

Partenariat 2011 - **Action 1**

Rôle de la variabilité climatique dans l'évolution temporelle des régimes d'étiage en France

Rapport 2011
Version du 28/02/2012

Ignazio Giuntoli
Benjamin Renard
Jean-Philippe Vidal

Février 2012

Irstea Lyon
UR Hydrologie-Hydraulique
3 bis quai Chauveau – CP 220
69336 Lyon cedex 09
Tél. 04 72 20 87 87 - Fax 04 78 47 78 75

Contexte de programmation et de réalisation

Les actions réalisées au cours des années précédentes ont permis de mettre en place le réseau de référence pour la surveillance des étiages. L'analyse des données issues des stations du réseau a révélé un certain nombre de tendances affectant le régime des étiages en France, parmi lesquelles : (i) une aggravation de la sévérité des étiages dans la partie sud du pays ; (ii) de nombreux changements significatifs décrivant un décalage de la période d'étiage vers plus de précocité (surtout le début de l'étiage). L'objectif principal de l'action effectuée cette année a été de dépasser la seule détection de tendance, et de mieux appréhender le rôle de la variabilité climatique de grande échelle dans la variabilité temporelle des régimes d'étiage. Cette évaluation est importante d'une part pour mieux comprendre l'origine des évolutions détectées, d'autre part pour ses conséquences éventuelles en termes de prédétermination ou de prévision saisonnière.

Les auteurs

Ignazio Giuntoli
Ingénieur de recherche
ignazio.giuntoli@irstea.fr
Irstea Lyon

Benjamin Renard
Chargé de recherche
benjamin.renard@irstea.fr
Irstea Lyon

Jean-Philippe Vidal
Chargé de recherche
Jean-philippe.vidal@irstea.fr
Irstea Lyon

Les correspondants

Onema : *Pascal Maugis, Chargé de mission Hydrologie, pascal.maugis@onema.fr*

Cemagref : *Benjamin Renard, Irstea, benjamin.renard@irstea.fr*

Droits d'usage :	<i>Accès libre</i>
Couverture géographique :	<i>France</i>
Niveau géographique:	<i>National</i>
Niveau de lecture:	<i>Professionnels, experts</i>
Nature de la ressource :	<i>Document</i>

ROLE DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE DANS L'EVOLUTION TEMPORELLE DES REGIMES D'ETIAGE EN FRANCE
RAPPORT
IGNAZIO GIUNTOLI, BENJAMIN RENARD, JEAN-PHILIPPE VIDAL

SOMMAIRE

Résumé	7
Abstract	9
Synthèse pour l'action opérationnelle	11
I. Introduction	15
I.1. Tendances hydrologiques et climat	15
I.2. Un réseau de référence pour la surveillance climatique des étiages	15
I.3. Tendances, variabilité climatique et changement climatique	16
I.4. Objectifs de l'action 2011	17
I.5. Plan du rapport	17
II. Rappel : principales tendances détectées sur les régimes hydrologiques en France métropolitaine	17
II.1. Sévérité des étiages	18
II.2. Saisonnalité des étiages	18
II.3. Moyennes eaux	19
II.4. Hautes eaux	20
III. Indices climatiques de grande échelle	23
III.1. Revue bibliographique	23
III.1.1 Oscillation Nord-Atlantique (NAO)	24
III.1.2 Oscillation Atlantique multidécennale (AMO)	26
III.1.3 Types de temps (WP)	27
III.2. Indices climatiques utilisés dans cette étude	28
III.2.1 Oscillation Atlantique multidécennale (AMO)	28
III.2.2 Oscillation Nord Atlantique (NAO)	29
III.2.3 Type de temps « flux d'ouest » (WP2)	31
III.2.4 Type de temps « anticyclonique » (WP8)	32
III.2.5 Corrélations entre indices climatiques	34
IV. Méthodologie	35

IV.1. Indices d'étiage	35
IV.2. Le test de Kendall	36
IV.3. Valeur ajoutée de l'analyse effectuée	37
V. Résultats	38
V.1. Liens synchrones : indices climatiques annuels	38
V.2. Liens synchrones : stabilité des relations hydro-climatiques	40
V.3. Liens asynchrones : indices climatiques saisonniers (NAO, WP2, WP8)	45
VI. Conclusions & Discussions	49
VI.1. Tendances temporelles et variabilité climatique	49
VI.2. Difficultés et opportunités	50
VI.2.1 Analyse fréquentielle : les limites de l'hypothèse <i>iid</i>	50
VI.2.2 Prévision saisonnière	51
VI.2.3 Projection des impacts du changement climatique	52
VII. Références	53

ROLE DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE DANS L'EVOLUTION TEMPORELLE DES REGIMES D'ETIAGE EN FRANCE

IGNAZIO GIUNTOLI, BENJAMIN RENARD, JEAN-PHILIPPE VIDAL

RESUME

Résumé

Les actions réalisées au cours des années précédentes ont permis de mettre en place un réseau de référence pour la surveillance des étiages, et d'en effectuer une analyse approfondie. Cette analyse a révélé un certain nombre de tendances affectant le régime des étiages en France, mais sans permettre néanmoins d'en attribuer l'origine : dérive de long terme liée au changement climatique ou résultat d'oscillations climatiques inter-décennales. L'objectif principal des travaux décrits dans ce rapport est de progresser dans la compréhension de l'origine de ces tendances, en recherchant des liens entre la variabilité climatique inter-annuelle à inter-décennale et la variabilité temporelle des régimes d'étiage en France.

Dans un premier temps, les principales tendances temporelles détectées au cours des actions précédentes sont rappelées brièvement, et une analyse bibliographique recensant les principaux liens hydro-climatiques connus est effectuée. Cette analyse bibliographique permet de sélectionner les modes de variabilité climatique les plus pertinents pour la zone géographique française : l'oscillation Nord-Atlantique (NAO), l'oscillation Atlantique multidécennale (AMO) et deux types de temps (circulation d'ouest WP2 et régime anticyclonique WP8). Ces modes de variabilité sont synthétisés sous la forme de séries chronologiques d'indices climatiques.

Dans un second temps, une analyse visant à détecter des corrélations entre ces indices climatiques et des indices hydrologiques décrivant les régimes d'étiage est effectuée. Les principaux liens détectés sont les suivants :

- Pour la sévérité des étiages, des corrélations avec l'AMO et la NAO sont détectées dans la partie sud du pays, avec une répartition spatiale similaire à celle observée pour les tendances temporelles. De plus, la fréquence des types de temps WP2 et WP8 semble jouer un rôle prépondérant dans la variabilité temporelle des régimes d'étiage sur une grande partie du pays, à l'exception notable du pourtour méditerranéen.
- Le rôle de la variabilité climatique, que ce soit l'AMO, la NAO ou les types de temps, est bien moins marqué pour la saisonnalité des étiages.

De plus, une étude restreinte aux très longues séries disponibles (plus de 60 ans de données sur la période 1948-2008) a permis d'évaluer la stabilité des tendances et corrélations détectées sur plusieurs périodes d'analyse (40 ans 1948-1988, 40 ans 1968-2008 et 60 ans 1948-2008). Il s'avère que les corrélations avec les indices climatiques (lorsque celles-ci existent) sont très stables d'une période à l'autre, alors que les tendances temporelles sont bien moins robustes, avec parfois des résultats contradictoires sur des périodes d'analyse différentes. Ce résultat est une indication de la pertinence des indices climatiques pour expliquer la variabilité temporelle des régimes hydrologiques, et suggère que ces indices sont de meilleurs candidats dans une optique de prédiction que la variable « temps ».

Enfin, de nombreux liens ont pu être mis en évidence sur la base des indices climatiques saisonniers. Certains de ces liens sont asynchrones : par exemple, la fréquence des types de temps en hiver et au printemps est bien corrélée avec la sévérité des étiages estivaux (surtout dans la partie nord de la France). Ceci ouvre des perspectives intéressantes en termes de prévision saisonnière.

Finalement, ce rapport discute des difficultés mais également des opportunités qui découlent de ces résultats.

Mots clés (thématique et géographique)

Régimes d'étiage, tendances, variabilité climatique, NAO, AMO, types de temps, prévision saisonnière, France

THE ROLE OF CLIMATE VARIABILITY IN THE EVOLUTION OF LOW FLOW REGIMES IN FRANCE

IGNAZIO GIUNTOLI, BENJAMIN RENARD, JEAN-PHILIPPE VIDAL

ABSTRACT

Abstract

The work performed during the previous years allowed setting up a reference gauging network for low flow monitoring, and thoroughly analyzing its data. This analysis showed numerous trends affecting low flow regimes in France, but without attributing their origin: long-term trend due to climate change or impact of climatic decadal oscillations. The main objective of the work described in this report is to explore some possible origins of these trends, by evaluating relationships between annual to decadal climate variability and the temporal variability of low flows in France.

In a first step, a brief summary of the trends detected in low flow regimes is proposed, and a literature review of known relationships between climatic and hydrologic variability is performed. This review helps in identifying the relevant modes of climate variability for the French geographic area: the North Atlantic Oscillation (NAO), the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) and two weather types (western circulation WP2 and anticyclonic regime WP8). These modes of variability are quantified through series of climate indices.

In a second step, an analysis is performed to detect correlations between climate and low-flow hydrologic indices. The main relationships are the following:

- Regarding drought severity, correlations with AMO and NAO indices are detected in Southern France, with a spatial pattern similar to the one observed for temporal trends. Moreover, the frequency of weather types WP2 and WP8 plays an important role in the temporal variability of low flow regimes in a large part of France, with the exception of the Mediterranean coast.
- The role of climate variability (AMO, NAO and weather types) is weaker for drought seasonality.

Moreover, an analysis based on available very long series (at least 60 years of data over the period 1948-2008) allows evaluating the stability of trends and correlations over distinct periods (40 years 1948-1988, 40 years 1968-2008 and 60 years 1948-2008). Correlations with climate indices (when significant) appear very stable from one period to the other, while temporal trends are far less robust, sometimes resulting in contradictory results over different periods. These results highlight the relevance of climate indices to explain the variability of hydrologic regimes, and suggest that such indices are better candidates for predictive purposes than the variable "time".

Lastly, many relationships are found when using seasonal climate indices. Some relationships are asynchronous: for instance, the frequency of weather types in winter and spring is correlated with summer hydrological drought (especially in Northern France). This suggests promising avenues for seasonal forecasting applications.

Finally, the difficulties and opportunities stemming from this work are discussed.

Keywords

Low flow regimes, trend, climate variability, NAO, AMO, weather type, seasonal forecasting, France

SYNTHESE POUR L'ACTION OPERATIONNELLE

I. INTRODUCTION

1.1. Tendances hydrologiques et climat

Le changement climatique pourrait avoir des impacts importants sur les régimes hydrologiques, liés à l'augmentation des températures et aux changements dans le régime des précipitations [IPCC, 2007]. Néanmoins, les évolutions détectées jusqu'à présent dans les séries hydrologiques ne montrent pas un signal global et cohérent, comme l'illustrent les études de *Kundzewicz et al.* [2005] et *Svensson et al.* [2005] basées sur des stations hydrométriques réparties sur toute la planète. Cette absence de signal global et cohérent a ainsi poussé *Svensson et al.* [2006] à poser la question suivante : "*Why is there no clear signal in observations?*".

La détection de tendances liées au climat dans les séries hydrologiques est difficile pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les phénomènes hydrologiques présentent naturellement une forte variabilité qui peut masquer la présence de tendances éventuelles. De plus, les séries hydrométriques sont parfois entachées d'erreurs métrologiques (incertitude des instruments de mesures, des courbes de tarages, des conditions opérationnelles, etc.) qui peuvent artificiellement créer des tendances. Enfin, de nombreux bassins versants sont influencés par des facteurs non-climatiques, comme des prélèvements, divers aménagements hydrauliques, etc. L'impact de ces facteurs n'étant pas toujours quantifiable avec précision, il peut être délicat de séparer leurs effets de ceux liés aux facteurs climatiques.

1.2. Un réseau de référence pour la surveillance climatique des étiages

Les points ci-dessus illustrent la nécessité de baser les études de détection de tendance sur un jeu de données amplement critiqué, constitué de longues séries, et représentant des bassins versants pas ou peu influencés. De plus, il est important de pérenniser les stations hydrométriques produisant ces données, afin de permettre la réactualisation des analyses et de mettre en place une véritable surveillance climatique des régimes hydrologiques, en particulier des régimes d'étiage.

Cette volonté a conduit à la définition d'un réseau de stations hydrométriques de référence pour la surveillance climatique des étiages. Les différentes étapes ayant conduit à ce réseau sont décrites en détails dans les rapports précédents [*Renard et al.*, 2008; *Giuntoli and Renard*, 2009; 2010]. Le réseau compte 236 stations hydrométriques en France Métropolitaine (Figure I-1), ainsi que 14 stations dans les départements d'Outre-Mer. Les séries hydrométriques couvrent globalement la période commune post-1968, certaines stations offrant même des données bien plus anciennes. Le réseau est globalement représentatif de la diversité hydrologique rencontrée en France, en termes de régimes, d'influences climatiques et de tailles de bassin.

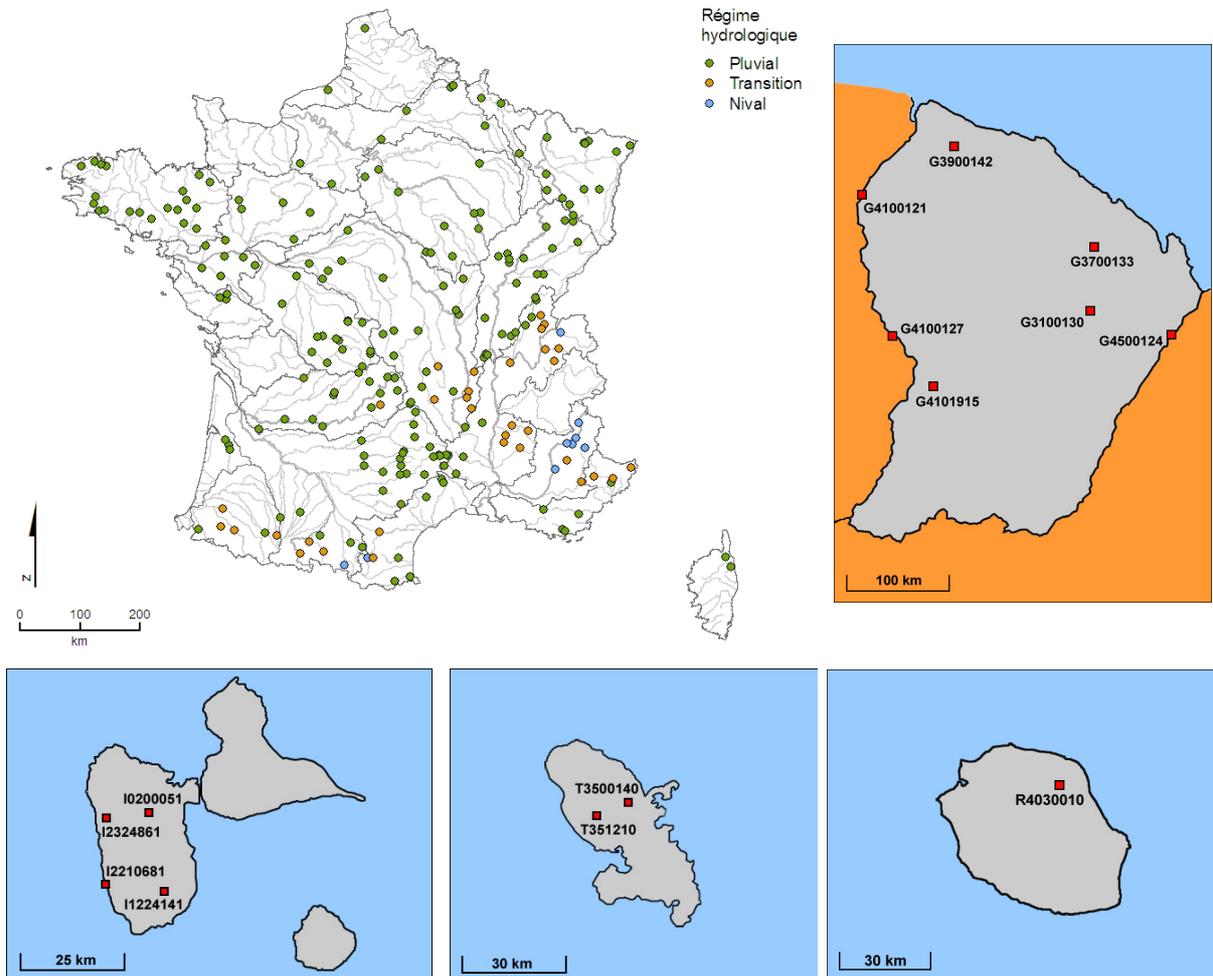


Figure I-1 – Localisation des stations hydrométriques composant le réseau de référence.

1.3. Tendances, variabilité climatique et changement climatique

L'analyse des données issues du réseau a permis de dresser un état des lieux général sur la stationnarité des régimes d'étiage en France. Les méthodes utilisées et les résultats sont présentés en détail dans le rapport de l'action 2010 [Giuntoli and Renard, 2010]. En particulier, une tendance à l'aggravation des étiages a été détectée pour les bassins à régime pluvial du sud de la France, ainsi qu'une tendance vers plus de précocité pour le début de la période d'étiage (voir section II pour un rappel plus détaillé des principales tendances détectées en France).

Néanmoins, il est important de garder à l'esprit que l'existence de tendances affectant les régimes d'étiage ne constitue pas en soi une preuve de l'impact du réchauffement climatique [cf. la distinction entre détection et attribution faite par le GIEC, IPCC, 2007]. En effet, plusieurs autres phénomènes peuvent induire des évolutions dans les étiages, notamment :

- Problèmes météorologiques liés à la mesure des bas débits : le travail de critique approfondie réalisé devrait permettre de limiter cet effet. De plus, le fait que les changements observés présentent une certaine cohérence spatiale conduit à penser que les problèmes météorologiques ne peuvent être l'unique facteur mis en cause.

- Influences anthropiques directes : bien que les stations du réseau soient toutes réputées « pas ou faiblement » influencées, il n'est pas possible d'exclure le fait que des influences anthropiques directes jouent un rôle dans les évolutions observées. Malheureusement, ces influences (certains prélèvements notamment) ne sont généralement pas quantifiées (surtout sur une période longue d'au moins 40 ans) ou exercent un impact qui est encore imparfaitement compris aujourd'hui (e.g. changement d'occupation du sol).
- Variabilité climatique inter-annuelle à inter-décennale: le climat fluctue naturellement suivant certains modes de variabilités, qui peuvent persister sur des durées de plusieurs années à plusieurs décennies (e.g. Atlantic Multi-decadal Oscillation AMO, North Atlantic Oscillation NAO, etc.). Ces oscillations naturelles peuvent potentiellement expliquer une partie des évolutions observées sur une quarantaine d'années. Ainsi, l'impact de cette variabilité climatique sur les régimes hydrologiques a pu être mis en évidence dans plusieurs régions du globe (e.g. impact de l'AMO en Amérique du Nord, impact de la NAO en Europe du Nord et du Sud, etc.). A ce jour, son rôle sur les régimes hydrologiques français reste néanmoins largement méconnu.

1.4. Objectifs de l'action 2011

L'objectif principal des travaux décrits dans ce rapport est de mieux comprendre le lien entre la variabilité climatique inter-annuelle à inter-décennale et l'évolution des régimes d'étiage en France. Cette évaluation est importante d'une part pour mieux comprendre l'origine des tendances, d'autre part car les stratégies de prédétermination et de gestion des étiages diffèrent suivant leur mode d'évolution temporelle (simple dérive dans le temps ou forçage par des oscillations climatiques inter-décennales). Les stations hydrométriques du réseau ont donc été ré-analysées afin d'évaluer si la sévérité et la saisonnalité des étiages dépendent de certains indices climatiques.

1.5. Plan du rapport

Le rapport est structuré de la manière suivante. La section II rappelle les principales tendances temporelles détectées au cours des actions précédentes. La section III décrit les indices climatiques utilisés dans ce travail. Ces indices visent à quantifier de manière synthétique la variabilité climatique de grande échelle, et ont été sélectionnés sur la base d'une analyse bibliographique recensant les principaux liens hydro-climatiques connus. La méthodologie utilisée pour mettre en évidence des liens hydro-climatiques sur la base des stations hydrométriques du réseau de référence est présentée en section IV, suivie par une description des principaux résultats en section V. Une discussion sur les difficultés et opportunités induites par ces résultats est proposée en section VI.

II. RAPPEL : PRINCIPALES TENDANCES DETECTEES SUR LES REGIMES HYDROLOGIQUES EN FRANCE METROPOLITAINE

Dans cette section, nous rappelons les principales tendances détectées dans les régimes d'étiage au cours des actions précédentes [*Giuntoli and Renard, 2010*]. L'objectif n'est pas de réaliser une présentation exhaustive, mais plutôt de rappeler les principales évolutions temporelles qui serviront de point de départ aux analyses effectuées dans ce rapport. De plus, nous présentons également les résultats obtenus pour deux variables descriptives des hautes eaux, qui ne figuraient pas dans les rapports précédents.

