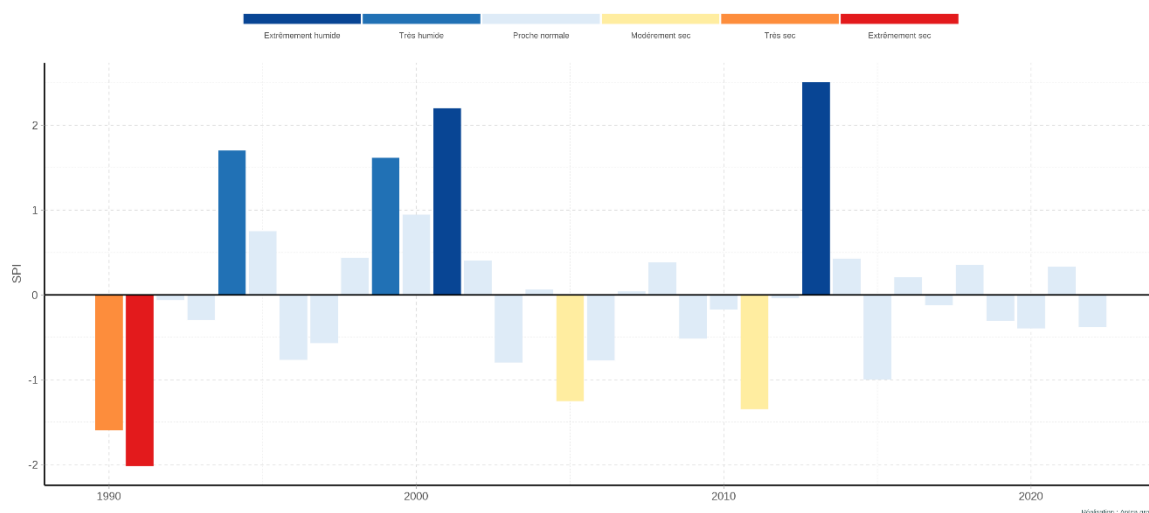


Figure 15 : Indice des Pluies Standardisées sur la période 1990 – 2022

➤ Calcul des tendances d'évolutions :

Les tendances d'évolutions sont calculées à partir du test statistique de **Mann-Kendall** qui est la méthode couramment utilisée pour détecter des tendances dans une série temporelle. Cette méthode présente de nombreux avantages :

- Statistique non paramétrique (applicable quelle que soit la distribution des données) ;
- Peu de données en entrée (10 analyses minimum) ;
- Détection tout type de tendance (croissante, décroissante linéaire ou non).

La principale restriction de cette méthode réside dans le fait que les données doivent être considérées comme **indépendantes** (sans autocorrélation). Lorsque les données sont autocorrélées, le test de Mann-Kendall modifié doit être appliqué.

La tendance est déterminée à partir de la **penne de Sen** (penne de droite de régression) qui est la médiane de toutes les pennes calculées entre chaque paire de point. Cette penne, positive ou négative, représente la tendance d'évolution de la variable testée (température, précipitation, débits, ...).

La tendance détectée est dite **significative** lorsque que la p-value du test est inférieure au seuil de significativité fixé qui est généralement de 5 % (p-value = 0,05). Ce seuil indique la probabilité que les résultats soient dus au hasard).

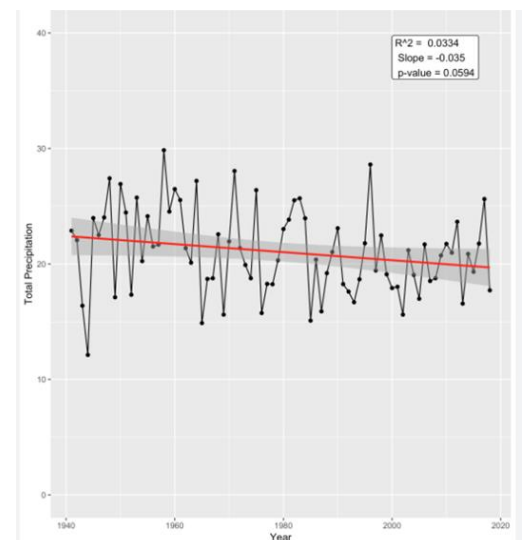


Figure 16 : Illustration de la penne de Sen (rouge)



La tendance calculée par le biais de ce test peut s'exprimer dans l'unité du paramètre analysé (m³/s, mm, °C, ...) par unité de temps (an, décennie, ...) mais également en relatif (%).

Dans la suite du document, les tendances seront représentées avec des graphiques d'évolution et sur des cartes, afin de comparer l'évolution (relative) des principaux paramètres analysés. Les tendances seront systématiquement représentées comme suit :

- ▼ Tendence à la baisse significative
- Tendence à la baisse non significative
- ▲ Tendence à la hausse significative
- Tendence à la hausse non significative
- Pas de tendances

On distingue :

- Les tendances **statistiquement significatives** ($p\text{-value} < 0,05$) : hausse ou baisse ;
- Les tendances **non significatives** ($p\text{-value} > 0,05$) ;
- **L'absence de tendance** d'évolution : $penne\ de\ Sen = 0$.

➤ **Le test de corrélation de Spearman :**

Le test de corrélation de Spearman est un test statistique non paramétrique (les données ne suivent pas une distribution normale), qui évalue la force et la direction de la relation monotone entre deux variables continues ou ordinales.

Ce test permet de **déterminer si les valeurs d'un paramètre tendent à augmenter ou diminuer lorsque les valeurs d'un autre paramètre augmentent, ou diminuent** ; ou si les variations de valeurs entre les deux paramètres sont totalement indépendantes.

Il ne fournit pas pour autant d'information sur les relations de cause à effet : parfois, les deux paramètres peuvent être corrélés parce qu'ils subissent l'effet des variations d'un facteur commun.

Les résultats de ce test peuvent être représentés par le biais d'une matrice de corrélation :

- Une corrélation peut être **positive**, ce qui signifie que lorsqu'une des variables augmente, l'autre augmente aussi (exemple : plus les précipitations sont importantes et plus les pluies efficaces le sont également).
- Lorsque la corrélation est **négative**, l'augmentation de la valeur d'un des paramètres est corrélée à la diminution de la valeur d'un autre

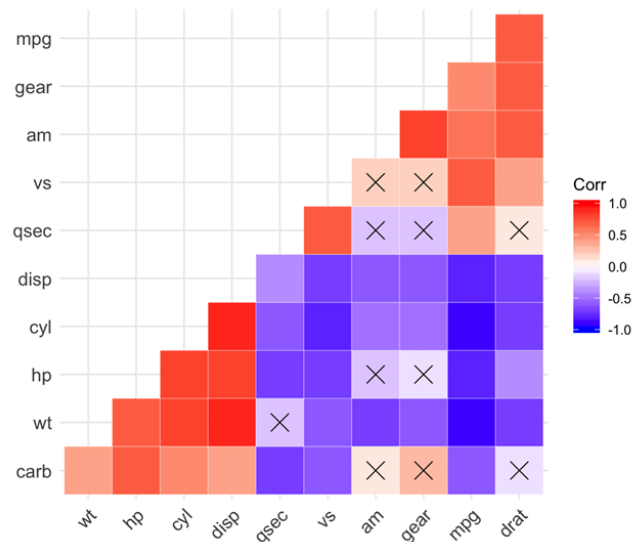


Figure 17 : Exemple de matrice de corrélation

III. Analyse prospective du climat et des impacts sur les ressources

3.1 Objectifs et prérequis de l'analyse prospective

L'objectif de l'analyse prospective du climat est de rendre compte de manière pédagogique des changements climatiques et de leurs impacts sur les ressources en eau attendus sur le territoire, à partir des dernières projections climatiques disponibles (EXPLORE2), et en rendant compte de l'incertitude des résultats par :

- La prise en compte de **plusieurs scénarios d'émission** de gaz à effet de serre, appelés RCP (« *Representative Concentration Pathways* ») ;
- La prise en compte de **plusieurs couples de modèles climatiques**, qui associent des modèles globaux (GCM) et régionaux (RCM) ;
- L'analyse de l'évolution des paramètres à **différents horizons temporels**.

L'ensemble des données analysées proviennent des portails du **DRIAS**. Les données les plus récentes correspondant à l'**ensemble EXPLORE2** ont été analysées.

➤ Scénario d'émissions de gaz à effet de serre

Le 6^{ème} rapport du GIEC, publié en 2021, montre que le scénario d'évolution de gaz à effet de serre dans le plus probable correspond au **RCP 8.5**. Ce scénario fera l'objet d'un focus particulier. A titre informatif, les évolutions associées au **RCP 4.5** seront également analysées pour la partie climat.

