

*#connaître #partager #accompagner*

Les rendez-vous du karst de Bourgogne Franche-Comté,  
5<sup>e</sup> édition – 12 décembre 2024



# Programme

9h00-9h30 Accueil des participants/présentation de la journée

9h30-10h15 **Dynamique hydroclimatique du Massif Jurassien : interactions et stationnarité** . *Vincent Fister (EPTB Saône et Doubs)*

10h15-11h00 **Un ruisseau souterrain intra-morainique dans le Jura : un cas unique au monde ?** *Christophe Durlet (Université de Bourgogne, CNRS)*

11h00-11h30 **Lancement d'une étude départementale (25) sur le karst afin de définir la prédisposition des terrains aux aléas affaissement / effondrement**. *Aurélien Vallet, Nejema Zergaoui, Tanguy Kasprowicz, Sylvain Haussard, Thibaut Richard (BRGM/CEREMA/DDT25)*

11h30-12h00 **Vulgariser le karst et ses vulnérabilités : exposition, conférence, BD... Un des rôles portés par les associations environnementales**. *Manon Silvant, Patrice Malavaux, Gérard Mamet (SOS Loue et Rivières comtoises)*

14h00-14h40 **La modélisation 3D des morphologies karstiques, un outil pour la description du karst et du milieu souterrain, son étude et sa conservation**. *Didier Cailhol (Association française de karstologie)*

14h40-15h20 **Récentes avancées sur le fonctionnement hydrogéologique et les interactions surface-souterrain dans le bassin de la Loue**. *Charlier J.-B., Ladouche B., Vallet A., Idoux A, Allanic C., Bailly-Comte V., Selles A. (BRGM)*

15h20-15h45 - **La radiolocalisation souterraine. Principe et applications**. *Denis Motte (GIPEK)*





# Consignes

- Les créneaux pour chaque intervention sont de 20-40 minutes maximum et comprennent les parties présentations et questions. Au cas où une/des interventions serai(en)t plus courte(s), l'idée est d'enchaîner sur la présentation suivante.

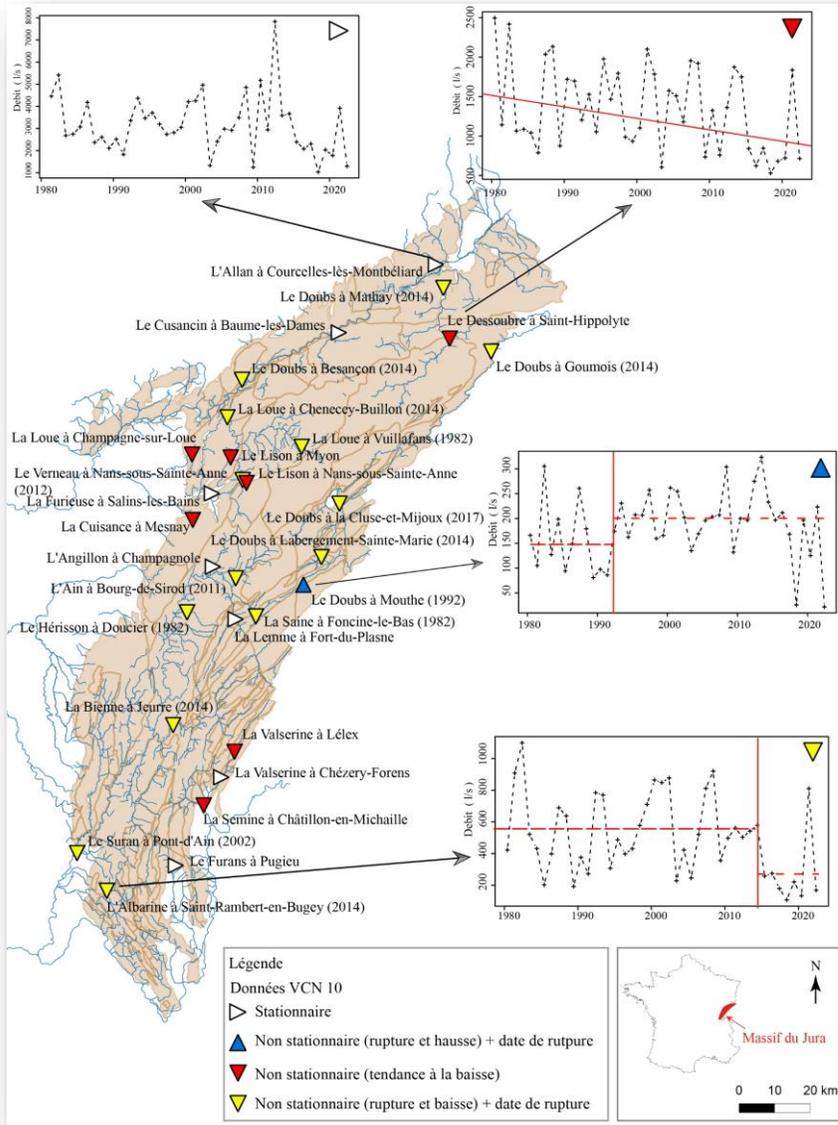
## Pour les personnes en visio

- Votre micro sera éteint pendant les présentations par l'administrateur afin d'éviter les bruits intempestifs.
- Si vous souhaitez intervenir, merci d'envoyer votre question sur le tchat : nous nous efforcerons de la soumettre pendant le temps de « questions/réponses » imparti après chaque présentation. Si les conditions le justifient, certaines questions pourront être directement posées oralement, micro et caméra seront alors activés.
- Nous prendrons d'abord les questions en salle puis celles du tchat.



*#connaître #partager #accompagner*

« Dynamique hydroclimatique du Massif Jurassien :  
interactions et stationnarité »

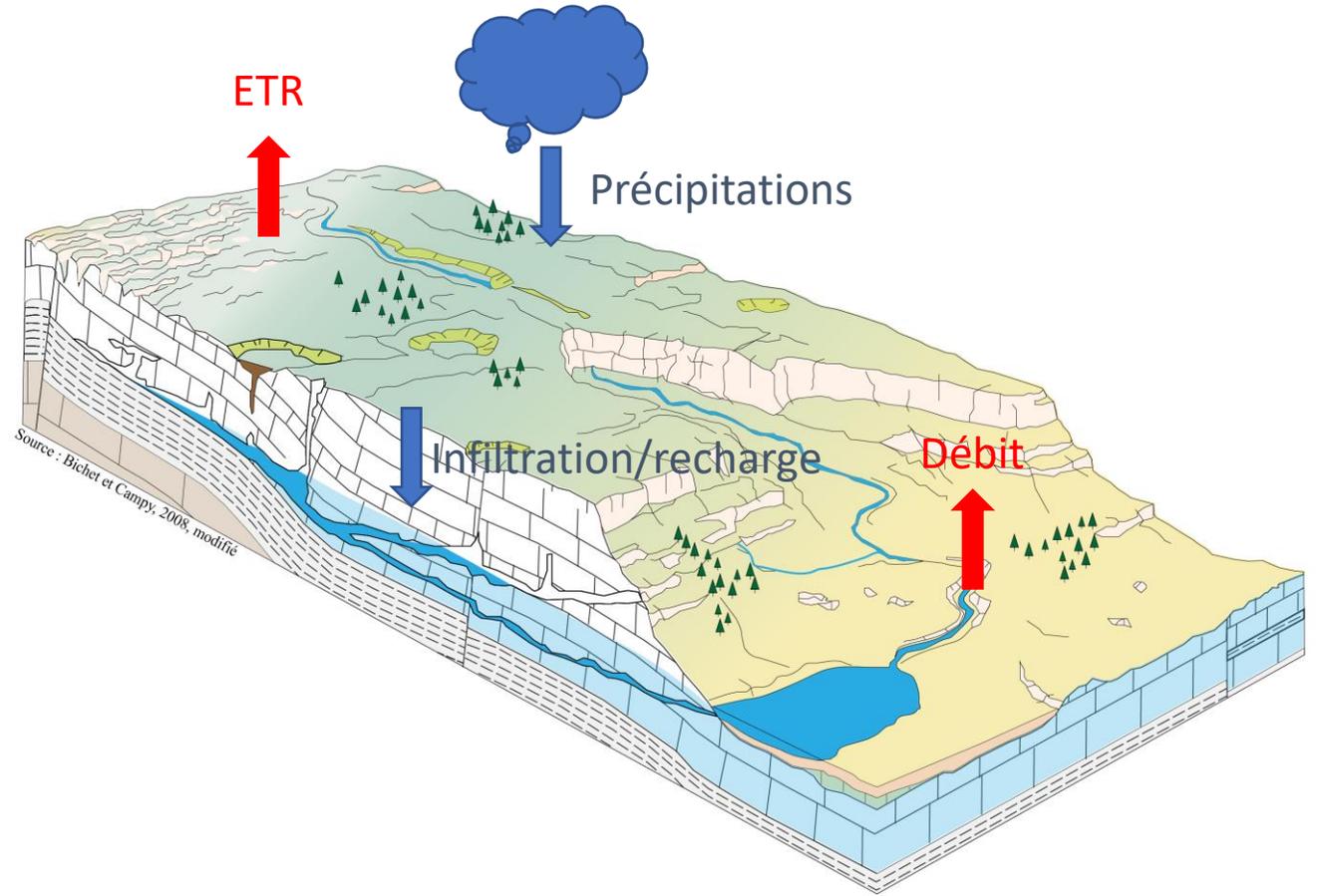
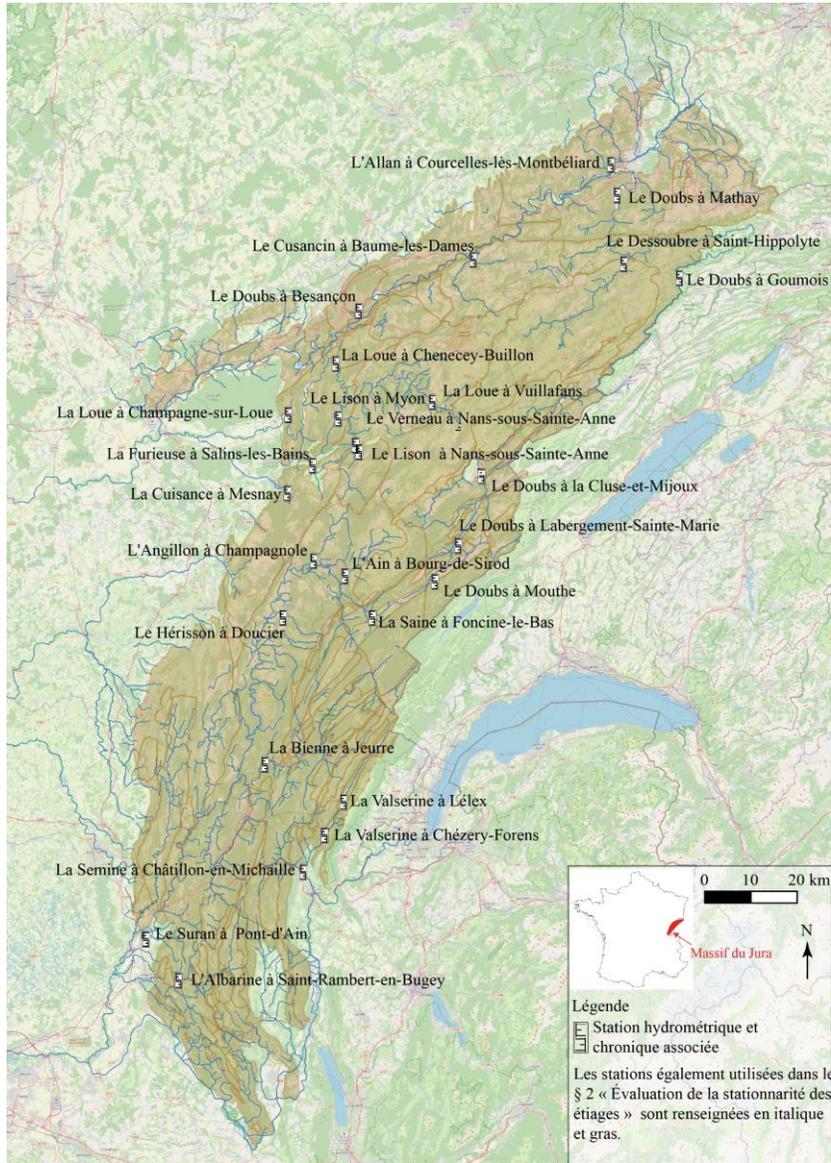


Quels paramètres influencent le plus sur les débits d'étiage et plus généralement sur les débits ?

Quelles sont les principales relations entre les variables hydroclimatiques ?

Quelles sont les principales tendances et ruptures temporelles observées ?

Y a-t-il des différences fonctionnelles majeures à l'échelle d'un massif comme celui du Jura ?

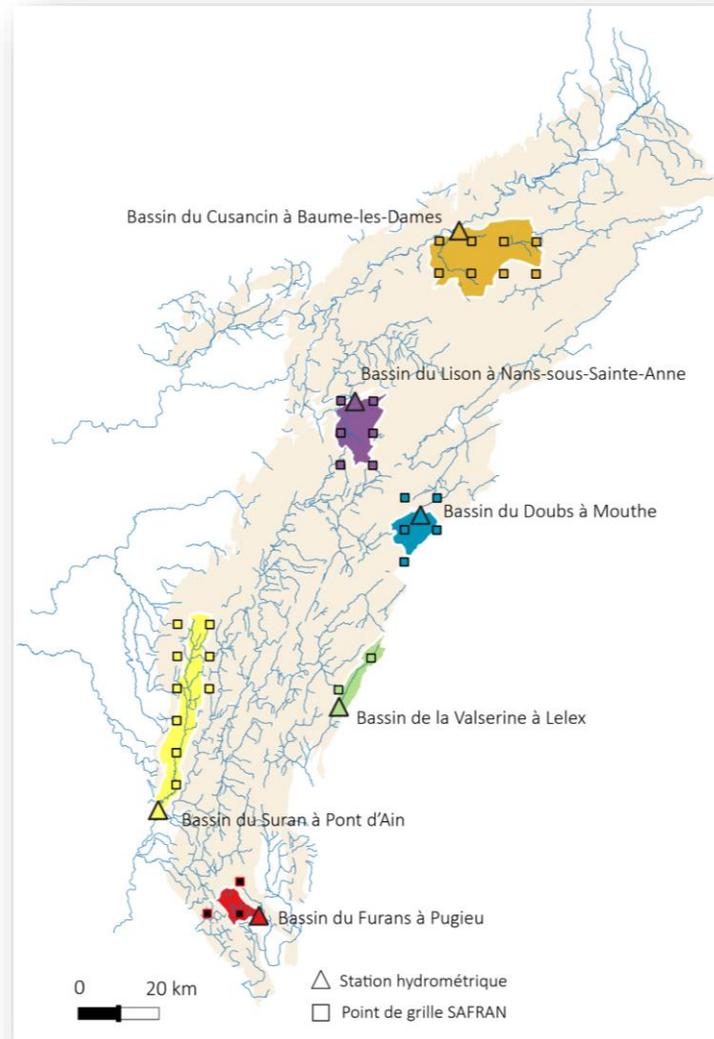


- Une dizaine de paramètres hydroclimatiques aux échelles annuelles et saisonnières sur la période 1980-2022 et à l'échelle de six bassins du massif du Jura