II.1. Sévérité des étiages

Il existe une séparation nord-sud marquée pour les évolutions affectant la sévérité des étiages. Plus précisément, on observe une tendance à l'aggravation de la sévérité des étiages dans plusieurs régions de la moitié sud de la France, notamment dans les Pyrénées, le Massif Central et le Jura, ainsi qu'en Aquitaine et sur le pourtour Méditerranéen (Figure II-1 pour l'indice « déficit de volume »). Précisons néanmoins que dans les Alpes et les Pyrénées, cette aggravation n'est pas visible pour les stations à régime purement nival. Les évolutions significatives de la sévérité des étiages sont bien moins nombreuses dans la partie nord du pays.

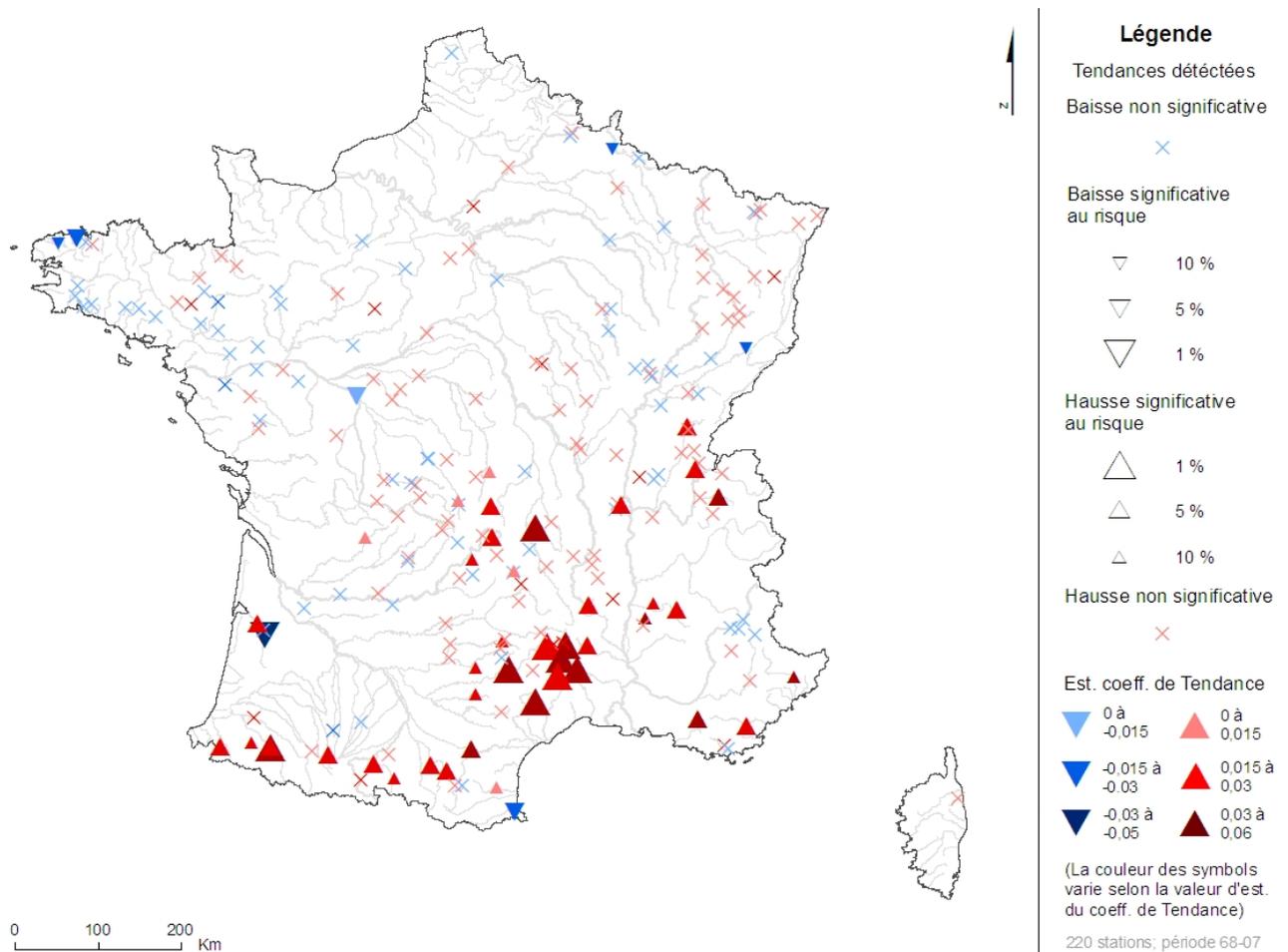


Figure II-1 – Tendances détectées pour l'indice « déficit de volume ». La tendance est exprimée en changement relatif annuel (i.e. une tendance de +0.01 correspond à une évolution de 1% par an en moyenne).

II.2. Saisonnalité des étiages

La saisonnalité des étiages présente des évolutions significatives, mais contrairement à la sévérité, ces évolutions n'ont pas de structure géographique particulière. A l'échelle de la France, la tendance la plus marquée concerne le début de la période d'étiage, qui semble se

décaler vers plus de précocité (Figure II-2). Ce décalage est moins marqué pour le centre de l'été, et devient peu significatif pour la fin de l'été.

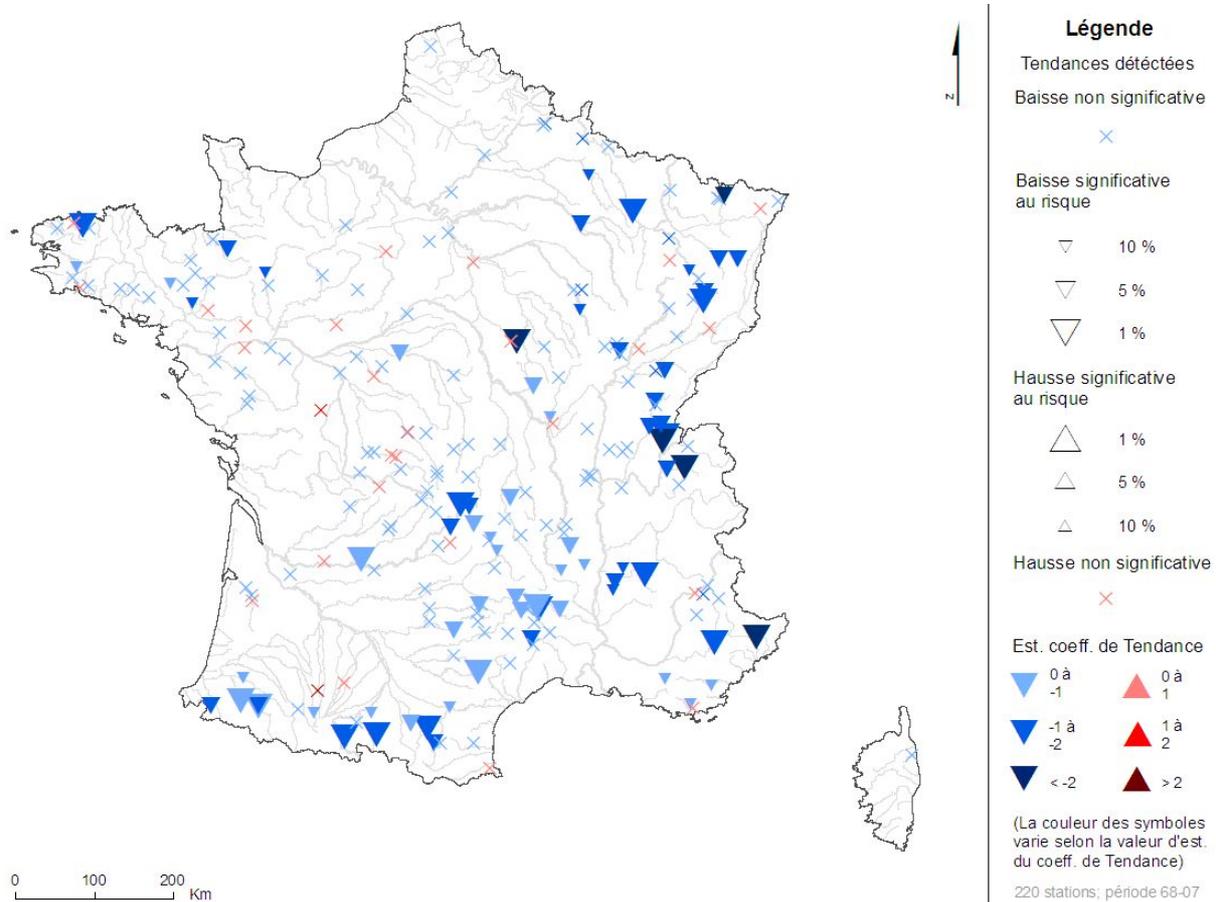


Figure II-2 - Tendances détectées pour l'indice « début d'été ». La tendance est exprimée en changement absolu annuel (i.e. une tendance de +1 correspond à une évolution de 1 jour par an en moyenne).

II.3. Moyennes eaux

Les résultats pour le débit moyen annuel (Figure II-3) ne montrent aucune tendance significative sur le nord de la France. Par contre, on observe de nombreuses tendances significatives à la baisse (24,1% des stations) localisées dans la partie sud, et plus précisément dans les Pyrénées, les Cévennes et le Massif Central. Remarquons par contre que les changements ne sont pas significatifs pour les stations purement nivales des Pyrénées et des Alpes.

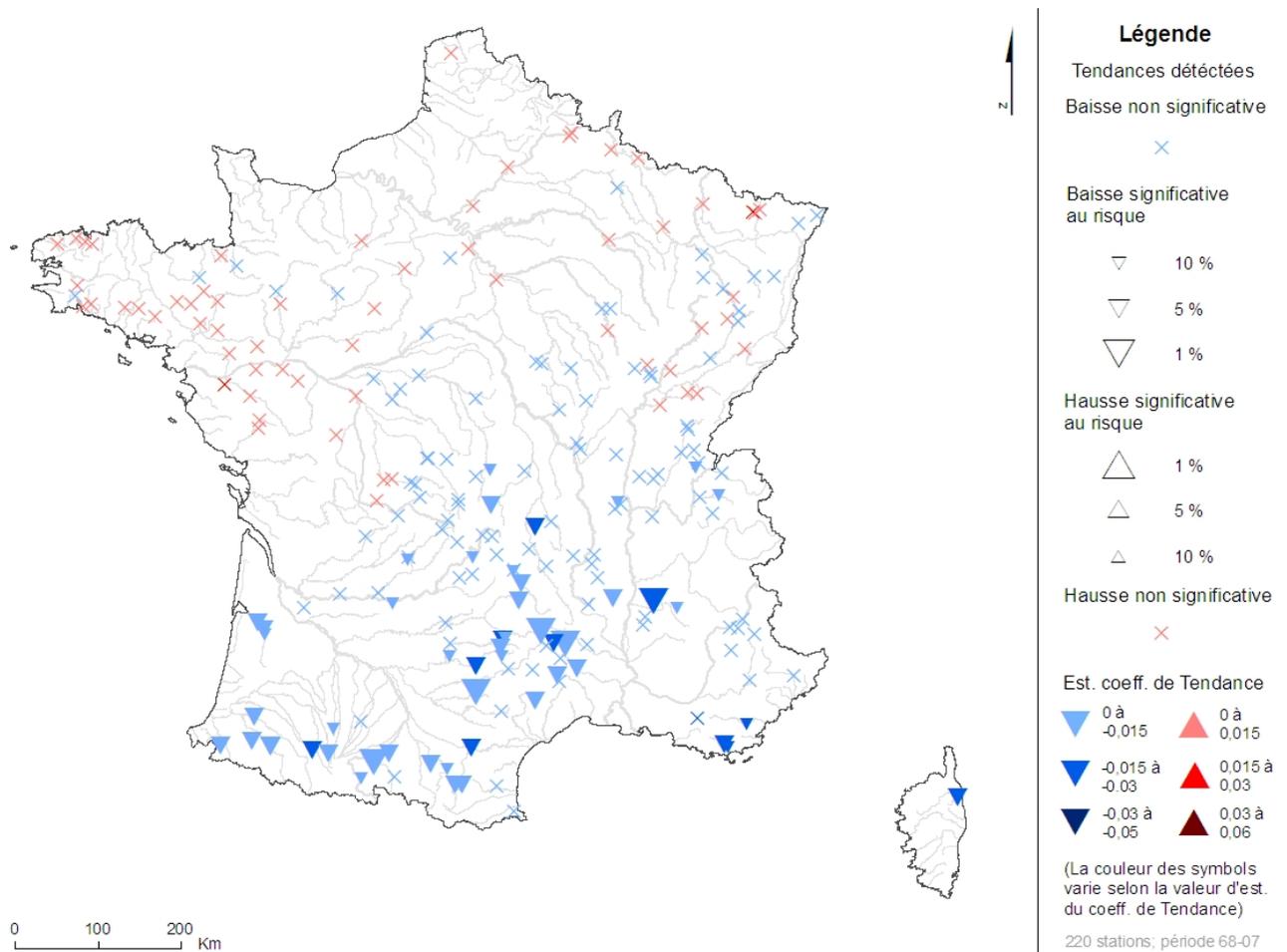


Figure II-3 – Tendances détectées pour l'indice « module annuel ». La tendance est exprimée en changement relatif annuel (i.e. une tendance de +0.01 correspond à une évolution de 1% par an en moyenne).

II.4. Hautes eaux

De nouvelles analyses ont été effectuées sur un sous-échantillon de 209 stations adaptées à l'étude des hautes eaux. Des indices descriptifs des hautes eaux ont été définis (Figure II-4), parmi lesquels le débit maximum annuel et le volume annuel des hautes eaux sont décrits ici. Une description plus complète est fournie dans l'article de *Giuntoli et al. [2011]*, qui est transmis en annexe de ce rapport (cf. livrables).

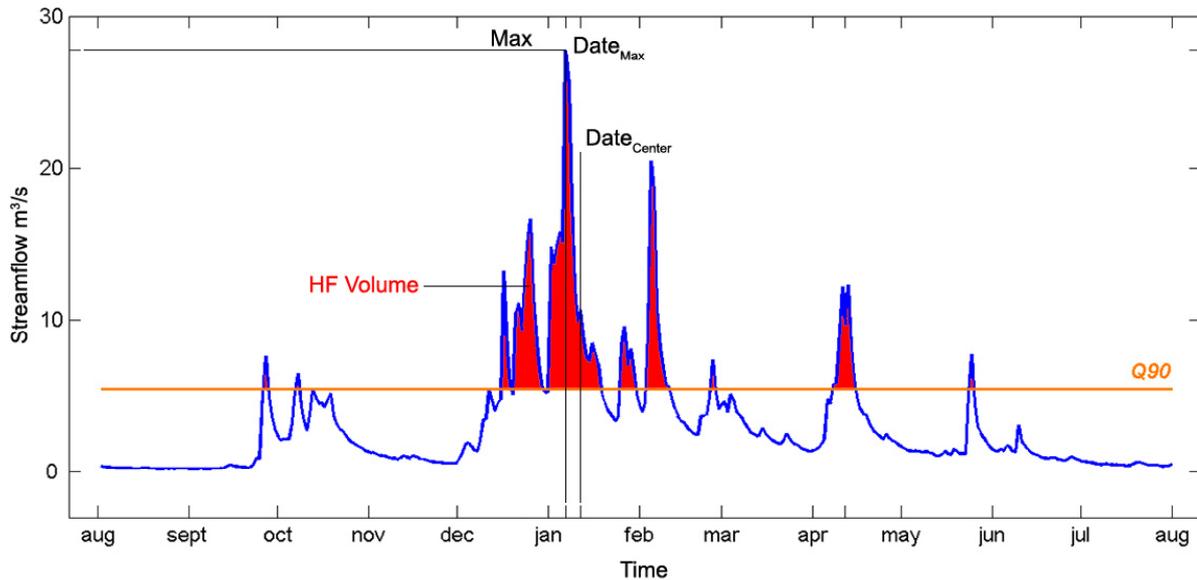


Figure II-4 – Schématisation des indices descriptifs des hautes eaux [d’après Giuntoli et al., 2011].

Les tendances détectées pour les maxima annuels sont décrites dans la Figure II-5. Comme pour les indices décrivant les basses et les moyennes eaux, on peut distinguer une division nord-sud dans ces résultats : dans la partie nord, les tendances, bien que souvent non significatives, sont généralement positives. Plusieurs tendances cohérentes à la hausse peuvent notamment être observées dans le nord-est du pays. Inversement, les tendances sont généralement négatives dans la partie sud du pays, avec notamment des regroupements cohérents de tendances à la baisse dans les Pyrénées ou le Massif Central.

Cette division nord-sud est également visible pour le volume des hautes eaux (Figure II-6). Cet indice est obtenu en calculant le volume écoulé annuellement au-dessus d’un seuil de haut débit (égal au quantile à 90% de la courbe des débits classés, cf. Figure II-4). On retrouve de nombreuses tendances à la baisse dans la partie sud du pays, tandis que dans la partie nord, les tendances sont généralement positives mais non significatives. Notons que la carte pour le volume des hautes eaux est similaire à celle pour le module (Figure II-3), ces deux indices étant très corrélés.

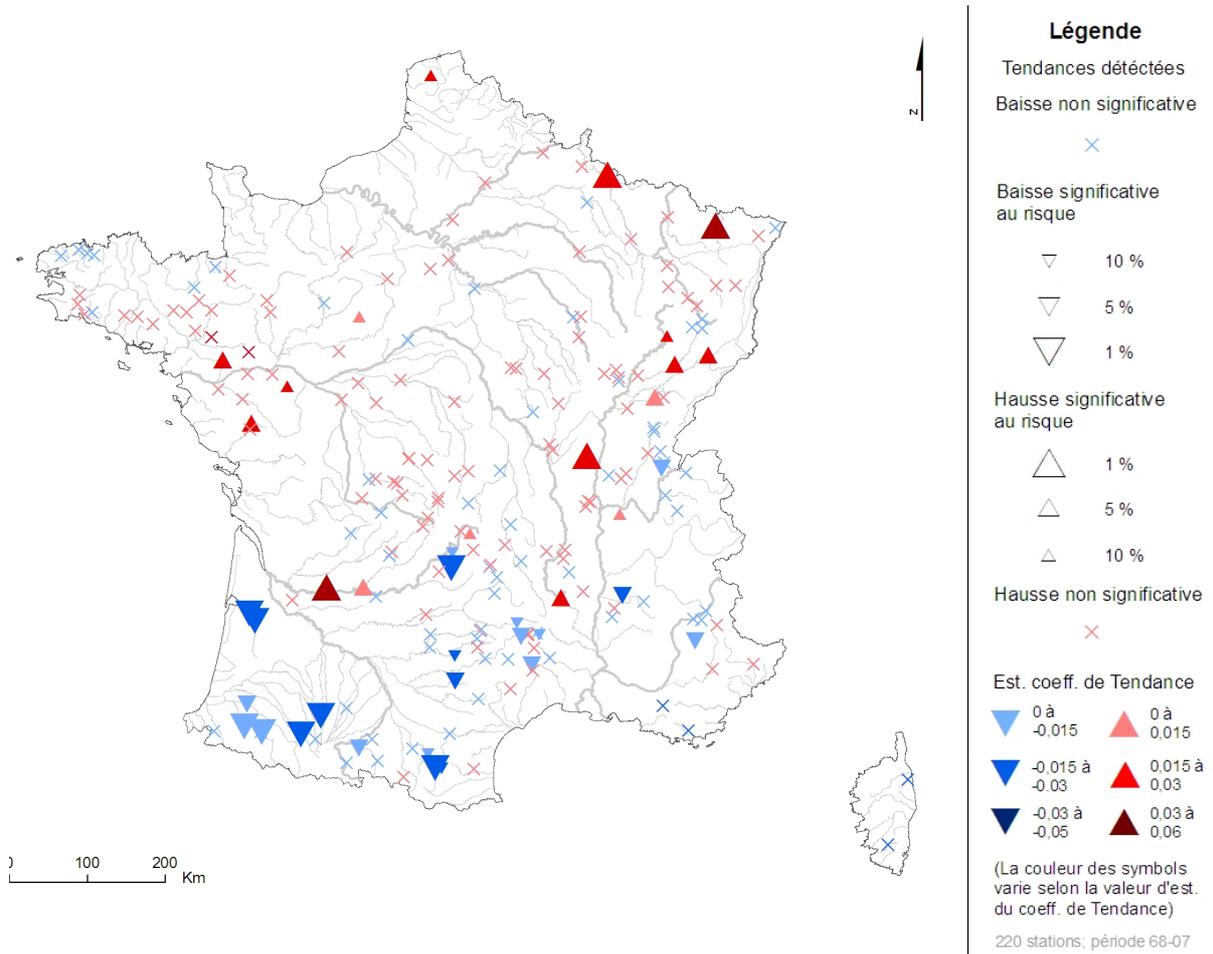


Figure II-5 – Tendances détectées pour l'indice « maximum annuel ». La tendance est exprimée en changement relatif annuel (i.e. une tendance de +0.01 correspond à une évolution de 1% par an en moyenne).

