



**DÉFINITION DE NARRATIFS HYDROLOGIQUES PAR
NIVEAU DE RÉCHAUFFEMENT DÉFINI PAR LA TRACC**

**Blaise CALMEL (INRAE), Jean-Philippe VIDAL (INRAE),
Louis HERAUT (INRAE), Éric SAUQUET (INRAE), Antoine
TORREMOCHA (INRAE)**

13/10/2025

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'écologie, 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 de 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.

Ce document contient des figures, graphiques et tableaux sans description alternative. Pour obtenir une description, contactez dep@eau-loire-bretagne.fr.

Nom du projet	Explore2 : Définition de narratifs hydrologiques par niveau de réchauffement défini par la TRACC
Nom du rapport	Définition de narratifs hydrologiques par niveau de réchauffement défini par la TRACC
Auteur(s)	Blaise CALMEL, INRAE Jean-Philippe VIDAL, INRAE Louis HERAUT, INRAE Éric SAUQUET, INRAE Antoine TORREMOCHA, INRAE
Numéro de version	1
Statut du document	Version finale
Accès en ligne	Libre
Mots-clés (5 maximum)	Narratifs, Trajectoire de Réchauffement de référence pour l'Adaptation au Changement Climatique (TRACC)

Table des matières

1	Introduction	9
2	Le climat selon la TRACC	10
2.1	Méthode et hypothèses pour l'élaboration de la TRACC	10
2.2	Approche par narratif	11
3	Définition de narratifs hydrologiques	13
4	Traduire les changements	18
5	Conclusion	22
6	Références	23

Résumé

Ce rapport est une présentation méthodologique de l'approche narrative des changements sur les eaux de surface dans le cadre des analyses par niveau de réchauffement. Cette méthodologie a été développée dans le cadre du projet EHCLO (Exploration HydroClimatique de la LOire) – produit d'une convention de recherche et développement entre l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne et INRAE – pour alimenter la partie prospective du volet climat de l'étude HMUC (Hydrologie Milieux Usages et Climat) des axes Loire et Allier (CALMEL et VIDAL, 2025). Dans le cadre de cette étude, une analyse suivant les préconisations de la TRACC (Trajectoire de Réchauffement de référence pour l'Adaptation au Changement Climatique, SOUBEYROUX et al., 2024 ; SOUBEYROUX et al., 2025) a été effectuée, nécessitant de penser une approche narrative sur l'hydrologie, à l'instar des narratifs climatiques développés dans le cadre du projet **Explore2**.

La méthodologie permettant de sélectionner des projections dites « narratives » parmi un ensemble est résumée dans le [tableau 1](#). Cette méthodologie a été appliquée pour les différents degrés de réchauffement sur l'ensemble de la France hexagonale et la Corse. Par la suite, un travail de transcription a été effectué afin de décrire de manière synthétique les principaux changements pour chacun des narratifs.

Définition des narratifs hydrologiques		
Étape	Description	Commentaire
[0a]	Sélection d'une région hydrographique	L'échelle de la région hydrographique permet de garder une bonne cohérence climatique et hydrologique
[0b]	Sélection d'un horizon	L'horizon peut être une fenêtre temporelle ou correspondre à un niveau de réchauffement fixé
[1]	Calcul de la médiane en changement sur QA , $QJXA$ et $VCN10$ sur les points de simulation de la région par chaîne hydrologique	Ces trois indicateurs permettent de couvrir les principaux comportements hydrologiques
[2]	Définition des groupes de comportement	Le regroupement (ou "clustering") permet de composer des groupes (ici 4) au comportement similaire
[3]	Filtrage des modèles hydrologiques via les critères de performance et de couverture spatiale	Chaque modèle hydrologique doit être au dessus des performances médianes sur l'ensemble des stations hydrométriques de la région pour chacun des critères
[4]	Filtrage des projections via la cohérence au sein de chaque groupe	Les projections doivent rester dans une sphère de rayon correspondant à la médiane des distances au centroïde plus 2 écarts-types
[5]	Sélection du narratif au sein de chaque groupe par une approche MinMax	Le narratif choisi pour un groupe est la projection dont la distance au plus proche centroïde (autre que celui du groupe) est maximale afin de garantir des contrastes entre les différents narratifs.

TABLEAU 1 : Synthèses des étapes successives pour sélectionner un jeu de narratifs pour une région et un horizon choisis.

Acronymes

Acronyme	Description
ΔX	Changement projeté pour la variable X entre le niveau de réchauffement et une période de référence spécifiée
GCM	General Circulation Model
GIEC	Groupe d'experts inter-gouvernemental sur l'évolution du climat
QA	Débit (Q) annuel (A)
$QJXA$	Débit (Q) journalier (J) maximal (X) annuel (A)
RCM	Regional Climate Model
RCP	Representative Concentration Pathway
TA	Température (T) annuelle (A)
TRACC	Trajectoire de Réchauffement de référence pour l'Adaptation au Changement Climatique
VCN_{10}	Débit moyen sur 10 jours minimal sur la période 01/05 au 30/11 de chaque année civile

Table des figures

1	Évolution des cumuls saisonniers moyens de précipitation pour une France à +4 °C. Un point correspond à un couple GCM-RCM et la couleur est celle de sa famille parmi les trois proposées par Météo-France (Section 2.2).	11
2	Évolution des cumuls saisonniers moyens de précipitation pour une France à +2 °C et +2,7 °C. La couleur des points est définie dans la légende de la figure 1.	12
3	Carte des régions et groupement de régions hydrographiques aux influences hydrologiques similaires.	13
4	Représentation en deux dimensions (par ACP) des valeurs médianes des changements en <i>QA</i> , <i>QJXA</i> et <i>VCN10</i> pour le territoire et l'horizon choisi pour chacune des 153 chaînes de modélisation (17 projections climatiques alimentant neuf modèles hydrologiques). Un point correspond à une chaîne de modélisation, les modèles hydrologiques sont indiqués à titre informatif.	14
5	Représentation en deux dimensions des groupes de comportement similaire suivant un regroupement par K-moyennes, les croix colorées correspondent au barycentre (centroïde) de chaque groupe.	14
6	Représentation en deux dimensions du filtrage des projections suivant leurs performances, exemple avec le groupe 2 (voir figure 5), les projections exclues sont en bleu pâle. Cette étape est propre à chaque groupe, les projections des autres groupes (en gris clair) ne sont pas prises en compte.	16
7	Représentation en deux dimensions du filtrage des projections suivant leur distance avec le centroïde du groupe, le cercle rouge correspond à la distance maximale tolérée (médiane des distances plus deux écarts-types).	16
8	Représentation en deux dimensions du processus de sélection du narratif hydrologique au sein d'un groupe, les projections en bleu translucide sont exclues de la sélection des narratifs lors des étapes précédentes. 5a) Calcul de la distance d'une projection à chacun des trois autres centroïdes (en pointillés gris) et identification de la plus faible (en pointillés rouges). 5b) Après identification de l'ensemble des distances minimales aux autres centroïdes (en pointillés gris), identification de la plus grande d'entre elles correspondant au narratif du groupe (en pointillés rouges).	17
9	Représentation en deux dimensions des narratifs sélectionnés (formes élargies) pour chacun des quatre groupes : les formes correspondent aux modèles hydrologiques suivant la figure 4 et les couleurs aux groupes définis en figure 5.	17
10	Cartes de la France hexagonale et de la Corse représentant le nombre de narratifs appartenant à une famille pour les différents horizons par niveau de réchauffement pour chacun des territoires définis. Les histogrammes représentent la médiane des changements par rapport à la période 1991-2020 ainsi que les quantiles 0.25 et 0.75 (trait noir) pour chacune des familles (en haut) et pour chacun des degrés de réchauffement (à droite).	19

Liste des tableaux

1	Synthèses des étapes successives pour sélectionner un jeu de narratifs pour une région et un horizon choisis.	5
2	Ensemble de projections climatiques issues du projet Explore2 identifiées par les couples GCM-RCM mobilisées pour la TRACC, année pivot et fenêtre d'extraction associées aux niveaux de réchauffement	10
3	Exemple pour la validation des modèles hydrologiques suivant leurs performances en biais, Q10 et Q90. Dans cet exemple, 92 stations de référence sont disponibles sur la région K, les valeurs médianes obtenus pour chacun des trois critères sont respectivement 84, 82 et 83 stations. La colonne <i>n</i> correspond au nombre de stations de référence disponibles pour le modèle hydrologique correspondant.	15
4	Les quatre familles de narratifs hydrologiques.	18
5	Première proposition des descriptifs suivant les différents indicateurs.	19
6	Seconde proposition des descriptifs suivant les différents indicateurs. Si une tendance inverse entre crues et étiages est identifiée, une description commune est générée (tableau du haut), autrement, des descriptions spécifiques pour chacun des extrêmes est générées (tableaux du bas).	20
7	Exemple des caractéristiques des narratifs retenus pour la région K pour une France à +2,7 °C.	21
8	Exemple des descriptions des narratifs retenus pour la région K pour une France à +2,7 °C.	21

1 Introduction

Le projet **Explore2** a produit un ensemble riche de projections hydrologiques décrivant l'évolution des débits, de la recharge potentielle des aquifères et des hauteurs piézométriques pour l'ensemble du ^{xxi}^e siècle. Ces données ont été examinées précédemment par scénario d'émission de gaz à effet de serre et par horizon de temps, comparativement à la période de référence 1976-2005.

La Trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC) est une initiative du Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité, de la Forêt, de la Mer et de la Pêche pour fixer un cadre climatique commun à l'échelle nationale pour le développement de stratégies d'adaptation (SOUBEYROUX *et al.*, 2024 ; SOUBEYROUX *et al.*, 2025). La TRACC est une traduction politique normative du changement climatique. Elle prescrit trois niveaux de réchauffement en France (+2 °C, 2,7 °C et +4 °C par rapport à la période pré-industrielle) à différents horizons (respectivement 2030, 2050 et 2100), pour cadrer les actions du 3^e Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC3 2025). La TRACC a été définie après le lancement d'**Explore2** et n'a donc pas été initialement intégrée dans le programme scientifique du projet.

Les approches narratives répondent à la problématique des incertitudes liées aux grands ensembles de projections. Ce rapport fournit des clefs méthodologiques et de compréhension vis-à-vis de la mise en place d'une approche narrative dans le cadre des projections hydrologiques issues de la TRACC.

2 Le climat selon la TRACC

2.1 Méthode et hypothèses pour l'élaboration de la TRACC

Les hypothèses d'évolution du climat de la TRACC s'appuient sur les travaux du Groupe d'experts inter-gouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC). Ainsi, si aucune action supplémentaire de limitation des émissions de gaz à effet de serre n'était engagée, à l'échelle mondiale, le réchauffement moyen annuel atteindrait +1,5 °C vers 2030, +2 °C au milieu de siècle et autour de +3 °C en 2100 par rapport à l'ère pré-industrielle (1900). Le réchauffement étant plus fort sur les surfaces continentales, *a fortiori* en Europe, ces hausses se traduiraient par des hausses des températures annuelles moyennes amplifiées en France hexagonale et Corse : +2 °C en 2030, +2,7 °C en 2050 et +4 °C en 2100, par rapport à 1900.

Météo-France a été chargé de fournir des projections climatiques associées à ces niveaux de réchauffement à partir des données [EXPLORE2-Climat 2022](#) élaborées dans le cadre du projet d' **Explore2**. Seules les projections sous scénario d'émission RCP 8.5 (garantissant le franchissement du niveau de réchauffement le plus élevé +4 °C) et corrigées avec la méthode ADAMONT (exploitées par tous les modèles hydrologiques – surface et souterrain – du projet **Explore2**) ont été sélectionnées. Ainsi, les différents niveaux de réchauffement sont décrits par un ensemble de 17 projections climatiques.

Le processus décrit par SOUBEYROUX *et al.* (2024) repose sur l'analyse de la température annuelle TA moyenne sur l'ensemble France hexagonale et Corse. La date de l'atteinte du niveau de réchauffement ΔTA spécifié par la TRACC constitue une année pivot. Des séquences de 20 ans ont été isolées autour de cette année pivot, les dix années précédentes et les neuf années suivantes (tableau 2). La fenêtre d'extraction des données est, par conséquent, propre à chaque projection climatique.

Cet ensemble baptisé [TRACC-2023](#) est disponible au téléchargement sur le portail [DRIAS - les futurs du climat](#).

GCM	RCM	France à +2 °C	France à +2,7 °C	France à +4 °C
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CNRM-ALADIN63	2041 [2031 - 2050]	2056 [2046 - 2065]	2080 [2070 - 2089]
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	MOHC-HadREM3-GA7-05	2035 [2025 - 2044]	2050 [2040 - 2059]	2074 [2064 - 2083]
ICHEC-EC-EARTH	MOHC-HadREM3-GA7-05	2027 [2017 - 2036]	2043 [2033 - 2052]	2067 [2057 - 2076]
ICHEC-EC-EARTH	KNMI-RACMO22E	2036 [2026 - 2045]	2051 [2041 - 2060]	2076 [2066 - 2085]
ICHEC-EC-EARTH	SMHI-RCA4	2032 [2022 - 2041]	2047 [2037 - 2056]	2072 [2062 - 2081]
IPSL-IPSL-CM5A-MR	DMI-HIRHAM5	2035 [2025 - 2044]	2049 [2039 - 2058]	2073 [2063 - 2082]
IPSL-IPSL-CM5A-MR	SMHI-RCA4	2033 [2023 - 2042]	2048 [2038 - 2057]	2070 [2060 - 2079]
MOHC-HadGEM2-ES	CNRM-ALADIN63	2024 [2014 - 2033]	2041 [2031 - 2050]	2066 [2056 - 2075]
MOHC-HadGEM2-ES	MOHC-HadREM3-GA7-05	2020 [2010 - 2029]	2035 [2025 - 2044]	2059 [2049 - 2068]
MOHC-HadGEM2-ES	CLMcom-CCLM4-8-17	2023 [2013 - 2032]	2037 [2027 - 2046]	2062 [2052 - 2071]
MOHC-HadGEM2-ES	RegCM4-6	2026 [2016 - 2035]	2041 [2031 - 2050]	2065 [2055 - 2074]
MPI-M-MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17	2047 [2037 - 2056]	2062 [2052 - 2071]	2089 [2079 - 2098]
MPI-M-MPI-ESM-LR	CTP-RegCM4-6	2044 [2034 - 2053]	2059 [2049 - 2068]	2086 [2076 - 2095]
MPI-M-MPI-ESM-LR	MPI-CSC-REMO2009	2048 [2038 - 2057]	2064 [2054 - 2073]	2091 [2081 - 2100]
NCC-NorESM1-M	DMI-HIRHAM5	2033 [2023 - 2042]	2049 [2039 - 2058]	2075 [2065 - 2084]
NCC-NorESM1-M	GERICS-REMO2015	2036 [2026 - 2045]	2053 [2043 - 2062]	2078 [2068 - 2087]
NCC-NorESM1-M	IPSL-WRF381P	2046 [2036 - 2055]	2063 [2053 - 2072]	2088 [2078 - 2097]

TABLEAU 2 : Ensemble de projections climatiques issues du projet **Explore2** identifiées par les couples GCM-RCM mobilisées pour la TRACC, année pivot et fenêtre d'extraction associées aux niveaux de réchauffement

Il faut ici souligner qu'une France à un niveau de réchauffement spécifié ne signifie pas que tous les points du territoire seront soumis uniformément à ce niveau de réchauffement. Les incertitudes pour les températures dans la TRACC sont toutefois réduites par construction, mais ce n'est pas forcément le cas pour les précipitations.

Dans la suite du document, nous utilisons la terminologie « France à +2 °C », « France à +2,7 °C » et « France à +4 °C » pour désigner les niveaux de réchauffement.

2.2 Approche par narratif

Dans une perspective d'illustration des incertitudes sur le climat, SOUBEYROUX *et al.* (2024) ont proposé de scinder l'ensemble TRACC-2023 formé des 17 projections en trois grandes familles selon les changements des cumuls d'été et d'hiver de précipitation (figure 1 en haut à gauche) pour une France à +4 °C :

- la famille « évolution limitée » (L), qui rassemble sept projections climatiques présentant de faibles changements des précipitations en été et en hiver,
- la famille « évolution contrastée » (C), qui rassemble cinq projections climatiques présentant une forte hausse des précipitations d'hiver et une forte diminution en été,
- la famille « évolution sèche » (S), qui rassemble cinq projections climatiques présentant une faible augmentation des précipitations d'hiver et une forte diminution en été.

La figure 1 (en haut à droite) montre également les changements des cumuls saisonniers de précipitation projetés pour l'automne et le printemps. Notons qu'une majorité de projections (10 sur 17) suggère une diminution des précipitations en automne et une augmentation des précipitations au printemps, dans une forme de continuité avec les saisons qui les précèdent.