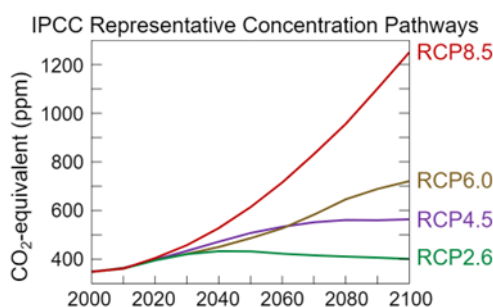


Figure 18 : Courbes d'évolution des RCP (Sources : GIEC)

Les conséquences de deux scénarios d'évolution de gaz à effet de serre seront analysées :

- Le **RCP 4.5** qui peut être aujourd'hui considéré comme « optimiste » ;
- Le **RCP 8.5**, auparavant considéré comme pessimiste (5^{ème} rapport), mais désormais jugé comme étant le plus probable.

➤ **Horizons temporels analysés**

Selon le DRIAS, **3 horizons temporels** doivent être distingués pour analyser les évolutions du changement climatique :

- La période historique : **1975 – 2005** ;
- L'horizon moyen terme : **2040 – 2070** ;
- L'horizon fin de siècle : **2070 – 2100**

L'évolution des paramètres climatiques et hydrologiques sera analysée pour les deux horizons futurs.

➤ **Notion de narratif climatique**

Dans le cadre des études de l'impact du changement climatique, l'identification de projections climatiques (couples GCM / RCM) adaptés aux objectifs de chaque étude constitue un point méthodologique crucial.

Pour ce type d'étude, et notamment pour celles qui nécessitent la mise en œuvre d'un modèle d'impact (ex : hydrologique), la volumétrie des données mises à disposition peut constituer un frein, puisque leur exploitation nécessite de disposer d'importantes ressources de calcul. Aussi, il est souvent préférable d'identifier judicieusement quelques couples de modèles ou « **narratifs** » qui permettront de remplir les objectifs de l'étude et d'identifier des mesures d'adaptation.

La méthode d'analyse et de sélection repose sur deux étapes consécutives et se base sur les éléments de cadrage proposés par Météo-France, et disponibles sur le site du DRIAS Climat :

1) L'analyse des projections climatiques

Dans un premier temps, une analyse des éléments pour la sélection des couples de modèles climatiques (GCM / RCM) mis à disposition sur le portail du DRIAS climat à la suite de l'intégration des résultats du projet EXPLORE 2.

Sur le périmètre du bassin Cher, l'ensemble des projections climatiques ont été analysées afin de caractériser la dispersion des différents couples de modèles. Plusieurs couples de modèles seront retenus (« *shortlist* ») sur la base de deux critères principaux :

- La cohérence des résultats avec les projections du 6^{ème} rapport du GIEC ;
- La prise en compte de **trajectoires climatiques contrastées** afin d'envisager différents futurs possibles sur le bassin.

2) L'analyse des projections hydro-climatiques

Dans un second temps et sur la base des couples de modèles climatiques retenus, une analyse similaire sera réalisée pour les projections hydro-climatiques, afin d'identifier une **sélection de modèles hydrologiques** cohérents sur le bassin.

3.2. Les données EXPLORE 2

Le projet EXPLORE2 a pour objectif **d’actualiser les connaissances sur l’impact du changement climatique** en France métropolitaine, pour l’ensemble du 21^{ème} siècle (1976 -2100). Il fait suite au projet EXPLORE 2070 (2012), qui avait permis d’obtenir des premiers résultats sur l’évolution des régimes hydrologiques sous forçage climatique à l’échelle métropolitaine et, plus récemment, aux jeux de données « DRIAS-2020 » mis à disposition lors de la publication du portail du DRIAS Climat.

3.2.1. Projections climatiques

L’actualisation de ces connaissances repose sur un nouvel ensemble de données intégrant :

- Des nouveaux couples de modèles (7), qui prennent en compte de manière plus précise les forçages aérosols évolutifs. La prise en compte de ce forçage permet de mieux simuler l’évolution future du rayonnement ;
- Des jeux de données affichant des changements de températures et de précipitation sur le territoire métropolitain, cohérents avec la distribution proposée par l’ensemble CMIP6 tant à l’échelle annuelle que saisonnière. Pour rappel, l’ensemble CMIP6 a été analysé dans 6^{ème} rapport du GIEC (2022) tandis que les projections climatiques EXPLORE2 correspondent à l’ensemble CMIP5.

Finalement, le projet EXPLORE2 proposent des projections pour **17 couples de modèles climatiques**. Les 7 nouvelles projections apparaissent surlignées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4 : Pré-sélection des simulations climatiques EXPLORE2 étendant l’ensemble DRAIS 2020
(Source : DRIS Climat – METEO France)

GCM	RCM	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CNRM-ALADIN63	Oui	Oui	Oui
	KNMI-RACMO22E	Oui	Oui	Oui
	<i>MOHC-HadREM3-GA7-05</i>	Non	Non	Oui
ICHEC-EC-EARTH	KNMI-RACMO22E	Oui	Oui	Oui
	SMHI-RCA4	Oui	Oui	Oui
	<i>MOHC-HadREM3-GA7-05</i>	Oui	Non	Oui
IPSL-IPSL-CM5A-MR	IPSL-WRF381P	Non	Oui	Oui
	SMHI-RCA4	Non	Oui	Oui
	<i>DMI-HIRHAM5</i>	Non	Non	Oui
MOHC-HadGEM2-ES	CLMcom-CCLM4-8-17	Non	Oui	Oui
	<i>CNRM-ALADIN63</i>	Non	Non	Oui
	ICTP-RegCM4-6	Oui	Non	Oui
	<i>MOHC-HadREM3-GA7-05</i>	Oui	Non	Oui
MPI-M-MPI-ESM-LR	CLMcom-CCLM4-8-17	Oui	Oui	Oui
	<i>ICTP-RegCM4-6</i>	Oui	Non	Oui
	MPI-CSC-REMO2009	Oui	Oui	Oui
NCC-NorESM1-M	DMI-HIRHAM5	Non	Oui	Oui
	GERICS-REMO2015	Oui	Oui	Oui
	<i>IPSL-WRF381P</i>	Non	Non	Oui

Ainsi, la sélection EXPLORE2 est basée sur **6 modèles globaux** issus de l'ensemble CMIP5 et **9 modèles régionaux** RCMs (les 8 mêmes que DRIAS-2020 et le nouveau HadREM3-GA7-05), soit **17 couples GCM/RCM** distincts (Tableau 1).

Ces nouvelles simulations basées sur ces 17 couples ne sont pas toutes disponibles pour les 3 scénarios RCP. En effet, certains couples de modèles non cohérents avec les intervalles de confiance de l'ensemble CMIP6 ont été retirés (IPSL/WFR, CNRM/RACMO⁴)

Les simulations sélectionnées pour EXPLORE2 comptent donc **36 projections du climat futur** (17 RCP8.5, 9 RCP4.5 et 10 RCP2.6) s'appuyant sur 17 simulations historiques.

Ces simulations ont été projetées sur une grille de 8 km de résolution, et corrigées de leur biais à partir de l'analyse de données d'observations SAFRAN (version 2016) en utilisant les méthodes ADAMONT et CDF-t, menant au nombre total de simulations corrigées du jeu EXPLORE2 à 72 projections futures et 34 historiques.

3.2.2. Projections hydrologiques

Dans le cadre du projet EXPLORE2, plusieurs modèles hydrologiques et hydrogéologiques ont été appliqués en temps présent et alimentés par es projections climatiques pour caractériser les futures des ressources en eau. L'objectif principal du volet ressource en eau du projet est de fournir une « hydrologie de référence » qui permettra de bâtir des exercices prospectifs en augmentant considérablement la densité des points de simulation par rapports aux projets précédents (EXPLORE 2070, DRIAS2020).

D'un point de vue méthodologique, le volet portant sur les simulations hydrologiques et hydrogéologiques du projet EXPLORE2 peut être résumé en 3 grandes phases :

➤ Choix des sites de référence

Les sites de référence doivent représenter la diversité des contextes hydro-climatiques en métropole et doivent donc être répartis sur l'ensemble du territoire (pour l'hydrologie de surface) ou du domaine modélisé (pour l'hydrologie souterraine). Les mesures de débits / niveaux doivent être faiblement altérées par les activités anthropiques. En outre, ils doivent disposer d'une plage temporelle de plusieurs dizaines d'années et les données en ces points doivent être d'une qualité métrologique suffisante.

Pour l'hydrologie de surface, **611 points de références** (station hydrométrique : Hydroportail⁵) à la suite d'une analyse des différents critères cités plus haut.

Pour l'hydrologie souterraine, **227 piézomètres de références** ont été sélectionnés au sein du domaine modélisé à partir de la base ADES⁶.

⁴ Hors des intervalles de confiance en été fin de siècle (Horizon 2070 – 2100) pour le RCP 8.5.

