



**NOTICE DE LECTURE
DES FICHES DES CHANGEMENTS
HYDROLOGIQUES (RECHARGE ET DEBIT)
PAR NIVEAU DE RECHAUFFEMENT**

Éric SAUQUET, INRAE

Antoine TORREMOCHA, INRAE,

Louis HERAUT, INRAE

Jean-Philippe VIDAL, INRAE

Blaise CALMEL, INRAE

12/08/2025

Avec le soutien financier de :

Le projet Explore2, porté par INRAE et l'Office International de l'eau (OIEau), s'inscrit dans la suite de l'étude Explore 2070 (2010-2012) grâce à laquelle les acteurs de la recherche, autour du Ministère de l'environnement, avaient établi des premiers scénarios prospectifs de disponibilités des ressources en eau à l'échelle de la France à horizon 2070. Officiellement lancé en juillet 2021, co-financé par les partenaires du projet, le Ministère de la transition écologique (MTE) et l'Office français de la biodiversité (OFB), le projet Explore2 a pour objectif d'actualiser les connaissances sur l'impact du changement climatique sur l'hydrologie à partir des publications du GIEC (CMIP5), mais aussi d'accompagner les acteurs des territoires dans la compréhension et l'utilisation de ces résultats pour adapter leurs stratégies de gestion de la ressource en eau.

*Explore2 – Notice de lecture des fiches des changements hydrologiques (recharge et débit)
par niveau de réchauffement*

Nom du projet	Explore2 : Anticiper les évolutions climatiques et hydrologiques en France
Nom du rapport	Notice de lecture des fiches des changements hydrologiques (recharge et débit) par niveau de réchauffement
Auteur(s)	Éric SAUQUET, INRAE Antoine TORREMOCHA, INRAE Louis HERAUT, INRAE Jean-Philippe VIDAL, INRAE Blaise CALMEL, INRAE
Numéro de version	0
Date contractuelle de remise du livrable	31/07/2025
Date effective de remise du livrable	14/07/2025
Statut du document	version provisoire/ version finale
Accès en ligne	libre/ restreint / confidentiel
Mots-clés (5 maximum)	changement climatique, TRACC

Table des matières

1	Introduction	9
2	Description des fiches de synthèse	10
2.1	En-tête	11
2.2	Volet Climat	11
2.3	Volet Hydrologie.....	12
3	Accès aux fiches de synthèse	15
4	Recommandations et avertissements	17
5	Références	18

Abréviations

- GCM** : General Circulation Model, Modèle de Circulation Générale
- HM** : Hydrological Model, Modèle Hydrologique
- QA** : Débit annuel
- QJXA** : Débit journalier maximal annuel
- QJXA-10_{ans}** : Débit journalier maximal annuel de période de retour 10 ans
- QS** : Débit saisonnier
- RCM** : Regional Climate Model, Modèle de Climat Régional
- SANDRE** : Service d'Administration Nationale des Données et Référentiels sur l'Eau
- TRACC** : Trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique
- VCN10_{Eté}** : Débit minimum annuel sur 10 jours glissants sur la période estivale
- VCN10-5_{ans, Eté}** : Débit minimum annuel sur 10 jours glissants sur la période estivale de période de retour 5 ans

Liste des figures

Figure 1 : Exemple de fiche de synthèse pour le niveau de réchauffement 2.7°C sur le secteur hydrographique M5.	10
Figure 2 : Régions hydrographiques en France hexagonale et Corse.....	16

Liste des tableaux

Tableau 1 : Dénomination et description des régions hydrographiques 15

Résumé

Les projections de débit et de recharge du projet **Explore2** ont été examinées par niveau de réchauffement en réponse au besoin d'accompagnement des utilisateurs, concernant la trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC) par Sauquet *et al.* (2025).

Pour les besoins de diffusion des résultats de ces analyses, des fiches de synthèse ont été élaborées et construites sur un schéma identique, associant représentations graphiques et tableaux. Elles décrivent les évolutions de la recharge et des débits à l'échelle de secteur hydrographique (découpage en 187 bassins ou sous-bassins versants du SANDRE). Ces fiches exploitent les résultats aux points de simulation du projet **Explore2** disposant de projections de débit issues d'au moins quatre modèles hydrologiques de surface et ceux obtenus pour la recharge sur le découpage en masses d'eau souterraine associées à des aquifères.