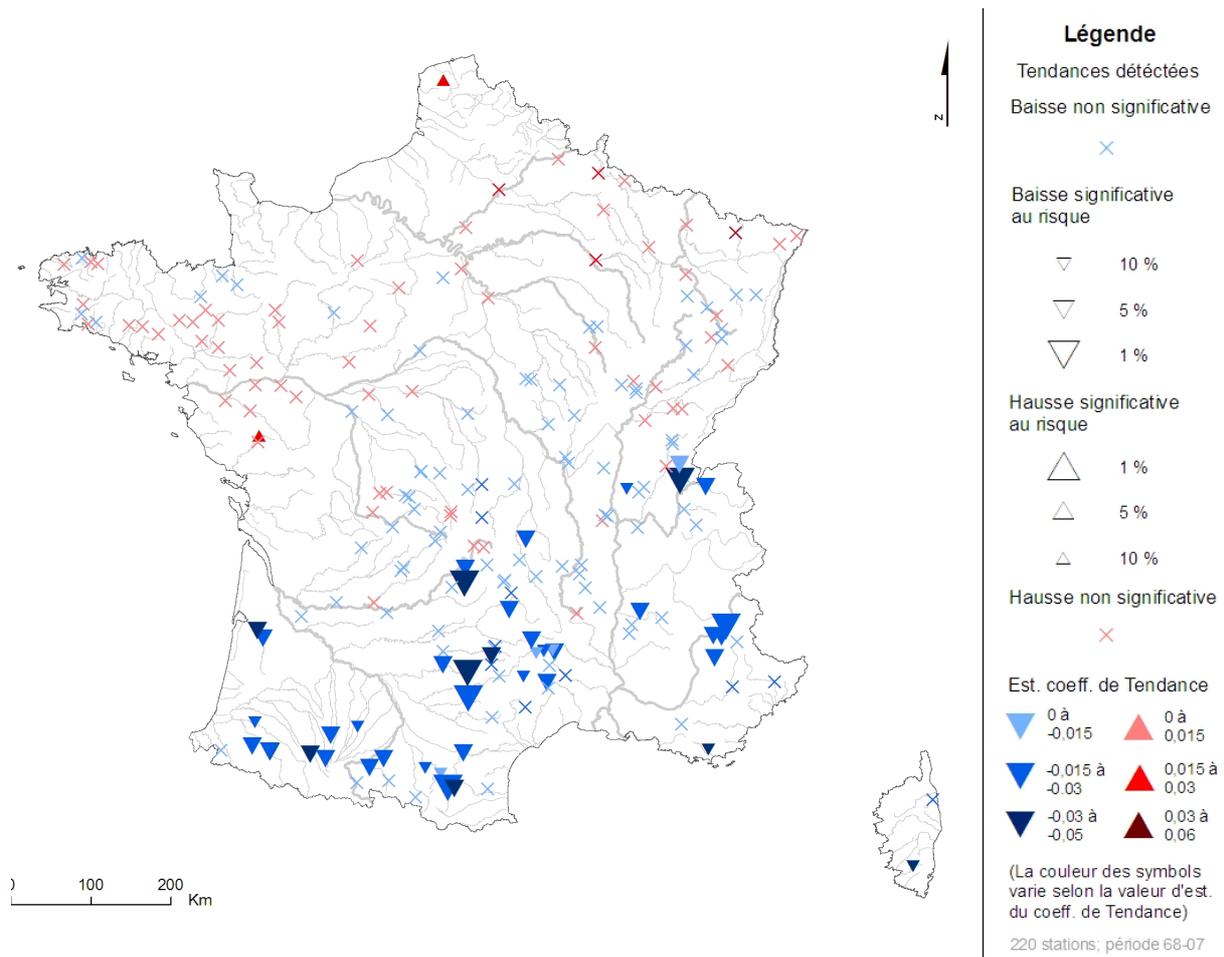


Figure II-6 - Tendances détectées pour l'indice « Volume des hautes eaux ». La tendance est exprimée en changement relatif annuel (i.e. une tendance de +0.01 correspond à une évolution de 1% par an en moyenne).

III. INDICES CLIMATIQUES DE GRANDE ECHELLE

Cette section présente une analyse bibliographique recensant les liens connus entre régimes hydrologiques et variabilité climatique de grande échelle. Dans un second temps, les indices climatiques utilisés pour quantifier la variabilité climatique de grande échelle sont présentés. Nous chercherons par la suite (section V) à relier ces indices climatiques aux indices hydrologiques.

III.1. Revue bibliographique

Cette revue présente les principaux modes de variabilité climatique connus pour impacter les régimes hydrologiques en Europe : l'oscillation Nord-Atlantique (NAO), l'oscillation Atlantique multidécennale (AMO) et les types de temps (WP). Notons que l'oscillation Arctique est également souvent mentionnée comme un mécanisme important pour le climat européen. Cependant, cette oscillation est très corrélée avec la NAO, et certains auteurs considèrent même cette dernière comme une version régionale de l'oscillation Arctique. Nous avons donc choisi de ne pas considérer cet indice pour éviter d'utiliser des indices trop redondants.

III.1.1 Oscillation Nord-Atlantique (NAO)

La NAO est un mode de variabilité atmosphérique affectant la région de l'Atlantique Nord. Elle est classiquement quantifiée par l'indice NAO, égal à la différence de pression (normalisée) entre deux stations météorologiques, en général celles de Gibraltar et de Reykjavik (Islande) [Hurrell, 1995] (Figure III-1). Une forte différence de pression correspond à la phase positive de la NAO (notée NAO+), qui se caractérise par une intensification des flux océaniques d'ouest, conduisant à des hivers doux et humides en Europe du Nord, et un temps plus sec en zone méditerranéenne (Figure III-2). Inversement, en phase négative (NAO-), les hivers sont froids et secs en Europe du Nord, et les dépressions se déplacent vers le pourtour Méditerranéen, qui connaît donc une activité pluvieuse plus importante que la normale [Hurrell and VanLoon, 1997].

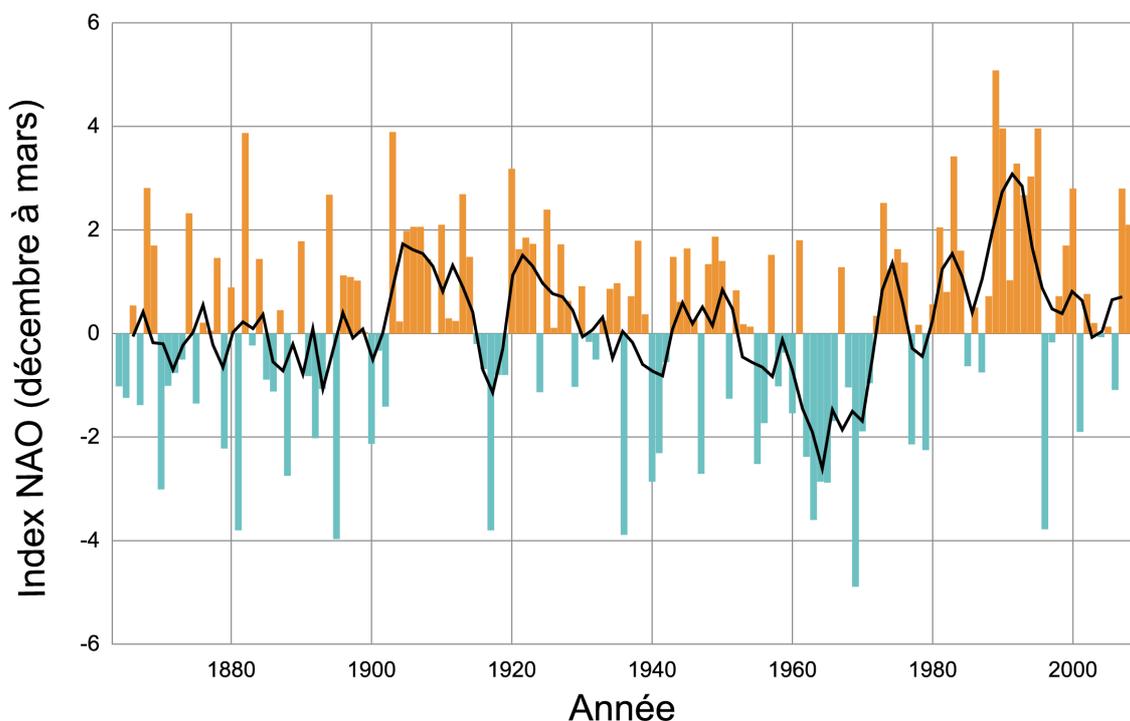


Figure III-1 – Indice NAO calculé de décembre à mars, période 1864-2009. Le trait noir représente une moyenne mobile sur 5 ans [source : NCAR Climate Data Guide].

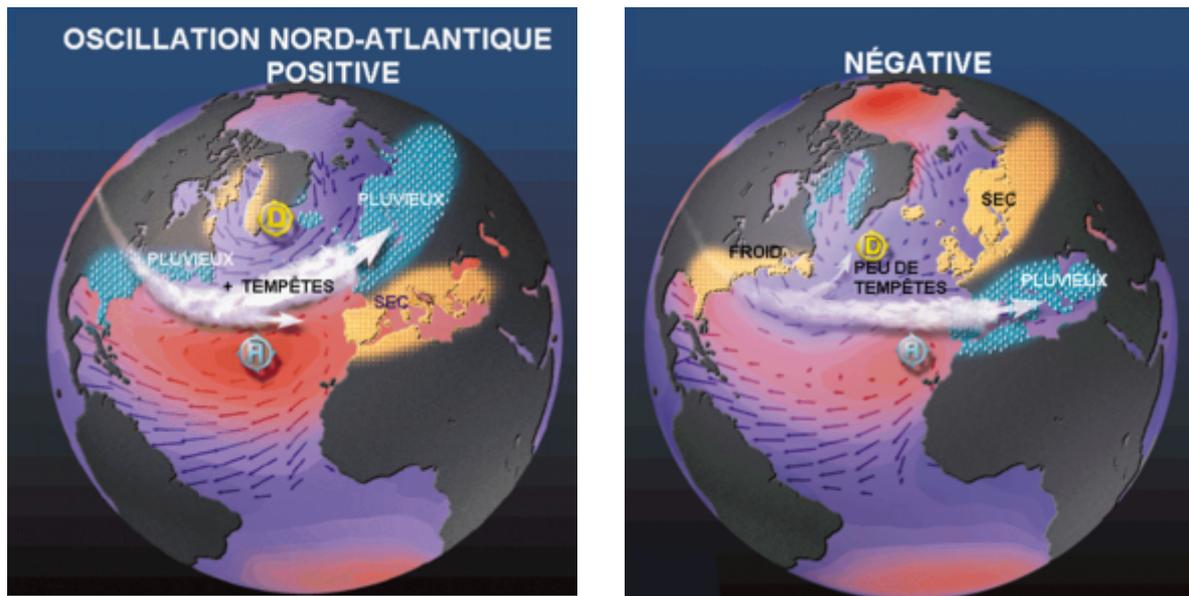


Figure III-2 –Schématisation du mécanisme de l’Oscillation Nord-Atlantique [source : Lamont Doherty Earth Observatory (funded by NOAA)].

Les conditions atmosphériques qui prévalent durant les phases positives et négatives de la NAO ont évidemment un impact sur l’hydrologie des rivières. *Pociask-Karteczka* [2006] propose une revue des principaux liens connus entre la NAO et les régimes hydrologiques. Plusieurs études ont été menées à l’échelle européenne. Ainsi, *Shorthouse and Arnell* [1997] ont montré que durant les phases positives de la NAO hivernale, les débits hivernaux sont généralement plus élevés que la normale en Europe du Nord, et inversement plus faibles que la normale en Europe du Sud. *Bouwer et al.* [2008] ont de plus confirmé que les régimes hydrologiques les plus sensibles aux variations de la NAO sont situés aux extrémités de l’Europe, i.e. en Scandinavie et dans la péninsule Ibérique. *Wrzesinski* [2011] a effectué une classification de rivières européennes en fonction de leur profil de dépendance aux variations de la NAO.

Ces résultats généraux ont été confirmés par des études focalisant sur des régions particulières, notamment en Scandinavie [*Kingston et al.*, 2006] ou sur les Iles Britanniques [*Wilby et al.*, 1997; *Kiely*, 1999; *Stahl et al.*, 2001]. De plus, certains liens asynchrones, qui présentent un intérêt potentiel en termes de prévision saisonnière, ont pu être mis en évidence. Ainsi, en Angleterre et au pays de Galles, une phase négative de la NAO hivernale est généralement suivie d’une anomalie négative des débits d’automne [*Wedgbrow et al.*, 2002]. Inversement, les phases positives de la NAO hivernale sont généralement associées aux caractéristiques suivantes :

- En Islande, anomalie positive du module de l’année suivante [*Jónsdóttir et al.*, 2004].
- Dans les Alpes, faibles débits lors de la fonte printanière [*Stahl et al.*, 2001].
- En Europe centrale, faibles débits en fin d’été / début d’automne [*Limanówka et al.*, 2002; *Kaczmarek*, 2003; *Pociask-Karteczka et al.*, 2003].
- Dans de nombreuses régions du Sud de l’Europe, étiages estivaux marqués, notamment dans la Péninsule ibérique [*Stahl et al.*, 2001; *Trigo et al.*, 2004; *Vicente-Serrano and Cuadrat*, 2007], en Roumanie [*Stefan et al.*, 2004] ou dans le Danube aval [*Rimbu et al.*, 2002; *Rimbu et al.*, 2004].

En France, l'impact de la NAO sur les régimes hydrologiques reste largement méconnu. *Cassou* [2004] s'est intéressé aux mécanismes atmosphériques et océaniques gouvernant la NAO, mais sans dresser un panorama des impacts sur l'hydrologie. A notre connaissance, les travaux de *Massei* [2010] ont été parmi les seuls à s'intéresser aux impacts hydrologiques de la NAO, en étudiant les co-variations entre l'indice NAO et les débits du bassin de la Seine aval.

III.1.2 Oscillation Atlantique multidécennale (AMO)

Comme la NAO, l'AMO représente un mode de variabilité climatique affectant l'Atlantique Nord, mais plutôt lié aux températures de surface de l'océan (alors que la NAO est basée sur des propriétés atmosphériques). Autre différence marquée avec la NAO, l'AMO possède une inertie temporelle beaucoup plus forte (Figure III-3, à comparer avec la Figure III-1). Ainsi, depuis 1860, il y a eu principalement deux phases chaudes (1860-1880, 1930-1960) et deux phases froides (1905-1925, 1965-1990). Depuis le début des années 1990, l'indice AMO est revenu dans une phase chaude [*Enfield et al.*, 2001].

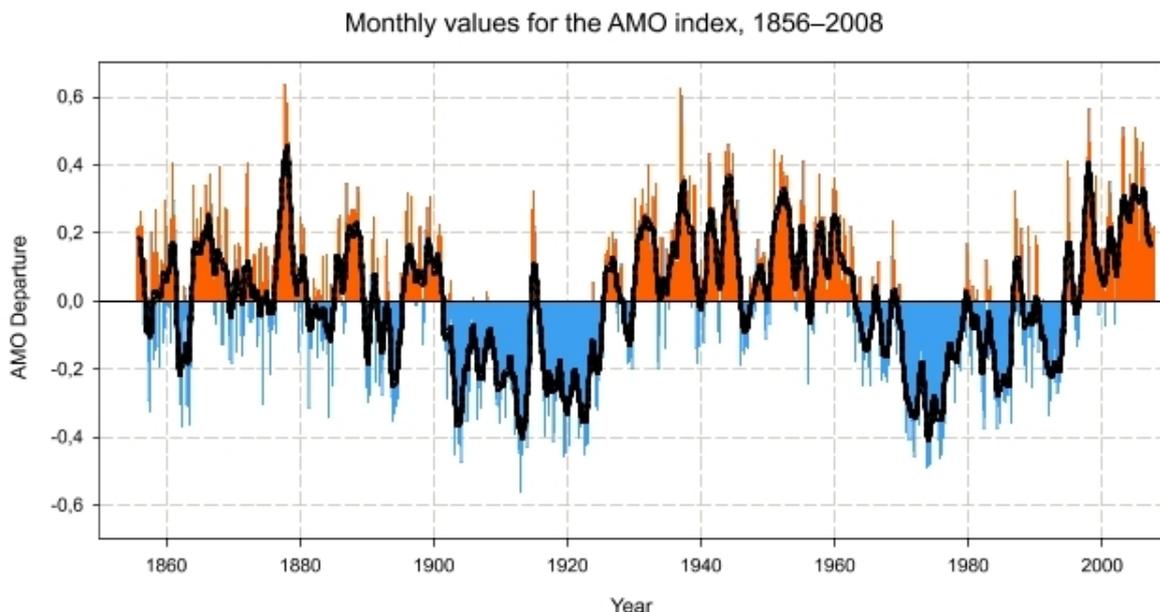


Figure III-3 – Variations de l'indice AMO depuis 1856 (d'après l'US National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)

L'impact de l'AMO a pu être mis en évidence sur des phénomènes météorologiques très variés [*Knight et al.*, 2006]. On peut notamment citer l'activité cyclonique en Atlantique [*Goldenberg et al.*, 2001; *Trenberth and Shea*, 2006; *Enfield and Cid-Serrano*, 2010] ou les sécheresses dans la région du Sahel [*Rowell et al.*, 1995; *Rowell*, 1996]. L'AMO est également connue pour influencer le climat estival Nord-Américain et Européen [*Sutton and Hodson*, 2005]: une anomalie chaude de l'AMO correspond à des pressions atmosphériques estivales moyennes plus basses que la normale sur l'ensemble du bassin Atlantique, mais également à des anomalies de précipitation estivales globalement négatives en Amérique du Nord et globalement positive en Europe de l'Ouest et du Nord.

De nombreuses études ont été menées aux Etats-Unis pour comprendre l'impact de l'AMO sur l'hydrologie. Ainsi, *Enfield et al.* [2001] ont analysé cet impact sur les précipitations et les écoulements. Il en ressort que les phases chaudes de l'AMO sont associées à des anomalies négatives sur une grande partie du pays, à la fois en termes de précipitations et d'écoulements.

McCabe et al. [2008] ont réalisé une étude spécifique sur les sécheresses aux Etats-Unis, et ont pu mettre en évidence l'association entre les phases chaudes de l'AMO et l'occurrence de sécheresses plus fréquentes ou prolongées dans le Midwest, mais inversement des sécheresses moins intenses en Floride ou dans le Nord-Ouest. Notons également l'étude d'*Assani et al.* [2011] au Québec, mettant en évidence le lien entre phase chaude de l'AMO et déficit de précipitations et d'écoulements.

Les études ciblées sur l'Europe semblent avoir été plus rares. On peut néanmoins citer le travail de *Huss et al.* [2010] sur l'évolution des glaciers Alpains en Suisse, pour lesquels l'indice AMO semble être inversement corrélé au bilan de masse des glaciers : les phases chaudes de l'AMO correspondent à des phases de récession des glaciers, alors que lors des phases froides, les glaciers connaissent une récession limitée, voire s'étendent.

A l'échelle plus réduite de la France, l'impact de l'AMO reste à notre connaissance largement méconnue. La seule référence dont nous ayons connaissance est le travail de *Tourre et al.* [2011], qui identifie l'AMO comme un facteur important dans la variabilité des températures en région Parisienne et celle des dates de vendange du Pinot Noir en Bourgogne.

III.1.3 Types de temps (WP)

Les indices climatiques présentés précédemment caractérisent une variabilité climatique à très grande échelle (en l'occurrence, le bassin de l'Atlantique Nord et au-delà). Cela possède évidemment un intérêt pour caractériser et comprendre les grands mécanismes qui gouvernent la variabilité climatique. Néanmoins, l'échelle des bassins versants qui seront étudiés par la suite est bien plus réduite : il peut donc exister un intérêt à utiliser des indicateurs de variabilité climatique plus locaux, i.e. plus spécifiques à la zone française étudiée. De tels indicateurs peuvent potentiellement avoir un pouvoir explicatif plus important que des indices tels que la NAO ou l'AMO. De plus, l'analyse bibliographique a montré que l'influence de la NAO ou de l'AMO était surtout sensible aux extrémités nord et sud de l'Europe. De par sa position géographique, la France se trouve au centre de ces deux zones, ce qui suggère que d'autres descripteurs de la variabilité climatique pourraient être plus adaptés.

Les types de temps sont des candidats intéressants pour remplir ce rôle. Ce concept est largement utilisé en météorologie pour classifier des situations synoptiques similaires, conduisant, pour un territoire géographique donné, à des conditions météorologiques (e.g. flux, pluies, températures) similaires. Il existe de très nombreuses méthodes pour effectuer cette classification (voir l'initiative européenne COST733 pour un recensement et une comparaison : <http://cost733.met.no/>). La plupart utilisent uniquement l'information fournie par les champs de pression (on parle aussi dans ce cas de « types de circulation »).

