



**NOTICE DE LECTURE  
DES FICHES « DIAGNOSTIC »  
DES MODELES HYDROLOGIQUES**

**Eric SAUQUET, INRAE**

**13/11/2023**

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'ici 2024, 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.

<b>Nom du projet</b>	<b>Explore2 : Anticiper les évolutions climatiques et hydrologiques en France</b>
Nom du rapport	Notice de lecture des fiches « diagnostic » des modèles hydrologiques
Auteur(s)	Eric SAUQUET, INRAE
Numéro de version	0
Date contractuelle de remise du livrable	01/07/2023
Date effective de remise du livrable	21/11/2023
Statut du document	version provisoire/ <del>version finale</del>
Accès en ligne	libre/ <del>restreint/confidentiel</del>
Mots-clés (5 maximum)	Modélisation hydrologique, Critères de performance, Observations

## Table des matières

1	Introduction .....	7
1.1	Objectif du document.....	7
1.2	Principes génériques retenus pour le diagnostic .....	7
1.3	Support de synthèse.....	10
2	Analyses et graphiques .....	11
2.1	Fiche de diagnostic « station » - Hydrologie de surface .....	11
2.2	Fiche de diagnostic « région » - Hydrologie de surface .....	15
2.3	Fiche de diagnostic « région » - Hydrologie souterraine .....	18
3	Synthèse.....	22
3.1	Hydrologie de surface.....	22
3.2	Hydrologie souterraine.....	23
4	Recommandations .....	24
5	Références .....	25

## Résumé

Un diagnostic des modèles hydrologiques mobilisés dans le projet Explore2 a fait l'objet d'un rapport détaillé (Sauquet *et al.*, 2023). L'objectif n'était pas de mettre en compétition les modèles hydrologiques mais bien d'aider, autant que possible, à faire un choix éclairé sur le groupement de modèles à privilégier pour caractériser le devenir des caractéristiques hydrologiques d'un cours d'eau sous un climat modifié. Ces diagnostics reposent sur une sélection de critères numériques qui permettent d'évaluer la capacité des modèles à reconstituer les différentes phases des régimes hydrologiques et à fournir des débits fiables en extrapolation spatiale (en dehors des points d'évaluation). Des fiches de synthèse ont été établies aux points d'évaluation (uniquement pour les débits) et à l'échelle régionale (pour les débits et les hauteurs piézométriques) et sont téléchargeables sur le portail DRIAS les futurs de l'eau (<https://www.drias-eau.fr>).

Ce document a pour objectifs :

- d'exposer brièvement le contenu technique des fiches « diagnostic » et de faciliter l'interprétation des graphiques et critères numériques calculés,
- d'identifier les secteurs et les types de cours d'eau où les modèles semblent moins performants.

## Liste des figures

Figure 1 : Exemple de fiche de synthèse « station » pour l'hydrologie de surface. ....	11
Figure 2 : Exemples de fiche de synthèse « région » avec des regroupements par région hydrographique (a) et par régime (b) pour l'hydrologie de surface. ....	15
Figure 3 : Exemple de fiche de synthèse pour l'hydrologie souterraine. ....	19
Figure 4 : Proportion d'avertissements, toutes stations et tous modèles confondus. ....	23

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Critères de diagnostic pour l'hydrologie de surface (définition, plage de variation autorisée...) . 8

Tableau 2 : Critères de diagnostic pour l'hydrologie souterraine (définition, plage de variation autorisée...) .9

# 1 Introduction

## 1.1 Objectif du document

Un diagnostic des modèles hydrologiques mobilisés dans le projet Explore2 a fait l'objet d'un rapport détaillé (Sauquet *et al.*, 2023). L'objectif n'était pas de mettre en compétition les modèles hydrologiques mais bien d'aider, autant que possible, à faire un choix éclairé sur le groupement de modèles à privilégier pour caractériser le devenir des caractéristiques hydrologiques d'un cours d'eau sous un climat modifié.

Ces diagnostics reposent sur une sélection de critères numériques qui permettent d'évaluer la capacité des modèles à reconstituer les différentes phases des régimes hydrologiques et à fournir des débits fiables en extrapolation spatiale (en dehors des points d'évaluation).

Ce document a pour objectifs :

- D'exposer brièvement le contenu technique des fiches « diagnostic » et de faciliter l'interprétation des graphiques et critères numériques calculés sur lesquels le diagnostic se fonde,
- D'identifier les secteurs et les types de cours d'eau où les modèles semblent moins performants.

## 1.2 Principes génériques retenus pour le diagnostic

Les choix et hypothèses qui suivent ont été retenus pour élaborer le diagnostic :

- Les sorties de débit ou de niveau piézométrique des modèles alimentés par la réanalyse SAFRAN (Vidal *et al.*, 2010) ont été confrontées aux données de référence sur un ensemble de points (stations hydrométriques et piézomètres) d'évaluation pré-établi (Sauquet *et al.*, 2022). Certains modèles proposent d'autres variables non examinées ici ; le diagnostic est donc de fait partiel.
- La littérature abonde de critères mesurant la performance de modèles hydrologiques et il n'y a pas de choix définitif et objectif de critères et les critères sont toujours questionnés. **Nous avons privilégié une analyse multi-critère**, c'est-à-dire une combinaison de critères, sélectionnés sur la base de discussions entre partenaires et décrivant les différentes phases du régime des eaux de surface ou des eaux souterraines.
- Quatorze critères ont été sélectionnés et classés par grande catégorie pour l'hydrologie de surface et quatre pour l'hydrologie souterraine.
- Sur la base des pratiques des modélisateurs, un intervalle de variation pour chaque critère numérique correspondant à une reconstitution acceptable a été défini. Dans le cas de valeurs en dehors de cet intervalle, des avertissements sont générés automatiquement dans les fiches de diagnostic à partir de phrases « type » pré-construites.
- Les métadonnées des points de diagnostic sont issues de l'Hydroportail (<https://hydro.eaufrance.fr>) et de la base de données ADES (<https://ades.eaufrance.fr>).

Critère numérique	Catégorie	Nom	Aspect examiné	Valeur optimale [Intervalle de valeurs acceptables]
<b>KGEV</b>	Performance Ⓢ	Critère d'efficacité de Kling Gupta calculé sur des séries temporelles de racines carrées des débits	Intensité/dynamique/saisonnalité	1 [1 ; 0.5]
<b>Biais</b>		Biais relatif	Intensité	0 [-0.2 ; 0.2]
<b>E<sub>R, DJF</sub></b> <b>E<sub>R, JJA</sub></b>	Sensibilité à la variabilité climatique Ⓢ	Rapport des élasticités des débits à la pluie liquide en hiver DJF et en été JJA	Sensibilité	1 [0.5 ; 2]
<b>E<sub>T, DJF</sub></b> <b>E<sub>T, JJA</sub></b>		Rapport des élasticités des débits à la température en hiver DJF et en été JJA		
<b>Q10</b>	Hautes Eaux Ⓢ	Ecart relatif de quantile de débit de fréquence au dépassement 10%	Intensité	0 [-0.2 ; 0.2]
<b>medtQJXA</b>		Ecart de date médiane des débits journaliers maximaux annuels QJXA	Saisonnalité	0 [- 1 mois ; 1 mois]
<b>aCDC</b>	Moyennes Eaux Ⓢ	Rapport des pentes du segment entre les quantiles des débits journaliers à 33 % et 66 % de la courbe des débits classés	Dynamique	1 [0.5 ; 2]
<b>αQA</b>		Rapport des pentes de Sen calculée sur la série des débits annuels	Dynamique (long terme)	1 [0.5 ; 2]
<b>Q90</b>	Basses Eaux Ⓢ	Ecart relatif de quantile de débit de fréquence au dépassement 90%	Intensité	0 [-0.8 ; 0.8]
<b>medtVCN10</b>		Ecart de date médiane des débits moyens sur 10 jours minimaux annuels VCN10	Saisonnalité	0 [- 1 mois ; 1 mois]
<b>RAT<sub>T</sub></b>		Test de robustesse (Nicolle <i>et al.</i> , 2021) à une variation de température de l'air		FAUX
<b>RAT<sub>R</sub></b>		Test de robustesse (Nicolle <i>et al.</i> , 2021) à une variation de précipitations		FAUX

Tableau 1 : Critères de diagnostic pour l'hydrologie de surface (définition, plage de variation autorisée...).