L'objectif visé des fiches est de montrer l'évolution pour quelques variables clefs descriptives du climat, de la recharge potentielle des aquifères et de l'hydrologie de surface par niveau de réchauffement et de sensibiliser aux incertitudes associées. Elles s'adressent à l'ensemble des acteurs locaux, et visent à leur apporter la connaissance des grandes tendances que connaîtront les secteurs hydrographiques dans lesquels elles s'inscrivent, pour l'élaboration de leurs documents de planification.

Ce document a pour objectif d'expliquer le contenu de ces fiches de synthèse.

1 Introduction

Le projet **Explore2** a produit une quantité inédite de données hydrologiques. Ainsi, des ensembles de projections hydrologiques ont été élaborés sur près de 4000 points de simulation répartis en France hexagonale. Ces projections ont fait l'objet d'un post-traitement pour examiner la réponse hydrologique aux niveaux de réchauffement spécifiés dans la trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC). Ce post-traitement consiste notamment à extraire les données (pluie, température, recharge potentielle des aquifères, piézométrie et débit) dans une fenêtre temporelle autour de la date d'atteinte du niveau de réchauffement, et de calculer des métriques sur ces fenêtres.

Les objectifs de ces fiches sont de présenter, de manière synthétique, l'évolution de variables descriptives du climat, de la recharge potentielle et du régime hydrologique par niveau de réchauffement et de sensibiliser aux incertitudes associées. La piézométrie n'a pas été considérée faute d'une couverture spatiale couvrant la France hexagonale et la Corse. Ici, les données sont exprimées en anomalie par rapport à la période de référence 1991-2020, avant de réaliser une analyse statistique de ces anomalies pour chaque point de grille pour les données du climat, pour chaque point de simulation pour les débits ou pour chaque masse d'eau souterraine pour la recharge potentielle des aquifères.

Des choix ont primé dans l'élaboration de ces fiches. Ainsi, nous avons privilégié :

- Les deux niveaux de réchauffement en France +2.7°C et +4°C par rapport à la période pré-industrielle au détriment du niveau de réchauffement le plus faible (+2°C). Deux fiches par secteur hydrographique seront proposées,
- Une approche régionale sur la base d'entités hydrologiques (les 187 secteurs hydrographiques du Système d'Information sur l'Eau du référentiel SANDRE, <https://www.sandre.eaufrance.fr>). Ce découpage peut rendre compte de spécificités géographiques, et est suffisamment documenté en simulation des précipitations, températures, débits et de la recharge compte tenu de la densité des points de simulation et de la résolution de base des masses d'eau souterraine et des projections climatiques,
- Les points de simulation des débits par au moins quatre modèles hydrologiques pour mieux décrire les incertitudes,
- Une trame de présentation unique pour faciliter la production en masse des fiches,
- Les résultats issus des narratifs hydrologiques baptisés ici narraTRACCs pour illustrer la diversité des futurs. Ces narratifs sont des triplets GCM-RCM-HM parmi un ensemble des projections de débits du projet Explore2. Les projections climatiques de ces triplets ont été sélectionnées par Météo-France (Soubeyroux *et al.*, 2024) : elles sont toutes corrigées avec la méthode ADAMONT et toutes obtenues sous scénario d'émissions fortes de gaz à effet de serre. La méthodologie choisie pour identifier ces narraTRACCs est inspirée de celle mise en place pour les analyses Hydrologie-Milieux-Usages-Climat (HMUC) sur le corridor ligérien dans le cadre d'une collaboration INRAE-Agence de l'eau Loire-Bretagne (Calmel et Vidal, en préparation). Le choix des narraTRACCs est opéré à des échelles plus larges que celles des secteurs hydrographiques pour éviter autant que faire se peut les discontinuités amont aval : à l'échelle de regroupements de régions hydrographiques, des régions hydrographiques, ou de secteurs hydrographiques cohérents géographiquement et climatiquement.

Les fiches et les données exploitées par ces fiches sont téléchargeables sur le dataverse d'**Explore2** dans une collection dédiée à la TRACC (<https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataverse/explore2-tracc>).

La lecture et l'interprétation des résultats nécessitent des connaissances sur le changement climatique. A défaut, il est nécessaire de suivre le MOOC du projet Explore2 (<https://e-learning.oieau.fr/MOOC-Explore2>).