De nombreuses études ont montré l'intérêt des classifications en type de temps pour l'hydrologie. Ainsi, plusieurs auteurs ont mis en évidence un lien entre la distribution des pluies et les types de temps [e.g. *Littmann*, 2000; *Boe and Terray*, 2008; *Lorenzo et al.*, 2008; *Martínez et al.*, 2008; *Garavaglia et al.*, 2010; *Garavaglia et al.*, 2011]. De même, des relations similaires existent pour des variables hydrométriques [e.g. *Samaniego and Bardossy*, 2007; *Petrow et al.*, 2009]. Enfin, plusieurs études ont spécifiquement démontré l'intérêt des types de temps pour l'étude des étiages [e.g. *Stahl and Demuth*, 1999 en Allemagne; *Pongracz et al.*, 2003 en Europe Centrale; *Fleig et al.*, 2010 au Danemark et en Grande-Bretagne].

Dans ce travail, nous avons utilisé les types de temps définis par *Garavaglia et al.* [2010]. Cette classification établit des situations synoptiques contrastées, adaptées à la zone d'étude, sur la base des champs géopotentiels. Plus particulièrement, nous avons choisi de focaliser sur

deux types de temps particuliers, qui sont les plus fréquemment observés : (i) le type WP2 (23% des jours), qui caractérise les circulations océaniques d'ouest typiques des perturbations pluvieuses qui traversent régulièrement le pays ; (ii) le type WP8 (28% des jours), qui caractérise les situations anticycloniques correspondant en général à des jours secs ou faiblement pluvieux.

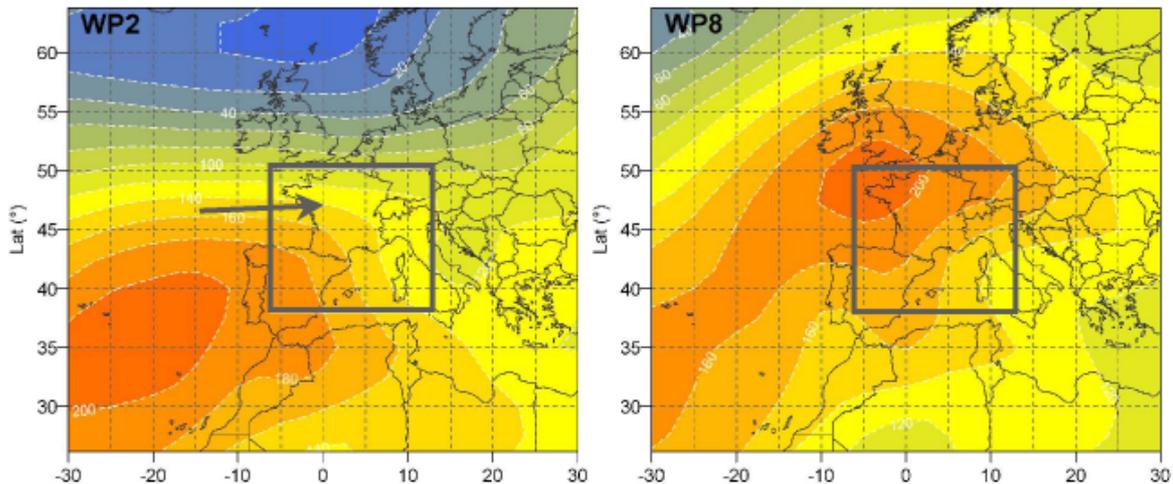


Figure III-4 – Schématisation des types de temps « flux d'Ouest » (WP2) et anticyclonique (WP8). Les couleurs représentent la moyenne des hauteurs du géopotential à 1000 hPa de chaque type de temps. D'après Garavaglia et al. [2010].

III.2. Indices climatiques utilisés dans cette étude

Cette section présente les séries numériques qui seront utilisées en pratique pour quantifier la variabilité climatique de grande échelle, et qui seront par la suite reliées aux indices décrivant les régimes hydrologiques d'été.

III.2.1 Oscillation Atlantique multidécennale (AMO)

La série des valeurs mensuelles de l'indice AMO a été téléchargée sur le site de la NOAA (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/amon.us.long.data>). Ces valeurs ont ensuite été moyennées à l'échelle annuelle pour obtenir la série décrite en Figure III-5 (sur la période 1940-2010). Précisons que nous avons utilisé des années hydrologiques plutôt que des années civiles, afin de rester cohérent avec la notion d'année qui sera utilisée pour définir les indices hydrologiques (cf section IV.1). Les années hydrologiques retenues sont les suivantes :

- Régime pluvial (étiages estivaux): février - janvier
- Régime nival (étiages hivernaux) et de transition : mai - avril

La distinction importante entre les régimes hydrologiques pluvial/nival conduit donc à considérer deux séries annuelles de l'indice AMO, afin de préserver la cohérence avec la dynamique des régimes d'été. La Figure III-5 représente l'indice AMO calculé sur l'année « pluviale » (février – janvier). En pratique, étant donné la forte inertie de cet indice, les séries définies au sens de l'année pluviale ou nivale sont très similaires.

Enfin, notons que l'indice AMO n'est utilisé qu'à l'échelle annuelle : l'utilisation de séries à échelle temporelle plus fine (e.g. AMO moyenné par saison) n'est pas utile, car la variabilité intra-annuelle est faible comparée à la variabilité multidécennale que cet indice cherche à capturer. Ceci est cohérent avec les pratiques rencontrées dans la littérature, où l'AMO est généralement considéré annuellement.

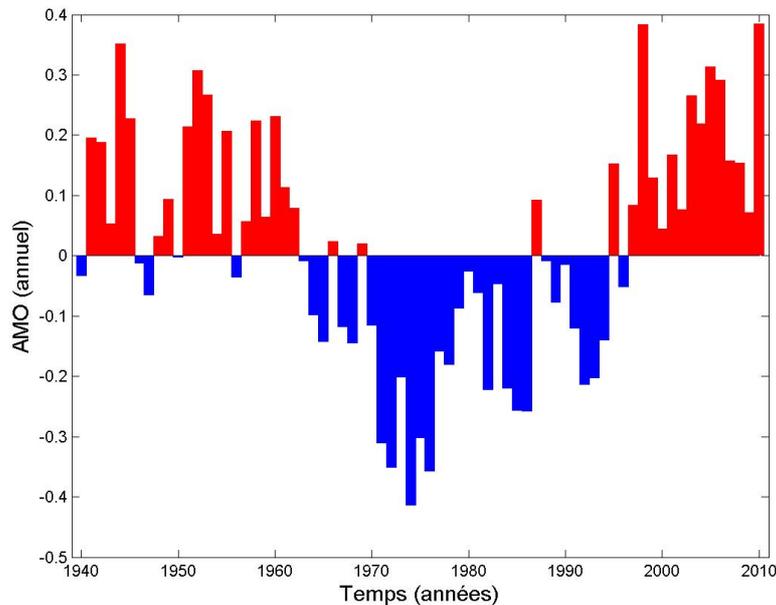


Figure III-5 – Valeurs moyennes annuelles de l'indice AMO. L'année est considérée au sens des régimes hydrologiques pluviaux (i.e. février - janvier).

III.2.2 Oscillation Nord Atlantique (NAO)

La série des valeurs mensuelles de l'indice NAO a été téléchargée sur le site du Climate Research Unit (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/nao/>). Les valeurs moyennées annuellement sont représentées en Figure III-6. Comme pour l'AMO, deux séries seront en fait utilisées pour préserver la cohérence avec les années hydrologiques au sens pluvial/nival.

Contrairement à l'AMO, la NAO possède une dynamique intra-annuelle qui n'est pas négligeable. Il semble donc important de considérer cet indice à l'échelle plus fine des saisons. Ceci est cohérent avec l'analyse bibliographique, qui montre que l'indice le plus utilisé n'est pas la NAO annuelle mais plutôt la NAO hivernale. Nous utilisons ici les saisons boréales classiques : hiver (djf), printemps (mam), été (jja) et automne (son). Les indices NAO correspondant sont présentés en Figure III-7. Précisons également que la définition de ces saisons reste fixe et ne dépend pas de la distinction pluvial/nival, contrairement à la définition de l'année.

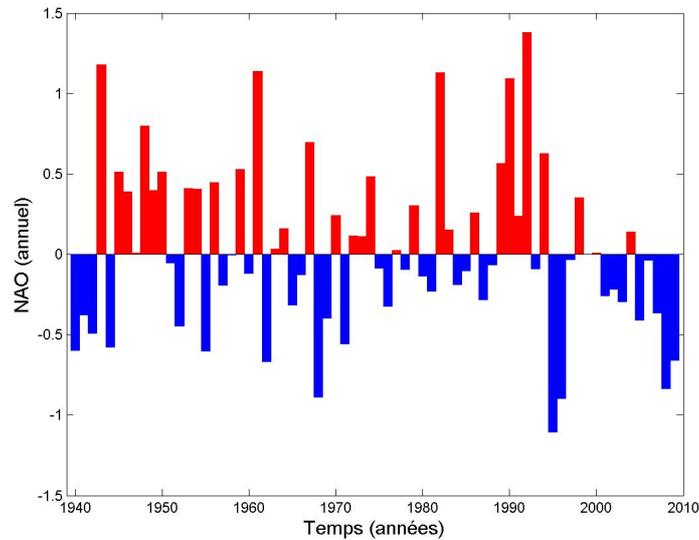


Figure III-6 – Valeurs moyennes annuelles de l'indice NAO. L'année est considérée au sens des régimes hydrologiques pluviaux (i.e. février - janvier).

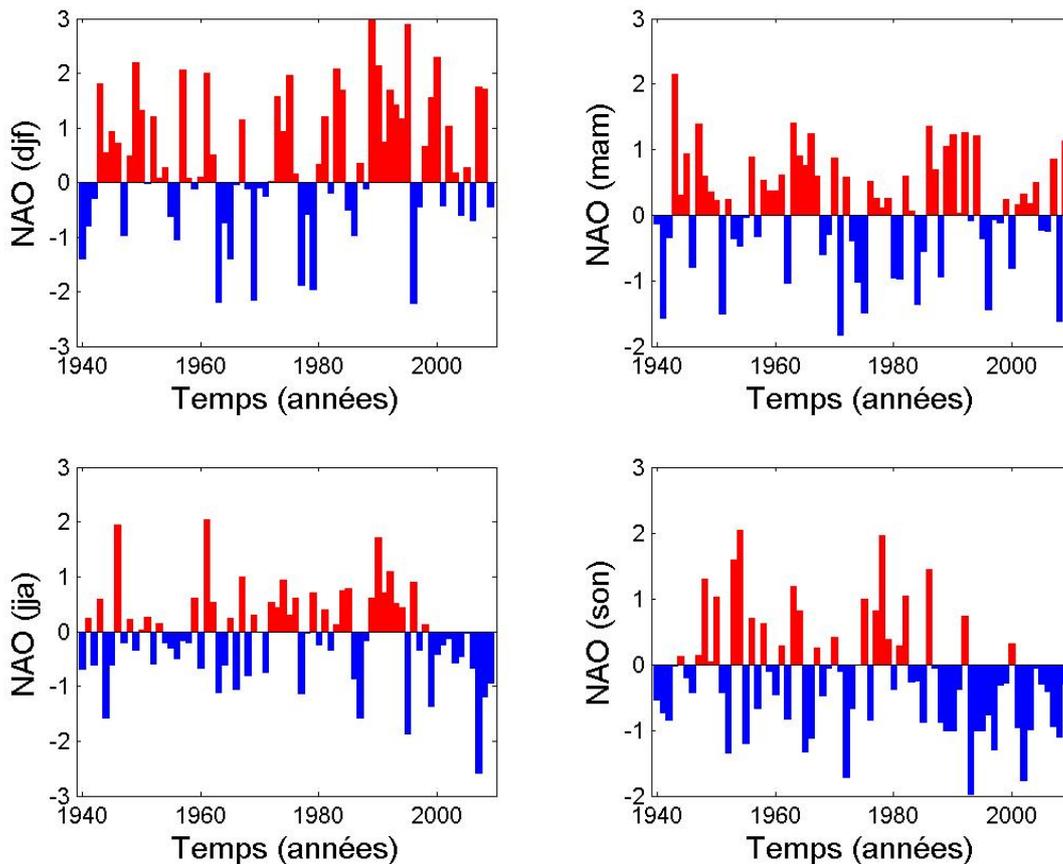


Figure III-7 – Valeurs moyennes saisonnières de l'indice NAO : hiver (dijf), printemps (mam), été (jja) et automne (son).

III.2.3 Type de temps « flux d'ouest » (WP2)

Le catalogue des types de temps nous a été transmis par EDF. Ce catalogue donne, pour chaque journée de la période 1953-2008, le numéro du type de temps correspondant. L'indice WP2 est basé sur: (i) le calcul de la fréquence d'occurrence du type de temps numéro 2 au sein de l'année ou de la saison; (ii) la normalisation de cette fréquence en y soustrayant la moyenne interannuelle et en divisant par l'écart-type interannuel. La Figure III-8 montre les variations de l'indice WP2 calculé à l'échelle de l'année (hydrologique, comme pour les sections précédentes). La variabilité intra-annuelle de l'indice étant importante, un calcul par saison est également effectué, comme illustré en Figure III-9.

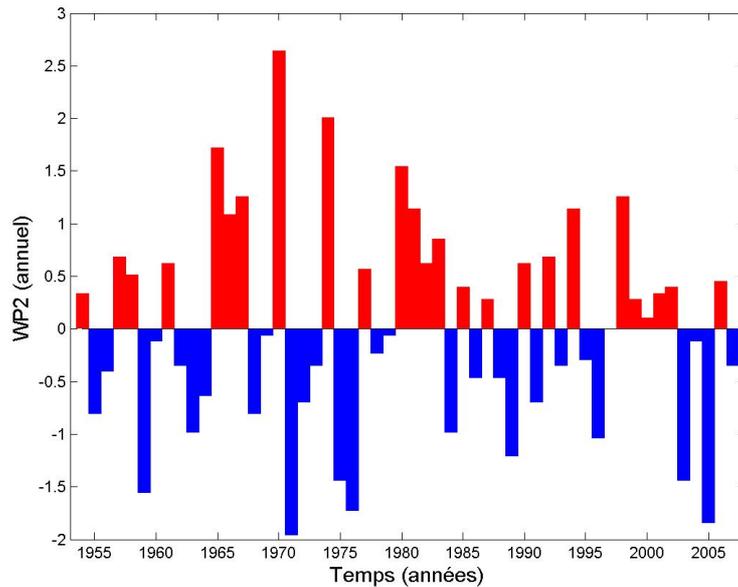


Figure III-8 – Valeurs moyennes annuelles de l'indice WP2. L'année est considérée au sens des régimes hydrologiques pluviaux (i.e. février - janvier).

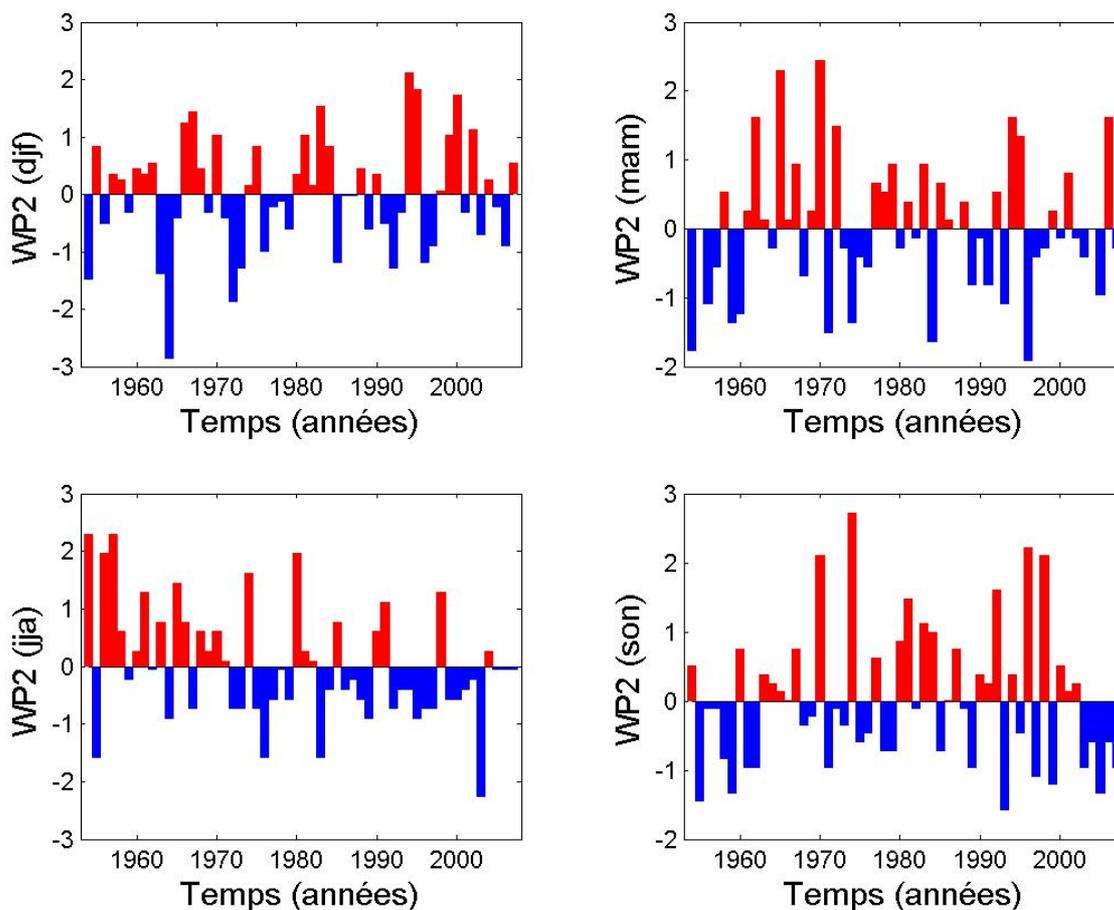


Figure III-9 – Valeurs moyennes saisonnières de l'indice WP2: hiver (dijf), printemps (mam), été (jja) et automne (son).

III.2.4 Type de temps « anticyclonique » (WP8)

Le calcul de l'indice WP8 est en tout point similaire à celui décrit en section III.2.3 pour l'indice WP2, en remplaçant simplement la fréquence d'occurrence du type 2 par celle du type 8. La Figure III-10 montre l'indice calculé sur l'année hydrologique, tandis que la Figure III-11 montre les indices saisonniers.

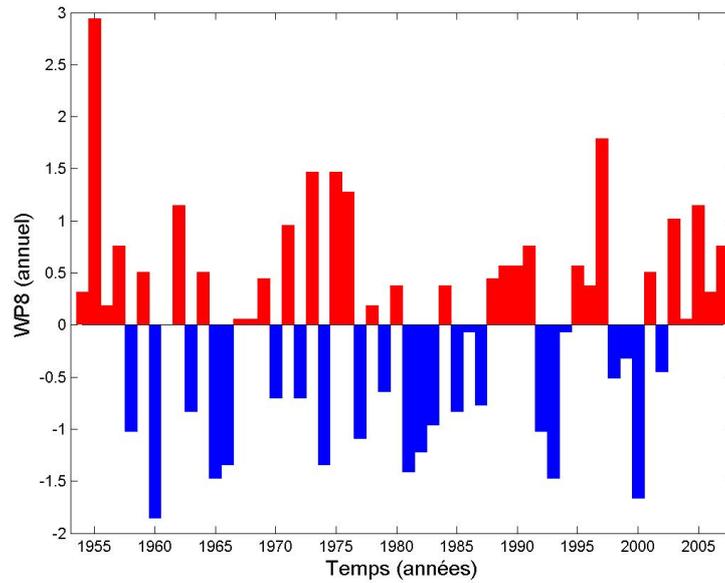


Figure III-10 – Valeurs moyennes annuelles de l'indice WP8. L'année est considérée au sens des régimes hydrologiques pluviaux (i.e. février - janvier).

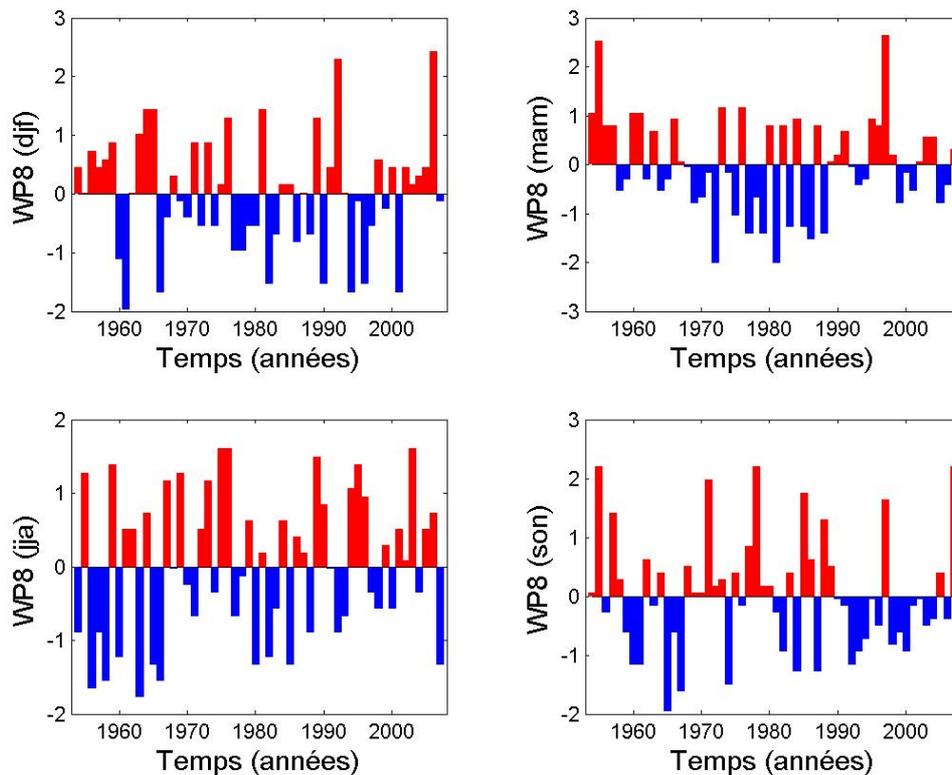


Figure III-11 – Valeurs moyennes saisonnières de l'indice WP8: hiver (dij), printemps (mam), été (jja) et automne (son).