Critère numérique	Catégorie	Nom	Aspect examiné	Valeur optimale [Intervalle de valeurs acceptables]
<b>NSE<sub>biais</sub></b>	Performance Ⓢ	Coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe calculé sur les niveaux piézométriques soustraits de la moyenne annuelle	Intensité/dynamique /saisonnalité	1 [1 ; 0.5]
<b>NSE<sub>ips</sub></b>		Coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe entre l'Indicateur Piézomètre Standardisé (IPS) simulé et l'IPS observé (Seguin et al., 2019)	Intensité/dynamique /saisonnalité	1 [1 ; 0.5]
<b>r</b>		Coefficient de corrélation	Intensité/dynamique /saisonnalité	1 [1 ; 0.5]
<b>Biais<sub>moy</sub></b>		Biais des moyennes, différence entre les moyennes des données simulées et de référence	Intensité	0 [-2 m ; 2 m]

Tableau 2 : Critères de diagnostic pour l'hydrologie souterraine (définition, plage de variation autorisée...).

### 1.3 Support de synthèse

---

Des fiches de synthèse ont été établies aux points d'évaluation (uniquement pour les débits) et à l'échelle régionale (pour les débits et les hauteurs piézométriques) et sont téléchargeables sur le portail DRIAS *les futurs de l'eau* (<https://www.drias-eau.fr>). Elles partagent la même structure :

- un en-tête,
- un ensemble de graphiques représentant des séries et les résultats des critères sélectionnés, et
- une légende accompagnée de commentaires ou de messages d'avertissements.

## 2 Analyses et graphiques

### 2.1 Fiche de diagnostic « station » - Hydrologie de surface

Un exemple de fiche de diagnostic « station » est présenté ici :

#### K298191001 - La Dore à Dorat

Région hydrographique : Loire

Superficie : 1523 km<sup>2</sup>

Altitude : 310 m

X = 736988 m (Lambert93)

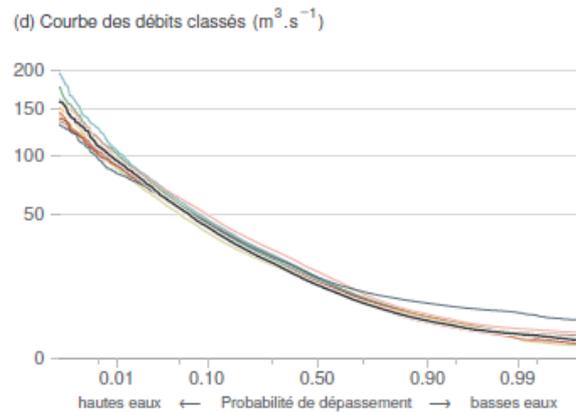
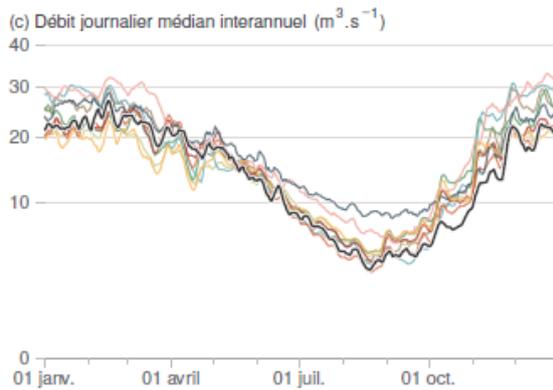
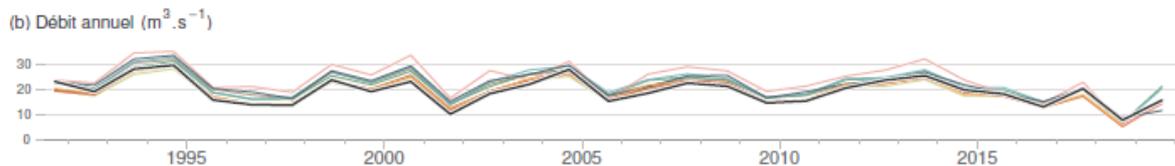
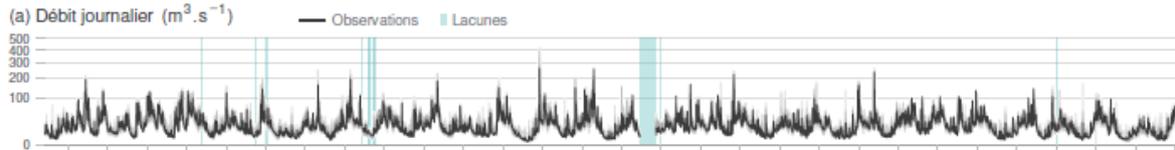
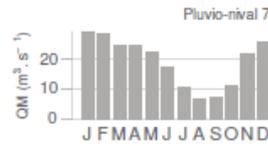
Y = 6532518 m (Lambert93)

Date de début : 01/06/1991

Date de fin : 31/12/2019

Disponibilité : 29 ans

Taux de lacunes : 2 %



#### (e) Critères de diagnostic

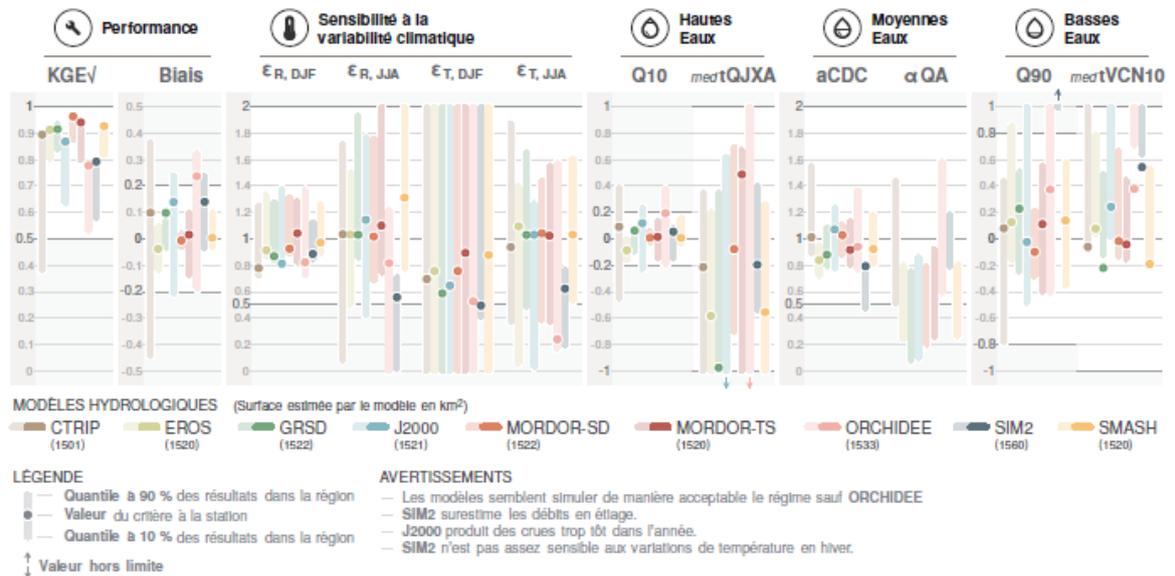


Figure 1 : Exemple de fiche de synthèse « station » pour l'hydrologie de surface.

• **L'en-tête :**

Code hydrographique de la station à dix caractères, nom de la station (rivière et lieu) et région hydrographique définie par le Système d'Information sur l'Eau du Sandre à laquelle elle appartient

**K298191001 - La Dore à Dorat**

Région hydrographique : Loire

Superficie : 1523 km<sup>2</sup>

Altitude : 310 m

X = 736988 m (Lambert93)

Y = 6532518 m (Lambert93)