Paramètre	Cusancin/Baume
Surface bassin (km <sup>2</sup> )	560
Alt. (m)	551
Débit (m <sup>3</sup> /s)	7.7
Précipitations tot. (mm)	1355
Température (°c)	9.4

Paramètre	Lison/NSSA
Surface bassin (km <sup>2</sup> )	230
Alt. (m)	710
Débit (m <sup>3</sup> /s)	5.1
Précipitations tot. (mm)	1569
Température (°c)	8.7

Paramètre	Suran/Pontain
Surface bassin (km <sup>2</sup> )	349
Alt. (m)	401
Débit (m <sup>3</sup> /s)	6.5
Précipitations tot. (mm)	1474
Température (°c)	9.9

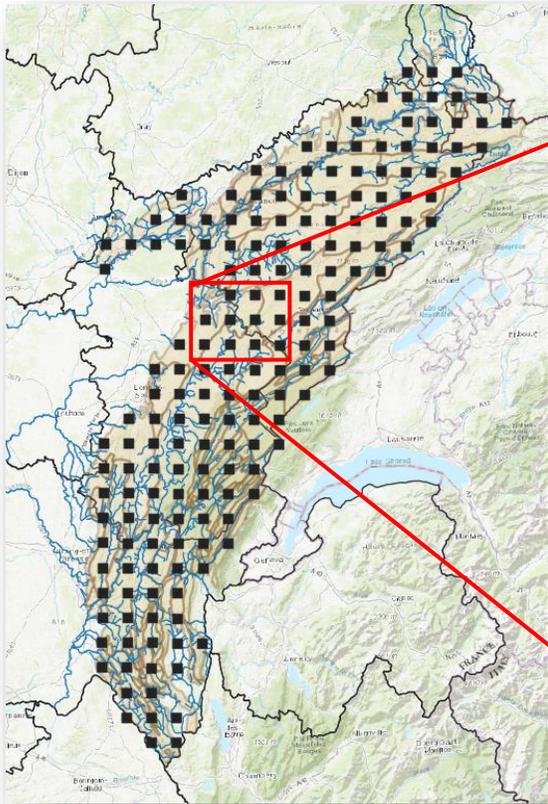


Paramètre	Doubs/Mouthe
Surface bassin (km <sup>2</sup> )	59
Alt. (m)	1159
Débit (m <sup>3</sup> /s)	1.9
Précipitations tot. (mm)	1738
Température (°c)	6.5

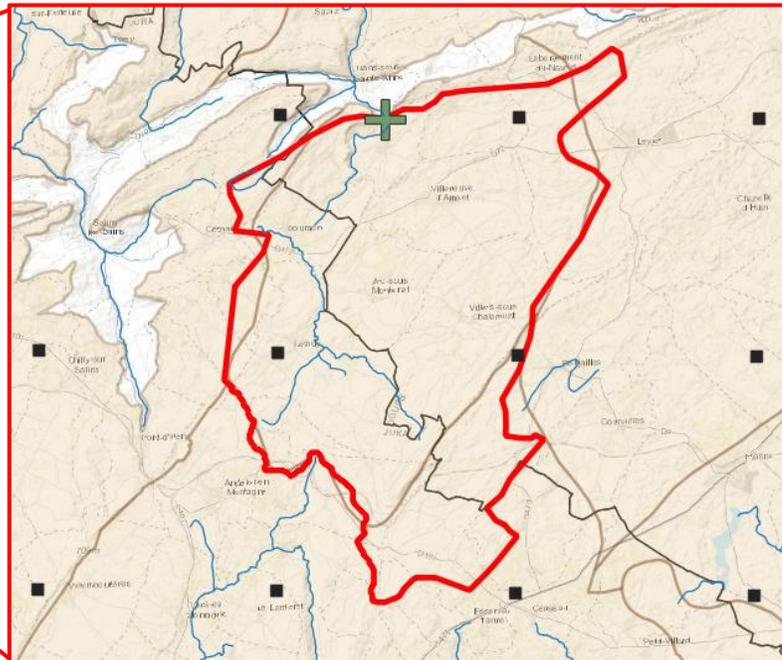
Paramètre	Valserine/Lelex
Surface bassin (km <sup>2</sup> )	85
Alt. (m)	1232
Débit (m <sup>3</sup> /s)	2.2
Précipitations tot. (mm)	1916
Température (°c)	6.8

Paramètre	Furans/Pugieu
Surface bassin (km <sup>2</sup> )	59
Alt. (m)	714
Débit (m <sup>3</sup> /s)	1.7
Précipitations tot. (mm)	1624
Température (°c)	8.8

- Recours aux données SAFRAN (Météo-France) : schéma d'analyse qui permet d'obtenir des données pour de nombreux paramètres climatiques à partir des observations locales (maille 8\*8 km)



Exemple du bassin du Lison à NSSA



• Données : Météo-France

- PRENEI\_Q : Précipitations solides
- PRELIQ\_Q : Précipitations liquides
- PE\_Q : Pluies efficaces
- T\_Q : Température
- EVAP\_Q : Evapotranspiration réelle
- ETP\_Q : Evapotranspiration potentielle

⇒ SAFRAN

- Débit
- Débit de base
- Débit d'étiage (VCN10)

⇒ HydroPortail + analyses

- Recharge (Thornthwaite et Wallingford)

⇒ SAFRAN + analyses

- Recharge > Les écoulements sur un massif comme le Jura vont être contrôlés par la recharge antérieure (état de remplissage du karst).

**ESTIMATION de la Pluie Efficace et de la REcharge selon différentes méthodes**

source : BRGM

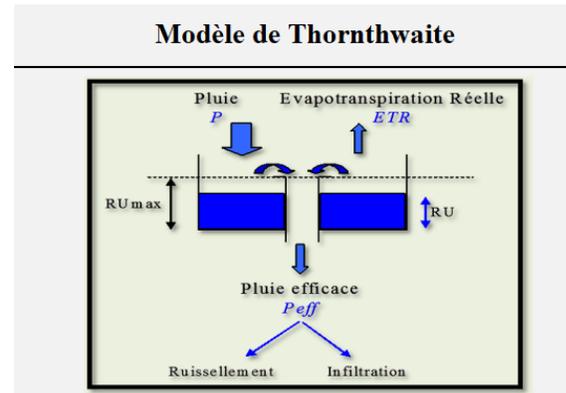
- Trois méthodes empiriques

$$R = 0.45 (P - 180) \text{ avec } P < 600 \text{ mm}$$

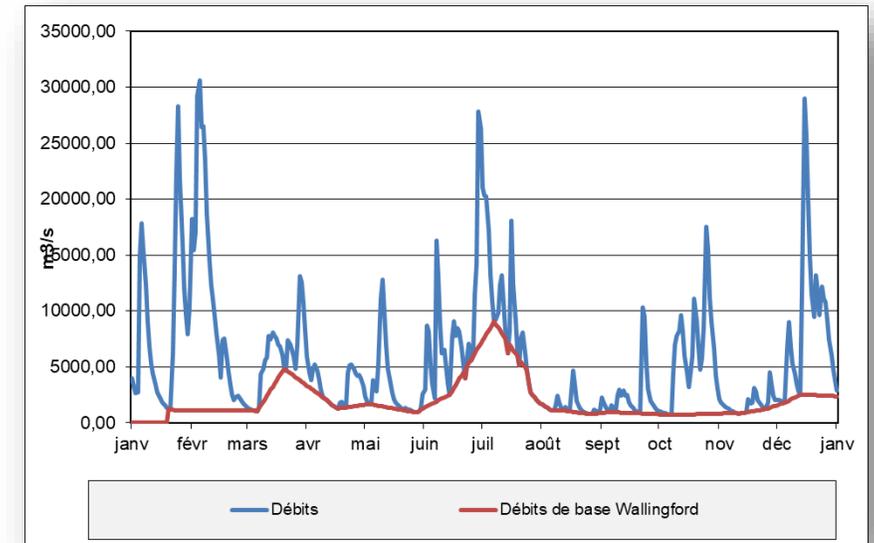
$$R = 0.88 (P - 410) \text{ avec } 600 \text{ mm} < P < 1000 \text{ mm}$$

$$R = 0.97 (P - 463) \text{ avec } P > 1000 \text{ mm}$$

- Trois méthodes de bilan hydrique du sol

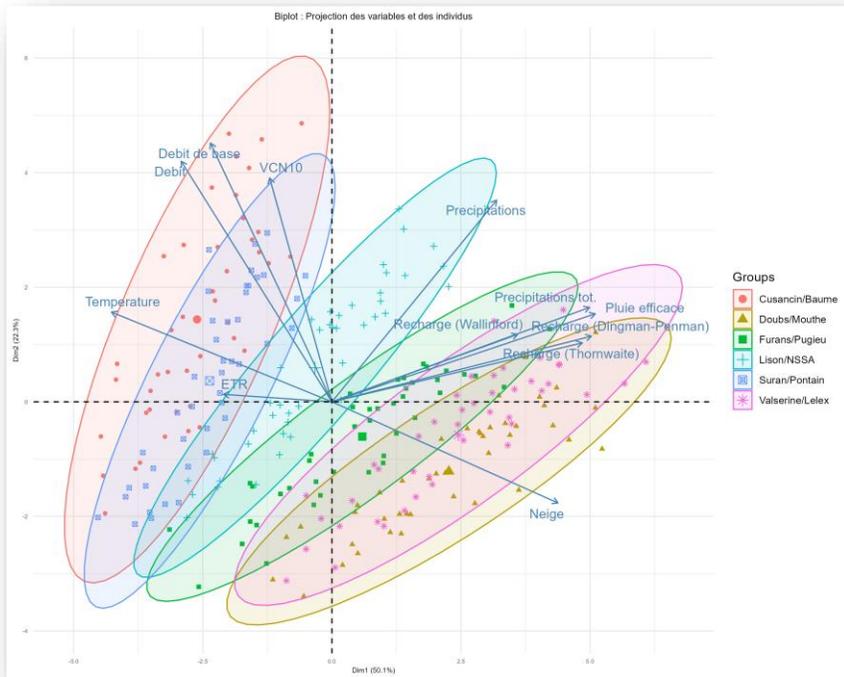


- Trois méthodes de filtre des chroniques de débits

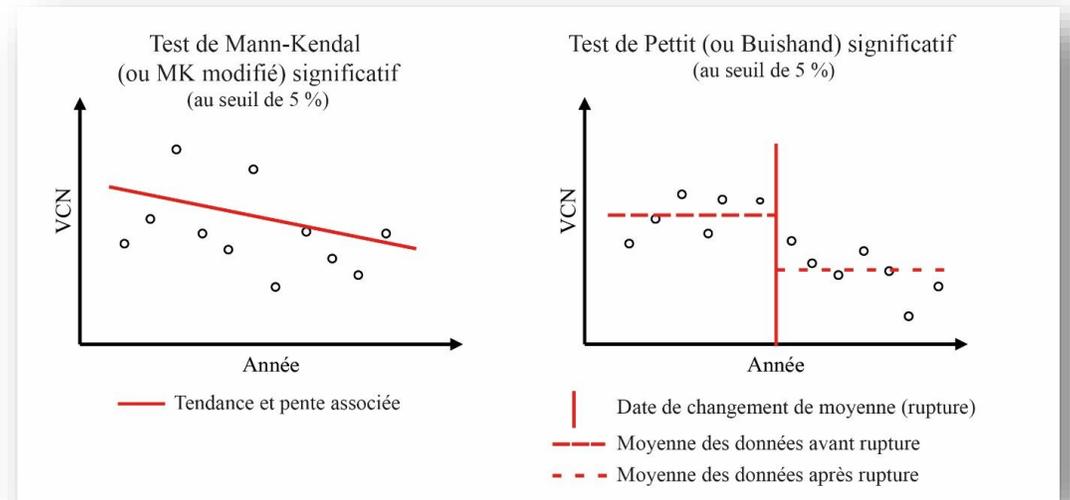


	Temperature	Neige	Precipitations	Precipitations tot.	ETR	Pluie efficace	Recharge (Thornwaite)	Recharge (Wallinford)	Debit	Debit de base	VCN10
Cusancin/Baume_1980	7.8	170	1211	1381	495	886	676	298	8408	3296	1875
Doubs/Mouthe_1980	5.1	572	1268	1840	506	1334	1169	306	1899	522	166
Furans/Pugieu_1980	7.3	283	1610	1892	529	1363	875	723	2410	1189	268
Lison/NSSA_1980	7.5	230	1423	1653	510	1143	962	429	5806	1953	963
Suran/Pontain_1980	8.7	149	1445	1594	551	1043	353	289	7917	2394	243
Valserine/Lelex_1980	5.5	592	1492	2084	509	1575	969	489	2452	1237	474