⁵ <https://hydro.eaufrance.fr/>

⁶ <https://ades.eaufrance.fr/>

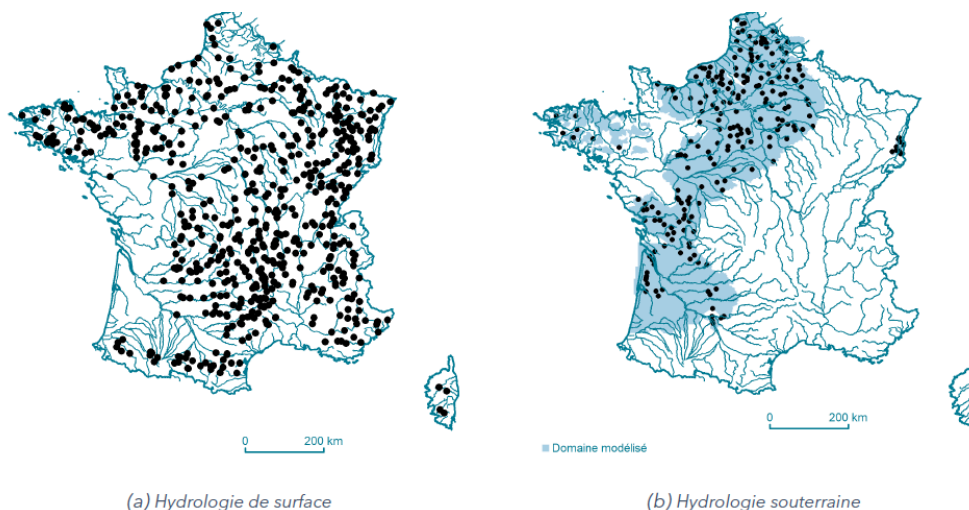


Figure 19 : Réseau de référence pour le diagnostic des modèles (Sources : SAUQUET et al. (2022))

Ces sites de référence sont mobilisés pour la phase de calage et de diagnostic des différents modèles utilisés dans le cadre du projet EXPLORE2.

➤ **Sélection de sites de restitution pour l'hydrologie de surface et souterraine**

Pour l'**hydrologie de surface**, les sites de restitution sont les sites au droit desquels sont réalisées les simulations hydrologiques. La sélection de ces sites est basée sur plusieurs réseaux nationaux thématiques opérationnels :

- Le réseau de suivi hydrométrique (Hydro portail) ainsi que la base administrée par le SCHAPI qui compte près de 5000 sites dont 3200 en activité ;
- Des sites du réseau ONDE dédié au suivi des écoulements en période d'étiage qui compte environ **3000 points d'observation** sur le territoire ;
- Les points nodaux des Schéma Directeurs d'Aménagements et de Gestion des Eaux (SDAGE). Il en existe **403** en France métropolitaine.
- Le Réseau de Contrôle de Surveillance (RCS) des eaux douces de surface : il est constitué de **1568** sites de mesures pérennes répartis sur l'ensemble du territoire, représentatifs du fonctionnement des masses d'eau ;

A ces réseaux opérationnels, s'ajoute l'ensemble de **1522 points de simulation** du projet Explore2070, sélectionné pour assurer une continuité entre les deux projets.

Parmi l'ensemble de points de potentiels (> 7000), un travail de sélection mêlant plusieurs critères (taille du bassin drainé, distance et indépendance entre les points des différentes sources, ...) a été entrepris pour retenir **4369 points de simulation** sur le territoire national répartis comme présenté dans la figure ci-dessous.

Source de données	Nombre de points des réseaux	Nombre de points drainant plus de 64 km ²	Nombre de points retenus
HYDRO	5045	3381	2889
EDF	36	36	
RCS	1568	1229	652
Explore2070	1522	1426	304
<i>dont estuaires</i>	231	202	175
ONDE	3302	611	511
Points nodaux	403	388	13
TOTAL	11876	7071	4369

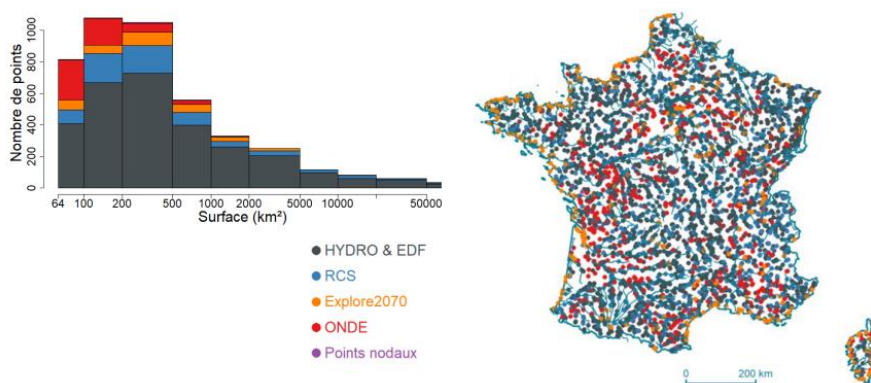


Figure 20 : Descriptif et contribution des réseaux identifiés à l'ensemble des points de simulations retenus dans Explore2 (Source :Sauquet et al., 2022)

Pour l'**hydrologie souterraine**, les points de supports sélectionnés se distinguent en deux catégories :

- Les points de supports pour la **modélisation de la recharge potentielle** (part des précipitations efficaces s'infiltrant pour recharger les aquifères) correspondent à des entités hydrogéologiques homogènes. Compte tenu de la taille parfois très inférieure à l'échelle unitaire des forçage climatique (maille SARAN de 64 km²), **l'échelle retenue est la Masse d'Eau Souterraine (MESO)** qui est notamment l'échelle de référence pour l'évaluation des états qualitatifs et quantitatifs souterrains dans le cadre de la DCE.
- Les points de supports correspondant au **domaine modélisé**, c'est-à-dire aux aquifères sur lesquels des modèles hydrogéologiques ont été développés. Au sein du domaine modélisé, on distingue 3 sources de données à l'échelle métropolitaine :

1) Les **modèles spatialisés intégrés** dans la plateforme **AquiFR** qui fournissent des chroniques piézométriques journalières sur un ensemble de piézomètres et des données maillées au pas de temps mensuel sur l'ensemble des grilles des modèles. La figure ci-contre montre les domaines spatiaux modélisés et le tableau ci-dessous présente les principales caractéristiques des modèles intégrés dans la plateforme.

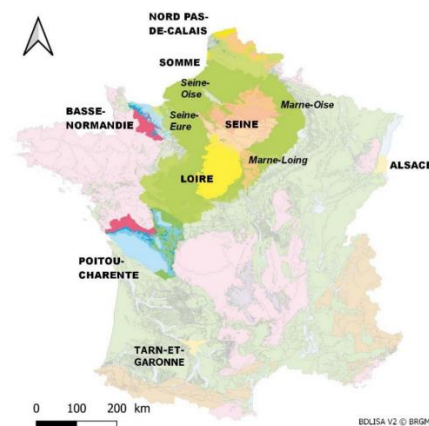


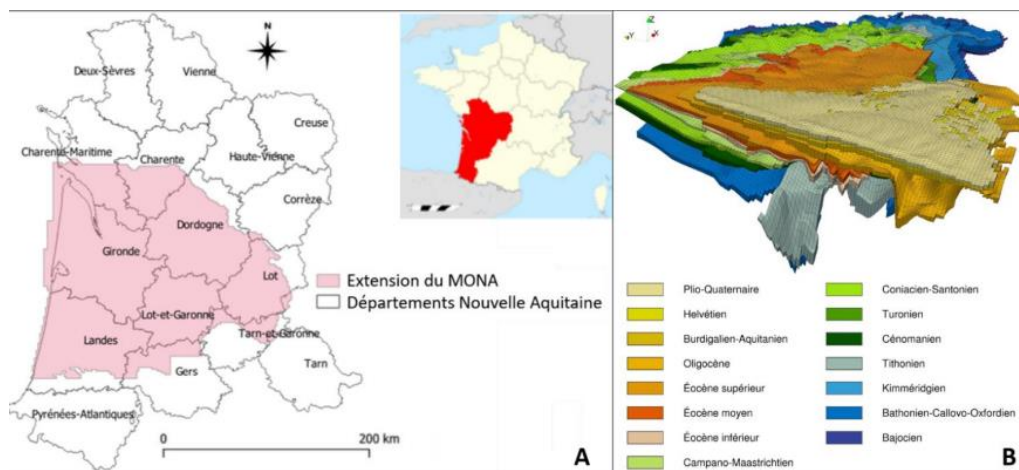
Figure 21 : Domaines spatiaux couverts par des modèles hydrogéologiques de la plateforme AquiFR.

Tableau 5 : Descriptif des modèles hydrogéologiques spatialisés présents dans la plateforme AquiFR

Code de calcul	Modèle	Nombre de couches	Nombre de mailles	Résolution spatiale du maillage	Référence de la version du modèle disponible dans AquiFR
Marthe	Somme	1	66 924	100 m/500 m	Amraoui et al. (2014)
	Nord Pas-de-Calais	10	226 077	500 m	Amraoui et al. (2017)
	Basse-Normandie	10	93 800	100 m/250 m	Croiset et al. (2013)
	Poitou-Charentes	8	90 084	1 km	Douez et al. (2011)
	Alsace	3	40 947	125 m	Noyer and Elsass (2006)
	Tarn-et-Garonne	2	36 442	250 m	Bardeau et al. (2016)
EauDyssée	Marne-Loing	4	66 235	250 m/500 m/1 km	Viennot and Abasq (2013)
	Marne-Oise	2	45 904	250 m/500 m/1 km	Viennot and Abasq (2013)
	Seine-Eure	1	57 306	250 m/500 m/1 km	Viennot and Abasq (2013)
	Seine-Oise	4	87 178	250 m/500 m/1 km	Viennot and Abasq (2013)
	Seine	6	41 609	1 km/2 km/ 4 km	Viennot (2009)
	Loire	3	37 620	1 km/2 km	Monteil et al. (2011)

AquiFR fournit des charges piézométriques mensuelles moyennes simulées en chaque point de grille de chaque modèle, et pour une période de simulation donnée. Au total, l'ensemble des modèles comptabilisent **890 126 mailles**.

