

*Partenariat 2010 – Hydrologie des étiages - Evolution des régimes hydrologiques*

# ***Identification des impacts hydrologiques du changement climatique : constitution d'un réseau de référence pour la surveillance des étiages.***

*Rapport 2010*

*Ignazio GIUNTOLI  
Benjamin RENARD*

*Décembre 2010*

Département Eaux  
Unité de Recherche Hydrologie - Hydraulique  
Groupement de Lyon  
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

---

Ce rapport a été rédigé dans le cadre de la convention 2010 liant l'ONEMA et le Cemagref. Il présente les principales investigations menées dans le cadre de l'action 3.6 « Evolution des régimes hydrologiques ». L'objectif à long terme de cette action est de mettre en place un réseau de référence de surveillance des étiages, regroupant les stations hydrométriques adaptées à l'identification des impacts hydrologiques du changement climatique, ainsi que les outils permettant l'analyse des données issues de ce réseau.

Le rapport d'activité 2010 présente notamment les résultats d'une critique approfondie des données hydrométriques, menée à bien en collaboration avec les producteurs de données (DREAL, EDF, CNR, SPC, DDE, CA Coteaux de Gascogne). Nous souhaitons remercier l'ensemble des personnes s'étant impliquées dans cette analyse pour leur temps, leur expertise et leurs conseils.

## Les auteurs

---

*Ignazio Giuntoli*  
*Ingénieur de recherche contractuel*  
*ignazio.giuntoli@cemagref.fr*  
*Cemagref Lyon*

*Benjamin Renard*  
*Chargé de recherche*  
*benjamin.renard@cemagref.fr*  
*Cemagref Lyon*

## Les correspondants

---

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

Cemagref : *Benjamin Renard, Cemagref, benjamin.renard@cemagref.fr*  
Référence du document :

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



**Identification des impacts hydrologiques du changement climatique : constitution d'un réseau de référence pour la surveillance des étiages.**

Rapport 2010

Ignazio Giuntoli, Benjamin Renard

## Sommaire

<b>Résumé.....</b>	<b>7</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>10</b>
<b><u>1. Introduction.....</u></b>	<b><u>12</u></b>
<b><u>1.1. Contexte et enjeux.....</u></b>	<b><u>12</u></b>
<b><u>1.2. Vers un réseau de référence pour la surveillance climatique des étiages.....</u></b>	<b><u>12</u></b>
<b><u>1.3. Etat d'avancement et objectifs de l'action 2010.....</u></b>	<b><u>13</u></b>
<b><u>1.4. Plan du rapport.....</u></b>	<b><u>13</u></b>
<b><u>2. Finalisation du réseau de référence.....</u></b>	<b><u>13</u></b>
<b><u>2.1. Rappel sur la présélection de stations hydrométriques.....</u></b>	<b><u>13</u></b>
<b><u>2.2. Critique des données.....</u></b>	<b><u>14</u></b>
<b><u>2.2.1. Organisation de la critique.....</u></b>	<b><u>14</u></b>
<b><u>2.2.2. Résultats de la critique.....</u></b>	<b><u>15</u></b>
<b><u>2.3. Description des stations hydrométriques finalement retenues.....</u></b>	<b><u>19</u></b>
<b><u>2.3.1. Description des stations de mesure.....</u></b>	<b><u>19</u></b>
<b><u>2.3.2. Description des bassins versants contrôlés.....</u></b>	<b><u>23</u></b>
<b><u>2.3.3. Les stations des départements d'outre-mer.....</u></b>	<b><u>26</u></b>
<b><u>2.4. Comparaison à d'autres réseaux de mesure.....</u></b>	<b><u>28</u></b>
<b><u>2.4.1. Réseau RADOME (pluie – température).....</u></b>	<b><u>29</u></b>
<b><u>2.4.2. Séries Quotidiennes de Référence SQR (pluies).....</u></b>	<b><u>30</u></b>
<b><u>2.4.3. Réseau de référence Pérenne.....</u></b>	<b><u>31</u></b>
<b><u>3. Evolution des régimes d'étiage.....</u></b>	<b><u>32</u></b>
<b><u>3.1. Méthodologie : indices d'étiage.....</u></b>	<b><u>32</u></b>
<b><u>3.2. Méthodologie : tests statistiques.....</u></b>	<b><u>33</u></b>
<b><u>3.2.1. Echelle locale : test de Mann-Kendall.....</u></b>	<b><u>33</u></b>
<b><u>3.2.2. Echelle régionale.....</u></b>	<b><u>35</u></b>
<b><u>3.2.3. Pourquoi toute cette armada statistique ?.....</u></b>	<b><u>38</u></b>
<b><u>3.3. Méthodologie : regroupements régionaux.....</u></b>	<b><u>43</u></b>
<b><u>3.3.1. Rappel sur les régions « hydro-géo-climatiques ».....</u></b>	<b><u>43</u></b>
<b><u>3.3.2. Modifications effectuées.....</u></b>	<b><u>43</u></b>
<b><u>3.4. Résultats .....</u></b>	<b><u>47</u></b>

3.4.1. Périodes d'analyse et présentation des résultats.....	47
3.4.2. Débit moyen annuel.....	52
3.4.3. Débit journalier minimum annuel.....	54
3.4.4. Durée de l'étiage.....	56
3.4.5. Déficit de volume.....	58
3.4.6. Début de l'étiage.....	60
3.4.7. Centre de l'étiage.....	62
3.4.8. Date du minimum annuel.....	64
3.4.9. Fin de l'étiage.....	66
3.4.10. Temps de récession.....	68
3.4.11. Base Flow Index.....	70
<b>4. Conclusions et perspectives.....</b>	<b>73</b>
<b>4.1. Réseau de référence pour la surveillance climatique des étiages.....</b>	<b>73</b>
<b>4.2. Tendances dans les régimes d'étiage en France.....</b>	<b>73</b>
<i>Références.....</i>	<i>75</i>
<i>Annexe 1 : Liste des stations du réseau.....</i>	<i>78</i>
<i>Annexe 2 : Stations modifiées.....</i>	<i>83</i>
<i>Annexe 3 : Résultats de l'analyse locale pour les stations des DOM.....</i>	<i>84</i>
<i>Annexe 4 : Résultats Analyse régionale fine.....</i>	<i>85</i>
<i>Annexe 5 : Résultats Analyse régionale large.....</i>	<i>88</i>
<i>Annexe 6 : Cartes des résultats par sous-saison (régimes de transition).....</i>	<i>89</i>

**Identification des impacts hydrologiques du changement climatique : constitution d'un réseau de référence pour la surveillance des étiages.**

*Ignazio Giuntoli, Benjamin Renard*

## Résumé

### RÉSUMÉ

L'action 2010 de la convention Onema-Cemagref a porté sur la finalisation de la validation des données hydrométriques du Réseau de Référence pour la Surveillance climatique des Etiages (RRSE) initié en 2008 et sur l'analyse des indices définis en 2009 décrivant la sévérité et la saisonnalité de l'étiage.

La première partie du rapport décrit la finalisation de la critique des données qui a conduit à un réseau définitif de 236 stations hydrométriques réparties sur la France Métropolitaine. Dans un premier temps, les causes ayant conduit à exclure un certain nombre de stations sont décrites. Puis, nous décrivons les caractéristiques des stations finalement retenues et des bassins versants qu'elles contrôlent. Enfin, nous comparons le réseau ainsi créé avec d'autres réseaux de référence utilisés à l'échelle nationale pour caractériser diverses variables environnementales (e.g. paramètres climatiques ou biologiques). De plus, les stations métropolitaines ont été complétées par des stations hydrométriques des départements d'Outre-Mer (DOM). Le rapport présente la critique de ces stations, qui ont été sélectionnées dans un deuxième temps et qui ont nécessité une étude distincte étant donné la différence de climat et de régime hydrologique. Au final, 14 stations hydrométriques (4 en Guadeloupe, 2 en Martinique, 1 à la Réunion et 7 en Guyane) complètent ainsi les 236 du réseau Métropolitain.

La seconde partie du rapport décrit l'analyse des stations du réseau afin d'évaluer la stationnarité des régimes d'étiage. Nous présentons tout d'abord les tests statistiques qui visent à évaluer l'existence de tendances sur divers indices d'étiage. L'analyse est faite à deux niveaux : à l'échelle locale (chaque station est étudiée indépendamment) et à l'échelle régionale (des groupes de stations contrôlant des bassins versants similaires sont étudiés conjointement). Les principaux résultats peuvent être résumés de la manière suivante :

(i) **Sévérité** : on observe une tendance à l'aggravation de la sévérité des étiages dans plusieurs régions de la moitié sud de la France. A l'inverse, quelques tendances vers des étiages moins sévères apparaissent en Bretagne et sur les Pays de la Loire. A l'exception de ces deux régions, on n'observe pas d'évolution significative de la sévérité des étiages dans la partie nord du pays, ni dans les rivières navales.

(ii) **Saisonnalité** : on observe globalement de nombreux changements significatifs décrivant un décalage de la période d'étiage vers plus de précocité. Ce décalage est particulièrement marqué pour le début de la période d'étiage, est moins marqué pour le centre de l'étiage, et devient peu significatif pour la fin de l'étiage.

### MOTS CLÉS

Etiages ; indices descriptifs ; sévérité ; saisonnalité ; tests statistiques ; validation de données.







***Identifying hydrological impacts of climate change : a reference network for monitoring low flows.***  
*Ignazio Giuntoli, Benjamin Renard*

## Abstract

### ABSTRACT

The 2010 action of the Onema-Cemagref agreement aimed to complete the validation of river discharge data from the Reference Network for Low Flow Climatic Monitoring (Réseau de Référence pour la Surveillance climatique des Etiages - RRSE) implemented in 2008 and to analyze the indices defined in 2009 which describe drought timing and severity.

The first part of the present report describes how the data review was accomplished and how we ended up with the definitive network of 236 gauging stations across France. Secondly we describe the causes that brought about the exclusion of a number of gauging stations. Moreover we describe the characteristics of the stations that were finally selected and their respective catchments. A comparison is then made between our drought database and other French reference databases used nationwide to monitor environmental variables (e.g. climate and biological parameters). Finally, in addition to the stations from Mainland France a number of gauging stations from French overseas departments were selected. The data screening for such stations was carried out at a later stage of the project and, due to the differences of climate and hydrology, required a distinct analysis. As a result, 14 gauging stations (4 in Guadeloupe, 2 in Martinique, 1 in Réunion Island and 7 in French Guyana) were added to the 236 from Mainland France.

The second part of the report describes the analysis carried out on the database stations in order to evaluate the stationarity of drought regimes, through the use of statistical trend tests. The analysis is carried out at two levels: at a local scale (At-site analysis) and at the regional scale (considering at once sets of stations grouped into homogeneous regions). The main results are listed here:

(i) **Drought severity:** an increasing severity is observed over several regions of southern France. Conversely signs of decreasing severity appear in some of the northwestern regions (Brittany and Pays de la Loire). Except for these regions there is no evidence of an increase in drought severity in northern France, nor in regions with snowmelt regimes.

(ii) **Drought timing:** a number of significant changes suggest a time shift towards droughts that occur earlier in the year. Such time shift is particularly consistent for the drought start, less consistent for the drought center, and is barely noticeable for the drought end.

### KEYWORDS

Hydrological droughts ; drought indices ; severity ; seasonality ; statistical tests; data validation.



## 1. Introduction

### 1.1. Contexte et enjeux

Le réchauffement du système climatique est aujourd'hui considéré comme une réalité dans la communauté scientifique (IPCC 2007). Néanmoins, son impact sur les régimes hydrologiques, et notamment dans le domaine extrême (crues et étiages), reste très délicat à observer. Les auteurs ayant effectué une brève revue des études de stationnarité des variables hydrologiques (Pilon and Yue 2002; Kundzewicz, Graczyk et al. 2005; Renard 2006) notent l'absence de réponse globale et cohérente des régimes des rivières au changement climatique. A titre d'illustration, une étude récente portant sur les hautes eaux de 195 rivières réparties sur l'ensemble du globe (Kundzewicz, Graczyk et al. 2005) montre que la plupart d'entre elles (137) peuvent être considérées comme stationnaires (au risque 10%). Parmi celles semblant présenter une tendance, le nombre de changements à la hausse est proche du nombre de changements à la baisse. 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 première difficulté vient de la forte variabilité interannuelle naturelle du régime des rivières, qui peut masquer une évolution du second ordre sur les valeurs extrêmes. De plus, la variabilité spatiale de la climatologie et des propriétés physiographiques des bassins versants, associée à la forte non-linéarité de la transformation pluie-débit, induisent une réponse très variable quant aux changements à attendre sur le régime des rivières. Notons également que le régime des rivières peut être influencé par de nombreux facteurs non-climatiques, comme l'occupation du sol, les 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. Enfin, rappelons que les chroniques de débit servant de base à l'analyse sont des mesures indirectes : il s'agit en fait de chroniques de hauteurs d'eau, transformées en débit *via* une courbe de tarage. Néanmoins, la rivière n'étant pas un environnement statique, il existe une réelle difficulté intrinsèque à assurer la validité des courbes de tarage sur de longues périodes. En particulier, la gestion de la partie extrapolée des courbes de tarage reste un problème très délicat, et un changement d'extrapolation peut causer des ruptures apparentes sur les valeurs extrêmes des séries de débit.

### 1.2. Vers un réseau de référence pour la surveillance climatique des étiages

Il est important de bien avoir conscience du fait que l'absence de résultats nets sur les variables hydrologiques ne remet aucunement en cause la réalité du changement climatique, mais illustre simplement le fait que ses impacts ne sont aujourd'hui pas discernables dans les séries hydrométriques, sur la base des données et des méthodes qui ont été utilisées. Ce constat, que l'on se doit de dresser par honnêteté scientifique, pose évidemment un véritable problème en terme de gestion des risques associés aux extrêmes hydrologiques. Devant l'importance des enjeux (gestion des ressources en eau, de l'irrigation, des zones inondables, des aménagements hydrauliques, etc.), il convient de poursuivre une surveillance active de l'évolution des débits des cours d'eau, en particulier dans le domaine des basses eaux.

Plusieurs pistes sont envisageables pour détecter plus efficacement un éventuel impact du changement climatique sur les régimes hydrologiques. La première consiste à améliorer la puissance des méthodes de détection. Cette approche a été abondamment étudiée (Renard, Garreta et al. 2006; Renard, Lang et al. 2006; Renard, Lang et al. 2008) et les résultats ont par exemple

démonstré qu'étudier la stationnarité des séries à une échelle régionale permettait une détection bien plus efficace que l'application de tests à l'échelle locale. La seconde piste consiste à utiliser des données mieux adaptées au contexte de la détection de changements. En particulier, la quantité de données utilisables augmente mécaniquement d'année en année, du fait de l'ancienneté accrue des chroniques de mesures. En conséquence, il est possible que certains changements qui ne sont pas détectables aujourd'hui s'affirment dans un avenir plus ou moins proche (Wilby 2006). Il existe donc un réel intérêt à remettre à jour régulièrement l'analyse de la stationnarité des séries hydrométriques en France, afin de passer d'une logique de détection à un instant donné à une logique de surveillance continue.

Dans ce contexte, la mise en place d'un Réseau de Référence pour la Surveillance climatique des Etiages (noté RRSE tout au long de ce rapport) est une condition *sine qua non* à une remise à jour régulière et efficace des résultats. En particulier, un tel réseau permettrait sinon de s'affranchir, du moins de faciliter l'étape indispensable de critique des données, en fournissant un ensemble de stations hydrométriques pour lesquelles les mesures répondent à des critères de qualité, et les informations relatives à l'historique des stations existent et sont aisément accessibles.

### **1.3. Etat d'avancement et objectifs de l'action 2010**

Les actions des années précédentes (Renard, Lang et al. 2008; Giuntoli and Renard 2009) ont permis de dresser une présélection des stations hydrométriques à inclure dans le réseau, et à réaliser une analyse préliminaire de la stationnarité des séries issues de ces stations. Les deux objectifs principaux de l'action 2010 sont donc les suivants :

- **Finalisation de la critique des données.** Une fois ce travail achevé, nous serons en mesure de proposer la liste de stations constituant le réseau. Ceci permettra de décrire les caractéristiques des stations finalement retenues, et d'évaluer si les stations du réseau recouvrent l'ensemble des régimes et systèmes hydrologiques existant en France. Nous comparerons également le réseau ainsi créé avec d'autres réseaux de référence utilisés à l'échelle nationale pour caractériser diverses variables environnementales (e.g. paramètres climatiques ou biologiques).
- **Analyse statistique des stations du réseau.** Il s'agira d'évaluer l'existence d'éventuelles évolutions dans le régime des étiages. Cette analyse sera effectuée aux échelles locale et régionale.

### **1.4. Plan du rapport**

Ce rapport présente les principaux résultats de l'action 2010. Il est organisé en deux grandes parties. La première partie (section 2) décrit la finalisation de la critique des données et la composition du réseau final comprenant 236 stations hydrométriques en France Métropolitaine ainsi que 14 stations complémentaires dans les DOM. La seconde partie du rapport (section 3) décrit l'analyse des stations du réseau afin d'évaluer la stationnarité des régimes d'étiage. Cette analyse est faite à deux niveaux : à l'échelle locale (chaque station est étudiée indépendamment) et à l'échelle régionale (des groupes de stations contrôlant des bassins versants similaires sont étudiés conjointement).

## **2. Finalisation du réseau de référence**

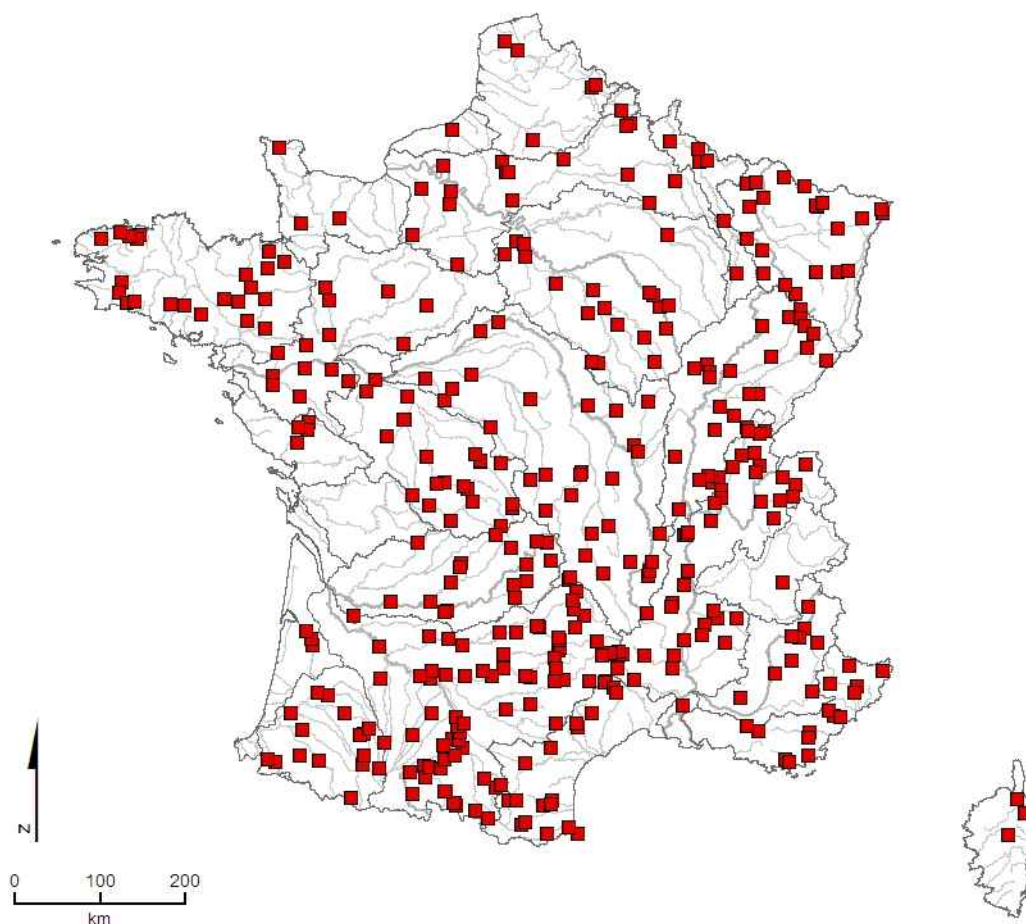
### **2.1. Rappel sur la présélection de stations hydrométriques**

Une présélection de stations hydrométriques adaptées au contexte de surveillance climatique a été effectuée au cours des années précédentes (cf. rapports 2008-2009). La Figure 2-1 montre la

présélection des 393 stations identifiées au début du projet. Cette présélection représente une borne haute des données qui peuvent être exploitées tout en respectant les trois critères suivant (à l'exception des stations d'outre-mer qui n'avaient pas été présélectionnées) :

- Critère 1 : ancienneté. Toutes les stations ont été en service durant au moins 40 ans.
- Critère 2 : caractère non influencé. Toutes les stations sont réputés « peu ou faiblement » influencées (suivant la terminologie de la base HYDRO).
- Critère 3 : qualité. La qualité des mesures est réputée « bonne » en basses eaux.

Cette présélection a été affinée au cours de l'action 2010 afin de tenir compte d'un travail de critique approfondi qui a été réalisé en collaboration avec les producteurs de données.



**Figure 2-1 – Répartition spatiale des 393 stations présélectionnées.**

## **2.2. Critique des données**

### **2.2.1. Organisation de la critique**

La critique des données a constitué une partie importante de l'action 2010. Comme décrit dans le rapport 2009, une critique préliminaire des séries présélectionnées avait permis d'exclure un certain nombre de stations avec une qualité manifestement inadéquate. A l'issue de cette critique le réseau comportait 347 stations (sur les 393 de départ).

Un site web (<https://r2se.cemagref.fr/>) a ensuite été créé afin de diffuser les résultats de l'étude de stationnarité auprès des producteurs de données et de leur poser des questions spécifiques sur les éventuelles anomalies rencontrées dans les chroniques. Dans la section «Résultats» du site chaque producteur a pu avoir accès aux éléments suivants : (i) résultats concernant ses stations hydrométriques (sous forme de fiches stations et de tracé de la chronique) ; (ii) un fichier Excel contenant les remarques faites lors de la critique préliminaire et les questions spécifiques auxquelles il était invité à répondre.

La promotion du site a été effectuée via un email aux responsables des services hydrométriques de chaque producteur de données. Dans un second temps, des contacts téléphoniques ont été menés avec chaque producteur afin de discuter directement des questions soulevées sur les stations. Enfin, il était proposé de se déplacer vers le gestionnaire pour vérifier avec lui les informations sur les stations, surtout quand le nombre de stations était important et demandait donc beaucoup de suivi et de travail. Cette évaluation a été effectuée en consultant les archives papier des stations ou d'autres sources comme des bases de données internes ou la Base Barème (pour la gestion des courbes de tarage). Le responsable du service hydrométrique et/ou les techniciens qui s'occupent de l'installation et de l'entretien des stations de mesure nous ont accompagnés dans cette évaluation.

Bien qu'indispensable, ce travail de critique reste difficile et parfois fastidieux à mener à bien. Parmi les difficultés rencontrées, on peut citer :

- Difficulté de vérifier certaines anomalies dans les parties les plus anciennes des chroniques, pour différentes raisons :
  - Les gestionnaires actuels connaissent moins bien l'historique ancien de la station.
  - Il est parfois difficile de juger de l'exhaustivité des archives : lorsque les archives contiennent peu d'information, est-ce parce que rien de notable ne s'est passé ou parce que certains événements n'ont pas été recensés ?
- Le passage des stations d'un producteur à l'autre peut créer des discontinuités dans le suivi d'une station, et induit une perte de mémoire sur la station.
- L'action était souvent méconnue des producteurs

### **2.2.2. Résultats de la critique**

Comme décrit dans le Rapport 2009 et en section 2.2.1, une première critique préliminaire avait permis de réduire le nombre de stations de 393 à 347. Sur ce sous-groupe, l'échange avec les gestionnaires a conduit à exclure 119 stations. Au final, le réseau de référence compte donc 236 stations. Ce nombre est constitué de 228 stations choisies parmi les 393 de la présélection initiale (soit 58%), plus 8 stations qui ont été rajoutées sous suggestion des gestionnaires.

Les causes d'exclusion de ces 119 stations (résumées dans la Figure 2-2) sont variées. On peut notamment citer :

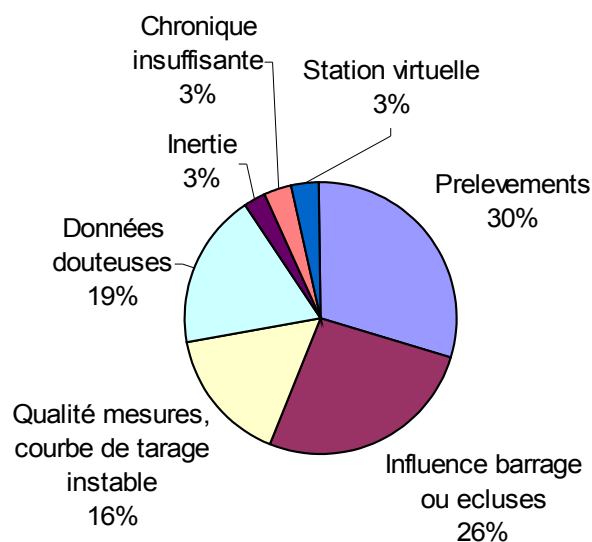
- Chronique insuffisante : Les séries sélectionnées avaient théoriquement 40 ans (ou plus) de données, mais en prenant en compte les lacunes dans la série, le nombre d'années effectivement disponibles tombait parfois à moins de 35 ans, ce qui a mené à exclure la station.
- Inertie : Le type d'analyse mis au point pour analyser les stations du réseau n'est pas adapté à l'étude de séries avec forte inertie qui présentent une variabilité très lente, avec une cyclicité

apparente sur plusieurs années, voire dizaine d'années. Pour cette raison plusieurs stations du nord de la France ont été exclues (Nord Pas de Calais, Haute Normandie).

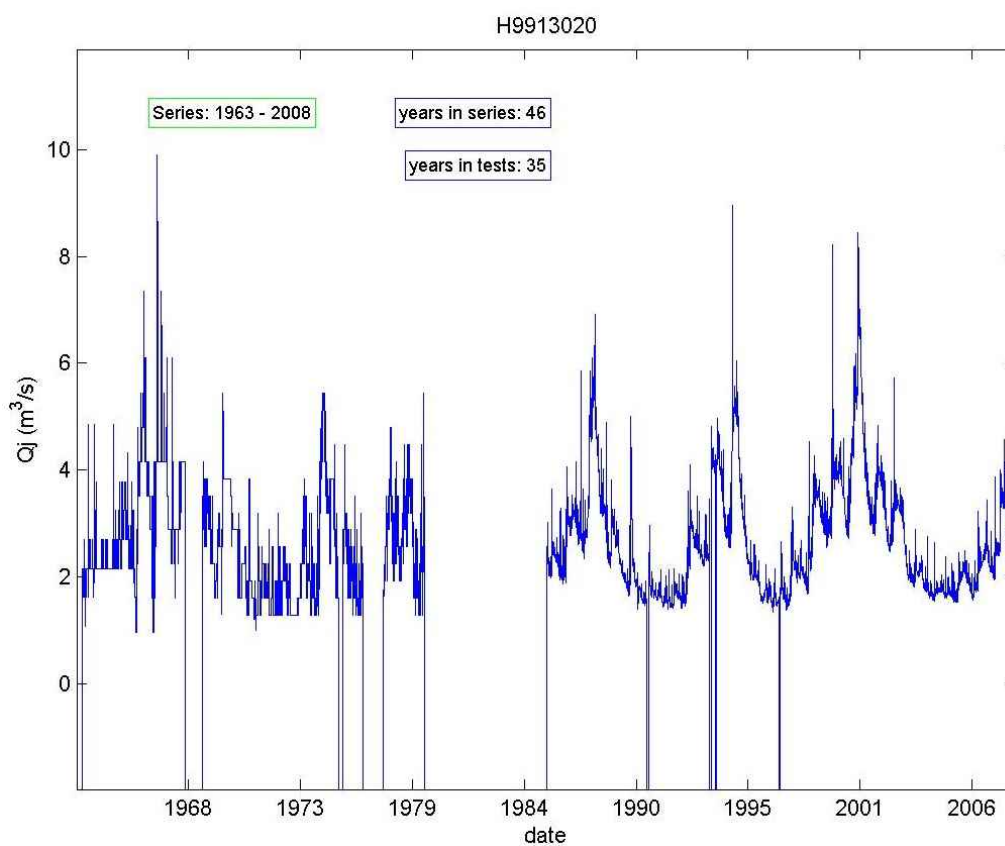
- Données douteuses : La visualisation du tracé de la chronique entière a souvent révélé des aberrations, dénotant probablement des erreurs soit métrologiques, soit de saisie ou de traitement des mesures (voir un exemple en Figure 2-3).
- Qualité de la mesure jugée mauvaise ou instable par les producteurs. Ce jugement peut se baser sur plusieurs facteurs :
  - Difficulté du jaugeage : certaines stations se trouvent dans des endroits d'accès difficile, ce qui ne permet pas un jaugeage régulier. La fréquence des jaugeages (ainsi que la stabilité des courbes de tarage, cf. point suivant) a pu être évaluée en utilisant la base de données Barème (pour les jaugeages à partir des années 80) ou les archives en format papier (pour les jaugeages plus anciens).
  - Courbe de tarage instable : grâce aux gestionnaires des informations importantes (et souvent non consultables en Banque Hydro), comme la qualité de la section de mesure et la continuité du suivi de la station, ont pu être prises en compte. De même, la stabilité de la section de mesure a pu être discutée avec les producteurs (e.g. transport de sédiments ou modification de la section lors de crues).
  - Une autre configuration délicate pour la mesure des basses eaux est celle où la section de mesure est très large, conduisant à une sensibilité de mesure en basses eaux très réduite.
  - Certaines stations présentent également une très bonne qualité mais seulement sur une partie de la chronique (en général la plus récente). Ceci est problématique dans l'optique d'une analyse de stationnarité portant sur une longue période d'observation.
  - Des déplacements de la station et/ou des changements d'instrumentation peuvent également être suspectés d'avoir créé des discontinuités dans la série analysée.
  - Dans la banque Hydro, la plupart des champs contiennent toujours une valeur par défaut lorsque le champ n'a pas été manuellement renseigné (il n'existe pas de valeur « non renseignée »). Ceci peut créer des confusions dans l'interprétation de ces champs.
- Influence barrages : les stations influencées par des barrages de petite ou grande taille situés en amont ont été exclues. Les barrages pouvaient avoir différentes fonctions : production d'énergie électrique, soutien d'étiage, stockage pour l'irrigation. Dans les cas où les apports n'étaient pas significatifs par rapport au débit d'étiage du cours d'eau ou dans le cas de débit naturel reconstitué (e.g. stations EDF), les stations ont été conservées.
- Prélèvements : de nombreux cours d'eau sont affectés par des prélèvements plus ou moins importants qui peuvent affecter le régime du cours d'eau en période de basses eaux. Les gestionnaires ont été questionnés sur la présence de prélèvements et sur leur finalité. Un cas emblématique est celui des stations de la DREAL Midi Pyrénées, souvent situées sur des plaines agricoles, où les cours d'eau sont soumis à de fréquents prélèvements. Dans cette région, une grosse partie des stations en plaine a été exclue pour cette raison. Les prélèvements ne sont pas toujours d'origine agricole mais peuvent être liés aussi à la production d'eau potable ou à la dérivation vers des canaux (en Bourgogne par exemple) pour assurer les voies navigables.



- Stations virtuelles : il s'agit de stations qui ne sont pas toujours signalées comme virtuelles en Banque Hydro, mais qui ont un débit qui est calculé (et non mesuré) en utilisant d'autres stations voisines. Grâce aux questionnaires nous avons pu identifier celles présentes dans le jeu de stations.



**Figure 2-2 – Raisons principales d'exclusion des stations.**



**Figure 2-3. Chronique de débits journaliers pour la station H9913020 (Le Cailly à Notre Dame de Bondeville) présentant des artefacts évidents et finalement exclue.**

La Figure 2-4 montre la localisation des stations du réseau final ainsi que des stations exclues.

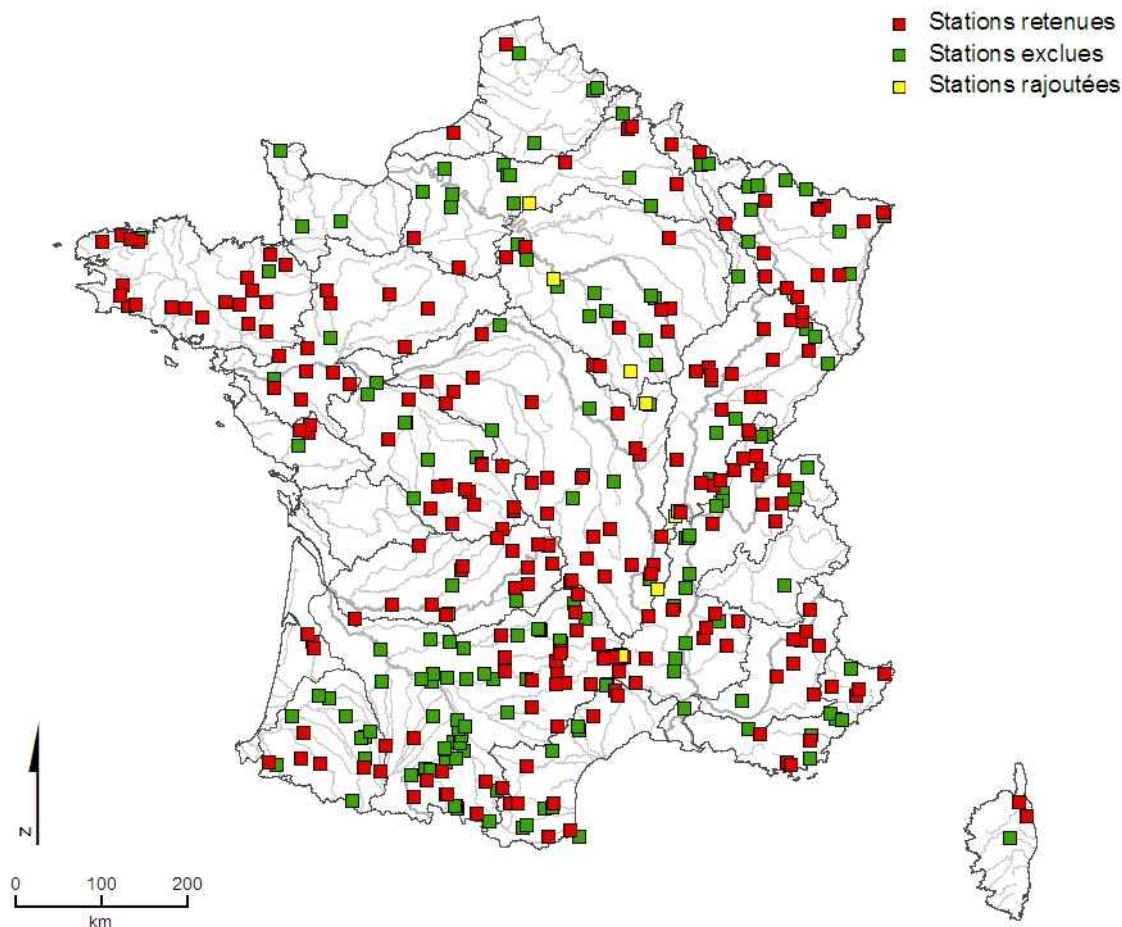


Figure 2-4 – Stations retenues (rouge) et stations exclues (vert).

### **2.3. Description des stations hydrométriques finalement retenues**

Cette section décrit les principales caractéristiques des 236 stations hydrométriques finalement retenues dans le réseau, ainsi que des bassins versants qu'elles contrôlent. La liste des 236 stations figure en 4.2. Précisons que quelques stations ont été conservées dans le réseau mais leurs données ont été modifiées par rapport aux données brutes contenues en banque Hydro (par exemple, seule une partie de la chronique a été conservée). La liste détaillée de ces modifications est donnée en 4.2. Enfin, une section spéciale (2.3.3) est consacrée à la description des stations des départements d'outre-mer, qui ont été ajoutées au cours de l'action 2010.

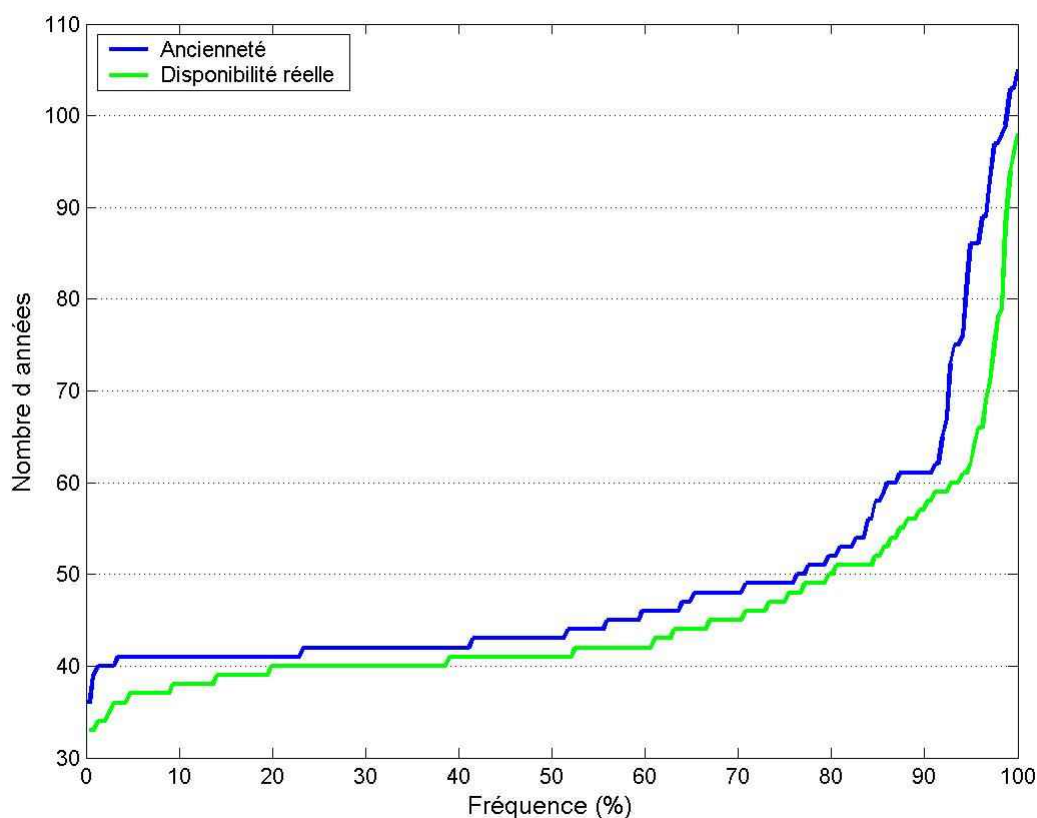
#### **2.3.1. Description des stations de mesure**

La courbe bleue en Figure 2-5 montre la distribution de l'ancienneté des 236 stations. Les chroniques s'étendent entre un peu moins de 40 ans jusqu'à plus de 100 ans. Plus précisément, la majorité des chroniques est inférieure à 50 ans (environ 80% des stations), alors qu'environ 15 % des stations possèdent plus de 60 ans de données.