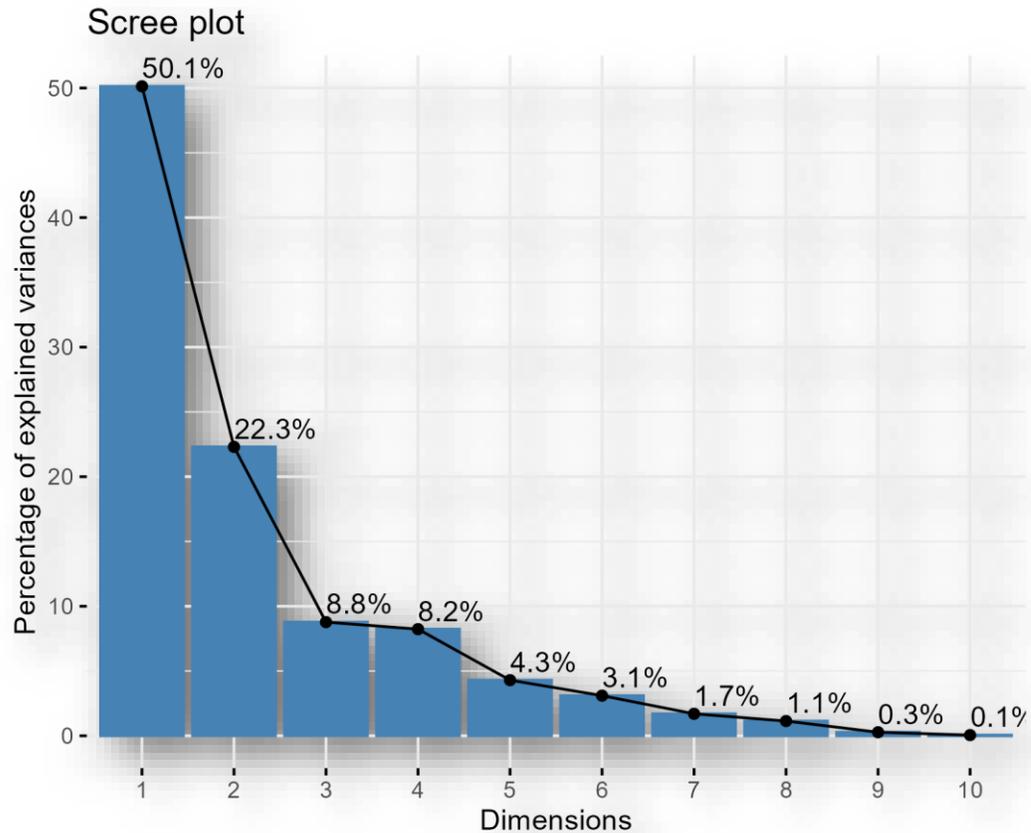
## Analyses exploratoires



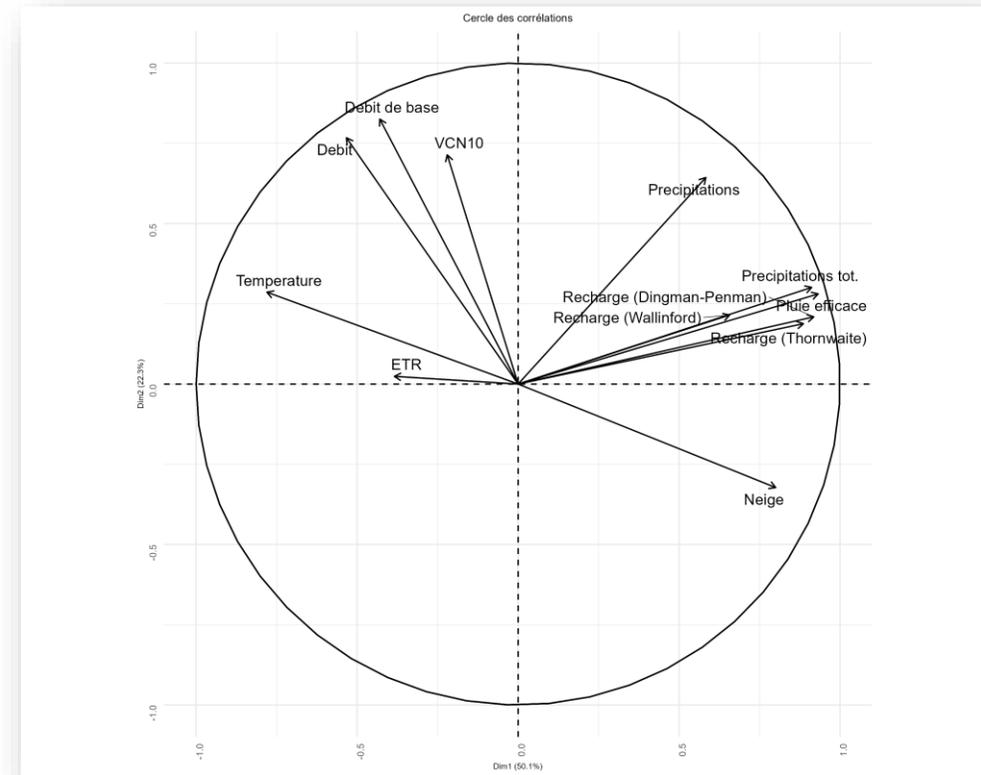
## Analyse des tendances et ruptures temporelles



## ☐ Analyse en composantes principales

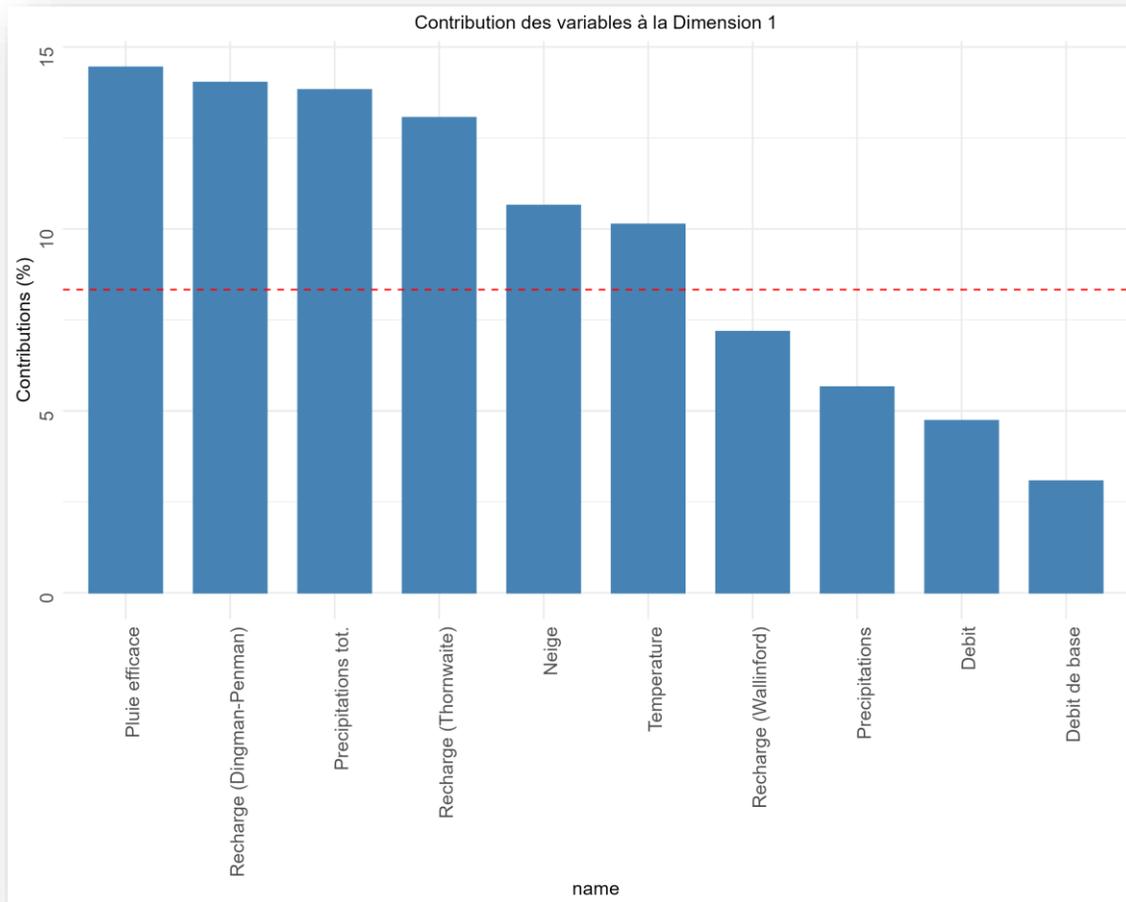


- Dimension 1 : 50% de la variance totale
- Dimension 2 : 22% de la variance totale
- Proportion importante de la variabilité globale des données

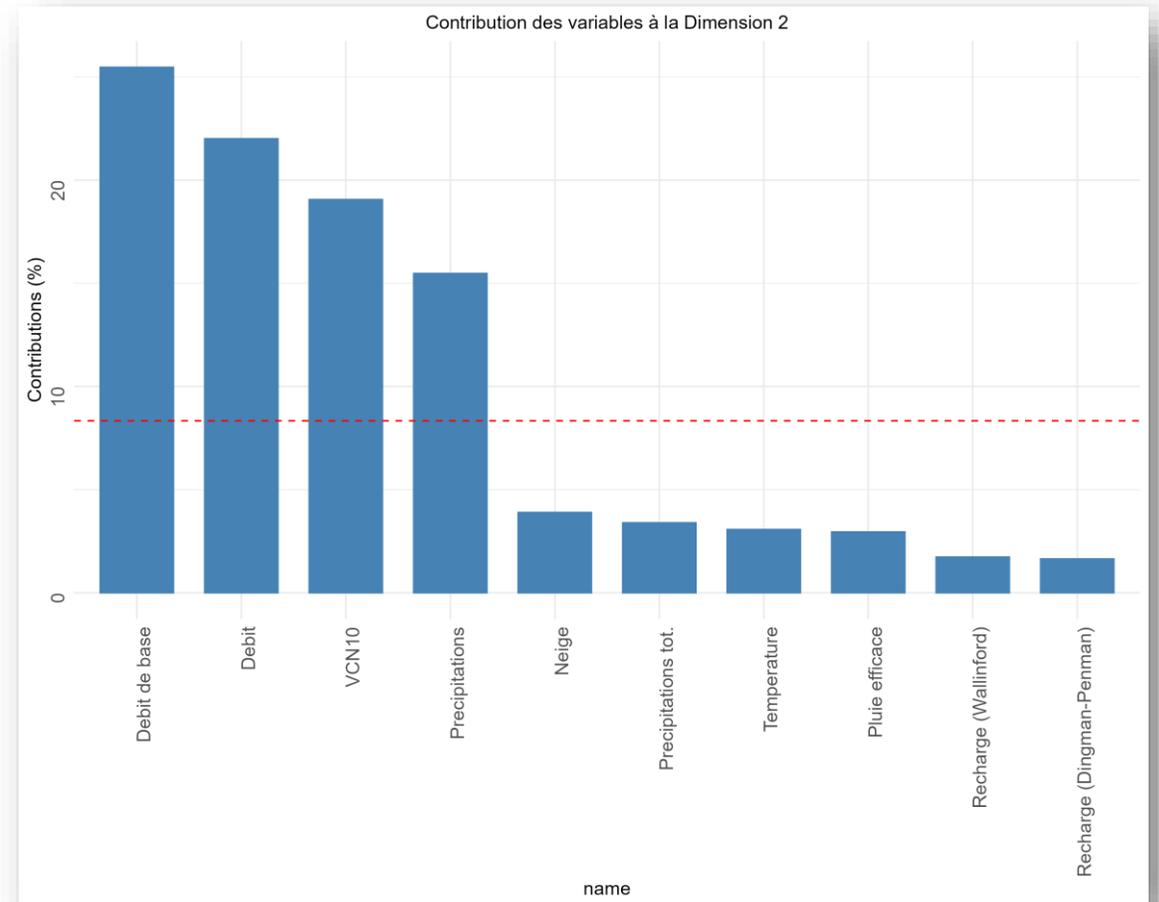


- Dimension 1. Forte corrélation pour Précipitation(s) : (coefficient proche de 0.80) et recharge(s)
- Dimension 2. Corrélation significative (coefficient proche de 0.70) pour Débit(s).

