

A large, stylized teal graphic element on the left side of the slide, consisting of a thick, rounded shape that resembles a stylized letter 'L' or a corner bracket. It has a solid teal foreground and a lighter teal shadow behind it.

Les études « tendances » sur le régime des crues en Europe

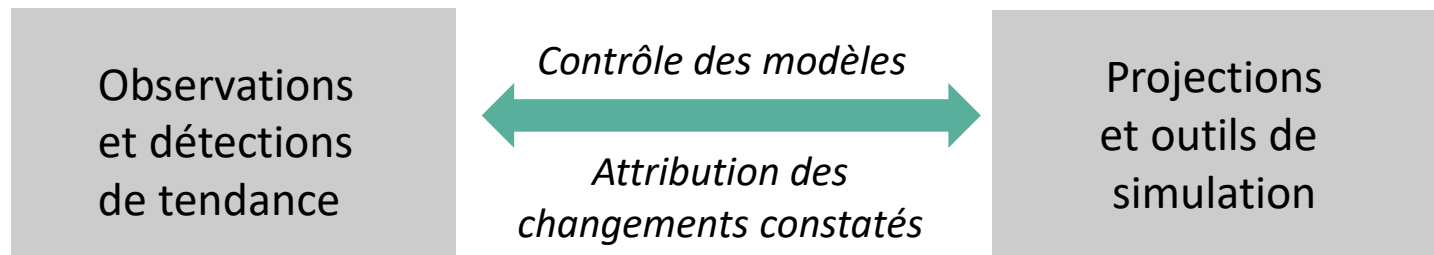
Eric SAUQUET, UR RiverLy, Lyon-Villeurbanne



Contexte : le changement climatique et ses impacts sur l'hydrologie

- Un fait : augmentation des températures de l'air → capacité accrue de l'atmosphère à contenir de l'eau
- Des constats / perceptions (impacts) : augmentation des coûts économiques dus aux inondations dans de nombreux territoires dans le monde
- Des craintes : implications pour la gestion des risques (zonages, dimensionnement des ouvrages de protection, etc.), des ressources (stratégie de remplissage/vidange des réservoirs) et des sols pour l'agriculture et pour les écosystèmes ("déphasage" avec des cycles biologiques)

Deux approches complémentaires pour appréhender l'impact du changement climatique





Objectifs et plan

- Des études globales qui indiquent des tendances à la baisse des intensités de crue mais des contrastes régionaux (ex. Do et al., 2017 ; Najibi and Devineni, 2018), **à confirmer à l'échelle européenne ?**
- Les principes d'une étude de stationnarité
- Deux illustrations à l'échelle européenne
- Un zoom sur le pourtour méditerranéen



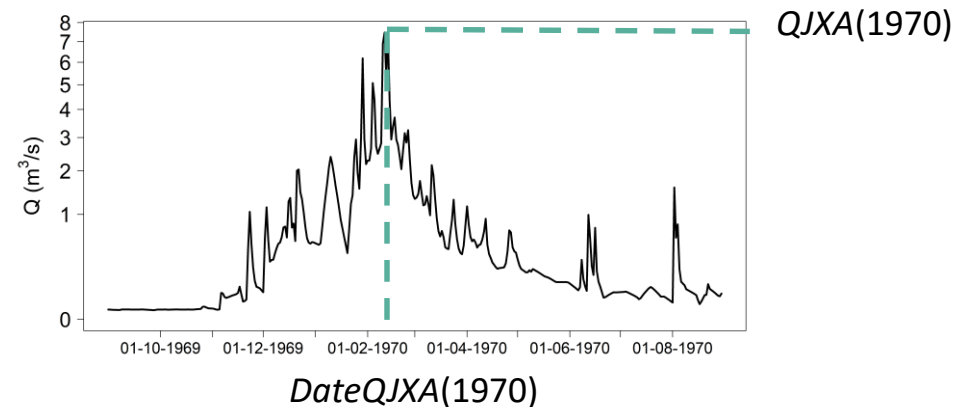
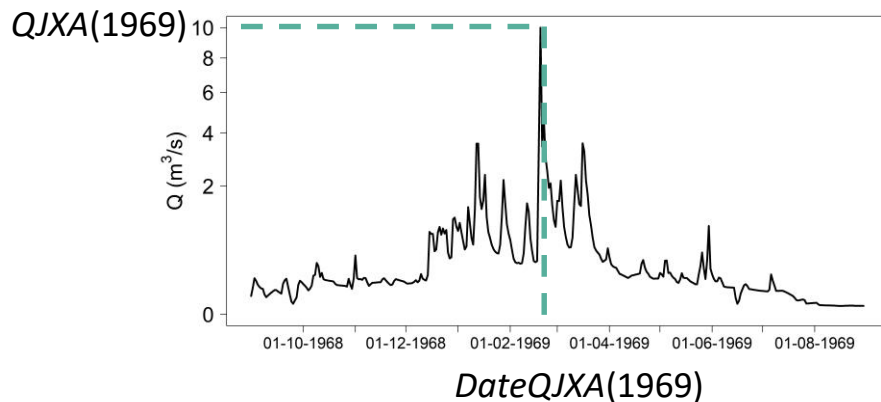
Les principes d'une étude de stationnarité