Il faut noter que les durées effectivement disponibles pour l'analyse coïncident rarement avec la disponibilité théorique à cause de la présence de lacunes dans les séries. Ces lacunes sont parfois courtes (quelques jours) mais dispersées sur toute la chronique, ou elles peuvent au contraire affecter plusieurs années consécutives. Les causes de ces lacunes sont diverses : difficultés

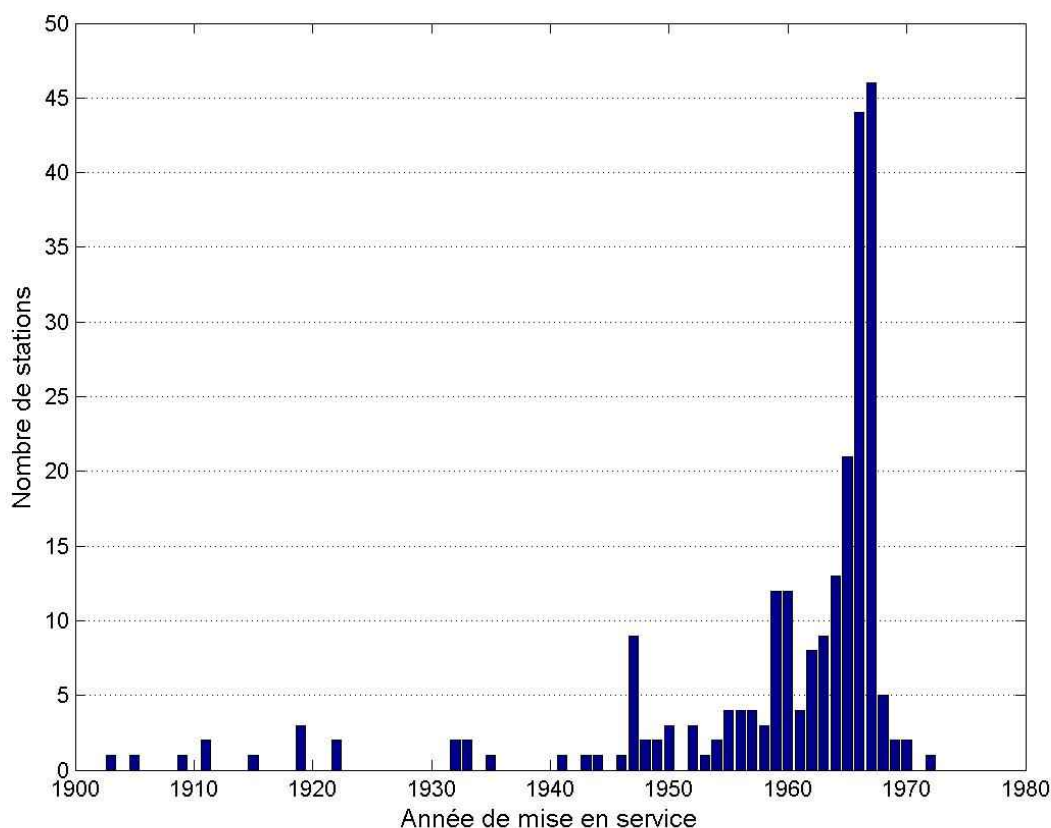
d'entretien des stations, changement de technologie, occurrence d'un phénomène naturel qui endommage la station, etc.

La courbe verte de la Figure 2-5 montre la disponibilité réelle des données, en ne conservant que les années où le pourcentage de lacunes est inférieur à 10%. On observe alors qu'environ 20% des stations possèdent moins de 40 années effectives de données. Ces stations ont néanmoins été conservées, puisqu'elles atteindront ce seuil d'ici quelques années. La majorité (~60%) des séries possède entre 40 et 50 années effectives de données. Environ 10% des séries ont plus de 60 années effectives.

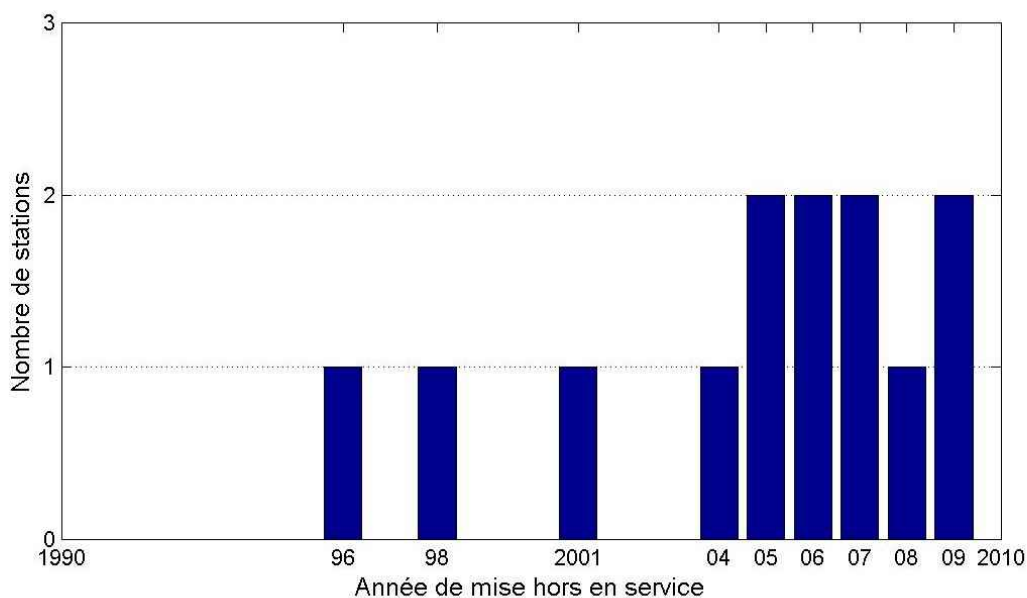


**Figure 2-5 – Distribution des anciennetés des chroniques (en bleu) et des durées des données effectivement disponibles (en vert) pour les 236 stations du réseau.**

La mise en service des stations varie entre 1903 et 1972 (Figure 2-6). 70% des stations ont été mises en service au cours des années 60, cette période correspondant à l'expansion majeure du réseau hydrométrique français. Le critère d'ancienneté de 40 ans est ainsi bien adapté aux stations disponibles. Avec le temps, non seulement les séries seront plus longues mais d'autres séries actuellement pas assez anciennes pourront être ajoutées au réseau. Notons que la plupart des stations sont toujours en service, à l'exception de 13 stations, dont les années de mise hors service sont représentées dans la Figure 2-7.

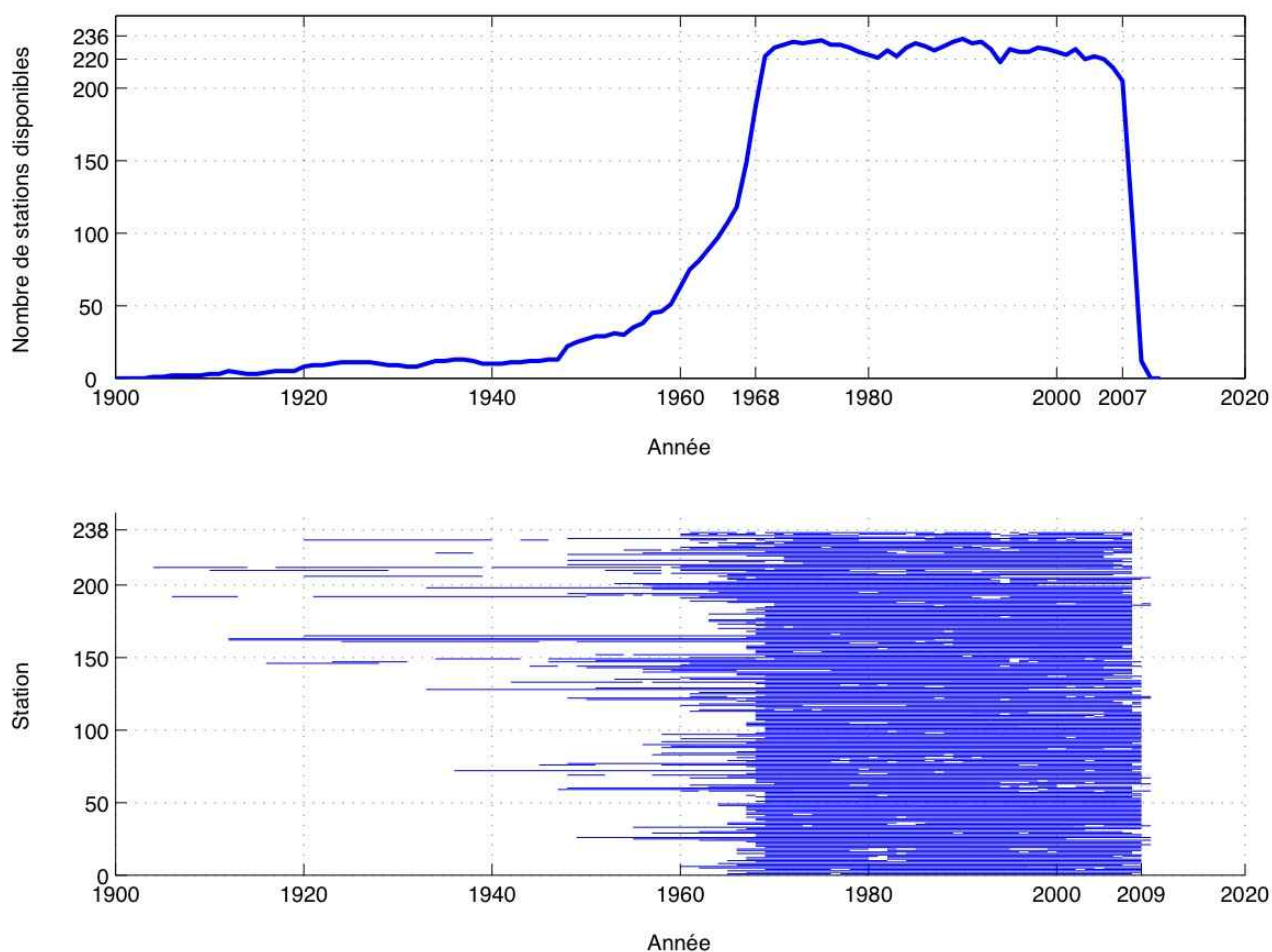


**Figure 2-6 – Histogramme des années de mise en service pour les 236 stations du réseau.**



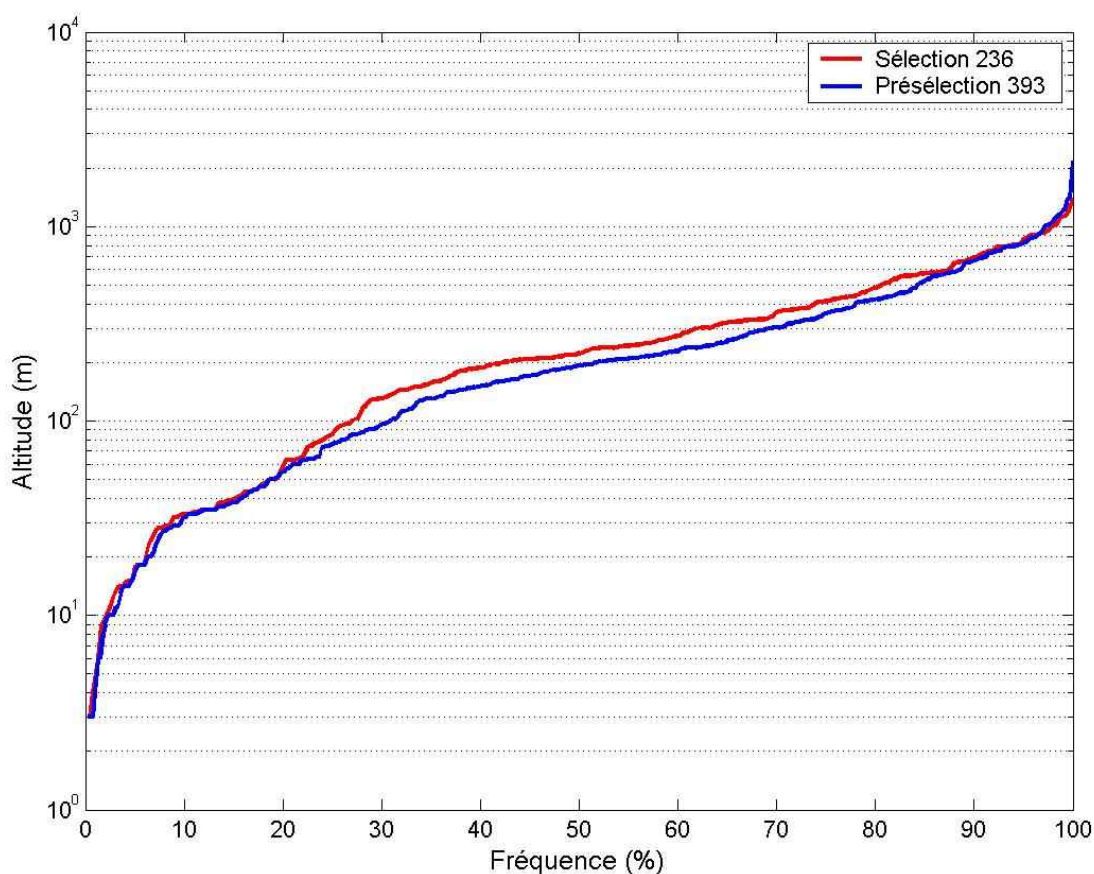
**Figure 2-7 – Histogramme des années de mise hors service pour les 13 stations qui ne sont plus actives.**

Finalement, la Figure 2-8 offre une vue globale de la disponibilité des données issues du réseau. On remarque aisément que la période post-1968 offre une couverture optimale.



**Figure 2-8 – Disponibilité des données pour chaque station (en bas) et nombre de stations disponibles (en haut).**

La courbe rouge en Figure 2-9 montre la distribution des altitudes des 236 stations. La majorité (~60%) des stations se situe entre 100 et 500 mètres d'altitude. Il est intéressant de noter que la courbe correspondant au réseau final (236 stations) est légèrement plus haute que celle correspondant à la présélection initiale (393 stations, courbe bleue). Ceci s'explique par le fait que l'étape de critique a conduit à exclure plus souvent des stations en plaine, notamment en raison d'influences qui sont plus rares lorsqu'on monte en altitude (prélèvement agricoles, dérivations).

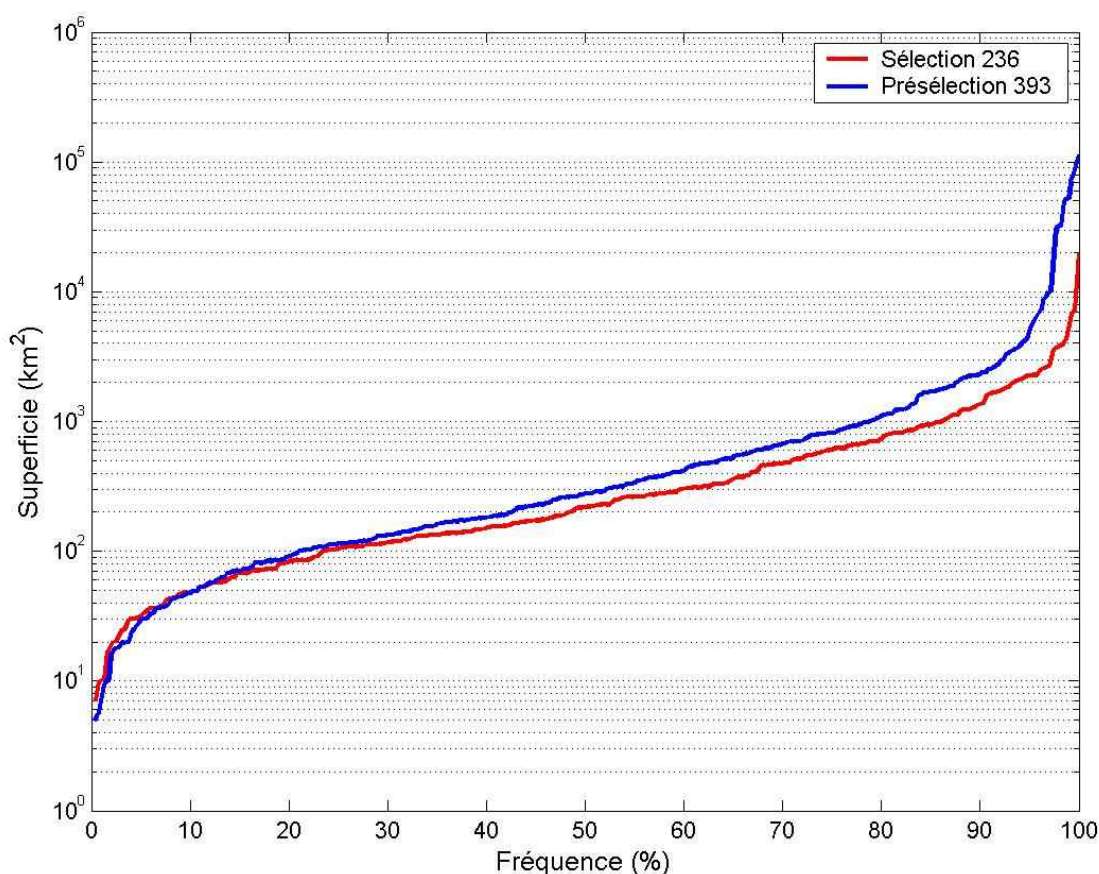


**Figure 2-9 – Distribution des altitudes des 236 stations retenues en rouge et des 393 stations présélectionnées en bleu.**

Enfin, signalons que la plupart des séries (94%) correspondent à des débits observés (réputés peu influencés). Mais on trouve également quelques séries correspondant à des débits recalculés (« apports naturels reconstitués »), qui représentent le débit que l'on observerait en l'absence d'aménagement. C'est le cas notamment des stations gérées par EDF.

### **2.3.2. Description des bassins versants contrôlés**

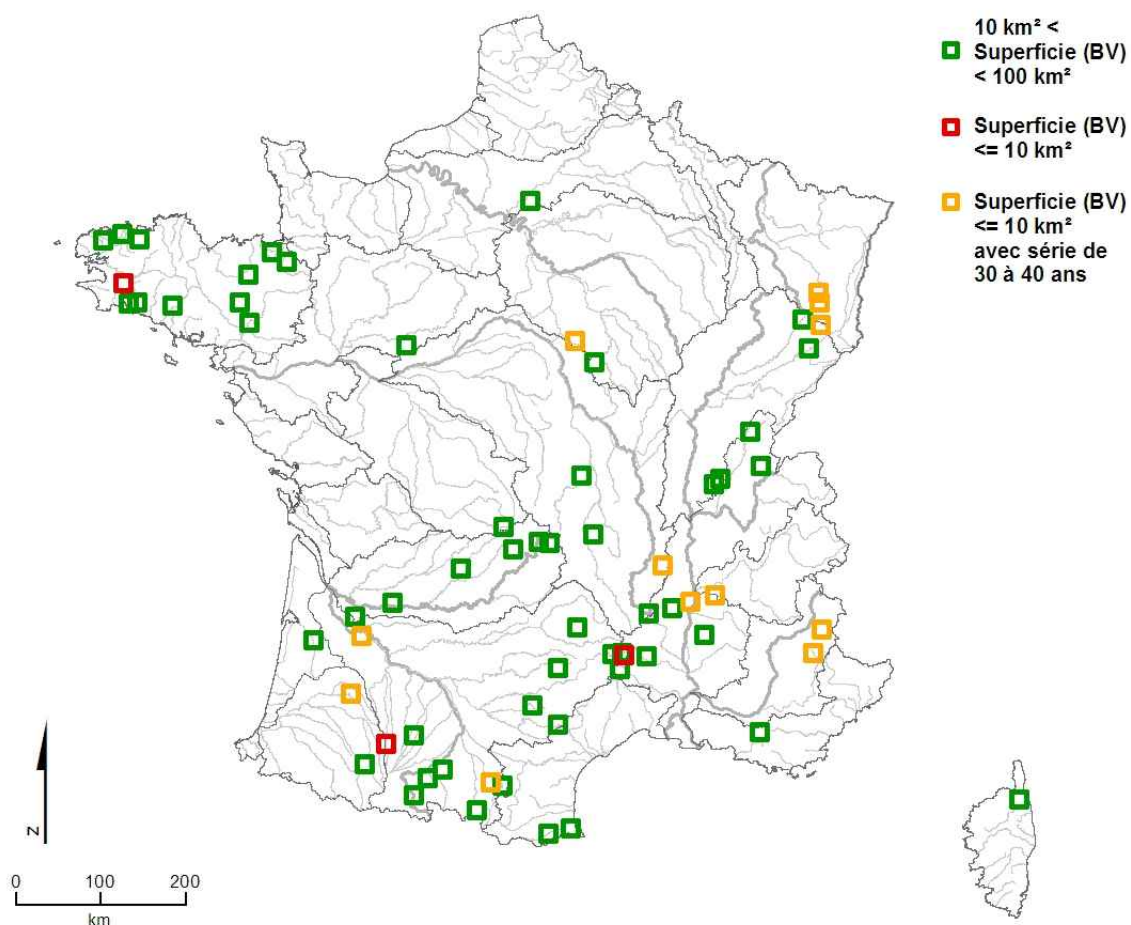
Les stations hydrométriques du réseau contrôlent des bassins versants de taille variée, comme le montre la Figure 2-10. Les bassins versants de taille modérée (moins de 1000 km<sup>2</sup>) représentent 86% des stations. Les bassins versants de petite taille (moins de 100 km<sup>2</sup>) représentent 23% des stations. Comme attendu, par rapport à la présélection initiale de 393 stations, la courbe finale (en rouge) est plus basse et représente donc un choix final de bassins versants de moindre taille. L'étape de critique a donc conduit à exclure plus souvent des grands bassins versants, plus fréquemment soumis à des influences.



**Figure 2-10. Distribution des superficies des bassins versants des 236 stations retenues (en rouge) et des 393 stations présélectionnées (en bleu).**

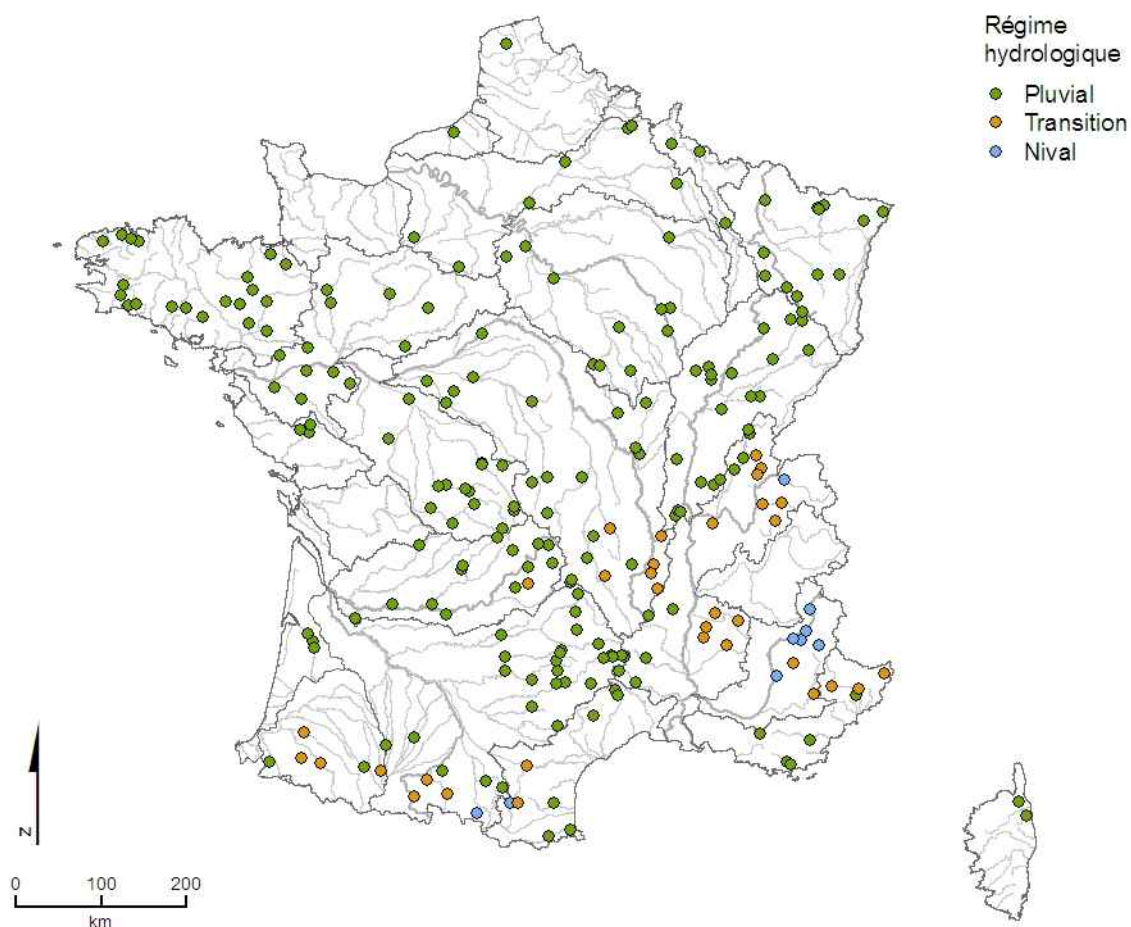
La Figure 2-11 illustre la couverture du petit chevelu hydrographique. Seules 3 stations (1%) contrôlent un bassin versant inférieur à 10 km<sup>2</sup>, alors que 53 stations (22%) contrôlent un bassin versant entre 10 et 100 km<sup>2</sup>. La couverture du très petit chevelu hydrographique est donc extrêmement limitée, et pourrait nécessiter une extension supplémentaire du réseau, quitte à assouplir certains critères de sélection. Une rapide interrogation de la banque Hydro montre qu'il existe 260 stations contrôlant des bassins versants inférieurs à 10 km<sup>2</sup>. Seules 9 stations possèdent plus de 40 ans de données (dont 3 ayant passé avec succès l'étape de critique et figurant donc dans le réseau final). Néanmoins, 17 stations supplémentaires possèdent de 30 à 40 années d'ancienneté, ce chiffre étant ramené à 12 stations après un premier tri basé sur les méta-données présentes en banque HYDRO. Ces 12 stations, dont la localisation est montrée en Figure 2-11 pourraient donc être candidates pour rejoindre le réseau si l'amélioration de la couverture du petit chevelu hydrographique devient un objectif majeur.





**Figure 2-11. Localisation des stations contrôlant des bassins versants de petite et très petite taille.**

Les stations ont été classées en trois grands groupes de régimes hydrologiques: Pluvial (193 stations, 82%), Nival pur (9 stations, 4%), Transition (34 stations, 14%). La Figure 2-12 montre la répartition géographique des ces régimes. Précisons que cette classification est relativement grossière et pourrait sans aucun doute être raffinée. L'objectif de cette classification est néanmoins modeste : il s'agit simplement de définir l'année hydrologique pour chaque régime (cf. section 3.1 pour plus de détails). En effet, l'étiage a lieu en été pour le régime pluvial, en hiver pour le régime nival pur, alors que le régime de transition peut présenter deux saisons d'étiage au cours d'une même année.



**Figure 2-12 – Subdivision des stations en régimes hydrologiques.**

### **2.3.3. Les stations des départements d'outre-mer**

La présélection initiale de 393 stations ne comprenait aucune station située dans les départements d'outre-mer. Nous avons souhaité remédier à cette absence afin de rendre le réseau réellement représentatif à l'échelle nationale, et pas seulement métropolitaine. De plus, les régimes hydrologiques rencontrés dans les DOM sont très différents de ceux rencontrés en métropole, et sont donc particulièrement intéressants à étudier.

Dans le but d'inclure les stations de Guadeloupe, Martinique, Guyane et Réunion, une recherche des données a été entreprise en contactant les producteurs de ces départements. Les données ont pu être repérées et téléchargées de la Banque Hydro (exception faite de la Guyane, où les séries ne sont pas versées en Banque Hydro, Tableau a).

Département	Organisme producteur	Service	Données	Nombre de stations	
				pré-sélectionnées	retenues
Guadeloupe	DIREN	Eau Milieux Aquatiques Risques et Déchets	Banque Hydro	10	4
Martinique	DIREN	Eau Milieux Aquatiques	Banque Hydro	5	2
Réunion	Office de l'eau	-	Banque Hydro / Banque de données eaureunion.fr	1	1
Guyane	DIREN	Eau et milieux aquatiques / Risques naturels	Obtenu (CD) directement par le producteur (format Access).	8	7

**Tableau a – Source des données des stations des DOM.**

Pour la Guyane, les chroniques brutes se présentent sous la forme de 2 à 4 valeurs de débit quotidiennes. De nouvelles séries de débits journaliers ont donc été créées après avoir moyenné les valeurs pluri-journalières.

En règle générale, les séries de débits journaliers ne sont pas très longues, le nombre d'années effectives variant entre 22 et 50 ans (35.5 en moyenne). De plus, de nombreuses stations ont été fermées au cours des années 90. Après discussion avec les producteurs, 14 séries ont finalement été retenues (Tableau b) : 4 en Guadeloupe, 2 en Martinique, 1 à la Réunion et 7 en Guyane. La Figure 2-13 et la Figure 2-14 montre la localisation des stations retenues.

Code Station	Nom Station	Début année hydrologique	Surface km <sup>2</sup>	Altitude m	Disponibilité données		Disp. réelle (n. années)
<b>Guadeloupe</b>		novembre					
I0200051	La Grande Rivière à Goyaves à Petit-Bourg [Prise d'eau, cote 90]		54.4	90	1951	1989	36
I1224141	La rivière du Grand Carbet à Capesterre-Belle-Eau [Barrage]		7.1	410	1961	1994	33
I2210681	La Grande Rivière des Vieux Habit à Vieux-Habitants [Pont du B.]		28.2	22	1951	1988	28
I2324861	La rivière Petite Plaine à Pointe-Noire		8.8	125	1964	1991	22
<b>Martinique</b>		novembre					
T3500140	La Lézarde au Gros – Morne [Lézarde 2]		13	171	1962	2006	35
T3501210	La Blanche à Fort-de-France [Alma]		4.3	423	1962	1998	27
<b>Réunion</b>		février					
R4030010	Le Grand Bras à Saint André		2	312	1982	2008	22
<b>Guyane</b>		juin					
G3100130	Approuague - Pierrette		6200	-	1959	2005	36
G3700133	Comté - Saut Bief		1760	-	1969	2001	31
*G3900142	Mana - Saut Sabbat		10255	-	1953	2008	34
G4100121	Maroni - Langa Tabiki		60930	-	1951	1999	47
G4100127	Maroni (Lawa) - Maripasoula		28285	-	1953	2008	49
G4101915	Tampok - Dégrad Roche		7655	-	1951	2004	46
G4500124	Oyapock - Saut Maripa		25520	-	1953	2008	50

\*modifié la série en 2005-2007 à cause d'artefacts.

**Tableau b – Liste des stations retenues pour les DOM.**

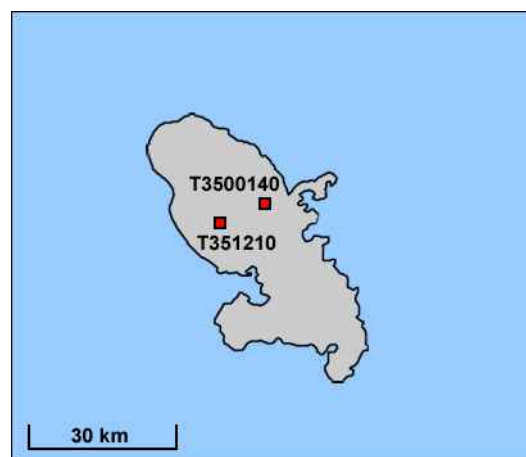
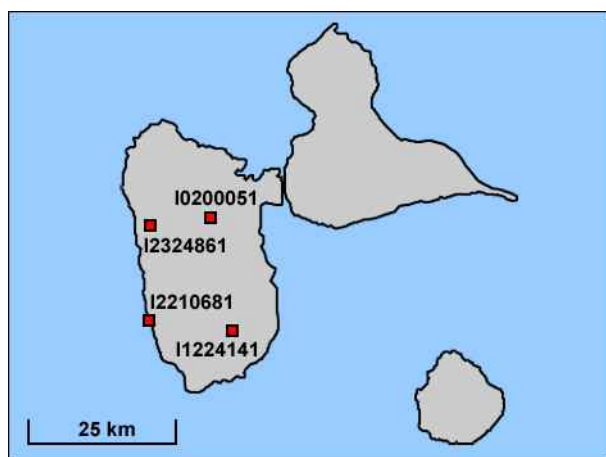


Figure 2-13 – Cartes des stations de Guadeloupe (4) et Martinique (2).

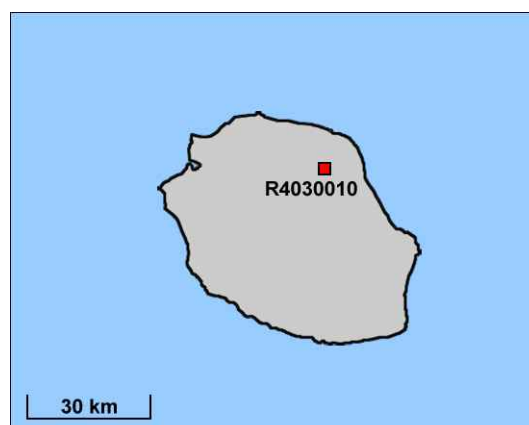
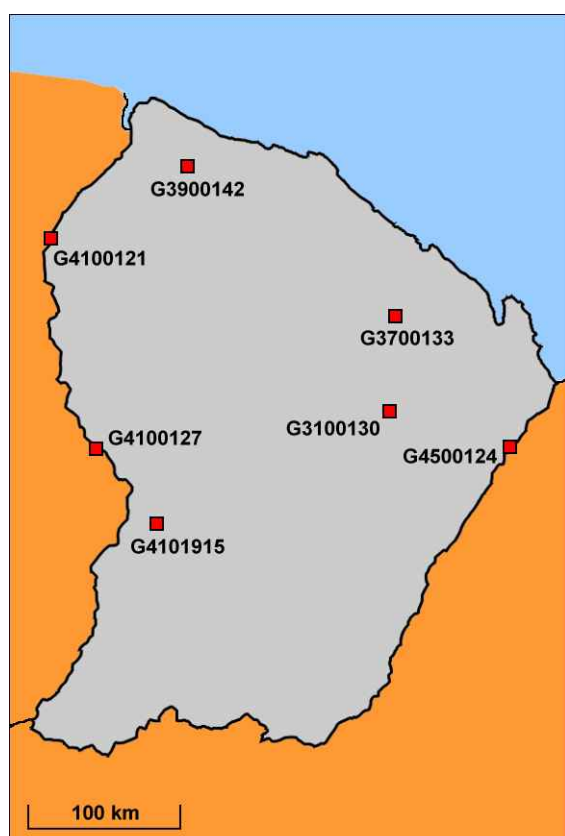


Figure 2-14 – Carte des stations de Guyane (7) et Réunion (1).

## 2.4. Comparaison à d'autres réseaux de mesure

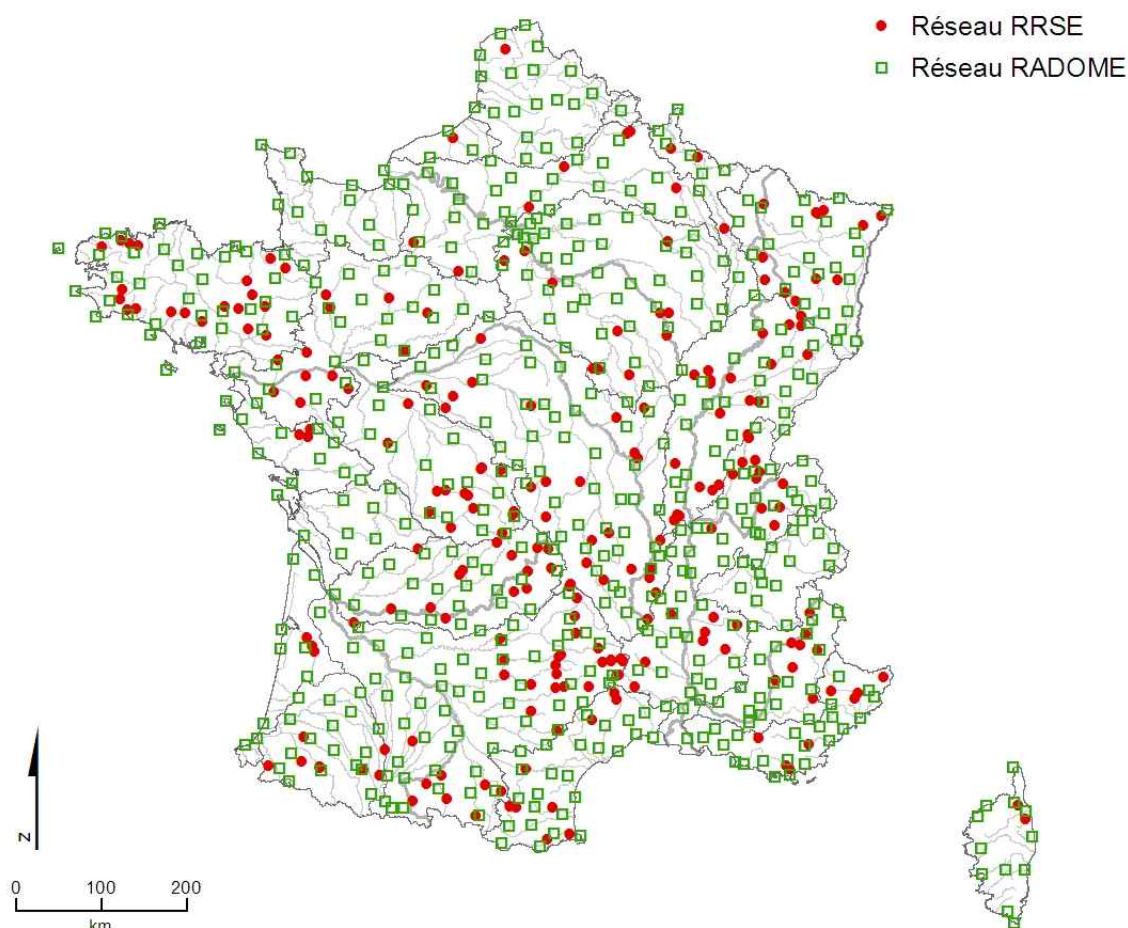
Les données hydrométriques issues du RRSE peuvent être utilisées de diverses façons : elles peuvent être étudiées et analysées en tant que telles, mais elles peuvent également être utilisées en association avec d'autres données décrivant d'autres paramètres hydro-climatiques. Par exemple, on pourrait souhaiter comparer d'éventuelles tendances détectées sur les étiages avec l'évolution de la pluviométrie dans le bassin. De même, on pourrait souhaiter utiliser un outil de modélisation hydrologique et/ou hydrogéologique pour mieux comprendre le lien entre différents paramètres

hydro-climatiques. De telles analyses ne peuvent se baser uniquement sur des données de débits, mais doivent également disposer de données supplémentaires comme par exemple la pluviométrie, les températures, les hauteurs de nappe, etc.

Nous nous intéressons donc dans cette section à la comparaison entre le RRSE et d'autres réseaux que l'on peut également considérer « de référence », et décrivant d'autres paramètres hydro-climatiques. Précisons que cette comparaison est effectuée de manière relativement simple, en juxtaposant les stations de mesure des différents réseaux. Néanmoins, la valeur de débit n'est pas une valeur ponctuelle, mais est liée à un bassin versant. Une comparaison plus poussée nécessiterait d'associer à chaque bassin versant contrôlé par une station du RRSE, les stations de mesure du réseau à comparer.