2 Description des fiches de synthèse

Un exemple de fiche est présenté ici :

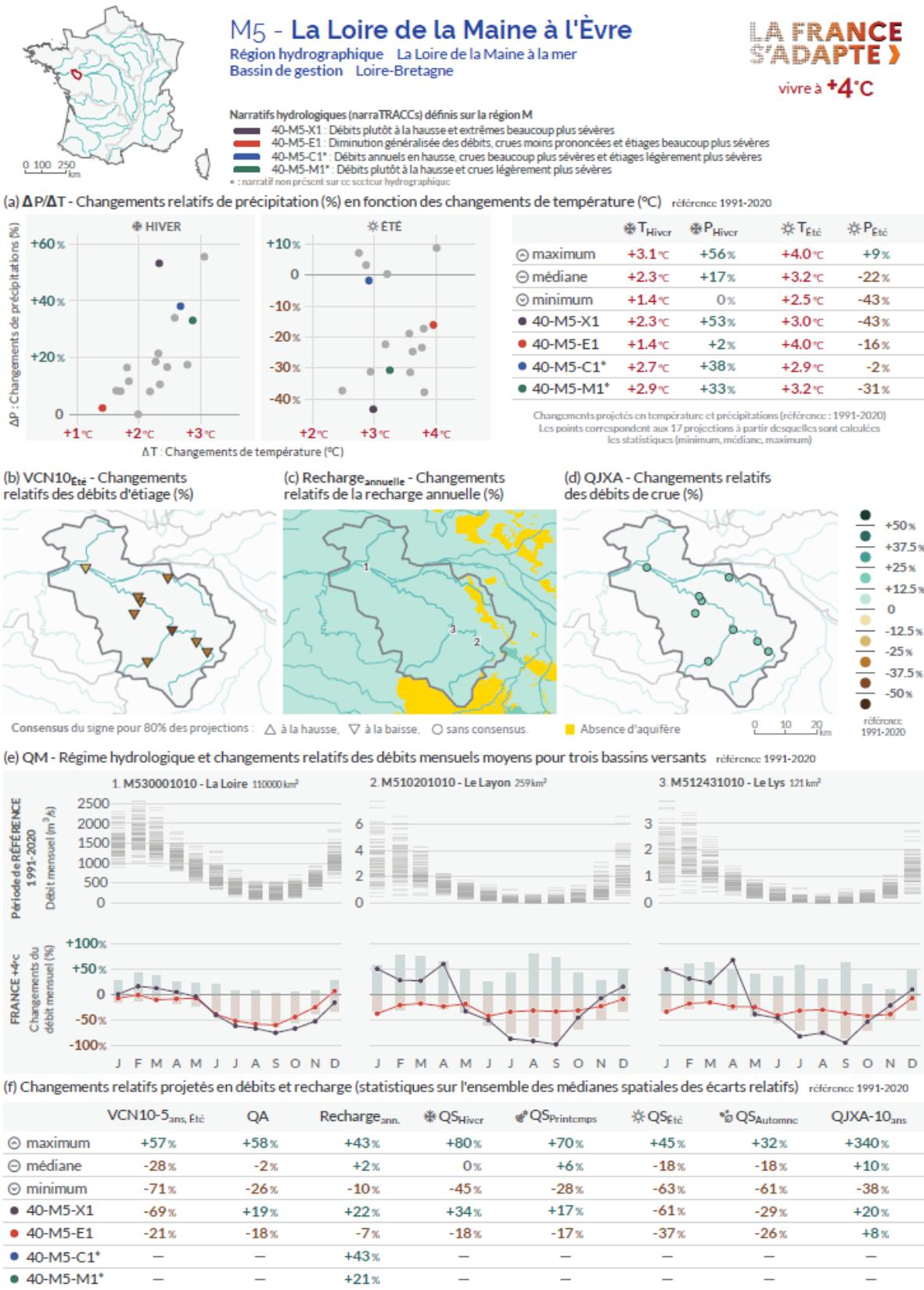
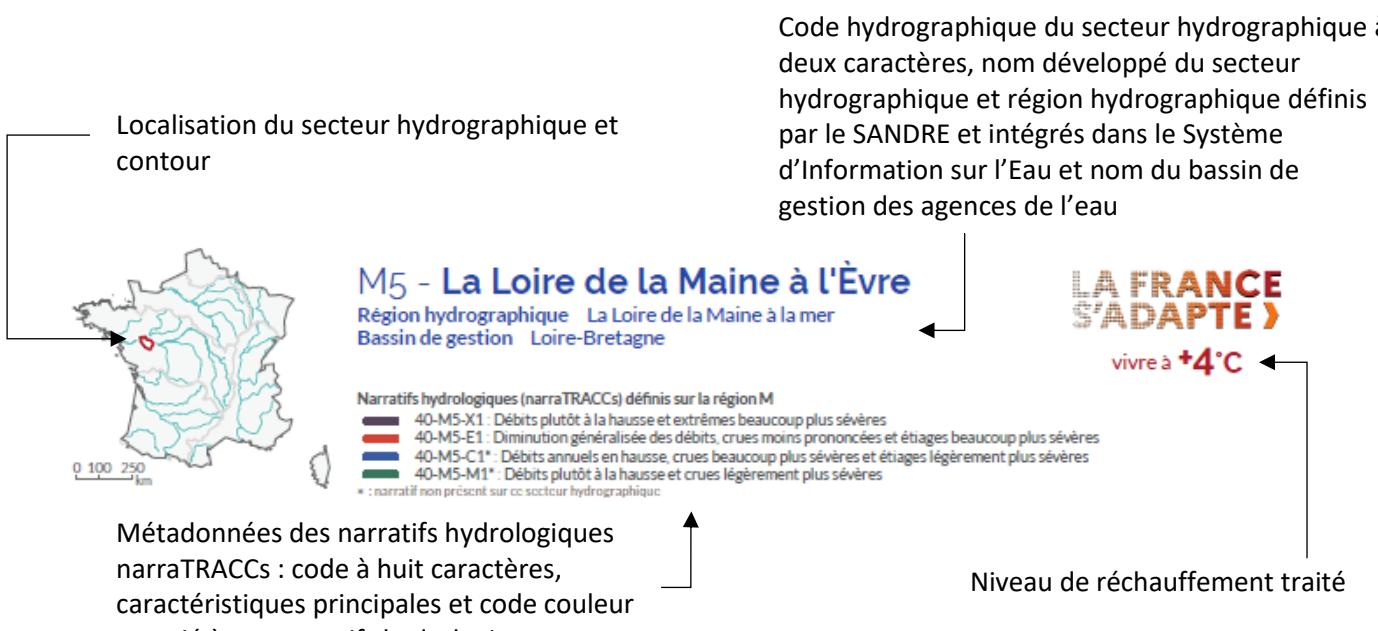