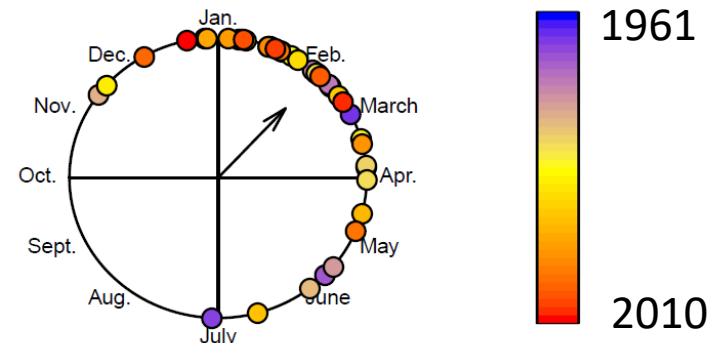
Les principes d'une étude de stationnarité

Les principes d'une étude de stationnarité







- Variables examinées :
 - Date et valeur des débits maximaux annuels

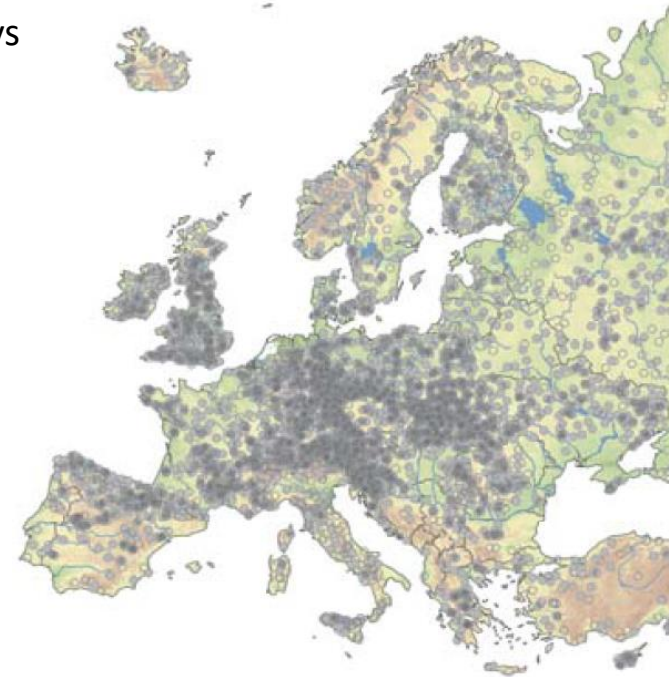


1. Transformation en jour Julien, puis en angle (radian)
 $\theta = \text{DateQJXA} \times 2\pi/366$
2. Positionnement sur le cercle trigonométrique
3. Calcul d'une date moyenne



Contraintes sur les jeu de données

- Période d'intérêt : 1960-2010
- Bassins sans influence anthropique notable de 38 pays
- *Analyse des magnitudes des crues* : (1) au moins **40 ans de données**, sauf pour    (49 ans), (2) le premier enregistrement ≤ 1968 et (3) le dernier enregistrement ≥ 2002 → 2370 stations avec une surface médiane de 381 km²
- *Analyse de la saisonnalité des crues* : **au moins 35 ans de données**, sauf    (49 ans) → 3298 stations avec une surface médiane de 420 km²
- Complément : base de données E-OBS et CPC Soil Moisture pour la température, les précipitations et l'humidité des sols