2) Les points de supports pour le **Modèle Nord-Aquitain (MONA)** qui est un modèle hydrodynamique régional développer pour modéliser des nappes profondes avec les problématiques relatives. Le MONA permet de représenter, à l'aide du code de calcul Marthe (Thiéry, 2014), la partie Nord du Bassin aquitain (46 000 km²) avec une résolution de maille de 2km pour 15 couches aquifères et 14 couches épontes soit 67 mailles de calcul.



Le MONA permet de simuler des charges hydrauliques dans chacune des mailles aquifères au pas de temps annuel. Dans le cadre du projet EXPLORE2, les résultats des simulations sont restitués sur les quatre aquifères principaux mis en évidence dans le tableau ci-dessous :

Tableau 6 : Nombre de mailles et superficie de chaque couche du MONA. En vert les couches pour lesquelles des restitutions EXPLORE2 sont disponibles.

Formation	N° Couche	Nombre de mailles	Superficie (km ²)
Plio – Quaternaire	1	2841	11364
Helvétien	2	2227	8908
Aquitainien-Burdigalien	3	3161	12644
Oligocène	4	4055	16220
Éocène supérieur	5	3899	15596
Éocène moyen	6	4331	17324
Éocène inférieur	7	4326	17304
Campano-Maastrichien	8	4337	17348
Coniacien-Santonien	9	6218	24872
Turonien	11	6667	26668
Cénomaniens	12	5772	23088
Tithonien	13	1838	3752
Kimméridgien	14	3381	13524
Bathonien-Calovo-Oxfordien	15	7856	31424
Bajocien	16	6044	24176

3) Les points de simulations complémentaires sur des piézomètres pour lesquels des projections de niveaux piézométriques ont été réalisées par différents modèles.

C'est notamment le cas des simulations du modèle hydrologique **EROS-Bretagne** (41 piézomètres), des points complémentaires **AquiFR** (724 piézomètres) et du **MONA** (415 piézomètres) pour lesquels des chroniques temporelles historiques et futures seront fournies au pas de temps journaliers (AquiFR et EROS Bretagne) et annuel (MONA).

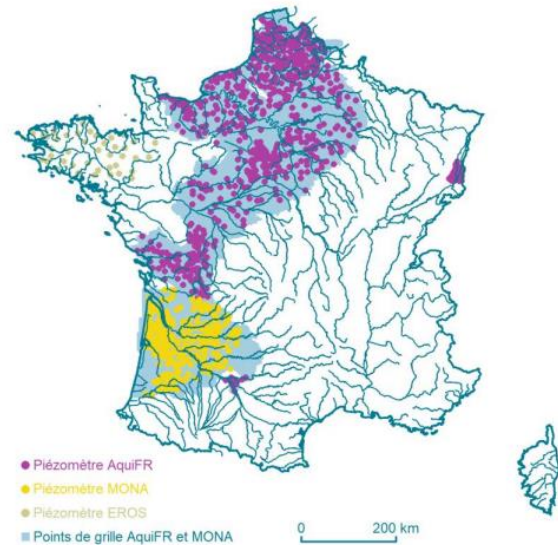


Figure 23 : Points de simulation des niveaux piézométriques par modèle

➤ Les simulations hydrologiques et hydrogéologiques

L'ensemble des modèles hydrologiques et hydrogéologiques ont été forcés par les données de la réanalyse SAFRAN pour produire des simulations en temps présents (nécessaires au diagnostic des modèles).

Pour les simulations futures, chaque modèle est forcé par les couples de modèles climatiques (GCM / RCM) décrits au chapitre 2.1.

Pour l'**hydrologie de surface**, **9 modèles** ont été appliqués pour prédire des débits journaliers futurs. Le nombre de points de références pris en compte par chaque modèle est inférieur à 611 pour trois raisons principales :

- Le domaine d'application ne couvre pas toute la France (EROS, J2000, MORDOR TS)
- Les débits ne sont pas fournis directement par le modèle (SIM2) ;
- Certains points de référence n'ont pas pu être placés sur le réseau hydrographique représenté par chaque modèle.

Tableau 7 : Caractéristiques des modèles d'hydrologie de surface utilisés dans le projet EXPLORE 2 (N : nombre de points simulés parmi les 611 points de référence).

Nom	Organisme	Modélisateurs impliqués	Région(s) simulée(s)	N
CTRIP	Météo-France	S. Munier	France	533
EROS	BRGM	J.-P. Vergnes	Bretagne, Loire	159
GRSD	INRAE	L. Strohmenger, G. Thirel, Ch. Perrin	France	608
J2000	INRAE	J. Bonneau, F. Branger	Loire, Rhône	235
MORDOR-SD	EDF	M. Le Lay	France	610
MORDOR-TS	EDF	C. Monteil, F. Hendrickx	Loire	113
ORCHIDEE	IPSL	P. Huang, L. Rinchiuso, A. Ducharne	France	556
SIM2	Météo-France	F. Rousset	France	203
SMASH	INRAE	F. Colléoni, P. Arnaud	France	603

Pour la simulation des niveaux de nappes, la plateforme AquIFR, le modèle EROS et le MONA ont été mobilisés pour simuler l'hydrologie souterraine sur des domaines disjoints.

Tableau 8 : Caractéristiques des modèles d'hydrologie souterraine utilisés dans le projet EXPLORE 2 (N : nombre de points simulés parmi les 227 points de référence).

Nom	Organisme	Modélisateurs impliqués	Région(s) simulée(s)	N
AquiFR	BRGM, ENS	J.-P. Vergnes, F. Habets	Hauts de France, Normandie, Ile de France, Pays de Loire, Centre Val de Loire, Nouvelle-Aquitaine, Grand Est	197
EROS	BRGM	J.-P. Vergnes	Bretagne	7
MONA	BRGM	R. Aissat	Nouvelle-Aquitaine	23

A l'échelle des masses d'eau souterraines, la recharge des nappes est simulée à partir de l'outil RECHARGE (BRGM)

➤ **Diagnostic des modèles hydrologiques**

Le diagnostic réalisé fournit un aperçu des qualités/performances des modèles d'hydrologie de surface et hydrogéologiques avec, pour entrée, la réanalyse SAFRAN.

Ce diagnostic compare les performances des différents modèles mobilisés à partir des simulations réalisées au droit des sites de références. L'objectif de ce diagnostic est de fournir des indications sur la performance de chaque modèle dans contexte donné afin de permettre, sur un territoire, la sélection d'un groupement de modèles cohérents dans le cadre d'un exercice prospectif.

Des fiches de diagnostic sont mises à disposition pour chaque site de référence modélisée (611 fiches pour l'hydrologie de surface) sur le portail du DRIAS eau⁷.

⁷ <https://www.drias-eau.fr/accompagnement/sections/400>

3.3. Sélection des projections climatiques

3.3.1. *Eléments de méthode*

L'analyse de la variabilité des couples de modèles climatiques EXPLORE2 est réalisée à travers la réalisation de graphique de dispersion des réponses au changement climatique de l'ensemble des modèles, à la fois sur les températures et les précipitations avec les spécificités suivantes :

- ΔT : écart de la température moyenne (sur 30 ans) par rapport à la période de référence et exprimé en °C ;
- ΔP : écart relatif des cumuls précipités (sur 30 ans) par rapport à la période de référence et exprimé en %.

Cette méthode d'analyse est appliquée par METEO France et décrite sur le portail du DRIAS Climat⁸.

Pour ces deux paramètres, les évolutions (ΔT et ΔP) sont calculées au **pas de temps annuel** entre la période de référence (1976 – 2005) et l'**horizon fin de siècle (2071 -2100)** pour le scénario à fortes émissions de gaz à effet de serre (RCP 8.5).

Le choix du pas de temps, de l'horizon fin de siècle et du RCP 8.5 ont été fixés pour les raisons suivantes :

- Le signal sur l'évolution des pluies est plus marqué en fin de siècle,
- Le scénario 8.5 (scénario à fortes émissions) est le scénario aujourd'hui privilégié dans le cadre des exercices prospectifs car le plus probable compte tenu du niveau des émissions actuelles.



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 actuellement). 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 climatiques utilisées en forçage des modèles d'impacts (modèle hydrologique), le RCP 8.5 est considéré uniquement.