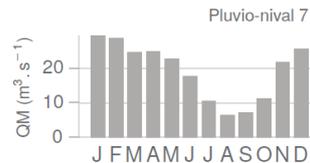
Date de début : 01/06/1991

Date de fin : 31/12/2019

Disponibilité : 29 ans

Taux de lacunes : 2 %

Localisation de la station et contour de son bassin versant

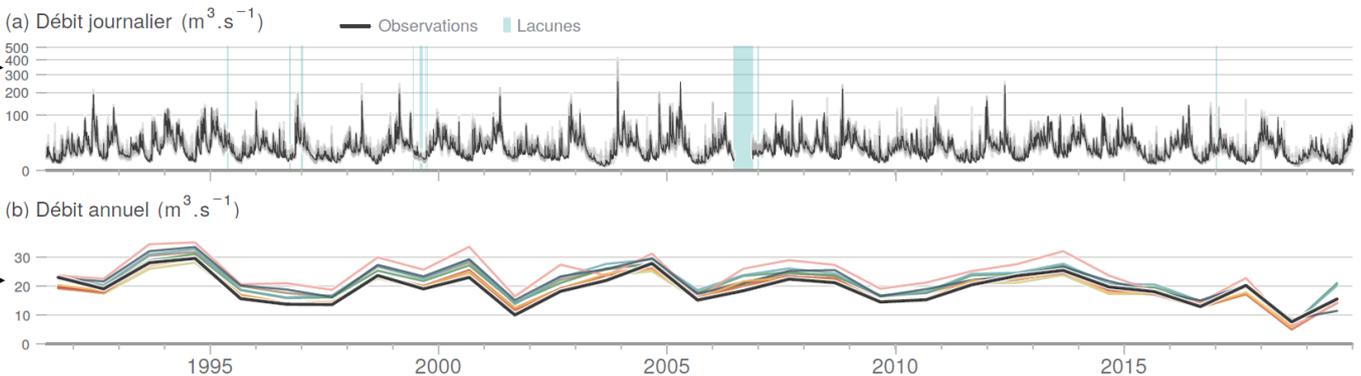


Métadonnées sur le point de diagnostic

Hydrogramme des douze débits mensuels moyens et régime hydrologique associé selon (Sauquet *et al.*, 2008)

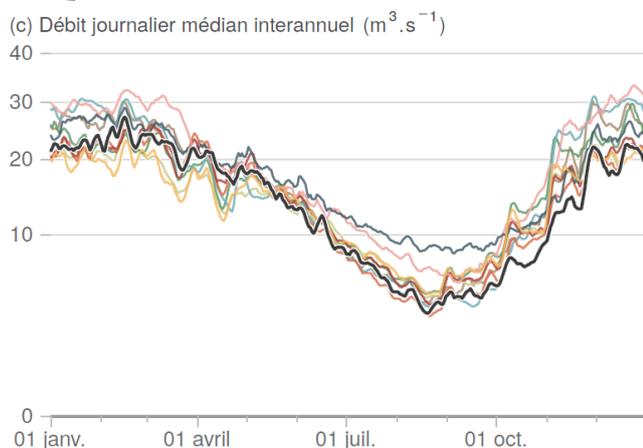
• **Les représentations graphiques :**

Hydrogramme des débits journaliers de référence en noir et des débits journaliers simulés sans distinction de modèles en gris. Les périodes de lacune sont indiquées en cyan. Les années doivent être lues sur l'axe des abscisses du graphique suivant (b). L'axe des ordonnées est en racine carrée



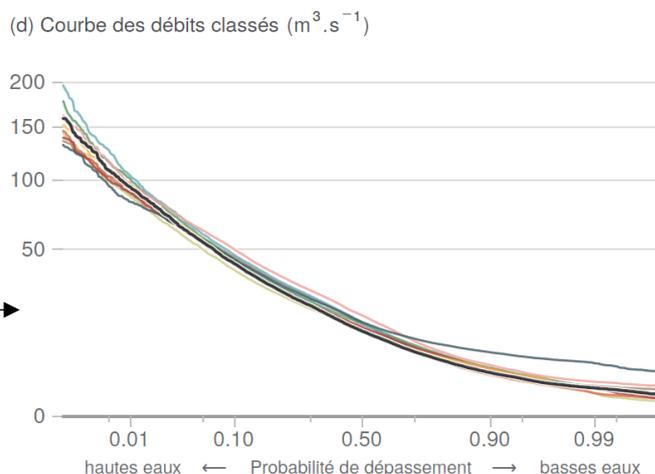
Hydrogrammes des débits annuels de référence **en noir** et ceux simulés par chaque modèle (en couleur)

Hydrogramme des débits journaliers médians interannuels, lissés sur cinq jours



L'axe des ordonnées est en racine carrée des débits

Courbes des débits classés (CDC)

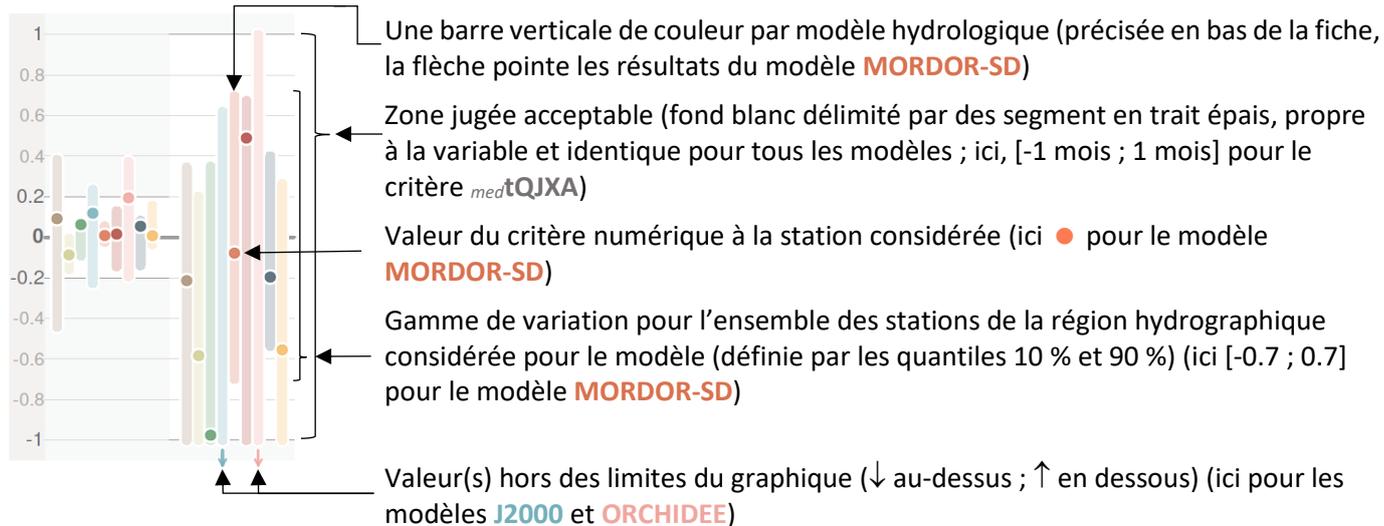


L'axe des abscisses a subi une transformation des fréquences au non dépassement (selon la loi normale centrée réduite) pour dilater les valeurs des hautes et basses eaux

Les graphiques (e) présentent les résultats des douze critères numériques regroupés par catégorie. Ces graphiques permettent de **comparer les comportements des modèles hydrologiques** à la station, et aussi de **mesurer en quoi les performances à cette station se distinguent de celles du modèle sur les autres points de référence** de la région hydrographique. Les tests de robustesse **RAT** ne font pas l'objet de représentation graphique. Leurs résultats apparaissent dans les avertissements en bas de page.

 **Hautes Eaux** ← **Catégorie de critère numérique**

**Q10 med tQJXA** ← **Nom du critère numérique**



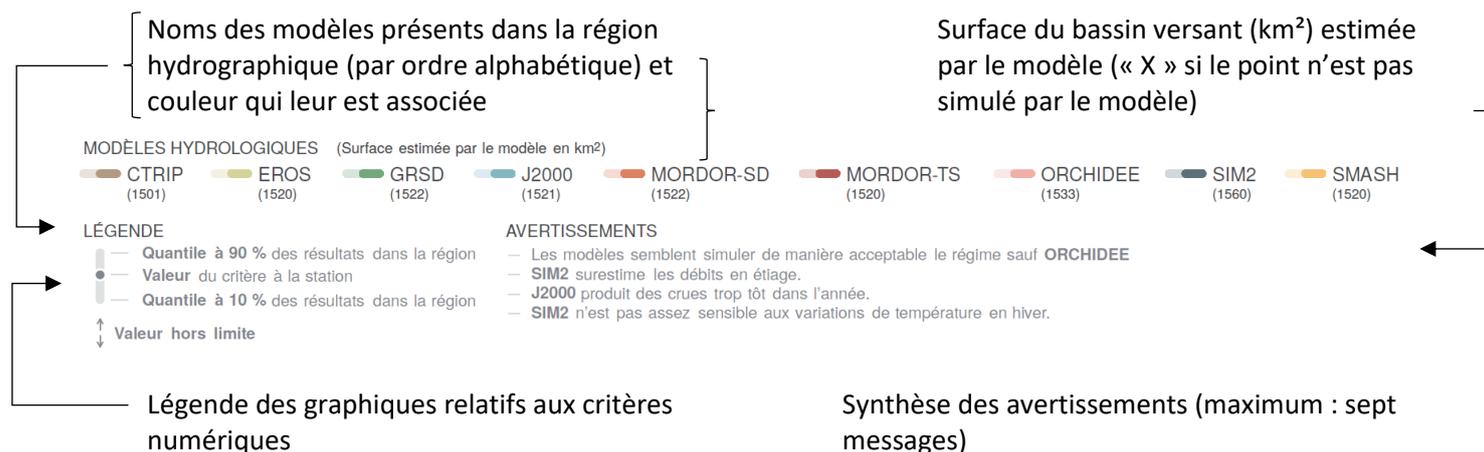
**Attention :**

- Chaque critère numérique possède son propre axe des ordonnées et les zones délimitées par des traits horizontaux épais sont celles qui déclenchent des avertissements. Une graduation en gras sur l'axe

des ordonnées permet de repérer les limites des intervalles à l'intérieur desquels la reconstitution est jugé satisfaisante.