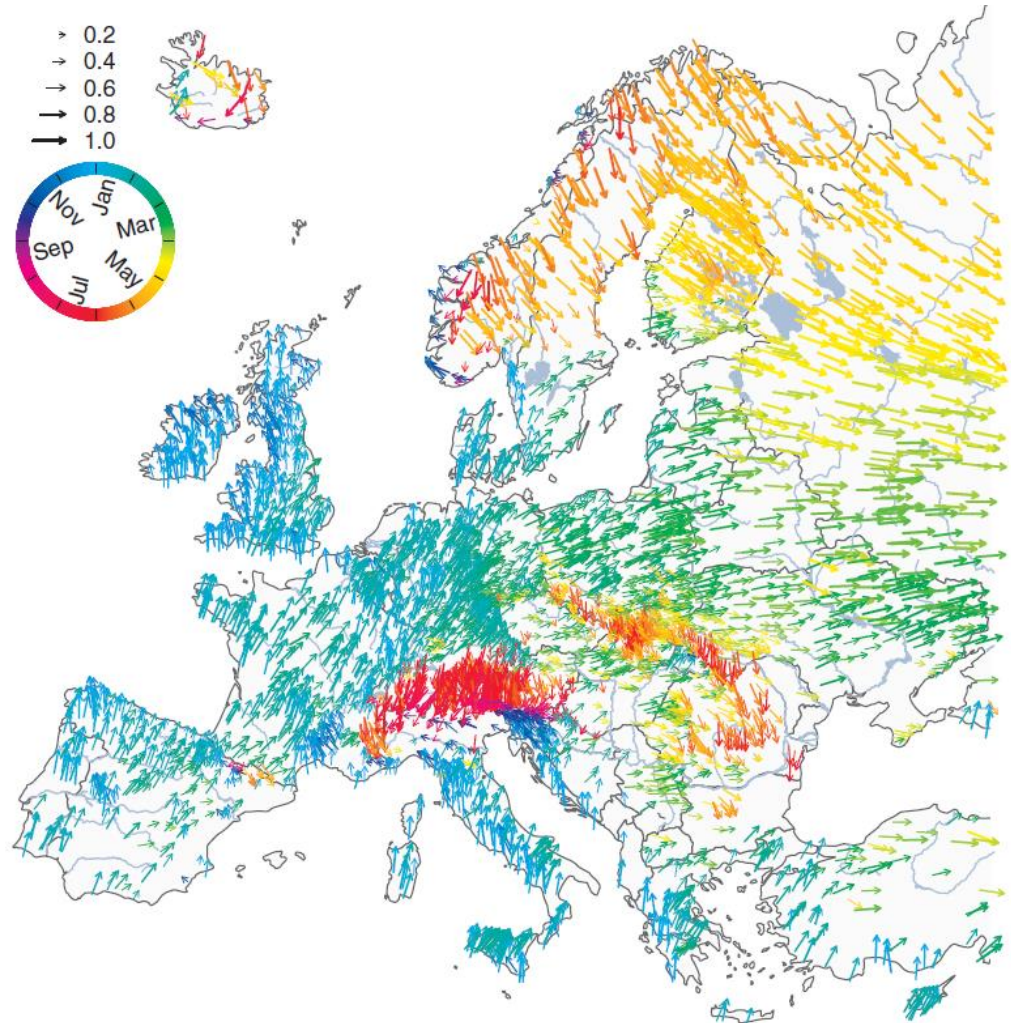


Stations hydrométriques
(○ : ≥ 10 années de données ;
● : ≥ 35 années de données)