## Analyse en composantes principales

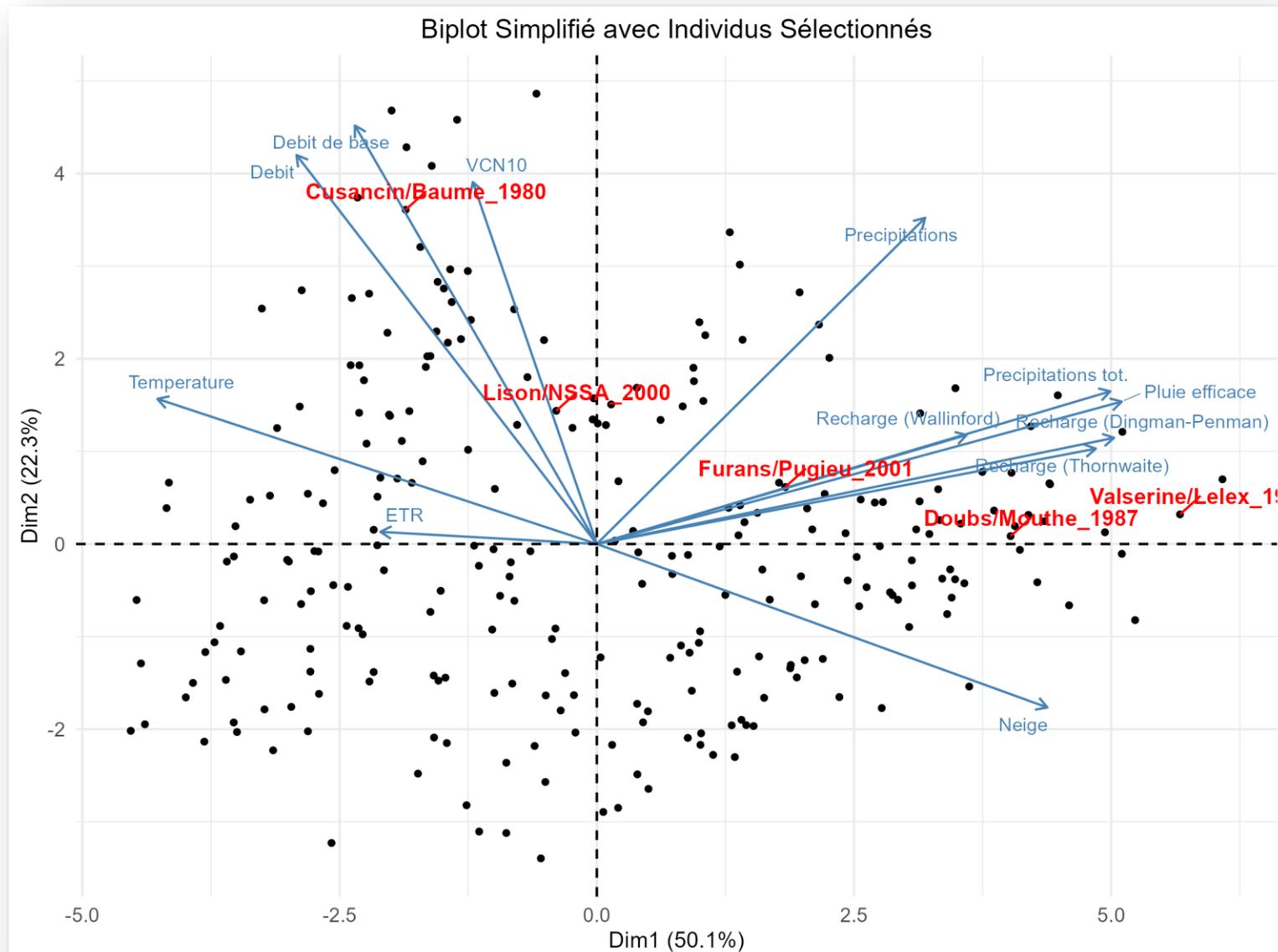


Apports hydriques globaux



Caractéristiques d'écoulement

## ☐ Analyse en composantes principales



## Analyse en composantes principales

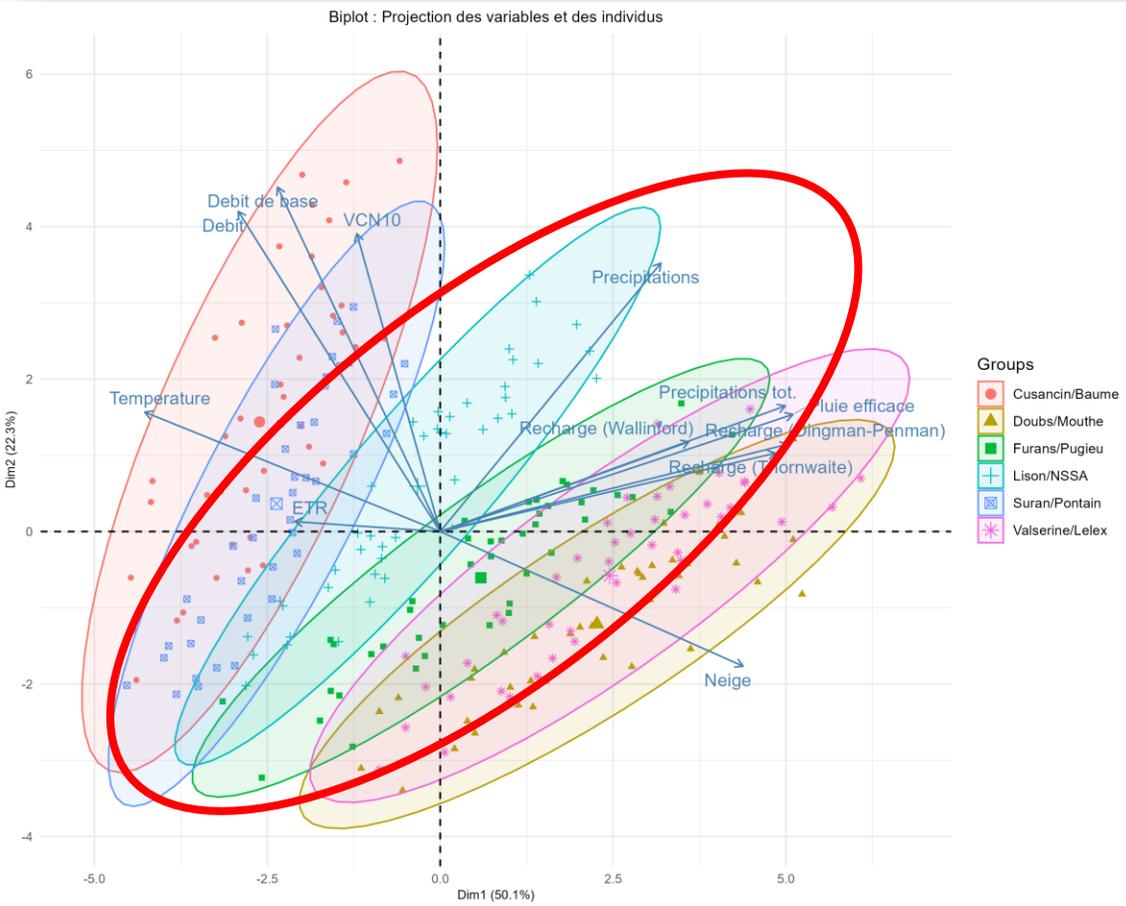


Paramètre	Type 1 : Haute Chaîne	Type 2 : Second Plateau	Type 3 : Premier Plateau
Stations	Doubs/Mouthe, Valserine/Lelex	Lison/NSSA, Furans/Pugieu	Cusancin/Baume, Suran/Pontain
Altitude moyenne (m)	1 159 à 1 232	710 à 714	401 à 551
Précipitations (mm)	1 738 à 1 916	1 569 à 1 624	1 355 à 1 474
Neige (mm)	600 à 650	350 à 400	220 à 300
Débit spécifique (l/s/km <sup>2</sup> )	32	22 à 28	13 à 18
Débit de base spécifique (l/s/km <sup>2</sup> )	15 à 18	10 à 12	6 à 9
Recharge (mm/an)	400 à 420	250 à 300	180 à 200

### Type 1 : Haute Chaîne

- Stations associées : Doubs/Mouthe, Valserine/Lelex.
- Caractéristiques principales :
  - Altitudes les plus élevées, avec des précipitations abondantes + neige.
  - Débits spécifiques élevés et importances des contributions souterraines (débit de base significatif).
- Hypothèses fortes :
  - Recharge importante: Les conditions climatiques et géographiques favorisent une infiltration importante dans le karst, permettant un stockage conséquent et une restitution progressive.
  - Rôle régulateur de la neige : La couverture neigeuse agit comme un réservoir temporaire, prolongeant la recharge au printemps et maintenant les débits en période d'été.
  - Faible interaction avec l'écoulement de surface : Les flux souterrains dominant, avec un ruissellement limité.

## ☐ Analyse en composantes principales

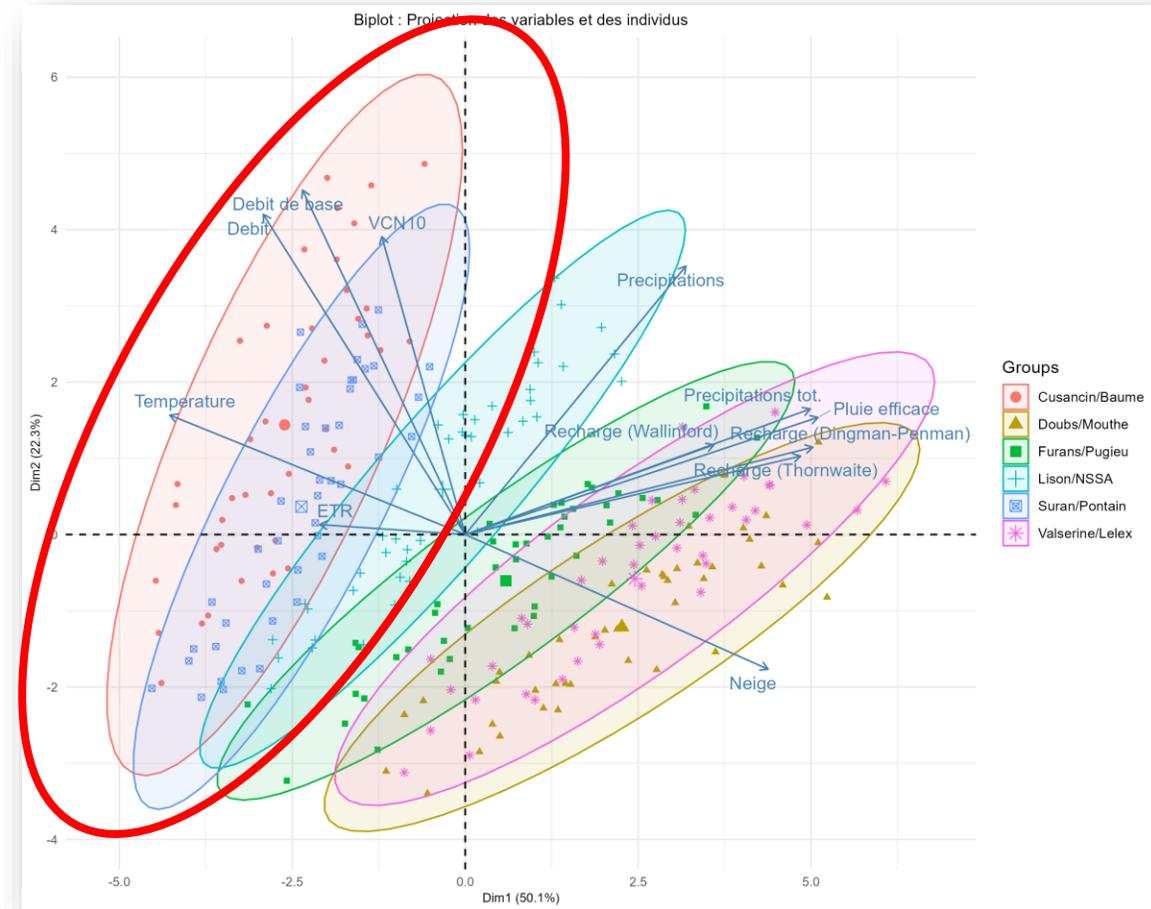


Paramètre	Type 1 : Haute Chaîne	Type 2 : Second Plateau	Type 3 : Premier Plateau
Stations	Doubs/Mouthe, Valsérine/Lelex	Lison/NSSA, Furans/Pugieu	Cusancin/Baume, Suran/Pontain
Altitude moyenne (m)	1 159 à 1 232	710 à 714	401 à 551
Précipitations (mm)	1 738 à 1 916	1 569 à 1 624	1 355 à 1 474
Neige (mm)	600 à 650	350 à 400	220 à 300
Débit spécifique (l/s/km <sup>2</sup> )	32	22 à 28	13 à 18
Débit de base spécifique (l/s/km <sup>2</sup> )	15 à 18	10 à 12	6 à 9
Recharge (mm/an)	400 à 420	250 à 300	180 à 200

### Type 2 : Deuxième Plateau

- Stations associées : Lison/NSSA, Furans/Pugieu.
- Caractéristiques principales :
  - Altitudes intermédiaires et précipitations modérées.
  - Débits spécifiques moyens, combinant flux de surface et souterrains.
- Hypothèses fortes :
  - Les flux souterrains et de surface coexistent, mais la recharge est moins efficace que dans les bassins de la Haute Chaîne.
  - La variabilité hydrologique est modérée, avec des réponses plus rapides aux précipitations par rapport aux bassins de la Haute Chaîne.

## ☐ Analyse en composantes principales



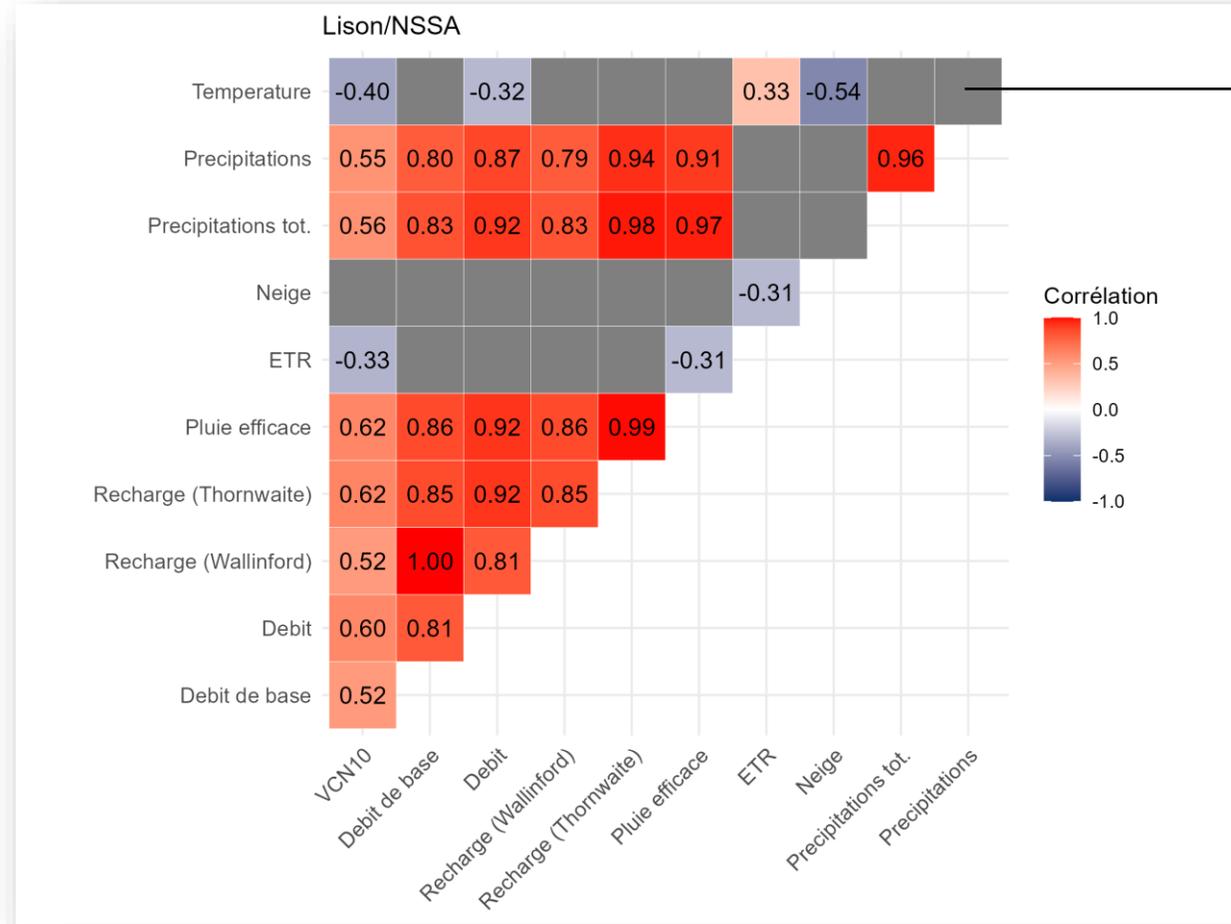
Paramètre	Type 1 : Haute Chaîne	Type 2 : Second Plateau	Type 3 : Premier Plateau
Stations	Doubs/Mouthe, Valsérine/Lelex	Lison/NSSA, Furans/Pugieu	Cusancin/Baume, Suran/Pontain
Altitude moyenne (m)	1 159 à 1 232	710 à 714	401 à 551
Précipitations (mm)	1 738 à 1 916	1 569 à 1 624	1 355 à 1 474
Neige (mm)	600 à 650	350 à 400	220 à 300
Débit spécifique (l/s/km <sup>2</sup> )	32	22 à 28	13 à 18
Débit de base spécifique (l/s/km <sup>2</sup> )	15 à 18	10 à 12	6 à 9
Recharge (mm/an)	400 à 420	250 à 300	180 à 200

### Type 3 : Premier Plateau et Avant-Monts

Stations associées : Cusancin/Baume, Suran/Pontain.

- Caractéristiques principales :
  - Recharge et débits de base faibles ;
  - Débits d'étiage (VCN10) faibles, reflétant une forte dépendance aux flux de surface.
- Hypothèses fortes :
  - Les bassins sont très sensibles aux périodes de sécheresse, en raison d'une plus faible contribution souterraine.
  - Une recharge limitée et des flux de surface plus importants rendent ces systèmes vulnérables aux variations climatiques.