- Sur les fiches, le focus est fait sur le critère numérique  $\alpha QA$  sur la pente de Sen calculée sur les débits annuels aux stations pour lesquelles le test de Mann-Kendall est significatif sur les débits de référence (risque à 10 %). Un point est positionné sur la fiche « station » si la tendance sur les débits de référence y est significative.

## • La légende



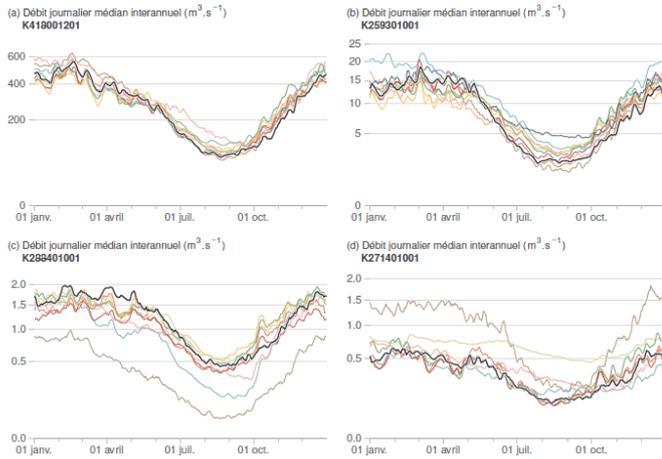
## 2.2 Fiche de diagnostic « région » - Hydrologie de surface

Deux types de fiches de diagnostic « région » ont été élaborés : un premier ensemble s'appuie sur des regroupements de station de référence par région hydrographique et le second sur des regroupements de ces mêmes stations par régime hydrologique. Leur contenu diffère par les informations fournies en-tête :

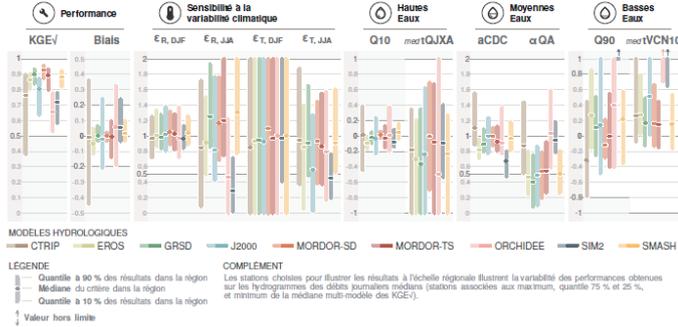
### Loire - K

92 stations de référence

Superficie minimale : 64 km<sup>2</sup>  
Superficie maximale : 35654 km<sup>2</sup>  
Altitude minimale (station) : 76 m  
Altitude maximale (station) : 1136 m



(e) Critères de diagnostic

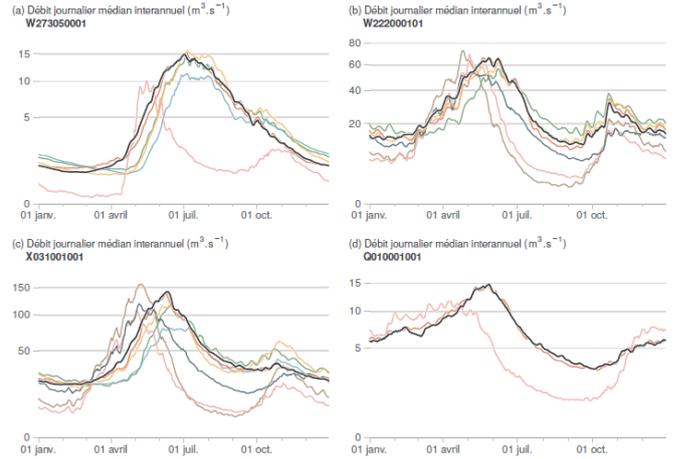
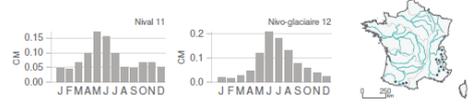


(a)

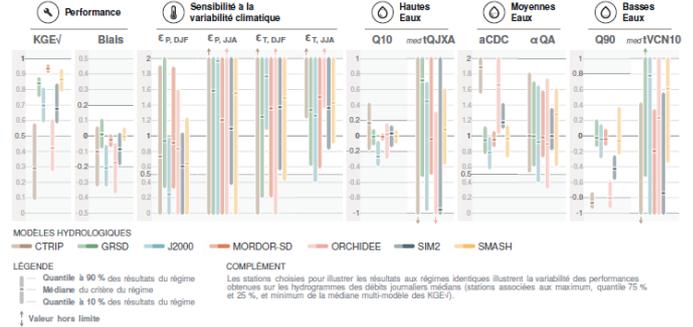
### Nival & nivo-glaciaire

28 stations de référence

Superficie minimale : 67 km<sup>2</sup>  
Superficie maximale : 11714 km<sup>2</sup>  
Altitude minimale (station) : 170 m  
Altitude maximale (station) : 2151 m



(e) Critères de diagnostic



(b)

Figure 2 : Exemples de fiche de synthèse « région » avec des regroupements par région hydrographique (a) et par régime (b) pour l'hydrologie de surface.

• **Les en-têtes**

Pour les fiches de synthèse par *région hydrographique* :

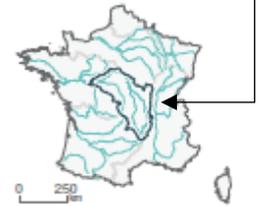
- Nom de la région hydrographique et première lettre du code dans le Système d'Information sur l'Eau du Sandre
- Nombre de stations concernées

**Loire - K**  
92 stations de référence

- Superficie minimale : 64 km<sup>2</sup>
- Superficie maximale : 35654 km<sup>2</sup>
- Altitude minimale (station) : 76 m
- Altitude maximale (station) : 1136 m

Statistiques des stations concernées

Contour de la région hydrographique



Pour les fiches de synthèse par *régime hydrologique* :

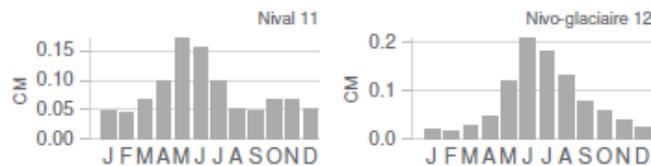
- Nom du régime hydrologique (Sauquet *et al.*, 2008)
- Nombre de stations concernées

**Nival & nivo-glaciaire**  
28 stations de référence

- Superficie minimale : 67 km<sup>2</sup>
- Superficie maximale : 11714 km<sup>2</sup>
- Altitude minimale (station) : 170 m
- Altitude maximale (station) : 2151 m