Saisonnalité des crues

- Variabilité spatiale

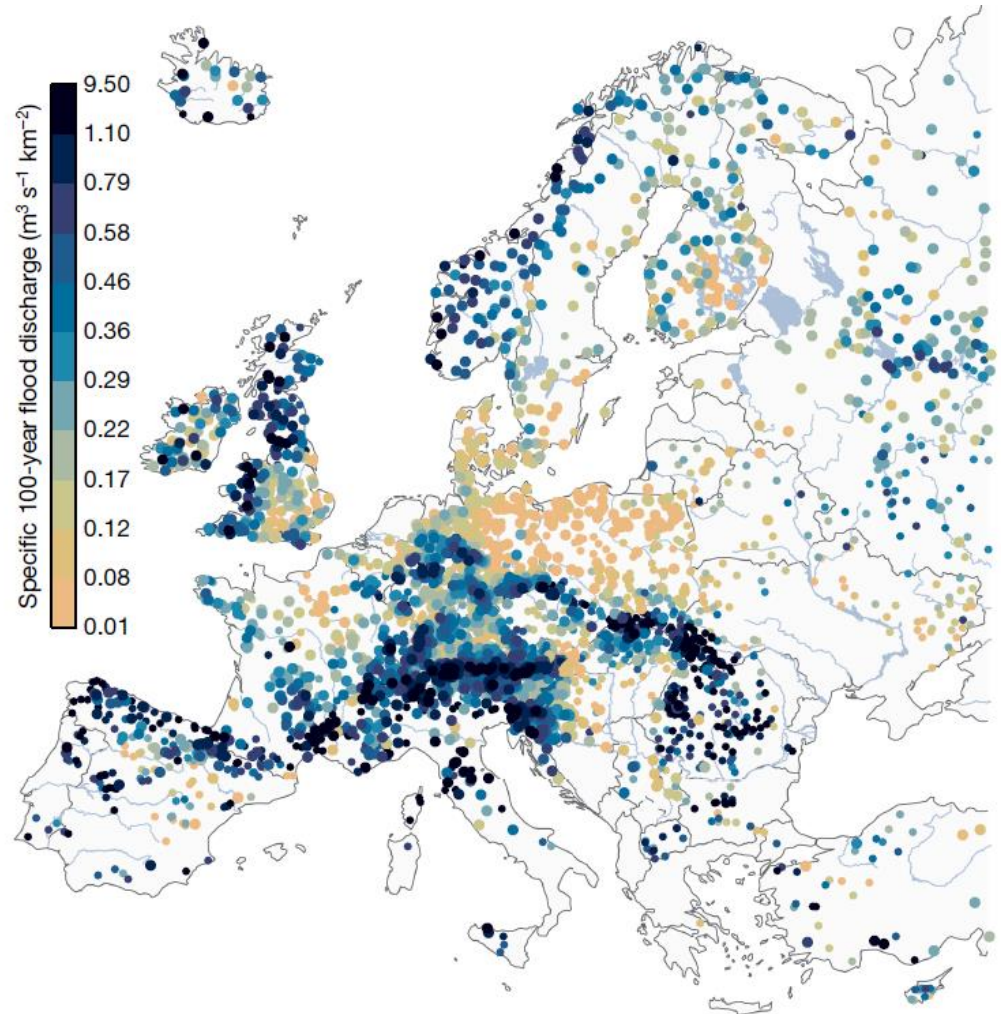
Contrairement à ce qu'un hydraulicien pourrait croire
/!\ ceci n'est pas un champs /!\
de vitesse 😊



Date moyenne d'occurrence des crues sur la période 1960–2010, indiquée par la direction et la couleur de la flèche. Chaque flèche représente une station. La longueur de la flèche renseigne le caractère fortement (1) ou faiblement (0) saisonnalisé