Figure 1 : Exemple de fiche de synthèse pour le niveau de réchauffement +4°C sur le secteur hydrographique M5.

2.1 En-tête



La première ligne rappelle l’entité géographique sur laquelle les narraTRACCs ont été identifiés (le plus souvent, l’entité est la région hydrographique à laquelle appartient le secteur considéré, ou un regroupement de régions hydrographiques dont celle à laquelle appartient le secteur considéré). Le code des narraTRACCs répond à la logique suivante :

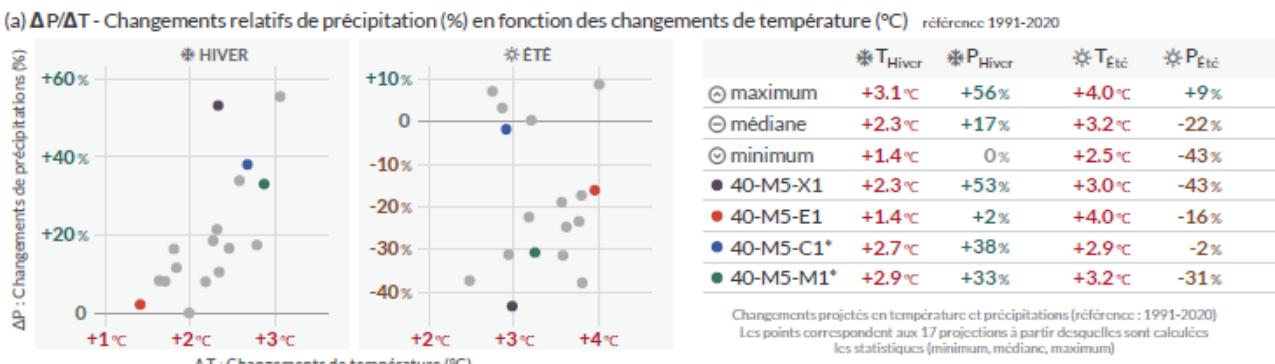
- Un chiffre correspondant au niveau de réchauffement : « 27 » désigne la France à +2.7°C et « 40 » désigne une France à +4°C,
- Le code SANDRE du secteur hydrographique,
- Un code associé aux caractéristiques du narraTRACC, comportant une première lettre associée à une famille :
 - E : Intensification des étiages,
 - C : Intensification des crues,
 - X : Intensification des événements extrêmes,
 - M : Changements modérés,

et un numéro permettant de distinguer des membres de la même famille présents dans le secteur.