### 2.4.1. Réseau RADOME (pluie – température)

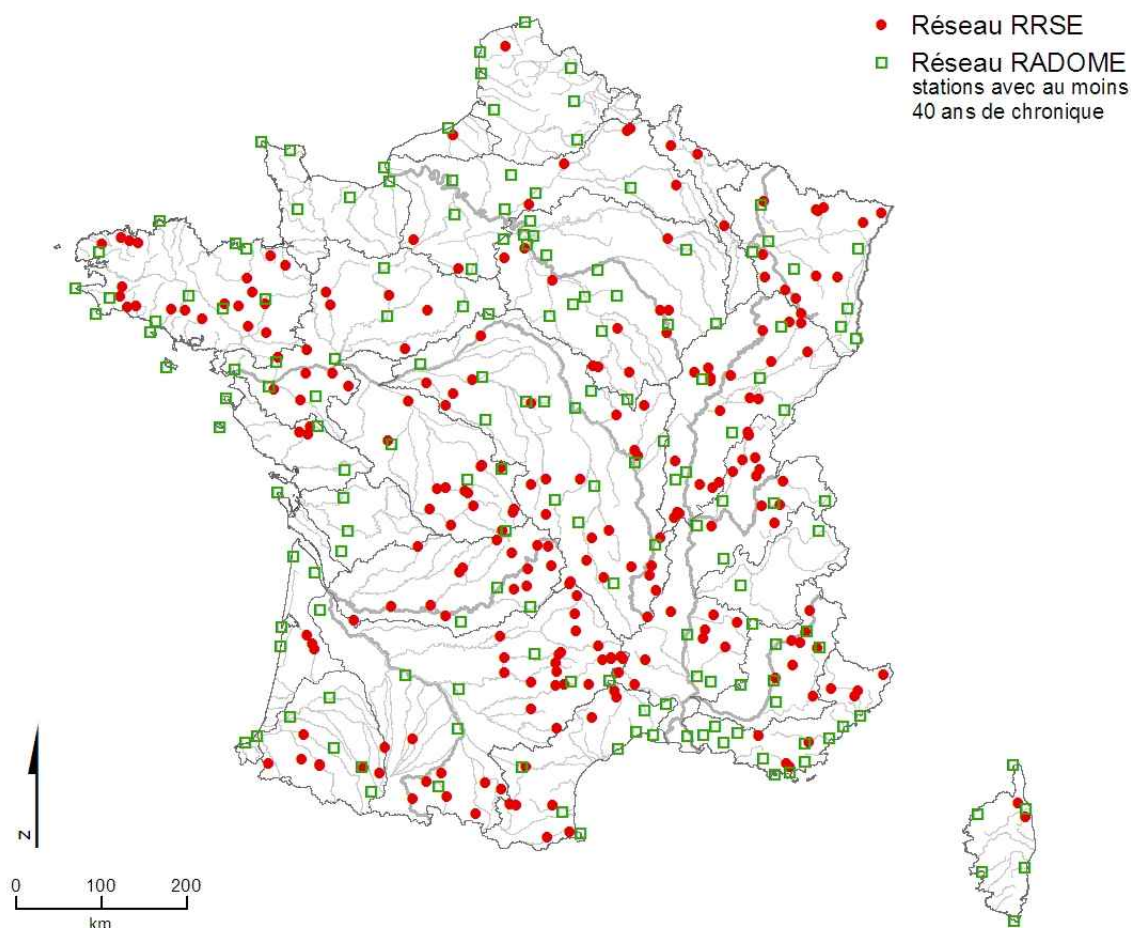
Le réseau RADOME est le réseau de mesure au sol de Météo France. Les stations de ce réseau mesurent divers paramètres météorologiques, en particulier les précipitations et les températures. Le réseau dispose au total de 551 stations, représentées avec les stations hydrométriques du RRSE en Figure 2-15. La couverture spatiale du réseau RADOME étant excellente, on observe un bon recouvrement entre les deux réseaux.



**Figure 2-15 – Stations hydrométriques du réseau RRSE (en rouge) et du réseau RADOME (en vert) (551 stations).**

Il est néanmoins plus intéressant de restreindre la comparaison avec les seules longues séries issues du réseau RADOME. La Figure 2-16 effectue cette comparaison, en ne conservant uniquement les

stations RADOME mises en service avant 1970 (et disposant donc d'environ 40 ans de données, soit 166 stations). Bien que la couverture spatiale du réseau RADOME diminue sensiblement, il n'apparaît pas d'incompatibilité franche entre les deux réseaux. On peut néanmoins noter que la densité de stations dans le Massif Central est élevée pour le RRSE, mais est bien plus faible pour le réseau RADOME restreint.



**Figure 2-16 – Stations hydrométriques du réseau RRSE (en rouge) et stations du réseau RADOME mises en service avant 1970 inclus (en vert, 166 stations).**

#### 2.4.2. Séries Quotidiennes de Référence SQR (pluies)

Les séries quotidiennes de référence de Météo-France sont des longues séries de pluies journalières qui vérifient un certain nombre de critères visant à garantir l'homogénéité de la mesure dans le temps. Les séries contiennent environ 50 ans de données et sont au nombre de 100. Les démarches adoptées pour confectionner le réseau SQR et le RRSE sont similaires en ce sens que l'objectif a été de sélectionner des longues séries de qualité satisfaisante.

La Figure 2-17 superpose les réseaux SQR et RRSE. On peut remarquer que contrairement au réseau RADOME, la couverture spatiale des SQR est très hétérogène, certaines zones comptant plusieurs postes très rapprochés (e.g. région parisienne, Bouches-du-Rhône) alors que d'autres en sont totalement dépourvu (e.g. haute Loire et Loire moyenne). En conséquence, le recouvrement des réseaux SQR et RRSE est très faible dans plusieurs zones, en particulier dans les Pyrénées Orientales, les Alpes du Sud, le Jura, la pointe Bretagne ou encore en Auvergne.

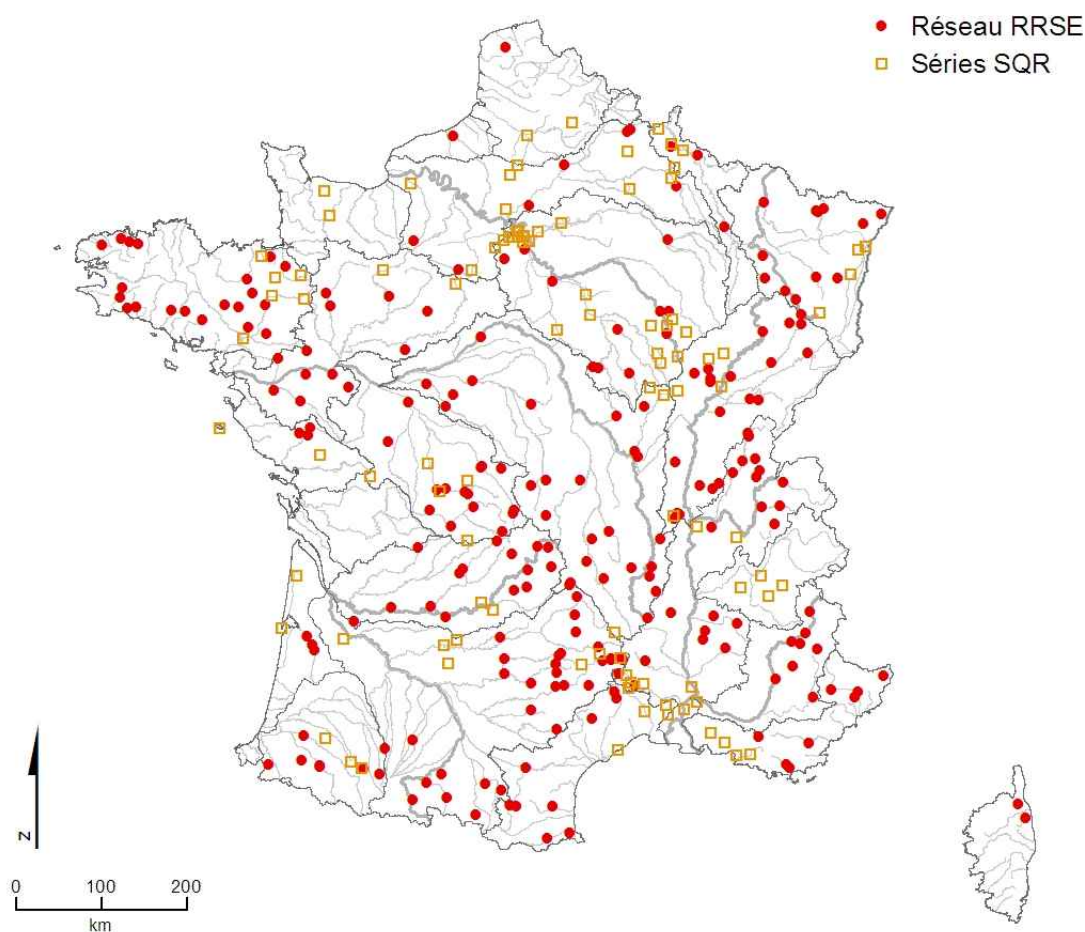


Figure 2-17 – Stations hydrométriques du réseau RRSE (en rouge) et sites SQR (en jaune, 100 stations).

### 2.4.3. Réseau de référence Pérenne

Le réseau pour le suivi de l'état de référence du bon état écologique des cours d'eau, ou Réseau de Référence Pérenne (RRP) est constitué d'un ensemble de sites hydrométriques considérés comme de « bonne qualité » où divers paramètres biologiques, chimiques et morphologiques sont mesurés. La Figure 2-18 superpose les réseaux RRP et RRSE, et montre que la répartition spatiale des sites de mesure est globalement assez similaire. En particulier, on peut remarquer que la région Midi-Pyrénées n'est que très peu représentée dans les deux réseaux. Le recouvrement est moins bon dans quelques régions comme par exemple le bassin de l'Isère ou le sud de la Corse (pas de stations RRSE) ou en Pays de la Loire (peu de stations RRP mais nombreuses stations RRSE).

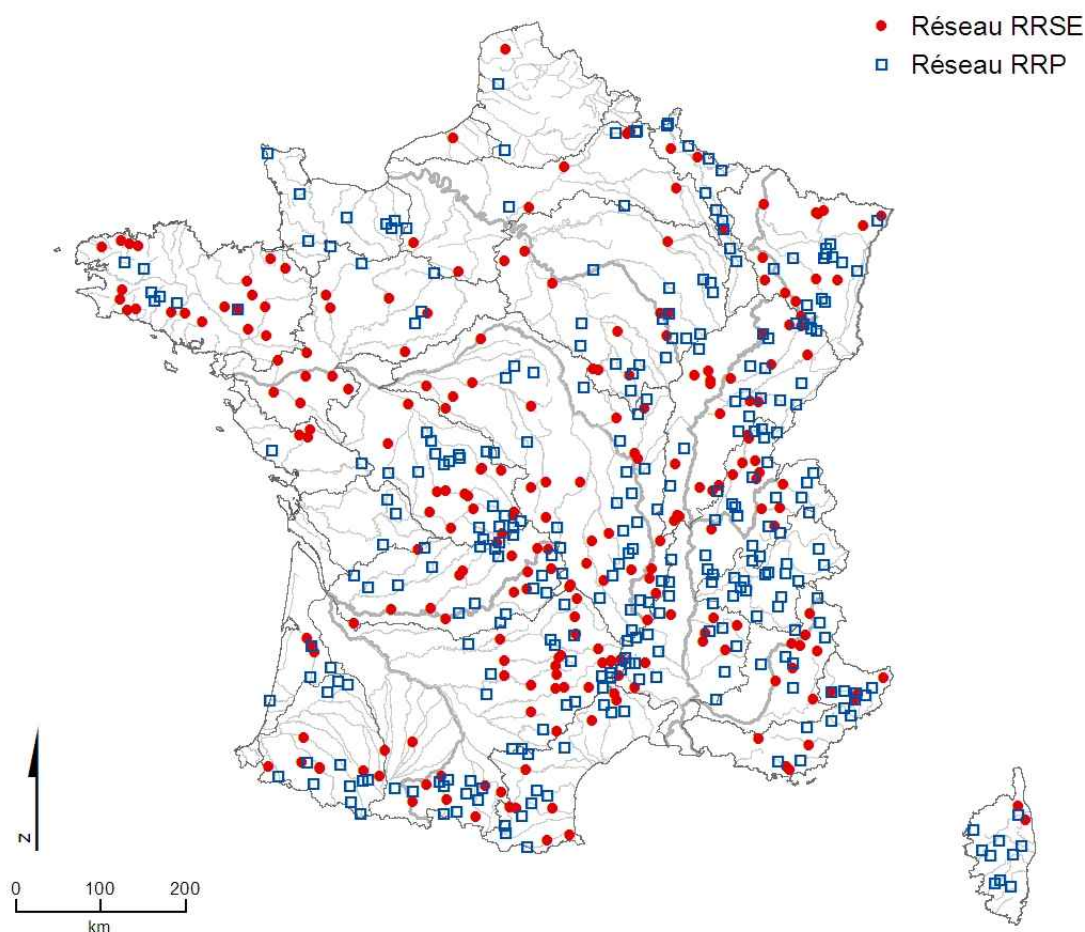


Figure 2-18 – Stations hydrométriques du réseau RRSE en rouge, et sites de mesure du réseau RRP en bleue (303 stations).

### 3. Evolution des régimes d'étiage

Cette section présente l'analyse des données hydrométriques issues du RRSE. Cette analyse vise à évaluer l'existence de tendances affectant divers descripteurs du régime d'étiage, et complète l'analyse préliminaire qui avait été présentée dans le précédent rapport d'activité (Giuntoli and Renard 2009). L'analyse est menée à bien à deux échelles distinctes : l'échelle locale (chaque station est étudiée indépendamment) et l'échelle régionale (des groupes de stations contrôlant des bassins versants similaires sont étudiés conjointement).

#### 3.1. Méthodologie : indices d'étiage

Le régime d'étiage est décrit par dix indices extraits des chroniques de débit journalier. Le choix de ces dix indices fait suite à une analyse approfondie visant à sélectionner des indices complémentaires, décrivant des facettes spécifiques du phénomène d'étiage, et à choisir des seuils de bas débit pertinents. Cette analyse est décrite en détails dans le précédent rapport d'activité (Giuntoli and Renard 2009), nous nous contentons donc ici de rappeler la nature de ces indices :

- 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 =  $q_{15\%}$ )
- **Date du pic de l'étiage** : Date du minimum annuel (calculé sur les données journalières brutes)
- **Indices de sévérité** :
  - **Durée de l'étiage** : durée annuelle sous le seuil (seuil de bas débit =  $q_{15\%}$ )
  - **Déficit de volume** : calculé par rapport au seuil de bas débit =  $q_{15\%}$
  - **Pic de l'étiage** : minimum annuel (calculé sur les données journalières brutes).
- **Autres**
  - **Temps de récession** : durée entre le centre et le début de l'étiage
  - **BFI** : Base Flow Index
  - **Module** : débit moyen annuel

Précisons que le calcul des indices est effectué par année hydrologique plutôt que par année civile. La définition de l'année hydrologique dépend du régime, tel que défini en section 2.3.2. Les années hydrologiques retenues sont les suivantes :

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

De plus, pour les régimes de transition, deux échantillonnages par sous-saisons sont également effectués, afin de décrire de manière distincte les étiages d'hiver (dus à la rétention des précipitations sous forme de neige) et les étiages d'été. Ces sous-saisons sont définies comme suit :

- Etiage d'été : mai – novembre
- Etiage d'hiver : décembre – avril

### **3.2. Méthodologie : tests statistiques**

Nous présentons ici les principaux outils statistiques utilisés dans l'analyse : le test de détection de tendance de Mann-Kendall (échelle locale) et le test de détection régionale. A l'issue de ces présentations, nous discutons de l'intérêt d'utiliser ces méthodes plutôt que des approches plus classiques, comme ajuster une droite de régression et évaluer si sa pente est significativement différente de zéro.

#### **3.2.1. Echelle locale : test de Mann-Kendall**

Le test de Mann-Kendall (Mann 1945; Kendall 1975) est un test non paramétrique de détection de tendance. Il s'agit certainement du test le plus utilisé en hydrologie, car il ne fait aucune hypothèse sur la distribution des données, ce qui lui confère une certaine robustesse. Il fait néanmoins l'hypothèse que les données sont indépendantes.

Les hypothèses du test sont  $H_0$  : la série est stationnaire,  $H_1$  : la série présente une tendance. La statistique de test  $Z$  est calculée de la façon suivante :

$$Z = \begin{cases} (S - 1) / \sqrt{\text{Var}(S)} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ (S + 1) / \sqrt{\text{Var}(S)} & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad (3-1)$$

Avec :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{signe}(X_j - X_i) \quad (3-2)$$

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

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  $\alpha$  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. La modification consiste à remplacer  $\text{Var}(S)$  dans l'équation (3-1) par :

$$\text{Var}(S) = \left( n(n-1)(2n+5) - \sum_{k=1}^n t_k k(k-1)(2k+5) \right) / 18 \quad (3-3)$$

où  $t_k$  est le nombre de valeurs conduisant à  $k$  ex æquo. Cette modification sera appliquée pour les indices « durée » et « déficit de volume » (en crue et en étiage), qui prennent la valeur zéro chaque année où le débit n'est pas passé sous le seuil de bas débit.

Le test de Mann-Kendall classique suppose que la série testée n'est pas autocorrélée. Lorsque cette hypothèse s'avère abusive, le test devient très fortement biaisé, c'est à dire qu'il détecte à tort un grand nombre de tendances qui n'existent en fait pas. Il est donc particulièrement important de vérifier l'existence d'autocorrélation dans la série, et le cas échéant, d'utiliser un test adapté.

*Hamed and Rao* (1998) et *Yue and Wang* (2002; 2004) ont ainsi proposé de corriger la distribution de la statistique de test  $S$  de Mann-Kendall pour prendre en compte d'éventuelles autocorrélations. En effet, ces auteurs ont mis en évidence que  $S$  ne suit plus sous  $H_0$  une loi Gaussienne centrée-réduite en présence d'autocorrélation, mais une loi  $N(0, \sigma^2)$ , où  $\sigma^2 < 1$  si  $\rho < 0$ , et  $\sigma^2 > 1$  si  $\rho > 0$ . Le problème est donc de calculer un facteur correctif  $\gamma$  tel que :

$$\text{Var}_\rho(S) = \gamma \text{Var}_{\rho=0}(S) \quad (3-4)$$

Les travaux de *Hamed and Rao* (1998) et *Yue and Wang* (2002; 2004) ont ainsi conduit à proposer deux formules pour le calcul du facteur correctif  $\gamma$ . Une comparaison de ces formules effectuée par *Renard* (2006) a montré des résultats similaires, la formule proposée par de *Hamed-Rao* semblant légèrement plus robuste. C'est donc cette formule qui est utilisée ici :

$$\gamma = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \sum_{k=1}^{n-1} (n-k)(n-k-1)(n-k-2)\rho_k \quad (3-5)$$

(3-0)

où l'autocorrélation d'ordre  $k$ ,  $\rho_k$ , est calculée sous hypothèse d'un processus auto-régressif d'ordre 1, i.e.  $\rho_k = \rho_1^k$ .

### 3.2.2. Echelle régionale

Le test de détection de tendance régionale est un test semi-paramétrique de détection d'une tendance homogène sur un ensemble de stations. Le raisonnement sous-tendant la construction de ce test est que des bassins versants aux comportements hydrologiques comparables et soumis à des conditions climatiques comparables devraient présenter une tendance similaire si la cause de cette tendance est un phénomène climatique à grande échelle.

La difficulté principale dans le développement de tests régionaux de détection de tendance est liée à l'existence de dépendances spatiales entre les sites étudiées. Des études synthétiques montrent que ces dépendances ne peuvent pas être ignorées, sous peine de biaiser très fortement les résultats du test (Renard, Lang et al. 2008). Le test régional a donc été construit dans l'optique de prendre en compte explicitement ces dépendances spatiales.

La matrice de données est notée  $X$ , et comporte  $n$  années en ligne et  $p$  stations en colonnes.  $X_k^{(i)}$  représente donc la variable d'intérêt en une année  $k$  pour un site  $i$ . Dans un premier temps, ces données sont transformées par « normal score ». Pour un site donné  $i$ , la transformation « normal score » peut être décrite comme suit :

$$\tilde{X}_k^{(i)} = \phi^{-1} \left( \hat{F}_i (X_k^{(i)}) \right) \quad (3-6)$$

Dans cette expression,  $\phi$  est la fonction de répartition d'une loi Gaussienne centrée réduite, et  $\hat{F}_i$  est la fonction de répartition empirique pour le site  $i$ .

Nous faisons ensuite l'hypothèse que la matrice transformée  $\tilde{X}$  est un échantillon issu d'une loi Gaussienne multivariée de dimension  $p$  :

$$\tilde{X}_\mu \sim \mathcal{N}(\ ; \ ) \quad (3-7)$$

Précisons qu'il s'agit là d'une hypothèse forte, dont la pertinence doit être vérifiée. En effet, la transformation « normal score » assure que les données sur chaque site sont Gaussiennes, mais cela ne suffit pas à assurer la normalité de la loi jointe. Cette hypothèse peut être évaluée en utilisant les outils proposés et décrits en détail par Renard, Lang et al. (Renard, Lang et al. 2008).

Sous l'hypothèse de stationnarité  $H_0$  (modèle  $M_0$ ), le vecteur moyenne  $\mu$  est identiquement nul par construction, et la matrice de variance peut être estimée par son estimateur classique de maximum de vraisemblance :

$$\hat{\Sigma} = \frac{1}{n} \tilde{X}^T \tilde{X} \quad (3-8)$$

Supposons à présent que les données sont affectées par une tendance identique pour tous les sites (modèle  $M_1$ ). Cette situation est paramétrée de la manière suivante :

$$E(\tilde{X}_k^{(i)}) = \beta y_k \quad (3-9)$$

où  $y_k$  représente l'année correspondant à la  $k^e$  donnée. Puisque, par construction, les moyennes de tous les sites sont nulles, il conviendra de remplacer l'année brute  $y_k$  par une année centrée  $\tilde{y}_k = y_k - \bar{y}$ , de sorte que :

$$\sum_{k=1}^n \beta \tilde{y}_k = 0 \quad (3-10)$$

L'estimation du paramètre de tendance  $\beta$  peut se faire explicitement conditionnellement à la matrice de variance. Notons  $(\gamma_{i,j})_{i,j=1,\dots,p}$  les termes de l'inverse de la matrice de covariance spatiale  $\Sigma^{-1}$ . Il est aisé de montrer que la dérivée de la log-vraisemblance par rapport à  $\beta$  s'annule au point suivant (Renard, Lang et al. 2008):

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{k=1}^n \left\{ \tilde{y}_k \sum_{i,j=1}^p \gamma_{i,j} \tilde{x}_k^{(j)} \right\}}{\left( \sum_{k=1}^n \tilde{y}_k^2 \right) \left( \sum_{i,j=1}^p \gamma_{i,j} \right)} \quad (3-11)$$

En conséquence, si la matrice de variance est estimée comme décrit dans l'équation (3-8), l'estimateur de tendance régionale peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\hat{\beta} = \frac{\mathbf{I}_p^T (\tilde{\mathbf{X}}^T \tilde{\mathbf{X}})^{-1} \tilde{\mathbf{X}}^T \tilde{\mathbf{Y}}}{\tilde{\mathbf{Y}}^T \tilde{\mathbf{Y}} \mathbf{I}_p^T (\tilde{\mathbf{X}}^T \tilde{\mathbf{X}})^{-1} \mathbf{I}_p} \quad (3-12)$$

où  $\tilde{\mathbf{Y}}$  est le vecteur colonne des années centrées et  $\mathbf{I}_p$  est un vecteur colonne de dimension  $p$  dont toutes les valeurs sont égales à un.

La significativité de cette tendance est alors déterminée en construisant un test du rapport de vraisemblance, ou test de déviance (cf. par exemple Coles 2001, pour plus de détails sur cette famille de tests). Plus précisément, on commence par calculer la statistique de test  $Z$  par la formule ci-dessous :

$$\begin{aligned}
 Z &= -2 \left( L_0(\mathbf{X}\hat{\boldsymbol{\theta}}_0) - L_1(\mathbf{X}\hat{\boldsymbol{\theta}}_1) \right) \\
 &= -2 \left( \sum_{k=1}^n \log \left( N(\tilde{\mathbf{x}}_k; 0, \hat{\boldsymbol{\Sigma}}) \right) - \sum_{k=1}^n \log \left( N(\tilde{\mathbf{x}}_k; \hat{\boldsymbol{\beta}}, \hat{\boldsymbol{\Sigma}}_k) \right) \right) \quad (3-13)
 \end{aligned}$$

$Z$  est connue sous le nom de déviance, et correspond à une différence entre les log-vraisemblances des deux modèles à comparer (ici, les modèles  $M_0$  (stationnaire) et  $M_1$  (tendance régionale)), sous hypothèses d'indépendance temporelle (pas d'autocorrélation). La théorie statistique montre alors que la statistique de test  $Z$  de l'équation (3-13) suit asymptotiquement une distribution du  $\chi^2$  à 1 degré de liberté. La significativité de la tendance régionale peut donc être évaluée en comparant la valeur observée de  $Z$  aux valeurs critiques issues d'une distribution du  $\chi^2$  à 1 degré de liberté.

L'application du test régional est illustrée sur un exemple en Figure 3-19, à partir de sept stations dans la région Cévennes, possédant 37 années communes entre 1969 et 2007. Les croix figurant dans le graphique correspondent aux données transformées par « normal score »  $\tilde{\mathbf{X}}$ . Pour une année donnée, sept valeurs transformées correspondant aux sept stations de la région sont reportées. La droite rouge correspond à la tendance  $\hat{\boldsymbol{\beta}} = -0.023988$  calculée dans l'équation (3-12). La statistique de test correspondant vaut  $Z = 3.7817$ . La loi du  $\chi^2$  à 1 degré de liberté donne comme valeurs critiques 2.706 au risque 10% et 3.841 au risque 5%. La valeur observée  $Z = 3.7817$  étant supérieure à 2.706 mais inférieure à 3.841, on en déduit que la tendance est significative au risque 10% (mais ne l'est pas au risque 5%).

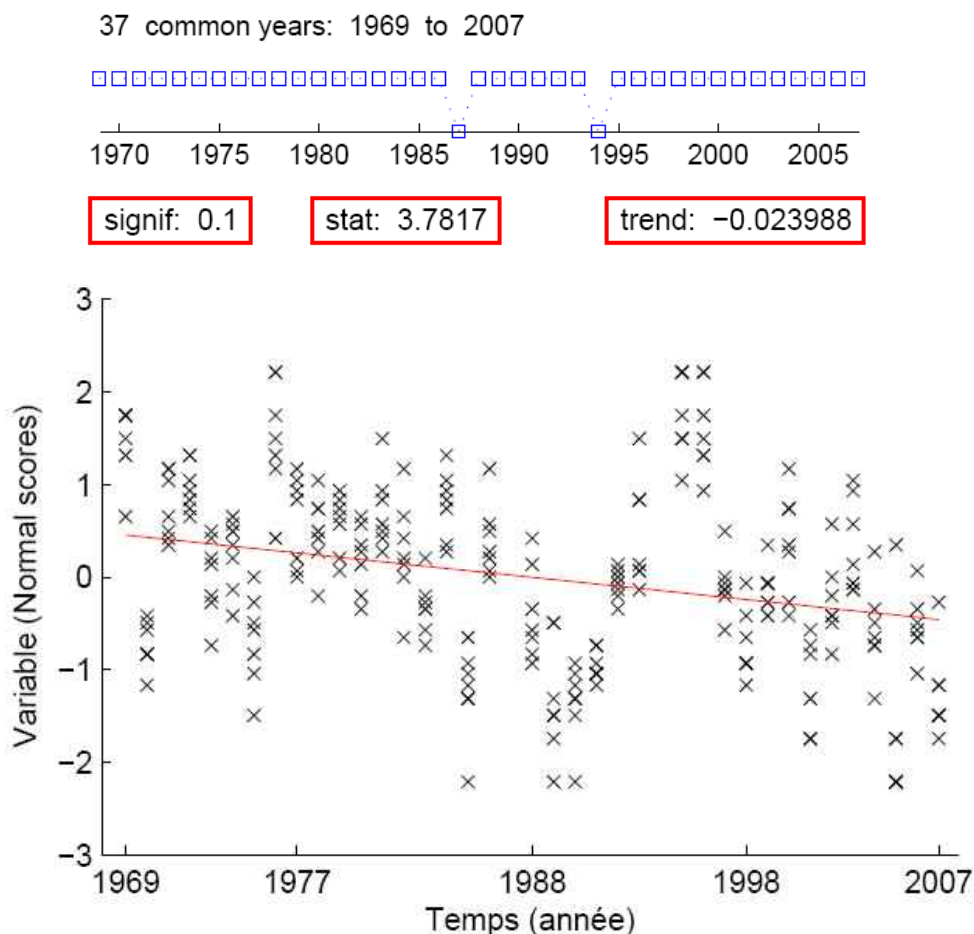


Figure 3-19. Exemple de résultat du test régional (basé sur 7 stations de la région Cévennes)

### 3.2.3. Pourquoi toute cette armada statistique ?

Le lecteur peut légitimement questionner la plus-value de ces outils statistiques qui peuvent sembler, à première vue, compliqués, par rapport à des méthodes plus classiques comme l'ajustement d'une droite de régression ou des approches de type « cumul des résidus » (cf. ellipses de Bois). L'objectif de cette section est donc d'essayer de convaincre le lecteur de l'intérêt de ces approches.

Le premier point important concerne l'utilisation de tests statistiques, qui permettent de déterminer la *significativité* des changements. Il existe de nombreux outils graphiques qui permettent d'effectuer un jugement visuel sur la stationnarité d'une série (méthodes de type « cumul » notamment). Les approches purement graphiques sont indiscutablement utiles, et notre propos n'est pas d'en décourager l'usage. Elles ne sont néanmoins pas suffisantes : le jugement visuel dépend en effet très fortement des caractéristiques de la série étudiée (variabilité, asymétrie de la distribution, etc.) et varie donc très fortement d'un bassin versant à l'autre, voire même, au sein d'un même bassin versant, d'une variable hydrologique à l'autre. Il est donc extrêmement difficile de se forger une expérience suffisante pour pouvoir juger, « à l'œil », de la significativité d'un changement. Il est donc important de distinguer de manière objective ce qui relève de la variabilité naturelle des données étudiées de ce qui peut être considéré comme un changement significatif. Enfin, les approches graphiques sont utiles dans le cas d'une étude ciblée sur un (voire quelques)

bassin(s) précis, mais ne sont pas très adaptées à une étude portant sur un grand nombre de bassins, où les méthodes doivent être largement automatisées.

L'importance de déterminer la significativité d'un changement ayant été argumenté, la question suivante est : pourquoi le test de Mann-Kendall ? Pourquoi ne pas ajuster une droite à la série étudiée, et évaluer si sa pente est significativement différente de zéro ? Il existe plusieurs justifications à ce choix :

- L'ajustement d'une droite est souvent effectué suivant le principe des moindres carrés, i.e. en sélectionnant la droite qui minimise la somme du carré des résidus. Ce critère est optimal dans le cas de résidus *Gaussiens*, mais ne l'est plus avec d'autres distributions. Or, les variables hydrologiques présentant une allure Gaussienne sont rares.
- De même, l'évaluation de la significativité de la pente de cette droite est effectuée *sous hypothèse de normalité des données*, ce qui est rarement le cas. En cas de très fort écart à cette hypothèse de normalité, le test peut devenir biaisé.
- Inversement, le test de Mann-Kendall est un test *non-paramétrique*, c'est à dire qu'il ne fait aucune hypothèse sur la distribution des données analysées, et est donc applicable de manière plus générale. En particulier, ce test n'utilise pas directement les valeurs de la série, mais seulement leur *rang* (i.e. cette valeur est la plus grande, la 2<sup>nd</sup>e plus grande, la 3<sup>e</sup> plus grande, etc.). Ceci présente les avantages suivants :
  - Moindre sensibilité à la présence d'une valeur extrême en début ou fin de série
  - Moindre sensibilité aux erreurs de mesure
- Le test de Mann-Kendall utilisé comprend une correction pour prendre en compte une éventuelle autocorrélation dans la série analysée. Ceci est extrêmement important : en effet, de nombreuses séries présentent de l'autocorrélation pour les variables de basses eaux ou pour le module (voir section 3.4.1). Or, les tests statistiques sont très peu robustes face à la présence d'autocorrélation en l'absence de cette correction, c'est à dire qu'ils auront tendance à détecter à tort de nombreuses tendances factices. Un exemple est proposé ci-dessous : la Figure 3-20 représente module annuel de la station de la Dore à Saint-Gervais-sous-Meymont (K2871910). La tendance à la baisse apparaissant sur la figure est significative au risque 5% si on ignore la présence d'autocorrélation. Or cette autocorrélation est significative sur cette série : une fois prise en compte via la correction implémentée dans le test de Mann-Kendall, la tendance à la baisse n'est plus significative ! En considérant la série sur la période entière de disponibilité (Figure 3-21), on peut observer qu'effectivement cette tendance à la baisse n'était sûrement qu'un artefact.
- Un dernier avantage du test de Mann-Kendall utilisé est qu'il implémente également une correction pour tenir compte de la présence d'ex aequo dans les données. Ceci est utile pour certaines variables d'étiage, comme la durée ou le déficit de volume, qui prennent la valeur zéro chaque année où le débit n'est pas passé sous le seuil de bas débit (cf. section 3.1).

K2871910 - Module de 1968 à 2007

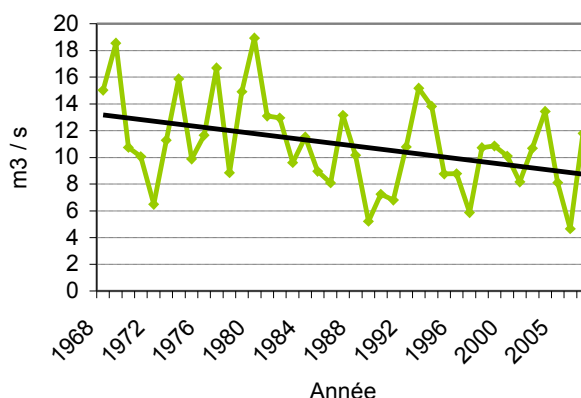


Figure 3-20. Modules annuels de la Dore à Saint-Gervais-sous-Meymont, 1968-2007.

K2871910 - Module de 1936 à 2007

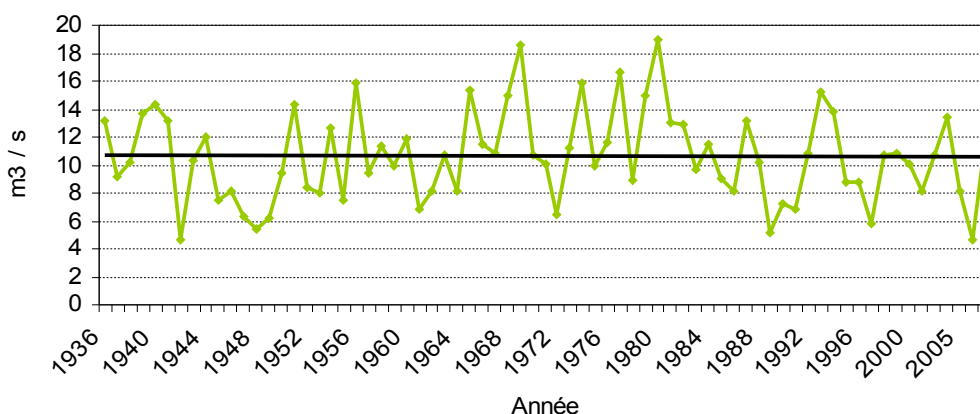


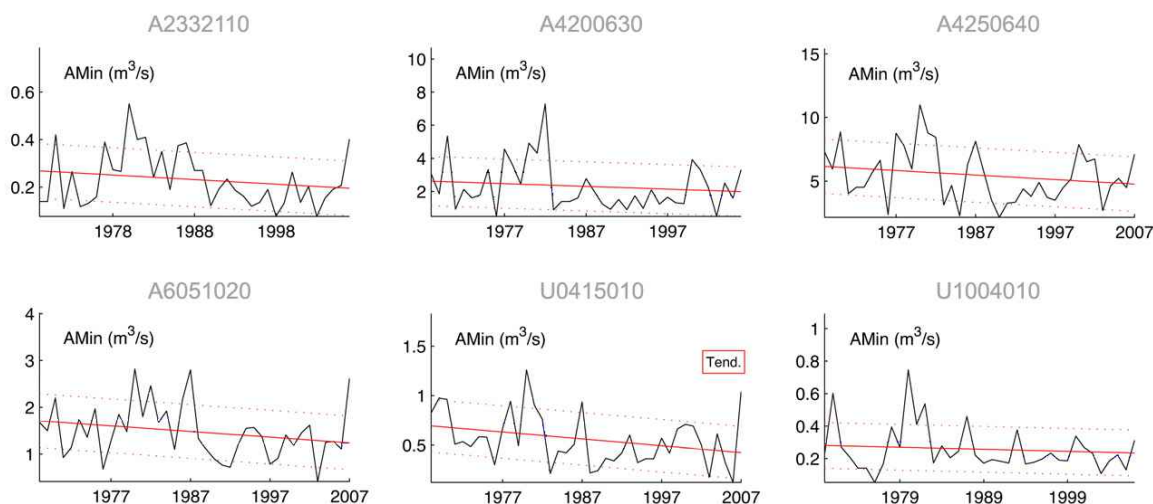
Figure 3-21. Modules annuels de la Dore à Saint-Gervais-sous-Meymont, 1936-2007.

Enfin, l'utilisation d'un test régional, qui utilise simultanément plusieurs séries, est une pratique encore peu courante mais qui se justifie dans une optique d'évaluation des impacts climatiques. En effet, la notion de cohérence qui sous-tend le test régional proposé nous semble importante : des bassins versants au fonctionnement hydrologique similaire et soumis à un même forçage climatique devraient réagir de façon similaire si c'est bien le climat qui est à l'origine des évolutions hydrologiques. Précisons que l'on n'utiliserait pas ce test si l'objectif était de détecter des ruptures liées à des problèmes météorologiques par exemple (qui, eux, n'ont pas de raison d'être similaires d'un bassin à l'autre).

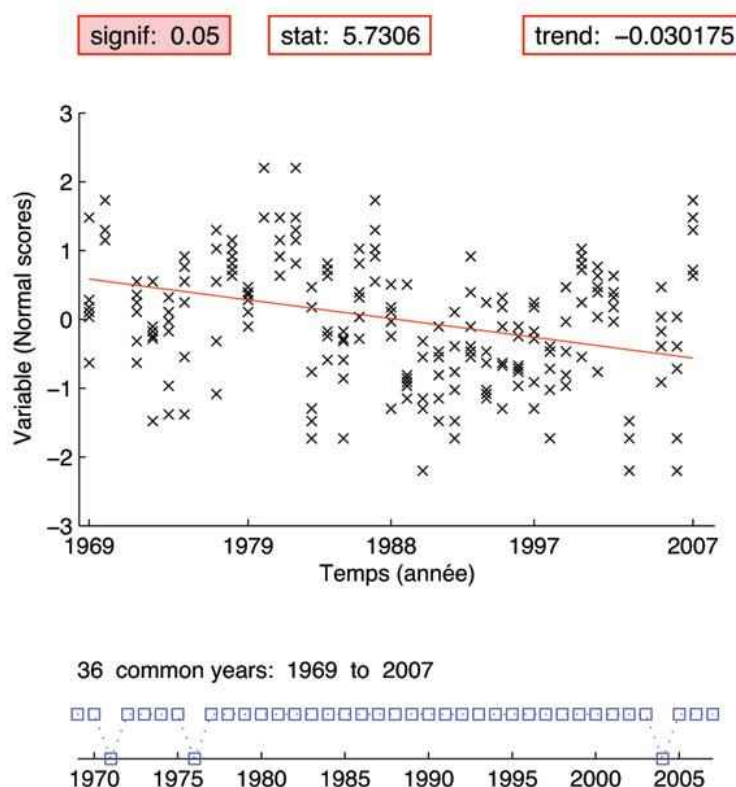
De plus, le passage à l'échelle régionale représente une opportunité d'améliorer la puissance de détection de changements, dans le cas où l'amplitude de ces changements reste faible comparée à la variabilité naturelle (ce qui est souvent le cas, surtout pour les extrêmes hydrologiques). A titre d'exemple, la Figure 3-22 montre les 6 stations qui composent la région « Vosges ». Une faible tendance à la baisse est observée sur ces stations, mais cette tendance n'est significative que pour une seule station : cette possible évolution est en fait « noyée » dans la très forte variabilité naturelle locale. Par contre, si l'on considère ces six stations conjointement et que l'on estime une tendance régionale (Figure 3-23), alors cette tendance régionale est significative au risque 5% :



l'utilisation conjointe de plusieurs stations, et le fait que la tendance est cohérente sur ces stations, permet de mieux mettre en évidence cette évolution.