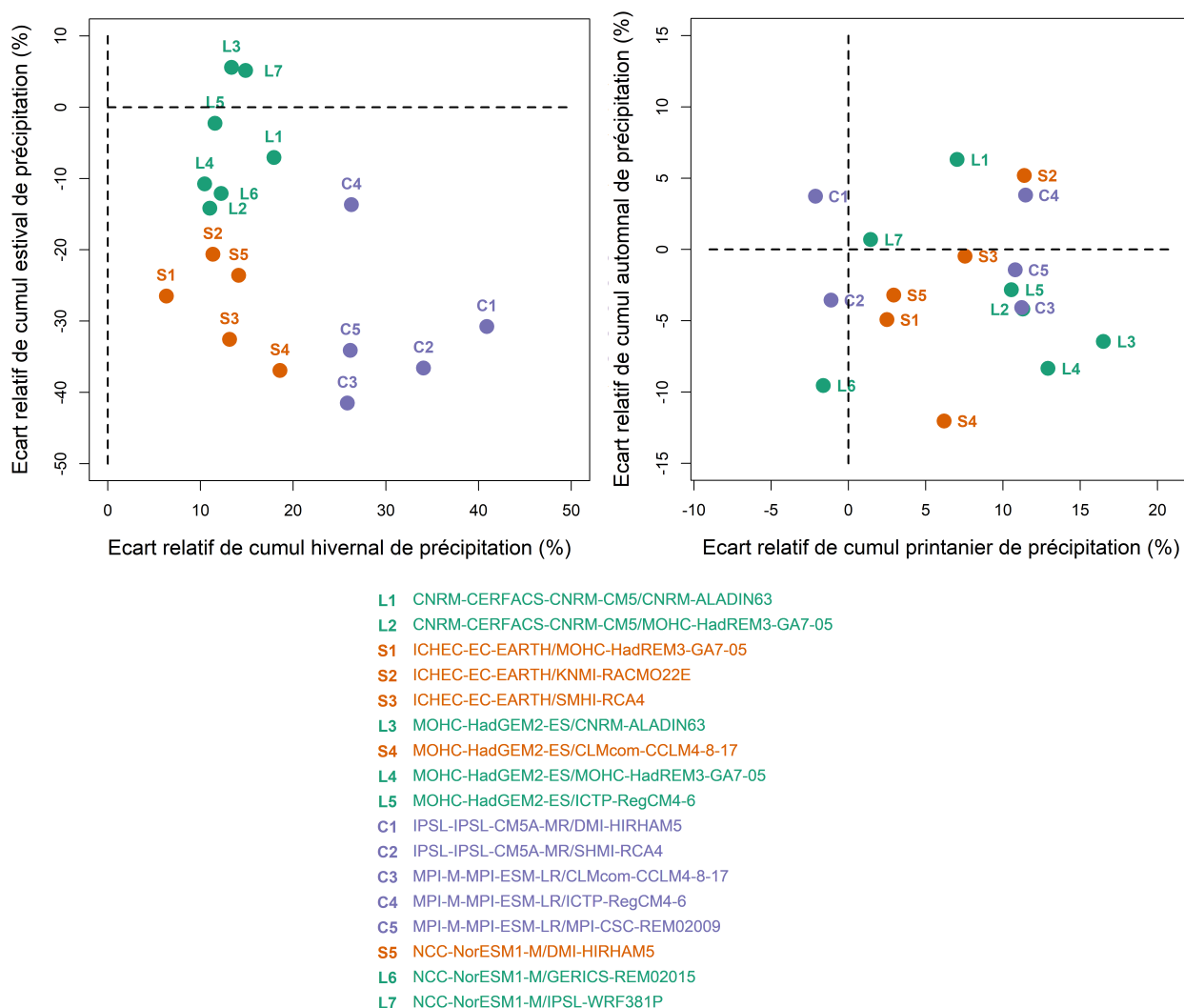


FIGURE 1 : Évolution des cumuls saisonniers moyens de précipitation pour une France à +4 °C. Un point correspond à un couple GCM-RCM et la couleur est celle de sa famille parmi les trois proposées par Météo-France (Section 2.2).

Les qualificatifs associés aux projections sont propres à une France à +4 °C. Les caractères relatifs identifiés (limité, contrasté et sec) des projections climatiques ne sont pas pertinents pour les autres niveaux de ré-

chauffement. Les projections regroupées pour une France à +4 °C se retrouvent dispersées pour les autres niveaux de réchauffement (graphiques de gauche de la [figure 2](#)) sur les critères de changements des cumuls hivernaux et estivaux de précipitation. La variabilité interne du climat en est partiellement à l'origine. Les résultats pour ces trois familles illustreront les incertitudes dans les sections suivantes pour le niveau de réchauffement +4 °C.

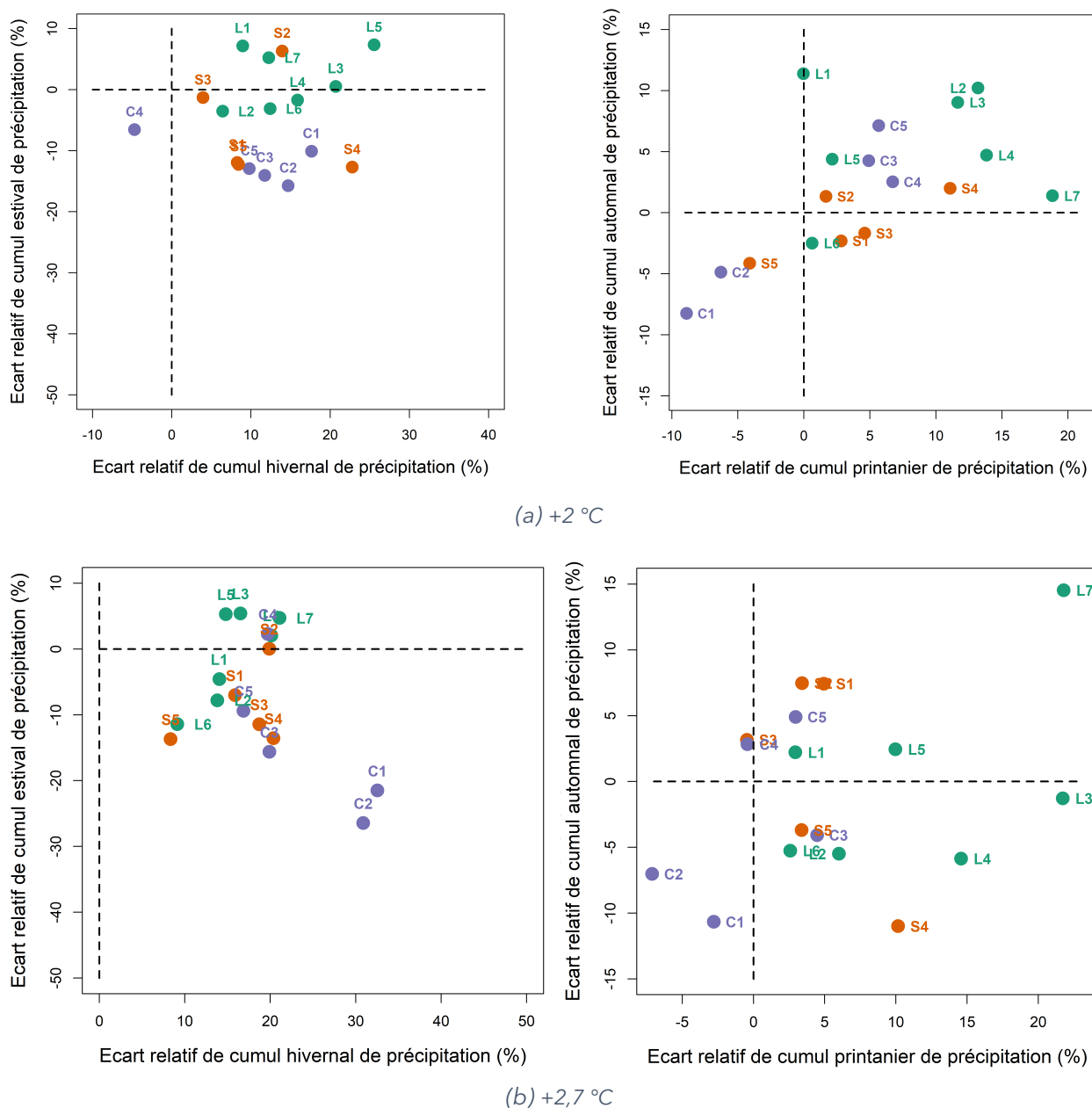


FIGURE 2 : Évolution des cumuls saisonniers moyens de précipitation pour une France à +2 °C et +2,7 °C. La couleur des points est définie dans la légende de la [figure 1](#).