## ❑ Corrélations inter-variables

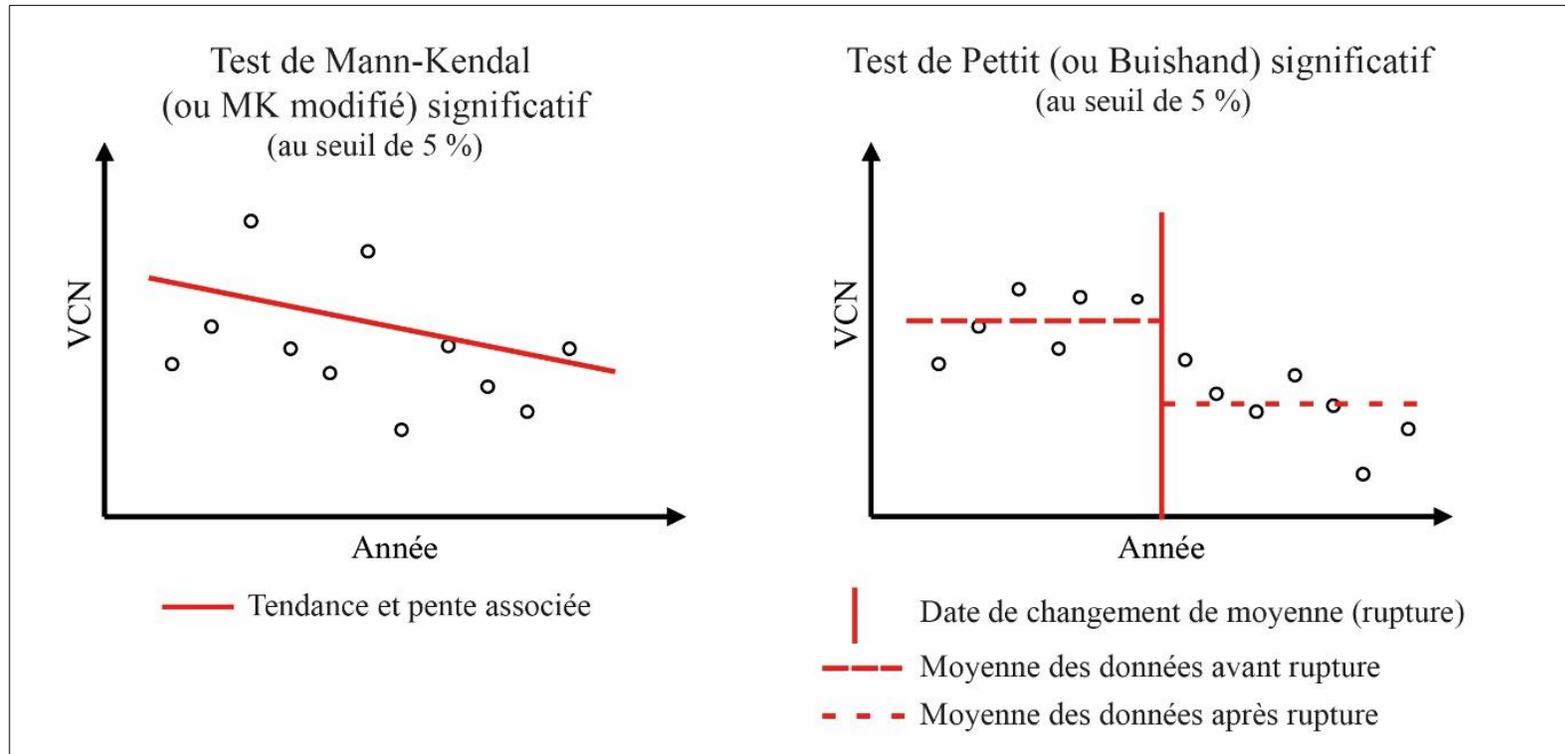


- Hypothèse de probabilité est évaluée autour d'une valeur, la p-value, et de son seuil de significativité (retenue à 5 %) : permet de considérer (ou non) les résultats comme non liés au hasard (et donc significatifs)
- Si le test présente une *pvalue* > 5% : corrélation non significatives



Nombreuses méthodes qui permettent de tester si les séries hydrologiques sont homogènes (stationnarité) entre deux temps donnés :

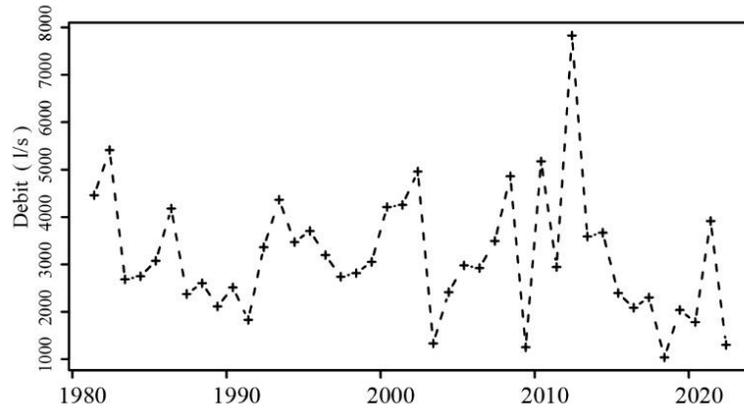
- Le test non-paramétrique de Mann-Kendall pour valider ou invalider une tendance ;
- Le test non-paramétrique de Pettit pour valider ou invalider une rupture.



- Hypothèse de probabilité est évaluée autour d'une valeur, la  $p$ -value, et de son seuil de significativité (retenue à 5 %) : permet de considérer (ou non) les résultats de ces deux tests comme non liés au hasard (et donc significatifs)
- Si le test présente une  $pvalue < 5\%$  : résultats significatifs et VCN non stationnaires

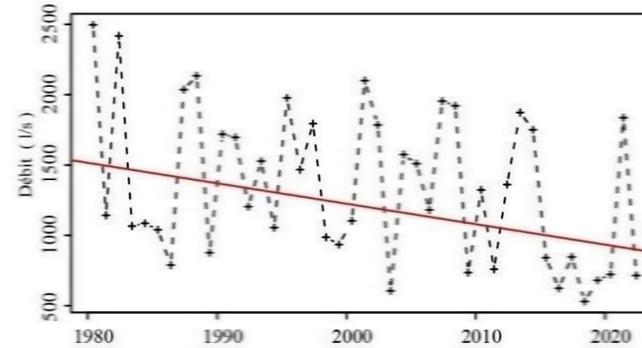
## Deux configurations

Données stationnaires dans le temps

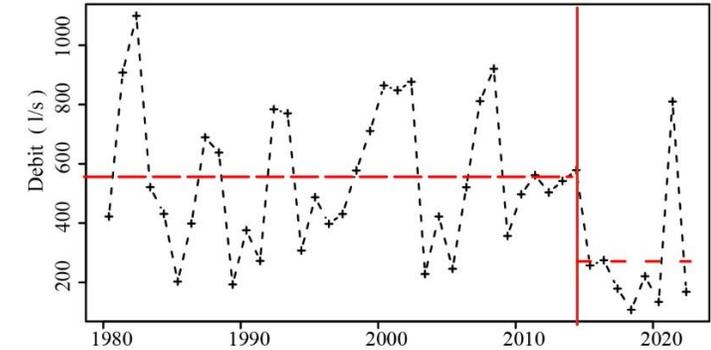


Pas d'évolution significative des débits d'étiage sur la chronique considérée

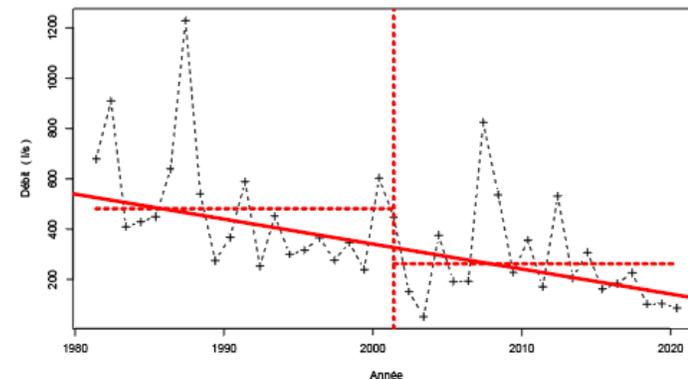
Données non-stationnaires dans le temps



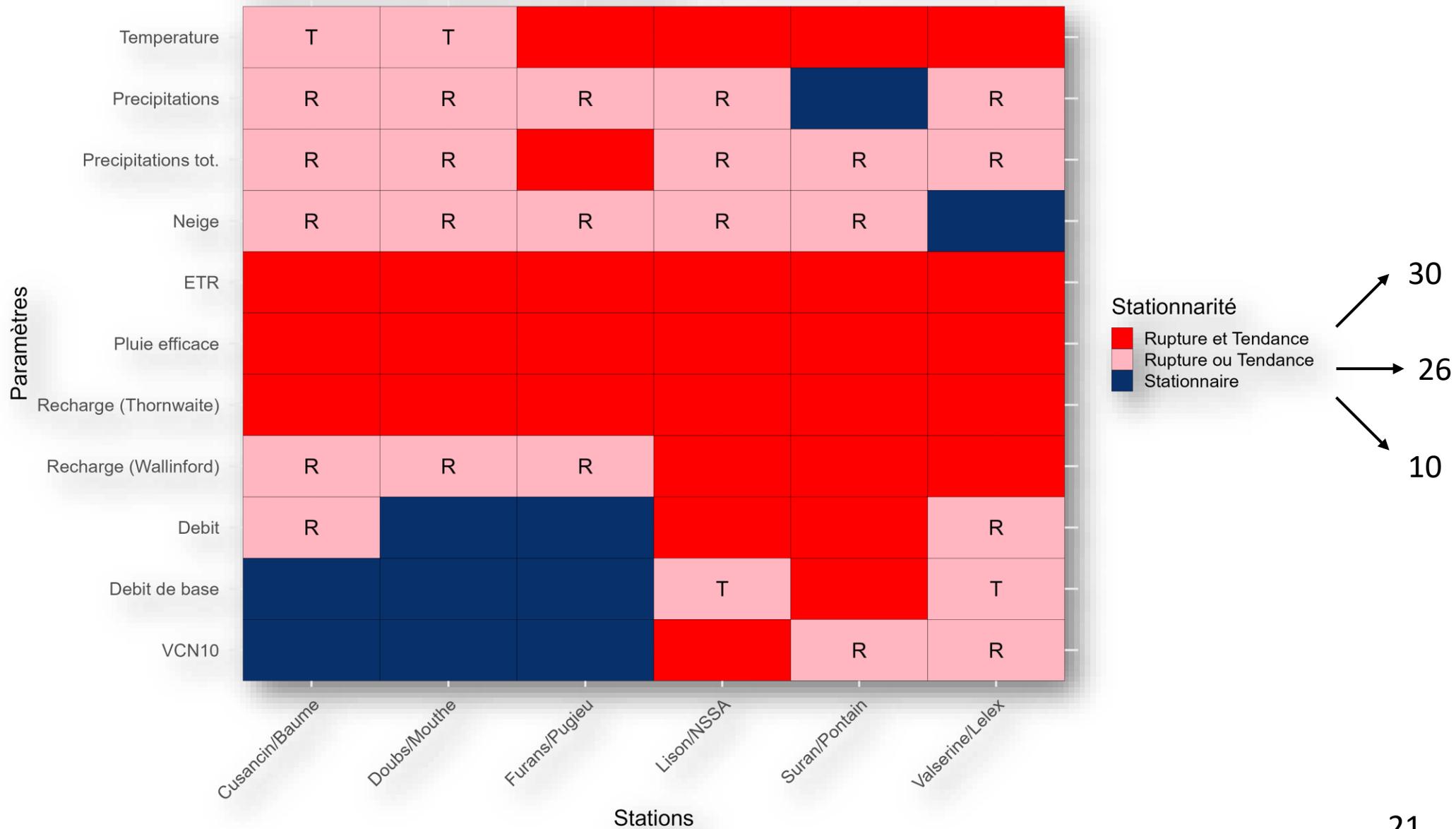
Tendance (MK) significative (à 5%) à la baisse des débits d'étiage et pente associée



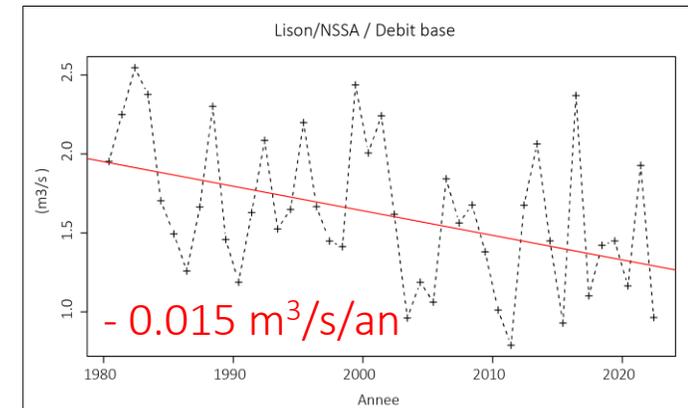
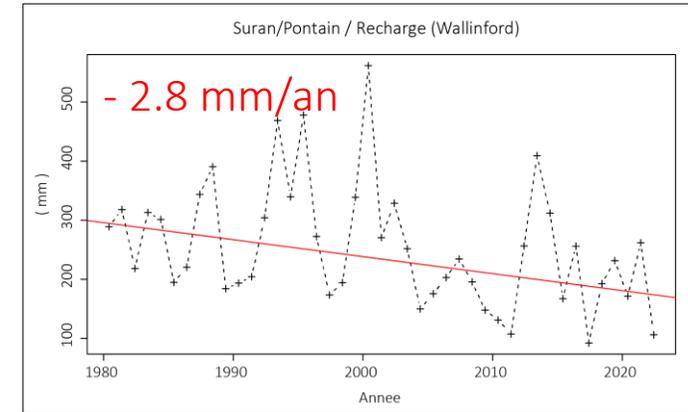
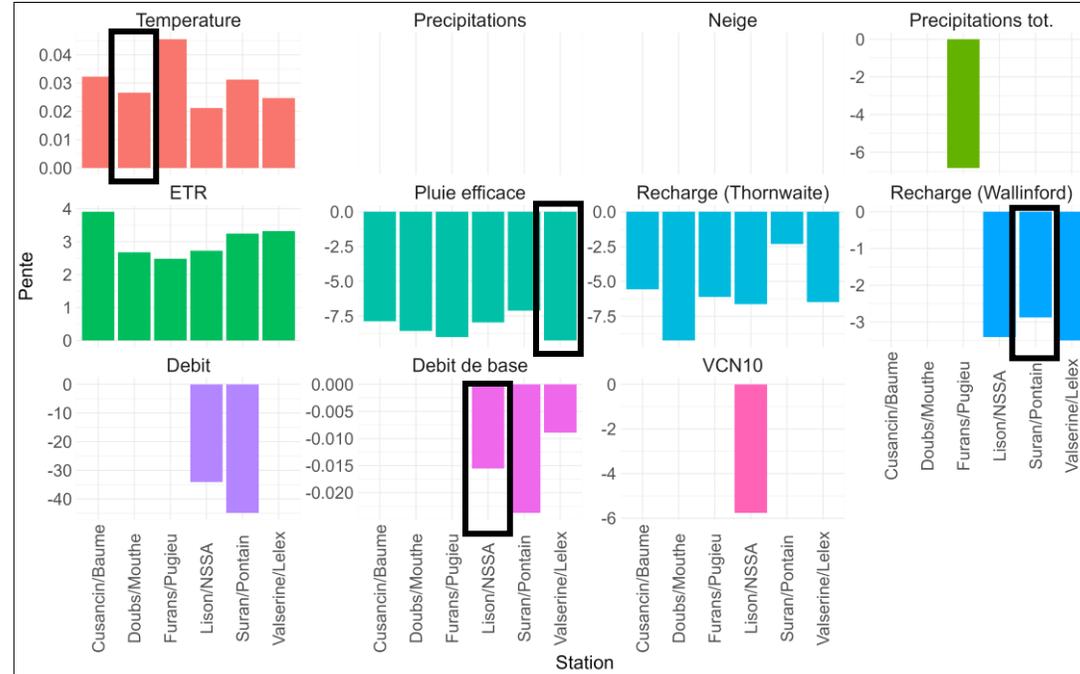
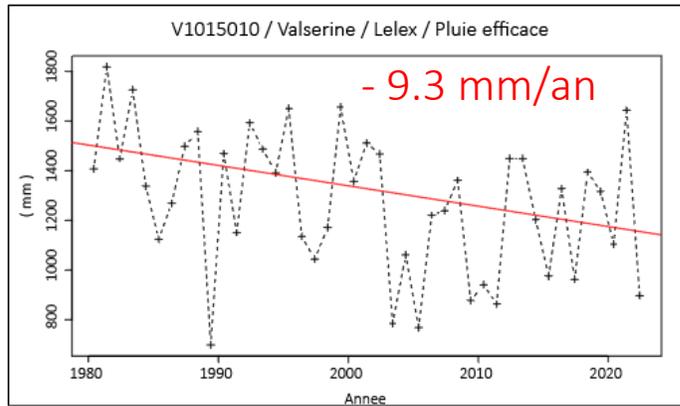
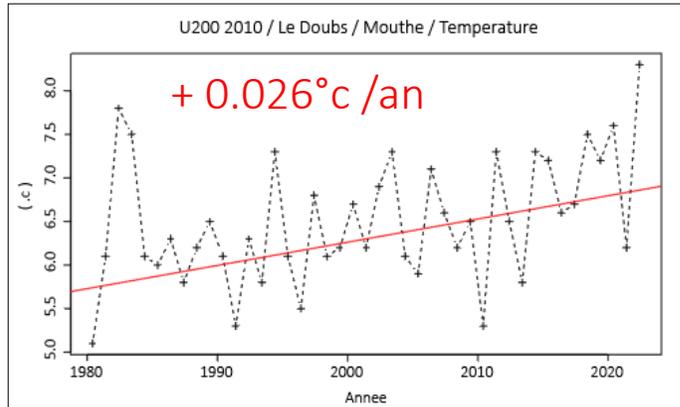
Rupture (Pettit) significative (à 5%) avec date de rupture et moyenne anté et post rupture