III.2.5 Corrélations entre indices climatiques

Les indices climatiques présentés dans les sections précédentes quantifient différents modes de variabilité qui, d'après l'analyse bibliographique, pourraient avoir un impact sur les régimes hydrologiques. Il est intéressant d'évaluer la corrélation entre ces indices afin de vérifier la complémentarité des informations portées par chaque indice : en effet, des indices très fortement corrélés n'auraient qu'un intérêt limité puisqu'ils constitueraient alors des descripteurs redondants d'un même mode de variabilité.

La Figure III-12(a) représente les corrélations entre les indices calculés à l'échelle annuelle. L'AMO, la NAO et les WP présente des corrélations faibles et non significatives, ce qui démontre que ces indices quantifient des modes de variabilité distincts. Une corrélation plus importante (-0.52, significative au risque 1%) est néanmoins observée entre la fréquence des deux types de temps WP2 et WP8. Cette corrélation négative traduit le fait que les années caractérisées par une forte fréquence de WP2 (circulation d'ouest pluvieuse) sont généralement également caractérisées par une faible fréquence de WP8 (régime anticyclonique), ce qui semble cohérent avec les mécanismes météorologiques que l'on connaît en France. Néanmoins, en dépit de cette corrélation non négligeable, la relation entre les indices WP2 et WP8 est loin d'être parfaite, et il reste donc intéressant de conserver les deux indices pour les analyses ultérieures.

La Figure III-12(b) représente également les corrélations entre indices, mais en incluant cette fois-ci les indices calculés à l'échelle saisonnière. Une première observation est que chaque indice annuel tend à être positivement corrélé au même indice calculé sur la saison, ce qui est un résultat attendu (le calcul saisonnier étant basé sur un sous-ensemble des données utilisées à l'échelle annuelle). Par contre, pour un indice donné, les quatre indices saisonniers tendent à être très peu corrélés entre eux, ce qui confirme la dynamique infra-annuelle des modes de variabilité correspondants, et confirme donc l'intérêt de cette saisonnalisation. Quelques corrélations supplémentaires méritent également d'être notées : on retrouve tout d'abord des corrélations négatives dans le bloc WP2/WP8, qui correspondent à la corrélation notée précédemment à l'échelle annuelle. De plus, on observe des corrélations positives entre la NAO hiver/printemps avec les indices WP2 hiver/printemps. Ceci pourrait correspondre au fait que les phases positives de la NAO correspondent à une intensification des flux d'ouest (cf. section III.1.1).

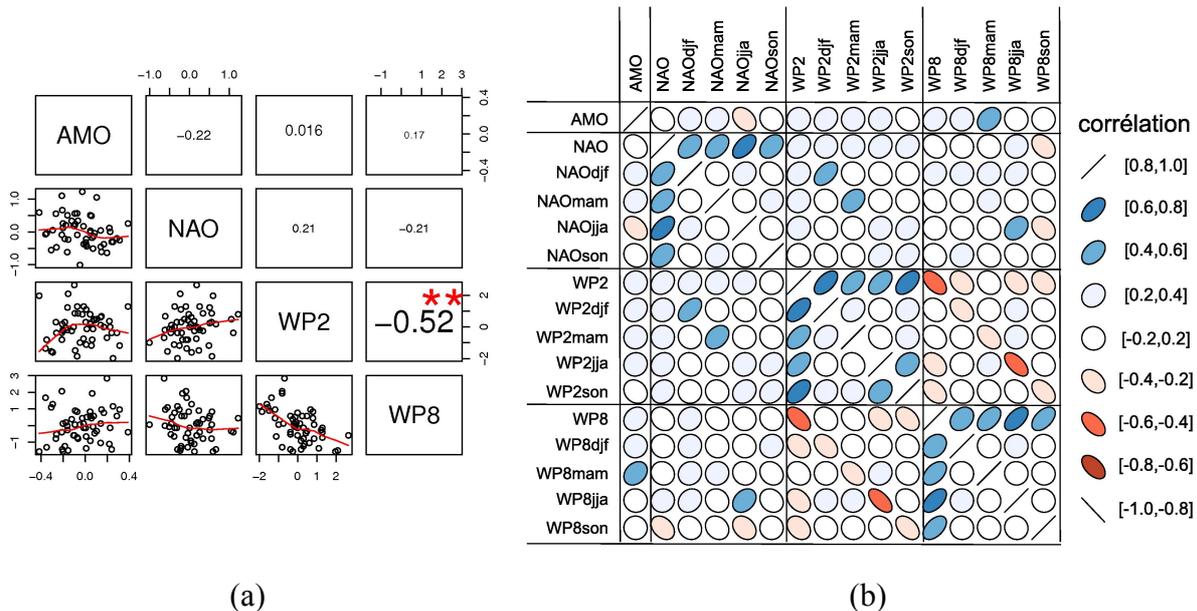


Figure III-12 – Représentations graphiques des corrélations entre indices climatiques.
(a) indices annuels : les éléments sous-diagonaux représentent les nuages de points, les éléments sur-diagonaux donnent la valeur du coefficient de corrélation. (b) indices annuels et saisonniers : les ellipses décrivent la corrélation entre indices.

IV. METHODOLOGIE

Cette section décrit la méthodologie utilisée pour étudier l'association entre : (i) la variabilité climatique de grande échelle, comme quantifiée par les indices décrits en section III ; et (ii) la variabilité du régime hydrologique d'étiage. Dans un premier temps, les indices hydrologiques utilisés sont décrits (section IV.1), avant de présenter le test statistique utilisé (section IV.2) et de discuter des particularités de cette analyse (section IV.3).

IV.1. Indices d'étiage

Le régime d'étiage est décrit par six indices extraits des chroniques de débit journalier. Ces indices sont identiques à ceux utilisés dans les précédents rapports [Giuntoli and Renard, 2009; 2010]:

- Indices de sévérité :
 - **Déficit de volume** : calculé par rapport au seuil de bas débit = $q_{15\%}$
 - **Pic de l'étiage** : minimum annuel (calculé sur les données journalières).
- Indices de saisonnalité :
 - **Début d'étiage** : centre de masse à 10% en volume (seuil de bas débit = $q_{15\%}$)
 - **Centre de l'étiage** : centre de masse à 50% en volume (seuil de bas débit = $q_{15\%}$)
 - **Fin d'étiage** : centre de masse à 90% en volume (seuil de bas débit = $q_{15\%}$)
- Moyennes eaux :
 - **Module** : débit moyen annuel

Précisons que nous avons restreint l'analyse à ces six indices, sur les dix indices utilisés dans les rapports précédents, dans un souci de clarté. En effet, il s'avère que les résultats sont très

comparables sur certains indices corrélés (par exemple : déficit de volume et durée d'étiage, ou encore centre de l'étiage et date du pic d'étiage), nous préférons donc restreindre le nombre d'indices utilisés, ce qui permet une présentation des résultats plus synthétique.

Rappelons enfin que le calcul des indices est effectué par année hydrologique plutôt que par année civile (cf. section III.2.1) :

- Régime pluvial (étiages estivaux): février - janvier
- Régime nival (étiages hivernaux) et de transition : mai - avril

IV.2. Le test de Kendall

Le degré d'association entre un indice climatique X et un indice hydrologique Y est étudié sur la base du coefficient de corrélation de *Kendall* [1938], aussi connu sous le nom de « τ de Kendall ». Ce coefficient est une alternative au coefficient de corrélation linéaire classique (coefficient de Pearson), et mesure le degré d'association entre les variables X et Y sur la base des rangs des observations (et non directement de leurs valeurs). Cette caractéristique est intéressante car elle permet de dériver un test *non-paramétrique* (i.e. qui ne fait pas d'hypothèse sur la distribution des données) pour évaluer la significativité de l'association entre X et Y . Ceci apporte une souplesse appréciable dans le cas des indices hydrologiques, dont la distribution est parfois difficile à déterminer et est bien souvent non-Gaussienne. Dans toute la suite de ce rapport, le terme « corrélation » sera donc à considérer au sens du τ de Kendall.

Soient $(x_i)_{i=1:n}$ et $(y_i)_{i=1:n}$ les séries observées, dont on cherche à évaluer si elles sont corrélées. Le τ de Kendall est défini de la façon suivante :

$\tau = S / D$, avec:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (\text{signe}(x_j - x_i) \times \text{signe}(y_j - y_i)) \quad (1)$$

$$D = n(n-1) / 2$$

De manière plus intuitive, le τ de Kendall compte le nombre de paires discordantes et concordantes : si les valeurs (x_i, x_j) d'une part et (y_i, y_j) d'autre part sont rangées dans le même ordre, alors la paire est concordante. Dans ce cas, le produit $\text{signe}(x_j - x_i) \times \text{signe}(y_j - y_i)$ dans l'équation (1) vaut +1. Dans le cas contraire, la paire est dite discordante, et le produit $\text{signe}(x_j - x_i) \times \text{signe}(y_j - y_i)$ vaut -1. Si les deux séries $(x_i)_{i=1:n}$ et $(y_i)_{i=1:n}$ sont corrélées, on devrait observer une grande proportion de paires discordantes (pour une association positive) ou concordantes (pour une association négative), conduisant à une valeur de S élevée en valeur absolue. Par contre, si les séries sont indépendantes, alors elles sont non corrélées, et on devrait donc observer à peu près autant de paires discordantes et concordantes, conduisant à une valeur de S proche de zéro. Le dénominateur D correspond au nombre total de paires évaluées dans la double somme de l'équation (1), et est utilisé pour standardiser la valeur de S . On assure ainsi que la valeur de τ varie entre -1 (corrélacion négative parfaite, toutes les paires sont discordantes) et +1 (corrélacion positive parfaite, toutes les paires sont concordantes).

Le test de Kendall vise à déterminer si le τ de Kendall est significativement différent de zéro, i.e. si les deux séries $(x_i)_{i=1:n}$ et $(y_i)_{i=1:n}$ sont significativement corrélées. Les hypothèses du test sont donc $H_0 : \tau = 0$, contre $H_1 : \tau \neq 0$. La statistique de test est égale à:

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{\text{Var}(S)} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{\text{Var}(S)} & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Où S est défini dans l'équation (1), et :

$$\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18 \quad (3)$$

Asymptotiquement ($n \rightarrow \infty$), Z est distribuée suivant une loi Gaussienne centrée réduite, $Z \sim N(0;1)$. L'hypothèse H_0 sera donc rejetée au risque α si $|Z| > u_{1-\alpha/2}$, où u_p représente le p -quantile d'une loi Gaussienne centrée réduite.

Notons qu'il est possible de modifier le test pour prendre en compte l'existence de valeurs ex-æquo dans la série à tester. Dans le cas de l'étude effectuée dans ce rapport, les ex-æquo peuvent concerner certains indices hydrologiques (notamment le déficit de volume en étiage, qui prend la valeur zéro chaque année où le débit n'est pas passé sous le seuil de bas débit). Dans ce cas, la correction consiste à remplacer $\text{Var}(S)$ dans l'équation (3) par :

$$\text{Var}(S) = \left(n(n-1)(2n+5) - \sum_{k=1}^n t_k k(k-1)(2k+5) \right) / 18 \quad (4)$$

où t_k est le nombre de valeurs conduisant à k ex-æquo. Notons qu'il existe également des corrections plus complexes dans le cas où des valeurs ex-æquo peuvent être trouvées dans les deux séries $(x_i)_{i=1,n}$ et $(y_i)_{i=1,n}$ [Kendall, 1975].

Pour conclure, on peut mentionner que le test de Mann-Kendall [Mann, 1945; Kendall, 1975], qui avait été abondamment utilisé dans les rapports précédents pour détecter une tendance temporelle dans les séries hydrologiques, est un cas particulier du test de Kendall présenté ici, obtenu en remplaçant la série $(x_i)_{i=1,n}$ par $1, \dots, n$. De ce point de vue, on peut donc considérer que la recherche d'associations entre indices climatiques et hydrologiques revient à remplacer la covariable « temps » par une covariable climatique.

IV.3. Valeur ajoutée de l'analyse effectuée

Par rapport aux études présentées dans l'analyse bibliographique (section III.1), le travail décrit dans ce rapport reprend un certain nombre de principes méthodologiques généraux, mais possède également quelques originalités visant à adapter ces principes au contexte des étiages et à combler certaines lacunes. En particulier, l'analyse possède les caractéristiques suivantes :

- Elle est basée sur un jeu de données hydrométriques amplement critiqué, possédant une couverture spatiale et temporelle remarquable.
- Elle n'utilise pas des débits moyennés e.g. mensuellement, mais privilégie l'utilisation de variables descriptives des événements d'étiage, basé sur des données journalières. Ceci permet une description plus fine des événements d'étiage, notamment en termes de saisonnalité et de sévérité.
- Elle ne focalise pas sur un ou quelques bassins particuliers, mais vise plutôt l'échelle nationale. Cette approche nationale possède évidemment des avantages et des inconvénients : l'intérêt est principalement la généralité des conclusions qui peuvent être tirées, mais en contrepartie, le nombre de stations analysées rend impossible une compréhension plus fine des mécanismes en jeu au sein de chaque bassin versant.

- Elle ne focalise pas sur un unique indice de variabilité climatique, mais évalue quatre indices différents (NAO, AMO, WP2 et WP8), décrivant des modes de variabilité bien distincts, aux échelles annuelles et saisonnières.
- L'utilisation d'indices climatiques saisonniers permet de rechercher à la fois des liens hydro-climatiques synchrones et asynchrones, ces derniers possédant un intérêt direct en termes de prévision saisonnière.
- Enfin, l'analyse contribue à une meilleure compréhension de l'impact de la variabilité climatique à grande échelle sur les régimes hydrologiques en France : l'analyse bibliographique montre que nos connaissances restent fragmentaires sur ce sujet.

V. RESULTATS

Cette section résume les principaux résultats de l'analyse effectuée. Dans un premier temps, nous recherchons des liens synchrones entre indices climatiques et hydrologiques, à l'échelle de l'année hydrologique (section V.1). Dans un second temps, nous évaluons la stabilité des corrélations détectées en fonction de la période d'analyse (section V.2). Enfin nous concluons avec une étude de l'existence de liens asynchrones, sur la base des indices climatiques saisonniers (section V.3).

V.1. Liens synchrones : indices climatiques annuels

La Figure V-1 présente les résultats du test de Kendall pour évaluer l'existence de liens entre, d'une part, trois indices hydrologiques (module, minimum annuel et déficit de volume) et, d'autre part, les quatre indices climatiques annuels définis en section III.2, ainsi que le temps. Dans la première colonne de cette figure, on retrouve donc les évolutions temporelles qui avaient été identifiées dans les rapports précédents, et qui ont été rappelées en section II. Les colonnes suivantes décrivent l'association avec les indices hydrologiques, ce qui permet de comparer la répartition spatiale des résultats. La période analysée est 1968-2008. Enfin, mentionnons l'utilisation d'une légende différente pour les régimes pluvial/nival, afin de mettre en évidence le fait que les années hydrologiques considérées sont différentes.

Le résultat le plus frappant de la Figure V-1 concerne les très nombreuses corrélations détectées entre les indices hydrologiques et les indices « type de temps » WP2 et WP8. Ces corrélations concernent la quasi-totalité du territoire, à l'exception du pourtour méditerranéen. Elles sont très significatives pour le module, légèrement moins pour le minimum annuel et le déficit volume, mais tout en conservant une cohérence spatiale remarquable. Le signe de ces corrélations est cohérent avec l'interprétation des indices WP2 et WP8 : une valeur élevée de WP2 correspond à une fréquence élevée du type de temps pluvieux « circulation d'ouest », conduisant à de fortes valeurs du module et du minimum annuel, et de faibles valeurs pour le déficit de volume. Un raisonnement similaire peut être tenu pour le WP8, correspondant à un type de temps sec.

Des corrélations sont également détectées pour l'indice AMO. De plus, on peut constater que la répartition spatiale des résultats est similaire à celle observée lorsque le temps est utilisé comme covariable (première colonne), notamment sur les Pyrénées et les Cévennes. Cette observation est importante car elle suggère que pour ces régions, les tendances temporelles détectées pourraient résulter, au moins en partie, de cette corrélation avec l'AMO. En effet, sur la période étudiée (1968-2008), l'indice AMO a globalement été en hausse marquée (cf. Figure III-5). Un indice hydrologique corrélé avec l'AMO devrait donc présenter une tendance temporelle similaire. Néanmoins, si c'est effectivement l'AMO qui est à l'origine de cette tendance, on peut s'attendre à ce que la tendance disparaisse sur une période de temps

plus longue, au gré des fluctuations de l'AMO. Cette possibilité pourra être étudiée en section V.2, où la stabilité des résultats sera évaluée sur plusieurs périodes.

Enfin, on détecte également plusieurs corrélations avec l'indice NAO, principalement regroupées dans le centre de la France. On peut également remarquer un ensemble de corrélations très significatives entre le module et la NAO sur la région des Cévennes.

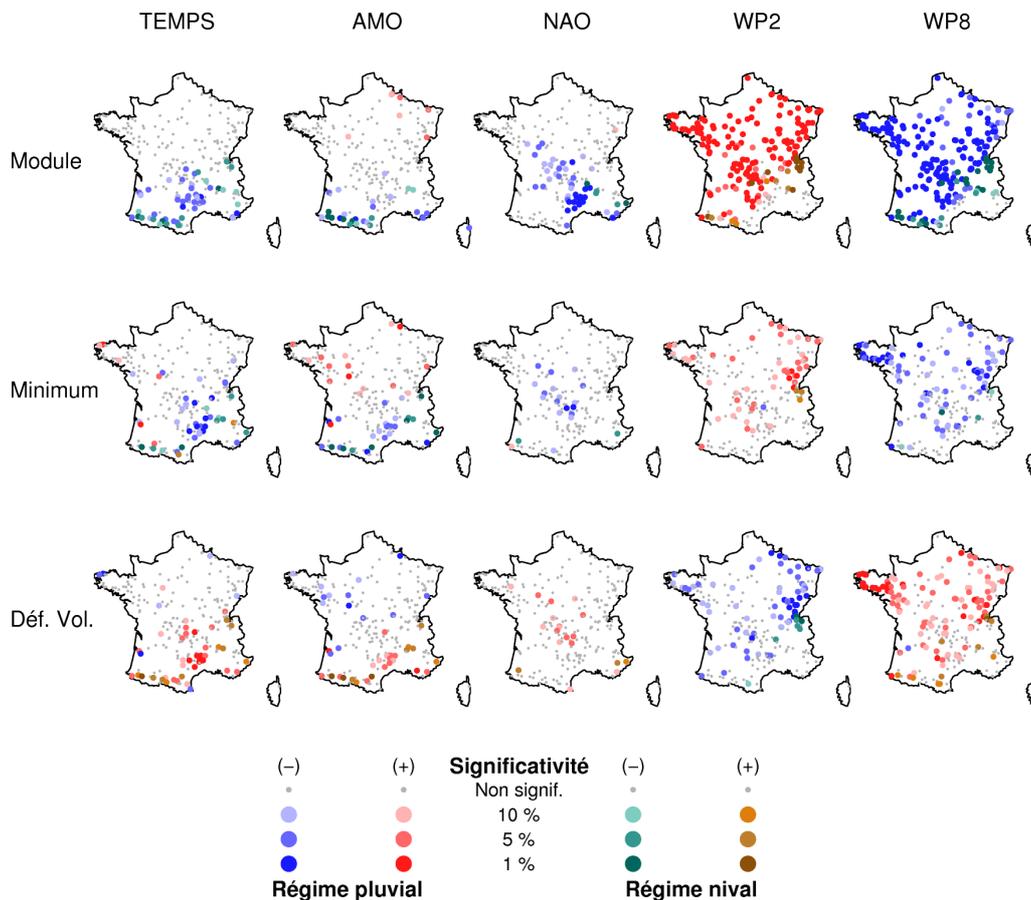


Figure V-1– Résultats du test d'association de Kendall entre les indices hydrologiques (en ligne) et les indices climatiques annuels (en colonne), période 1968-2008.