3.3.2. *Résultats à l'échelle métropolitaine*

A l'échelle métropolitaine, les résultats de l'analyse réalisée par METEO France sont représentés sur la figure ci-dessous qui affiche la dispersion des simulations individuelles de l'ensemble EXPLORE2 selon les évolutions prévues de précipitations (abscisses) et de températures (ordonnées) au pas de temps annuel pour l'horizon fin de siècle selon le scénario RCP8.5. Le symbole utilisé est représentatif du modèle climatique global (GCM) utilisé comme forçage et la couleur est fonction du modèle climatique régional (RCM) mis en œuvre. Les 5e et 95e centiles de l'ensemble EXPLORE2, ainsi que la médiane sont représentés par des lignes en pointillé. Les mêmes repères pour l'ensemble CMIP6 sont représentés par des lignes continues.

⁸ <https://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/425>

Diagramme $\Delta T / \Delta P$:

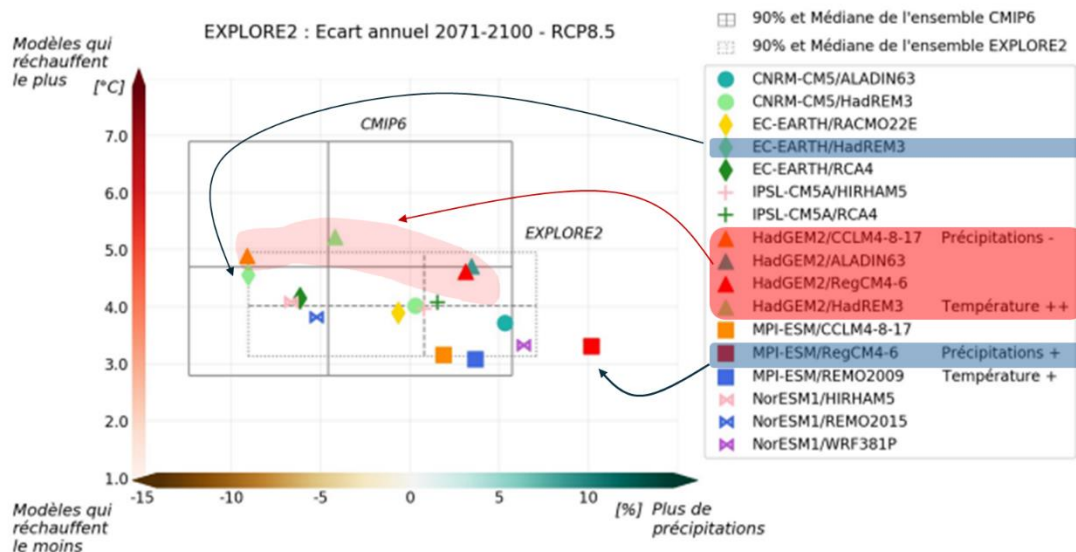


Figure 24 : Diagramme de dispersion des couples de modèles climatiques EXPLORE2 sur le territoire métropolitain, analyse annuelle à l'horizon lointain pour le RCP 8.5 (Source : METEO France)

De manière générale, les simulations de l'ensemble EXPLORE2 couvrent assez bien l'ensemble des possibles modélisés par CMIP6 pour les évolutions de précipitations, mais cela reste un ensemble globalement 'froid' par rapport à CMIP6, puisqu'il ne couvre que la partie basse des augmentations de températures.

Les extrêmes de l'ensemble EXPLORE2 en fin de siècle selon le RCP8.5 sont :

- Pour l'évolutions des températures, les simulations du couple GCM **HadGEM2** sont celles qui prévoient le climat le plus chaud, avec + 5,2 °C par rapport à la référence 1976-2005. À l'opposé, les modèles régionaux forcés par le GCM MPI-ESM sont ceux qui modélisent le climat le moins chaud dans cet ensemble, avec + 3,1 °C.
- Pour les précipitations, les modèles régionaux jouent un rôle plus déterminant. La plus importante augmentation des précipitations est modélisée le couple **MPI-ESM/RegCM4-6**, jusqu'à + 10,2 % en moyenne annuelle de la fin de siècle. Et l'assèchement la plus important de - 9,1 % est modélisée par les couples **EC-EARTH/HadREM3** et **HadGEM/CCLM4-8-17**.

3.3.3. Résultats sur le bassin du Cher

Sur le bassin du Cher, une analyse similaire a été réalisée à partir de l'ensemble des projections disponibles pour les **276 mailles SAFRAN** intersectant le périmètre du bassin et disposant de chroniques journalières sur le période 1975 – 2100.

Dispersion des simulations climatiques sur le territoire du **Bassin du Cher**

EXPLORE 2 : Écart annuel sur l'horizon 2071-2100 | RCP 8.5

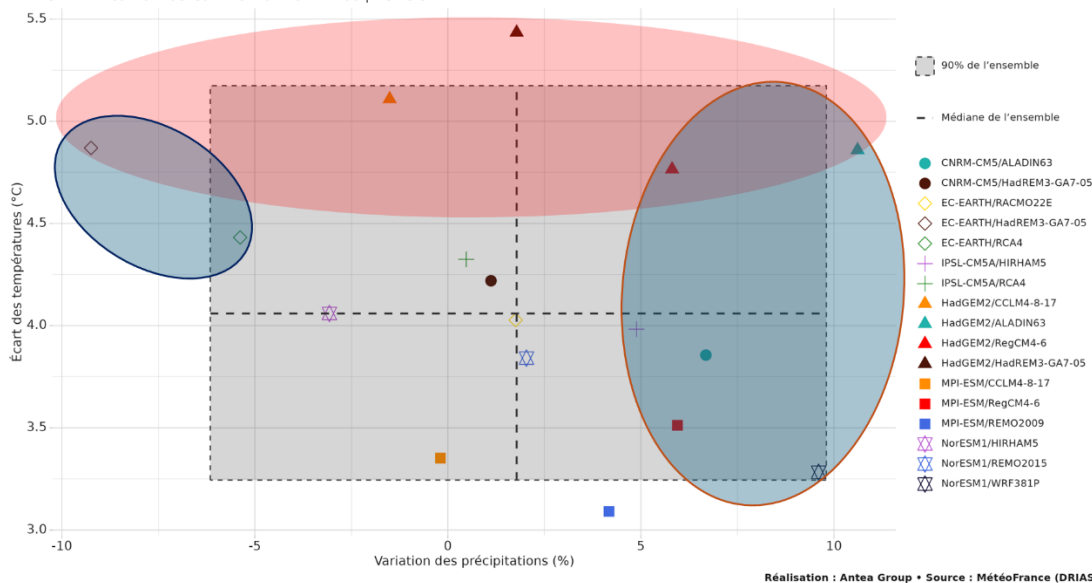


Figure 25 : Diagramme de dispersion des couples de modèles climatiques EXPLORE2 sur le bassin du Cher, analyse annuelle à l'horizon lointain pour le RCP 8.5 (Source : AnteaGroup)

Le graphique de dispersion des projections climatiques sur le bassin du Cher montre une cohérence avec les résultats de l'analyse métropolitaine détaillés plus haut avec notamment :

Pour l'évolution des **températures**, la gamme de variabilité des modèles s'étend de + 3.3 °C à + 5.4 °C en température moyenne annuelle avec un écart médian entre les deux horizons de + 4°C. Les couples associés au modèle global **HadGEM2** identifiés comme étant les plus réchauffant (> + 4,5 °C) avec une projection extrême correspondant au couple **HadGEM2/HadREM3-GA7-05** (+ 5.5 °C). A l'inverse les couples les plus froids (inférieurs à la médiane de l'ensemble EXPLORE2) correspondent aux couples associés aux modèles globaux **MPI-ESM** et **NorESM1** avec un scénario « extrême peu réchauffant » correspond au couple **MPI-ESM/REMO2009** (+ 3°C soit 1 °C de moins que la médiane multi-modèles de l'ensemble EXPLORE2).

Concernant l'évolution des **précipitations**, l'évolutions des cumuls peut varier entre -10 % et + 10% selon les couples de modèles de l'ensemble EXPLORE2 avec un écart relatif médian entre la période historique et l'horizon fin de siècle de + 1,8 %. Comme observé à l'échelle métropolitaine, la variabilité des projections de pluies semble portée par les modèles régionaux. On observe néanmoins que les deux couples les plus secs correspondent au modèle global **EC-EARTH** : **EC-EARTH/HadREM3-GA7-05** (-9,2 %) et **EC-EARTH/RCA4** (-5,4 %). A l'inverse, les projections les plus humides en fin de siècle sont principalement associées à 5 modèles globaux et 4 modèles régionaux. Parmi ces projections humides on distinguera :

- Les couples « très chauds » et humides principalement associé au modèle global HadGEM2 : **HadGEM2 /ALADIN63** et **HadGEM2 /RegCM4-6**
- Les couples « chauds » et humides : **IPSL-CM5A/HIRHAM5** et **CNRM-CM5 /ALADIN63**
- Les couples « froids » et humides : **MPI-ESM/ RegCM4** et **NorESM1/WRF381P**.