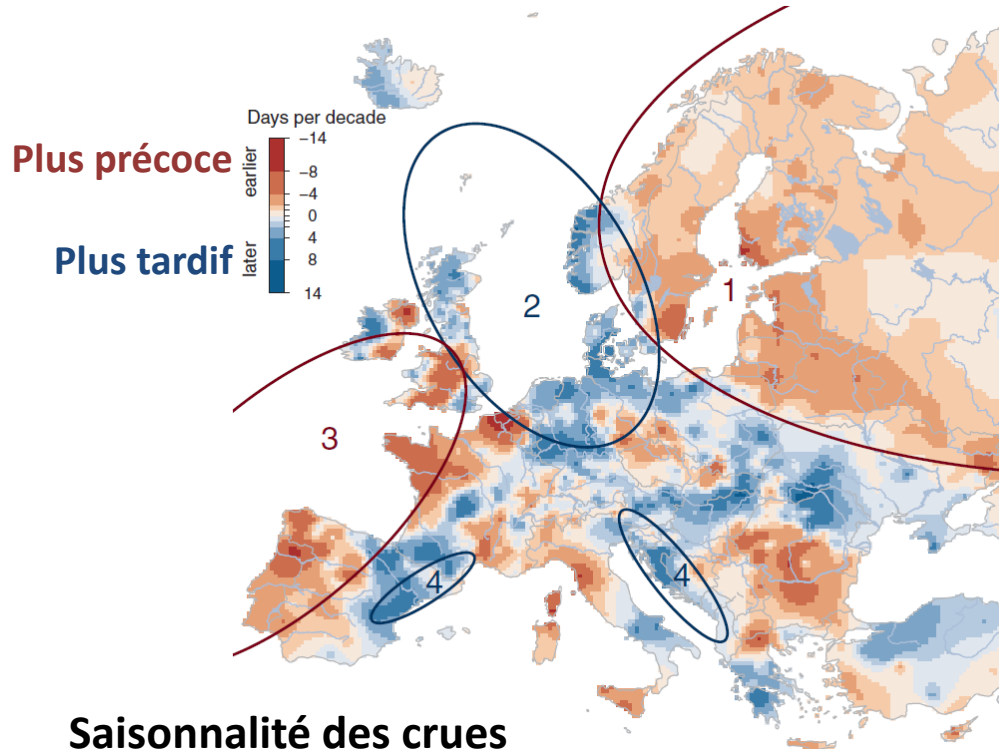
Intensité des crues

- Variabilité spatiale



*Quantile de crue centennal (débit spécifique)
sur la période 1960-2010*

Résultats

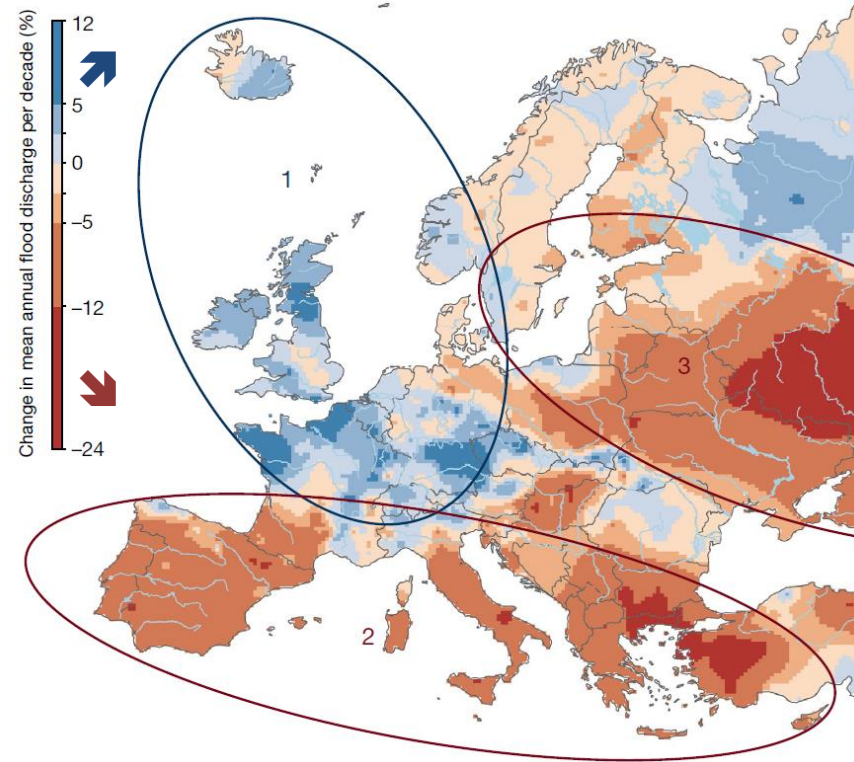


Saisonnalité des crues

Changement exprimé jours par décennie.

Les nombres 1–4 désigne des régions avec des drivers distincts :

- 1, Nord Est : fonte plus précoce
- 2, Mer du Nord : tempêtes hivernales plus tardives
- 3, Ouest (côte) : conditions de saturation plus précoces
- 4, régions en Méditerranée : influence atlantique accentuée



Magnitude des crues

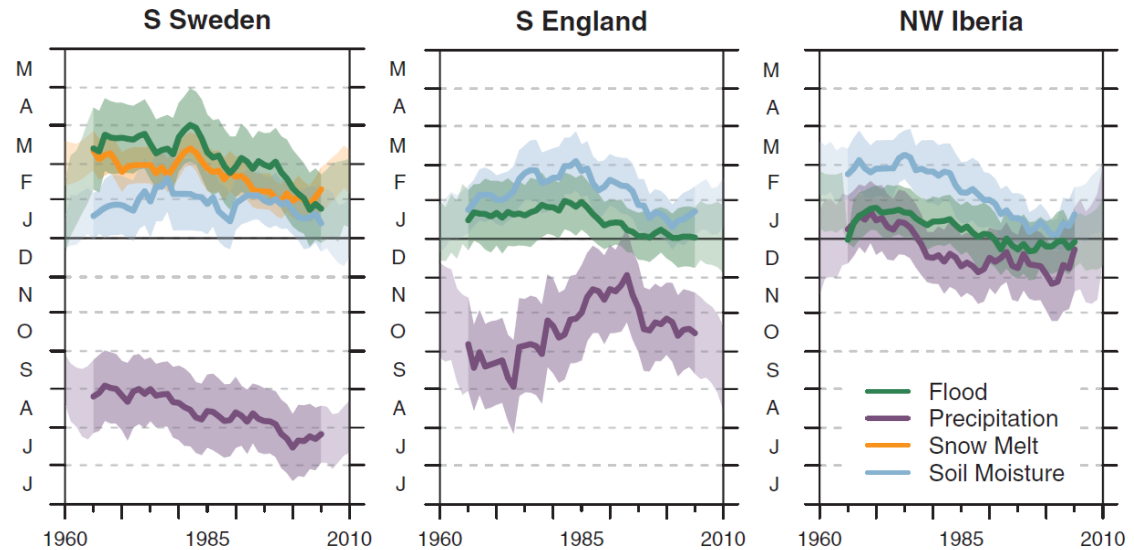
Changement exprimé en % de la moyenne des QJXA par décennie.