La Figure V-2 présente les résultats pour les trois indices décrivant la saisonnalité de l'étiage. Globalement, les corrélations avec les indices climatiques semblent moins marquées que pour les précédents indices hydrologiques. En particulier, l'influence de la NAO et de l'AMO est faible et peu structurée spatialement. Les corrélations avec les indices WP2 et WP8 sont plus nombreuses, notamment pour le début et la fin de l'étiage, et sont cohérentes spatialement : les années caractérisées par des fréquences élevées de type de temps sec WP8 semblent correspondre à des débuts d'étiage plutôt précoces (notamment dans le centre et en Bretagne), et des fin d'étiages plutôt tardives (notamment sur le tiers nord et les Pyrénées), et inversement pour le type de temps WP2. La Figure V-2 rappelle également que de nombreuses tendances temporelles existent pour la saisonnalité des étiages (première colonne), notamment pour le début de l'étiage, mais la répartition spatiale de ces tendances ne correspond à aucune des répartitions observées avec les indices climatiques. Il semble donc

que ces tendances temporelles ne puissent pas s'expliquer par l'effet de la variabilité climatique.

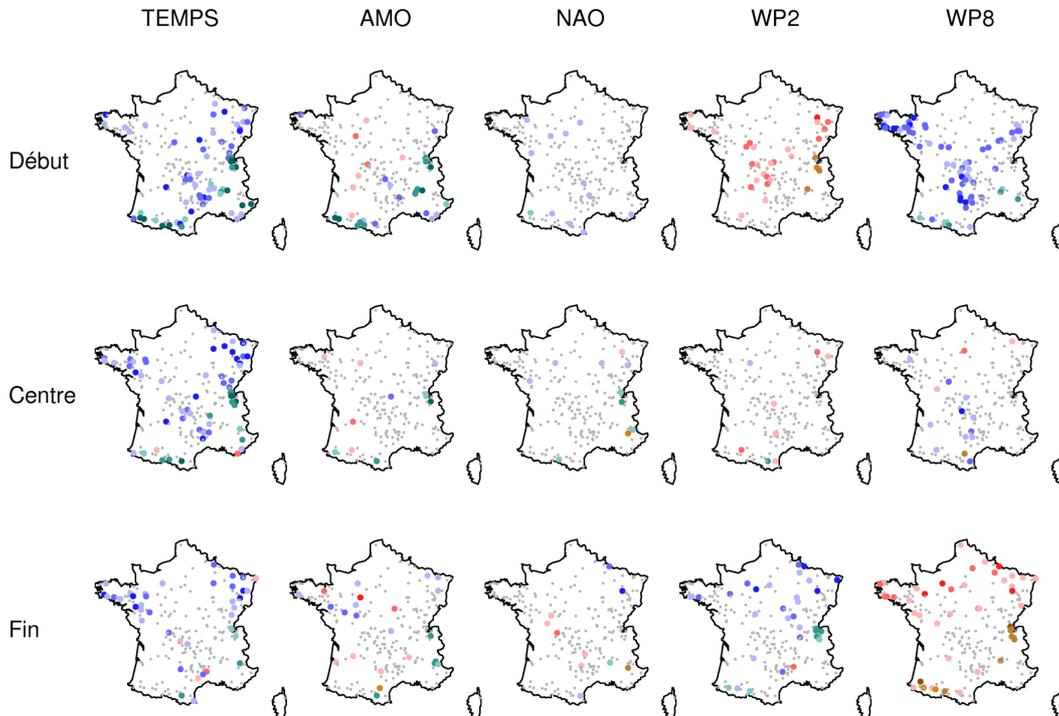


Figure V-2 - Résultats du test d'association de Kendall entre les indices hydrologiques (en ligne) et les indices climatiques annuels (en colonne), période 1968-2008. Légende identique à la Figure V-1.

V.2. Liens synchrones : stabilité des relations hydro-climatiques

Dans cette section, l'objectif est d'évaluer la stabilité des corrélations détectées précédemment lorsque la période d'analyse change. Un sous-échantillon de 28 très longues séries, couvrant la période 1948-2008, est utilisé. La Figure V-3 montre les tendances temporelles détectées sur les périodes : (i) 1948-1988 (40 ans); (ii) 1968-2008 (40 ans, correspondant à la période analysée dans la section précédente) ; (iii) la période totale 1948-2008 (60 ans). Seuls trois indices hydrologiques sont présentés pour simplifier la présentation : le module, le début de l'étiage et le déficit de volume. On peut clairement observer que ces tendances temporelles ne sont pas stables dans le temps : ainsi, pour le module par exemple, une analyse sur la période 1948-1988 suggère une tendance à la hausse, mais cette tendance s'inverse sur la période 1968-2008, et disparaît sur la période complète 1948-2008. Le même manque de stabilité est observé pour les autres indices hydrologiques.

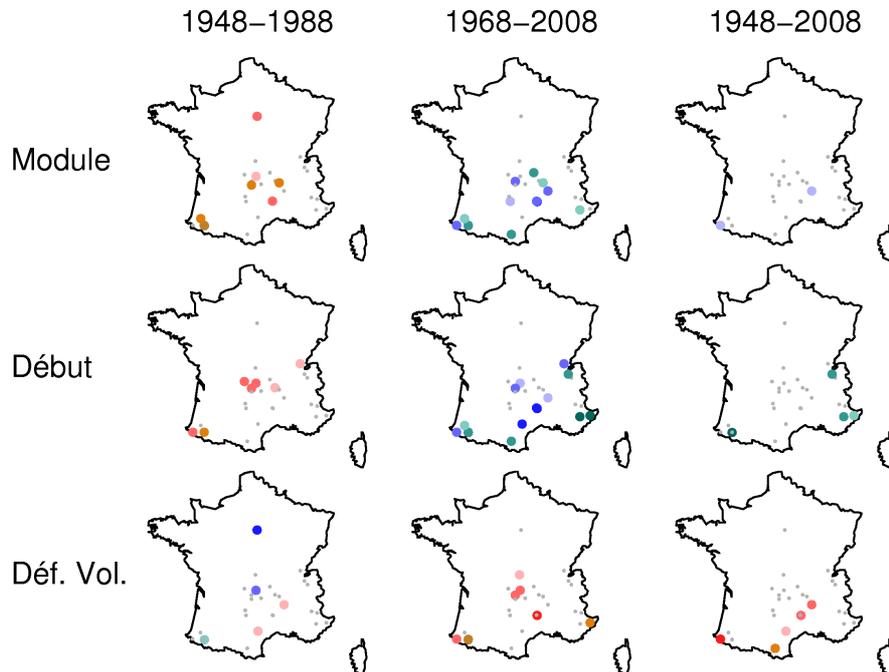


Figure V-3 – Comparaison des résultats du test d’association de Kendall entre les indices hydrologiques (en ligne) et le temps, pour trois périodes d’analyse (en colonne). Légende identique à la Figure V-1.

La même expérience est réalisée pour les corrélations avec les indices climatiques. La Figure V-4 présente les résultats pour l’AMO. L’interprétation de cette figure est peu concluante car les zones où l’AMO a une influence (Pyrénées, Cévennes, cf. section V.1) sont très peu représentées dans les 28 longues séries disponibles. Tout au plus peut-on remarquer que l’analyse sur différentes périodes ne livre pas de résultats contradictoires.

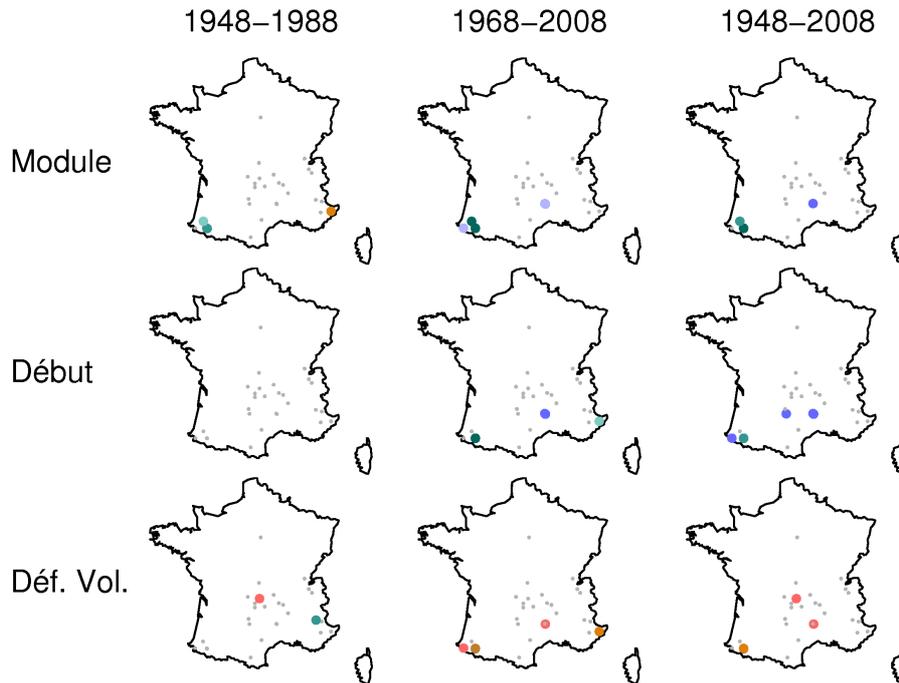


Figure V-4 - Comparaison des résultats du test d'association de Kendall entre les indices hydrologiques (en ligne) et l'indice AMO annuel, pour trois périodes d'analyse (en colonne). Légende identique à la Figure V-1.

Les résultats concernant la NAO sont plus marqués (Figure V-5) : on observe que les corrélations détectées sur les trois périodes restent cohérentes. En particulier, l'influence de la NAO sur le module dans le centre de la France reste observable sur les trois périodes. Son influence sur les indices d'étiage est bien moins marquée sur la base de l'échantillon de stations utilisé, et ce de manière cohérente sur les trois périodes analysées.

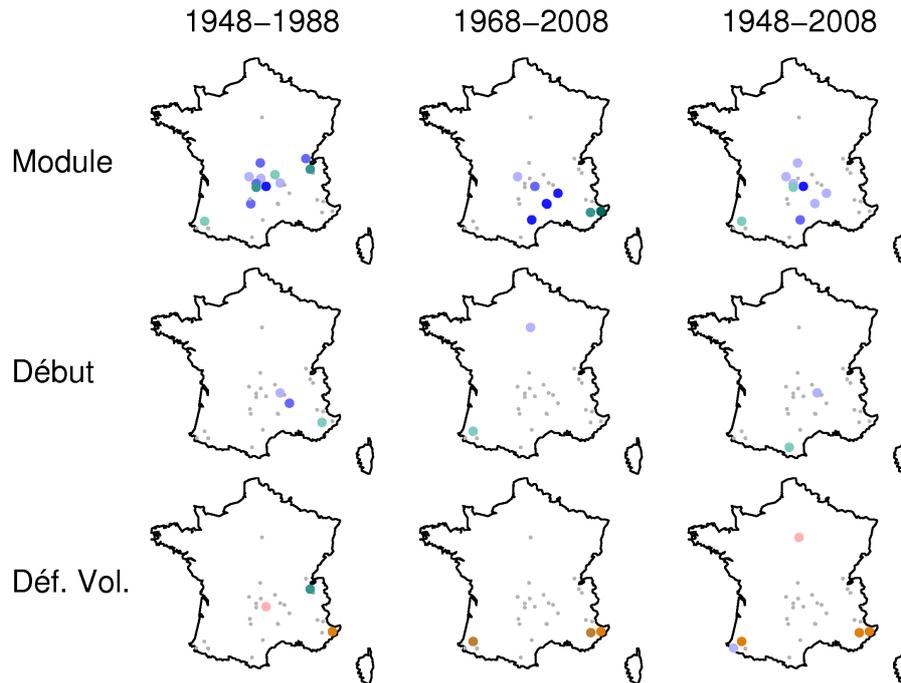


Figure V-5 – Comparaison des résultats du test d’association de Kendall entre les indices hydrologiques (en ligne) et l’indice NAO annuel, pour trois périodes d’analyse (en colonne). Légende identique à la Figure V-1.

Enfin, les résultats obtenus pour l’indice climatique WP8 démontre la très bonne stabilité des corrélations détectées avec cet indice (Figure V-6) : en particulier, les corrélations WP8-module et WP8-déficit de volume restent cohérentes quelle que soit la période considérée. Les résultats pour l’indice WP2 sont similaires.

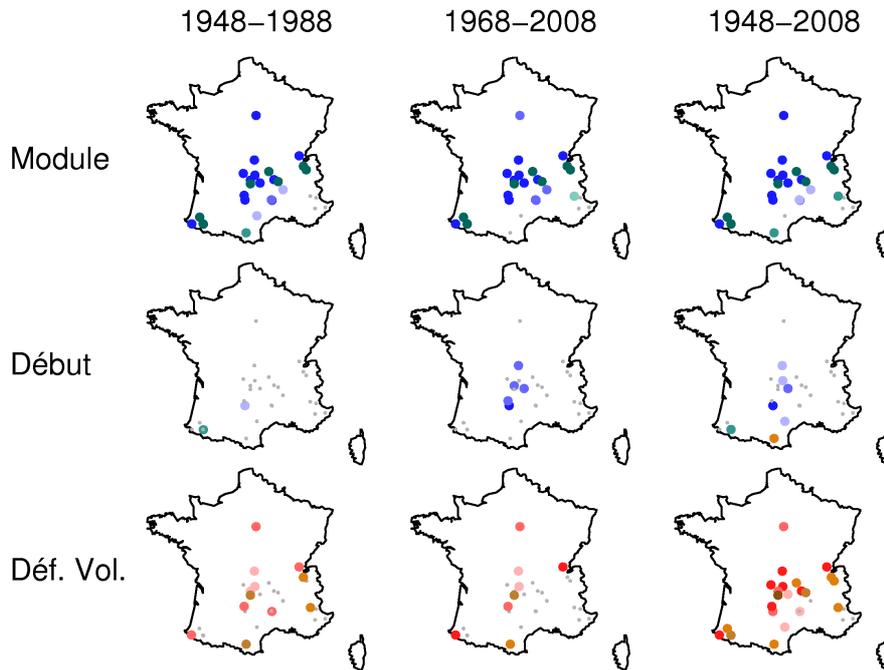


Figure V-6 – Comparaison des résultats du test d’association de Kendall entre les indices hydrologiques (en ligne) et l’indice WP8 annuel, pour trois périodes d’analyse (en colonne). Légende identique à la Figure V-1.

Le contraste entre le manque de stabilité des tendances temporelles d’une part, et la bonne stabilité des corrélations avec les indices climatiques (lorsque celles-ci existent) d’autre part, est un résultat important qui appelle plusieurs commentaires. Tout d’abord, ce résultat confirme que les tendances temporelles détectées ne devraient pas être extrapolées pour le futur, en tout cas pas sur la base des seuls résultats présentés ici. Inversement, le fait que les liens climat-hydrologie détectés restent stables est une indication de la pertinence des indices climatiques pour expliquer la variabilité temporelle des régimes hydrologiques.

Comme discuté en section V.1, les tendances temporelles détectées sur les régimes hydrologiques pourraient donc s’expliquer (au moins en partie) par une dépendance à la variabilité climatique de grande échelle, sur la base du raisonnement suivant : (i) les indices hydrologiques dépendent des indices climatiques ; (ii) certains de ces indices possèdent une forte inertie temporelle qui peut créer des tendances apparentes sur des périodes « courtes » de quelques dizaines d’années (ceci est surtout vrai pour l’AMO, cf. Figure V-7). (iii) certaines tendances temporelles détectées sur les indices hydrologiques pourraient donc résulter, au moins en partie, de l’inertie des indices climatiques.

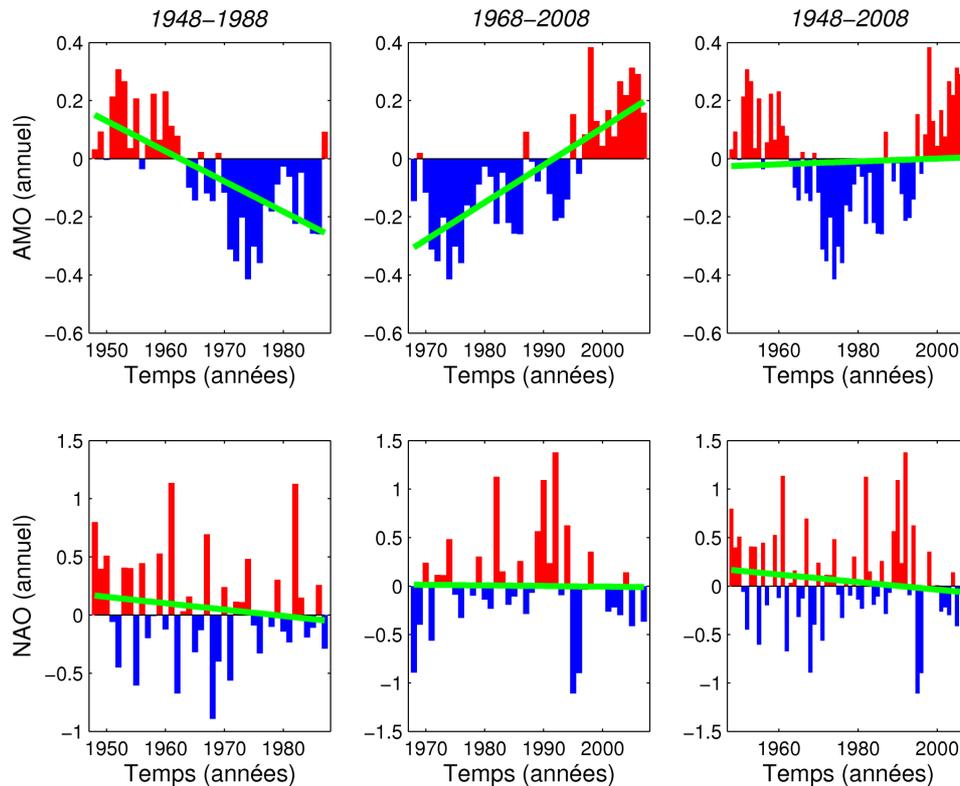


Figure V-7 – Evolution temporelle de l'AMO et de la NAO sur les trois périodes considérées. Les lignes vertes représentent les tendances apparentes sur chaque période.

V.3. Liens asynchrones : indices climatiques saisonniers (NAO, WP2, WP8)

L'objectif de cette section est de rechercher des corrélations hydro-climatiques sur la base des indices climatiques saisonniers. On s'intéresse plus particulièrement à la recherche de corrélations asynchrones, par exemple un indice climatique hivernal ou printanier qui posséderait une bonne corrélation avec l'étiage estival : ce type de corrélation peut ouvrir des applications en termes de prévision saisonnière.

La Figure V-8 présente les résultats du test de Kendall entre, d'une part, les six indices hydrologiques (en ligne) et, d'autre part, les quatre séries de NAO saisonnière (en colonne). Le premier commentaire que l'on peut faire concerne la NAO hivernale (première colonne). La revue bibliographique (section III.1.1) a montré l'importance de cet indice dans la variabilité temporelle des régimes hydrologiques. En particulier, les phases positives de la NAO hivernale sont associées avec des écoulements élevés en Europe du Nord, et inversement, des étiages marqués sur la péninsule Ibérique. Aucune de ces associations n'est visible en France : globalement, les indices hydrologiques de quantité (module, minimum et déficit de volume) sont très faiblement corrélés à la NAO hivernale. Quelques corrélations sont détectées pour les indices hydrologiques de saisonnalité, mais de manière relativement diffuse. Contrairement à ce qui est observé en Europe du Nord et du Sud, il semble donc que les régimes hydrologiques français soient faiblement influencés par la NAO hivernale.

Le second résultat marquant concerne le lien clairement détecté sur la moitié nord du pays entre la NAO estivale et les indices hydrologiques décrivant la sévérité de l'étiage (minimum

annuel et déficit de volume). Ce lien assez net peut ouvrir des perspectives intéressantes en termes de prévision saisonnières : en effet, si la NAO estivale est prévisible, alors la sévérité de l'étiage pourrait également l'être sur la partie nord du pays. Ce point sera discuté en section VI.2.2.

Mentionnons également que d'autres corrélations sont détectées (par exemple avec la NAO automnale) mais de manière plus diffuse à l'échelle du pays. Enfin, on peut remarquer que la considération de l'indice NAO à l'échelle saisonnière permet de mettre en évidence certaines corrélations de façon bien plus nette qu'avec la NAO annuelle (cf. Figure V-1 et Figure V-2). Ceci confirme l'intérêt de considérer ce mode de variabilité à l'échelle plus fine de la saison.