De manière générale, la dispersion des projections climatiques des températures et cumuls annuels sur le bassin du Cher est cohérente avec les observations concernant le territoire métropolitain pour l'horizon fin de siècle sous RCP 8.5.

3.3.4. Identification d'une shortlist de modèles « Bassin du Cher »

Sur la base de l'analyse de la variabilité des couples de modèles de l'ensemble EXPLORE2 sur le bassin du Cher et en prenant en compte la nécessité de cohérence entre cet ensemble et l'ensemble CMIP6, la *shortlist* de modèles pré-identifiée sur le bassin du Cher associe les projections suivantes :

Tableau 9 : Shortlist des couples de modèles sur le bassin du Cher

Couple	ΔT (°C)	ΔP (%)	Description	CONCERT'EAU
EC-EARTH/HadREM3-GA7-05	+ 4,8	- 9,3	Evolution marquée de la température moyenne annuelle et diminution forte des précipitations : Scénario très chaud et extrêmement sec	✓
CNRM-CM5/ALADIN63	+ 3.85	+ 6,7	Evolution des précipitations inférieure à la médiane de l'ensemble et augmentation très marquée des pluies : Scénario très humide.	✓
HadGEM2/CCLM4-8-17	+5.1	-1,5	Evolution marquée des températures et des cumuls moyens annuels : Scénario très chaud et humide	✓
HadGEM2/ALADIN63	+4.8	+10,6	Evolution très marquée de la température et augmentation extrême des cumuls de pluies : Scénario très chaud et très humide	✓

La *shortlist* proposée est composée de **4 couples de modèles climatiques**. Par rapport à la dispersion de l'ensemble des modèles EXPLORE2, les couples retenus sont des modèles réchauffant (écarts supérieurs à la médiane qui est de + 4°C) afin d'assurer une cohérence minimale avec les projections de l'ensemble CMIP6 qui ne sont pas encore mises à disposition.

3.4. Sélection des projections hydrologiques

3.4.1. Données disponibles sur le bassin

Sur le bassin du Cher, **9 sites de références**, correspondant aux critères préétablis dans le cadre de la méthodologie EXPLORE2 sont identifiés. Concernant les simulations, on recense **90 points de restitutions** localisés sur l'ensemble du territoire. Le nombre de modèles hydrologiques mis en œuvre peut être variable pour chaque point.

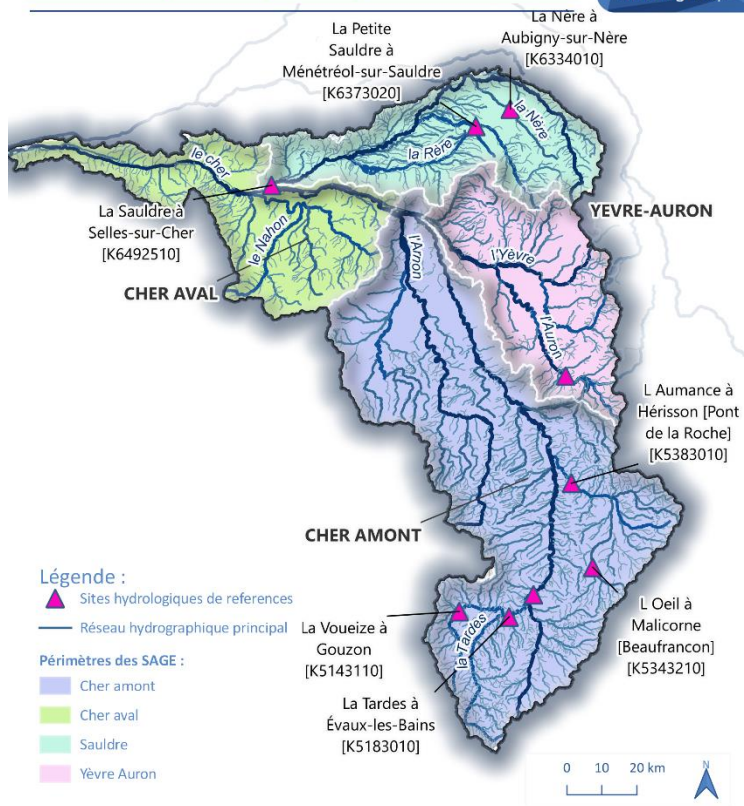
Une sélection des points de simulations sera réalisée pour l'analyse prospective des débits. Cette sélection se base principalement sur la localisation des stations hydrométriques sélectionnées pour l'analyse rétrospective afin d'assurer une cohérence dans l'information analysée en période passée et future. Sur le bassin, **27 points de simulation** ont été présélectionnés.

Tableau 10 : Nombre de simulations disponibles pour les 32 points de restitution EXPLORE2 sélectionnés sur le bassin du Cher

Points de simulation retenus	32
CTRIP	30
EROS	25
GRSD	30
J2000	30
MORDOR_TS	32
MORDOR_SD	16
SIM2	16
SMASH	32
ORCHIDEE	31

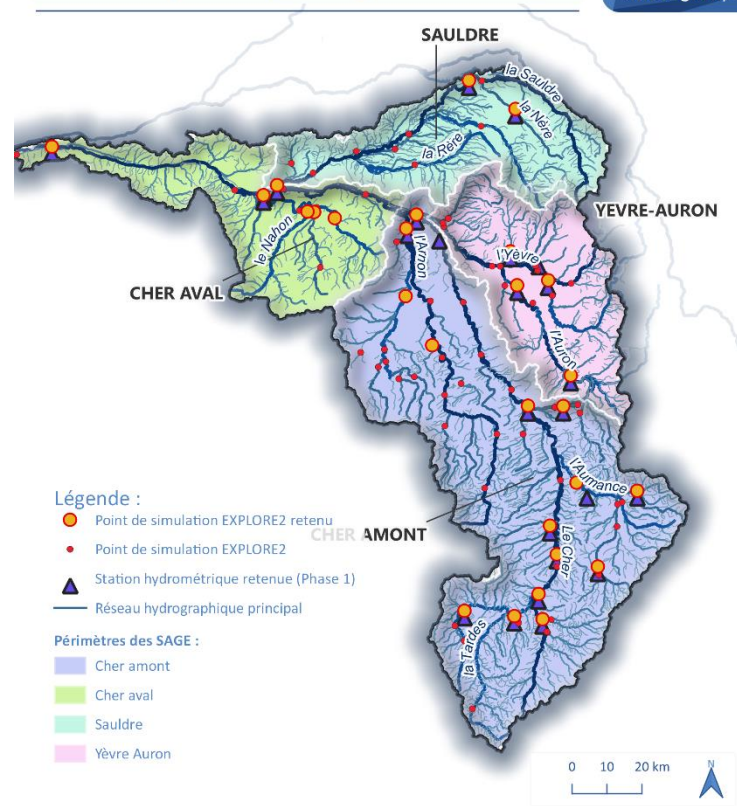
La figure ci-dessous présente la localisation des sites de référence (gauche) et la localisation des points de simulation retenus, en cohérence avec la localisation des stations hydrométriques analysées en Phase 1.

Localisation des sites de références
EXPLORE2 pour l'hydrologie de surface



Sources :METEO FRANCE, BD CARTHAGE

Localisation des sites de simulation
EXPLORE2 pour l'hydrologie de surface



Sources :METEO FRANCE, BD CARTHAGE

Figure 26 : Localisation des sites de références EXPLORE2 pour l'hydrologie de surface sur le bassin du Cher.

3.4.2. Diagnostic et sélection des modèles hydrologiques

La sélection des modèles hydrologiques se base sur les **fiches diagnostic** réalisés dans le cadre du projet EXPLORE2 et accessible via une plateforme dédiée⁹.

Le diagnostic des différents modèles hydrologiques mis en œuvre dans le cadre du projet EXPLORE2 se base sur une comparaison des chroniques observées au droit des sites hydrologiques de références (chapitre 2.2.1) et des chroniques simulées sur la période historique par chaque modèle hydrologique. Une analyse multicritère est réalisée décrivant les performances de chaque modèle pour reconstituer fidèlement les différentes phases du régime hydrologique (basses eaux, hautes eaux, intensité, dynamique, etc...).

Sur les 6 sites de références pour lesquels des fiches de diagnostic sont disponibles, l'analyse des indicateurs multicritère montre que **4 modèles hydrologiques** semblent pertinents sur le bassin. Il s'agit des modèles suivants :

- MORDOR TS (EDF) ;
- GRSD (INRAE) ;
- EROS (BRGM) ;
- SMASH (INRAE).

De manière générale, Ces quatre modèles présentent sur les sites de références :

- Les meilleurs performance (fonction objectif) avec des KGE supérieurs ou proches de 0,9 et des biais relativement faibles (~1).
- De bonnes performances sur les différentes périodes du régimes hydrologiques (basses eaux, hautes eaux)
- De bonnes performances quant à la réaction des régimes hydrologiques vis-vis des variations de la pluviométrie.