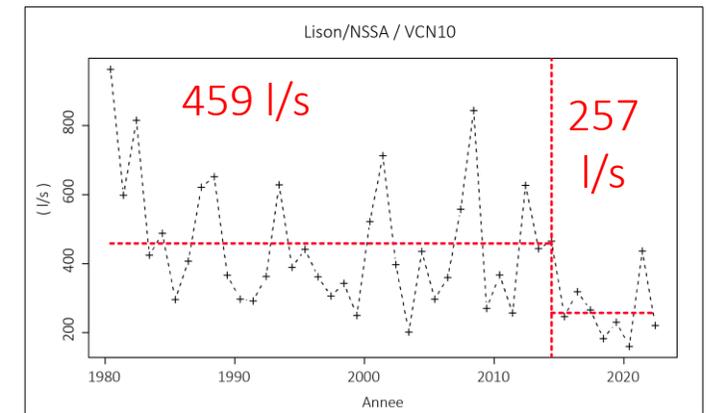
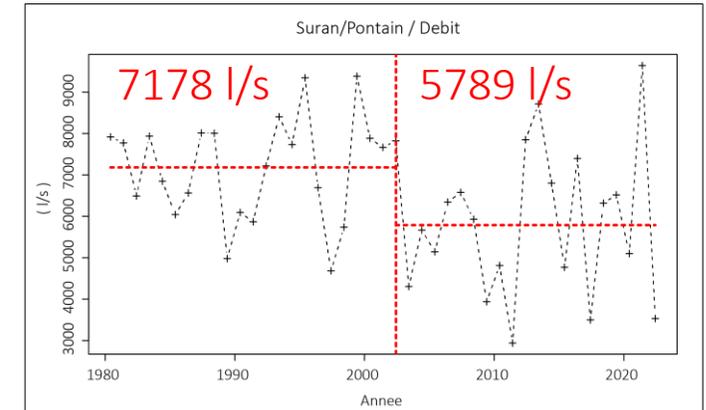
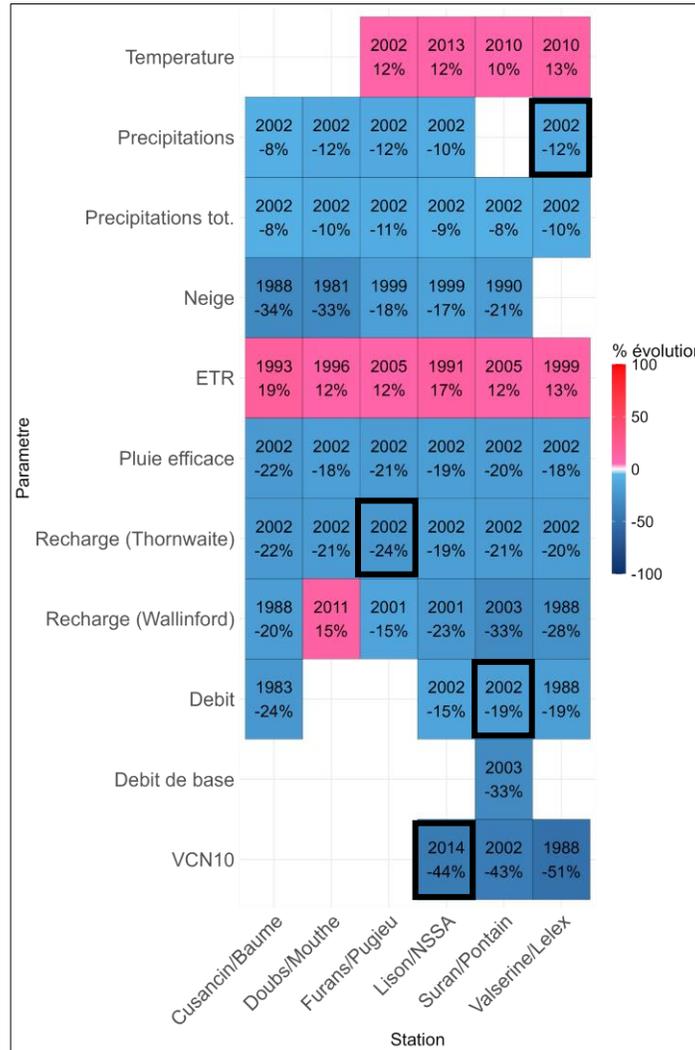
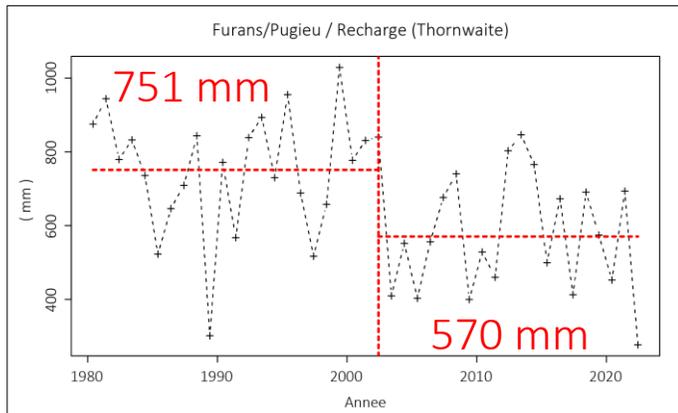
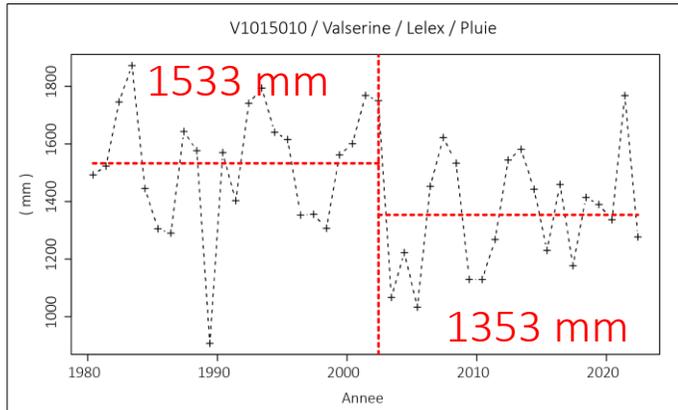
Stationnarité par station et paramètre



Stationnarité à l'échelle annuelle - tendances

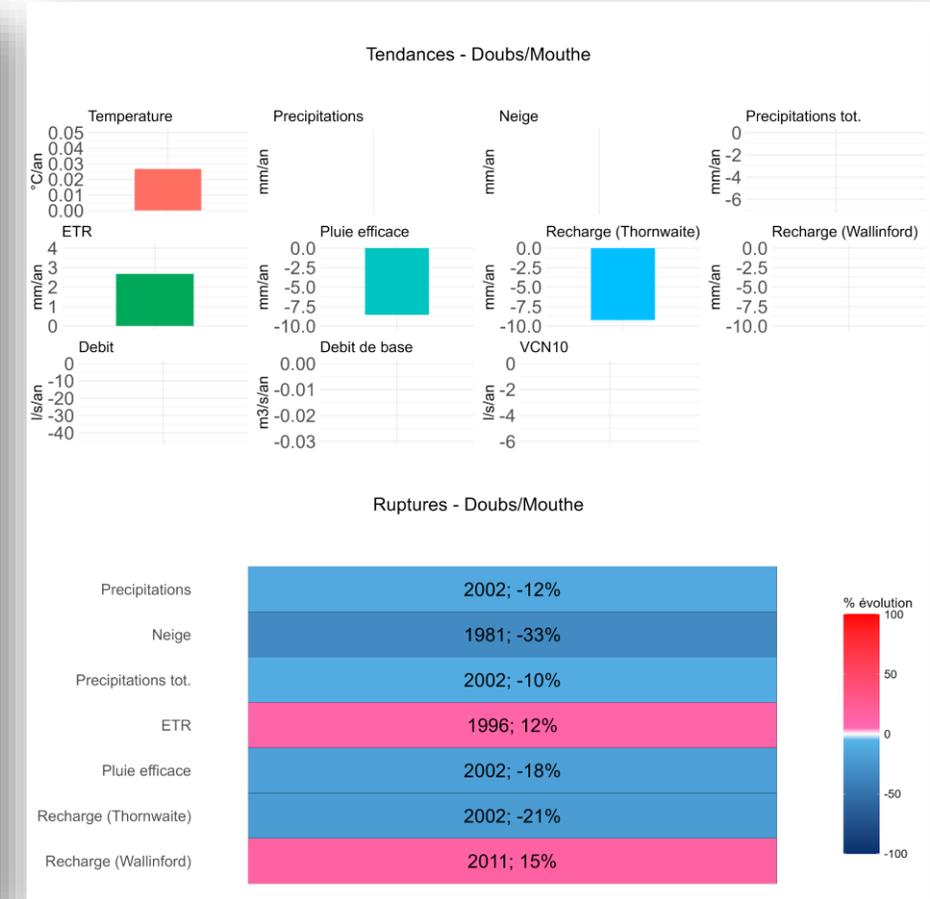
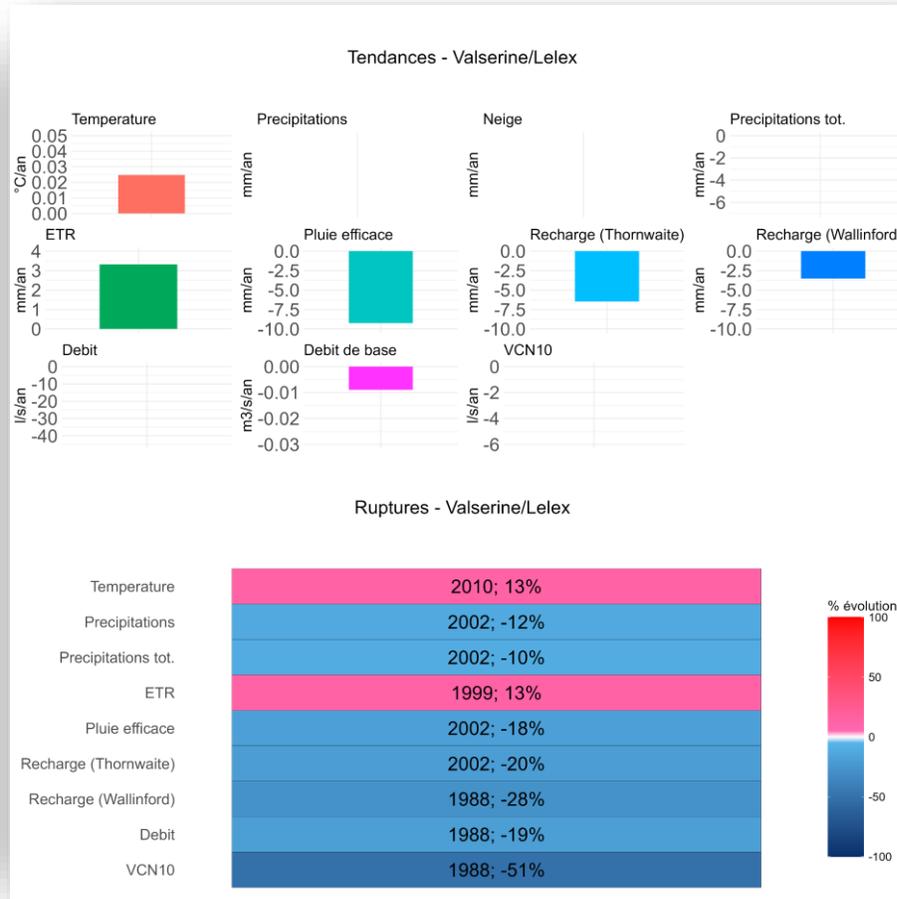
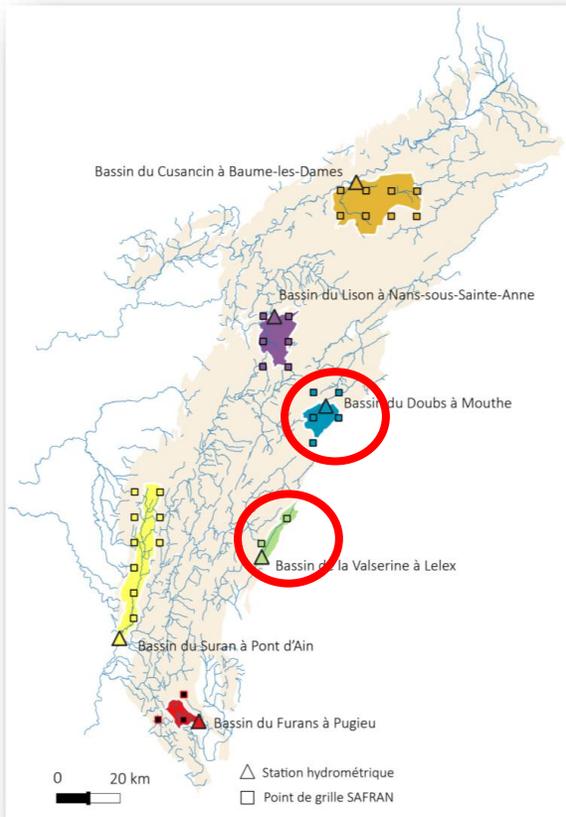