**Figure 3-22. Test local appliqué à 6 stations de la région « Vosges », pour la variable « minimum annuel ». Seule la station U0415010 présente une tendance significative au risque 10%.**



**Figure 3-23. Test régional appliqué aux 6 stations de la région « Vosges », pour la variable « minimum annuel ». La tendance régionale est cohérente et significative au risque 5%.**



### 3.3. Méthodologie : regroupements régionaux

#### 3.3.1. Rappel sur les régions « hydro-géo-climatiques »

Les 393 stations présélectionnées avaient été regroupées lors de l'action 2008 en régions homogènes des points de vue hydrologique, géologique et climatique. Ce regroupement était principalement basé sur les hydro-écorégions (Wasson, Chandesris et al. 2004), avec quelques modifications supplémentaires pour améliorer la cohérence des regroupements en termes de régimes hydrologiques (cf. Renard, Lang et al. 2008, pour plus de détails). Les plus grands bassins versants sont des cas à part du fait de la multitude des contrôles hydrologiques, et sont numérotés négativement. La Figure 3-24 rappelle la subdivision des 393 stations présélectionnées qui avait été adoptée. Précisons néanmoins que l'analyse de stationnarité qui suit a été menée sur la sélection définitive de 236 stations (voir Figure 2-12).

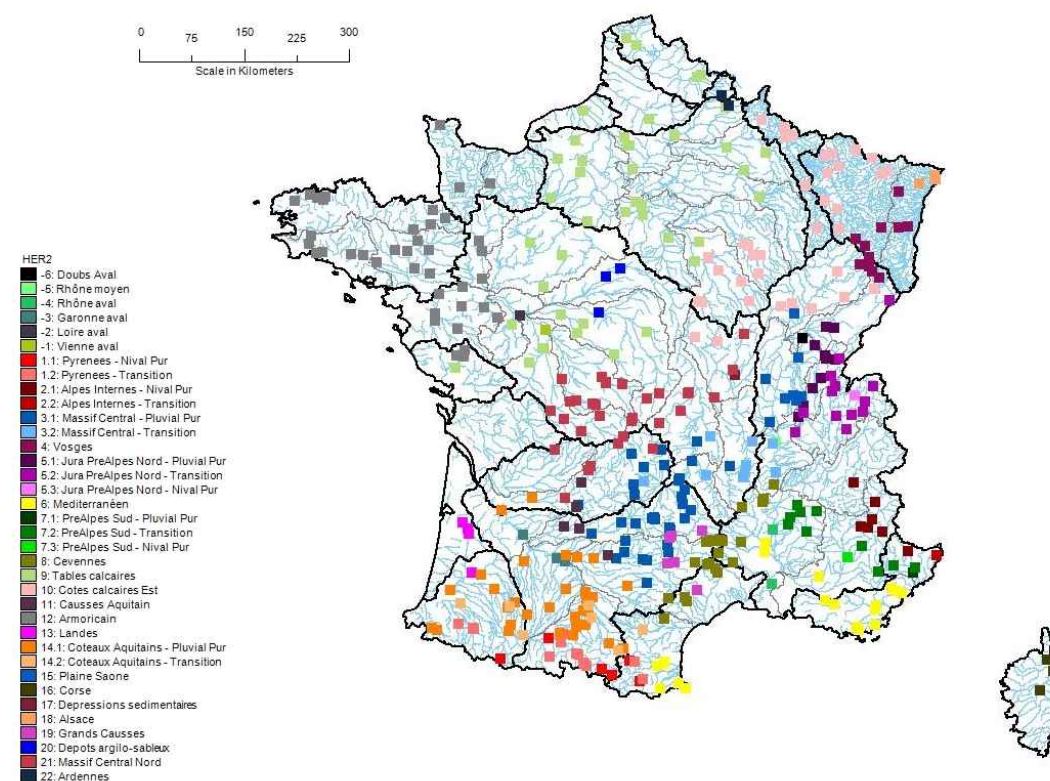


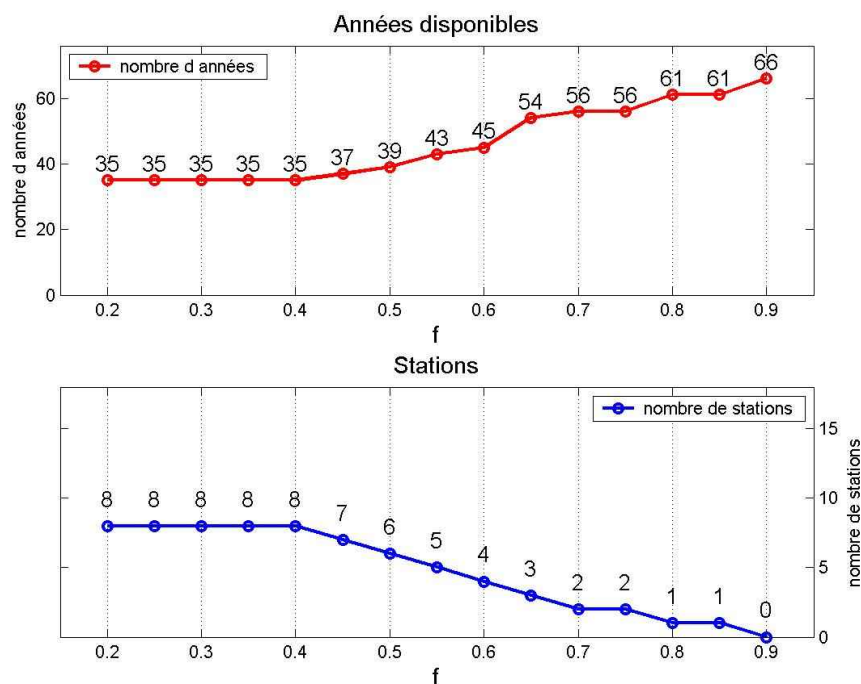
Figure 3-24. Classement des 393 stations présélectionnées dans des régions homogènes.

#### 3.3.2. Modifications effectuées

L'application du test régional présenté en section 3.2.2 pose un certain nombre de problèmes pratiques, qui nous ont conduit à légèrement modifier le regroupement initialement envisagé. En effet, le test régional n'accepte pas les données manquantes, ce qui exerce une contrainte forte dans la sélection des stations : dès qu'une année est manquante pour une station, il faut la retirer pour toutes les stations de la région. Il convient donc d'effectuer un compromis entre les situations suivantes :

- Privilégier le nombre de stations dans chaque région, avec le risque de perdre de nombreuses années à cause des données manquantes éparpillées sur les différentes stations.
- Privilégier le nombre d'années disponibles, en excluant les stations présentant trop de données manquantes, avec le risque de n'avoir que peu de stations dans chaque région.

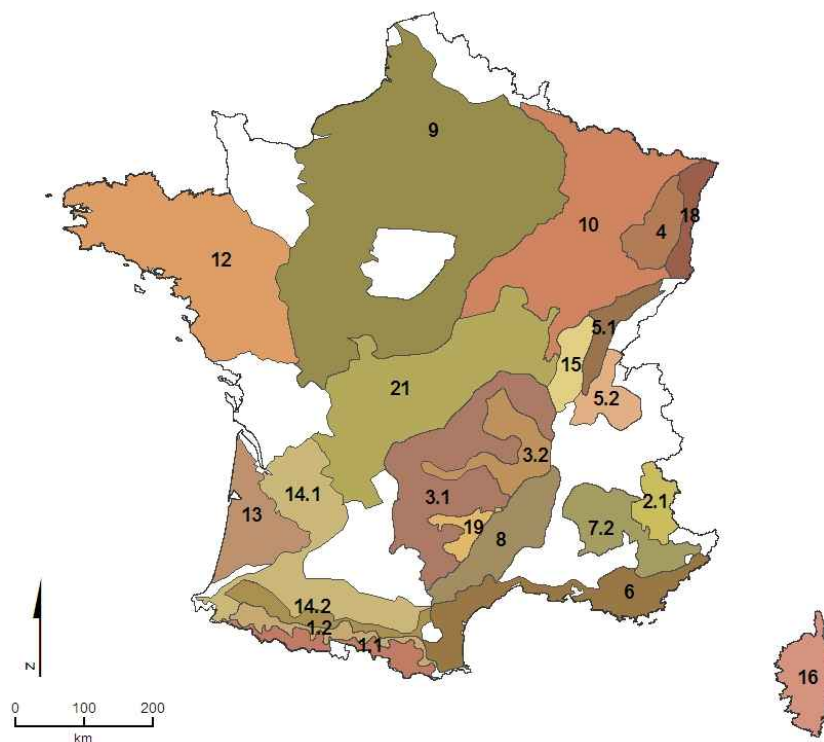
Il n'existe malheureusement pas de solution miracle à ce problème, le choix des stations à conserver ou à exclure de chaque région doit donc être effectué « à la main », en visualisant la disponibilité des données et en équilibrant le coût d'exclure une station incomplète avec les années qu'elle fait perdre à la matrice de données régionale. Pour ce faire, nous avons utilisé et développé un petit utilitaire développé par Etienne Leblois (Cemagref Lyon) qui permet de réaliser ce compromis (cf. Figure 3-25). En abscisse, un facteur  $f$  quantifie le compromis à réaliser, les valeurs de  $f$  proches de 0 privilégiant le nombre de stations, les valeurs proches de 1 favorisant le nombre d'années. Suivant la valeur de ce facteur, on choisira au maximum 8 stations, mais avec seulement 35 années de données, ou au contraire deux stations, avec 56 années.



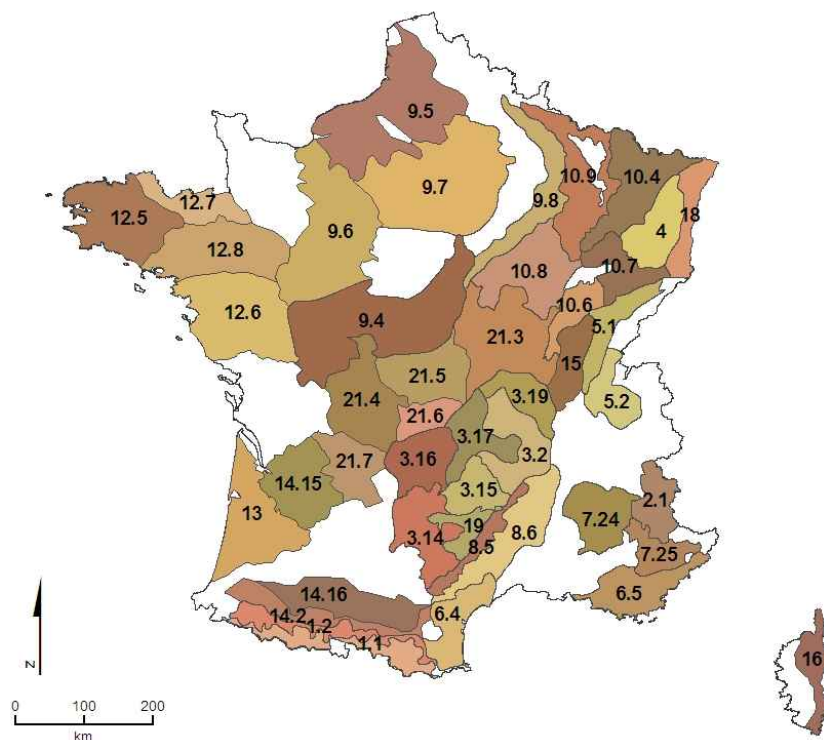
**Figure 3-25. Illustration du dilemme de la création de régions : compromis entre le nombre de stations et le nombre d'années.**

D'autre part, nous avons finalement décidé de réaliser l'analyse régionale à deux échelles emboîtées :

- **Analyse Large** (Figure 3-26) : Les régions utilisées correspondent aux régions initialement définies (section 3.3.1). Cependant, seules 22 régions sur les 36 de départ sont utilisées. Ceci est dû au fait qu'après la critique des données, 14 régions ne contenaient une seule station, voire aucune, ce qui est évidemment insuffisant pour une analyse régionale. Les contours figurant en Figure 3-26 montrent l'étendue approximative des régions à cette échelle. Les zones blanches correspondent aux régions où il n'y a plus suffisamment de stations pour effectuer une analyse régionale.
- **Analyse Fine** (Figure 3-27) : Les régions utilisées correspondent à des subdivisions supplémentaires des régions définies pour l'analyse large. Ces subdivisions supplémentaires ont été effectuées en utilisant les hydro-écorégions de niveau 2. On obtient ainsi 45 régions qui devraient présenter une plus grande homogénéité que celles de l'analyse large, mais une étendue géographique moindre. Notons que l'analyse à l'échelle fine permet de « repêcher » certaines stations qui avaient été exclues pour l'analyse large à cause de lacunes trop pénalisantes (cf. dernière colonne du Tableau c).



**Figure 3-26 – Découpage en 22 régions homogènes utilisé pour l’analyse large. Les numéros correspondent au code de la région (cf. Tableau c).**



**Figure 3-27 - Découpage en 45 régions homogènes utilisé pour l’analyse fine. Les numéros correspondent au code de la région (cf. Tableau c).**

Le Tableau c résume les propriétés des analyses « fine » et « large » effectuées à l’échelle régionale.

Analyse Large					Analyse Fine					Solde
n.	CODE REGION	Nom région	n. de stations		n.	CODE REGION	Nom région	n. de stations		A.F. - A.L.
			dispo nibles	utilisé es				dispo nibles	utilisé es	
1	1.1	Pyrénées – Nival Pur	2	2	1	=	=	=	=	=
2	1.2	Pyrénées – Transition	7	5	2	=	=	=	=	=
3	2.1	Alpes Internes – Nival Pur	5	4	3	=	=	=	=	=
					4	3.14	Massif Central - SO - Pluvial Pur	7	4	
					5	3.15	Massif Central - O - Pluvial	3	3	
					6	3.16	Massif Central - NO - Pluvial	6	6	
					7	3.17	Massif Central - N - Pluvial	5	5	
					8	3.19	Massif Central - NE - Pluvial	3	2	
4	3.1	Massif Central – Pluvial Pur	24	13			Total		20	7
					9	3.2	Massif Central Transition Est	6	5	
					x	3.21	Massif Central Transition Ouest	1	0	
5	3.2	Massif Central Transition	7	5			Total		5	0
6	4	Vosges	7	6	10	=	=	=	=	=
7	5.1	Jura Préalpes Nord – Pluvial	6	5	11	=	=	=	=	=
8	5.2	Jura Préalpes Nord –	7	6	12	=	=	6	6	=
					13	6.4	Pourtour méditerranéen Ouest	3	3	
					14	6.5	Pourtour méditerranéen Est	4	4	
9	6	Pourtour méditerranéen	7	5			Total		7	2
					15	7.24	Préalpes Sud Drome – Transition	5	4	
					16	7.25	Préalpes Sud HtProv. – Transition	4	3	
10	7.2	Préalpes Sud – Transition	9	5			Total		7	2
					17	8.5	Cévennes Ouest	8	7	
					18	8.6	Cévennes Est	7	5	
11	8	Cévennes	15	8			Total		12	4
					19	9.4	Tables calcaires – SudLoire PoitCh	6	3	
					20	9.5	Tables calcaires – Norm Picardie	2	2	
					21	9.6	Tables calcaires – NordLoire Perche	5	4	
					22	9.7	Tables calcaires – AuCr - BP IdF	5	5	
					23	9.8	Tables calcaires – Champagne Humide	3	3	
12	9	Tables calcaires	21	9			Total		17	8
					24	10.4	Cotes calcaires Est – Plateau Lorrain	6	5	
					25	10.6	Cotes calcaires Est – Plane Bourgogne	4	4	
					26	10.7	Cotes calcaires Est – Coll-HSaone SVosges	3	3	
					27	10.8	Cotes calcaires Est – BP Bourgogne	6	5	
					28	10.9	Cotes calcaires Est – BP Lorraine	3	3	
13	10	Cotes calcaires Est	23	14			Total		20	6
					29	12.5	Armoricaïn – MA Ouest	10	10	
					30	12.6	Armoricaïn – MA Sud Intérieur	10	8	
					31	12.7	Armoricaïn – MA Cotes Nord	3	3	
					32	12.8	Armoricaïn – MA Est Intérieur	8	8	
14	12	Armoricaïn	33	23			Total		29	6
15	13	Landes	3	3	33	=	=	=	=	=
					34	14.15	Cot Aquit Pluvial Pur – Nord Aquitaine	2	2	
					35	14.16	Cot Aquit Pluvial Pur – Centre Est Aquitaine	6	6	
					36	14.17	Cot Aquit Pluvial Pur – Pyrénées Atlantiques	2	0	
16	14.1	Coteaux Aquitains – Pluvial	10	7			Total		8	1
17	14.2	Coteaux Aquitains - Transition	3	2	37	=	=	=	=	=
18	15	Plaine Saône	3	3	38	=	=	=	=	=
19	16	Corse	2	2	39	=	=	=	=	=
20	18	Alsace	2	2	40	=	=	=	=	=
21	19	Grands Causses	5	4	41	=	=	=	=	=
					42	21.3	Massif Central N – Morvan Charollais	7	6	
					43	21.4	Massif Central N – Plateau Limousin Ouest	7	7	
					44	21.5	Massif Central N – Plateau Limousin Est	5	5	
					45	21.6	Massif Central N – Hautes Terres Limousin	5	5	
					46	21.7	Massif Central N – Collines Calc Dordogne	5	4	
22	21	Massif Central Nord	29	19			Total		27	8
		<b>Stations utilisées au total</b>		<b>152</b>					<b>196</b>	<b>44</b>
										<b>+22.5%</b>

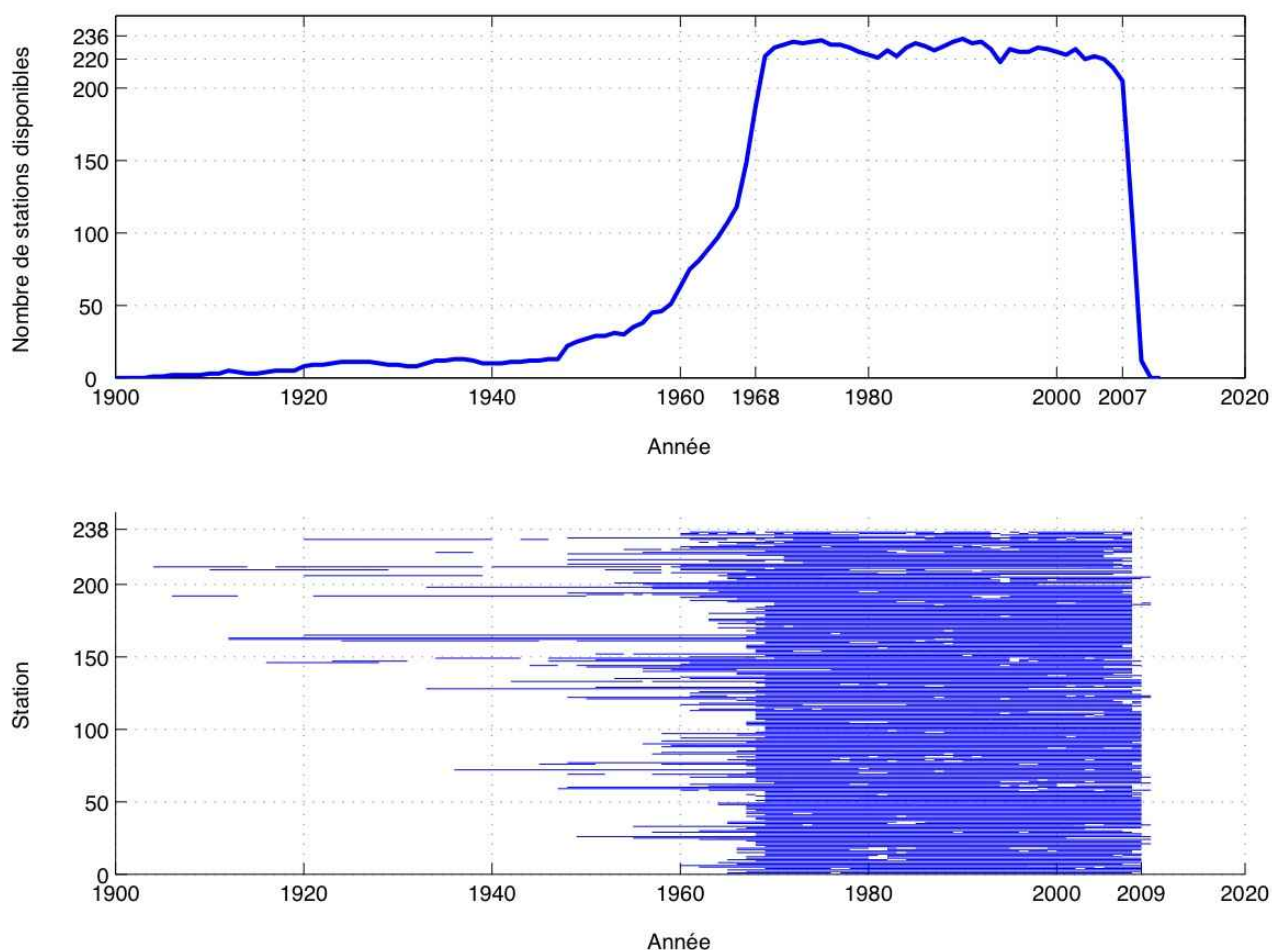
Tableau c. Caractéristiques des régions définies pour les analyses « large » et « fine ».

### 3.4. Résultats

#### 3.4.1. Périodes d'analyse et présentation des résultats

Le choix des périodes d'analyse a été fait en se basant sur la disponibilité des données par station (pour l'analyse locale) et par région (pour l'analyse régionale).

Les graphiques de la Figure 3-28, montrent la disponibilité de données dans les chroniques et le nombre de stations disponibles selon l'année. Cette représentation a permis de choisir la période de 40 ans la plus adéquate (1968-2007), avec 220 stations comportant suffisamment de données sur cette période commune pour effectuer l'analyse de tendance.



**Figure 3-28 – Disponibilité des données pour chaque station (en bas) et nombre de stations disponibles (en haut).**

Les Figure 3-29 et Figure 3-30 montrent, pour les analyses régionales « fine » et « large » respectivement, les périodes communes aux stations d'une région donnée. Notons que les périodes d'analyse ne sont pas strictement égales sur toutes les régions, car cela aurait été trop pénalisant à cause de la difficulté à gérer les lacunes comme expliqué en section 3.3.2. Néanmoins, la période 1968-2007 reste partagée par la majorité des régions. On peut donc considérer que les résultats de l'analyse locale et des deux analyses régionales restent comparables.

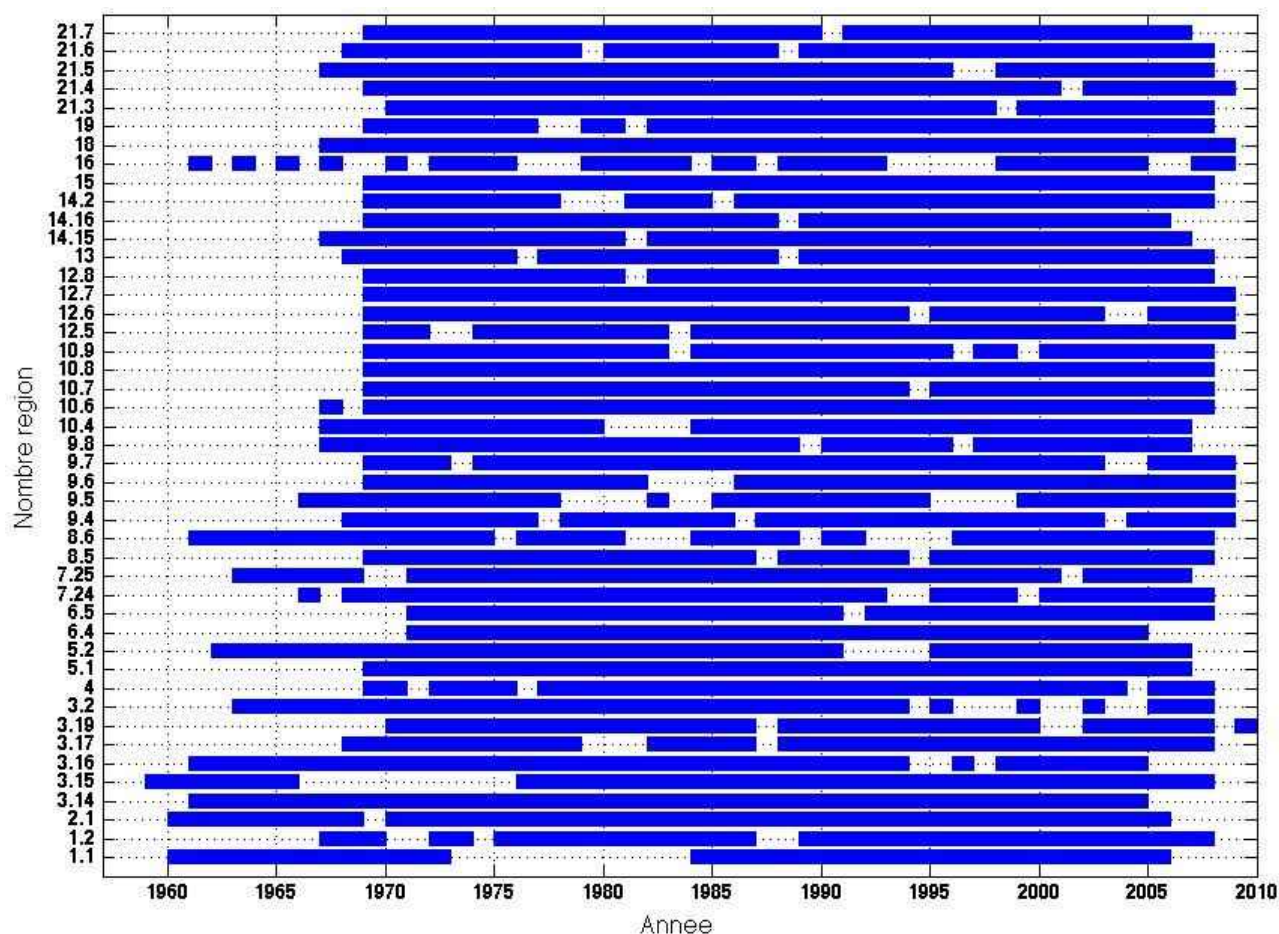


Figure 3-29 – Périodes communes de disponibilité des données pour les stations groupées par région. Analyse Fine (45 régions).

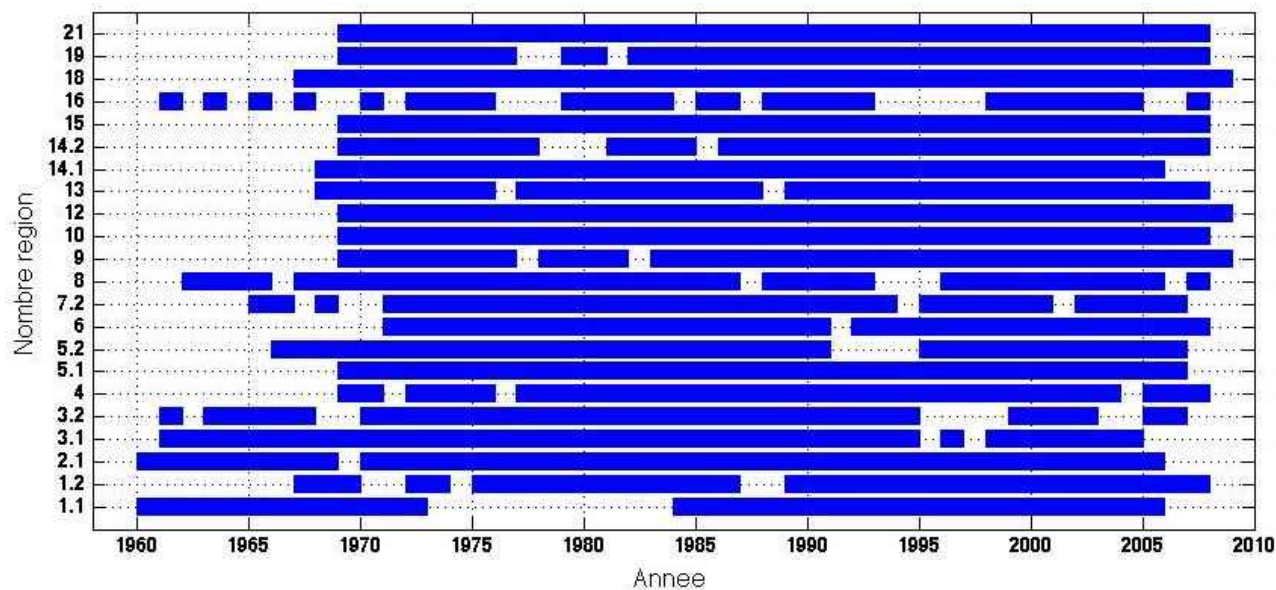


Figure 3-30 – Périodes communes de disponibilité des données pour les stations groupées par région. Analyse Large (22 régions).



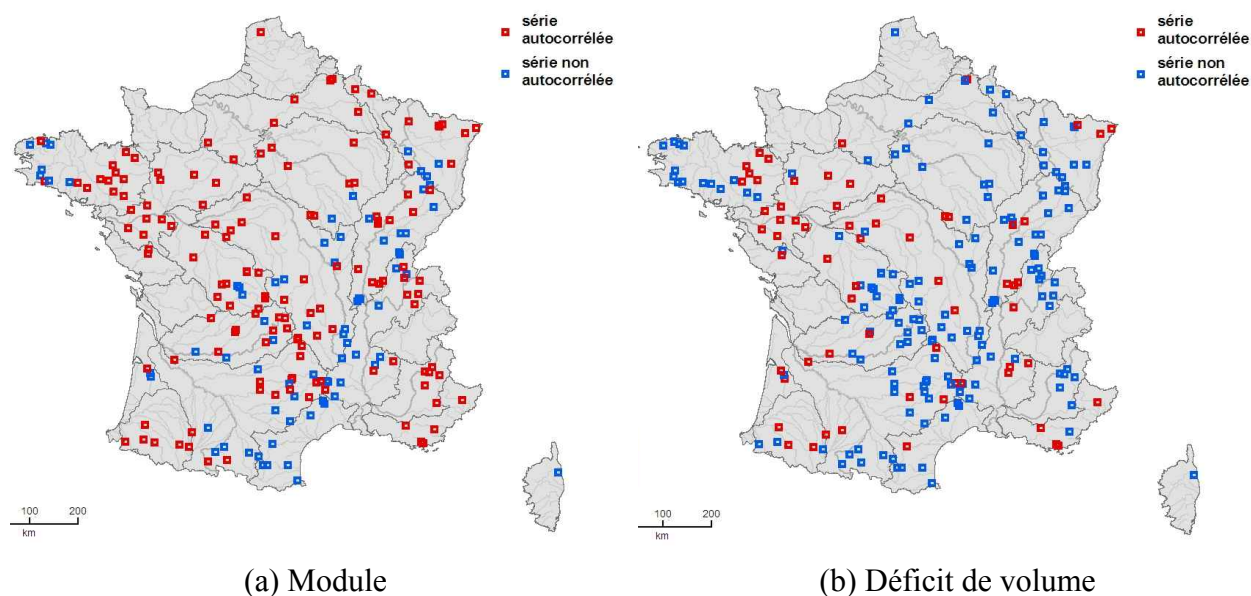
Dans les sections suivantes, les résultats des analyses menées aux niveaux local et régional sont regroupés par indice d'étiage. Pour chaque indice, 3 cartes sont proposées :

- La carte des résultats locaux (e.g. Figure 3-32), où un symbole représente pour chaque station la significativité de la tendance ainsi que son amplitude (exprimé en changement relatif annuel, i.e. une tendance de +0.015 correspond à une augmentation d'environ 1.5% par an en moyenne).
- Deux cartes pour les analyses régionales « large » et « fine » (e.g. Figure 3-33). Pour chaque région, un code couleur indique si la tendance régionale est significative. Les points noirs désignent les stations composant la région, et le chiffre désigne leur nombre. Il sera important de considérer ce nombre dans l'interprétation des résultats, car certaines régions ne comportent que très peu de stations : un changement cohérent détecté sur 2 stations n'a pas la même portée qu'un changement cohérent sur 10 stations ! Notons également qu'il était difficile de faire également figurer sur ces cartes l'amplitude des tendances sans rendre la figure illisible. Les amplitudes ont ainsi été regroupées en 4.2 et 4.2 (évolution annuelle exprimée en pourcentage de l'écart-type).

Une dernière remarque importante pour l'interprétation des résultats doit être faite. Les séries d'indice peuvent présenter une autocorrélation temporelle significative. Ceci ne pose pas de problème pour l'analyse locale, puisque nous utilisons le test de Mann-Kendall modifié pour prendre en compte cette possible autocorrélation (voir section 3.2.1). Par contre, le test régional suppose les séries temporellement indépendantes (voir section 3.2.2). Si cette hypothèse est abusive, le test pourrait avoir tendance à sur-évaluer la significativité de la tendance régionale.

Afin d'estimer le rôle potentiel joué par cette autocorrélation temporelle, nous avons évalué la significativité des autocorrélations pour chaque indice. Il ressort de cette étude que les indices de saisonnalité (début, centre et fin d'étiage, date du minimum annuel) et l'indice « temps de récession » ne sont pas autocorrélés. Par contre, les indices de sévérité (durée, déficit de volume, minimum annuel) peuvent être autocorrélés : environ 30% des stations présentent une autocorrélation significative au risque 10% pour ces indices. De même, le débit moyen annuel tend à être autocorrélé, avec environ 65% des stations présentant une autocorrélation significative au risque 10%.

La Figure 3-31 montre la répartition spatiale des autocorrélations significatives pour deux indices. Le débit moyen annuel présente une autocorrélation significative sur une grande partie du territoire. Les résultats de l'analyse régionale doivent donc généralement être considérés avec précaution pour cet indice. Pour l'indice « déficit de volume », les autocorrélations significatives se regroupent à l'Ouest du bassin parisien. Cette répartition est typique des trois indices de sévérité (durée, déficit de volume et minimum annuel). En conséquence, la présence d'une éventuelle tendance régionale sur la sévérité des étiages dans cette région devra également être considérée avec précaution.



**Figure 3-31. Cartographie des autocorrélations significatives pour le module (a) et le déficit de volume (b).**

Précisons enfin que seuls les résultats concernant l'année hydrologique complète figurent dans le corps de ce rapport. Les résultats par sous-saison pour les régimes de transition (cf. section 3.1) sont regroupés en 4.2. De même, les résultats pour les stations des DOM, seulement analysées à l'échelle locale, sont regroupés en 4.2.



### 3.4.2. Débit moyen annuel

Les résultats pour le débit moyen annuel de l'analyse locale (Figure 3-32) 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. Les cartes de l'analyse régionale (Figure 3-33) confirment globalement cette observation (avec les réserves émises en section 3.4.1 dues à la présence d'autocorrélation). En plus des trois régions précédentes, on peut également observer des baisses régionales cohérentes pour les stations pluvio-nivales des Alpes et du Jura, sur le pourtour Méditerranéen et dans les Landes. Remarquons par contre que les changements ne sont pas significatifs pour les stations purement nivales des Pyrénées et des Alpes. Enfin, on observe une hausse significative pour la région des Tables Calcaires en Normandie et Picardie (analyse fine, région 9.5), mais cette région ne contient que deux stations.

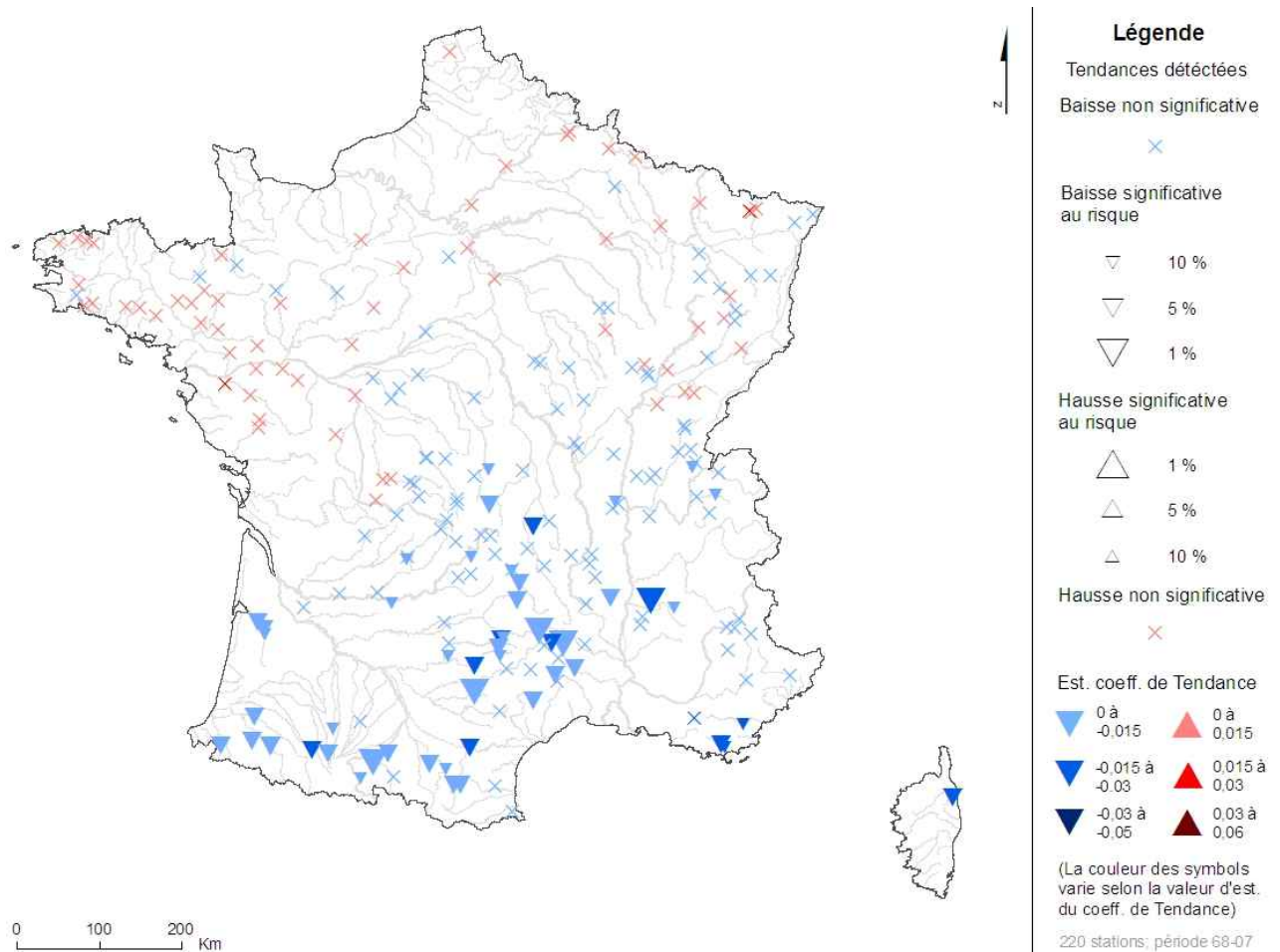


Figure 3-32 – Résultats de l'analyse locale pour l'indice « module annuel ».