En complément, l’astérisque * rappelle l’existence de narraTRACCs identifiés à l’échelle de l’entité géographique mais ces narraTRACCs ne sont pas présents dans l’ensemble des projections hydrologiques du secteur considéré.

2.2 Volet Climat

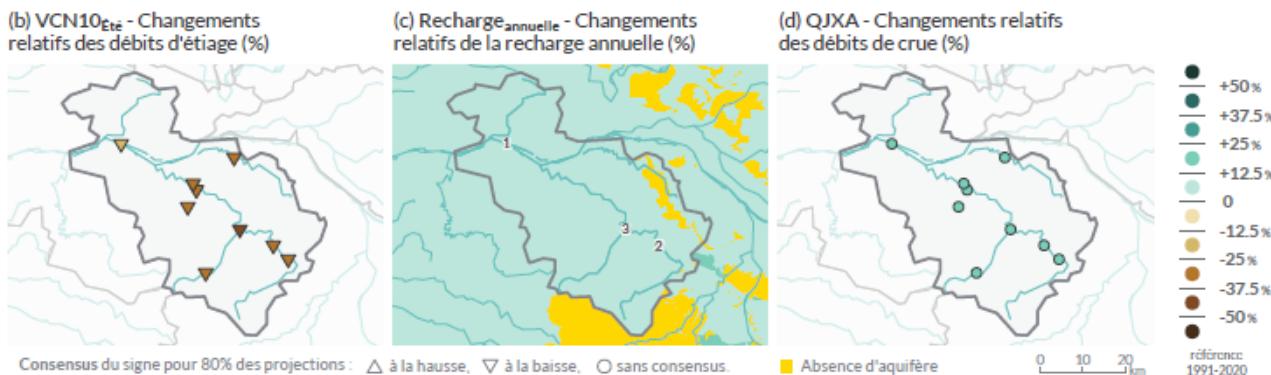
Sur la partie gauche, chaque graphique est associé à une saison : hiver à gauche et été à droite. Les variables de base sont les moyennes spatiales à l’échelle du secteur hydrographique de température (T) et de précipitations (P) pour chaque projection. Y sont représentées les anomalies par rapport à la période de référence calculées pour les 17 projections choisies par Météo-France pour décrire la TRACC (Soubeyroux et al., 2024). Un point est une projection GCM-RCM corrigée avec la méthode ADAMONT. En couleur sont représentées les changements des projections climatiques utilisées en entrée des modèles hydrologiques qui définissent les narraTRACCs.



Le tableau sur la droite est une synthèse statistique : sont indiqués les changements médians, minimaux et maximaux parmi les 17 projections climatiques. Les statistiques sont calculées sur les moyennes interannuelles des températures et précipitations agrégées sur le secteur hydrographique. Les valeurs spécifiques des projections climatiques GCM-RCM des narratRACCs sont précisées dans les quatre dernières lignes avec le code couleur associé. Les chiffres en rouge signalent les températures (en hausse quelle que soit la projection). Les chiffres du tableau en marron indiquent une diminution des précipitations et, inversement, les chiffres en vert indiquent une hausse des précipitations.

Les résultats sur le climat permettent de comprendre partiellement les réponses hydrologiques présentées plus bas.