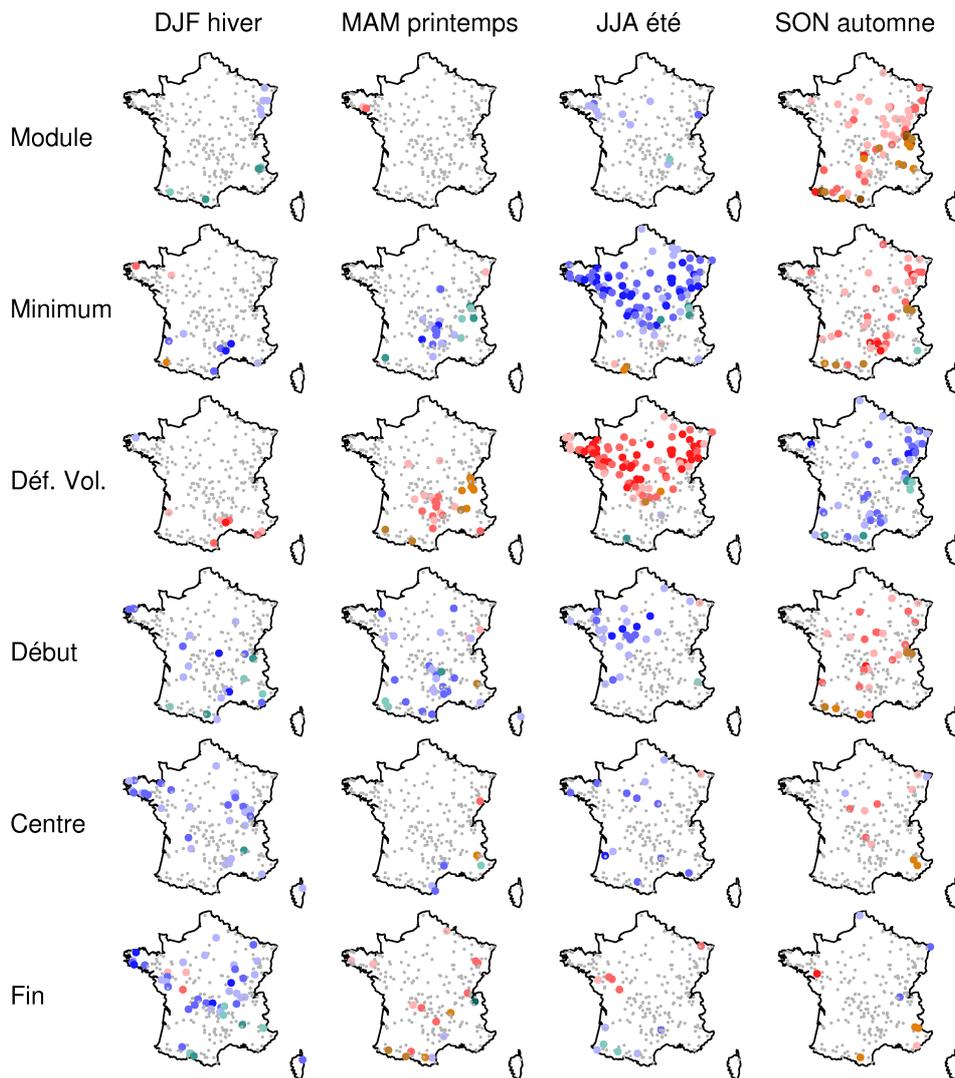


Figure V-8 - Résultats du test d'association de Kendall entre les indices hydrologiques (en ligne) et les indices NAO saisonniers (en colonne), période 1968-2008. Légende identique à la Figure V-1.

La Figure V-9 présente les résultats obtenus avec les indices WP2 saisonniers. Le résultat le plus marquant concerne les nombreuses corrélations asynchrones détectées sur la moitié nord du pays entre le WP2 hivernal/printanier et les indices hydrologiques décrivant la sévérité de

l'étiage (et dans une moindre mesure, les indices de saisonnalité). Comme précédemment, ce résultat ouvre des perspectives de prévision saisonnière (voir section VI.2.2 pour une discussion plus approfondie).

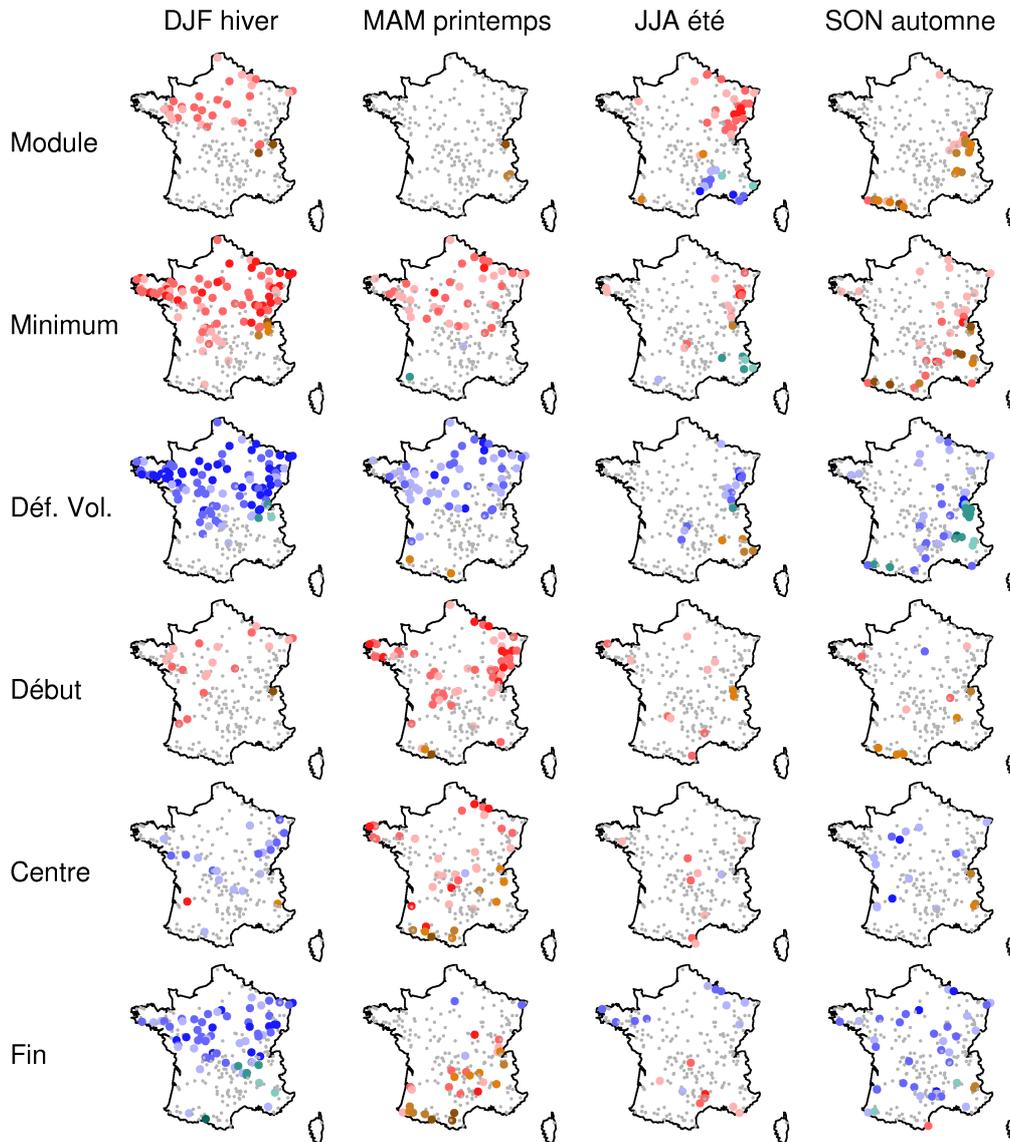


Figure V-9 – Résultats du test d'association de Kendall entre les indices hydrologiques (en ligne) et les indices WP2 saisonniers (en colonne), période 1968-2008. Légende identique à la Figure V-1.

Comme pour le WP2, de nombreuses corrélations sont également détectées entre les indices WP8 saisonniers et les indices hydrologiques (Figure V-10), mais contrairement au WP2 et à la NAO estivale, ces corrélations ne concernent pas uniquement la moitié nord de la France et s'étendent plus au sud. Les corrélations les plus nettes concernent :

- Le module et le WP8 d'automne, principalement dans le centre de la France et en Bretagne.
- Les indices de sévérité de l'étiage et les WP8 d'hiver/printemps/été, sur une grande partie du territoire à l'exception notable des zones montagneuses et du pourtour méditerranéen.
- Les indices de saisonnalité de l'étiage et les WP8. Le début de l'étiage est plus fortement corrélé avec les WP8 de printemps/été, alors que pour le centre et surtout la fin de l'étiage la corrélation la plus forte concerne le WP8 d'automne.

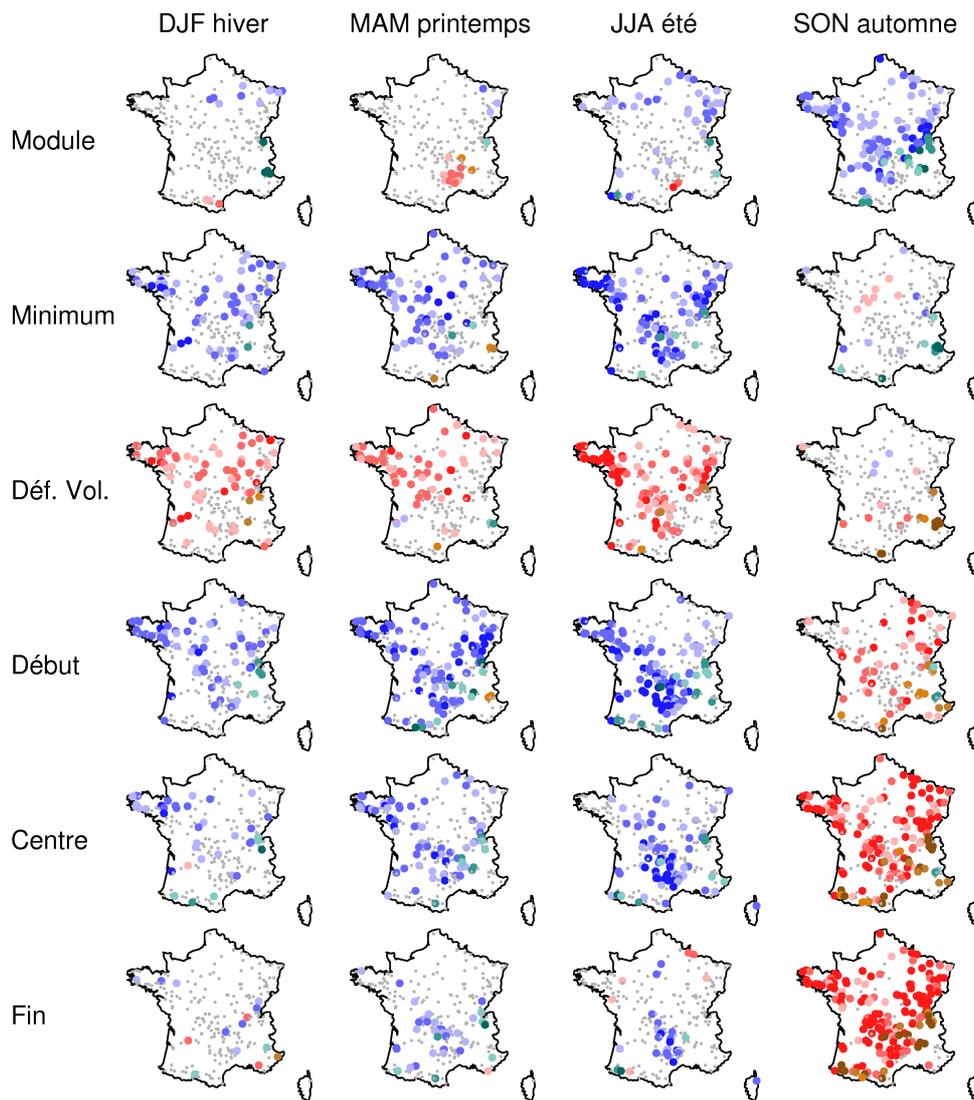


Figure V-10 – Résultats du test d'association de Kendall entre les indices hydrologiques (en ligne) et les indices WP8 saisonniers (en colonne), période 1968-2008. Légende identique à la Figure V-1.

VI. CONCLUSIONS & DISCUSSIONS

Cette section résume les principales conclusions de ce travail (section VI.1), avant de discuter des difficultés découlant des résultats obtenus, mais aussi des opportunités potentielles (section VI.2).

VI.1. Tendances temporelles et variabilité climatique

L'analyse présentée dans ce rapport avait pour but de dépasser les analyses de tendance réalisées jusqu'ici, et de mieux comprendre quels sont les facteurs climatiques qui agissent sur la variabilité temporelle des régimes hydrologiques. Les principaux résultats peuvent être résumés de la manière suivante :

- **Sévérité des étiages** : Une division nord-sud était observée pour les tendances temporelles, avec une aggravation de la sévérité des étiages dans la partie sud de la France. Un signal spatial similaire est observé pour les corrélations avec l'AMO et la NAO. En conséquence, on ne peut exclure qu'au moins une partie des tendances temporelles détectées sur les régimes d'étiage soient due à une dépendance à la variabilité climatique de grande échelle, et à l'inertie de cette dernière. De plus, la fréquence des types de temps WP2 (circulation d'ouest) et WP8 (anticyclonique) semble jouer un rôle prépondérant dans la variabilité temporelle des régimes d'étiage sur une grande partie du pays, à l'exception notable du pourtour méditerranéen.
- **Saisonnalité des étiages** : De nombreuses tendances temporelles avaient été observées, en particulier sur le début de l'étiage (vers une précocité accrue). Cependant, contrairement à ce que l'on remarque pour la sévérité des étiages, on ne retrouve pas de signal similaire pour les corrélations avec l'AMO et la NAO. De plus, le rôle des types de temps WP2 et WP8 est également bien moins marqué. En conséquence, les tendances temporelles détectées sur la saisonnalité des étiages ne semblent pas être liées à la variabilité climatique de grande échelle.

De plus, une étude restreinte aux très longues séries disponibles (plus de 60 ans de données sur la période 1948-2008) a également permis de mettre en évidence la bonne stabilité des corrélations avec les indices climatiques (lorsque celles-ci existent), alors que les tendances temporelles sont bien moins robustes, avec parfois des résultats contradictoires sur des périodes d'analyse différentes. Ce résultat est une indication de la pertinence des indices climatiques pour expliquer la variabilité temporelle des régimes hydrologiques, et suggère que ces indices sont de bien meilleurs candidats dans une optique de prédiction que la variable « temps ».

Enfin, l'utilisation d'indices climatiques saisonniers a permis de préciser certains liens hydro-climatiques. Les principales conclusions sont les suivantes :

- La considération des indices NAO, WP2 et WP8 à l'échelle saisonnière met en évidence certaines corrélations de façon bien plus nette qu'avec les mêmes indices calculés annuellement, ce qui confirme l'intérêt de considérer ces modes de variabilité à l'échelle plus fine de la saison.
- Contrairement à ce qui est décrit dans la littérature, notamment aux extrémités nord et sud de l'Europe (cf. section III.1.1), la NAO hivernale est très faiblement corrélée avec les indices hydrologiques de quantité (module, minimum annuel et déficit de volume). Il semble donc que la position géographique de la France la place dans une zone de faible influence de la NAO hivernale, contrairement à des régions comme la Scandinavie ou la péninsule Ibérique.

- Certaines relations mises en évidence sur la base des indices climatiques saisonniers sont asynchrones, c'est à dire que les caractéristiques des étiages estivaux sont corrélées avec des indices climatiques calculés sur les saisons précédentes (hiver et printemps). Ceci ouvre des perspectives intéressantes en termes de prévision saisonnière.

VI.2. Difficultés et opportunités

Les relations hydro-climatiques décrites précédemment peuvent induire un certain nombre de difficultés, mais peuvent également être une source d'opportunités. Nous discutons ci-après des conséquences pratiques des résultats de cette étude.

VI.2.1 Analyse fréquentielle : les limites de l'hypothèse iid

La dépendance des régimes d'étiage à la variabilité climatique de grande échelle soulève un certain nombre d'interrogations dans le cadre de l'analyse fréquentielle, i.e. de la détermination de certaines variables réglementaires comme par exemple le débit mensuel quinquennal sec (QMNA5) ou plus simplement le module inter-annuel. En effet, les méthodes classiques d'analyse fréquentielle font l'hypothèse que les données sont indépendantes et identiquement distribuées (*iid*). Or, l'existence d'une dépendance à la variabilité climatique met à mal l'hypothèse d'équi-distribution, puisque la distribution de la variable hydrologique dépend de l'état climatique.

Cette non-équi-distribution est particulièrement problématique dans le cas d'une dépendance à un indice climatique possédant une forte inertie, comme l'AMO. En effet, la question de la représentativité sur le long terme de statistiques calculées à partir de quelques dizaines d'années d'observations se pose [voir les discussions proposées par *Jain and Lall*, 2001]. Considérons par exemple la Figure V-7 : un module ou un quantile calculé sur la période 1960-1990 correspondra à une phase globalement négative de l'AMO. Si la variable hydrologique d'intérêt est fortement dépendante de l'AMO, cette estimation risque de fortement sous- ou sur-estimer le véritable module/quantile. Une estimation plus fiable nécessiterait d'utiliser une période beaucoup plus longue, permettant d'intégrer à la fois des phases positives et négatives de l'AMO.

Des méthodes d'analyse fréquentielle intégrant le rôle de la variabilité climatique ont été proposées dans la littérature scientifique. A titre d'illustration, on peut citer les travaux menés en Australie, pays où le rôle de la variabilité climatique sur l'hydrologie est très net et bien documenté [*Franks*, 2002; *Franks and Kuczera*, 2002]. Par exemple, *Micevski et al.* [2006] ont montré que les quantiles de crue varient quasiment du simple au double entre les phases positives et négatives de l'oscillation Pacifique interdecennale (IPO). *Thyer et al.* [2000; 2003a; b] ont également illustré la difficulté de correctement estimer la distribution de pluies annuelles avec 40 ans de données, suggérant que des durées de l'ordre de 90 ans sont nécessaires pour échantillonner les différentes phases de l'IPO de manière satisfaisante. Pour faire face à ces difficultés, ces auteurs ont proposé des méthodes d'analyse fréquentielle innovantes, intégrant le lien avec la variabilité climatique, et tentant de tirer le meilleur parti des très longues séries disponibles à l'échelle régionale.

Enfin, remarquons qu'une dépendance à des modes de variabilité climatique plus dynamiques (les types de temps par exemple) est moins problématique, car elle ne réclame pas de durée d'observation excessive pour garantir un minimum de représentativité. Il est même possible de tirer partie de telles dépendances pour améliorer les estimateurs: par exemple, la méthode SCHADEX [*Paquet et al.*, 2006; *Garavaglia et al.*, 2010] d'estimation des pluies extrêmes

utilise une estimation stratifiée par type de temps. Ceci permet d'utiliser des échantillons constitués d'événements plus homogènes et d'améliorer la fiabilité des estimations, par rapport à des méthodes qui ignorent le rôle des types de temps [Garavaglia *et al.*, 2011].

VI.2.2 Prévision saisonnière

La dépendance des régimes d'étiage à des indices climatiques saisonniers ouvre des perspectives de prévision saisonnière des étiages. Deux cas de figure sont envisageables :

- La relation hydro-climatique est asynchrone, c'est à dire que les caractéristiques de l'étiage sont corrélées avec des indices climatiques calculés sur les saisons précédentes (hiver et printemps pour des étiages estivaux). Dans ce cas, il est possible d'utiliser directement la valeur *observée* de l'indice pour effectuer une prévision probabiliste de ce que sera l'étiage. Pour les caractéristiques hydrologiques étudiées dans ce rapport, c'est le cas de la sévérité des étiages, qui pourrait potentiellement être prévue (au moins dans certaines régions) en utilisant la fréquence des types de temps en hiver et au printemps (cf. section V.3).
- La relation hydro-climatique est synchrone, c'est à dire que les caractéristiques de l'étiage sont corrélées avec des indices climatiques calculés sur la saison de l'étiage. Dans ce cas de figure, il est évidemment impossible d'utiliser la valeur observée de l'indice climatique pour prévoir l'étiage : il faut à la place utiliser une valeur *prévue* de l'indice. La prévisibilité de l'étiage dépend donc directement de la prévisibilité de l'indice climatique. Dans ces travaux, ce cas de figure est observé pour le lien entre la sévérité des étiages dans le nord de la France et la NAO estivale (cf. section V.3).

Evidemment, le travail présenté dans ce rapport ne suffit pas à mettre en place un système de prévision saisonnière, ni à garantir que ce système sera fiable et discriminant. Le travail à effectuer comprend notamment les étapes suivantes:

- Il est nécessaire de dépasser l'approche de "détection" que nous avons adoptée dans ce travail (qui est néanmoins un premier pas nécessaire pour identifier les indices climatiques d'intérêt). Plus précisément, des modèles statistiques décrivant la relation climat-hydrologie devront être mis en place. Etant donné que la prévision saisonnière est probabiliste par nature, ces modèles devront être capable de décrire la distribution de la variable hydrologique d'intérêt, conditionnellement à l'état climatique.
- La recherche de covariables climatiques pertinentes pourrait être complétée. En effet, il apparaît par exemple que les étiages des rivières méditerranéennes sont peu sensibles aux fréquences des types de temps utilisés dans ce travail, contrairement à ce qui est observé sur le reste du territoire (cf. section V). Il pourrait donc être intéressant d'évaluer l'apport d'autres types de temps parmi la classification effectuée par EDF (cf. Section III.1.3), voire d'autres classifications, basées sur d'autres variables ou d'autres fenêtres spatiales [notamment les régimes climatiques proposés par Cassou *et al.*, 2004; Cassou *et al.*, 2005].
- L'étude présentée dans ce rapport ne considère qu'un indice climatique à la fois. La prévisibilité saisonnière pourrait potentiellement être accrue en utilisant simultanément plusieurs indices climatiques comme covariables, la difficulté résidant dans la prise en compte d'éventuelles interactions entre ces indices.