⁹ <https://www.drias-eau.fr/accompagnement/cartePointSimulation/>

Bibliographie

Publications techniques

- Eric Sauquet, Yvan Caballero, Jean-Pierre Vergnes, Ryma Aissat. Points et supports de simulation des projections hydrologiques. INRAE; BRGM. 2022. ffhal-03940238v2
- Les nouvelles projections climatiques de référence : DRIAS 2020 pour la métropole, METEO France (2020)

Sites internet

- Drias climat : <https://www.drias-climat.fr/>
- Drias eau : <https://www.drias-eau.fr/>
- Meteo France : ¹ <https://meteo.data.gouv.fr/>

Annexes

Annexe 1 : Caractéristiques des postes météo France avec des données quotidiennes retenus.

Annexe 2 : Caractéristiques des postes météo France avec des Séries Quotidiennes de Références (SQR)

Annexe 3 : Caractéristiques des postes météo France avec des Longues Séries Homogénéisées (LSH)

Annexe 4 : Caractéristiques des stations hydrométriques retenues pour l'analyse rétrospective

Annexe 5 : Caractéristiques des piézomètres retenus pour l'analyse rétrospective

Annexe 1 : Caractéristiques des postes météo France avec des données quotidiennes retenus.

Nom poste	Numero Poste	TM				TN				TX			
		Période	Années incomplètes	1950 - 2022	1990 -2022	Période	Années incomplètes	1950 - 2022	1990 -2022	Période	Années incomplètes	1950 - 2022	1990 -2022
BOURGES	18033001	1946-2023		oui	oui	1946-2023		oui	oui	1946-2023		oui	oui
CHATEAUMEILLANT	18057003	1971-2023	1984		oui	1971-2023	1984		oui	1971-2023	1984		oui
DUN	18087001	1985-2023			oui	1985-2023			oui	1985-2023			oui
ETRECHY	18090001	1986-2020			oui	1986-2020			oui	1986-2020	1985		oui
AVORD	18092001	1924-2023	1931, 1932, 1940, 1947	oui	oui	1924-2023	1931, 1932, 1940, 1947	oui	oui	1924-2023	1932, 1940, 1947	oui	oui
GRACAY	18103001	1949-2021	1970, 1971, 1972, 1973, 1974, 1975, 1976, 1977, 1978, 1979, 1980, 1981, 1982, 1983, 1984, 1985		oui	1949-2021	1970, 1971, 1972, 1973, 1974, 1975, 1976, 1977, 1978, 1979, 1980, 1981, 1982, 1983, 1984, 1985		oui	1949-2021	1970, 1971, 1972, 1973, 1974, 1975, 1976, 1977, 1978, 1979, 1980, 1981, 1982, 1983, 1984, 1985		oui
HENRICHEMONT	18109002	1987-2023			oui	1987-2023	2024		oui	1987-2023			oui
LIGNIERES	18127001	1986-2021	2014		oui	1986-2021	2014		oui	1986-2021	2014		oui
NANCAY	18159001	1983-2020			oui	1983-2020			oui	1983-2020			oui
OUROUER-LES-B.	18175001	1987-2020			oui	1987-2020			oui	1987-2020			oui
ST-MARTIN-D'A.	18223003	1950-2023	1953, 1954, 1958, 1960, 1961, 1975, 1977, 1982, 1991, 2015		oui	1950-2023	1953, 1954, 1958, 1960, 1961, 1975, 1982, 1991, 2015,		oui	1950-2023	1958, 1960, 1961, 1977, 1982, 1991		oui
VAILLY	18269001	1978-2021	1983		oui	1978-2021	1983		oui	1978-2021	1983		oui
VIERZON - VEVES	18279001	1963-2023	1970, 1971, 2014, 2019		oui	1963-2023	1970, 1971, 2014, 2019		oui	1963-2023	1970, 1971, 2014, 2019		oui
POULAINES	36162001	1988-2021	1987		oui	1988-2021			oui	1988-2021			oui
ROMORANTIN	41097001	1924-2023	1926, 1927, 1930, 1931, 1939, 1940, 1952	oui	oui	1924-2023	1926, 1927, 1930, 1931, 1939, 1940, 1952	oui	oui	1924-2023	1926, 1927, 1930, 1931, 1939, 1940, 1952	oui	oui
THEILLAY	41256002	1979-2020			oui	1979-2020			oui	1979-2020			oui
PIONSAT	63281001	1949-2023	1950, 1956, 1957, 1959, 1960, 2016, 2018	oui	oui	1949-2023	1950, 1957, 1959, 1960, 2016, 2018	oui	oui	1949-2023	1956, 1957, 1959, 1960, 2016, 2018	oui	oui
AUBIGNY-SUR-NERE	18015003	1992-2023			oui				oui	1992-2023			oui
OUROUER	18175003	1992-2023			oui	1992-2023			oui	1992-2023			oui
LYE	36107001	1993-2020			oui	1993-2020			oui	1993-2020			oui
Nombre de postes				4	20			4	19			4	20

Nom poste	Numero Poste	ETP				ETP Grille			
		Période	Années incomplètes	1950 - 2022	1990 - 2022	Période	Années incomplètes	1950 - 2022	1990 - 2022
BOURGES	18033001	1950-2023	1957, 1958, 1970, 1972, 1973, 1982, 2009, 2016, 2017,	oui	oui	2004-2023			
CHATEAUMEILLANT	18057003								
DUN	18087001								
ETRECHY	18090001								
AVORD	18092001	1991-2015	2004			2004-2023	2009		
GRACAY	18103001								
HENRICHEMONT	18109002								
LIGNIERES	18127001								
NANCAY	18159001								
OUROUER-LES-B.	18175001								
ST-MARTIN-D'A.	18223003								
VAILLY	18269001								
VIERZON - VEVES	18279001								
POULAINES	36162001								
ROMORANTIN	41097001	1993-2016	2004, 2005, 2006, 2012, 2014			2004-2023			
THEILLAY	41256002								
PIONSAT	63281001					2019-2023			
AUBIGNY-SUR-NERE	18015003					2004-2023			
OUROUER	18175003					2004-2023			
LYE	36107001					2004-2020			
Nombre de postes				1	1			0	0

Annexe 2 : Caractéristiques des postes météo France avec des Séries Quotidiennes de Références (SQR)

		RR				TN				TX				TM			
Nom poste	Numero Poste	Période	Années incomplètes	1950 - 2022	1990 - 2022	Période	Années incomplètes	1950 - 2022	1990 - 2022	Période	Années incomplètes	1950 - 2022	1990 - 2022	Période	Années incomplètes	1950 - 2022	1990 - 2022
BOURGES	18033001	1947-2022		oui	oui	1953-2022		oui	oui	1953-2022		oui	oui	1953-2022		oui	oui
BRINON	18037001	1953-2022	1976, 1979, 2009, 2019	oui	oui												
CHAPELLE-D'ANG_SAPC	18047001	1978-2022		oui	oui												
CHATEAUMEILLANT	18057003	1951-2022	1957, 1967, 1968, 1969	oui	oui												
DUN	18087001	1947-2022	1962, 1963	oui	oui												
AVORD	18092001	1951-2022		oui	oui	1953-2022		oui	oui	1953-2022		oui	oui	1953-2022		oui	oui
VIERZON - VEVES	18279001	1947-2022	1961, 2014, 2019	oui	oui												
AUZANCES_SAPC	23013001	1950-2022		oui	oui												
CHAMBONCHARD	23046001	1970-2022	1971, 2019	oui	oui												
CROCQ	23069002	1951-2022		oui	oui												
LUCAY-LE-MALE	36103001	1963-2022	1984, 1985, 1992	oui	oui												
ORVILLE	36147001	1947-2022	2019	oui	oui												
PELLEVOISIN	36155001	1975-2022	1990, 2020	oui	oui												
JOUE-LES-TOURS OB	37122001	1948-2022		oui	oui												
Nombre de postes				14	14			2	2			2	2			2	2

Annexe 3 : Caractéristiques des postes météo France avec des Longues Séries Homogénéisées (LSH)