Toutes les remarques précédentes illustrent les limitations de cette classification des divers futurs climatiques possibles. Il faut ajouter à cela que ces narratifs décrits par (SOUBEYROUX *et al.*, 2024) et utilisés par SOUBEYROUX *et al.* (2025) sont à l'échelle de la France et leur pertinence régionale reste à démontrer. Enfin, ces narratifs restent au niveau climatique et ne prennent donc pas en compte les spécificités hydrologiques introduites par les bassins versants.

3 Définition de narratifs hydrologiques

Dans le cadre des **études prospectives** d'évolutions de régimes hydrologiques, les résultats sont dépendants de l'ensemble des projections disponibles ainsi que des hypothèses adoptées. Une analyse des évolutions hydrologiques futures qui se limiterait uniquement à la médiane de l'ensemble des projections serait insuffisante. Il est ainsi indispensable de synthétiser l'information relative à la **dispersion des projections**. L'approche statistique présente l'inconvénient de regrouper, par exemple à travers une valeur médiane ou d'un quantile, des résultats provenant de projections différentes ce qui est source d'incohérences spatiales.

L'objectif des narratifs est ainsi de présenter des projections contrastées tout en couvrant l'ensemble des projections hydrologiques. Il a été choisi de se limiter à **quatre narratifs** permettant d'une part de bien couvrir la diversité des projections tout en facilitant l'interprétation des résultats.

Dans un premier temps, il faut logiquement définir spatialement et temporellement une zone d'étude. Les narratifs sont définis à l'échelle d'une **région hydrographique** (SANDRE, 2002) ou d'un groupe de régions hydrographiques voisines et aux caractéristiques hydrologiques proches, formant un ensemble géographique cohérent (figure 3). Une échelle plus large ne permet pas de prendre correctement en compte les spécificités des territoires et une échelle plus réduite tend à limiter l'identification de comportements contrastés entre les projections.

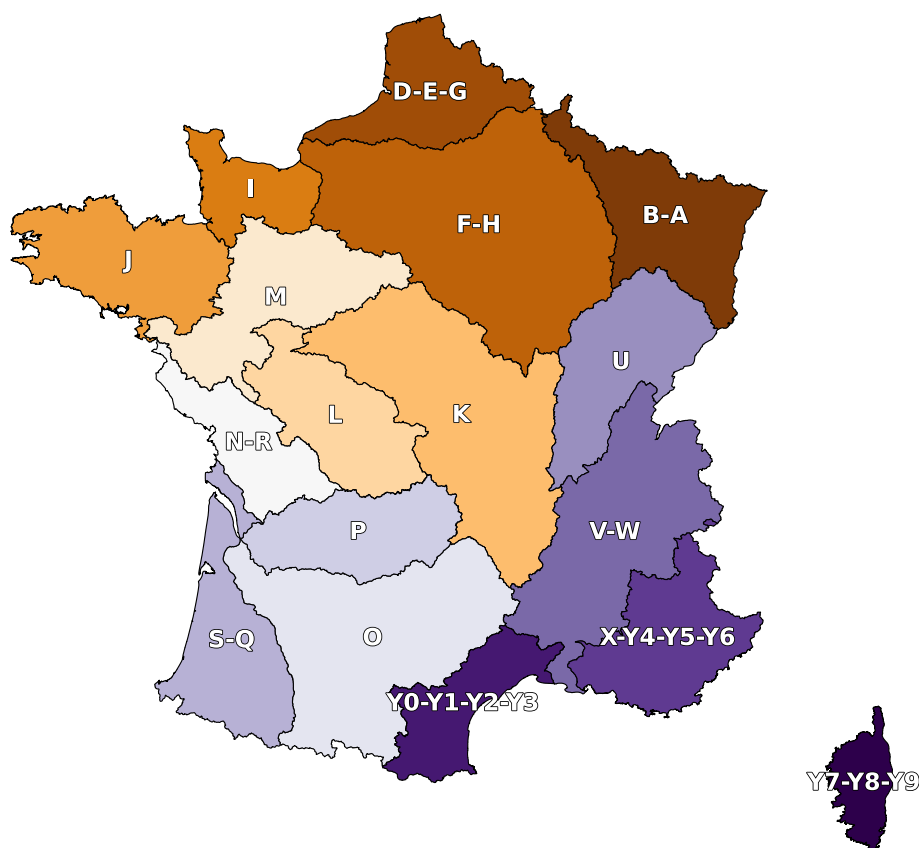


FIGURE 3 : Carte des régions et groupement de régions hydrographiques aux influences hydrologiques similaires.

1. Une fois le périmètre d'étude défini, il s'agit de sélectionner les indicateurs permettant de décrire les différentes phases du régime hydrologique des cours d'eau. Les changements par rapport à la **période de référence 1991-2020** en QA (débit moyen annuel), $QJXA$ (débit journalier maximum annuel) et $VCN10$ (débit moyen sur dix jours minimal annuel) sont des indicateurs permettant d'illustrer l'évolution respectivement des débits moyens, hauts et bas. La médiane multi-site par chaîne de modélisation est calculée sur l'ensemble des points de simulation du territoire pour l'horizon choisi (fi-

gure 4). Afin de faciliter la visualisation, une analyse en composantes principales (ACP) a été effectuée permettant de passer des trois indicateurs précédents à deux dimensions. Cette étape n'interfère pas dans le processus de sélection des narratifs.

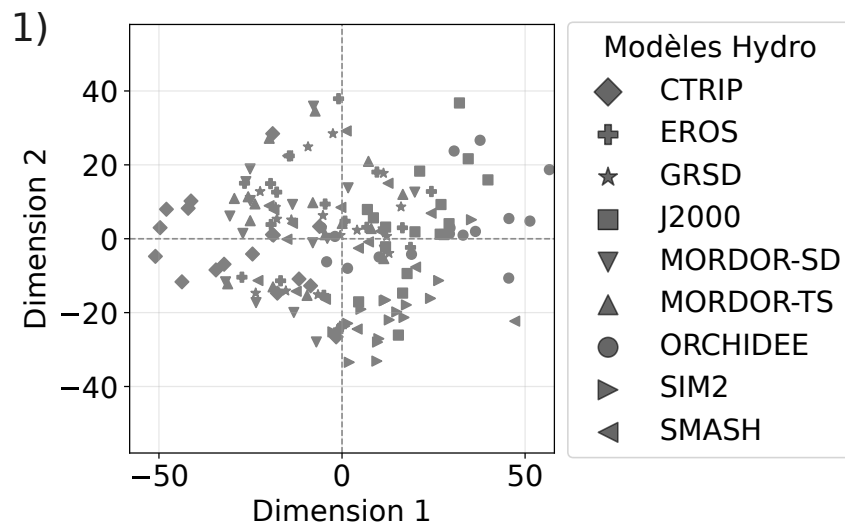


FIGURE 4 : Représentation en deux dimensions (par ACP) des valeurs médianes des changements en QA, QJXA et VCN10 pour le territoire et l'horizon choisi pour chacune des 153 chaînes de modélisation (17 projections climatiques alimentant neuf modèles hydrologiques). Un point correspond à une chaîne de modélisation, les modèles hydrologiques sont indiqués à titre informatif.

2. Sur cet espace, une méthode est appliquée afin de déterminer la partition de groupes permettant de minimiser la variance à l'intérieur de chacun des groupes. Cette méthode de regroupement est un partitionnement suivant l'algorithme de Lloyd appelé **clustering K-means** ou **regroupement par K-moyennes**. Une centaine de combinaisons sont testées afin de limiter les biais pouvant survenir lors de l'initialisation. Pour chaque itération, un premier centroïde est tiré aléatoirement, les autres sont sélectionnés de telle sorte à maximiser la distance entre les centroïdes et ainsi d'identifier des comportements fortement contrastés. La combinaison retenue est celle obtenant le meilleur score de silhouette permettant ainsi d'assurer à la fois la cohésion au sein d'un groupe et la séparation distincte des différents groupes (ROUSSEUX, 1987). Quatre groupes présentant des futurs hydrologiques contrastés sont ainsi générés (figure 5).