Les nombres 1–3 désigne des régions avec des drivers distincts :

- 1, Nord Ouest : ↗ précipitation et ↗ humidité
- 2, Sud : ↘ précipitations et ↗ évaporation
- 3, Est : ↘ eaux de fonte et fonte plus précoce

Saisonnalité des crues

- **A la recherche des origines des tendances**
- S Suède : évolution temporelle du pic de crue ~ celle de la fonte des neiges de fin mars à février



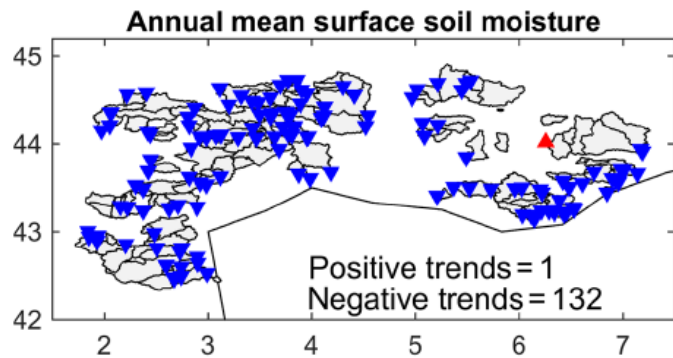
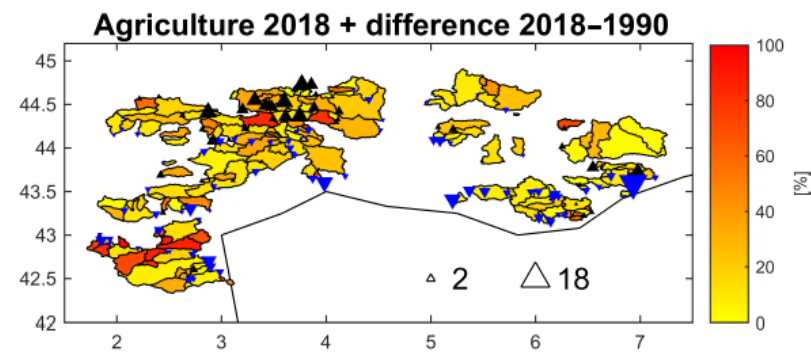
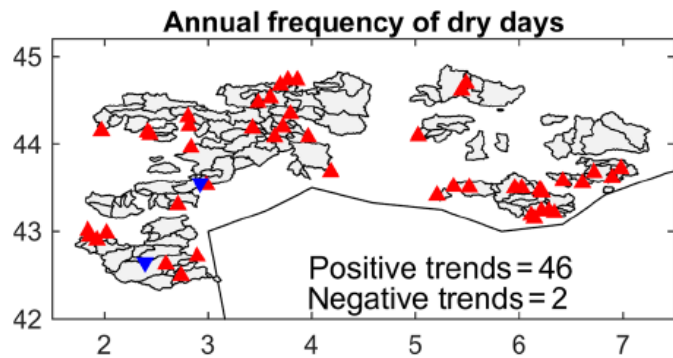
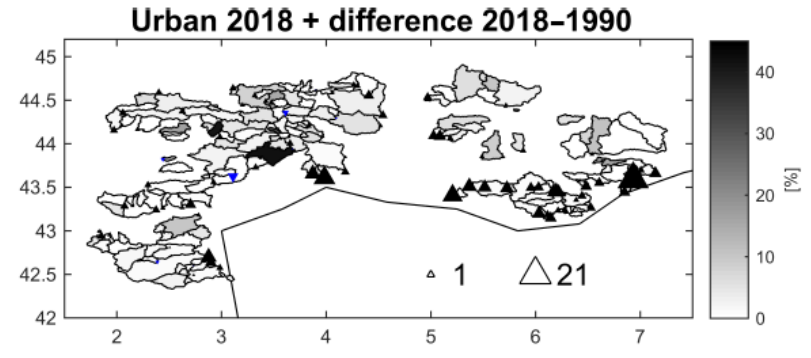
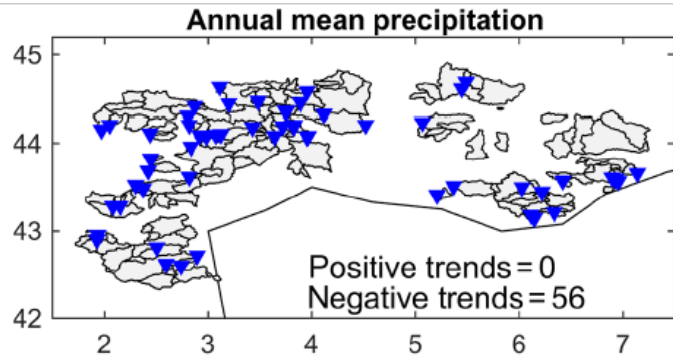
- S Angleterre : évolution temporelle du pic de crue ~ celle de de l'humidité des sols de février à janvier. Du fait des capacités de stockage importantes en souterrain, les fortes précipitations d'automne ont tendance à s'accumuler, et l'humidité du sol et les nappes augmentent continuellement jusqu'à atteindre leur maximum en hiver. Les pluies hivernales soutenues sur des sols saturés vont être les déclencheurs des crues en hiver
- NO Espagne : ~ mêmes processus que pour l'Angleterre mais concomitance des maxima de précipitation et d'humidité du sol