Statistiques des stations concernées

Localisation des stations concernées sur une carte de France

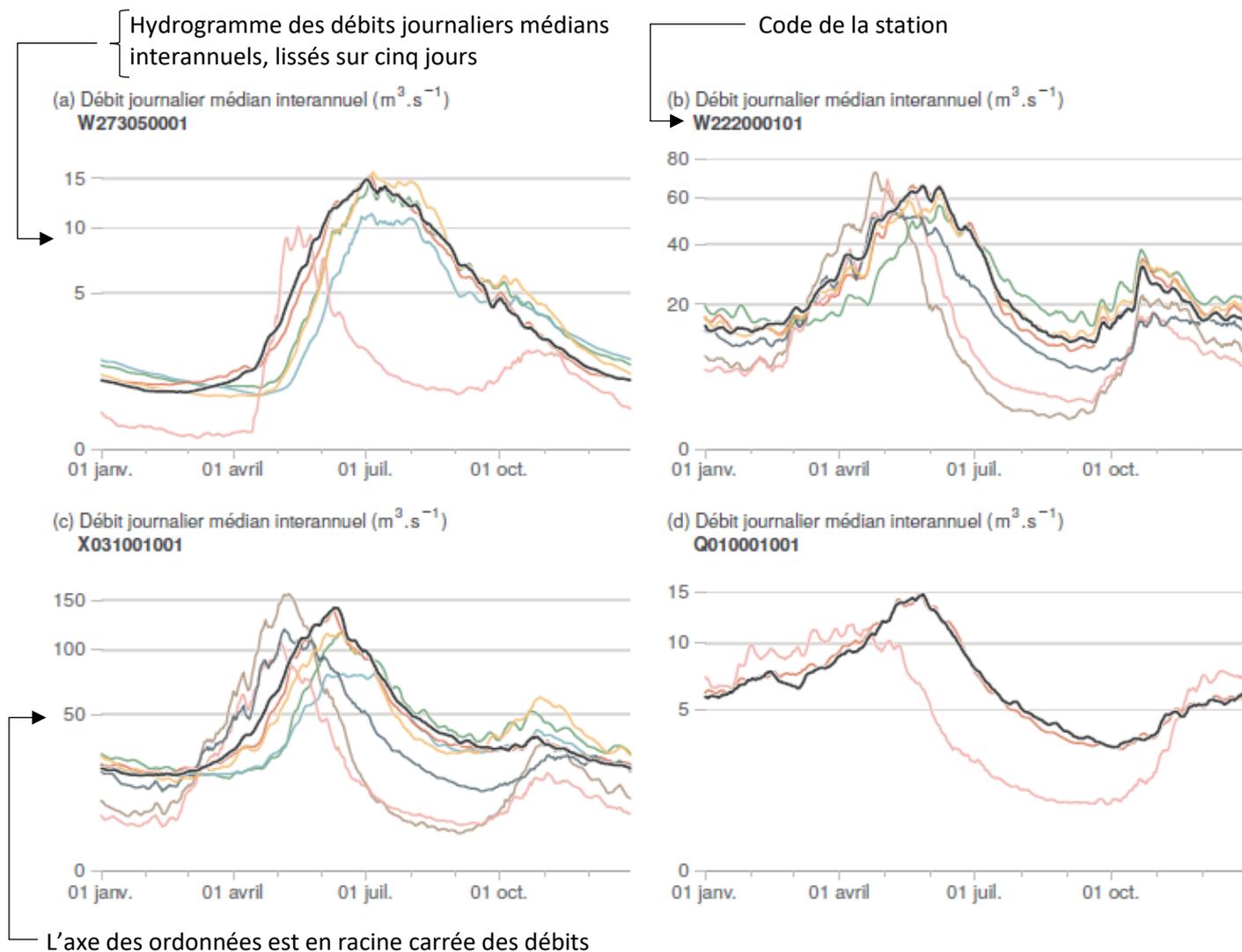


Hydrogrammes des médianes des douze coefficients mensuels de débit CM, toutes stations confondues

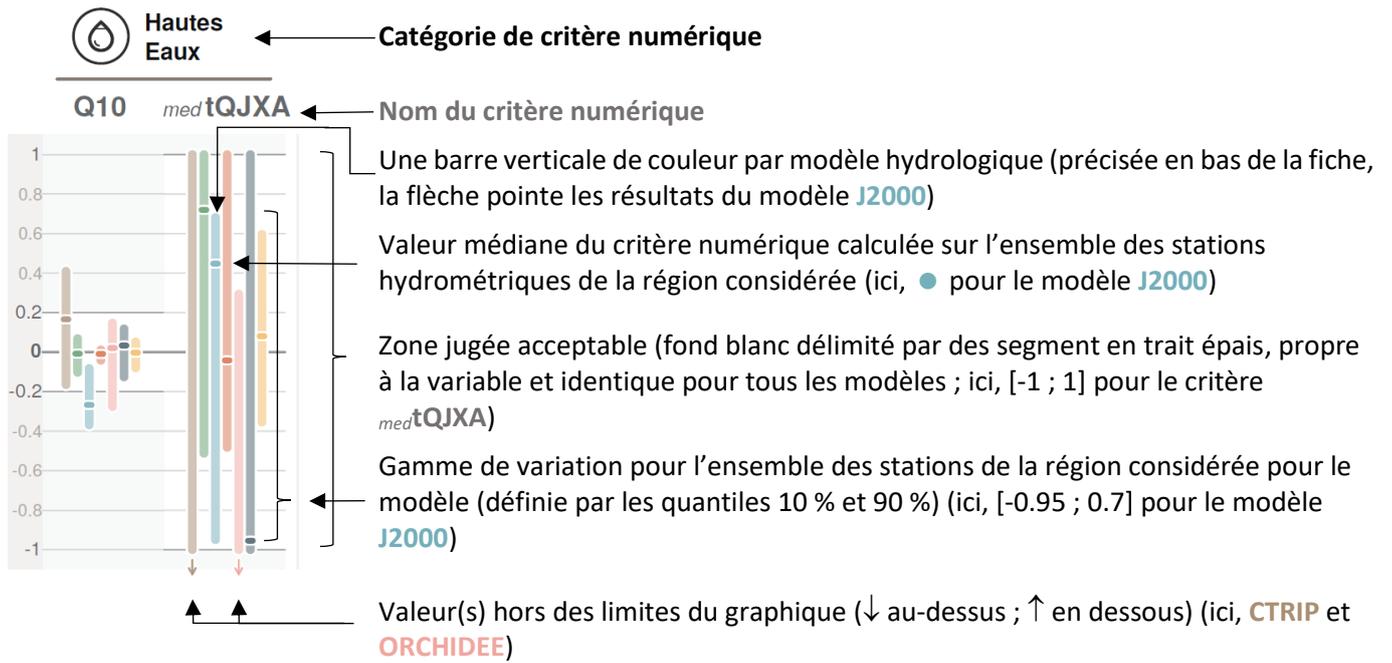


• **Les représentations graphiques**

Quatre graphiques identiques à celui (c) de la fiche de diagnostic « station » - des hydrogrammes construits sur la base de débits journaliers - illustrent la diversité des résultats obtenus dans le regroupement. Ils sont ordonnés de la station la mieux reconstituée (en haut à gauche) à la moins bien reconstituée (en bas à droite).



L'ensemble des graphiques (e) est l'homologue de l'ensemble (e) de la fiche de diagnostic « station ». Les graphiques présentent les résultats des douze critères numériques regroupés par catégorie.



• **La légende**

Noms des modèles présents dans la région hydrographique (par ordre alphabétique) et couleur qui leur est associée



Légende des graphiques relatifs aux critères numériques

Modalité de sélection des stations illustratives des résultats sur la région

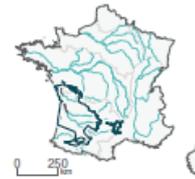
**2.3 Fiche de diagnostic « région » - Hydrologie souterraine**

Aucune fiche n'a été élaborée aux piézomètres de référence, leur représentativité vis-à-vis de l'entité hydrogéologique étant toujours discutable. Le diagnostic est donc présenté à l'échelle des entités hydrogéologiques nationales, définies par le référentiel hydrogéologique BDLISA. L'organisation de ces fiches pour l'hydrologie souterraine (Figure 3) reprend en grande partie celle des fiches de diagnostic « région » l'hydrologie de surface :

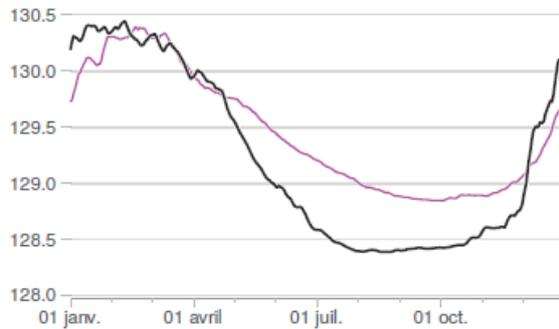
## Grand système aquifère multicouche des calcaires et dolomies du Jurassique moyen à supérieur du Bassin aquitain et de ses bordures - 358