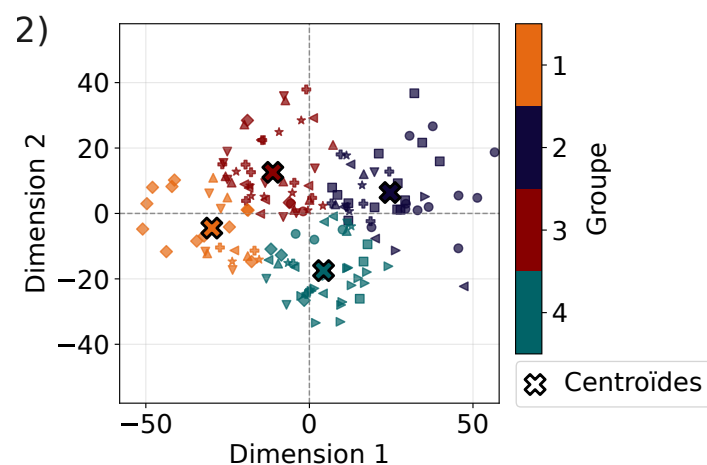


FIGURE 5 : Représentation en deux dimensions des groupes de comportement similaire suivant un regroupement par K-moyennes, les croix colorées correspondent au barycentre (centroïde) de chaque groupe.

3. Une fois ce regroupement effectué, l'objectif est alors d'identifier un narratif représentatif de chaque groupe, autrement dit la chaîne de modélisation hydrologique qui permet d'illustrer les comporte-

ments hydrologiques de ce groupe. Deux étapes de filtrage sont effectuées en amont afin de garder les modèles avec des performances acceptables sur la zone d'étude et cohérentes au sein du groupe.

- (a) Pour chacun des neuf modèles hydrologiques, les **performances** sont étudiées sur les stations de référence de la région considérée. Les stations de référence – environ 600 en France – sont des stations hydrométriques qui disposent de débits faiblement influencés ou naturalisés (pour plus de détails, voir SAUQUET et al., 2022 ; STROHMENGER et al., 2023).

Sur le territoire choisi, on examine si, au droit de ces stations, les performances de chaque modèle sont jugées acceptables (Tableau 3, page 22, de SAUQUET et al. (2023)). Ainsi, pour chaque modèle hydrologique, sont exclues les stations avec un biais moyen supérieur à 20%, un écart de reconstitution du débit descriptif des basses eaux Q90 supérieur à 80% ou un écart de reconstitution du débit descriptif des hautes eaux Q10 supérieur à 20%

Ces seuils correspondent à la définition des zones blanches jugées comme acceptables dans les fiches diagnostic à la station mises à disposition par **Explore2** (HÉRAUT et SAUQUET, 2024). La lecture de ces fiches est détaillée dans une notice dédiée (SAUQUET et HÉRAUT, 2024).

Un critère de 0,2 sur le biais par exemple conduit à retenir uniquement les modèles possédant un biais inférieur à 20% en valeur absolue sur le débit moyen interannuel. Le raisonnement est le même pour les quantiles de haut débit (Q10) et bas débit (Q90).

- (b) Pour chaque modèle hydrologique et chaque critère, les stations pour lesquelles la performance est acceptable sont décomptées. La médiane des effectifs, tous modèles hydrologiques confondus, pour chaque critère est utilisée comme seuil. Tout modèle hydrologique dont le nombre de stations aux performances acceptables est strictement inférieur au seuil se voit exclu de la sélection des narratifs (tableau 3 et figure 6). Cette étape permet de coupler deux effets : d'une part un effet sur les performances des modèles hydrologiques, d'autre part un effet concernant la disponibilité des stations sur le secteur. Cette étape est grandement dépendante du nombre de stations de référence présentes sur le territoire. Les régions avec peu de stations de références n'ont donc pas la garantie que les narratifs retenus présentent une bonne couverture spatiale.

Modèles Hydro	<i>n</i>	Biais stations valides	Q10 stations valides	Q90 stations valides	Modèle valide
CTRIIP	86	52	52	76	X
EROS	84	83	76	85	✓
GRSD	92	92	89	88	✓
J2000	88	68	65	69	X
MORDOR-SD	92	92	91	90	✓
MORDOR-TS	92	87	85	85	✓
ORCHIDEE	82	55	59	64	X
SIM2	28	23	27	1	X
SMASH	89	89	82	83	✓
Médianes	-	84	82	83	-

TABLEAU 3 : Exemple pour la validation des modèles hydrologiques suivant leurs performances en biais, Q10 et Q90. Dans cet exemple, 92 stations de référence sont disponibles sur la région K, les valeurs médianes obtenus pour chacun des trois critères sont respectivement 84, 82 et 83 stations. La colonne *n* correspond au nombre de stations de référence disponibles pour le modèle hydrologique correspondant.

Cependant, il peut ponctuellement survenir qu'au sein d'un groupe, aucune chaîne de modélisation ne valide les critères de performance. Dans ce cas, le groupe est exclu et aucun narratif n'y est identifié. Ce choix de réduire le nombre de narratifs a été préféré à l'option de faire une nouvelle étape de

regroupement sur les projections ayant validé les critères de performance. En effet, le regroupement initial a pour visée de générer des groupes de comportement similaire parmi l'ensemble des projections. Le faire a posteriori induit un biais lié aux performances et ne permet pas d'être représentatif de l'ensemble des projections.

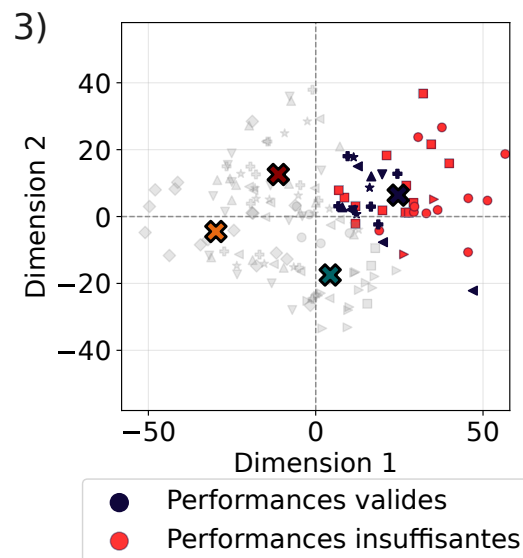


FIGURE 6 : Représentation en deux dimensions du filtrage des projections suivant leurs performances, exemple avec le groupe 2 (voir figure 5), les projections exclues sont en bleu pâle. Cette étape est propre à chaque groupe, les projections des autres groupes (en gris clair) ne sont pas prises en compte.

4. Pour s'assurer de la cohérence des projections au sein de chaque groupe, seules les projections qui sont dans la sphère de rayon correspondant à la **médiane des distances avec le centroïde** (point central du groupe) plus deux écarts-types sont conservées. Cette étape est relativement peu contraignante mais permet d'éviter de conserver des projections qui seraient fortement éloignées des autres points (figure 7).

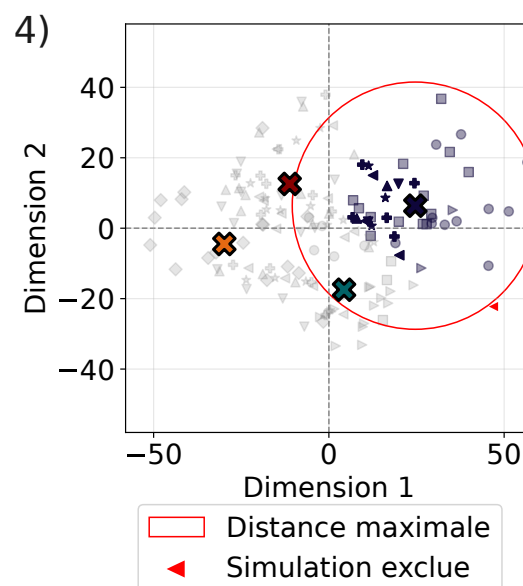


FIGURE 7 : Représentation en deux dimensions du filtrage des projections suivant leur distance avec le centroïde du groupe, le cercle rouge correspond à la distance maximale tolérée (médiane des distances plus deux écarts-types).

5. La dernière étape consiste à sélectionner une chaîne qui présente des contrastes avec les autres groupes. Pour cela, une approche dite "**MinMax**" est utilisée. La chaîne de modélisation retenue

comme narratif est celle qui présente le maximum de la plus petite distance à un autre centroïde. Elle est donc la projection qui, parmi les projections de son groupe, est la plus éloignée du centroïde le plus proche (figure 8).