Un zoom sur le pourtour méditerranéen

- Objectif : analyser des tendances dans les caractéristiques de crue sur un échantillon étendu de données et les relier à des évolutions du climat et d'occupation du sol
- Variables examinées :
 - Nombre d'événements de crue au dessus de deux seuils élevés (percentiles 95% et 99% calculés sur toute la chronique) et intensité du dépassement
 - Percentiles annuels 95% et 99%
- Un jeu de données régional : 171 séries de débits journaliers de plus de 20 ans (durée médiane = 45 ans)
- Test de Mann Kendall pour tester la significativité, pente de Sen pour estimer l'intensité du changement et régression pour identifier des causes possibles
- Données auxiliaires : précipitations (SAFRAN), humidité du sol (ISBA) et occupation du sol (Corine Land Cover)

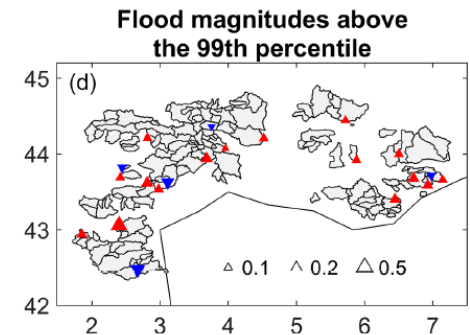
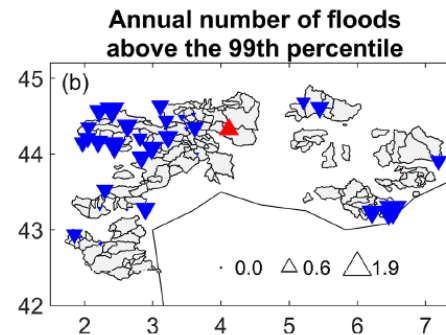
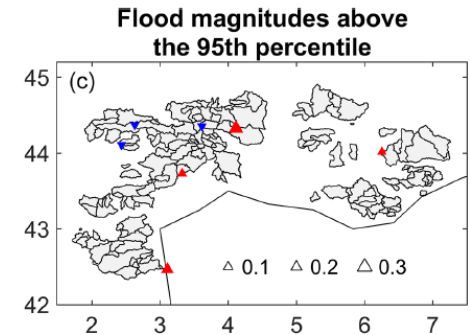
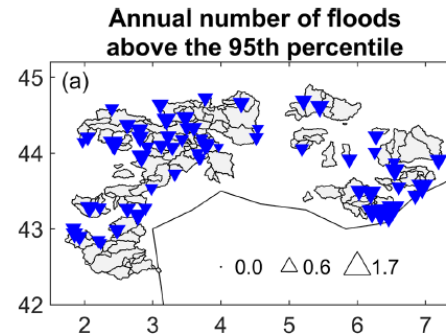
Un zoom sur le pourtour méditerranéen



| Variable | Positive trends | Negative trends | Regional significance |
|--------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------------|
| Mean precipitation | 0 | 56 | Yes |
| Mean rainfall | 1 | 49 | Yes |
| Frequency of dry days | 46 | 2 | Yes |
| Mean temperature | 166 | 0 | Yes |
| Mean surface soil moisture | 1 | 132 | Yes |
| Mean actual evapotranspiration | 169 | 0 | Yes |