Stationnarité à l'échelle annuelle - ruptures



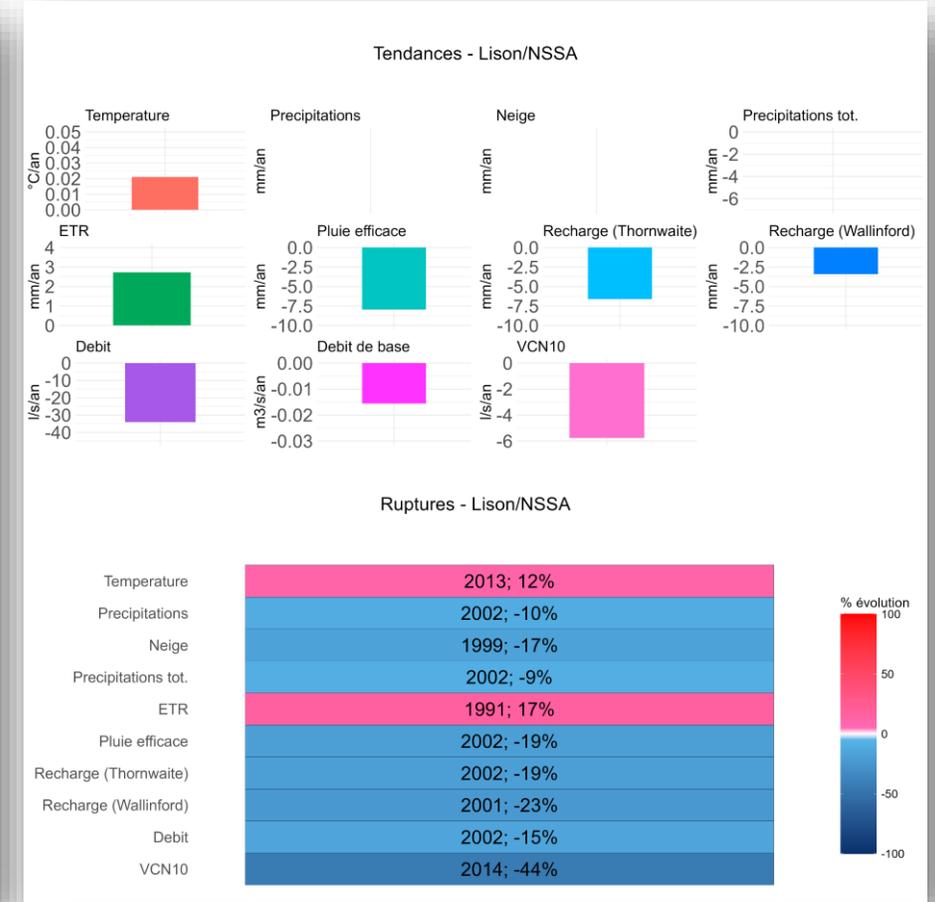
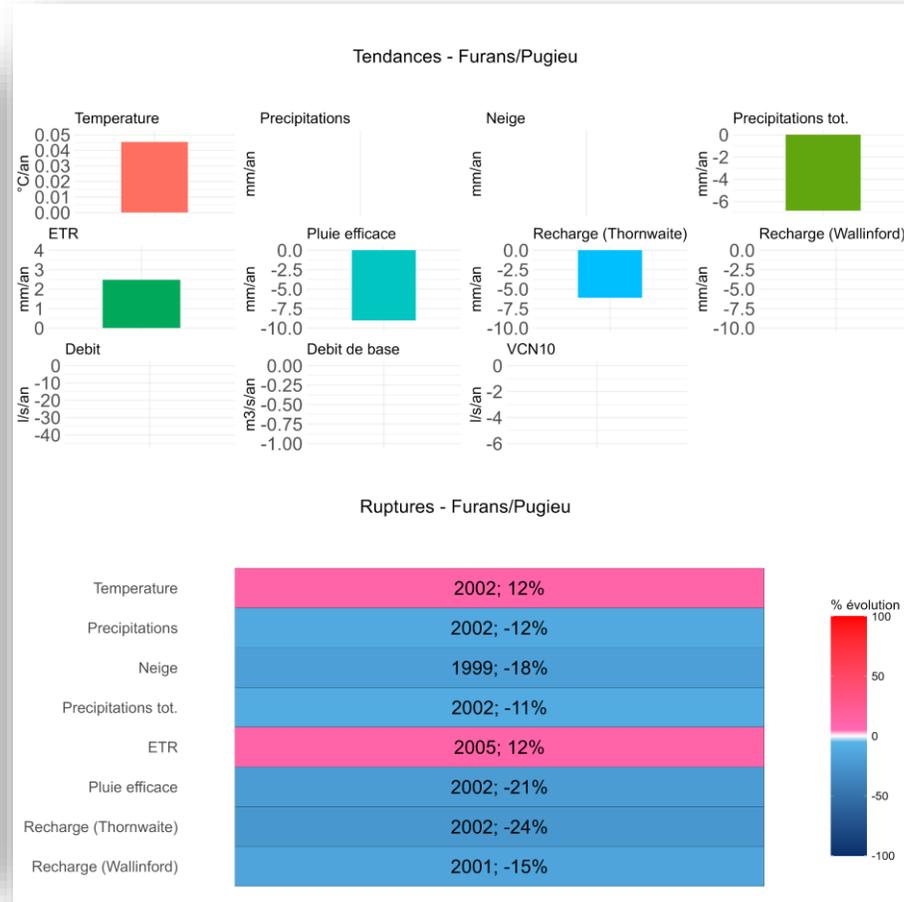
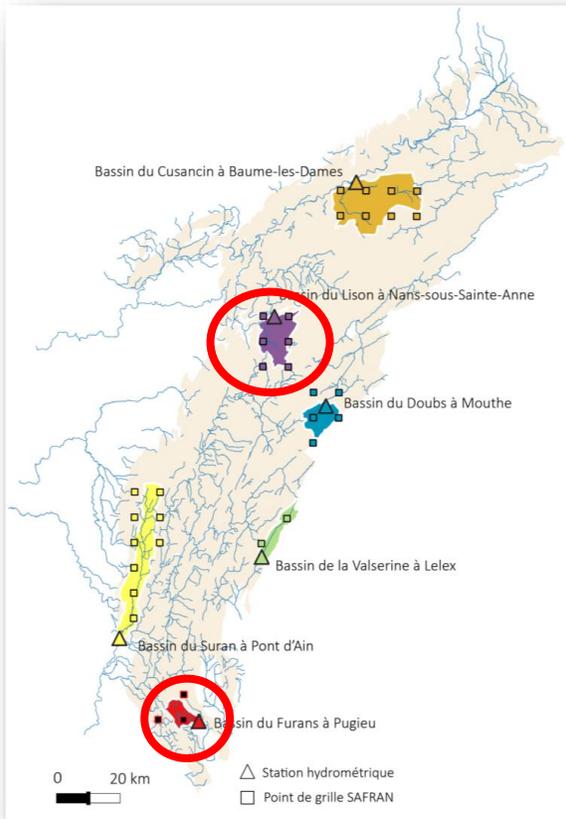
Stationnarité à l'échelle annuelle

- Haute-Chaîne



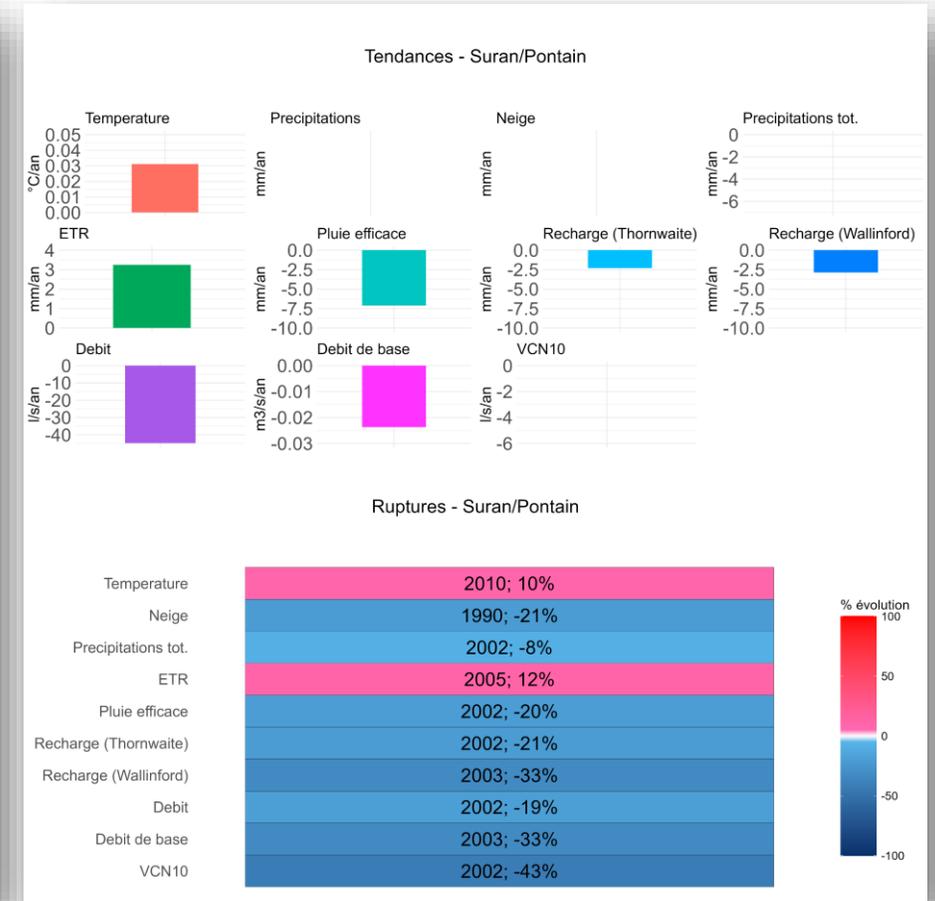
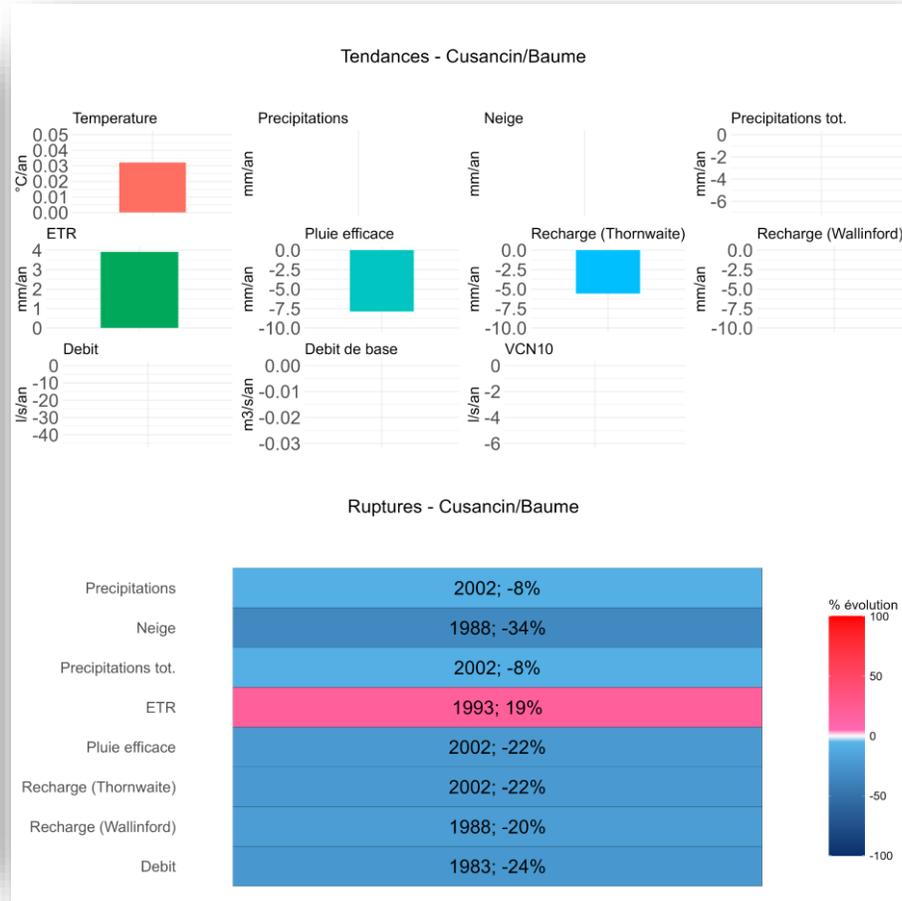
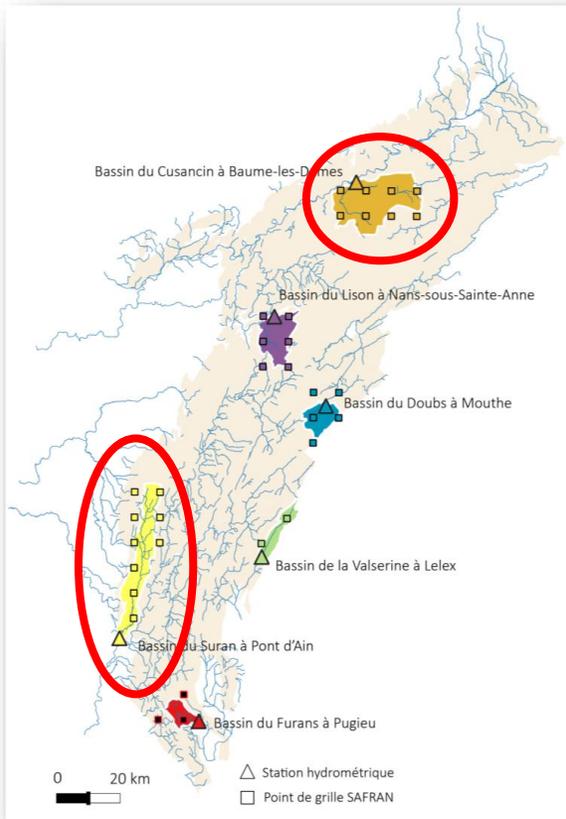
Stationnarité à l'échelle annuelle