Les systèmes de prévision saisonnière basés sur des modèles statistiques liant directement les variables hydrologiques aux indices climatiques ont été abondamment étudiés de par le monde, par exemple au Royaume-Uni [Wedgbrow *et al.*, 2002; Wilby *et al.*, 2004], en Australie [Sharma *et al.*, 2000], en Amérique du Sud [Westra *et al.*, 2008], au Canada [Sveinsson *et al.*, 2008], au Brésil [Lima and Lall, 2010] ou aux Etats-Unis [Gong *et al.*, 2011]. Leur utilisation en France reste par contre très marginale, probablement car le lien avec la variabilité climatique de grande échelle y est moins flagrant que dans certaines régions du globe. L'analyse de Sauquet *et al.* [2008] relate ainsi la difficulté à mettre en place de tels systèmes en France, mais sur la base de techniques différentes de celles décrites dans ce rapport (en particulier, les indices climatiques et hydrologiques utilisés sont différents).

Enfin, précisons qu'une approche alternative de prévision hydrologique saisonnière consiste à utiliser une chaîne de modèles pour: (i) prévoir les forçages atmosphériques des débits (e.g. pluies, températures); (ii) utiliser un modèle hydrologique pour évaluer le débit résultant. Cette approche est actuellement développée à Météo France [Ceron *et al.*, 2010; Soubeyroux *et al.*, 2010; Singla *et al.*, 2012], et est à contraster avec l'approche purement statistique discutée précédemment, qui cherche simplement à établir un lien statistique et direct entre la variabilité climatique et les régimes hydrologiques. Les mérites comparés de chaque approche restent à déterminer, mais il se pourrait également qu'elles soient complémentaires et puissent être combinées.

VI.2.3 Projection des impacts du changement climatique

Une autre application potentielle concerne la projection des impacts hydrologiques du changement climatique. En effet, l'approche la plus couramment utilisée actuellement consiste à utiliser les forçages futurs (e.g. pluies, températures) issus d'un GCM (après descente d'échelle et correction de biais éventuelles), et de transformer ces variables en débit *via* un modèle hydrologique [pour des applications en France cf. Leblois, 2002; Ducharne *et al.*, 2011; Hendrickx and Sauquet, 2012]. Une des difficultés de cette approche est liée au fait que la reproduction par les GCM de certaines variables-clés pour l'hydrologie (les pluies notamment) reste insatisfaisante. De plus, la fiabilité des projections dépend également de la capacité du modèle hydrologique à l'extrapolation (i.e. sa capacité à rester pertinent avec des conditions de forçage inédites).

Comme pour la prévision saisonnière, une alternative pourrait être d'utiliser directement un lien statistique entre indices climatique et hydrologique. Ceci pourrait être bénéfique si le GCM reproduit l'indice climatique de manière plus fiable que les pluies. Evidemment, ceci reste à évaluer: *a priori*, les GCM sont plus aptes à reproduire les champs de pression utilisés pour la définition de nombreux climatiques. Néanmoins, cela ne signifie pas que l'on puisse s'affranchir du travail de validation en temps présent, par exemple en vérifiant que le GCM ne présente pas de biais majeur dans la reproduction de la fréquence des différents types de temps.

Considérons par exemple le module dans la Figure V-1, et sa relation avec les types de temps: cette relation pourrait être utilisée en climat futur en utilisant les fréquences de type de temps projetées par le GCM. Ce type d'approche reliant directement indices climatiques et débit n'a été que peu utilisé. Tisseuil *et al.* [2010] proposent une revue des exemples trouvés dans la littérature, et discutent des raisons pour lesquelles cette approche reste marginale. Dans le même temps, ces auteurs décrivent une application encourageante aux débits des rivières dans le Sud-Ouest de la France. L'intérêt des telles projections directement basées sur le lien climat-débit reste donc globalement à démontrer, mais mérite en tout cas d'être évalué. En

particulier, des variables très intégrées telles que le module se prêtent peut-être à ce type d'analyse. Il est néanmoins moins probable que des variables plus dynamiques (des caractéristiques fines de l'étiage ou les crues par exemple) puissent être étudiées de la sorte, sans l'aide d'un modèle hydrologique utilisant les forçages atmosphériques pertinents.

VII. REFERENCES

- Assani, A. A., R. Landry, and M. Laurencelle (2011), Comparison of interannual variability modes and trends of seasonal precipitation and streamflow in southern Quebec (Canada), *River Research and Applications*, n/a-n/a
- Boe, J., and L. Terray (2008), A weather-type approach to analyzing winter precipitation in France: Twentieth-century trends and the role of anthropogenic forcing, *J. Climate*, 21(13), 3118-3133
- Bouwer, L. M., J. E. Vermaat, and J. C. J. H. Aerts (2008), Regional sensitivities of mean and peak river discharge to climate variability in Europe, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 113(D19)
- Cassou, C. (2004), Du changement climatique aux régimes de temps: l'oscillation nord-atlantique, *La Météorologie*, 45, 21-32
- Cassou, C., L. Terray, and A. S. Phillips (2005), Tropical Atlantic influence on European heat waves, *J. Climate*, 18(15), 2805-2811
- Cassou, C., L. Terray, J. W. Hurrell, and C. Deser (2004), North Atlantic winter climate regimes: Spatial asymmetry, stationarity with time, and oceanic forcing, *J. Climate*, 17(5), 1055-1068
- Ceron, J. P., G. Tanguy, L. Franchisteguy, E. Martin, F. Regimbeau, and J. P. Vidal (2010), Hydrological seasonal forecast over France: feasibility and prospects, *Atmos Sci Lett*, 11(2), 78-82
- Ducharne, A., et al. (2011), Potential evolution of the Seine River flood regime under climate change, *Houille Blanche-Rev. Int.*(1), 51-57
- Enfield, D. B., and L. Cid-Serrano (2010), Secular and multidecadal warmings in the North Atlantic and their relationships with major hurricane activity, *Int. J. Climatol.*, 30(2), 174-184
- Enfield, D. B., A. M. Mestas-Nunez, and P. J. Trimble (2001), The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental US, *Geophys. Res. Lett.*, 28(10), 2077-2080
- Fleig, A. K., L. M. Tallaksen, H. Hisdal, K. Stahl, and D. M. Hannah (2010), Inter-comparison of weather and circulation type classifications for hydrological drought development, *Physics and Chemistry of the Earth*, 35(9-12), 507-515
- Franks, S. W. (2002), Identification of a change in climate state using regional flood data, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 6(1), 11-16
- Franks, S. W., and G. Kuczera (2002), Flood frequency analysis: Evidence and implications of secular climate variability, New South Wales, *Water Resources Research*, 38(5)
- Garavaglia, F., J. Gailhard, E. Paquet, M. Lang, R. Garcon, and P. Bernardara (2010), Introducing a rainfall compound distribution model based on weather patterns sub-sampling, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14(6), 951-964
- Garavaglia, F., M. Lang, E. Paquet, J. Gailhard, R. Garcon, and B. Renard (2011), Reliability and robustness of a rainfall compound distribution model based on weather pattern sub-sampling, *Hydrology and Earth System Sciences.*, 15(2), 519-532
- Giuntoli, I., and B. Renard (2009), Identification des impacts hydrologiques du changement climatique : vers un réseau de référence pour la surveillance des étiages, 86 pp, Cemagref, Lyon, France.

- Giuntoli, I., and B. Renard (2010), Identification des impacts hydrologiques du changement climatique : constitution d'un réseau de référence pour la surveillance des étiages., 106 pp, Cemagref, Lyon, France.
- Giuntoli, I., B. Renard, and M. Lang (2011), Floods in France, in *Changes in flood risk in Europe. In Press.*, edited by Z. W. Kundzewicz, IAHS Press.
- Goldenberg, S. B., C. W. Landsea, A. M. Mestas-Nunez, and W. M. Gray (2001), The recent increase in Atlantic hurricane activity: Causes and implications, *Science*, 293(5529), 474-479
- Gong, G., L. Wang, and U. Lall (2011), Climatic precursors of autumn streamflow in the northeast United States, *Int. J. Climatol.*, 31(12), 1773-1784
- Hendrickx, F., and E. Sauquet (2012), Impact of business-as-usual water management under climate change for the Ariège river basin (France), *Hydrological sciences Journal. In preparation.*
- Hurrell, J. W. (1995), DECADEAL TRENDS IN THE NORTH-ATLANTIC OSCILLATION - REGIONAL TEMPERATURES AND PRECIPITATION, *Science*, 269(5224), 676-679
- Hurrell, J. W., and H. VanLoon (1997), Decadal variations in climate associated with the north Atlantic oscillation, *Clim. Change*, 36(3-4), 301-326
- Huss, M., R. Hock, A. Bauder, and M. Funk (2010), 100-year mass changes in the Swiss Alps linked to the Atlantic Multidecadal Oscillation, *Geophys. Res. Lett.*, 37(10), L10501
- IPCC (2007), Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 996 pp, Cambridge.
- Jain, S., and U. Lall (2001), Floods in a changing climate: Does the past represent the future?, *Water Resources Research*, 37(12), 3193-3205
- Jónsdóttir, J. F., C. Uvo, and A. Snorrason (2004), Multivariate analysis of Icelandic river flow and its relation to variability in atmospheric circulation, paper presented at XIII Nordic Hydrological Conference, Tallinn, Estonia, 8-12 August 2004.
- Kaczmarek, Z. (2003), The Impact of Climate Variability on Flood Risk in Poland, *Risk Analysis*, 23(3), 559-566
- KENDALL, M. G. (1938), A NEW MEASURE OF RANK CORRELATION, *Biometrika*, 30(1-2), 81-93
- Kendall, M. G. (1975), *Rank correlation methods*, 202 pp., Griffin, London.
- Kiely, G. (1999), Climate change in Ireland from precipitation and streamflow observations, *Adv. Water Resour.*, 23(2), 141-151
- Kingston, D. G., D. M. Hannah, D. M. Lawler, and G. R. McGregor (2006), Interactions between large-scale climate and river flow across the northern North Atlantic margin, *Iahs-Aish P*, 308, 350-355
- Knight, J. R., C. K. Folland, and A. A. Scaife (2006), Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation, *Geophys. Res. Lett.*, 33(17)
- Kundzewicz, Z. W., D. Graczyk, T. Maurer, I. Pinskiwar, M. Radziejewski, C. Svensson, and M. Szwed (2005), Trend detection in river flow series: 1. Annual maximum flow, *Hydrol. Sci. J.-J. Sci. Hydrol.*, 50(5), 797-810
- Leblois, E. (2002), Evaluation of the possible impacts of climatic change by distributed models (Gewex-Rhone et Gicc-Rhone projects), *Houille Blanche-Revue Internationale De l'Eau*(8), 78-83
- Lima, C. H. R., and U. Lall (2010), Climate informed long term seasonal forecasts of hydroenergy inflow for the Brazilian hydropower system, *J. Hydrol.*, 381(1-2), 65-75

- Limanówka, D., Z. Nieckarz, and J. Pociask-Karteczka (2002), The North Atlantic Oscillation impact on hydrological regime in Polish Carpathians, paper presented at ERB and Northern European FRIEND Project 5 Conference, Demanovska dolina, Slovakia.
- Littmann, T. (2000), An empirical classification of weather types in the Mediterranean Basin and their interrelation with rainfall, *Theoretical and Applied Climatology*, 66(3-4), 161-171
- Lorenzo, M. N., J. J. Taboada, and L. Gimeno (2008), Links between circulation weather types and teleconnection patterns and their influence on precipitation patterns in Galicia (NW Spain), *Int. J. Climatol.*, 28(11), 1493-1505
- Mann, H. B. (1945), Nonparametric tests against trend, *Econometrica*, 13, 245-259
- Martínez, C., J. Campins, A. Jansü, and A. Genovés (2008), Heavy rain events in the Western Mediterranean: an atmospheric pattern classification, *Advances in Science and Research*, 2, 61-64
- Massei, N., B. Laignel, J. Deloffre, J. Mesquita, A. Motelay, R. Lafite, and A. Durand (2010), Long-term hydrological changes of the Seine River flow (France) and their relation to the North Atlantic Oscillation over the period 1950-2008, *Int. J. Climatol.*, 30(14), 2146-2154
- McCabe, G. J., J. L. Betancourt, S. T. Gray, M. A. Palecki, and H. G. Hidalgo (2008), Associations of multi-decadal sea-surface temperature variability with US drought, *Quatern Int*, 188, 31-40
- Micevski, T., S. W. Franks, and G. Kuczera (2006), Multidecadal variability in coastal eastern Australian flood data, *J. Hydrol.*, 327(1-2), 219-225
- Paquet, E., J. Gailhard, and R. Garçon (2006), Evolution de la méthode du gradex : approche par type de temps et modélisation hydrologique, *La houille blanche*, 5, 80-90
- Petrow, T., J. Zimmer, and B. Merz (2009), Changes in the flood hazard in Germany through changing frequency and persistence of circulation patterns, *Nat Hazard Earth Sys*, 9(4), 1409-1423
- Pociask-Karteczka, J. (2006), River Hydrology and the North Atlantic Oscillation: A General Review, *Ambio*, 35(6), 312-314
- Pociask-Karteczka, J., Z. Nieckarz, and D. Limanowka (2003), Prediction of hydrological extremes by air circulation indices, *Water Resources Systems - Water Availability and Global Change*(280), 134-141
- Pongracz, R., I. Bogardi, and L. Duckstein (2003), Climatic forcing of droughts: a Central European example, *Hydrol. Sci. J.-J. Sci. Hydrol.*, 48(1), 39-50
- Renard, B., M. Lang, and E. Sauquet (2008), Identification des impacts hydrologiques du changement climatique, Cemagref, Lyon, France.
- Rimbu, N., C. Boroneant, C. Buta, and M. Dima (2002), Decadal variability of the Danube river flow in the lower basin and its relation with the North Atlantic Oscillation, *Int. J. Climatol.*, 22(10), 1169-1179
- Rimbu, N., M. Dima, G. Lohmann, and S. Stefan (2004), Impacts of the North Atlantic Oscillation and the El Nino-Southern Oscillation on Danube river flow variability, *Geophys. Res. Lett.*, 31(23)
- Rowell, D. P. (1996), Variability of summer rainfall over tropical north Africa (1906-92): Observations and modelling - Further analysis of simulated interdecadal and interannual variability of summer rainfall over tropical north Africa - Reply, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 122(532), 1007-1013
- Rowell, D. P., C. K. Folland, K. Maskell, and M. N. Ward (1995), Variability of Summer Rainfall over Tropical North-Africa (1906-92) - Observations and Modeling, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 121(523), 669-704

- Samaniego, L., and A. Bardossy (2007), Relating macroclimatic circulation patterns with characteristics of floods and droughts at the mesoscale, *J. Hydrol.*, 335(1-2), 109-123
- Sauquet, E., J. Lerat, and C. Prudhomme (2008), La prévision hydro-météorologique à 3-6 mois. Etat des connaissances et applications, *La houille blanche*(6), 77-84
- Sharma, A., K. C. Luk, I. Cordery, and U. Lall (2000), Seasonal to interannual rainfall probabilistic forecasts for improved water supply management: Part 2 - Predictor identification of quarterly rainfall using ocean-atmosphere information, *J. Hydrol.*, 239(1-4), 240-248
- Shorthouse, C., and N. W. Arnell (1997), Spatial and temporal variability in European river flows and the North Atlantic Oscillation, paper presented at FRIEND'97, IAHS Publ. , Postojna, Slovenia.
- Singla, S., J. P. Céron, E. Martin, F. Regimbeau, M. Déqué, F. Habets, and J. P. Vidal (2012), Predictability of soil moisture and river flows over France for the spring season, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16(1), 201-216
- Soubeyroux, J.-M., et al. (2010), Caractérisation et prévision des sécheresses et étiages en France à partir de la chaîne hydrométéorologique Safran-Isba-Modcou, *La houille blanche*(5), 30-39
- Stahl, K., and S. Demuth (1999), Linking streamflow drought to the occurrence of atmospheric circulation patterns, *Hydrol. Sci. J.-J. Sci. Hydrol.*, 44(3), 467-482
- Stahl, K., S. Demuth, H. Hisdal, M. J. Santos, R. Verissimo, and R. Rodrigues (2001), The North Atlantic Oscillation (NAO) and the drought, In: Assessment of the Regional Impact of Droughts in Europe. Final Report, ARIDE, Institute of Hydrology, Freiburg.
- Stefan, S., M. Ghioca, N. Rimbu, and C. Boroneant (2004), Study of meteorological and hydrological drought in southern Romania from observational data, *Int. J. Climatol.*, 24(7), 871-881
- Sutton, R. T., and D. L. R. Hodson (2005), Atlantic Ocean forcing of North American and European summer climate, *Science*, 309(5731), 115-118
- Sveinsson, O. G. B., U. Lall, V. Fortin, L. Perrault, J. Gaudet, S. Zebiak, and Y. Kushnir (2008), Forecasting spring reservoir inflows in Churchill Falls basin in Quebec, Canada, *J. Hydrol. Eng.*, 13(6), 426-437
- Svensson, C., Z. W. Kundzewicz, and T. Maurer (2005), Trend detection in river flow series: 2. Flood and low-flow index series., *Hydrol. Sci. J.-J. Sci. Hydrol.*, 50(5), 811-824
- Svensson, C., J. Hannaford, Z. W. Kundzewicz, and T. Marsh (2006), Trends in river floods: why is there no clear signal in observations?, paper presented at Frontiers in Flood Research, IAHS Publication, Paris.
- Thyer, M., and G. Kuczera (2000), Modeling long-term persistence in hydroclimatic time series using a hidden state Markov model, *Water Resources Research*, 36(11), 3301-3310
- Thyer, M., and G. Kuczera (2003a), A hidden Markov model for modelling long-term persistence in multi-site rainfall time series 1. Model calibration using a Bayesian approach, *J. Hydrol.*, 275(1-2), 12-26
- Thyer, M., and G. Kuczera (2003b), A hidden Markov model for modelling long-term persistence in multi-site rainfall time series. 2. Real data analysis, *J. Hydrol.*, 275(1-2), 27-48
- Tisseuil, C., M. Vrac, S. Lek, and A. J. Wade (2010), Statistical downscaling of river flows, *J. Hydrol.*, 385(1-4), 279-291
- Tourre, Y. M., D. Rousseau, L. Jarlan, E. Le Roy Ladurie, and V. Daux (2011), Western European climate, and Pinot noir grape harvest dates in Burgundy, France, since the 17th century, *Clim. Res.*, 46(3), 243-253

- Trenberth, K. E., and D. J. Shea (2006), Atlantic hurricanes and natural variability in 2005, *Geophys. Res. Lett.*, 33(12)
- Trigo, R. M., D. Pozo-Vazquez, T. J. Osborn, Y. Castro-Diez, S. Gamiz-Fortis, and M. J. Esteban-Parra (2004), North Atlantic oscillation influence on precipitation, river flow and water resources in the Iberian peninsula, *Int. J. Climatol.*, 24(8), 925-944
- Vicente-Serrano, S. M., and J. M. Cuadrat (2007), North Atlantic oscillation control of droughts in north-east Spain: evaluation since 1600 A. D., *Clim. Change*, 85(3-4), 357-379
- Wedgbrow, C. S., R. L. Wilby, H. R. Fox, and G. O'Hare (2002), Prospects for seasonal forecasting of summer drought and low river flow anomalies in England and Wales, *Int. J. Climatol.*, 22(2), 219-236
- Westra, S., A. Sharma, C. Brown, and U. Lall (2008), Multivariate streamflow forecasting using independent component analysis, *Water Resources Research*, 44(2)
- Wilby, R. L., G. O'Hare, and N. Barnsley (1997), The North Atlantic Oscillation and British Isles climate variability, 1865–1996, *Weather*, 52, 266-276
- Wilby, R. L., C. S. Wedgbrow, and H. R. Fox (2004), Seasonal predictability of the summer hydrometeorology of the River Thames, UK, *J. Hydrol.*, 295(1-4), 1-16
- Wrzesinski, D. (2011), Regional differences in the influence of the North Atlantic Oscillation on seasonal river runoff in Poland, *Quaestiones Geographicae*, 30(3), 127-136

Onema
Hall C – Le Nadar
5 square Félix Nadar
94300 Vincennes
01 45 14 36 00
www.onema.fr

Irstea
1 rue Pierre-Gilles de Gennes
CS 10030
92761 Antony cedex
01 40 96 61 2
www.irstea.fr