Un zoom sur le pourtour méditerranéen

Tendances significatives au niveau de 10 % (test de Mann-Kendall) du nombre annuel de crues au-dessus des percentiles (a, b) et du dépassement de seuil (c, d). Les triangles bleus (resp. rouges) indiquent une diminution (resp. une augmentation). La taille des triangles indique les changements relatifs



| Variable | Positive trends | Negative trends | Regional significance |
|--|-----------------|-----------------|-----------------------|
| Number of floods above the 95th percentile | 0 | 67 | Yes |
| Number of floods above the 99th percentile | 1 | 45 | Yes |
| Flood magnitudes above the 95th percentile | 4 | 3 | No |
| Flood magnitudes above the 99th percentile | 16 | 5 | No |



Un zoom sur le pourtour méditerranéen

- **A la recherche des origines des tendances**
- Les bassins où une à la baisse de l'occurrence des crues est suggérée sont plutôt de grande taille (taille moyenne de 369 km² contre 253 km² pour les bassins sans tendance significative), avec une plus faible proportion de zones karstiques (33% contre 41 %) et de zones urbaines (1,7% contre 3,79 %), ayant de plus faible augmentation de l'urbanisation (+0,77% contre +0,41%) (test Student)
- L'humidité du sol antérieure est un driver et sa tendance à la diminution expliquerait la réduction du nombre de crues annuel, et cela malgré la hausse des précipitations fortes constatée dans le secteur (Ribes et al., 2019)

| Variable | Positive trends | Negative trends |
|--|-----------------|-----------------|
| Cumulative precipitation during floods above the 95th percentile | 36 | 6 |
| Cumulative precipitation during floods above the 99th percentile | 34 | 3 |
| Antecedent wetness conditions for floods above the 95th percentile | 10 | 40 |
| Antecedent wetness conditions for floods above the 95th percentile | 6 | 24 |

Cumulative precipitation = sum of nonzero consecutive rainy days, on a time window up to 10 days prior to the flood event



Difficultés et limite de l'exercice

**/!\ difficulté d'identifier des tendances dans les extrêmes /!\
/!\ peu de stations propices à des études de tendance /!\
/!\ effets antagonistes qui masquent les changements combinés /!**

- Absence de tendance partagée sur le globe, à l'échelle européenne mais des tendances régionales peuvent émerger (si homogénéité hydro-climatique)
- Des effets sensibles quand le processus dominant est lié de manière univoque à la température
- Dans le sud de la France, une forme de contradiction entre des crues moins fréquentes et un coût croissant des dommages causés par les inondations
→ une augmentation des coûts due à une augmentation de la vulnérabilité socio-économique (Neppel et al., 2003)
- Aucune capacité prédictive (ne pas extrapoler des tendances)



Références

- Blöschl, G. et al. Changing climate shifts timing of European floods. *Science* 357, 588–590 (2017).
- Blöschl, G. et al. Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 573, 108–111(2019)
- Tramblay, Y. et al. Detection and attribution of flood trends in Mediterranean basins. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23, 4419–4431, <https://doi.org/10.5194/hess-23-4419-2019> (2019)




La pente de Sen

This test computes both the slope (i.e. linear rate of change) and intercept according to Sen's method. First, a set of linear slopes is calculated as follows:

$$d_k = \frac{X_j - X_i}{j - i}$$

for $(1 \leq i < j \leq n)$, where d is the slope, X denotes the variable, n is the number of data, and i, j are indices.

Sen's slope is then calculated as the median from all slopes: $b = \text{Median } d_k$.



Le test de Mann-Kendall

The non-parametric Mann-Kendall test is commonly employed to detect monotonic trends in series of environmental data, climate data or hydrological data. The null hypothesis, H_0 , is that the data come from a population with independent realizations and are identically distributed. The alternative hypothesis, H_A , is that the data follow a monotonic trend. The Mann-Kendall test statistic is calculated according to :

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(X_j - X_k)$$

with

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{if } x = 0 \\ -1 & \text{if } x < 0 \end{cases}$$

The mean of S is $E[S] = 0$ and the variance σ^2 is

$$\sigma^2 = \left\{ n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=1}^p t_j(t_j-1)(2t_j+5) \right\} / 18$$

where p is the number of the tied groups in the data set and t_j is the number of data points in the j th tied group. The statistic S is approximately normal distributed provided that the following Z-transformation is employed:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sigma} & \text{if } S < 0 \end{cases}$$

The statistic S is closely related to Kendall's τ as given by:

$$\tau = \frac{S}{D}$$

where

$$D = \left[\frac{1}{2}n(n-1) - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^p t_j(t_j-1) \right]^{1/2} \left[\frac{1}{2}n(n-1) \right]^{1/2}$$