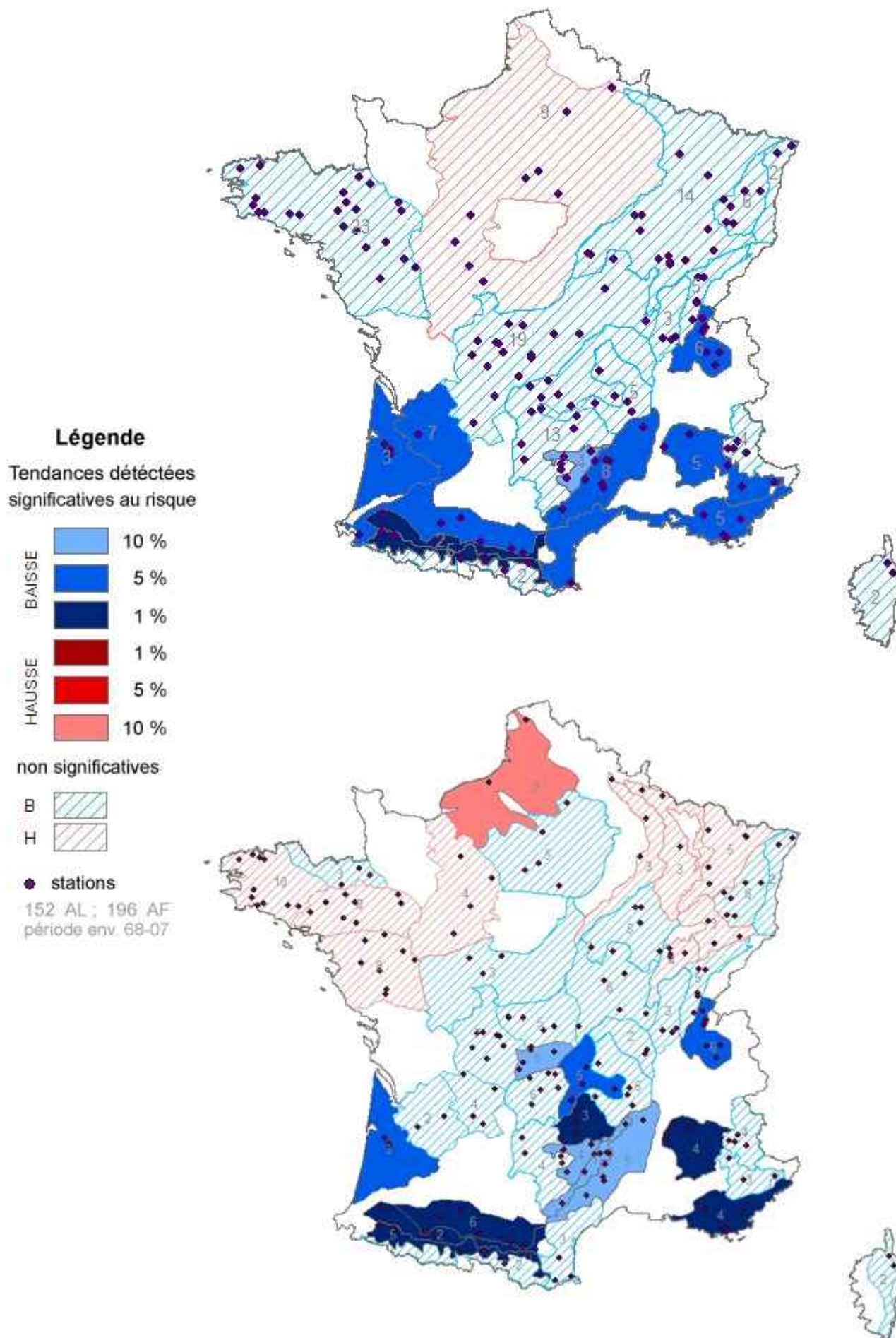


Figure 3-33 – Résultats des analyses régionales pour l'indice « module annuel »

### 3.4.3. Débit journalier minimum annuel

Dans l'analyse locale (Figure 3-34) on détecte des tendances significatives à la baisse (donc une aggravation de la sévérité des étiages) sur 19% des stations, contre seulement 3% des stations à la hausse. Les régions les plus concernées par ces baisses sont le Massif Central et les Cévennes, et une partie des Pyrénées. Dans l'analyse régionale (Figure 3-35) des détections significatives à la baisse apparaissent aussi dans les stations à régime de transition des Vosges, des Alpes et du Jura, ainsi qu'en Provence-Côte d'Azur et en Corse.

A l'échelle régionale, on observe également des tendances significatives à la hausse (donc des étiages moins sévères). Ces hausses concernent deux régions qui recouvrent le sud de la Bretagne, le Pays de Loire et le nord du Poitou Charente (analyse fine, 12.8 et 12.6). La significativité de la détection est relativement faible (10%) et limitée à l'analyse régionale fine, mais le nombre de stations est important (8 stations pour chacune des deux régions). Néanmoins, l'autocorrélation des séries pourrait jouer un rôle dans ces tendances (cf. section 3.4.1). On observe également une hausse régionalement significative sur deux stations purement nivales des Pyrénées. On peut noter que les stations purement nivales des Alpes présentent également une augmentation, mais celle-ci n'est pas significative.

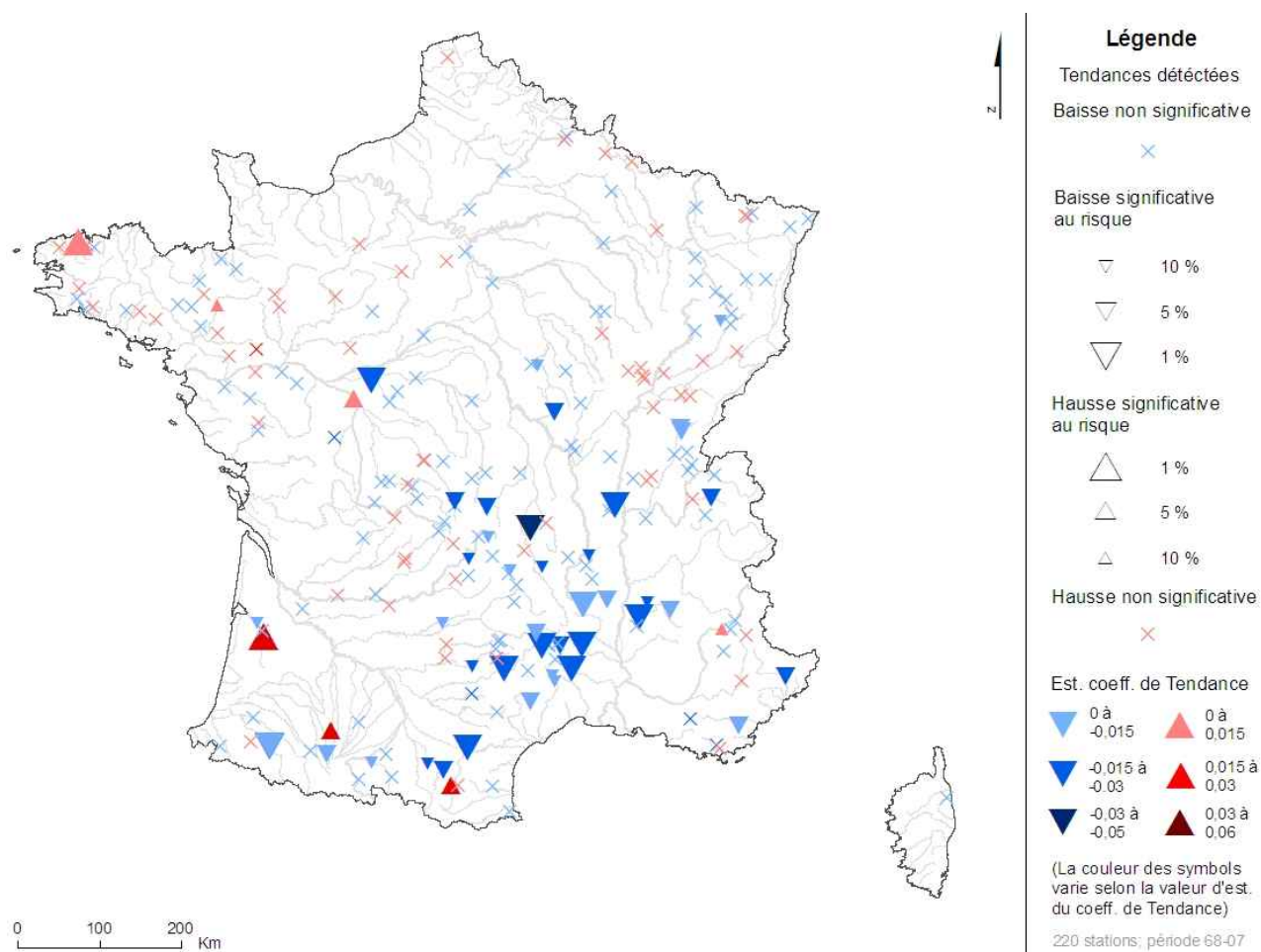


Figure 3-34 – Résultats de l'analyse locale pour l'indice « débit journalier minimum annuel ».

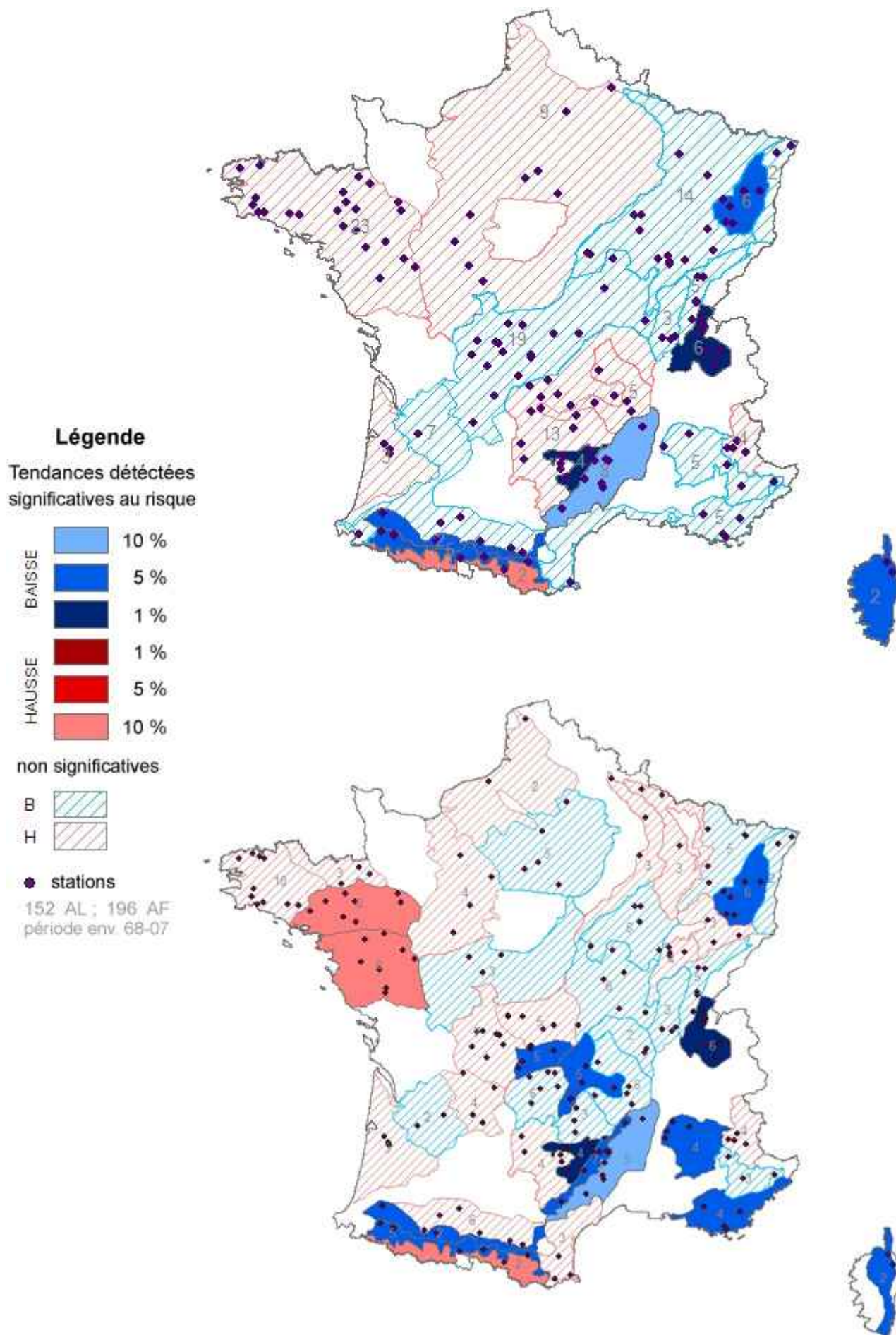
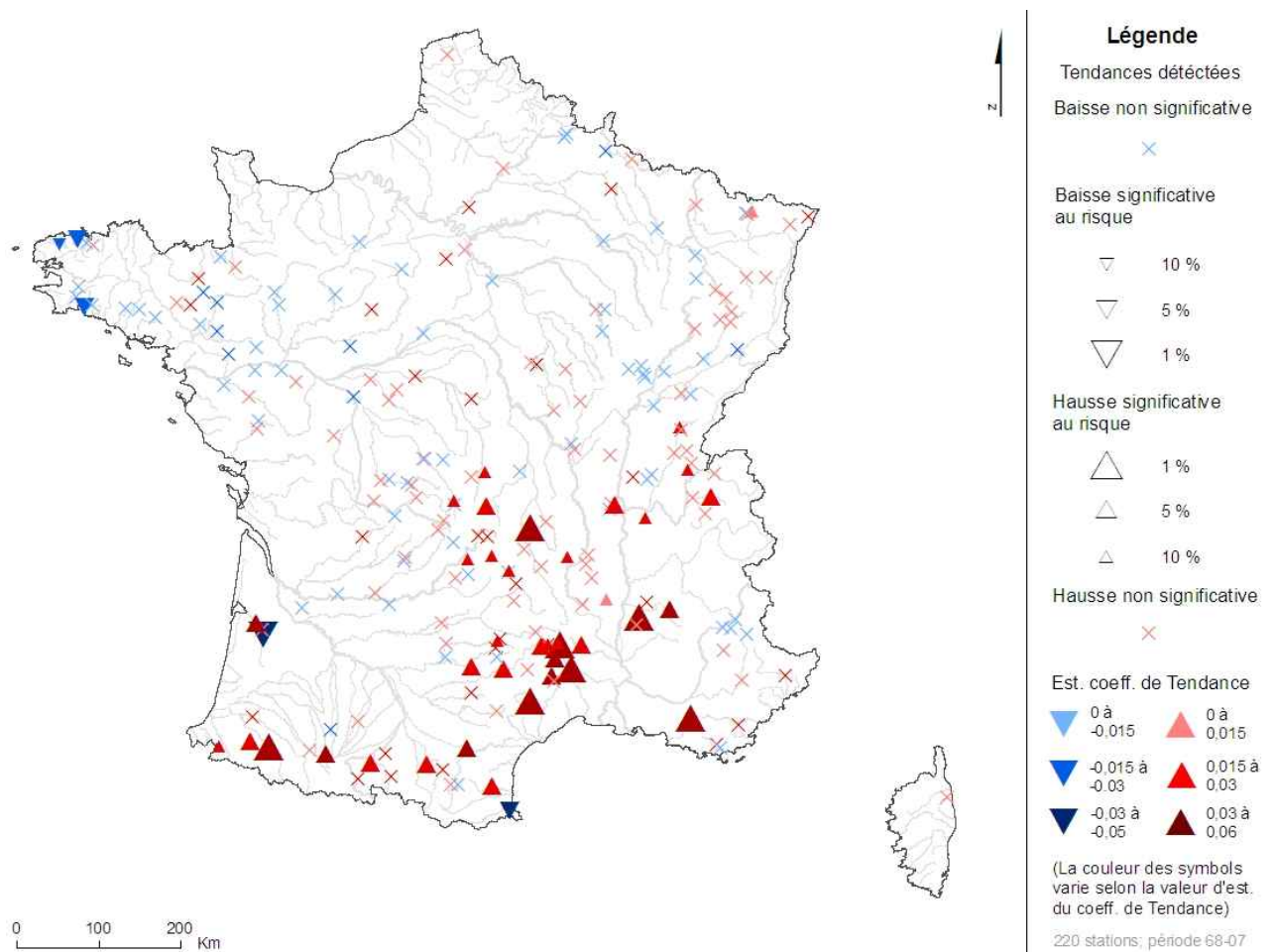


Figure 3-35 – Résultats des analyses régionales pour l'indice « débit journalier minimum annuel ».

### 3.4.4. Durée de l'étiage

Dans l'analyse locale (Figure 3-36) on met en exergue de nombreuses hausses significatives (18% des stations) et seulement quelques baisses significatives (2% des stations). Comme pour les indices « module » et « minimum annuel », les augmentations significatives de la durée des étiages se regroupent sur les Cévennes, le Massif Central et les Pyrénées. L'analyse régionale (Figure 3-37) permet d'ajouter à cette liste les régions les régimes de transition des Préalpes et du Jura, les Coteaux Aquitains, la Provence-Côte d'Azur et la Corse. Les changements pour les stations purement nivales des Alpes et des Pyrénées ne sont par contre pas significatifs.

On observe également une diminution régionalement significative de la durée d'étiage sur 10 stations de la Pointe Bretagne (analyse fine, région 12.5).



**Figure 3-36 – Résultats de l'analyse locale pour l'indice « durée de l'étiage ».**



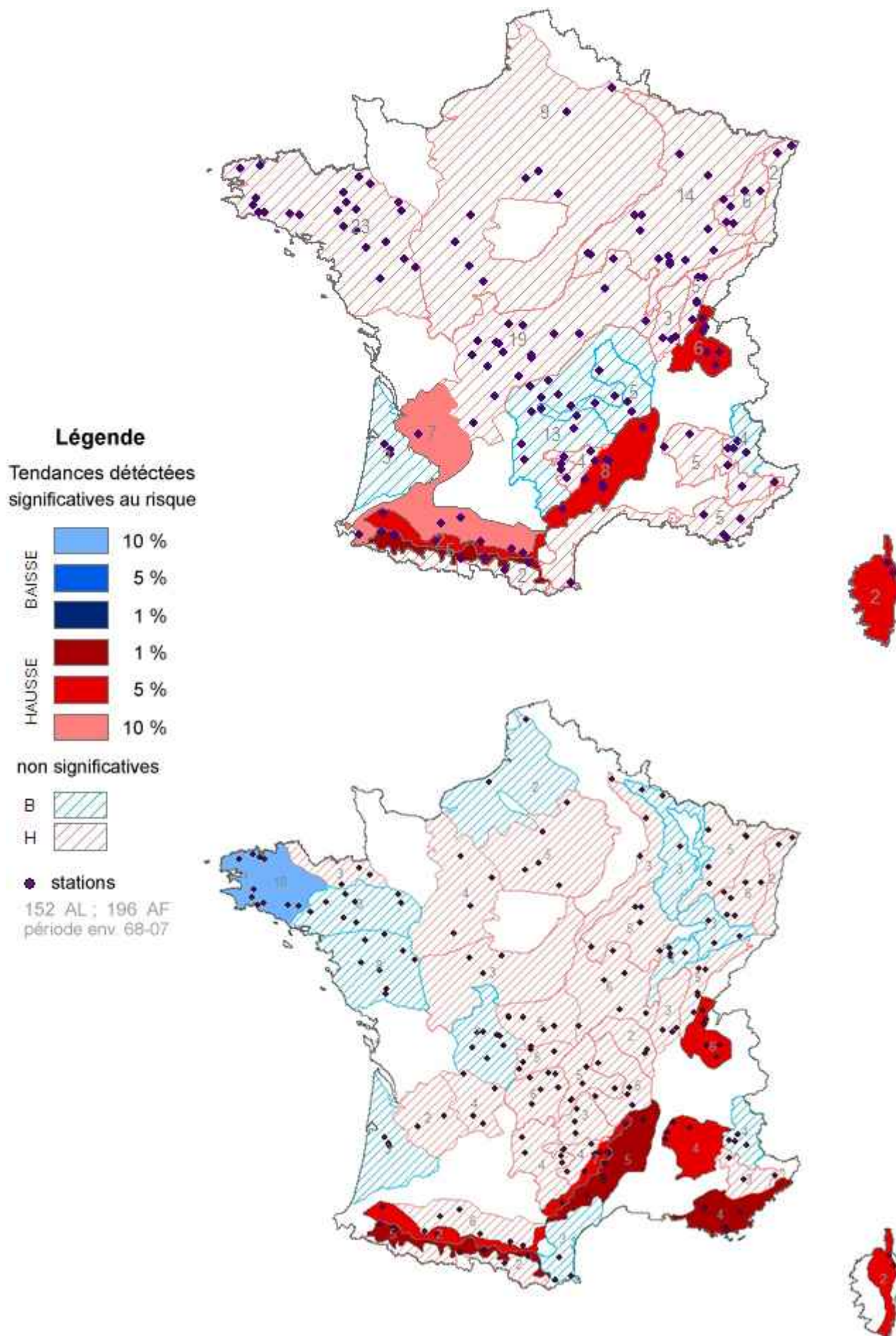


Figure 3-37 – Résultats des analyses régionales pour l'indice « durée de l'étiage ».

### 3.4.5. Déficit de volume

Les résultats pour le déficit de volume sont très similaires à ceux obtenus pour la durée d'étiage, ce qui n'est guère étonnant car ces deux indices sont très corrélés (cf. précédent rapport d'activité, Giuntoli and Renard 2009). Les seules différences notables concernent l'analyse régionale fine (Figure 3-39), où les régions du Massif Central Nord (région 3.17 en Auvergne) et des Grands Causses (région 19, Nord du Languedoc Roussillon) pressentent cette fois-ci une tendance significative à la hausse. Inversement, le changement à la baisse de la pointe Bretagne (région 12.5) n'est plus significatif.

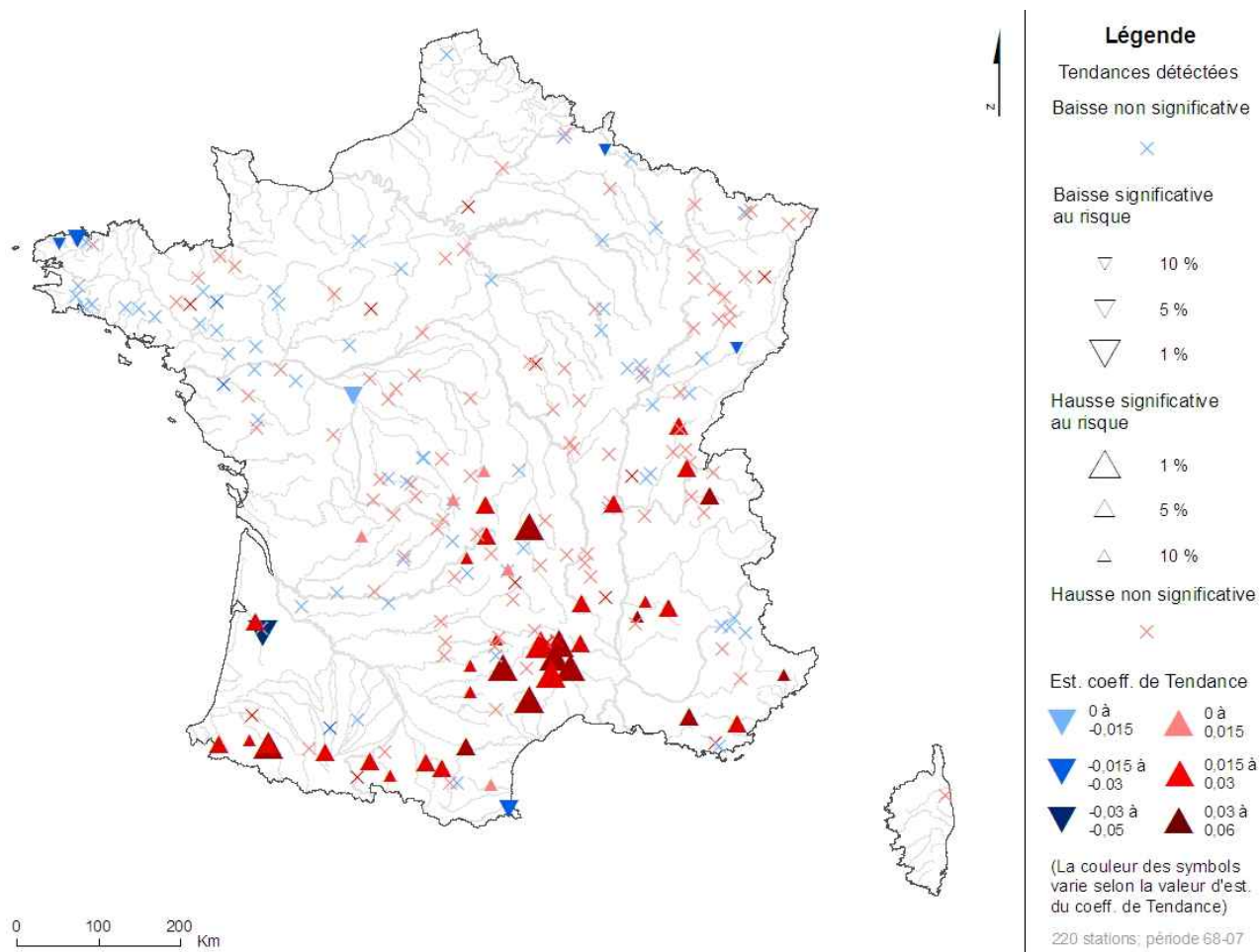


Figure 3-38 – Résultats de l'analyse locale pour l'indice « déficit de volume ».

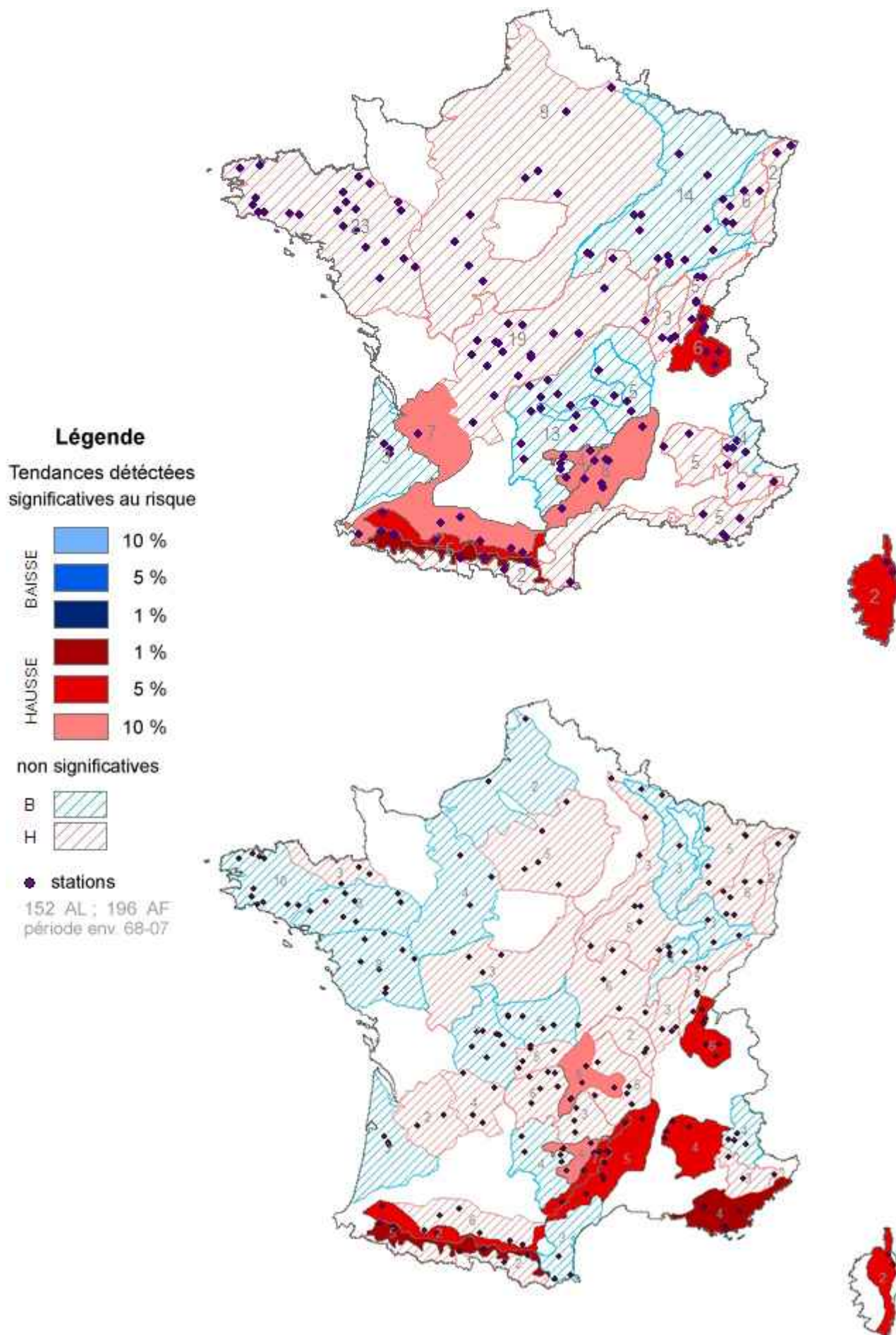
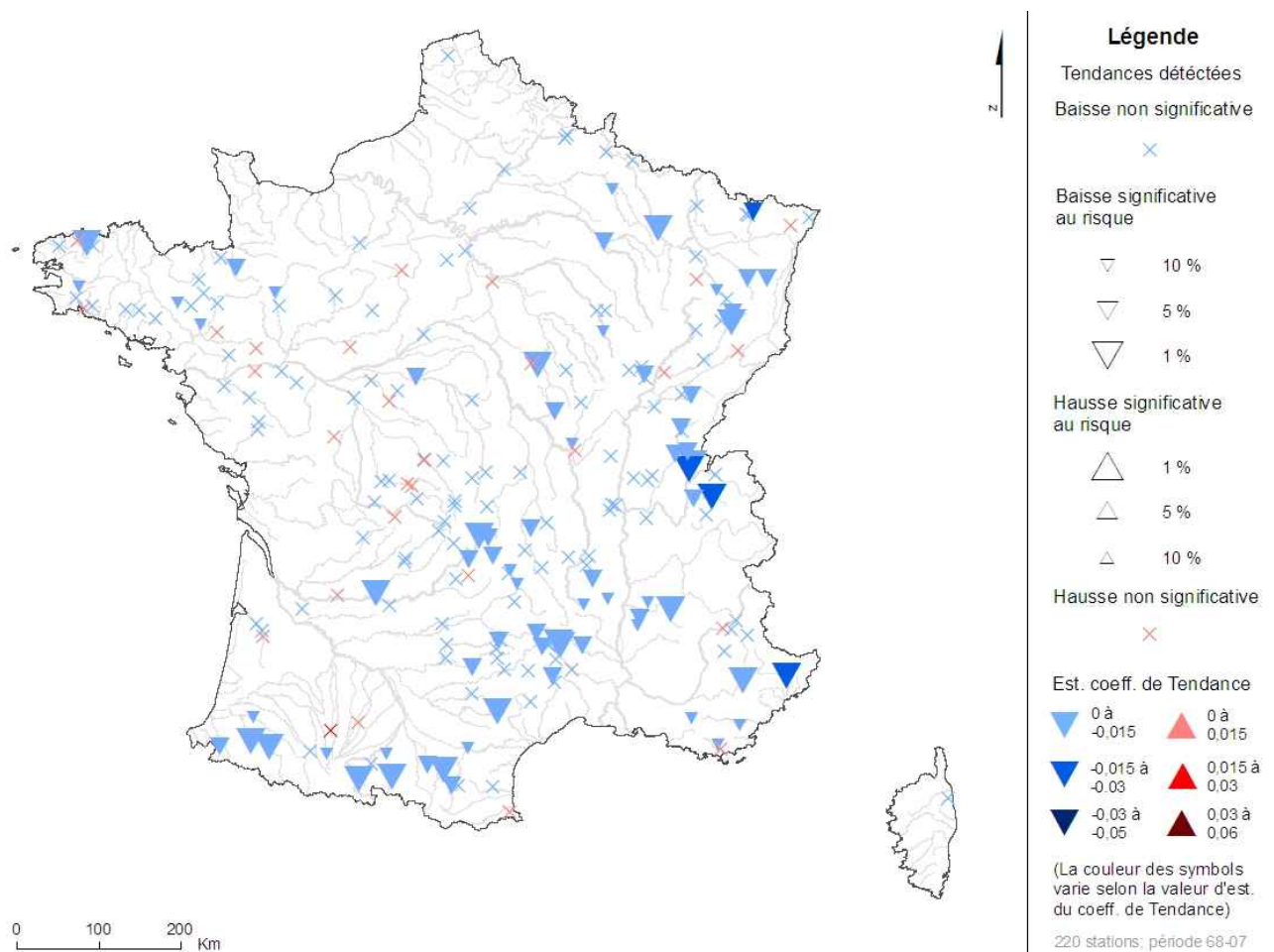


Figure 3-39 – Résultats des analyses régionales pour l'indice « déficit de volume ».

### 3.4.6. Début de l'étiage

La variable de saisonnalité « début d'étiage » est une variable pour laquelle on détecte de très nombreux changements à la baisse (i.e. le début de la période d'étiage tend à être plus précoce) : 32% des stations présentent une baisse significative à l'échelle locale (Figure 3-40). Ces baisses significatives sont notamment observées sur les Pyrénées, le Massif Central, les Cévennes, le Jura et les Vosges. L'analyse régionale (Figure 3-41) confirme la cohérence de ces changements : on observe une précocité accrue sur les régimes de transition des Pyrénées, des Alpes et du Jura, dans les Cévennes, le nord du Massif-Central, les Tables Calcaires de Bourgogne et d'Ile de France, les Coteaux Aquitains et la Bretagne.

Précisons qu'une difficulté méthodologique supplémentaire apparaît pour cet indice, comme pour les indices de centre et fin d'étiage (tous basés sur le concept de « centre de masse », cf. Giuntoli and Renard 2009). En effet, ces indices ne sont pas définis les années où le débit n'est pas passé sous le seuil de bas débit choisi. De telles années doivent donc être considérées comme « manquantes ». Etant donné les difficultés à gérer les données manquantes, comme expliqué en section 3.3.2, il peut s'avérer impossible de constituer une région avec suffisamment d'années non-manquantes concomitantes à toutes les stations. Ceci explique pourquoi certaines régions de l'analyse régionale ne peuvent être analysées pour ces indices (elles sont représentées en gris dans la Figure 3-41).



**Figure 3-40 – Résultats de l'analyse locale pour l'indice « début d'étiage ».**

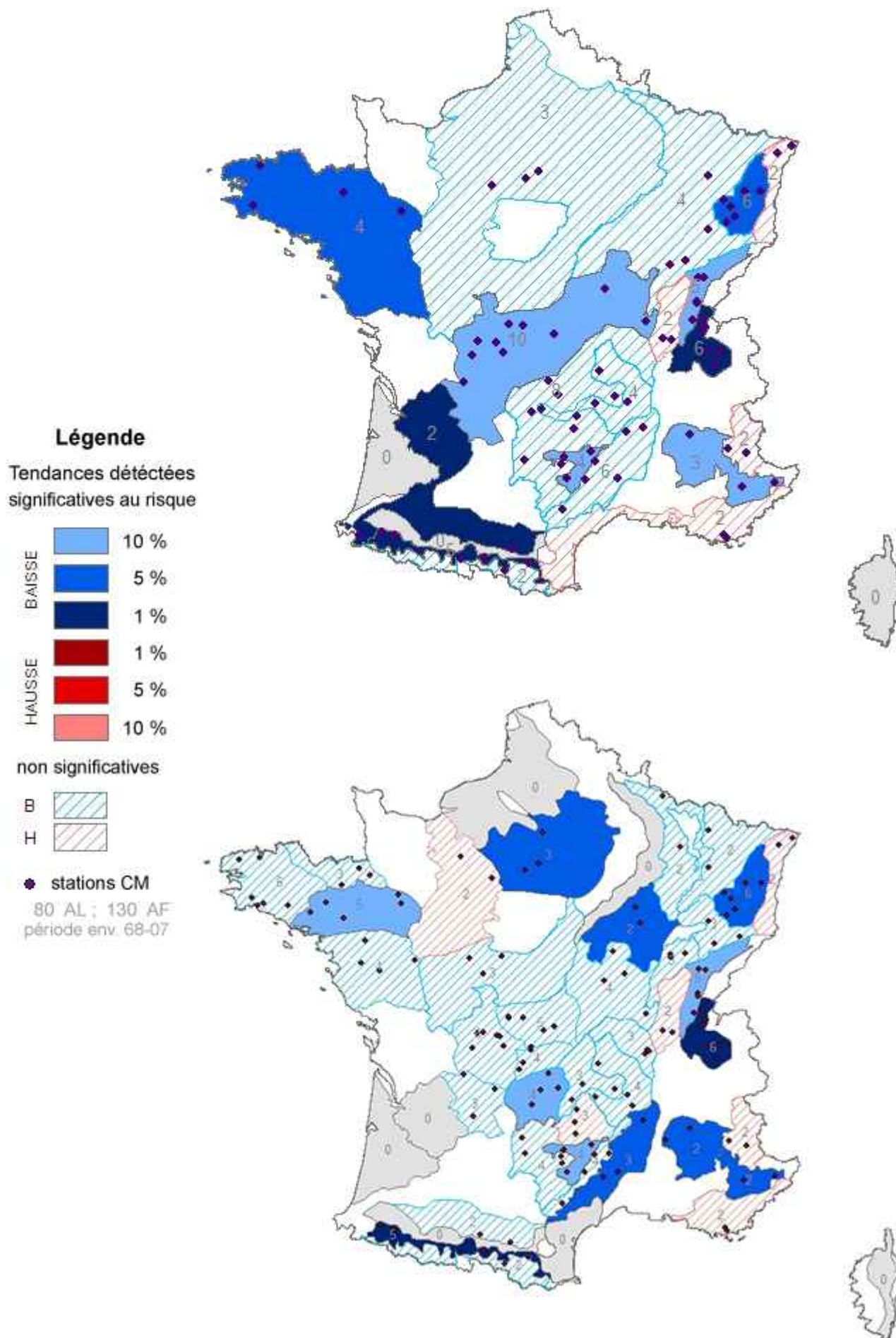


Figure 3-41 – Résultats des analyses régionales pour l'indice « début d'étiage ».

### 3.4.7. Centre de l'étiage

Les résultats pour cet indice sont similaires à ceux observés pour le début de l'étiage, bien que généralement moins marqués : 27% des stations présentent une précocité significativement accrue du centre de l'étiage à l'échelle locale (Figure 3-42). Ces baisses significatives sont notamment observées sur les Pyrénées, le Massif Central, le Jura, les Vosges et la Bretagne. L'analyse régionale (Figure 3-43) dévoile des changements cohérents dans les Pyrénées (à la fois pour les stations purement nivales et les régimes de transition), les Vosges, le Jura, le nord du Massif-Central, les Tables Calcaires de Bourgogne et le sud Bretagne. A l'inverse, on observe également à l'échelle régionale une augmentation significative pour deux stations de la plaine d'Alsace.