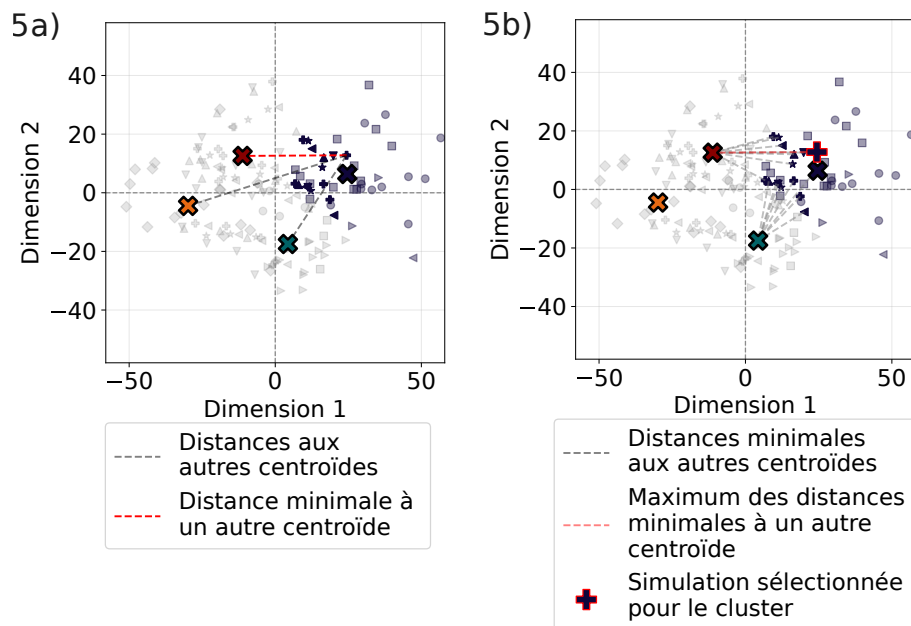


FIGURE 8 : Représentation en deux dimensions du processus de sélection du narratif hydrologique au sein d'un groupe, les projections en bleu translucide sont exclues de la sélection des narratifs lors des étapes précédentes. 5a) Calcul de la distance d'une projection à chacun des trois autres centroïdes (en pointillés gris) et identification de la plus faible (en pointillés rouges). 5b) Après identification de l'ensemble des distances minimales aux autres centroïdes (en pointillés gris), identification de la plus grande d'entre elles correspondant au narratif du groupe (en pointillés rouges).

Le centroïde n'est pas modifié en fonction des projections écartées au fil du processus car celui-ci traduit la dispersion initiale des projections qui sont considérées comme des futurs équiprobables. Un modèle avec bonne performance ne signifie pas qu'il sera fiable sous changement climatique, il est donc important d'être conservatif quand il s'agit d'identifier les principaux changements à venir (SAUQUET *et al.*, 2023). Les étapes 3, 4 et 5 sont effectuées distinctement pour chacun des groupes valides (figure 9).

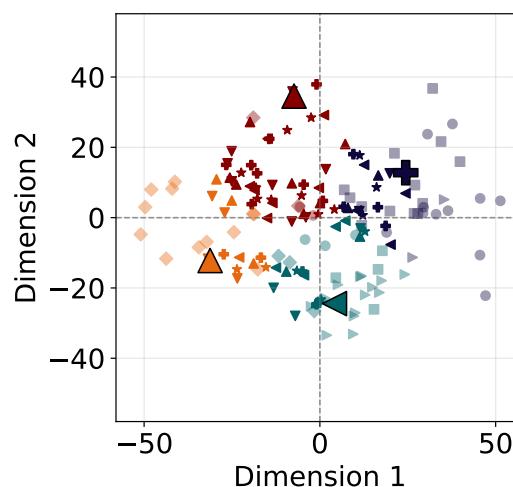


FIGURE 9 : Représentation en deux dimensions des narratifs sélectionnés (formes élargies) pour chacun des quatre groupes : les formes correspondent aux modèles hydrologiques suivant la figure 4 et les couleurs aux groupes définis en figure 5.

4 Traduire les changements

Cette méthodologie a été déployée suivant les trois niveaux de réchauffement et sur les 17 territoires de la [figure 3](#). Il s'agit alors de donner pleinement le sens de « narratifs » à ces chaînes de modélisation en associant à chacune d'entre elles un futur intelligible. Dans le but d'avoir une approche uniforme quel que soit le niveau de réchauffement ou le territoire, une valeur de changement de $\pm 15\%$ pour les trois indicateurs (changements en QA , $QJXA$ et $VCN10$) a été fixée pour distinguer quatre familles de changements ([tableau 4](#)).

Intensification des événements eXtrêmes (X)	Changement sur le $VCN10$ inférieur à -15% et sur le $QJXA$ supérieur à $+15\%$
Intensification des Etiages (E)	Changement sur le $VCN10$ inférieur à -15% (changement sur le $QJXA$ inférieur ou égal à $+15\%$)
Intensification des Crues (C)	Changement sur le $QJXA$ supérieur à $+15\%$ (changement sur le $VCN10$ supérieur ou égal à -15%)
Changements Modérés (M)	Changement sur le $VCN10$ supérieur ou égal à -15% et sur le $QJXA$ inférieur ou égal à $+15\%$

TABLEAU 4 : Les quatre familles de narratifs hydrologiques.

Néanmoins des doublons (voire des triplons) de familles de narratifs peuvent survenir pour un horizon et un territoire donnés. Avoir des narratifs qui appartiennent à une même famille est un signal important car il traduit un faisceau cohérent de projections détectant des changements marqués.

À l'échelle de la France hexagonale et de la Corse, il apparaît pour une France à $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ que seuls trois narratifs sont issus de la famille **X**, l'ensemble des narratifs étant réparti de manière relativement homogène entre les familles **E**, **C** et **M** ([figure 10](#)). En revanche, pour une France à $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$, les narratifs issus de la famille **M** tendent à se raréfier là où ceux appartenant aux familles **X** et **E** deviennent majoritaires. La famille **E** est la seule à couvrir l'ensemble du territoire sur les trois degrés de réchauffement traduisant un signal fort sur les basses eaux.

Il s'agit alors de pouvoir les départager au sein d'un horizon et pour un territoire donné selon leur niveau d'intensité. Parmi les familles dupliquées, des classements sont effectués selon les évolutions attendues. Le rang 1 correspond ainsi aux changements les plus significatifs suivant :

- **X** : classement selon $\Delta QJXA - \Delta VCN10$ pour illustrer l'intensification des événements extrêmes ;
- **E** : classement selon $-2 \Delta VCN10 - \Delta QA$ pour illustrer l'intensification des étiages et une diminution du débit moyen ;
- **C** : classement selon $2 \Delta QJXA + \Delta QA$ pour illustrer l'intensification des crues et une hausse du débit moyen ;
- **M** : classement selon $1/(|\Delta QA| + |\Delta QJXA| + |\Delta VCN10|)$ pour illustrer des changements limités.

Par exemple, pour un couple horizon-territoire donné, le narratif **X1** est plus intense sur les événements extrêmes que le narratif **X2** ou encore le narratif **M1** a des changements plus modérés que le narratif **M2**. Attention toutefois, ces numérotations ne sont représentatives que pour le couple horizon-territoire sélectionné, il n'y a pas de lien entre deux narratifs **E1** temporellement ou spatialement distincts.

Cette dénomination permet de rapidement identifier les principaux changements. D'une part le premier caractère permet de comparer les évolutions des narratifs entre les différents horizons et territoire. D'autre part, le second terme permet une gradation plus fine au sein d'un quartet de narratifs. Enfin, une phrase descriptive des évolutions des trois indicateurs a été ajoutées afin de décrire les changements, permettant d'entrer dans un niveau de détail supplémentaire.