2.3 Volet Hydrologie



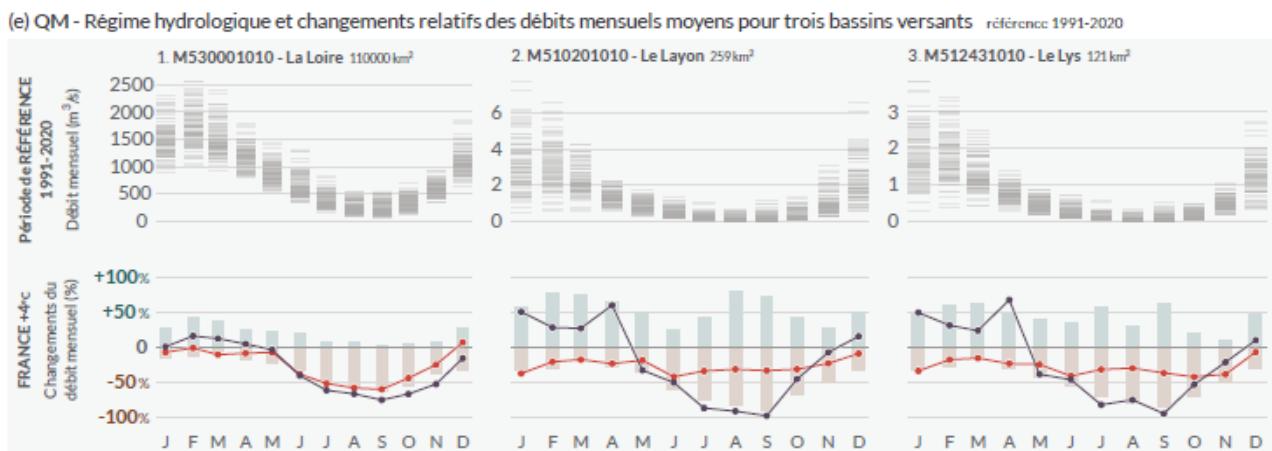
Les cartes (b), (c) et (d) illustrent la variabilité spatiale des réponses hydrologiques au sein du secteur hydrographique (exprimées en écarts relatifs). Il s'agit de la médiane d'ensemble des changements pour toutes les projections de débit ou de recharge disponibles. La couleur des polygones ou des symboles, selon la carte, porte l'information sur l'intensité médiane du changement. La gamme de couleur décrite à l'extrême droite est commune à toutes les cartes. Les numéros sur la carte de la recharge annuelle permettent de localiser les trois points de simulations de la figure (e).

Les résultats aux points de simulation des débits à l'intérieur du secteur hydrographique (b) et (d) sont décrits par un symbole de couleur. Le symbole permet de différencier les points où les projections s'accordent sur le signe de l'anomalie (triangle pointant vers le haut (resp. le bas) pour un consensus à la hausse (resp. baisse) de ceux où le consensus n'est pas présent (disque). Deux variables de débits extrêmes sont présentées :

- VCN10_{Eté} qui décrit les étiages estivaux : il s'agit du minimum estival des débits moyens sur 10 jours. L'été s'étend ici du 01/05 au 30/11,
- QJXA qui décrit les hautes eaux : il s'agit du débit journalier maximal annuel. Les valeurs annuelles sont extraits sur l'année hydrologique adaptée aux crues (débutant le mois du minimum des débits mensuels moyens interannuels),

dont on calcule les moyennes interannuelles, puis les anomalies et finalement la médiane d'ensemble en chaque point de simulation.

La carte des anomalies des recharges annuelles moyennes, située au centre (c), fait apparaître les résultats obtenus sur les polygones de couleurs, qui sont les masses d'eau souterraine : il s'agit des médianes d'ensemble sur les 17 projections retenues. Les masses d'eau souterraine ne présentant pas d'aquifères, pour lesquelles la notion de recharge n'a pas de sens, sont colorées en jaune. Le caractère consensuel du signe du changement n'est pas précisé pour la recharge annuelle.



Les graphiques (e) représentent sur la première ligne les hydrogrammes composés des débits mensuels moyens sur la période 1991-2020 et sur la seconde ligne les changements des débits mensuels pour le niveau de réchauffement examiné, pour trois points de simulation. Ces points de simulation ont été choisis pour explorer la diversité des tailles des bassins versants simulés au sein du secteur hydrographique.

Chaque segment sur les hydrogrammes de la première ligne correspond au résultat d'une projection hydrologique. Ces segments sont tracés avec un niveau de transparence ; ainsi, les zones aux couleurs plus marquées correspondent à des zones où se concentrent les estimations des chaines de modélisation. Les courbes en couleur sur les graphiques de la seconde ligne permettent d'identifier les changements projetés par chaque narratRACC (les couleurs sont celles de l'en-tête). Elles se superposent à des rectangles qui renseignent les incertitudes. Ces derniers correspondent à l'intervalle de confiance à 90 % défini par les quantiles 5 % et 95 % des anomalies pour chaque mois, et contiennent donc 90% des valeurs.