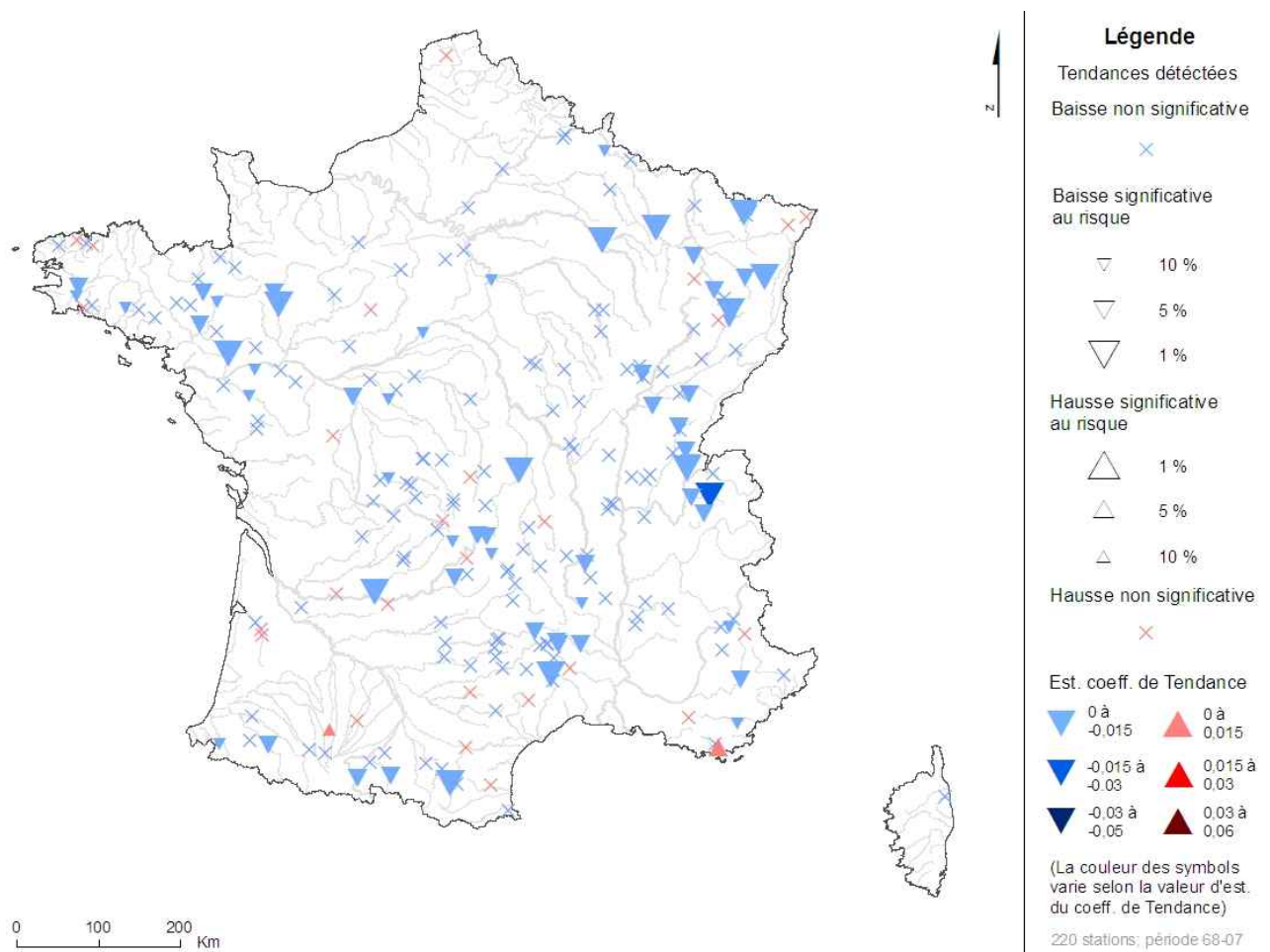


Figure 3-42 – Résultats de l'analyse locale pour l'indice « centre d'étiage ».

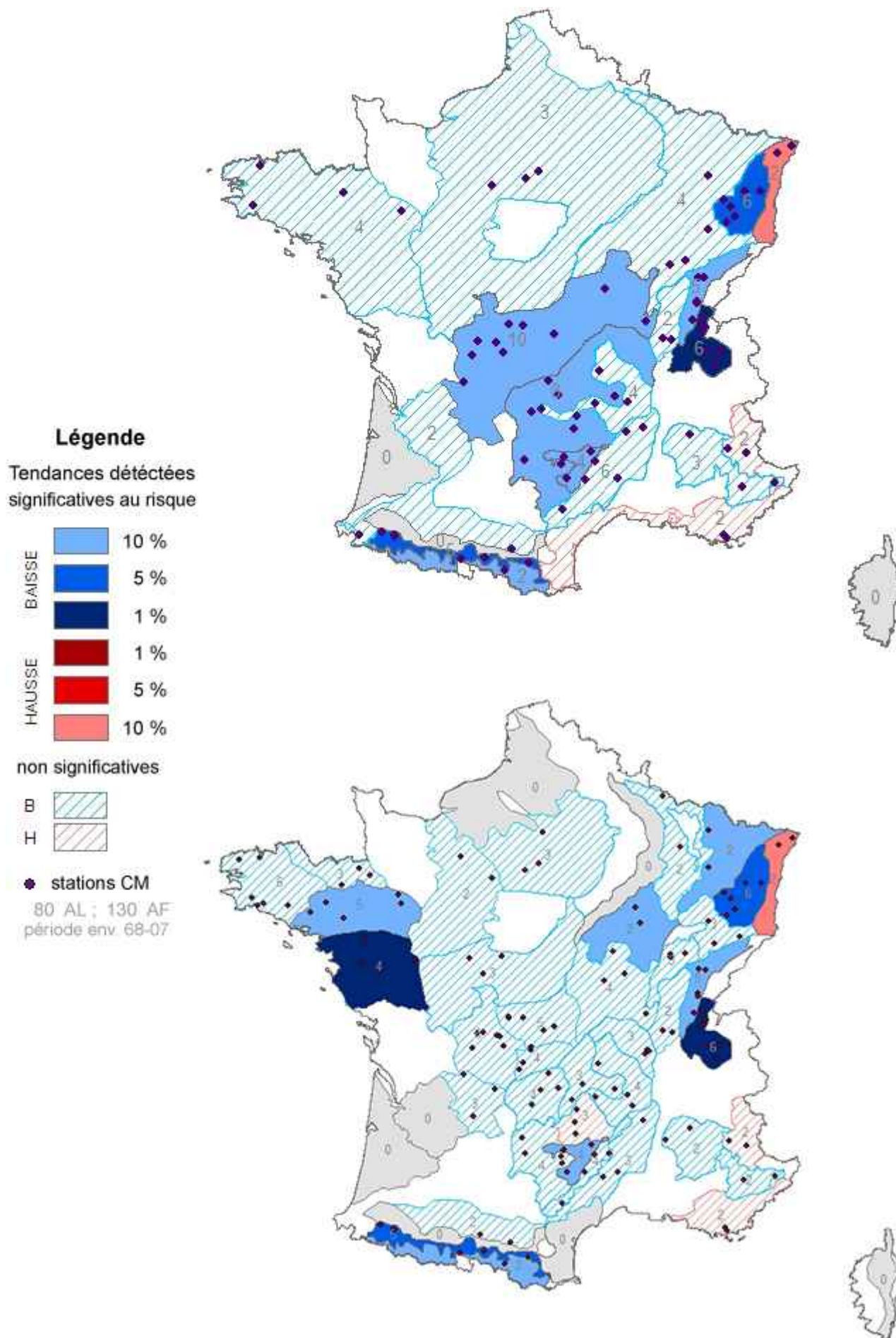


Figure 3-43 – Résultats des analyses régionales pour l'indice « centre d'étiage ».

### 3.4.8. Date du minimum annuel

La date du minimum annuel vise à caractériser la saisonnalité du pic d'étiage (à comparer avec l'indice « centre » qui visait plutôt à caractériser le centre de gravité de l'étiage). Les détections pour cet indice sont peu nombreuses au niveau local (16% des stations, Figure 3-44), et sont regroupés en Franche Comté et sur le nord des Alpes. Au niveau régional (Figure 3-45), on détecte des tendances à la baisse sur les régions du Massif Central Nord (analyse large, région 21), du Jura (régions 5.2-5.1), des Cocotes Calcaires Est (région 10.8, Bourgogne, analyse fine), des Tables Calcaires (régions 9.7 et 9.8, Ile de France et Champagne, analyse fine). La région des cours d'eau à régime de transition des Pyrénées (1.2, analyse fine) est la seule région de la partie sud du pays à montrer une précocité accrue de la date du minimum annuel. Enfin, la seule hausse significative au niveau régional est détectée sur deux stations de la plaine d'Alsace, comme c'était déjà le cas pour le centre de la période d'étiage.

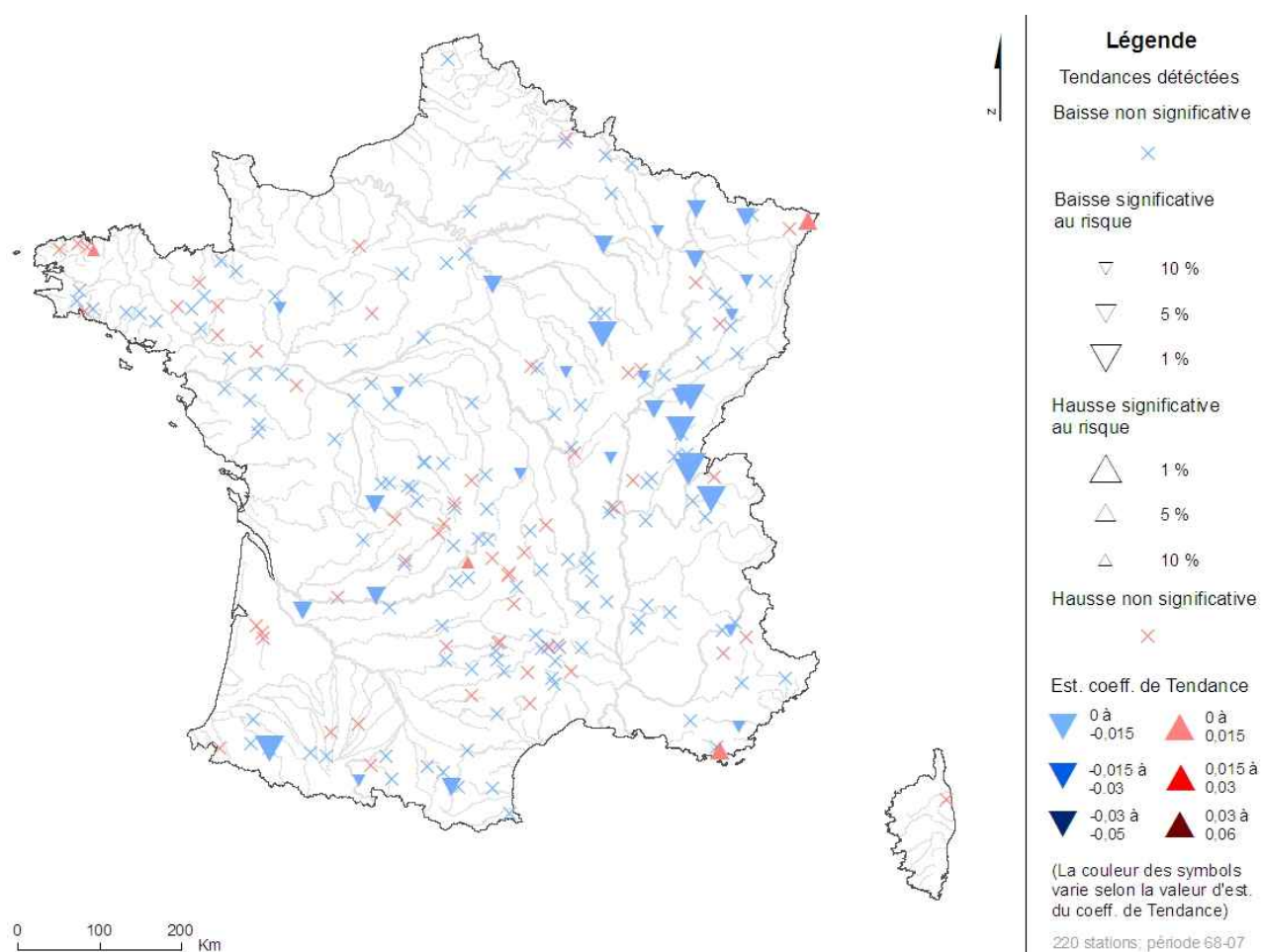


Figure 3-44 – Résultats de l'analyse locale pour l'indice « date du débit minimum annuel ».



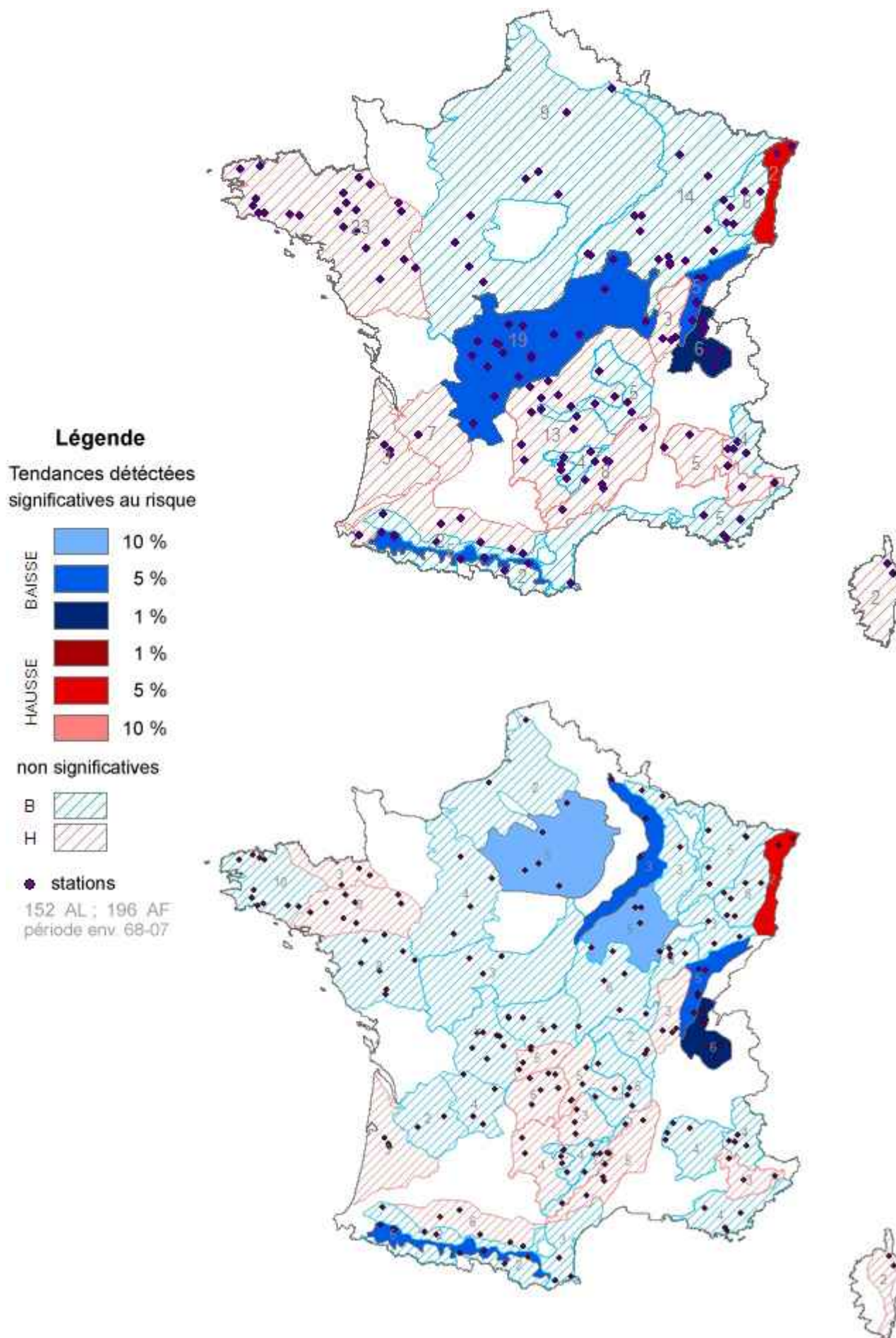


Figure 3-45 – Résultats des analyses régionales pour l'indice « date du débit minimum annuel ».

### 3.4.9. Fin de l'étiage

Les changements significatifs pour cet indice sont peu nombreux au niveau local (17% des stations, Figure 3-46), et correspondent surtout à des diminutions (ie précocité accrue) regroupées dans le nord-est du pays et en Bretagne. Au niveau régional (Figure 3-47), les seuls changements significatifs concernent ces deux zones géographiques : on observe des diminutions significatives en Bretagne (à l'exception des côtes nord, régions 12.5, 12.6, 12.8, analyse fine), sur les tables calcaires du nord de la Loire (région 9.6, analyse fine), dans les Vosges (région 4) et les cotes calcaires environnantes (régions 10.4 et 10.7, analyse fine) et dans les stations pluviales du Jura.

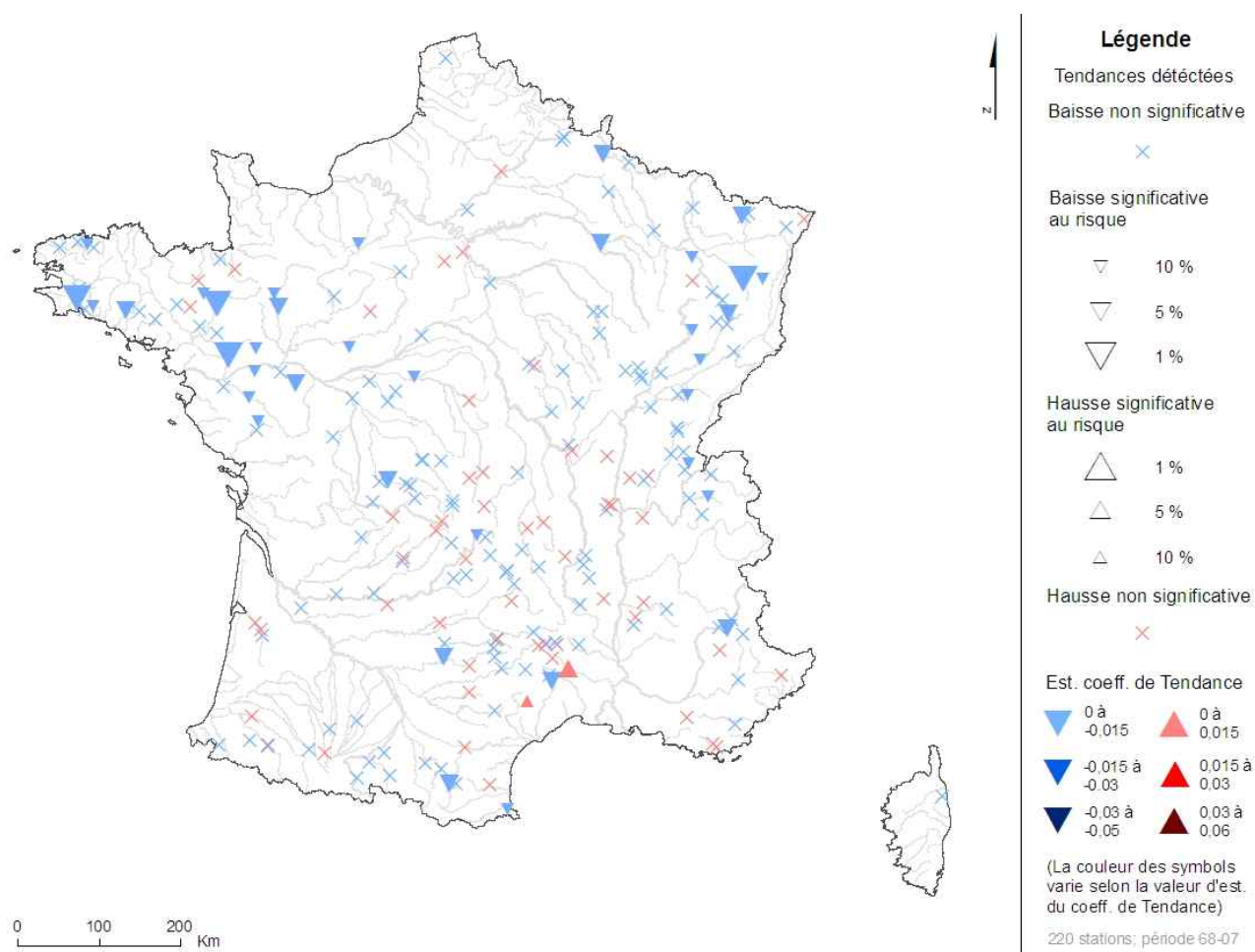


Figure 3-46 – Résultats de l'analyse locale pour l'indice « fin d'étiage ».

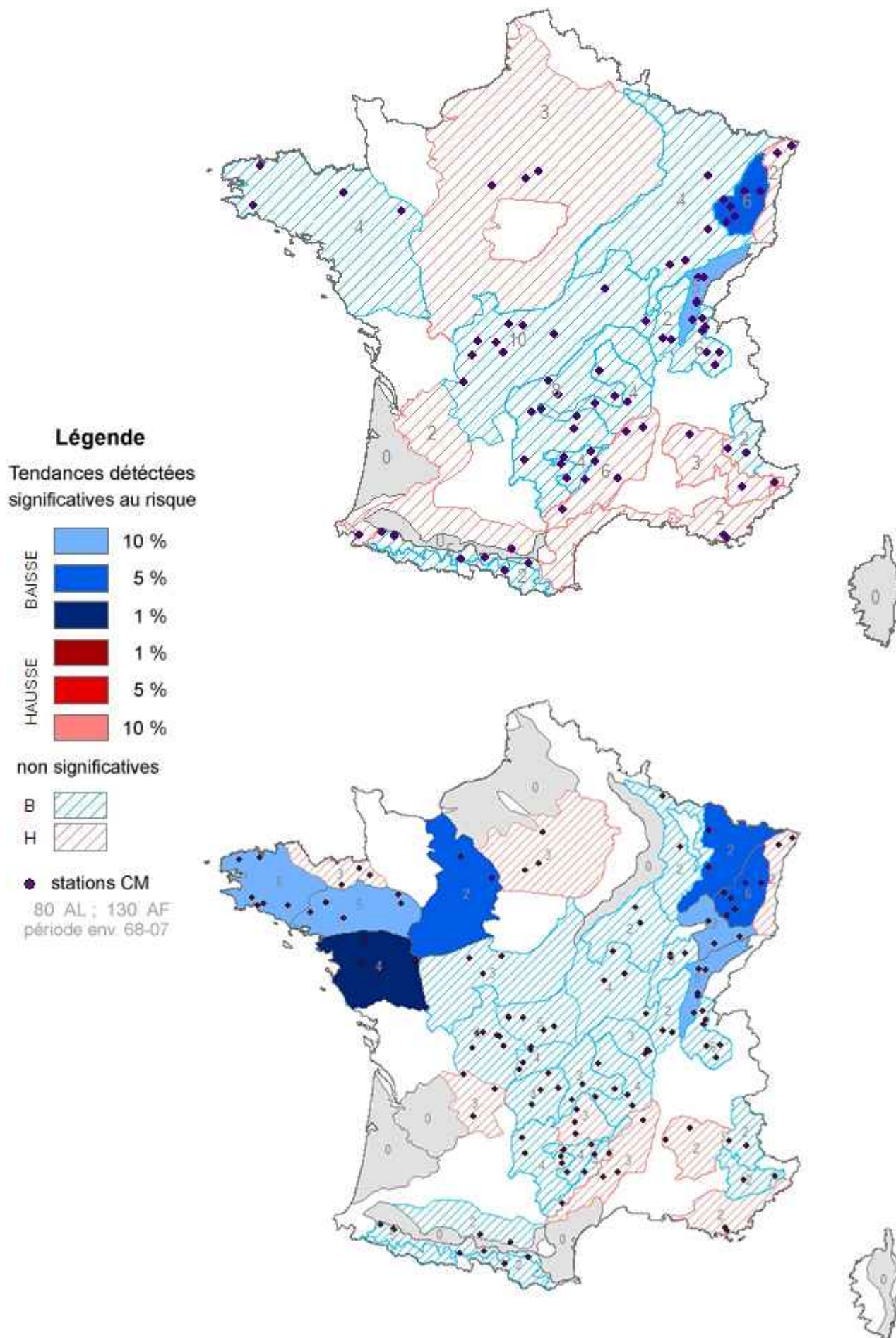


Figure 3-47 – Résultats des analyses régionales pour l'indice « fin d'étiage ».

### 3.4.10. Temps de récession

L'indice « temps de récession » désigne la durée qui sépare le centre et le début de l'étiage. Au niveau local (Figure 3-48), on observe un regroupement de hausses significatives dans les Pyrénées et le Massif Central. A l'échelle régionale (Figure 3-49), des hausses significatives apparaissent en Bretagne, dans les stations pluvio-nivales des Pyrénées et des Alpes, en Aquitaine, dans les Cévennes et en Ile de France. A l'inverse, on observe une diminution significative sur les tables calcaires du nord de la Loire. Notons néanmoins que le nombre de stations est faible sur ces régions, les résultats sont donc à considérer avec précaution.

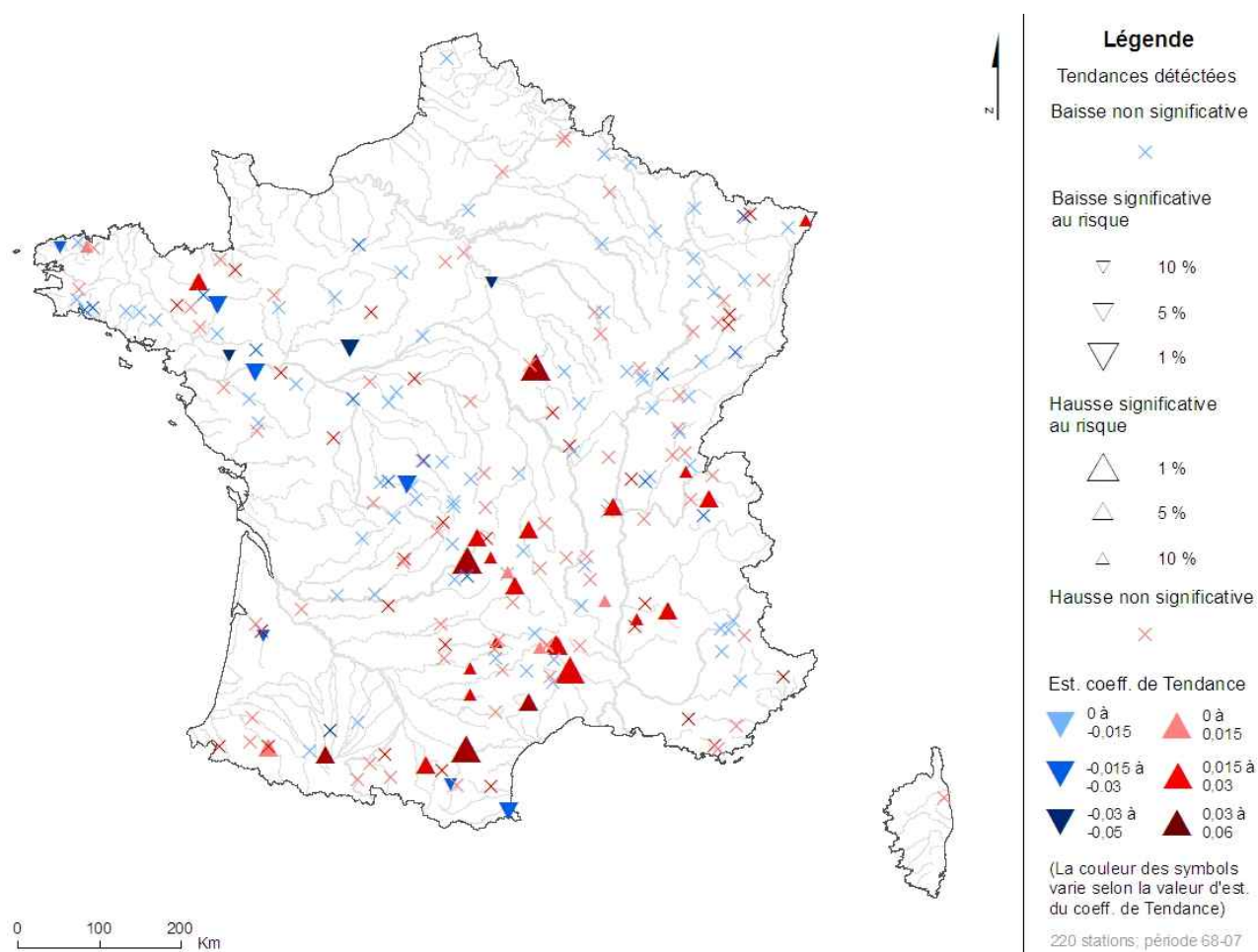


Figure 3-48 – Résultats de l'analyse locale pour l'indice « temps de récession ».

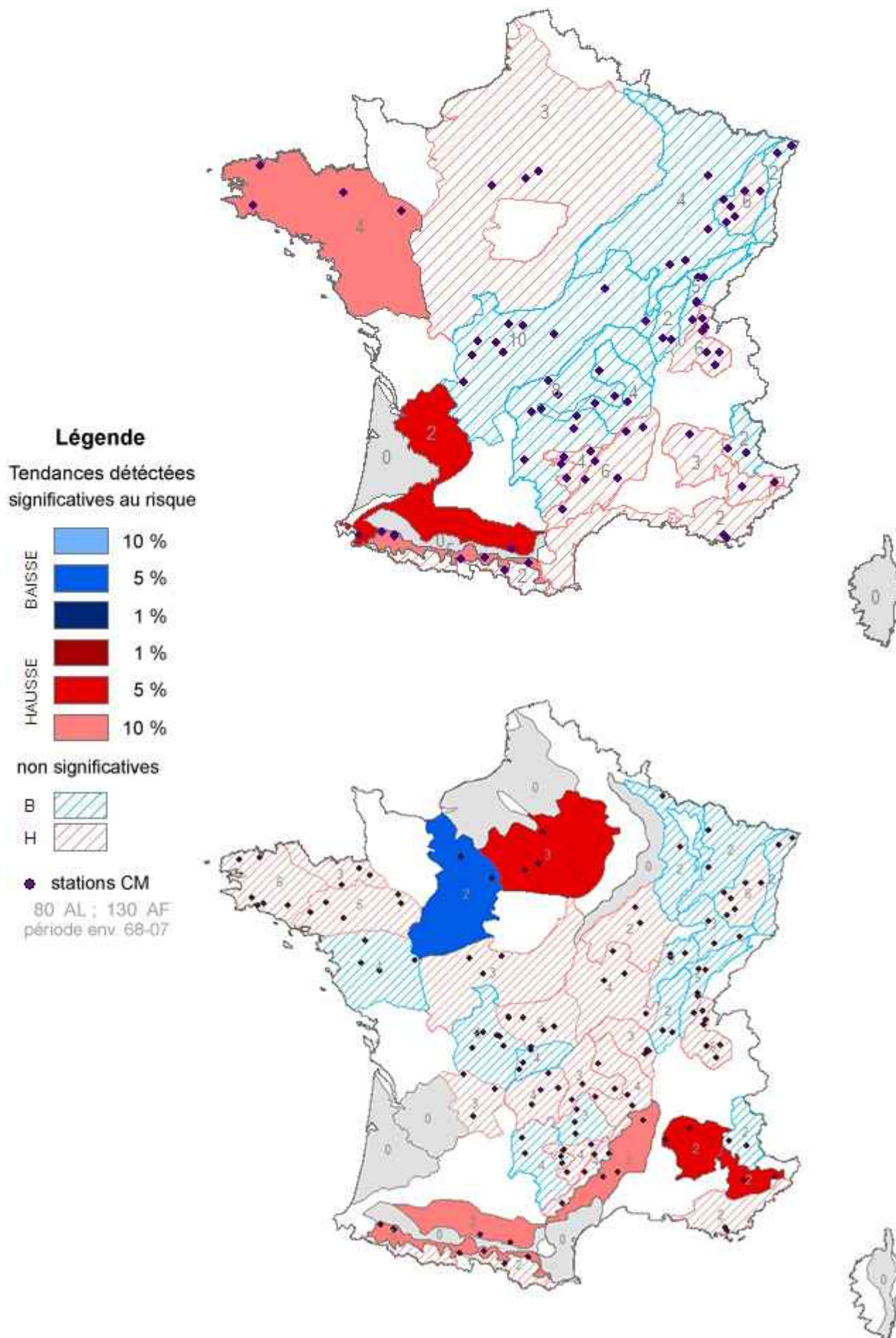


Figure 3-49 – Résultats des analyses régionales pour l'indice « temps de récession ».

### 3.4.11. Base Flow Index

L'indice du BFI correspond au ratio entre l'écoulement annuel lié au débit de base et l'écoulement annuel total. Il semble difficile de dégager des comportements globaux de l'analyse locale (Figure 3-50), si ce n'est que la plupart des hausses significatives (correspondant à une contribution relative accrue du débit de base au débit total) s'observent dans le sud-ouest du pays, alors que les baisses concernent plutôt le nord-est.

Au niveau régional (Figure 3-51), des baisses significatives sont observées dans les Landes, sur les stations purement nivales des Pyrénées et sur l'Ouest du Massif Central (région 3.15, analyse fine), alors que des hausses significatives sont observées en Normandie-Picardie (région 9.5, analyse fine), au nord-est du massif central (région 3.19, analyse fine), sur le Jura (régions 5.1 et 5.2) et en Corse. Notons néanmoins que le nombre de stations est faible sur la plupart de ces régions, les résultats sont donc à considérer avec précaution.

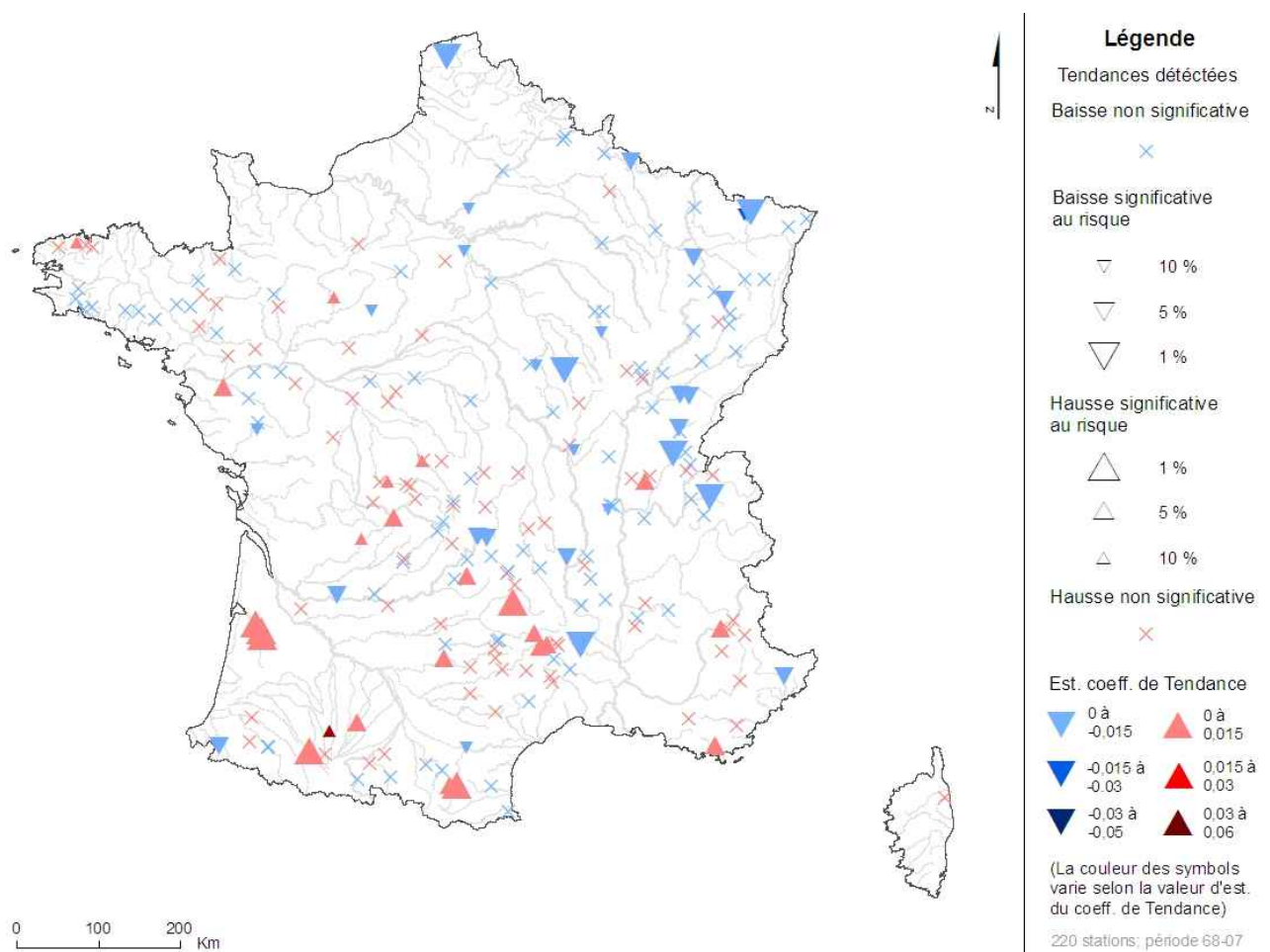


Figure 3-50 – Résultats de l'analyse locale pour l'indice « Base Flow Index ».

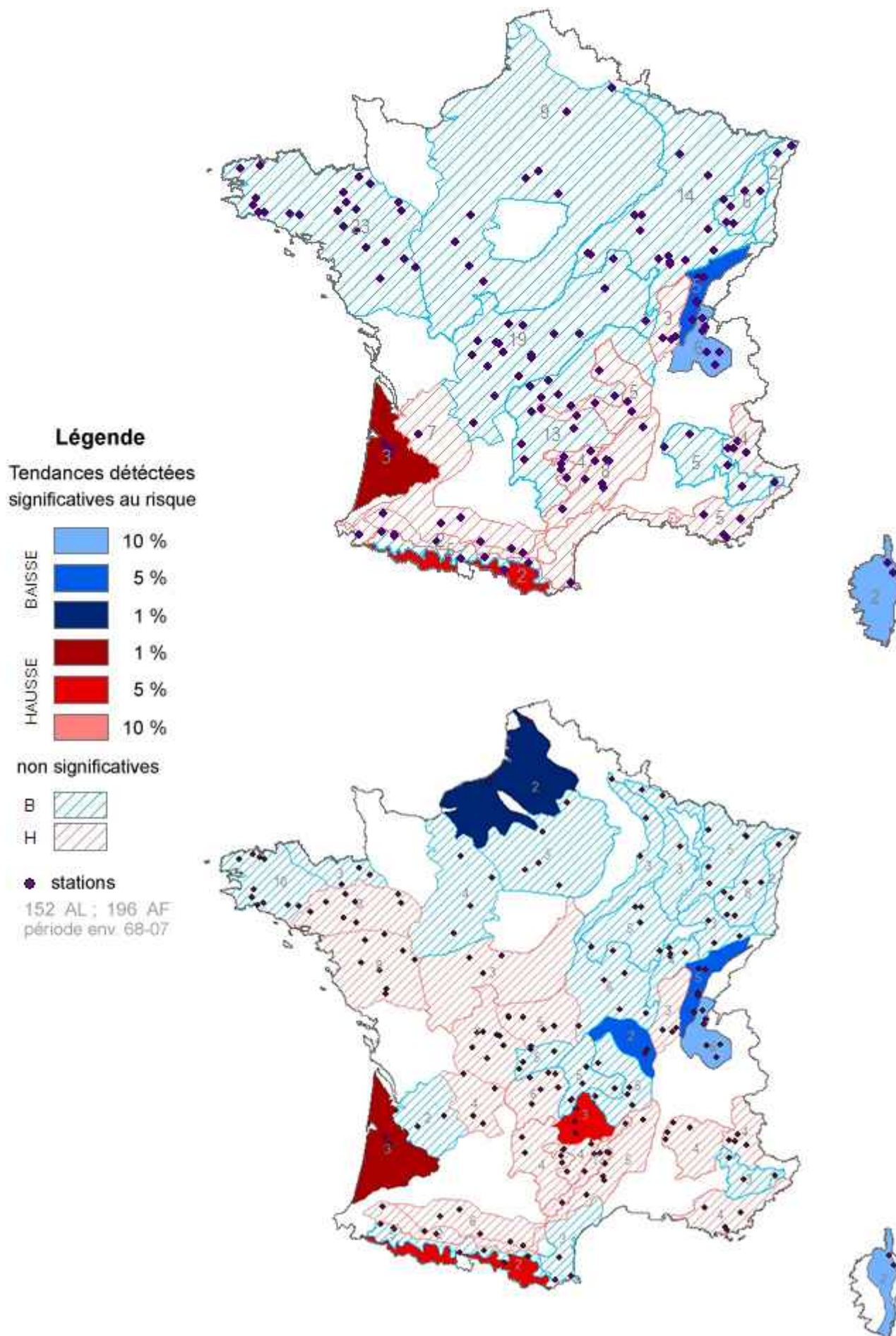


Figure 3-51 – Résultats des analyses régionales pour l'indice « Base Flow Index ».