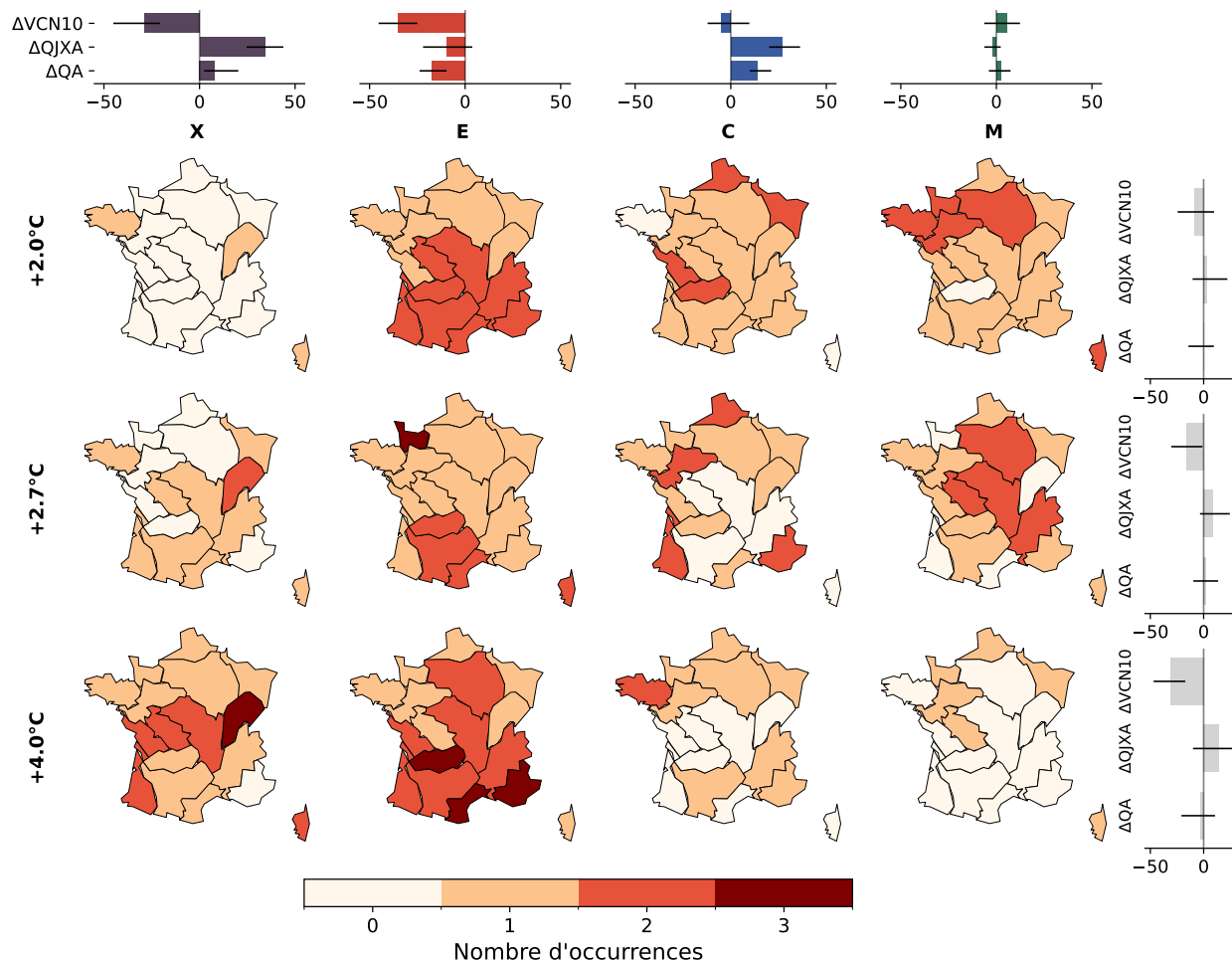


FIGURE 10 : Cartes de la France hexagonale et de la Corse représentant le nombre de narratifs appartenant à une famille pour les différents horizons par niveau de réchauffement pour chacun des territoires définis. Les histogrammes représentent la médiane des changements par rapport à la période 1991-2020 ainsi que les quantiles 0.25 et 0.75 (trait noir) pour chacune des familles (en haut) et pour chacun des degrés de réchauffement (à droite).

Ces descriptions sont générées suivant des seuils sur les changements. La première proposition de la phrase correspond à une tendance sur le débit moyen identifiée essentiellement à travers les changements en QA (tableau 5).

Débit moyen			
QA	QJXA	VCN10	Description
$5\% < \Delta QA$	$15\% < \Delta QJXA$	$\Delta VCN10 < -15\%$	"Augmentation généralisée des débits..."
$-15\% < \Delta QA$	$-15\% < \Delta QJXA$	$-15\% < \Delta VCN10$	"Diminution généralisée des débits..."
$15\% < \Delta QA$	-	-	"Débits annuels en hausse..."
$-15\% < \Delta QA$	-	-	"Débits annuels en baisse..."
$8\% < \Delta QA \leq 15\%$	-	-	"Débits plutôt à la hausse..."
$-15\% \leq \Delta QA < -8\%$	-	-	"Débits plutôt à la baisse..."
$-8\% \leq \Delta QA \leq 8\%$	-	-	"Peu de changements sur le débit moyen..."

TABEAU 5 : Première proposition des descriptifs suivant les différents indicateurs.

La seconde proposition de la phrase caractérise les changements sur les extrêmes (tableau 6). Si les hautes eaux et les basses eaux s'intensifient de façon similaire, autrement dit si le changement sur le $QJXA$ est inverse au changement sur le $VCN10$, une proposition commune est générée (tableau 6.1). Autrement, une description spécifique sur les crues (tableau 6.2) et une autre sur les étiages (tableau 6.3) sont générées et combinées. Si le changement sur un extrême est négligeable par rapport à l'autre, la proposition de ce dernier est écartée.

6.1 Intensifications similaires des extrêmes			
QA	QJXA	VCN10	Description
-	$35\% < \Delta QJXA$	$\Delta VCN10 < -35\%$	"... extrêmes beaucoup plus sévères."
-	$35 < \Delta QJXA$	$-35\% \leq \Delta VCN10 < -15\%$	"... extrêmes plus sévères encore plus marqués sur les crues."
-	$15 < \Delta QJXA \leq 35\%$	$\Delta VCN10 < -35\%$	"... extrêmes plus sévères encore plus marqués sur les étiages."
-	$15 < \Delta QJXA \leq 35\%$	$-35\% \leq \Delta VCN10 < -15\%$	"... extrêmes plus sévères."
-	$-5\% \leq \Delta QJXA \leq 5\%$	$-5\% \leq \Delta VCN10 \leq 5\%$	"... changements modérés sur les extrêmes."
-	$-15\% \leq \Delta QJXA < -5\%$	$5\% < \Delta VCN10 \leq 15\%$	"... extrêmes légèrement moins prononcés."
-	$\Delta QJXA < -15\%$	$15\% < \Delta VCN10$	"... extrêmes moins prononcés."
6.2 Caractérisation des crues			
QA	QJXA	VCN10	Description
-	$35\% < \Delta QJXA$	-	"... crues beaucoup plus sévères..."
-	$20\% < \Delta QJXA \leq 35\%$	-	"... crues plus sévères..."
-	$5\% < \Delta QJXA \leq 20\%$	-	"... crues légèrement plus sévères..."
-	$-15\% \leq \Delta QJXA < -5\%$	-	"... crues légèrement moins prononcées..."
-	$\Delta QJXA < -15\%$	-	"... crues moins prononcées..."
6.3 Caractérisation des étiages			
QA	QJXA	VCN10	Description
-	-	$\Delta VCN10 < -35\%$	"... étiages beaucoup plus sévères..."
-	-	$-35\% \leq \Delta VCN10 < -20\%$	"... étiages plus sévères..."
-	-	$-20\% \leq \Delta VCN10 < -5\%$	"... étiages légèrement plus sévères..."
-	-	$5\% \leq \Delta VCN10 < 15\%$	"... étiages légèrement moins prononcés..."
-	-	$15\% \leq \Delta VCN10$	"... étiages moins prononcés..."

TABLEAU 6 : Seconde proposition des descriptifs suivant les différents indicateurs. Si une tendance inverse entre crues et étiages est identifiée, une description commune est générée (tableau du haut), autrement, des descriptions spécifiques pour chacun des extrêmes est générées (tableaux du bas).

À titre d'exemple, sur la région K pour une France à +2,7 °C, quatre narratifs sont sélectionnés (tableau 7). Deux narratifs "Modérés" sont identifiés ainsi qu'un narratif "Extrêmes" et un de la famille "Étiages". Ces

deux derniers étant les seuls représentant de leur famille de changement, ils prennent le rang 1. Pour les narratifs issus de la famille **M**, la chaîne de modélisation NorESM1-M REMO ADAMONT EROS présente des changements plus modérés que la chaîne NorESM1-M WRF381P ADAMONT SMASH, elle prend donc le rang 1 et cette dernière le rang 2. Elles sont respectivement nommées **M1** et **M2**. Comme mentionné précédemment, ce classement est propre à chaque horizon et territoire, seules les lettres sont définies sur des critères spatio-temporels communs.

Chaînes hydroclimatiques	Delta QA	Delta QJXA	Delta VCN10	Nom
NorESM1-M REMO ADAMONT EROS	-1.2%	-0.5%	-11%	M1
NorESM1-M WRF381P ADAMONT SMASH	14%	9.9%	8.8%	M2
IPSL-CM5A-MR RCA4 ADAMONT MORDOR-SD	-9.7%	1.7%	-55%	E1
EC-EARTH HadREM3-GA7 ADAMONT EROS	24%	38%	-20%	X1

TABLEAU 7 : Exemple des caractéristiques des narratifs retenus pour la région K pour une France à +2,7 °C.