5 piézomètres de référence

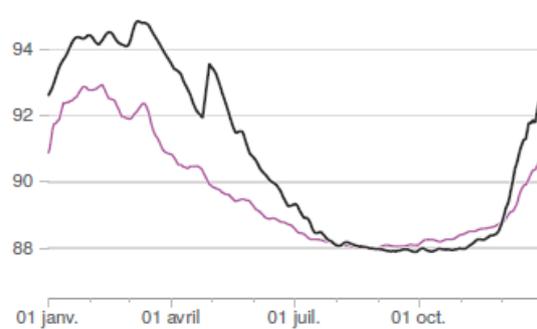
Altitude minimale (piézomètre) : 97 m  
Altitude maximale (piézomètre) : 165 m



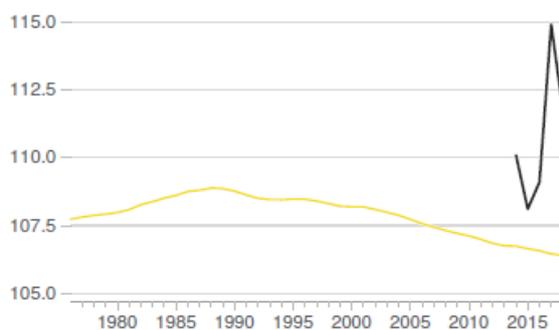
(a) Hauteur journalière médiane interannuelle (m)  
06371X0004/PUITS



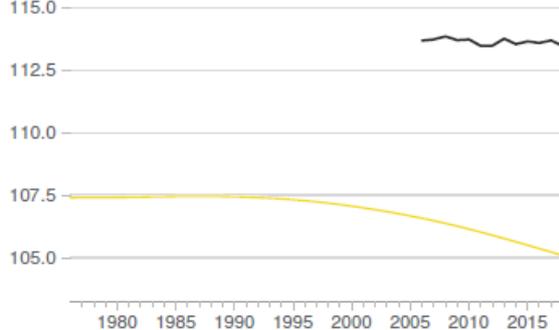
(b) Hauteur journalière médiane interannuelle (m)  
06613X0039/S



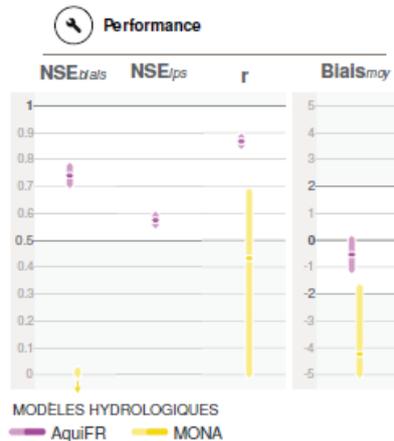
(c) Hauteur annuelle (m)  
07597X0006/F



(d) Hauteur annuelle (m)  
09042X0001/F



(e) Critères de diagnostic



**LÉGENDE**  
 — Quantile à 90 % des résultats dans l'entité  
 — Médiane du critère dans l'entité  
 — Quantile à 10 % des résultats dans l'entité  
 † Valeur hors limite

**COMPLÉMENT**

Les piézomètres choisis pour illustrer les résultats à l'échelle de l'entité illustrent la variabilité des performances obtenues (piézomètres associés aux maximum, quantile 75 % et 25 %, et minimum de la médiane multi-modèle des NSE<sub>bi</sub>).

Figure 3 : Exemple de fiche de synthèse pour l'hydrologie souterraine.

• **L'en-tête**

Nom et code à trois chiffres de l'entité hydrogéologique  
 Nombre de piézomètres concernées

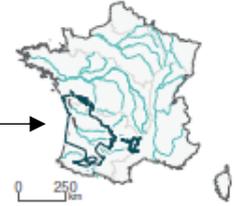
**Grand système aquifère multicouche des calcaires et dolomies du Jurassique moyen à supérieur du Bassin aquitain et de ses bordures - 358**

5 piézomètres de référence

Altitude minimale (piézomètre) : 97 m  
 Altitude maximale (piézomètre) : 165 m

Valeurs minimale et maximale des altitudes d'implantation des piézomètres

Contour de l'entité hydrogéologique



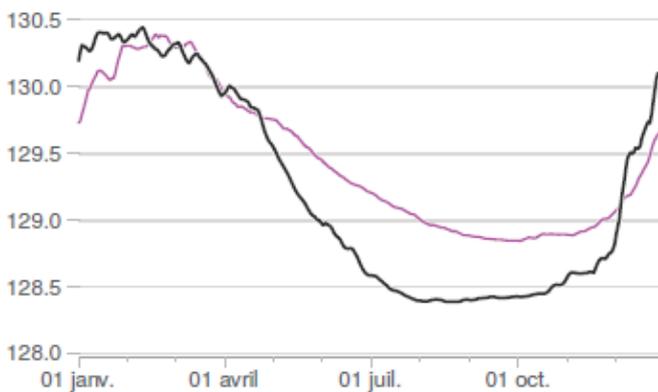
• **Les représentations graphiques**

Quatre graphiques identiques - des variations infra-annuelles des niveaux piézométriques - illustrent la diversité des résultats obtenus dans l'entité hydrogéologique. Ils sont ordonnés du piézomètre le mieux reconstitué (en haut à gauche) au moins bien reconstitué (en bas à droite).

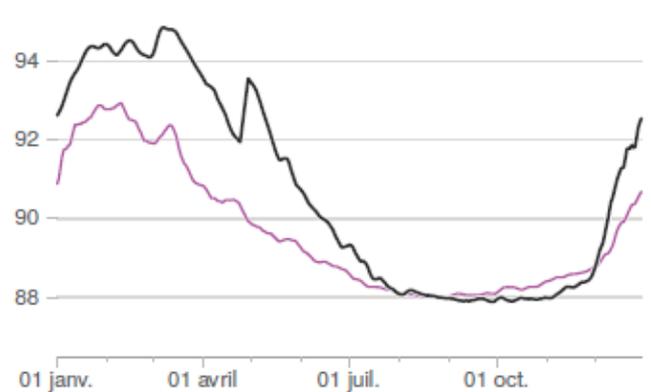
Niveaux piézométriques médians interannuels, lissés sur cinq jours

Code du piézomètre

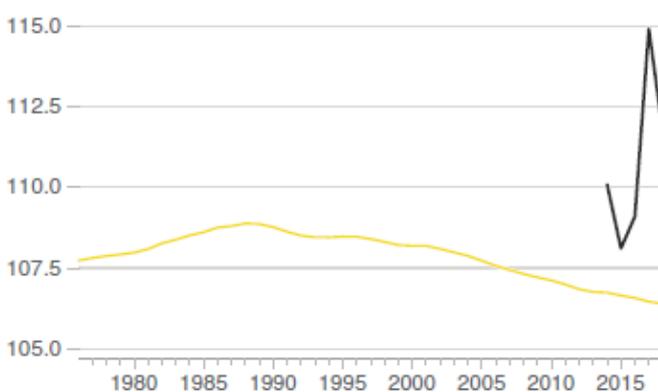
(a) Hauteur journalière médiane interannuelle (m)  
 06371X0004/PUITS



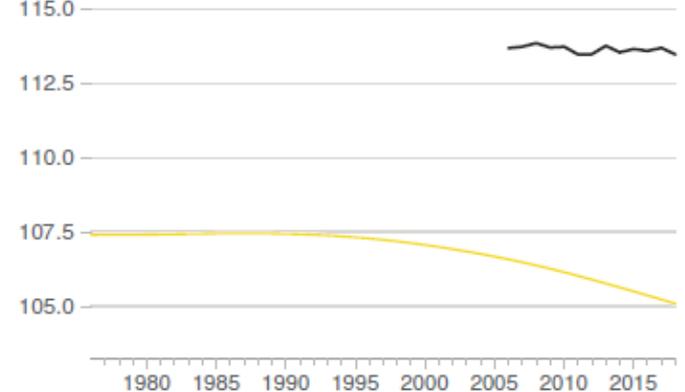
(b) Hauteur journalière médiane interannuelle (m)  
 06613X0039/S