Changements relatifs projetés en débits et recharge (statistiques sur l'ensemble des médianes spatiales des écarts relatifs) référence 1991-2020								
	VCN10-5 _{ans} , Eté	QA	Recharge _{ann.}	* QS _{Hiver}	* QS _{Printemps}	* QS _{Eté}	* QS _{Automne}	QJXA-10 _{ans}
○ maximum	+57 %	+58 %	+43 %	+80 %	+70 %	+45 %	+32 %	+340 %
○ médiane	-28 %	-2 %	+2 %	0 %	+6 %	-18 %	-18 %	+10 %
○ minimum	-71 %	-26 %	-10 %	-45 %	-28 %	-63 %	-61 %	-38 %
● 40-M5-X1	-69 %	+19 %	+22 %	+34 %	+17 %	-61 %	-29 %	+20 %
● 40-M5-E1	-21 %	-18 %	-7 %	-18 %	-17 %	-37 %	-26 %	+8 %
● 40-M5-C1*	—	—	+43 %	—	—	—	—	—
● 40-M5-M1*	—	—	+21 %	—	—	—	—	—

Le tableau (f) propose, sur les trois premières lignes, des statistiques de débit et de recharge calculées sur l'ensemble des projections hydrologiques. Les chiffres du tableau en marron indiquent une réduction de la disponibilité en eau et, inversement, les chiffres en vert indiquent une hausse de la disponibilité en eau.

Le tableau décrit les changements en débit (colonnes 2, 3 et 5 à 9) pour :

- Le quantile sec de période de retour 5 ans VCN10-5_{ans, Eté} du VCN10_{étété} décrit plus haut,
- Le débit annuel moyen interannuel QA,
- Les quatre débits saisonniers moyens interannuels QS,
- Le quantile de période de retour 10 ans QJXA-10_{ans} du QJXA décrit plus haut.

Pour chaque projection hydrologique prise individuellement, les débits caractéristiques sont calculés sur la période 1991-2020 et la période associée au réchauffement. Les anomalies sont ensuite calculées en chaque point de simulation. La valeur médiane des anomalies calculées sur tous les points de simulation est jugée représentative des changements à l'échelle du secteur hydrographique pour la projection considérée. Il s'agit donc d'une statistique spatiale. Toutes ces médianes sont ensuite rassemblées pour former un échantillon final d'autant de valeurs que de nombre de projections hydrologiques. Sont extraites finalement les minimum, maximum et médianes, afin de qualifier la dispersion des réponses hydrologiques à l'échelle du secteur hydrographique. Le tableau intègre sur les quatre dernières lignes des valeurs associées aux narraTRACCs, sous réserve de leur disponibilité sur le secteur hydrographique.

Les changements pour la recharge annuelle sont reportés en quatrième colonne. Les valeurs se fondent sur les moyennes interannuelles des valeurs annuelles agrégées à l'échelle du secteur hydrographique (moyennes pondérées par les surfaces des MESO considérées comme aquifères interceptées par le secteur hydrographique). Les valeurs des quatre dernières lignes correspondent aux estimations du modèle RECHARGE alimenté par les quatre projections climatiques à l'origine des narraTRACCs (cf. (a)).

3 Accès aux fiches de synthèse

Ces fiches et les données qui ont conduit à leur élaboration sont téléchargeables sur le dataverse d'**Explore2** dans la collection dédiée à la TRACC (<https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataverse/explore2-tracc>) par région hydrographique (Tableau 1, Figure 2) . Ces documents rassemblent les lots de deux fiches de chaque secteur (+2.7°C et +4°C), rangés par ordre croissant du numéro du secteur hydrographique.

Bassin de gestion	Code SANDRE	Description
Rhin-Meuse	A	Le Rhin
	B	La Meuse
Artois-Picardie	D	Affluents du Rhin
	E	L'Escaut et fleuves de la frontière belge à l'embouchure de la Bresle (exclue)
Seine-Normandie	F	La Seine de sa source au confluent de l'Oise (exclu)
	G	Fleuves côtiers de la limite du bassin Artois-Picardie à l'embouchure de la Seine (exclue)
Loire-Bretagne	H	La Seine du confluent de l'Oise (inclus) à l'embouchure
	I	Fleuves côtiers de l'embouchure de la Seine (exclue) à la limite du bassin Loire-Bretagne
Adour-Garonne	J	Fleuves côtiers de Bretagne
	L	La Loire de la Vienne à la Maine (exclue)
Rhône-Méditerranée-Corse	K	La Loire de sa source à la Vienne (exclue)
	M	La Loire de la Maine à la mer
Adour-Garonne	N	Fleuves côtiers du sud de la Loire
	O	La Garonne
Adour-Garonne	P	La Dordogne
	Q	L'Adour
Rhône-Méditerranée-Corse	R	La Charente
	S	Fleuves côtiers façade atlantique
Rhône-Méditerranée-Corse	U	La Saône
	V	Le Rhône (Saône-Isère-Durance exclues)
Rhône-Méditerranée-Corse	W	L'Isère
	X	La Durance
Rhône-Méditerranée-Corse	Y	Fleuves côtiers méditerranéens (Corse incluse)

Tableau 1 : Dénomination et description des régions hydrographiques.