Néanmoins, comme on peut le constater sur les deux narratifs de la famille **M**, les comportements sont assez différents. Le premier indique très peu de changements sur le *QA* et le *QJXA* ainsi qu'une légère diminution du *VCN10*. Le second identifie une légère hausse sur les trois indicateurs. Les descriptions transcrivent précisément ces caractéristiques propres à chaque narratif (tableau 8).

Nom	Description QA	Description QJXA	Description VCN10
M1	Peu de changements sur le débit moyen	-	étiages légèrement plus sévères
M2	Débits plutôt à la hausse	crues légèrement plus sévères	étiages légèrement moins prononcés
E1	Débits plutôt à la baisse	-	étiages beaucoup plus sévères
X1	Débits annuels en hausse	extrêmes plus sévères encore plus marqués sur les crues	

TABLEAU 8 : Exemple des descriptions des narratifs retenus pour la région K pour une France à +2,7 °C.

5 Conclusion

Dans le cadre de l'approche par niveau de réchauffement préconisée par la TRACC, une méthode par narratif hydrologique a été mise en place. Elle se place dans le prolongement du projet **Explore2** qui a permis de sélectionner un ensemble de projections hydrologiques tout en proposant quatre narratifs climatiques sur l'ensemble de la France hexagonale et la Corse.

Ces narratifs ne permettaient pas de prendre compte l'ensemble des changements du point de vue hydrologique ni les disparités territoriales qui sont par ailleurs plus marquées sur les enjeux hydrologiques que climatiques.

L'Agence de l'Eau Loire-Bretagne a, dans le cadre de l'étude HMUC axe Loire-Allier, demandé à INRAE de penser une méthodologie permettant de sélectionner des narratifs hydrologiques représentatifs de la disparité des projections.

Les changements médians en *QA*, *QJXA* et *VCN10*, pour un couple niveau de réchauffement - territoire donné, sont divisés en quatre groupes de changements via un regroupement par K-moyennes. Au sein de chacun de ses groupes, une projection est sélectionnée en tant que narratif suivant la proximité avec les autres projections de comportements similaires et la distance avec les autres groupes. L'objectif étant de choisir des chaînes de modélisation représentatives de la dispersion de l'ensemble des projections.

Des critères sur la représentativité spatiale ainsi que sur les performances ont été mis en place afin de prévenir la sélection de chaînes de modélisation non pertinentes. Néanmoins, ces critères sont déterminés sur les stations de référence qui disposent de débits peu anthropisés, aux chroniques longues et de bonne qualité. Certains territoires comme la Corse, la Vendée ou la Charente-Maritime en sont particulièrement peu pourvus, rendant cette étape incomplète.

Une fois les chaînes de modélisation servant de narratifs sélectionnées, il a fallu les nommer de telle sorte à pouvoir identifier facilement les changements qu'elles traduisent. Pour cela, quatre grandes familles de changements ont été identifiées :

- la famille **X** : intensification des événements extrêmes ;
- la famille **E** : intensification des étiages ;
- la famille **C** : intensification des crues ;
- la famille **M** : changements modérés.

À ces lettres est associé un chiffre correspondant au rang du narratif au sein du quartet pour un territoire et un niveau de réchauffement donnés. Ces rangs indiquent l'intensification des changements pour les familles **X**, **E** et **C** ; et la modération des changements pour la famille **M**. Enfin, une phrase de description est associée à chaque narratif afin de transcrire de manière exhaustive les changements en *QA*, *QJXA* et *VCN10*.

Cette dénomination Lettre-Chiffre Description permet de couvrir les différentes échelles. La lettre est définie au niveau national, le chiffre au niveau du groupement de régions hydrographiques et la description quantifie les changements locaux.

Les chaînes de modélisation retenues en tant que narratifs par région et par niveau de réchauffement sont disponibles sur le dataverse d'**Explore2** (HÉRAUT et al., 2025b) ainsi que des fiches résultats par sous-région hydrographique (HÉRAUT et al., 2025a). Une interface web sera également proposée de telle sorte à pouvoir visualiser les changements en *QA*, *QJXA* et *VCN10* suivant les différents niveaux de réchauffement et régions hydrographiques.

6 Références

- CALMEL, B. et J.-P. VIDAL (2025). *Étude Hydrologie, Milieux, Usages et Climat sur l'axe Loire. Volet Climat*. Rapport HMUC. INRAE.
- HÉRAUT, L. et E. SAUQUET (2024). *Fiches de diagnostic régional des modèles hydrologiques de surface du projet Explore2*. Version V2. DOI : [10.57745/LNTOKL](https://doi.org/10.57745/LNTOKL).
- HÉRAUT, L., E. SAUQUET, B. CALMEL et J.-P. VIDAL (2025a). *Analyse des débits et de la recharge potentielle des aquifères par niveau de réchauffement et par secteur hydrographique – Fiche de synthèse*. DOI : [10.57745/QDCSBZ](https://doi.org/10.57745/QDCSBZ).
- HÉRAUT, L., E. SAUQUET, A. TORREMOCHA, B. CALMEL et J.-P. VIDAL (2025b). *Sélections de narratifs hydrologiques (narraTRACC) par niveau de réchauffement sur chaque secteur hydrographique*. DOI : [10.57745/KAHIWJ](https://doi.org/10.57745/KAHIWJ).
- PNACC3 (2025). Document de présentation. Gouvernement. 388 p.
- ROUSSEUX, P. J. (1987). « Silhouettes : A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis ». In : *Journal of Computational and Applied Mathematics* 20, p. 53-65. DOI : [10.1016/0377-0427\(87\)90125-7](https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7).
- SANDRE (2002). *Référentiel hydrographique*. Rapport technique. 49 p.
- SAUQUET, E. et L. HÉRAUT (2024). *Notice de lecture des fiches « diagnostic » des modèles hydrologiques*. Version V1. DOI : [10.57745/MDHS0D](https://doi.org/10.57745/MDHS0D).
- SAUQUET, E., J. VERGNES, G. THIREL et L. STROHMENGER (2022). *Identification de stations hydrométriques et piézomètres pour l'évaluation des modélisations hydrologiques et hydrogéologiques*. Rapport du projet Explore2. INRAE & BRGM. 32 p. DOI : [10.57745/DE9SPE](https://doi.org/10.57745/DE9SPE).
- SAUQUET, E., H. L., B. J., A. REVERDY, L. STROHMENGER et J.-P. VIDAL (2023). *Diagnostic des modèles hydrologiques : des données aux résultats*. Rapport du projet Explore2. INRAE & IGE. 130 p. DOI : [10.57745/S6PQXD](https://doi.org/10.57745/S6PQXD).
- SOUBEYROUX, J.-M., B. DUBUISSON, S. BERNUS, R. SAMACOÏTS, F. ROUSSET, M. SCHNEIDER, A. DROUIN, T. MADEC, M. TARDY et L. CORRE (nov. 2024). *À quel climat s'adapter en France selon la TRACC ?* Rapp. tech. Météo-France.
- SOUBEYROUX, J.-M., S. BERNUS, B. DUBUISSON, A. DROUIN, T. MADEC, F. ROUSSET, R. SAMACOÏTS, M. SCHNEIDER, M. TARDY, F. TOCQUER, L. CORRE, S. MORIN, A. RIBES et S. SOMOT (mars 2025). *À quel climat s'adapter en France selon la TRACC ? partie 2*. Rapp. tech. Météo-France, p. 46.
- STROHMENGER, L., E. SAUQUET, C. BERNARD, J. BONNEAU, F. BRANGER, A. BRESSON, P. BRIGODE, R. BUZIER, O. DELAIGUE, A. DEVERS, G. EVIN, M. FOURNIER, S.-C. HSU, S. LANINI, A. de LAVENNE, T. LEMAITRE-BASSET, C. MAGAND, G. MENDOZA GUIMARÃES, M. MENTHA, S. MUNIER, C. PERRIN, T. PODECHARD, L. ROUCHY, M. SADKI, M. SOUTIF-BELLENGER, F. TILMANT, Y. TRAMBLAY, A.-L. VÉRON, J.-P. VIDAL et G. THIREL (2023). « On the visual detection of non-natural records in streamflow time series : challenges and impacts ». In : *Hydrology and Earth System Sciences* 27.18, p. 3375-3391. DOI : [10.5194/hess-27-3375-2023](https://doi.org/10.5194/hess-27-3375-2023).