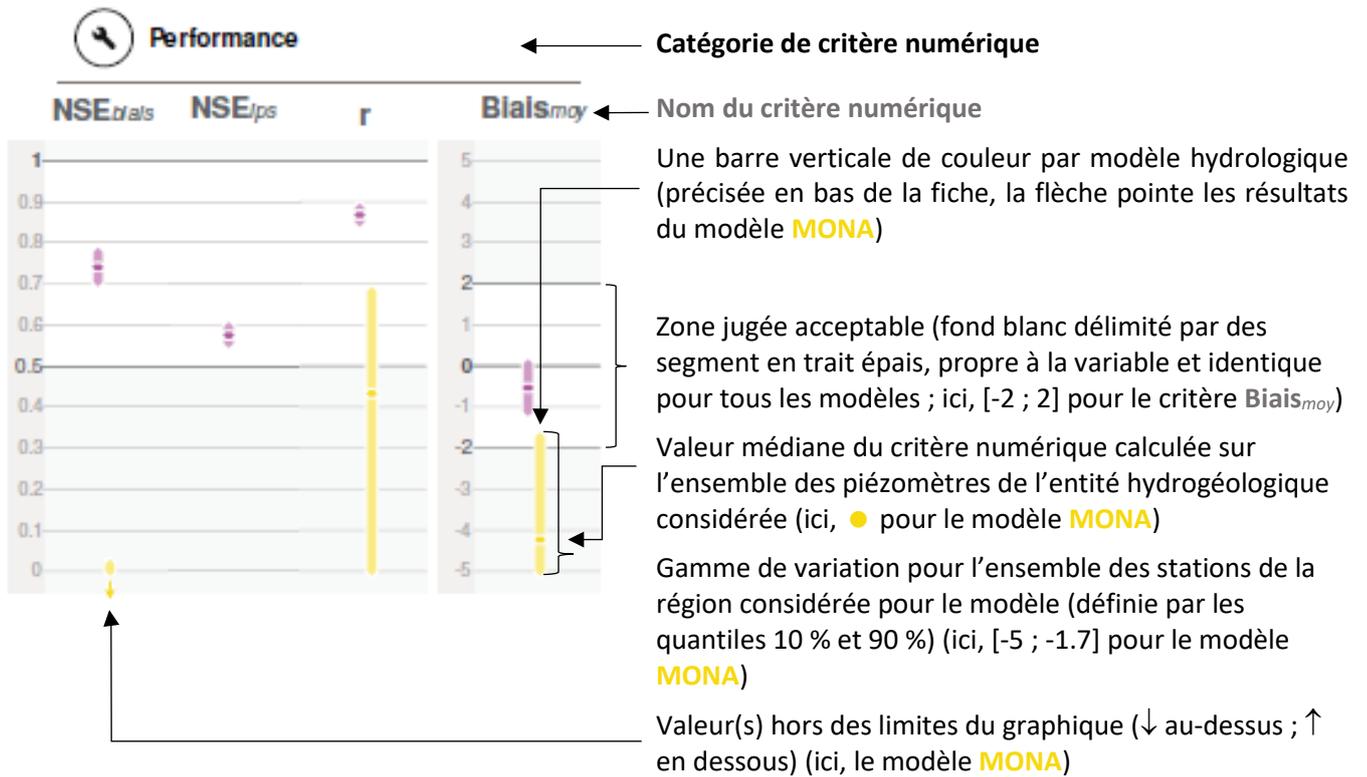
(c) Hauteur annuelle (m)  
 07597X0006/F



(d) Hauteur annuelle (m)  
 09042X0001/F



L'ensemble des graphiques (e) présente les résultats des quatre critères numériques (une catégorie).



• **La légende**

Noms des modèles présents dans l'entité hydrogéologique (par ordre alphabétique) et couleur qui leur est associée

**MODÈLES HYDROLOGIQUES**  
 — AquifFR — MONA

**LÉGENDE**  
 — Quantile à 90 % des résultats dans l'entité  
 — Médiane du critère dans l'entité  
 — Quantile à 10 % des résultats dans l'entité  
 ↑ Valeur hors limite

**COMPLÉMENT**

Les piézomètres choisis pour illustrer les résultats à l'échelle de l'entité illustrent la variabilité des performances obtenues (piézomètres associés aux maximum, quantile 75 % et 25 %, et minimum de la médiane multi-modèle des **NSE<sub>biais</sub>**).

Légende des graphiques relatifs aux critères numériques

Modalité de sélection des piézomètres illustratifs des résultats dans l'entité

## 3 Synthèse

### 3.1 Hydrologie de surface

Des comportements spécifiques aux modèles ont pu être identifiés :

- Les performances, tous modèles confondus, sont bonnes à très bonnes sur les grands bassins versants (surface supérieure à 6000 km<sup>2</sup>), et inégales sur les petits cours d'eau (surface inférieure à 200 km<sup>2</sup>).
- Les performances des modèles aux paramètres calés numériquement (**GRSD**, **EROS**, **MORDOR-TS**, **MORDOR-SD** et **SMASH**) au droit de stations de référence donnent une vision un peu optimiste des performances attendues en bassins non jaugés.
- Le modèle **CTRIP** semble confronté à des difficultés en particulier dans les zones montagneuses (en particulier les Alpes), et dans le bassin de la Seine où les aquifères jouent un rôle non négligeable sur l'hydrologie de surface. Une tendance généralisée à la sous-estimation des débits en étiage (**Q90**) est perceptible, exception faite du Nord-Est de la France.
- Le modèle **EROS**, appliqué au bassin de gestion Loire-Bretagne, sous-estime généralement les débits de hautes eaux (**Q10**) et, à l'inverse, surestime les débits en étiage (**Q90**), en particulier sur la partie amont de la Loire.
- Le modèle **GRSD**, en extrapolation en dehors des stations de référence où un calage a été effectué, peut surestimer fortement les débits d'étiage (**Q90**) de manière très locale. Il n'y a pas de comportement régional mais une plus grande difficulté à reproduire les régimes à dominante nivale.
- Le modèle **J2000** semble sous-estimer les débits de hautes eaux (**Q10**) dans les Alpes. De manière localisée, **J2000** surestime fortement les débits en étiage. De fortes valeurs négatives de **Biais** sont présentes dans les Alpes, pour partie dues à des biais de précipitations issues de SAFRAN (trop faibles) sur ce secteur.
- Les deux variantes du modèle MORDOR ont un domaine d'application réduit (limité à la Loire amont de Saumur pour **MORDOR-TS** et aux stations de référence pour **MORDOR-SD**). Les résultats suggèrent une tendance généralisée à la sous-estimation des débits en basses eaux pour **MORDOR-SD**. Aucune spécificité régionale ne se dégage pour **MORDOR-TS**.
- Le modèle **ORCHIDEE** est confronté à des difficultés principalement dans les Alpes, dans le bassin de la Seine et dans les Hauts de France où les aquifères jouent un rôle non négligeable sur la dynamique des débits des cours d'eau. Sur les secteurs au nord de la France, les débits de hautes eaux semblent surestimés tandis que les débits de basses eaux (**Q90**) semblent sous-estimés hors Massif Central, Jura et Bretagne, régions qui affichent une surestimation des débits de basses eaux.
- Le modèle **SIM2** présente des performances faibles sur les bassins amont en zone de montagne, ainsi que sur les bassins fortement influencés par les échanges avec une nappe non modélisée explicitement, comme celui de la Somme dans le Nord de la France. En outre, **SIM2** semble surestimer les débits de basses eaux hors Somme et Alpes.
- Le modèle **SMASH**, que ce soit avec des paramètres calés aux stations ou extrapolés, présente de moindres performances dans l'ouest du bassin hydrographique Seine-Normandie.

Notons que les secteurs présentant des difficultés de modélisation sont : les Hauts-de-France, les affluents aval de la Seine, Jura, Sud-Est (avec un point noir : la fontaine de Vaucluse). En témoignent les cartes de défaillance (proportion de valeurs hors limites – et donc d'avertissements - tous modèles et toutes stations confondus) sur le critère **KGEV** et **Q90** (Figure 4). Attention, cependant, à ne pas sur-interpréter les résultats obtenus avec le score de **KGEV** sur les cours d'eau influencés par les nappes : ces critères donnent une part importante à la capacité à reproduire des variabilités d'un signal ; sur ces cours d'eau la variabilité temporelle est faible, il est préférable de s'en tenir au **Biais** pour qualifier le modèle. Les critères numériques signalent

une plus grande difficulté à reconstituer les basses eaux que les hautes eaux. L'analyse des élasticités  $\epsilon$  montre que les réponses aux impulsions de pluie en hiver sont bien appréhendées par les modèles (d'une certaine manière, c'est attendu : les modèles ont été conçus pour reproduire la transformation pluie-débit) et une bonne sensibilité à la température en été (surtout dans le sud de la France, là où les phénomènes d'évaporation et de transpiration sont les plus déterminants). Pour les autres saisons, les résultats sont variables (en été, nous pouvons soupçonner une difficulté à bien réagir à des pluies locales captées partiellement par la réanalyse SAFRAN). Les tests de robustesse RAT sont très exigeants avec un taux élevé de défaillance, que les modèles soient calés par optimisation ou non.