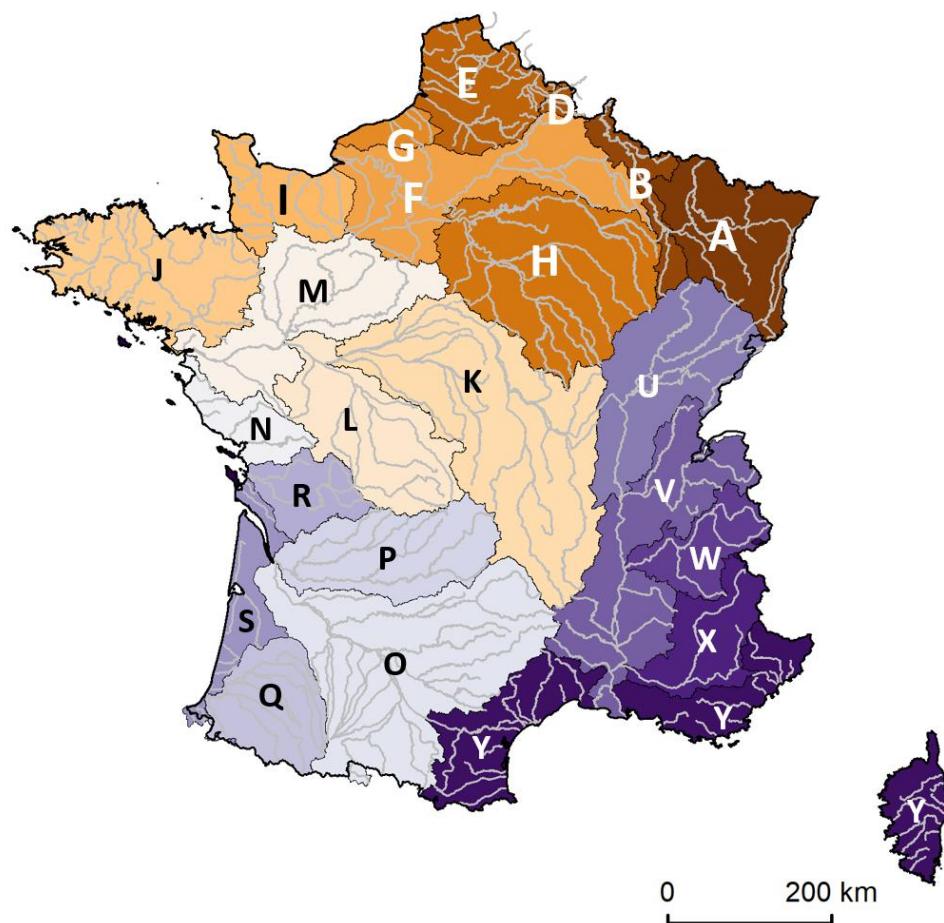


Figure 2 : Régions hydrographiques en France hexagonale et Corse.

4 Recommandations et avertissements

La lecture et l'interprétation des résultats nécessitent des connaissances sur le changement climatique. A défaut, il est indispensable de suivre le MOOC du projet Explore2 (<https://e-learning.oieau.fr/MOOC-Explore2>).

Ces résultats comportent des incertitudes. Il ne s'agit pas de prévisions mais d'indications d'évolutions possibles sous le scénario de réchauffement prescrit par la TRACC (+2.7°C en milieu de siècle et +4°C en fin de siècle). Cette précaution d'usage et d'interprétations est rappelée dans l'avertissement en bas de chaque fiche.

Ces fiches sont volontairement synthétiques et ne se substituent pas au calcul des indicateurs à partir des projections brutes pour les besoins d'une étude sur un territoire. Il ne faut pas tenter d'extraire les valeurs numériques des graphiques.

5 Références

- CALMEL B., VIDAL J.-P. (2025). Etude Hydrologie, Milieux, Usages et Climat sur l'axe Loire. Rapp. tech., [⟨hal-XXX⟩](https://hal-xxx)
- SAUQUET ET AL. (2025). Evolution de l'hydrologie de surface en France par niveau de réchauffement. Rapp. tech., <https://doi.org/10.57745/MN29RG>
- SOUBEYROUX ET AL. (2024). A quel climat s'adapter en France selon la TRACC ? Météo-France ⟨hal-04797481v1⟩