- Deuxième Plateau

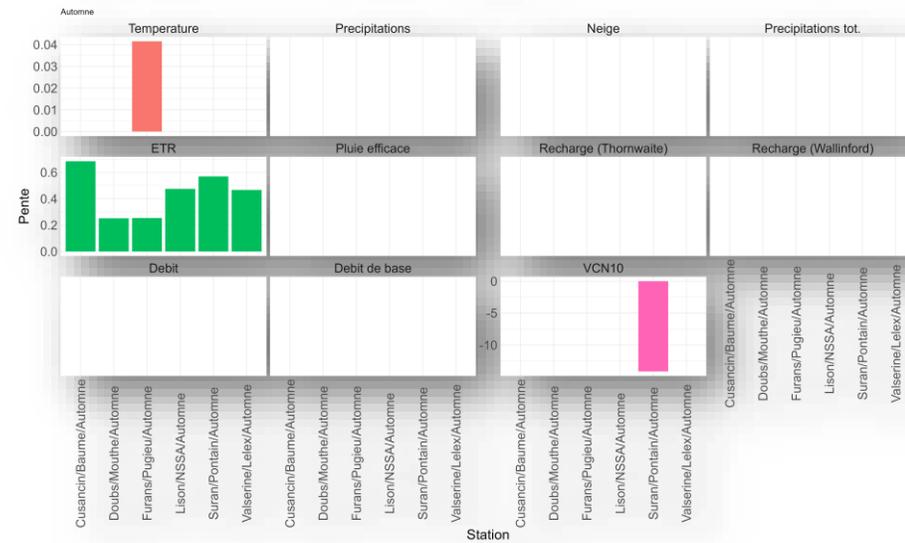
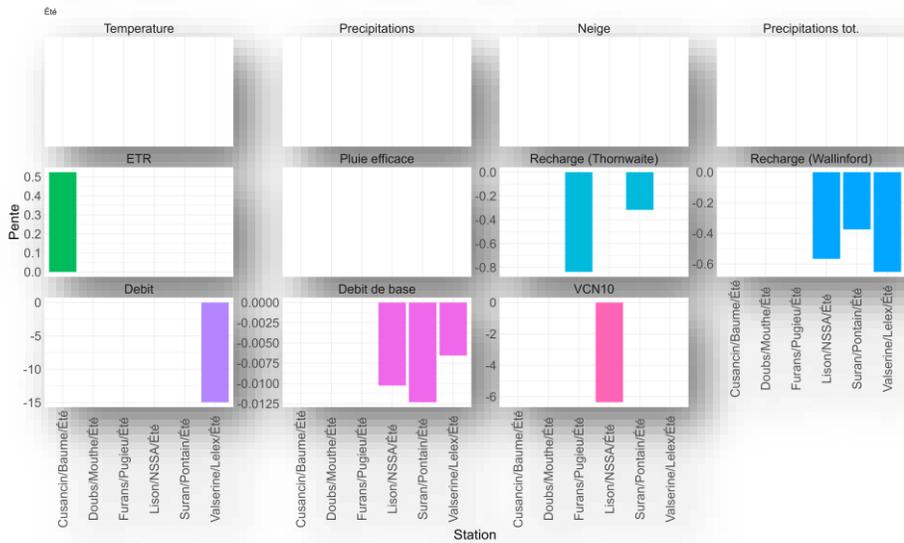
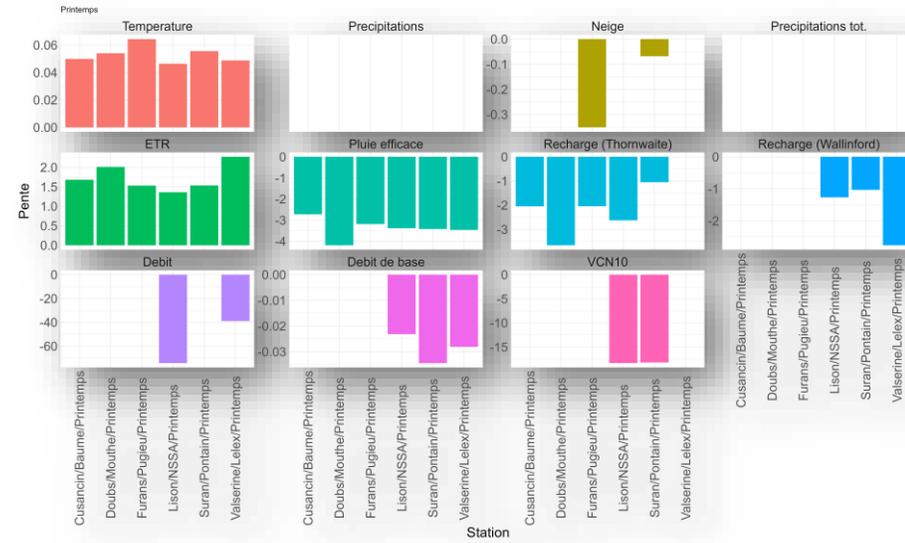
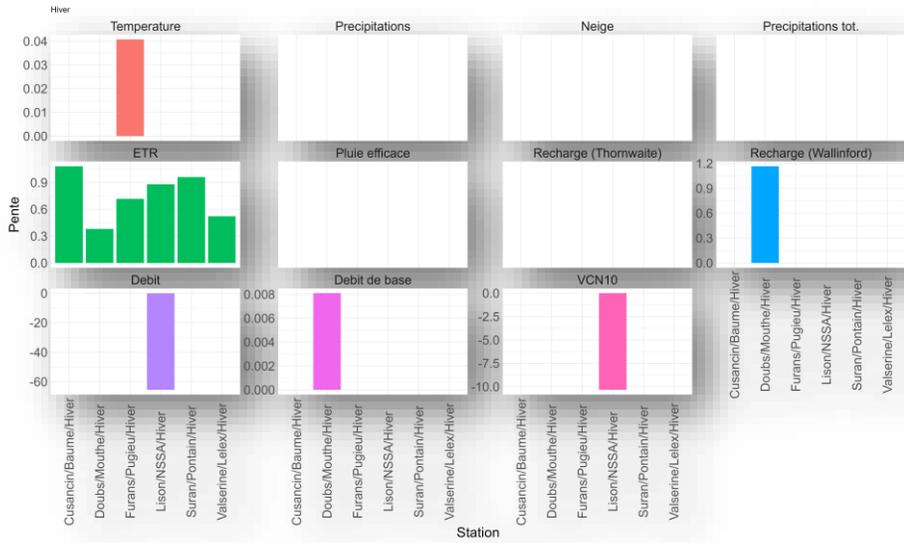


Stationnarité à l'échelle annuelle

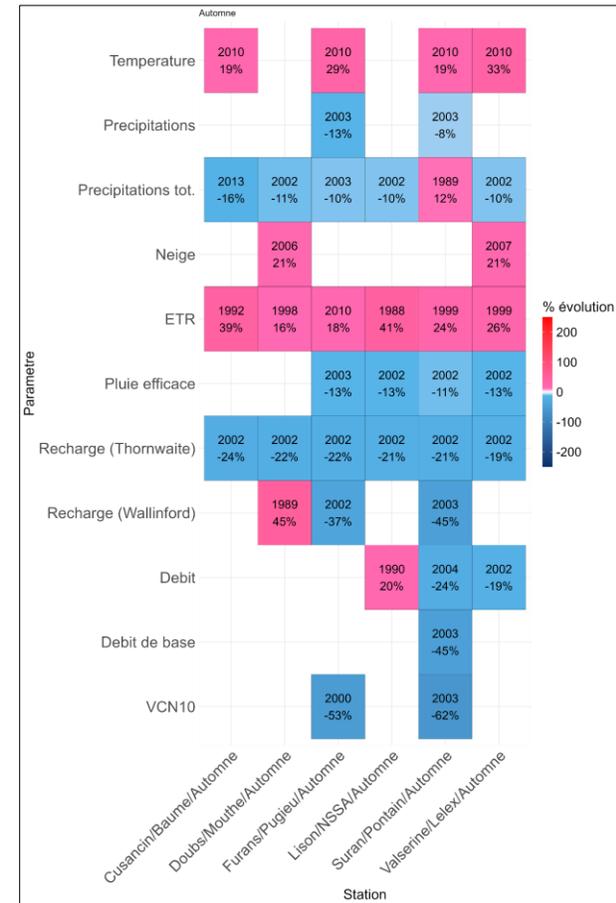
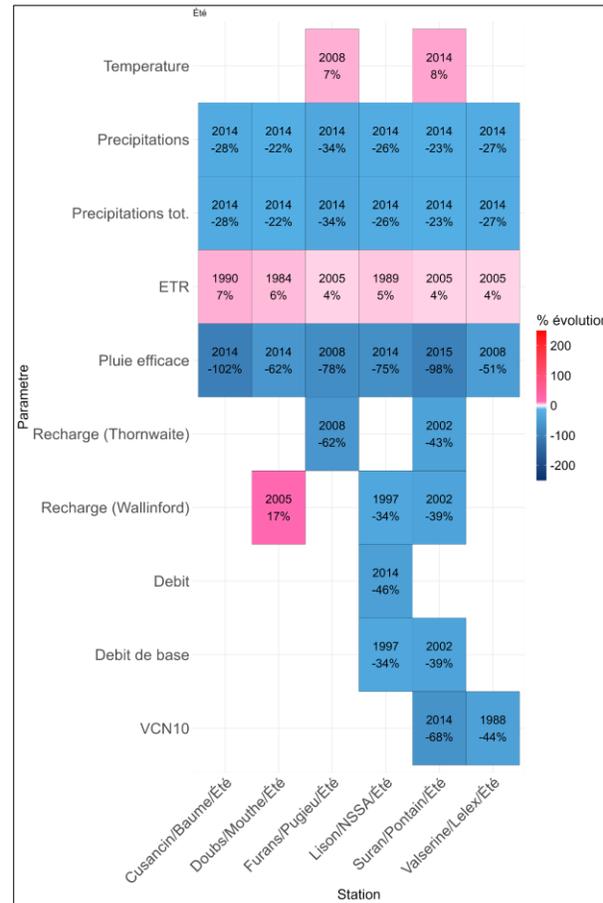
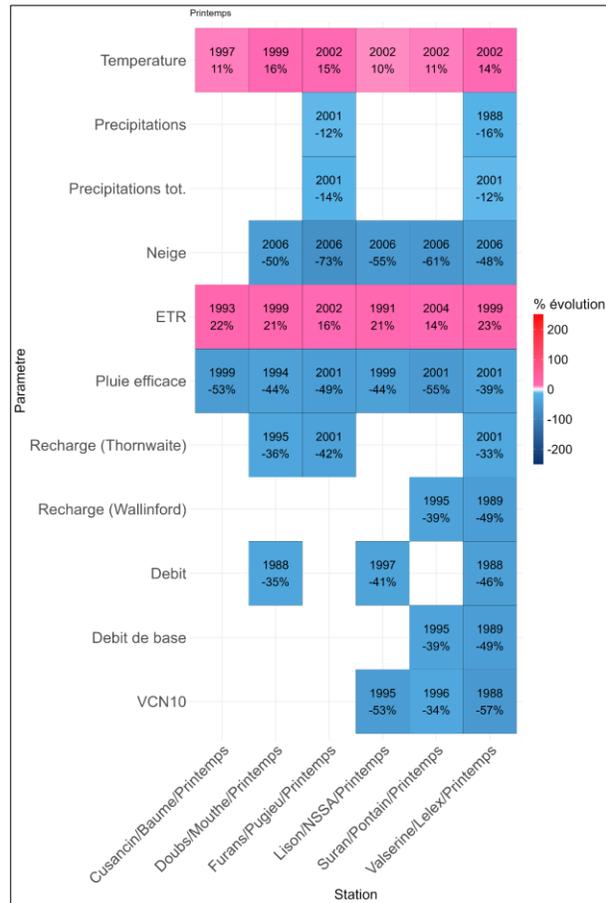
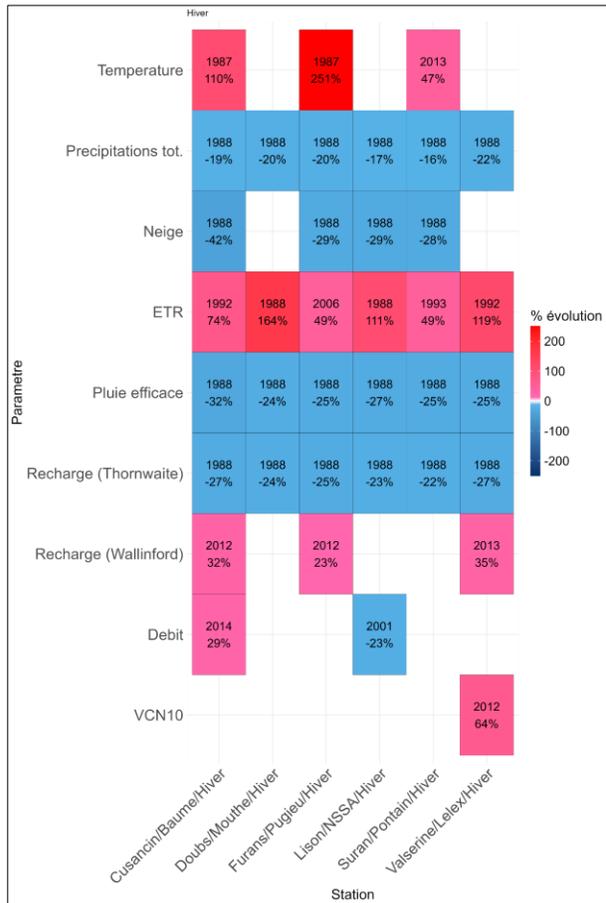
- Premier Plateau et Avant-Monts



Stationnarité à l'échelle saisonnière - tendances



Stationnarité à l'échelle saisonnière - ruptures



### Interactions/influences

- Précipitations efficaces jouent un rôle central > représentent l'eau directement disponible pour alimenter les écoulements de surface et les réserves souterraines ;
- Débits d'étiage (VCN10) et les débits de base > fortement corrélés avec la recharge du karst ;
- Recharges directement influencées par les précipitations hivernales > détermine pour partie les réserves pour les étiages estivaux. Baisse notable des précipitations hivernales impacte significativement la recharge + augmentation de l'ETR (notamment estivale) exacerbant les déficits hydriques estivaux.

### Tendances Temporelles

Absence stationnarité généralise avec tendances/ruptures convergent vers une raréfaction inquiétante de la ressource en eau, quelques exemples :

- Températures : Augmentation tendancielle significative dans toutes les stations (+0.3 à +0.5 °C par décennie) ;
- Précipitations : Ruptures observées sur 5 stations en 2002 ;
- Précipitations efficaces/recharges/débits : marquées par des tendances/ruptures quasi généralisées et dans certains cas particulièrement importantes (cas du Lison à NSSA)

### Différences Fonctionnelles et typologie :

- Haute-Chaîne (Doubs, Valserine) : Faible variabilité hydrologique (précipitations/recharge/Q), mais impact de la diminution des précipitations neigeuses (printemps - 50 %).
- Deuxième Plateau (Lison, Furans) : Variabilité hydrologique modérée > mixité flux de surface/souterrain et une capacité intermédiaire d'adaptation.
- Premier Plateau (Cusancin, Suran) : Dépendance forte aux flux de surface, vulnérabilité accrue aux sécheresses prolongées.

## Tendances Temporelles

- Hiver/printemps : Réduction des précipitations efficaces, impact direct sur la recharge hivernale et disponibilité estivale + impact pluriannuel de recharges déficitaires (âge de l'eau en étiage souvent > 5 ans) ?
- Été : Augmentation de l'ETR et accentuation des périodes d'étiage prolongées /rôle de l'évaporation sur la diminution des débits d'étiage des rivières ? + séquences d'étiage deviendraient plus longues (comme pour l'étiage 2018 qui a duré près de six mois), avec notamment un démarrage plus précoce dans l'année (couvert neigeux absent).

## Typologie

- Basculement typologique : Les bassins du "Deuxième Plateau " risque de basculer vers une dynamique plus proche du "Premier Plateau« , même chose pour Haute-Chaîne > "Deuxième Plateau "
- Prendre en considération les paramètres structurels (nature des réservoirs/karstification) en plus des paramètres conjoncturels

## Changement climatique

- Mettre en perspective ces résultats avec les travaux sur le CC notamment sur des paramètres comme la recharge/débits.



Des questions ?