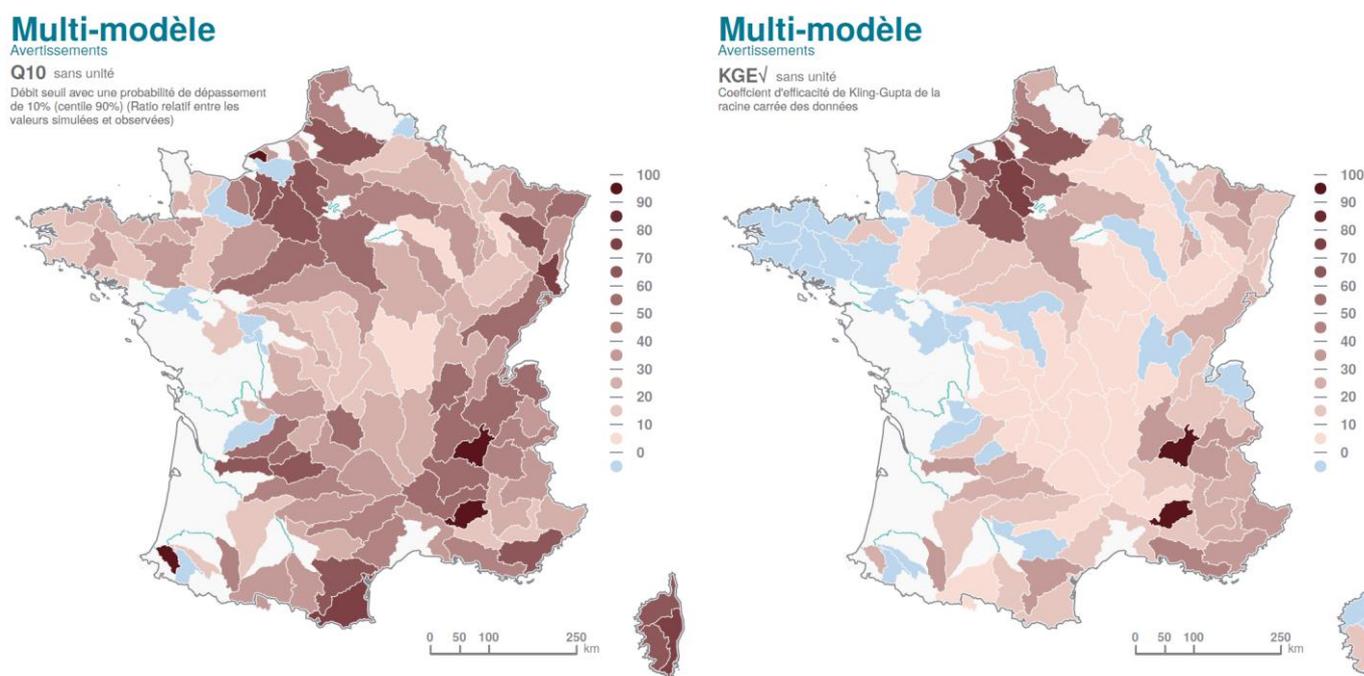


Figure 4 : Proportion d'avertissements, toutes stations et tous modèles confondus.

### 3.2 Hydrologie souterraine

Les conclusions sont plus difficiles à établir : les performances de modèles spatialisés comme **MONA** et **AquiFR** constatées au droit des piézomètres ne préjugent pas nécessairement de la qualité du modèle sur les autres points de grille où aucune observation n'est disponible. Néanmoins, soulignons que :

- Le modèle **AquiFR** présente des valeurs de **Biais<sub>moy</sub>** négatives dans le nord du bassin de la Loire, correspondant à la région de la Beauce, signe d'une sous-estimation significative du niveau des aquifères. L'inverse est observé sur la plaine d'Alsace, avec des valeurs de **Biais<sub>moy</sub>** positives. Ailleurs, aucune tendance significative n'apparaît.
- Le score **NSE<sub>ips</sub>** est majoritairement positif, démontrant la capacité d'**EROS-Bretagne** et d'**AquiFR** à reproduire les anomalies mensuelles (remontées de nappe/sécheresses). Les déficiences se concentrent sur la plaine d'Alsace.
- Le coefficient de corrélation **r** est négatif sur deux piézomètres de référence modélisés par la plate-forme **AquiFR**. Tous les piézomètres en Bretagne simulés par **EROS-Bretagne** présentent un coefficient de corrélation **r** supérieur à 0.93. Les résultats sont plus mitigés avec **MONA** ( $r < 0$  pour 10 des 23 piézomètres).

## 4 Recommandations

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 n'a pas pour objectif de mettre en compétition les modèles : il s'agit d'aider à la sélection d'un groupement de modèles, quand plusieurs sont disponibles, à privilégier dans un exercice prospectif.

**Les modèles d'hydrologie de surface et les modèles hydrogéologiques présentent des performances satisfaisantes à l'échelle de la France ou des domaines modélisés mais peuvent s'avérer déficients sur certains secteurs hydrographiques.** Concernant l'hydrologie de surface, les exigences en termes de **KGEV** et **Biais** sont respectées par tous les modèles pour 184 des 611 stations de référence et, à l'opposé, pour 23 des stations de référence, les scores se situent majoritairement en dehors des intervalles fixés par les modélisateurs.

Les utilisateurs des simulations pourront examiner les fiches de synthèse élaborées à différents niveaux d'agrégation : du local (à la station) au régional (à la région hydrographique) et opérer des choix.

**Il n'est pas possible de suggérer *a priori* un ensemble de modèles sans connaître l'usage qui sera fait des données.** En effet, le choix doit être guidé par les besoins des utilisateurs : par exemple, le débit uniquement ou le débit et d'autres variables (ex. humidité des sols) ou les débits en un ensemble de points prescrits. Le choix est contraint par la capacité des modèles à fournir toutes les variables souhaitées et/ou la disponibilité des données simulées aux points d'intérêt.

**Il est déconseillé de rassembler des simulations de plusieurs modèles hydrologiques (des points avec des modèles différents),** au risque de faire émerger des incohérences spatiales en temps présent et surtout sous changement climatique.

Les écarts relevés entre les données de référence et les données simulées ne sont pas dus uniquement aux modèles. L'analyse s'est appuyée sur des données de référence. Malgré le soin apporté dans la phase de sélection des points de référence et le filtrage des données aberrantes, les données de référence peuvent comprendre des erreurs ou influences résiduelles. De plus, les forçages en secteurs de montagne (hétérogènes par nature) peuvent manquer de précision ou globalement peuvent occulter des précipitations convectives.

Avant toute utilisation de projections hydrologiques, il faut rappeler que :

- Un modèle avec bonne performance ne signifie pas qu'il sera fiable sous changement climatique. La bonne performance est une condition nécessaire mais pas suffisante pour garantir une fiabilité.
- A ce jour, la communauté scientifique ne sait pas si des modèles même biaisés alimentés par des projections climatiques apporteront une information utile dans une étude d'impact. S'ils apportent de l'information, nous n'en connaissons pas la nature (quantitative ou qualitative).

Ces derniers commentaires incitent à être conservatifs à ce stade du projet.

Dans la suite, le consortium s'engage à examiner les divergences (si elles existent) entre les modèles alimentés par les mêmes projections climatiques et à rechercher leur origine (croisement avec les critères d'élasticité ou les résultats des tests de robustesse).

## 5 Références

- Gupta *et al.* (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377, 80-91.
- Nash, J. E., Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 3, 282-290. DOI : 10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- Nicolle *et al.* (2021). Technical note: RAT – a robustness assessment test for calibrated and uncalibrated hydrological models. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25, 5013-5027. DOI : 10.5194/hess-25-5013-2021.
- Sauquet, E., Gottschalk, L., Krasovskaia, I. (2008). Estimating mean monthly runoff at ungauged locations: an application to France. *Hydrology Research* 39, 5-6, 403-423. DOI : 10.2166/nh.2008.331.
- Sauquet *et al.* (2022). Identification de stations hydrométriques et piézomètres pour l'évaluation des modélisations hydrologiques et hydrogéologiques. *Rapp. tech. INRAE ; BRGM*, p. 31. DOI : hal-03940233.
- Sauquet *et al.* (2023). Diagnostic des modèles hydrologiques : Des données aux résultats. *Rapp. tech. INRAE ; IGE*, p. 130.
- Seguin, J.-J. Allier, D., Manceau, J.-C. (2019). Contribution d'un index piézométrique standardisé à l'analyse de l'impact des sécheresses sur les ressources en eau souterraine. *Géologues*, 202, 43-48.