## 4. Conclusions et perspectives

### 4.1. Réseau de référence pour la surveillance climatique des étiages

La finalisation de la critique des données a permis de définir la liste définitive des stations du réseau, qui compte finalement 236 stations hydrométriques en France Métropolitaine, complétée par 14 stations dans les DOM. 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. Un effort supplémentaire pourrait néanmoins être mené pour améliorer la couverture du petit chevelu hydrographique.

Bien qu'une liste de stations ait pu être arrêtée à l'issue de cette action 2010, le RRSE ne doit pas rester figé, et des évolutions futures seront bénéfiques, voire nécessaires :

- La nomenclature même du RRSE demeure une question ouverte, les dernières réunions avec l'ONEMA ayant pointé un risque de confusion avec d'autres « réseaux de référence ».
- La composition du réseau devra évoluer dans le futur, avec notamment l'inclusion de nouvelles stations passant le critère d'ancienneté (tout en répondant aux autres critères formant le cahier des charges du réseau, cf. Renard, Lang et al. 2008) et potentiellement l'exclusion d'autres stations dont la qualité se serait détériorée, ou pour lesquelles des problèmes non relevés lors de la critique seraient soulevés.
- Le réseau ne sera utile que si les producteurs sont étroitement associés à sa valorisation et son évolution. En effet, les producteurs possèdent la meilleure expertise sur la qualité des données hydrométriques, et sont notamment les plus à même de décider de l'inclusion d'une nouvelle station ou de l'exclusion d'une station problématique.
- En particulier, la meilleure stratégie pour l'inclusion de nouvelles stations est certainement de solliciter directement l'avis des producteurs plutôt que de réaliser des requêtes en banque HYDRO. A titre d'exemple, les nouvelles stations qui permettraient d'améliorer la couverture du petit chevelu hydrographique (cf. section 2.3.2) devraient être suggérées par les producteurs.
- Il conviendra de réfléchir au lien à établir avec la banque Hydro. La banque HYDRO III étant actuellement en phase de construction, il est difficile de décrire en détail la nature de ce lien. On peut néanmoins imaginer un champ spécial dans la base de données permettant d'identifier les stations qui appartiennent au RRSE (et éventuellement à d'autres réseaux). De plus, certains des traitements implémentés au cours de cette analyse (par exemple, extraction d'indices d'étiage ou application de tests de tendance) pourraient être ajoutés au catalogue des outils d'analyse qui seront disponibles dans HYDRO III (tous les codes utilisés dans cette action étant bien entendu mis à disposition de l'ONEMA).

### 4.2. Tendances dans les régimes d'étiage en France

Les analyses effectuées sur un ensemble de stations hydrométriques amplement critiquées en association avec les producteurs de données permettent de dresser un état des lieux général sur la stationnarité des régimes d'étiage en France. Les résultats les plus robustes peuvent être résumés de la manière suivante :

- **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, les Alpes, le Massif Central et le Jura, ainsi qu'en Aquitaine et sur le

pourtour Méditerranéen. Précisons néanmoins que dans les Alpes et les Pyrénées, cette aggravation n'est pas visible pour les stations à régime purement nival. A l'inverse, quelques tendances vers des étiages moins sévères apparaissent en Bretagne et sur les Pays de la Loire. A l'exception de ces deux régions, on n'observe pas d'évolution significative de la sévérité des étiages dans la partie nord du pays.

- **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. Plus précisément, on observe globalement de nombreux changements significatifs décrivant un décalage de la période d'étiage vers plus de précocité. A l'échelle de la France, ce décalage est particulièrement marqué pour le début de la période d'étiage, est moins marqué pour le centre de l'étiage, et devient peu significatif pour la fin de l'étiage. Néanmoins, à l'échelle d'une région donnée, on observe rarement ce décalage pour tous les indices de saisonnalité simultanément.

Il est intéressant d'observer que parmi ces résultats, peu avaient pu être mis en évidence dans le travail de Renard (2006), qui était pourtant similaire. Cette différence s'explique par l'ancienneté accrue des séries depuis ce premier travail (une petite dizaine d'années supplémentaires), mais également par le nombre plus important de stations analysées. Ceci montre bien l'intérêt de remettre à jour régulièrement ce type d'étude, et d'utiliser le réseau dans une optique de « surveillance climatique ».

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'année. 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 inconnu.

L'objectif principal de l'action qui sera menée en 2011 sera 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 inter-décennales). Les stations hydrométriques du réseau seront donc ré-analysées afin d'évaluer si la sévérité et la saisonnalité des étiages dépendent de certains indices climatiques. Il conviendra notamment d'évaluer quels sont les modes de variabilité climatique prépondérants pour les étiages français, et de déterminer les échelles de temps pertinentes pour étudier leur dépendance. Comme pour l'analyse de tendance réalisée en 2010, cette analyse sera réalisée à l'échelle locale (i.e. recherche de liens indépendamment sur chaque station disponible) et à l'échelle régionale (i.e. recherche de liens cohérents sur un ensemble de stations au sein d'une région homogène). Cette étude tirera également partie des réflexions sur la création de région homogène et la définition d'indices descriptifs d'étiage.

## Références

- Coles, S. (2001). An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. London, Springer-Verlag.
- Giuntoli, I. and B. Renard (2009). Identification des impacts hydrologiques du changement climatique : vers un réseau de référence pour la surveillance des étiages. Lyon, France, Cemagref: 86.
- Hamed, K. H. and A. R. Rao (1998). "A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data." Journal of Hydrology **204**(1-4): 182-196.
- 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. C. U. Press. Cambridge: 996.
- Kendall, M. G. (1975). Rank correlation methods. London, Griffin.
- Kundzewicz, Z. W., D. Graczyk, et al. (2005). "Trend detection in river flow series: 1. Annual maximum flow." Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques **50**(5): 797-810.
- Mann, H. B. (1945). "Nonparametric tests against trend." Econometrica **13**: 245-259.
- Pilon, P. J. and S. Yue (2002). "Detecting climate-related trends in streamflow data." Water Science and Technology **45**(8): 89-104.
- Renard, B. (2006). Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France. Lyon, France, INPG / Cemagref: 364.
- Renard, B., V. Garreta, et al. (2006). "An application of Bayesian analysis and MCMC methods to the estimation of a regional trend in annual maxima." Water Resources Research **42**(12).
- Renard, B., M. Lang, et al. (2006). "Statistical analysis of extreme events in a non-stationary context via a Bayesian framework." Stochastic Environmental Research and Risk Assessment **21**: 97-112.
- Renard, B., M. Lang, et al. (2008). "Regional methods for trend detection: assessing field significance and trend consistency." Water Resources Research **44**.
- Renard, B., M. Lang, et al. (2008). Identification des impacts hydrologiques du changement climatique. Convention ONEMA-Cemagref.
- Svensson, C., J. Hannaford, et al. (2006). Trends in river floods: why is there no clear signal in observations? Frontiers in Flood Research, Paris, IAHS Publication.
- Wasson, J. G., A. Chandris, et al. (2004). "Les hydro-écorégions: une approche fonctionnelle de la typologie des rivières pour la directive cadre européenne sur l'eau." Ingénieries **40**: 3-10.
- Wilby, R. L. (2006). "When and where might climate change be detectable in UK river flows?" Geophysical Research Letters **33**(19).

- Yue, S. and C. Y. Wang (2002). "Regional streamflow trend detection with consideration of both temporal and spatial correlation." International Journal of Climatology **22**(8): 933-946.
- Yue, S. and C. Y. Wang (2004). "The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series." Water Resources Management **18**(3): 201-218.



## Annexe 1 : Liste des stations du réseau

Code Banque H.	Cours d'eau	Régime hydrol.	Surface km <sup>2</sup>	Altitude m	Région HGC (L)	Producteur
O2725010	La Lauze a Semezies-Cachan [Faget-Abbatial]	pluvial	36	187	14.1	CA CotGasc
O6804630	L'Osse a Castex [Mielan]	pluvial	10.2	238	14.1	CA CotGasc
Y0115410	La Massane a Argeles-sur-Mer [Mas d'en Torrent]	pluvial	17.2	81	6	DDE Aude
Y0245210	Le Mondony a Amelie-les-Bains-Palalda	pluvial	32.3	242	6	DDE Aude
Y0655010	Le Verdoube a Tautavel	pluvial	305	91	6	DDE Aude
Y1105010	Le Rebenty a Saint-Martin-Lys	transition	136	373	1.2	DDE Aude
Y1232010	L'Aude a Carcassonne [Pont Neuf]	transition	1770	96	14.2	DDE Aude
L2443010	L'Auxance a Quincay [Rochecourbe]	pluvial	262	83	9	DDE Vienne
L7000610	La Vienne a Nouatre	pluvial	19920	40	-1	DDE Vienne
A2332110	La Liepvrette a Liepvre	pluvial	108	260	4	Dreal Alsace
A3301010	La Moder a Schweighouse-sur-Moder [aval]	pluvial	622	144	18	Dreal Alsace
A3832010	Le Seltzbach a Niederroedern	pluvial	202	120	18	Dreal Alsace
Q0214010	L'Echez a Louey	pluvial	89.6	333	14.1	Dreal Aquitaine
Q0522520	L'Arros a Gourgue	transition	173	292	14.2	Dreal Aquitaine
Q5501010	Le Gave de Pau a Berenx [Pont de Berenx]	transition	2575	38	14.2	Dreal Aquitaine
Q6142910	Le Gave d'Ossau a Oloron-Sainte-Marie [Oloron-Ste-Croix]	transition	488	215	1.2	Dreal Aquitaine
Q7002910	Le Gave d'Oloron a Oloron-Sainte-Marie [Oloron-SNCF]	transition	1085	204	1.2	Dreal Aquitaine
Q7322510	Le Saison a Mauleon-Licharre	transition	480	129	1.2	Dreal Aquitaine
Q9164610	La Nive des Aldudes a Saint-Etienne-de-Baigorry	pluvial	156	144	14.1	Dreal Aquitaine
S2224610	Le Grand Arriou a Moustey [Biganon]	pluvial	108	28	13	Dreal Aquitaine
S2235610	Le Bouron a Belin-Beliet [Moulin du Moine]	pluvial	36	23	13	Dreal Aquitaine
S2242510	L'Eyre a Salles	pluvial	1650	14	13	Dreal Aquitaine
K2363010	La Senouire a Paulhaguet	transition	155	538	3.2	Dreal Auvergne
K2514010	L'Allanche a Joursac [Pont du Vernet]	pluvial	157	746	3.1	Dreal Auvergne
K2523010	L'Alagnon a Joursac [Joursac-le-Vialard]	pluvial	310	870	3.1	Dreal Auvergne
K2593010	L'Alagnon a Lempdes	pluvial	984	450	3.1	Dreal Auvergne
K2644010	L'Ailloux a Manglieu [Moulin de Lavour]	pluvial	73.2	437	3.1	Dreal Auvergne
K2871910	La Dore a Tours-sur-Meymont [Giroux]	transition	800	395	3.2	Dreal Auvergne
K3264010	La Saunade a Pontaumur	pluvial	112	536	21	Dreal Auvergne
K3374710	Le Boublon Lagees a Fourilles	pluvial	71.4	255	21	Dreal Auvergne
O7404010	Le Bes a Marchastel [Gour du Gou - 2]	pluvial	30.5	1205	3.1	Dreal Auvergne
P0115010	La Burande [ou ru de Burons] a la Tour-d'Auvergne	pluvial	19.8	905	3.1	Dreal Auvergne
P0885010	Le Mars a Bassignac [Pont de Vendes]	pluvial	117	366	3.1	Dreal Auvergne
P1422510	La Maronne a Sainte-Eulalie	transition	112	595	3.2	Dreal Auvergne
H0100010	La Seine a Nod-sur-Seine	pluvial	371	248	10	Dreal Bourgogne
H0100020	La Seine a Plaines-Saint-Lange	pluvial	704	179	10	Dreal Bourgogne
H0321030	L'Ource a Autricourt	pluvial	548	197	10	Dreal Bourgogne
H2062010	Le Beuvron a Ouagne [Champmoreau]	pluvial	264	160	10	Dreal Bourgogne
H2073110	Le Sauzay a Corvol-l'Orgueilleux	pluvial	81	172	10	Dreal Bourgogne
H21220XX	La Cure à Marigny-l'Église [collage: Iles Ménéfriers+Crottefou]	pluvial	221	310	10	Dreal Bourgogne
H2342010	Le Serein a Chablis	pluvial	1120	132	10	Dreal Bourgogne
K1284810	La Selle à la Celle-en-Morvan [Polroy]	pluvial	138	322	21	Dreal Bourgogne
K1724210	La Dragne a Vandenesse	pluvial	115	210	10	Dreal Bourgogne
U1224010	La Tille a Arceau [Arcelot]	pluvial	700	223	10	Dreal Bourgogne
U1224020	La Tille a Cessey-sur-Tille	pluvial	744	201	10	Dreal Bourgogne
U1235020	La Norges a Genlis	pluvial	264	196	15	Dreal Bourgogne
U1324010	L'Ouche a Plombières-les-Dijon	pluvial	655	243	10	Dreal Bourgogne
U3214010	La Grosne a Jalogny [Cluny]	pluvial	332	244	3.1	Dreal Bourgogne
J0144010	La Loysance a Saint-Ouen-la-Rouerie	pluvial	81.5	50	12	Dreal Bretagne
J0323010	Le Guyoult a Epiniac	pluvial	63	18	12	Dreal Bretagne
J0626610	Le Neal a Medreac	pluvial	82	57	12	Dreal Bretagne
J2603010	Le Jarlot a Plougonven	pluvial	44	18	12	Dreal Bretagne
J2723010	La Penze a Taule [Penhoat]	pluvial	141	6	12	Dreal Bretagne

Code Banque H.	Cours d'eau	Régime hydrol.	Surface km <sup>2</sup>	Altitude m	Région HGC (L)	Producteur
J3024010	Le Guillec a Trezillide	pluvial	43	35	12	Dreal Bretagne
J3205710	L'Aber Wrac'h au Drennec	pluvial	24	34	12	Dreal Bretagne
J4214510	Le Langelin a Briec [Pont D72]	pluvial	7	130	12	Dreal Bretagne
J4224010	Le Jet a Ergue-Gaberic	pluvial	107	18	12	Dreal Bretagne
J4514010	Le Moros a Concarneau [PONT D22]	pluvial	20.1	10	12	Dreal Bretagne
J4614010	Le Ster Goz a Bannalec [Pont Meyla]	pluvial	69.7	28	12	Dreal Bretagne
J5613010	L'Evel a Guenin	pluvial	316	39	12	Dreal Bretagne
J5704810	Le Coet-Organ a Quistinic [Kerdec]	pluvial	47.7	38	12	Dreal Bretagne
J7353010	Le Meu a Montfort-sur-Meu [L'Abbaye]	pluvial	468	29	12	Dreal Bretagne
J7483010	La Seiche a Bruz [Carce]	pluvial	820	15	12	Dreal Bretagne
J7824010	L'Aron a Grand-Fougeray [La Bernardais]	pluvial	118	13	12	Dreal Bretagne
J7973010	Le Canut Sud a Saint-Just [La Riviere Colombel]	pluvial	37	25	12	Dreal Bretagne
J8363110	L'Yvel a Loyat [Pont D 129]	pluvial	315	33	12	Dreal Bretagne
J8433010	La Claie a Saint-Jean-Brevelay	pluvial	137	44	12	Dreal Bretagne
J8602410	L'Aff a Paimpont [Pont Du Secret]	pluvial	30.2	64	12	Dreal Bretagne
K0403010	Le Lignon du Velay au Chambon-sur-Lignon	transition	139	930	3.2	Dreal CentreBsLrBr
K0454010	La Dunieres a Sainte-Sigolene [Vaubarlet]	transition	228	584	3.2	Dreal CentreBsLrBr
K0567520	La Semene a Saint-Didier-en-Velay [Le Crouzet]	transition	134	720	3.2	Dreal CentreBsLrBr
K0673310	La Coise a Saint-Medard-en-Forez [Moulin Brule]	transition	181	425	3.2	Dreal CentreBsLrBr
K1341810	L'Arroux a Rigny-sur-Arroux	pluvial	2277	237	21	Dreal CentreBsLrBr
K1383010	La Bourbince a Vitry-en-Charollais	pluvial	819	237	17	Dreal CentreBsLrBr
K4443010	L'Ardoux a Lailly-en-Val	pluvial	155	78	20	Dreal CentreBsLrBr
K5183010	La Tardes a Evaux-les-Bains	pluvial	854	334	21	Dreal CentreBsLrBr
K5653010	L'Auron a Bourges [L'Ormediot]	pluvial	585	130	9	Dreal CentreBsLrBr
K6492510	La Sauldre a Selles-sur-Cher	pluvial	2254	73	20	Dreal CentreBsLrBr
K7312610	L'Indre a Saint-Cyran-du-Jambot	pluvial	1712	85	9	Dreal CentreBsLrBr
K7414010	La Tourmente a Villeloin-Coulange [Coulange]	pluvial	109	96	9	Dreal CentreBsLrBr
K7514010	L'Echandon a Saint-Branches	pluvial	127	63	9	Dreal CentreBsLrBr
H5172010	La Saulx a Vitry-en-Perthois	pluvial	2100	95	9	Dreal ChampagneAr
H6201010	L'Aisne a Mouron	pluvial	2280	102	9	Dreal ChampagneAr
Y7315010	Le Bevinco a Olmeta-di-Tuda [Lancone]	pluvial	53.6	209	16	Dreal Corse
Y9315010	Le Fium-Alto a Taglio-Isolaccio [Acitaja]	pluvial	114	35	16	Dreal Corse
U0415010	Le Breuchin a la Proiseliere-et-Langle	pluvial	123	343	4	Dreal FrancheComt
U0474010	La Lanterne a Fleurey-les-Faverney	pluvial	1020	211	10	Dreal FrancheComt
U1004010	L'Ognon a Servance [Fourguenons]	pluvial	73.5	380	4	Dreal FrancheComt
U1054010	L'Ognon a Beaumotte-Aubertans	pluvial	1250	229	10	Dreal FrancheComt
U1084010	L'Ognon a Pesmes	pluvial	2038	185	10	Dreal FrancheComt
U2356610	Le Rupt a Dung	pluvial	42.2	322	10	Dreal FrancheComt
U2615830	Le Lison a Myon	pluvial	217	317	5.1	Dreal FrancheComt
U2634010	La Loue a Champagne-sur-Loue	pluvial	1380	237	5.1	Dreal FrancheComt
U2722010	Le Doubs a Neublans-Abergement	pluvial	7290	181	-6	Dreal FrancheComt
V2206010	Le Herisson a Doucier	pluvial	49	495	5.1	Dreal FrancheComt
V2624010	La Valouse a Thoirette [Chalea]	pluvial	280	287	5.1	Dreal FrancheComt
G2011010	La Bethune a Saint-Aubin-le-Cauf	pluvial	307	14	9	Dreal HauteNorm
H9021010	L'Eure a Saint-Luperce	pluvial	330	154	9	Dreal HauteNorm
I0011010	La Risle a Rai	pluvial	149	205	9	Dreal HauteNorm
H3621010	Le Loing à Épisy	pluvial	3900	48	9	Dreal IDF Bassin SN
H4223110	La Remarde a Saint-Cyr-sous-Dourdan	pluvial	147	77	9	Dreal IDF Bassin SN
H4252010	L'Orge a Morsang-sur-Orge	pluvial	922	35	9	Dreal IDF Bassin SN
H78335XX	L'Ysieux à Viarmes [collage: Giez+Bertinval]	pluvial	57.3	39	9	Dreal IDF Bassin SN
O3006710	La Goudech a Saint-Maurice-de-Ventalon [La Cepede]	pluvial	10	1008	8	Dreal Languedoc R
O3011010	Le Tarn au Pont-de-Montvert [Fontchalettes]	pluvial	67	905	8	Dreal Languedoc R
O3035210	Le Briancon aux Bondons [Cocures]	pluvial	25	591	8	Dreal Languedoc R
Y2015010	L'Arre au Vigan [La Terrisse]	pluvial	159	187	8	Dreal Languedoc R
Y2035010	La Vis a Saint-Laurent-le-Minier	pluvial	332	149	8	Dreal Languedoc R
Y2214010	La Lergue a Lodeve	pluvial	228	153	19	Dreal Languedoc R
L0010610	La Vienne a Peyrelevalde [Servieres]	pluvial	58.5	618	21	Dreal Limousin

Code Banque H.	Cours d'eau	Régime hydrol.	Surface km <sup>2</sup>	Altitude m	Région HGC (L)	Producteur
L0314010	La Vige a Saint-Martin-Sainte-Catherine	pluvial	134	302	21	Dreal Limousin
L0563010	La Briance a Condat-sur-Vienne [Chambon Veyrinas]	pluvial	597	214	21	Dreal Limousin
L0813010	La Glane a Saint-Junien [le Derot]	pluvial	288	208	21	Dreal Limousin
L4010710	La Creuse a Felletin	pluvial	165	510	21	Dreal Limousin
L4033010	La Rozeille a Moutier-Rozeille [Aubusson]	pluvial	186	440	21	Dreal Limousin
L4220710	La Grande Creuse a Fresselines	pluvial	1235	212	21	Dreal Limousin
L4411710	La Petite Creuse a Fresselines [Puy Rageaud]	pluvial	850	218	21	Dreal Limousin
L5034010	L'Ardour a Folles [Forgefer]	pluvial	131	318	21	Dreal Limousin
L5101810	La Gartempe a Folles [Bessines]	pluvial	570	298	21	Dreal Limousin
L5134010	La Semme a Droux	pluvial	177	186	21	Dreal Limousin
L5223020	Le Vincou a Bellac [2]	pluvial	286	235	21	Dreal Limousin
P3234010	La Loyre a Voutezac	pluvial	103	145	21	Dreal Limousin
P3264310	Le Roseix a Vars-sur-Roseix	pluvial	58	115	21	Dreal Limousin
A4050620	La Moselle a Rupt-sur-Moselle	pluvial	153	432	4	Dreal Lorraine
A4200630	La Moselle a Saint-Nabord [Noir Gueux]	pluvial	621	371	4	Dreal Lorraine
A4250640	La Moselle a Epinal	pluvial	1220	324	4	Dreal Lorraine
A5261010	Le Madon a Mirecourt	pluvial	382	261	10	Dreal Lorraine
A5431010	Le Madon a Pulligny	pluvial	940	225	10	Dreal Lorraine
A6051020	La Meurthe a Saint-Die	pluvial	374	335	4	Dreal Lorraine
A7881010	La Seille a Metz	pluvial	1280	163	10	Dreal Lorraine
B2220010	La Meuse a Saint-Mihiel	pluvial	2540	219	10	Dreal Lorraine
B4631010	La Chiers a Carignan	pluvial	1967	159	10	Dreal Lorraine
B5322010	La Vence a la Francheville	pluvial	124	150	10	Dreal Lorraine
O0015310	Le Maudan a Fos	transition	38	555	1.2	Dreal Midi Pyrenees
O0384010	L'Arac a Soulan [Freychet]	transition	169	480	1.2	Dreal Midi Pyrenees
O0554010	L'Arbas a Castelbiague [Pont de Prades]	transition	98	332	1.2	Dreal Midi Pyrenees
O0624010	Le Volp a Montberaud [Ste-Croix-Volvestre]	pluvial	91	274	14.1	Dreal Midi Pyrenees
O1464010	Le Blau a Chalabre	pluvial	67	375	14.1	Dreal Midi Pyrenees
O1584610	Le Douctouyre a Vira [Engravies]	pluvial	131	301	14.1	Dreal Midi Pyrenees
O3031010	Le Tarn a Bedoues [Cocures]	pluvial	189	565	8	Dreal Midi Pyrenees
O3454310	La Muze a Montjoux [St-Hippolyte]	pluvial	112	330	19	Dreal Midi Pyrenees
O4704030	Le Dadou a Paulinet [St-Jean-de-Jeanne]	pluvial	72	413	3.1	Dreal Midi Pyrenees
O5042510	L'Aveyron a Palmas [Pont de Manson]	pluvial	270	580	19	Dreal Midi Pyrenees
O5055010	Le Serre a Coussergues [Resuenhe]	pluvial	110	580	19	Dreal Midi Pyrenees
O5224010	L'Alzou a Villefranche-de-Rouergue [Barrage Cabal]	pluvial	199	302	3.1	Dreal Midi Pyrenees
O5284310	La Serene a Saint-Andre-de-Najac [Canabral]	pluvial	103	305	3.1	Dreal Midi Pyrenees
O5312910	Le Viaur a Arques	pluvial	138	732	3.1	Dreal Midi Pyrenees
O5464310	Le Giffou a Saint-Just-sur-Viaur [La Fabreguerie]	pluvial	175	360	3.1	Dreal Midi Pyrenees
O8113510	Le Cele a Figeac [Merlancon]	pluvial	676	182	3.1	Dreal Midi Pyrenees
E4306010	La Hem a Tournehem-sur-la-Hem [Guemy]	pluvial	105	32	9	Dreal NordPasCalais
X0130010	La Durance a l' Argentiere-la-Bessee	nival	984	950	2.1	Dreal PACA
X0434010	L'Ubaye a Barcelonnette [Abattoir]	nival	549	1132	2.1	Dreal PACA
X1225010	Le Bes a la Javie [Esclangon-Peroure]	transition	165	805	7.2	Dreal PACA
Y4002010	L'Arc a Pourrieres	pluvial	49	246	6	Dreal PACA
Y4615020	Le Real Martin a la Crau [Decapris]	pluvial	277	29	6	Dreal PACA
Y4624010	Le Gapeau a Hyeres [Ste-Eulalie]	pluvial	517	9	6	Dreal PACA
Y5215020	L'Aille a Vidauban [Le Baou]	pluvial	229	41	6	Dreal PACA
Y6042010	Le Var a Entrevaux [Pont-Levis]	transition	676	465	7.2	Dreal PACA
Y6434010	L'Esteron au Broc [La Clave]	pluvial	451	127	7.1	Dreal PACA
M0243010	L'Orne Saosnoise a Montbizot [Moulin Neuf Cidrerie]	pluvial	510	50	9	Dreal Pays de Loire
M1213010	La Braye a Valennes [la Caboche]	pluvial	270	101	9	Dreal Pays de Loire
M1354020	L'Escotais a Saint-Paterne-Racan	pluvial	67	65	9	Dreal Pays de Loire
M3323010	L'Ernee a Andouille [les Vaugeois]	pluvial	375	63	12	Dreal Pays de Loire
M3423010	La Jouanne a Force	pluvial	410	47	12	Dreal Pays de Loire
M5102010	Le Layon a Saint-Georges-sur-Layon	pluvial	250	44	12	Dreal Pays de Loire
M5222010	Le Layon a Saint-Lambert-du-Lattay [Pont de Bezigon]	pluvial	920	15	12	Dreal Pays de Loire
M6013010	L'Evre a la Chapelle-Saint-Florent [Pont Dalaine]	pluvial	460	11	12	Dreal Pays de Loire



Code Banque H.	Cours d'eau	Régime hydrol.	Surface km <sup>2</sup>	Altitude m	Région HGC (L)	Producteur
M6323010	L'Erdre a Cande [La Gree]	pluvial	169	34	12	Dreal Pays de Loire
M6333020	L'Erdre a Nort-sur-Erdre [Moulin de Vaux]	pluvial	472	4	12	Dreal Pays de Loire
M7112410	La Sevre Nantaise a Tiffauges [la Moulinette]	pluvial	814	43	12	Dreal Pays de Loire
M8205020	L'Ognon aux Sorinieres [Villeneuve]	pluvial	147	3	12	Dreal Pays de Loire
N3001610	Le Grand Lay a Saint-Prouant [Monsireigne]	pluvial	131	63	12	Dreal Pays de Loire
N3024010	Le Louing a Chantonay [St-Philbert du Pont Charrault]	pluvial	120	43	12	Dreal Pays de Loire
N3113010	Le Petit Lay a Saint-Hilaire-le-Vouhis	pluvial	262	35	12	Dreal Pays de Loire
H7021010	L'Oise a Hirson	pluvial	315	161	22	Dreal Picardie
H7033010	Le Thon a Origny-en-Thierache	pluvial	258	140	9	Dreal Picardie
H7401010	L'Oise a Sempigny	pluvial	4290	33	9	Dreal Picardie
U4014010	La Reyssouze a Montagnat	pluvial	84.4	237	15	Dreal RhoneAlpes
U4204010	La Veyle a Lent	pluvial	34	251	15	Dreal RhoneAlpes
U4235010	Le Renon a Neuville-les-Dames	pluvial	102	218	15	Dreal RhoneAlpes
U4624010	L'Azergues à Châtillon	pluvial	336	206	3.1	Dreal RhoneAlpes
U4635010	La Brévenne à Sain-Bel	pluvial	219	236	3.1	Dreal RhoneAlpes
U4644010	L'Azergues a Lozanne	pluvial	792	194	3.1	Dreal RhoneAlpes
V1015010	La Valserine a Lelex [Niaizet]	transition	85	846	5.2	Dreal RhoneAlpes
V1015030	La Valserine a Chezery-Forens [Chezery]	transition	119	572	5.2	Dreal RhoneAlpes
V1214010	Le Fier a Dingy-Saint-Clair	transition	222	514	5.2	Dreal RhoneAlpes
V1255010	Le Cheran a Allevés [La Charniaz]	transition	249	575	5.2	Dreal RhoneAlpes
V1774010	La Bourbre a Tignieu-Jameyzieu	transition	703	202	5.2	Dreal RhoneAlpes
V2414010	La Bienne a Saint-Claude [Chenavier]	transition	216	423	5.2	Dreal RhoneAlpes
V4145210	La Glueyre a Gluiras [Tisonèche]	pluvial	71	411	8	Dreal RhoneAlpes
V4225010	Le Bez a Chatillon-en-Diois	transition	227	558	7.2	Dreal RhoneAlpes
V4275010	La Gervanne a Beaufort-sur-Gervanne	transition	108	325	7.2	Dreal RhoneAlpes
V4414010	Le Roubion a Soyans	transition	186	264	7.2	Dreal RhoneAlpes
V4455010	Le Jabron a Souspierre	transition	85	245	7.2	Dreal RhoneAlpes
K5200910	Le Cher a Teillet-Argenty	pluvial	1600	267	21	EDF Brive
L4321710	La Petite Creuse a Genouillac	pluvial	558	273	21	EDF Brive
P0115020	La Burande [ou ru de Burons] a Singles	pluvial	85	557	21	EDF Brive
P0364010	La Santoire a Condat [Roche-Pointue]	pluvial	172	693	3.1	EDF Brive
P1502510	La Maronne a Pleaux [Enchanet]	pluvial	513	370	3.1	EDF Brive
P3021010	La Vezere a Bugeat	pluvial	143	675	21	EDF Brive
K0010010	La Loire a Usclades-et-Rieutord [Rieutord]	pluvial	62	1012	8	EDF Grenoble
K0523010	L'Ance du Nord a Saint-Julien-d'Ance [Laprat]	pluvial	354	692	3.1	EDF Grenoble
V0222010	L'Arve a Arthaz-Pont-Notre-Dame	nival	1664	410	5.3	EDF Grenoble
V1264010	Le Fier a Vallieres	transition	1350	253	5.2	EDF Grenoble
V2202010	L'Ain a Marigny [Chalain]	pluvial	650	456	5.1	EDF Grenoble
V2322010	L'Ain a Cernon [Vouglans]	pluvial	1120	329	5.1	EDF Grenoble
X0310010	La Durance a Embrun [La Clapiere]	nival	2170	787	2.1	EDF Grenoble
X0454010	L'Ubaye au Lauzet-Ubaye [Roche Rousse]	nival	946	790	2.1	EDF Grenoble
X0500010	La Durance a Espinasses [Serre-Poncon]	nival	3580	652	2.1	EDF Grenoble
X1130010	La Durance a Oraison [Escale]	nival	6760	415	7.3	EDF Grenoble
X2202010	Le Verdon a Demandolx [Castillon]	transition	655	790	7.2	EDF Grenoble
Y6432010	Le Var a Malaussene [La Mescla]	transition	1830	170	7.2	EDF Grenoble
Y6614010	La Roya a Tende [St-Dalmas-de-Tende]	transition	168	655	2.2	EDF Grenoble
O1076010	Le Quioules a Chateau-Verdun [Riete 2]	nival	52.8	1110	1.1	EDF Toulouse
O3121010	Le Tarn a Montbrun [Pont de Montbrun]	pluvial	621	480	8	EDF Toulouse
O3364010	La Dourbie a Nant [Pont de Gardies]	pluvial	300	433	8	EDF Toulouse
O3471010	Le Tarn a Saint-Victor-et-Melviu [Pinet]	pluvial	2677	285	19	EDF Toulouse
O4102510	L'Agout a Fraisse-sur-Agout	pluvial	48	792	8	EDF Toulouse
O5344010	Le Vioulou a Salles-Curan [Trebons-Bas]	pluvial	57	806	3.1	EDF Toulouse
O7041510	Le Lot a Balsieges [Bramonas]	pluvial	465	663	19	EDF Toulouse
O7354010	La Lander a Saint-Georges	pluvial	310	749	3.1	EDF Toulouse
O7444010	Le Bes a Saint-Juery	pluvial	283	917	3.1	EDF Toulouse
Y1012010	L'Aude a Puyvalador	nival	134	1391	1.1	EDF Toulouse
A9091050	La Sarre a Keskastel	pluvial	878	208	10	SN Strasbourg

Code Banque H.	Cours d'eau	Régime hydrol.	Surface km <sup>2</sup>	Altitude m	Région HGC (L)	Producteur
A9132050	L'Albe a Sarralbe [Rech]	pluvial	407	208	10	SN Strasbourg
A9352050	L'Eichel a Oermingen	pluvial	280	210	10	SN Strasbourg
P1114010	La Luzège a Maussac [Pont de Maussac]	pluvial	84.9	561	3.1	SPC Dordogne
P2484010	Le Ceou a Saint-Cybranet	pluvial	603	74	11	SPC Dordogne
P4271010	La Vézère a Campagne	pluvial	3736	51	21	SPC Dordogne
P5404010	L'Eyraud a la Force [Bitarel]	pluvial	73.5	32	14.1	SPC Dordogne
P5715010	L'Engranne a Baigneaux	pluvial	30	33	14.1	SPC Dordogne
P8012510	La Dronne a Saint-Pardoux-la-Rivière [Le Manet]	pluvial	140	150	21	SPC Dordogne
V5324010	L'Aygués a Saint-May [Pont de la Tune]	transition	473	382	7.2	SPC Grand Delta
V5425210	La Gagnière a Gagnières [Bannes]	pluvial	55.3	193	8	SPC Grand Delta
V7115010	Le Gardon de Ste-Croix a Gabriac [Pont Ravagers]	pluvial	47	380	8	SPC Grand Delta
V7135010	Le Gardon de St-Jean a Corbes [Roc Courbe]	pluvial	263	136	8	SPC Grand Delta
stations suggérées par les gestionnaires.						