Nom poste	Numero Poste	Période	RR		Période	TN		Période	TX		Période	TM	
			1950 - 2022	1990 - 2022		1950 - 2022	1990 - 2022		1950 - 2022	1990 - 2022		1950 - 2022	1990 - 2022
ISLE-ET-BARDAIS	3130002	1953-2022	oui	oui									
MONTLUCON	3185007	1951-2022	oui	oui									
LES AIX-D'ANG.	18003003	1956-2022	oui	oui									
AUBIGNY-SUR-NERE	18015003	1959-2022	oui	oui									
BOURGES	18033001	1947-2022	oui	oui	1953-2022	oui	oui	1953-2022	oui	oui	1953-2022	oui	oui
BRINAY	18036001	1947-2022	oui	oui									
BRINON	18037001	1947-2022	oui	oui									
CHAPELLE-D'ANG_SAPC	18047001	1950-2022	oui	oui									
CHATEAUMEILLANT	18057003	1949-2022	oui	oui									
DUN	18087001	1947-2022	oui	oui									
EPINEUIL	18089001	1947-2022	oui	oui									
AVORD	18092001	1949-2022	oui	oui	1953-2022	oui	oui	1953-2022	oui	oui	1953-2022	oui	oui
HENRICHEMONT	18109002	1950-2022	oui	oui									
ORVAL RAD	18172003	1950-2022	oui	oui									
OUROUER	18175003	1948-2022	oui	oui									
PREVERANGES	18187004	1947-2022	oui	oui									
ST-FLORENT/CHER	18207003	1947-2022	oui	oui									
ST-MARTIN-D'A.	18223003	1948-2022	oui	oui	1959-2022	oui	oui	1959-2022	oui	oui	1959-2022	oui	oui
ST-PIERRE	18231001	1947-2022	oui	oui									
VIERZON - VEVES	18279001	1947-2022	oui	oui	1959-2022	oui	oui						
AUZANCES_SAPC	23013001	1950-2022	oui	oui									
CHAMBONCHARD	23046001	1950-2022	oui	oui									
CROCQ	23069002	1951-2022	oui	oui									
CHABRIS	36034002	1949-2022	oui	oui									
ISSOUDUN_SAPC	36088005	1947-2022	oui	oui									
LUCAY-LE-MALE	36103001	1947-2022	oui	oui									
ORVILLE	36147001	1947-2022	oui	oui									
ST-CHRISTOPHE	36186001	1947-2022	oui	oui									
FAVEROLLES	41080001	1950-2022	oui	oui									
PIONSAT	63281001	1951-2022	oui	oui									
Nombre de postes			30	30		4	4		3	3		3	3

Annexe 4 : Caractéristiques des stations hydrométriques retenues pour l'analyse rétrospective

SAGE	Code station	Nom station	Periode	Emprise	1990 - 2022	1965 - 2010
Cher amont	K509090001	Le Cher à Chambonchard - La Caborne	2001-2024	24	non	non
	K514311001	La Voueize à Gouzou	1971-2024	54	oui	non
	K518302002	La Tardes à Évaux-les-Bains	1921-2008	88	non	oui
	K520090201	Le Cher à Teillet-Argenty [EDF - QNR]	1948-2020	73	oui	oui
	K522090003	Le Cher à Montluçon	2004-2024	21	non	non
	K523401001	La Magieure à Vaux	1997-2024	28	non	non
	K533311001	Le Bandais à Vieure	1994-2024	31	oui	non
	K534321001	L'Oeil à Malicorne - Beaufranc	1969-2024	56	oui	non
	K538302001	L'Aumance à Hérisson	1994-2024	31	oui	non
	K540092001	Le Cher à Saint-Amand-Montrond	1966-2024	59	oui	oui
	K543302001	La Marmande à Saint-Pierre-les-Étieux - Brébeurre	1992-2024	33	oui	non
	K549090001	Le Cher à Vierzon	1994-2024	31	oui	non
	K549090201	Le Cher à Foëcy	1965-2010	46	non	oui
	K619242001	L'Arnon à Méreau - Alnay	1996-2024	29	oui	non
Cher Aval	K650091001	Le Cher à Châtillon-sur-Cher	1993-2024	32	oui	non
	K659302001	Le Fouzon à Meusnes - Le Gué au Loup *	2003-2024	22	oui	oui
	K671091001	Le Cher à Tours - Pont Saint-Sauveur	2000-2024	25	non	non
Sauldre	K633252001	La Sauldre à Brinon-sur-Sauldre	1989-2024	36	oui	non
	K633401001	La Nère à Aubigny-sur-Nère	1970-2024	55	non	non
	K649251001	La Sauldre à Selles-sur-Cher - Saint-André - Ancienne	1965-2014	50	non	oui
Yèvre - Auron	K555230001	L'Yèvre à Savigny-en-Septaine	1996-2024	29	non	non
	K555458001	L'Ouatier à Moulins-sur-Yèvre - Maubranche	2004-2024	21	non	non
	K557410001	Le Moulon à Bourges - Asnières	1994-2024	31	non	non
	K562301001	L'Auron au Pondy	1989-2024	36	oui	non
	K565301001	L'Auron à Bourges - L'Ormediot	1966-2024	59	oui	oui
					14	7

Annexe 5 : Caractéristiques des piézomètres retenus pour l'analyse rétrospective

SAGE	Code BSS	Commune	Code MESO	Nom MESO	Periode	Emprise	Année début	Année fin	Nombre d'année	
Cher amont	05184X0027/P	Cerbois		Calcaires et marnes du Jurassique supérieur du bassin versant du Cher libres	1995-2024	30	1996	2023	28	
	05186X0002/P	Paudy	GG076		1994-2024	31	1995	2023	28	
	05195X0029/P	Plou	GG076		1993-2024	32	1996	2023	28	
	05458X0002/F2AEP	Chezal-Benoît	GG076		1995-2024	30	1996	2023	28	
	05458X0003/PAEP	Ségry	GG076		1995-2024	30	1996	2023	28	
	05461X0001/PCAEP	Primelles	GG076		1988-2024	37	1996	2023	27	
	05465X0001/PZ	Saint-Baudel	GG067	Calcaires à silex et marnes captifs du Dogger sud bassin parisien	1993-2024	32	1995	2023	28	
	05467X0092/PF	Loup-des-Châ	GG144	Calcaires tertiaires lacustres du Berry	1979-2024	46	1999	2023	25	
	05712X0016/P	Ambrault	GG071	Calcaires et marnes du Dogger du Berry libres	1995-2024	30	1997	2023	27	
05726X0003/F	Le Châtelet	GG130	Calcaires du Lias du bassin parisien captifs	1995-2024	30	1996	2023	26		
Cher aval	04597X0065/PZ	Pontlevoy	GG089	Craie du Séno-Turonien sous Beauce sous Sologne captive	1994-2024	31	1996	2023	28	
	04883X0077/FAEP	Château-sur-Cher	GG142	Sables et grès du Cénomaniens captifs	1993-2024	32	1998	2023	25	
	04883X0081/FAEP	Château-sur-Cher	GG085	Craie du Séno-Turonien du bassin versant du Cher libre	1993-2024	32	1998	2023	26	
	04894X0016/PZ	Seigy	GG142	Sables et grès du Cénomaniens captifs	1992-2024	33	1995	2023	27	
	04905X0053/P	Lye	GG085	Craie du Séno-Turonien du bassin versant du Cher libre	1995-2024	30	1996	2023	28	
	04911X0013/FAEP2	Saint-Loup	GG142	Sables et grès du Cénomaniens captifs	1994-2024	31	1995	2023	27	
	04915X0009/F1AEP1	Genouilly	GG151	Sables verts libres de l'Albien au Néocomien sud Loire	1995-2024	30	1996	2023	28	
	05176X0033/FAEP3	Baudres	GG142	Sables et grès du Cénomaniens captifs	1994-2024	31	1997	2023	27	
	05442X0018/P	Levroux	GG076	Calcaires et marnes du Jurassique supérieur du bassin versant du Cher libres	1995-2024	30	1996	2023	28	
Sauldre	04316X0061/F	Clémont	GG089	Craie du Séno-Turonien sous Beauce sous Sologne captive	1995-2024	30	1996	2023	26	
	04606X0021/FAEP2	Château-de-Sologny	GG089		1994-2024	31	1995	2023	26	
	04623X0053/F	Château-sur-Nè	GG084		Craie du Séno-Turonien du Sancerrois libre	1993-2024	32	1995	2023	26
	04625X0073/F	Nançay	GG142	Sables et grès du Cénomaniens captifs	1995-2024	30	1996	2023	27	
	04628X0003/FAEP	Château-d'Ang	GG142		1993-2024	32	1995	2023	27	
	04902X0012/FAEP	Billy	GG142		1994-2024	31	1995	2023	27	
	04926X0001/FAEP	Alligny	GG142		Sables et grès du Cénomaniens captifs	1995-2024	30	1996	2023	28
Yèvre-Auron	04936X0010/F	Rians	GG077	Calcaires et marnes du Jurassique supérieur du bassin versant de Yèvre-Auron libres	1995-2024	30	1996	2023	25	
	05202X0099/P	Étréchy	GG077		1995-2024	30	1996	2023	28	
	05203X0083/P	Villequiers	GG077		1993-2024	32	1996	2023	27	
	05208X0011/P	Nérondes	GG071	Calcaires et marnes du Dogger du Berry libres	1993-2024	32	1995	2023	29	
	05463X0029/P	Levet	GG077	Calcaires et marnes du Jurassique supérieur du bassin versant de Yèvre-Auron libres	1993-2024	32	1995	2023	28	
	05464X0045/P	Champied-Givau	GG077		1988-2024	37	1995	2023	28	
	05471X0070/P1	Vornay	GG077		1979-2024	46	1996	2023	26	
	05472X0029/P	Osmerly	GG077		1993-2024	32	1995	2023	29	
	05473X0036/P	Blet	GG071		Calcaires et marnes du Dogger du Berry libres	1995-2024	30	1996	2023	28
	05475X0057/P1	Verneuil	GG067		Calcaires à silex et marnes captifs du Dogger sud bassin parisien	1995-2024	30	1996	2023	26