## Annexe 2 : Stations modifiées

	Code	Cours d'eau	Régime hydrol.	Surface km <sup>2</sup>	Altitude m	Région HGC	Producteur	nouvelle station	Chronique modifiée	modification effectuée
1	H0321030	L'Ource a Autricourt	pluvial	548	197	10	Dreal Bourgogne	-	OUI	Chronique a été substituée par une à jour (telechargée 06/2010) pour problème en 90.
2	H21220XX	La Cure à Marigny-l'Église [collage: lles	pluvial	221	310	10	Dreal Bourgogne	OUI	OUI	collage de stations (2004) H2122010 et H2122020
3	H6201010	L'Aisne a Mouron	pluvial	2280	102	9	Dreal ChampagneAr	-	OUI	Données pré-62 effacées (problèmes metrologiques)
4	H7021010	L'Oise a Hirson	pluvial	315	161	22	Dreal Picardie	-	OUI	Données pré-66 effacées, post-05/2003 effacées (problèmes metrologiques)
5	H78335XX	L'Ysieux à Viarmes [collage: Giez+Bertinval]	pluvial	57.3	39	9	Dreal IDF Bassin SN	OUI	OUI	collage des stations (1997) : H7833520 et H7833540
6	K1341810	L'Arroux a Rigny-sur-Arroux	pluvial	2277	237	21	Dreal CentreBsLrBr	-	OUI	Données 12-1977 effacées (problèmes metrologiques)
7	K2363010	La Senouire a Paulhaguet	transition	155	538	3.2	Dreal Auvergne	-	OUI	cette chronique a été substituée par une à jour (telechargée 08/2010) pour problème en 2008
8	K2644010	L'Ailloux a Manglieu [Moulin de Lavour]	pluvial	73.2	437	3.1	Dreal Auvergne	-	OUI	Données sept-dec-1987 effacées (problèmes metrologiques)
9	K3264010	La Saunade a Pontaurmur	pluvial	112	536	21	Dreal Auvergne	-	OUI	Données juin-oct-1979 effacées (problèmes metrologiques)
10	M6013010	L'Evre a la Chapelle-Saint-Florent [Pont	pluvial	460	11	12	Dreal Pays de Loire	-	OUI	Données 1980-1981 effacées (problèmes metrologiques)
11	O3035210	Le Briancon aux Bondons [Cocures]	pluvial	25	591	8	Dreal Languedoc R	-	OUI	Données pré-69 effacées (problèmes metrologiques)
12	Q9164610	La Nive des Aldudes a Saint-Etienne-de-Baigorry	pluvial	156	144	14.1	Dreal Aquitaine	-	OUI	oct 1955 effacé (problèmes metrologiques, valeurs maxi pas coherentes)
13	U4635010	La Brévenne à Sain-Bel	pluvial	219	236	3.1	Dreal RhoneAlpes	OUI	OUI	Données 07/2000-05/2001 effacées (problèmes metrologiques)
14	V1774010	La Bourbre a Tignieu-Jameyzieu	transition	703	202	5.2	Dreal RhoneAlpes	-	OUI	Données pré-1963 effacées (problèmes metrologiques)
15	V44455010	Le Jabron a Souspierre	transition	85	245	7.2	Dreal RhoneAlpes	-	OUI	Données 08-aout--31-12-1967 effacées (artefacts ds serie)
16	V5324010	L'Aygues a Saint-May [Pont de la Tune]	transition	473	382	7.2	SPC Grand Delta	-	OUI	Données pré-1920 effacées (problèmes metrologiques)
17	Y0115410	La Massane a Argeles-sur-Mer [Mas d'en	pluvial	17.2	81	6	DDE Aude	-	OUI	Données pré-71 effacées (problèmes metrologiques)
18	Y0245210	Le Mondony a Amelie-les-Bains-Palalda	pluvial	32.3	242	6	DDE Aude	-	OUI	Données pré-71 effacées (problèmes metrologiques)
19	Y1232010	L'Aude a Carcassonne [Pont Neuf]	transition	1770	96	14.2	DDE Aude	-	OUI	Données pré-69 et 1983 effacées (problèmes metrologiques)
20	Y6434010	L'Esteron au Broc [La Clave]	pluvial	451	127	7.1	Dreal PACA	-	OUI	Données pré-70 effacées (problèmes metrologiques)

## Annexe 3 : Résultats de l'analyse locale pour les stations des DOM

ord.	Dép.	Code	Années utilis.	Module		Date Min Annuel		Base Flow Index		Min Annuel		Durée		Déficit de Volume		CM Années utilis.	Début		Centre		Fin		Temps Recession	
				Signif.	Tendance	Signif.	Tendance	Signif.	Tendance	Signif.	Tendance	Signif.	Tendance	Signif.	Tendance		Signif.	Tendance	Signif.	Tendance	Signif.	Tendance	Signif.	Tendance
1	Guad.	I0200051	36	1	-0.013465	0.05	0.01111	0.1	0.0062603	1	0.0045659	1	0.0043355	1	-0.0054973	33	0.1	-0.0075414	1	0.0036273	1	-0.008666	1	-0.0084314
2	Guad.	I1224141	33	0.01	-0.03994	1	0.011425	1	0.0058129	1	-0.00029453	1	0.00080124	1	0.0041506	31	1	-0.0043003	1	0.0091551	0.01	-0.049603	0.01	-0.034325
3	Guad.	I2210681	28	0.01	0.053756	1	-0.016854	1	0.0014217	1	0.0047135	1	-0.0089148	0.05	0.033945	27	1	-0.0051551	0.05	-0.022546	0.01	0.049391	0.01	0.068871
4	Guad.	I2324861	22	1	-0.0059524	1	0.016143	1	0.0073133	1	0.0066186	1	0.0076861	1	-0.014301	21	0.05	0.012309	1	0.006157	1	-0.019219	1	-0.017169
5	Mart.	T3500140	35	1	0.0062145	1	0.0025892	1	-0.0022929	1	-0.0036266	1	-0.0036356	1	-0.0030876	31	1	-0.0031612	1	-0.0076047	1	0.0097155	1	0.0028371
6	Mart.	T3501210	27	1	0.0037964	1	0.026435	1	0.0062958	1	0.0020993	1	0.0037088	1	-0.019469	23	0.01	-0.0050012	1	-0.0014932	1	0	1	0.00081392
7	Réun.	R4030010	22	1	-0.012615	1	-0.01367	1	-0.0078175	1	-0.0022734	1	-0.0099418	1	-0.010122	21	1	-0.013391	1	0.009184	1	-0.0021671	1	-0.011181
8	Guyane	G3100130	36	1	0.014177	1	-0.001689	1	-0.0017547	1	-0.0006165	1	0	1	-0.0018184	35	1	0.001112	1	-0.002877	1	0.0083578	1	0.0097154
9	Guyane	G3700133	31	0.01	0.042936	1	-0.002101	0.1	-0.0030907	1	0.00038503	1	-0.0034497	1	-0.0029845	31	0.1	-0.0036239	0.01	-0.023879	0.1	0.028531	0.05	0.045038
10	Guyane	G3900142	34	1	0.0048891	1	-0.001465	1	0.00040461	1	0.0028749	1	-0.002547	1	0.00090457	28	1	9.65E-05	1	-0.005959	1	0.0061762	1	0.0066787
11	Guyane	G4100121	47	1	0.003855	1	-0.001481	1	-0.00082322	1	-0.00027445	1	-0.0014138	1	0.0052083	42	1	0.0003728	1	-0.0010085	1	0	1	0.0015718
12	Guyane	G4100127	49	1	-0.0030296	1	-0.000804	0.05	-0.0014808	0.1	-0.0016629	1	-0.0007569	1	-0.0025881	47	0.1	0.0010966	1	0.00060229	1	-0.0033474	1	-0.0024267
13	Guyane	G4101915	46	1	0.011352	1	-0.001688	1	-0.0010414	1	0.00039275	1	0.00015611	1	0.0015275	42	1	0.0012152	0.1	-0.011012	1	0.010239	1	0.0098761
14	Guyane	G4500124	50	1	0	1	-0.000768	1	-0.00041771	1	-0.0011757	1	-0.0018886	1	0	47	1	0.0001647	1	-0.0019991	1	0	1	0.0027551

**Table A. Résumé des résultats locaux pour les stations des DOM. Les tendances sont exprimées en évolution relative annuelle (e.g. +0.01 correspond à une augmentation de 1% par an en moyenne). Les cellules rouges (resp. bleues) représentent des tendances à la hausse (resp. à la baisse). Les cellules grisées représentent les tendances significatives.**

## Annexe 4 : Résultats Analyse régionale fine.



\* en commun avec l'analyse régionale large

\*\* région invalidée (n. années insuffisant).

**Table B. Résumé des résultats régionaux (analyse fine). Les tendances sont des évolutions relatives annuelles exprimées en pourcentage de l'écart-type (e.g. +0.01 correspond à une augmentation annuelle de 1% de l'écart-type). Les cellules rouges (resp. bleues) représentent des tendances à la hausse (resp. à la baisse). Les cellules grisées représentent les tendances régionalement significatives.**

## Annexe 5 : Résultats Analyse régionale large.

ord.	Région	Nombre Années en commun	Module		Etiage plus longue		Date Min Annuel		Base Flow Index		Min Annuel		Durée		Déficit de Volume		commun CM Années en	Début		Centre		Fin		Temps Récession	
			Signif.	Tendance	Signif.	Tendance	Signif.	Tendance	Signif.	Tendance	Signif.	Tendance	Signif.	Tendance	Signif.	Tendance		Signif.	Tendance	Signif.	Tendance	Signif.	Tendance	Signif.	Tendance
1	1.1*	35	1	-0.01252	0.1	0.017336	1	-0.0076413	0.05	0.019286	0.1	0.016267	1	0.013457	1	0.0071099	33	1	-0.015753	0.1	-0.01883	1	-0.011087	1	0.0001624
2	1.2*	36	0.01	-0.037404	0.01	0.032073	0.05	-0.022463	1	-0.0086786	0.05	-0.01998	0.01	0.031512	0.01	0.030464	31	0.01	-0.044489	0.05	-0.030319	1	-0.011169	0.1	0.017633
3	2.1*	45	1	-0.01498	1	-0.0031939	1	-0.006205	1	0.013669	1	0.0043273	1	-0.010126	1	-0.007727	38	1	0.010908	1	0.0026688	1	-0.0056235	1	-0.011693
4	3.1	42	1	-0.0049383	1	-0.0080655	1	0.0096665	1	-0.00042368	1	0.0017554	1	-0.0098758	1	-0.0065581	35	1	-0.015167	0.1	-0.01967	1	-0.01517	1	-0.002345
5	3.2	38	1	-0.01208	1	-0.011062	1	-0.013362	1	0.0089561	1	0.0015098	1	-0.0051063	1	-0.0029553	33	1	-0.0091602	1	-0.010371	1	-0.0072604	1	-0.0096152
6	4*	36	1	-0.019431	1	0.013725	1	-0.016299	1	-0.0038072	0.05	-0.030175	1	0.022058	1	0.021192	30	0.05	-0.032391	0.05	-0.033588	0.05	-0.038094	1	0.0044513
7	5.1*	38	1	-0.000006453	1	0.0019831	0.05	-0.023844	0.05	-0.024611	1	-0.01229	1	0.0045605	1	0.0049362	36	0.1	-0.021354	0.1	-0.020889	0.1	-0.022785	1	-0.0010875
8	5.2	37	0.05	-0.02394	1	0.01191	0.01	-0.023792	0.1	-0.016385	0.01	-0.025255	0.05	0.02715	0.05	0.027869	31	0.01	-0.034577	0.01	-0.033633	1	-0.016928	1	0.011855
9	6	36	0.05	-0.026552	1	0.0019301	1	-0.0032168	1	0.010297	1	-0.0095986	1	0.0068256	1	0.0071388	30	1	0.0028589	1	0.010513	1	0.002922	1	0.005789
10	7.2	37	0.05	-0.025379	1	0.011814	1	0.0053247	1	-0.0097325	1	-0.010147	1	0.016411	1	0.015507	30	0.1	-0.022955	1	-0.0092597	1	0.0019407	1	0.0091454
11	8	40	0.05	-0.020665	1	0.011101	1	0.0075971	1	0.011414	0.1	-0.015232	0.05	0.017543	0.1	0.015786	32	1	-0.017004	1	-0.01207	1	0.0046264	1	0.0071475
12	9	38	1	0.0005223	1	0.0045972	1	-0.0064506	1	-0.00098716	1	0.003078	1	0.0057916	1	0.0022747	31	1	-0.010141	1	-0.0046306	1	0.0082014	1	0.0095325
13	10	39	1	-0.0027123	1	0.0052385	1	-0.013556	1	-0.014273	1	-0.0039678	1	0.00008031	1	-0.00039406	31	1	-0.0090939	1	-0.011698	1	-0.015997	1	-0.0073893
14	12	40	1	-0.0012857	1	-0.00085565	1	0.00078118	1	-0.0052177	1	0.0016591	1	0.0011421	1	0.0044043	33	0.05	-0.024704	1	-0.011989	1	-0.011699	0.1	0.018491
15	13*	38	0.05	-0.029131	1	-0.00085962	1	0.012443	0.01	0.04929	1	0.0086478	1	-0.00014505	1	-0.003932	26**	1	-0.0099266	1	-0.003533	1	-0.004552	1	0.0014125
16	14.1	38	0.05	-0.026647	0.1	0.015583	1	0.00046835	1	0.0031771	1	-0.0081083	0.1	0.01654	0.1	0.014377	32	0.01	-0.034182	1	-0.020323	1	0.00043179	0.05	0.027386
17	14.2*	35	0.01	-0.0455	0.05	0.025028	1	-0.0022013	1	0.010373	0.05	-0.026806	0.05	0.026689	0.05	0.025245	29**	1	-0.017707	1	0.0083017	1	0.020395	0.1	0.025055
18	15*	39	1	-0.010337	1	-0.0046744	1	0.0018845	1	0.019176	1	-0.0004838	1	0.0015986	1	0.0018076	31	1	3.8652E-05	1	-0.00062919	1	-0.0024887	1	-0.0037876
19	16*	29	1	-0.0184	1	0.017029	1	0.011652	0.1	-0.021762	0.05	-0.031703	0.05	0.02154	0.05	0.026547	21**	1	-0.0094058	1	0.011151	1	0.0086627	1	0.018981
20	18*	31	1	-0.0058248	1	0.014235	0.05	0.019706	1	-0.014327	1	-0.010815	1	0.013827	1	0.012303	31	1	0.0072535	0.1	0.020299	1	0.011005	1	-0.00090654
21	19*	36	0.1	-0.021318	1	0.017915	1	-0.0022655	1	0.0024475	0.01	-0.029163	1	0.016843	0.1	0.023234	31	0.1	-0.024561	0.1	-0.022235	1	-0.018066	1	0.00024937
22	21	39	1	-0.0092585	1	-0.0051967	0.05	-0.011326	1	-0.0066489	1	-0.0046141	1	0.010374	1	0.011629	33	0.1	-0.017559	0.1	-0.016503	1	-0.007977	1	-0.0036746

\* en commun avec l'analyse régionale fine

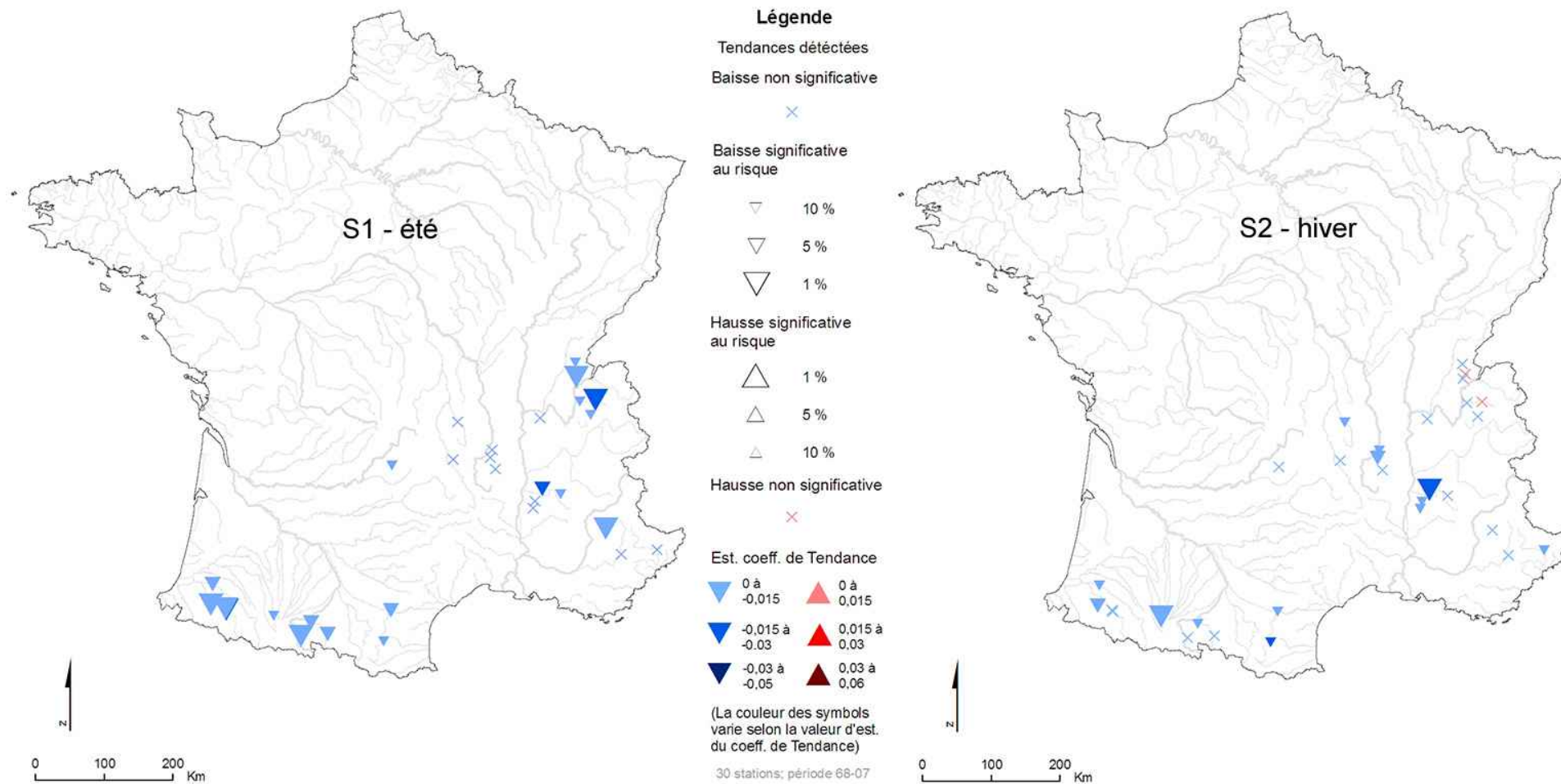
\*\* région invalidée (n. années insuffisant).

**Table C. Résumé des résultats régionaux (analyse fine). Les tendances sont des évolutions relatives annuelles exprimées en pourcentage de l'écart-type (e.g. +0.01 correspond à une augmentation annuelle de 1% de l'écart-type). Les cellules rouges (resp. bleues) représentent des tendances à la hausse (resp. à la baisse). Les cellules grisées représentent les tendances régionalement significatives.**



## Annexe 6 : Cartes des résultats par sous-saison (régimes de transition)

Module



Module

**Légende**

période env. 68-07

• stations

S1 : 25

S2 : 24

**BAISSE**



**Tendances détectées**  
significatives      non significatives

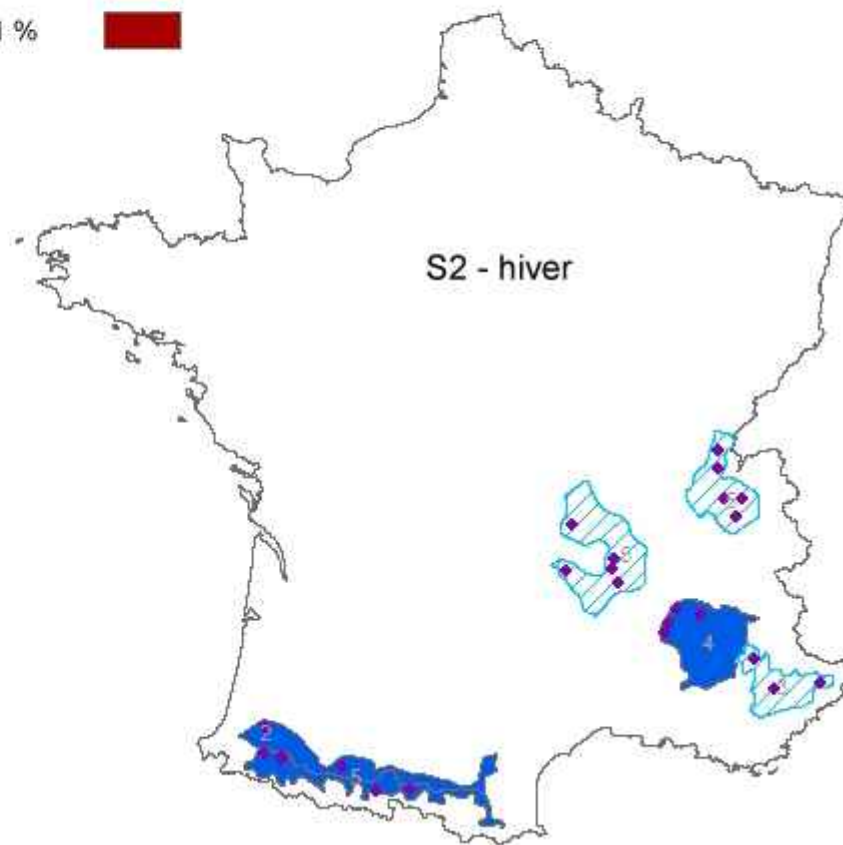
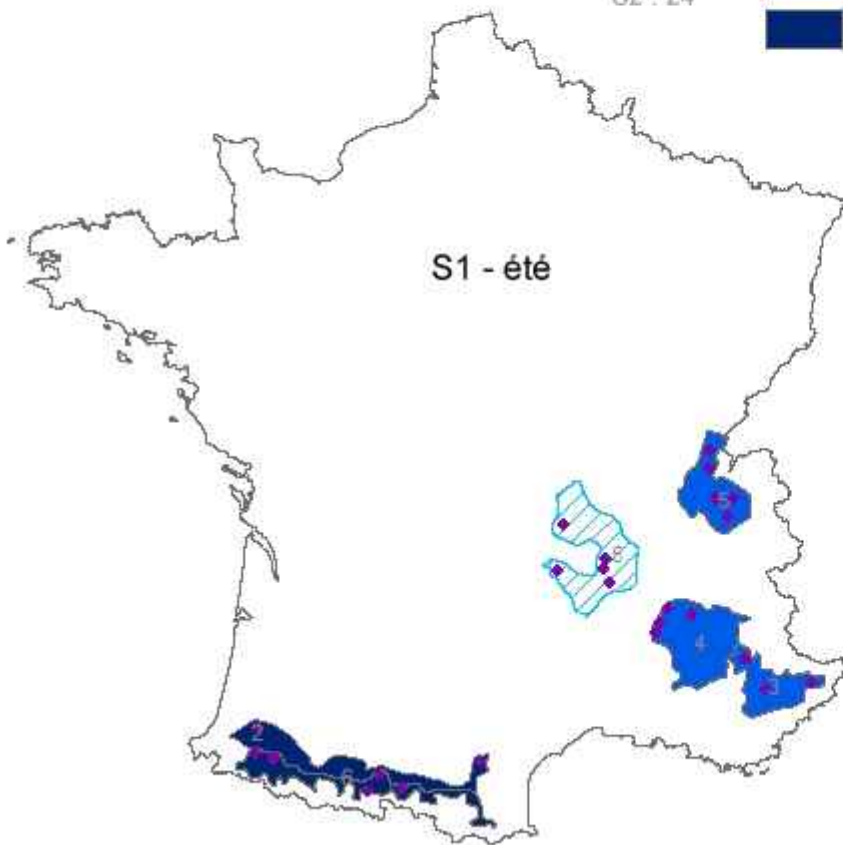
au risque :

10 %

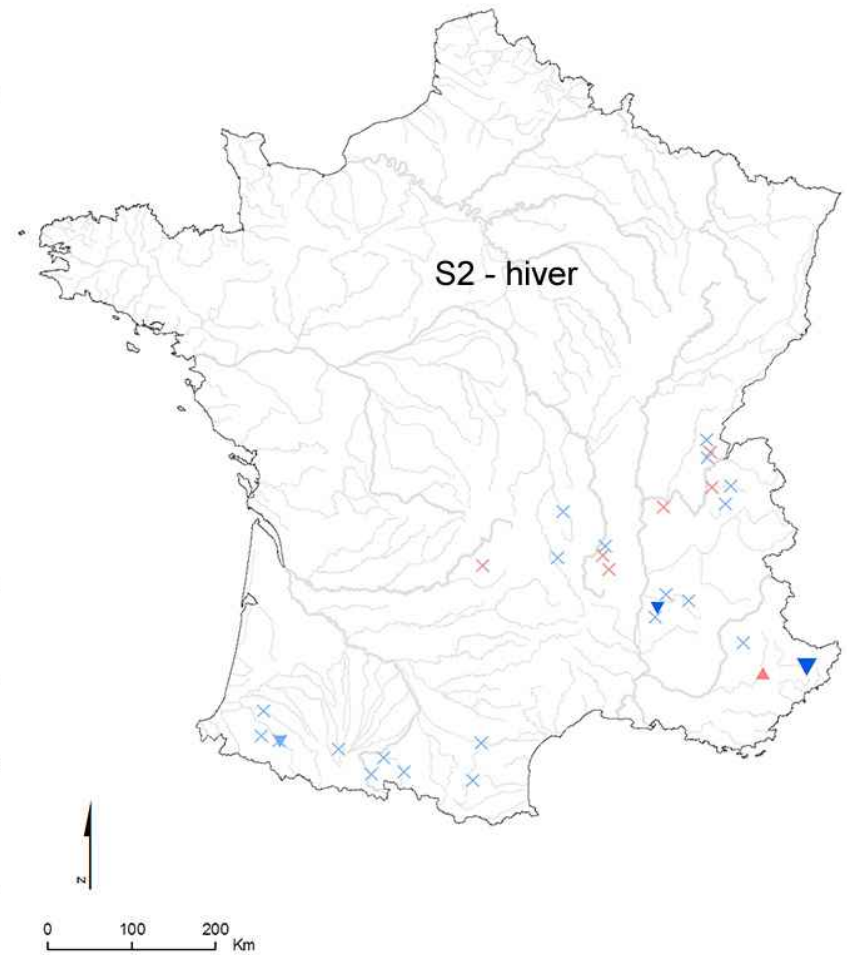
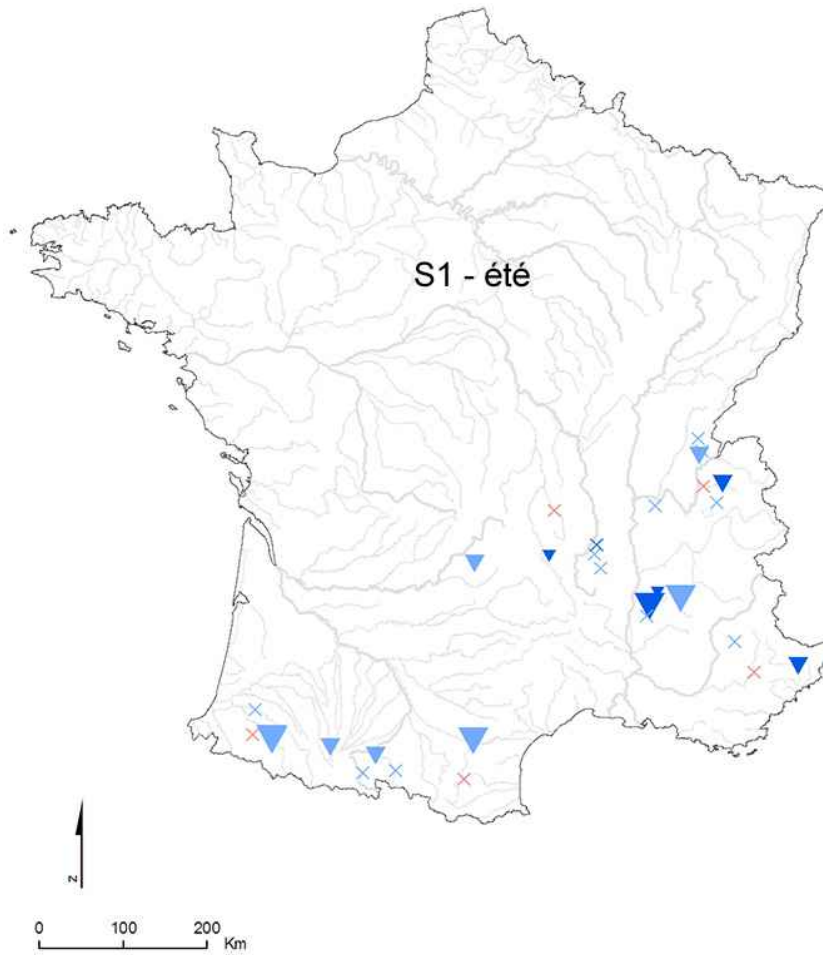
5 %

1 %

**HAUSSE**



Débit minimum



**Débit minimum**

**Légende**

période env. 68-07

• stations

S1 : 25

S2 : 24

**BAISSE**



**Tendances détectées**  
significatives      non significatives

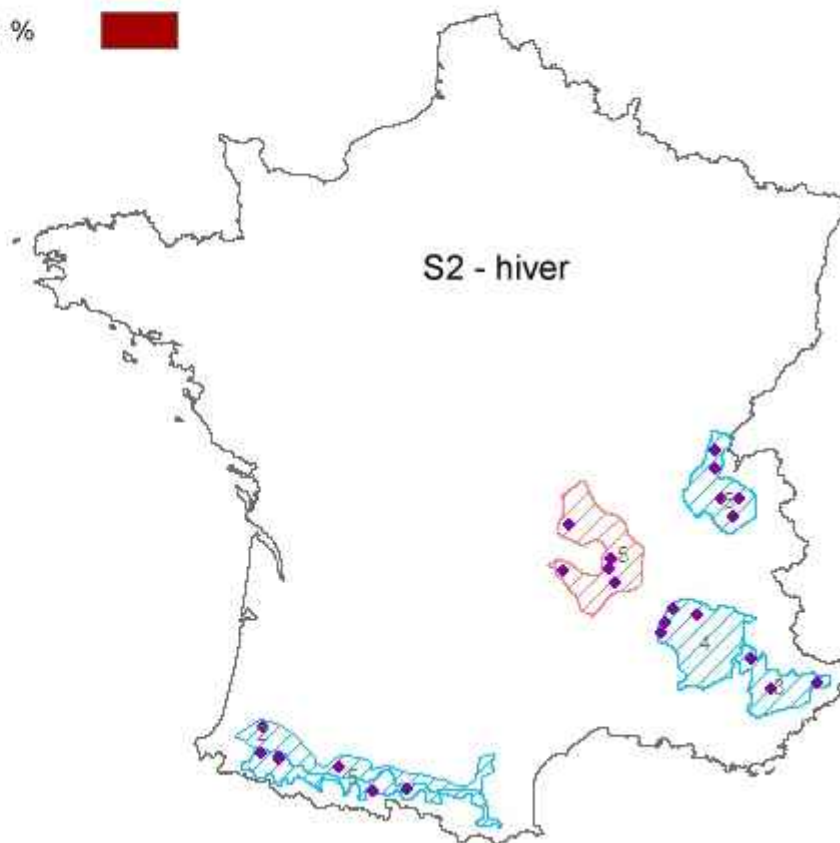
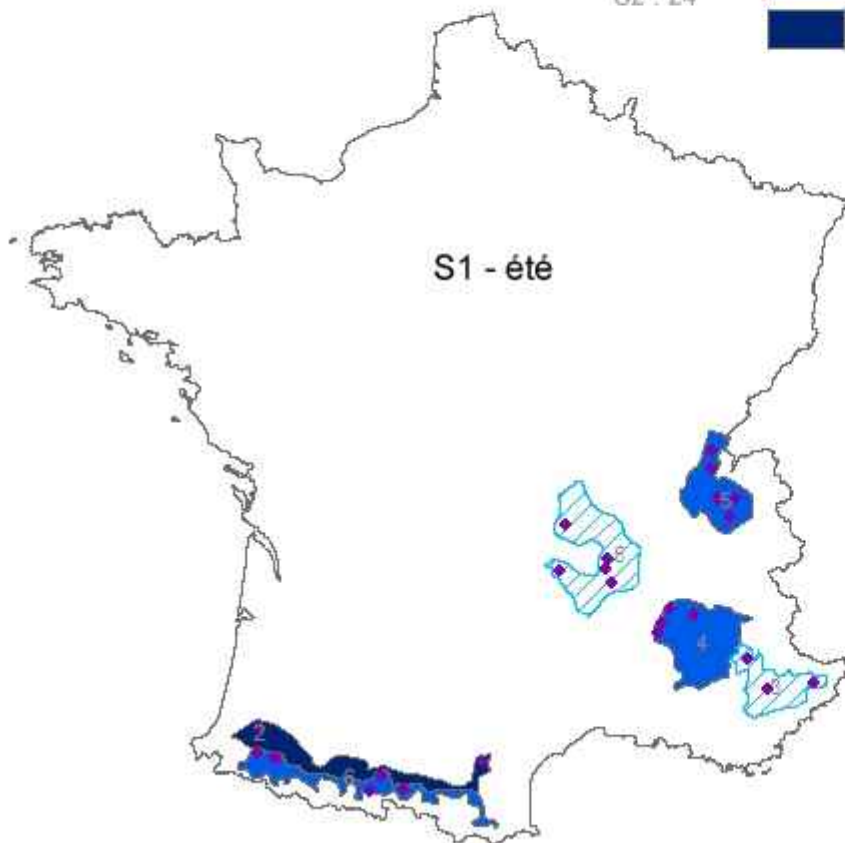
au risque :

10 %

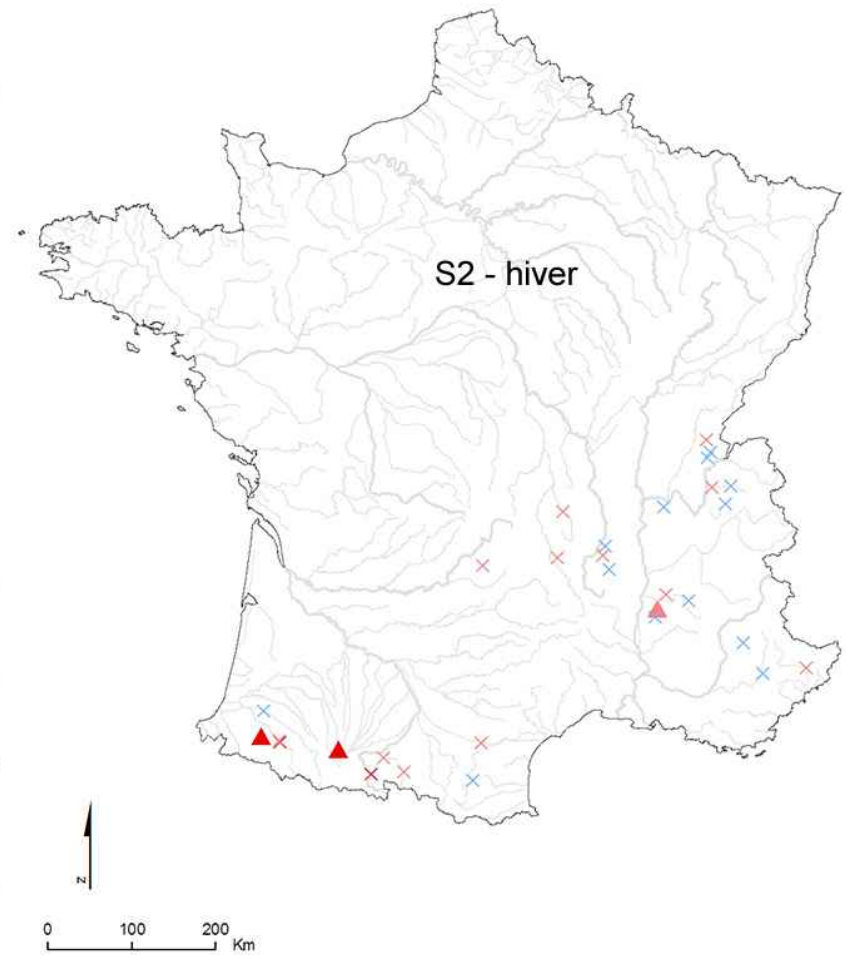
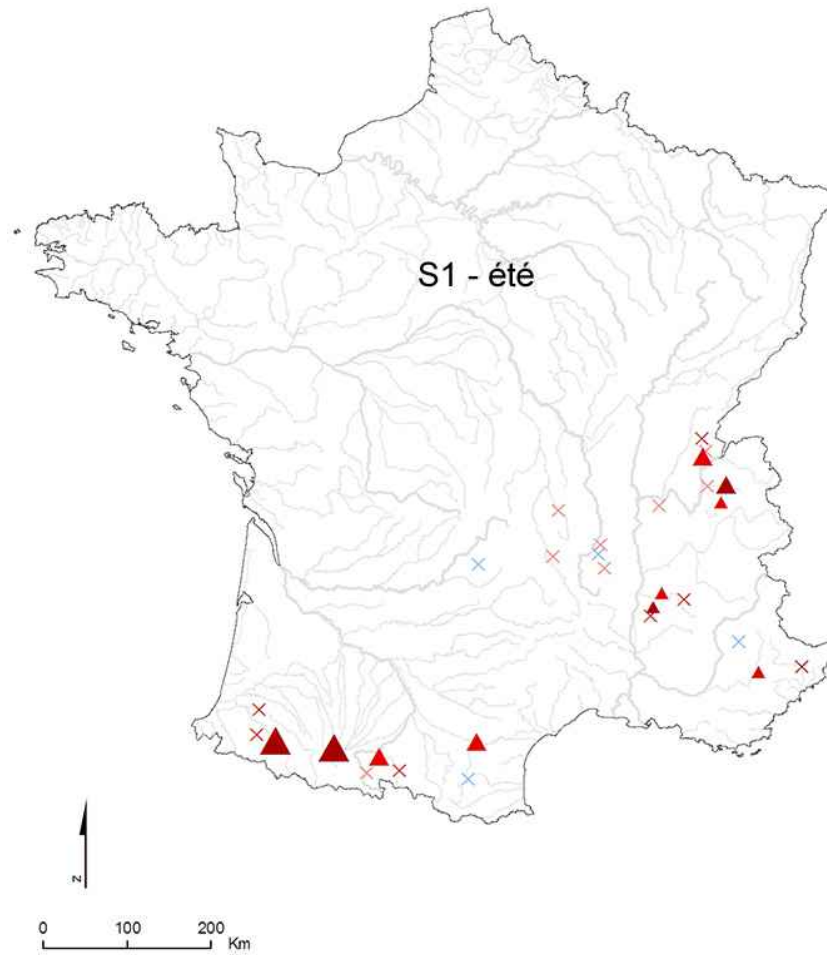
5 %

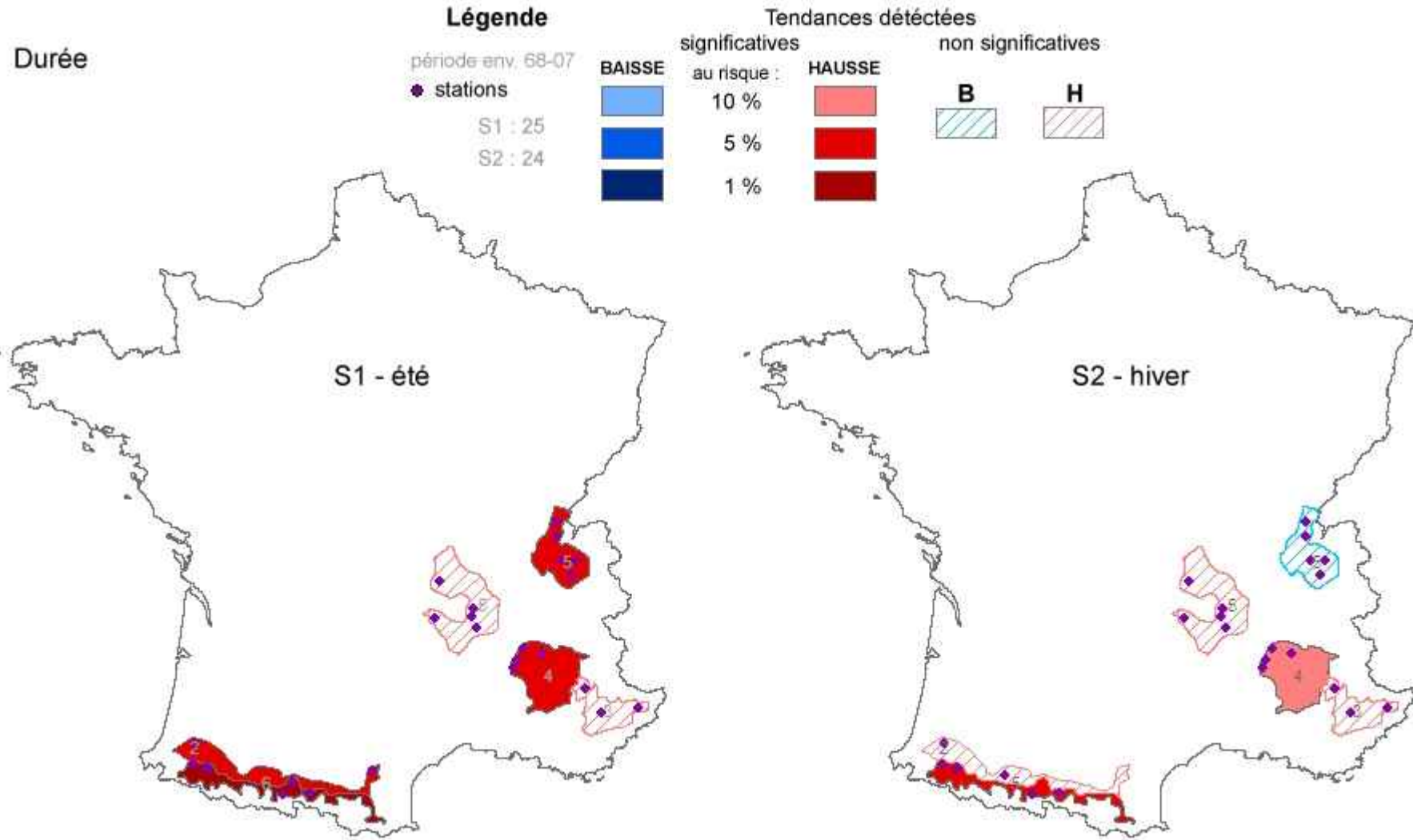
1 %

**HAUSSE**

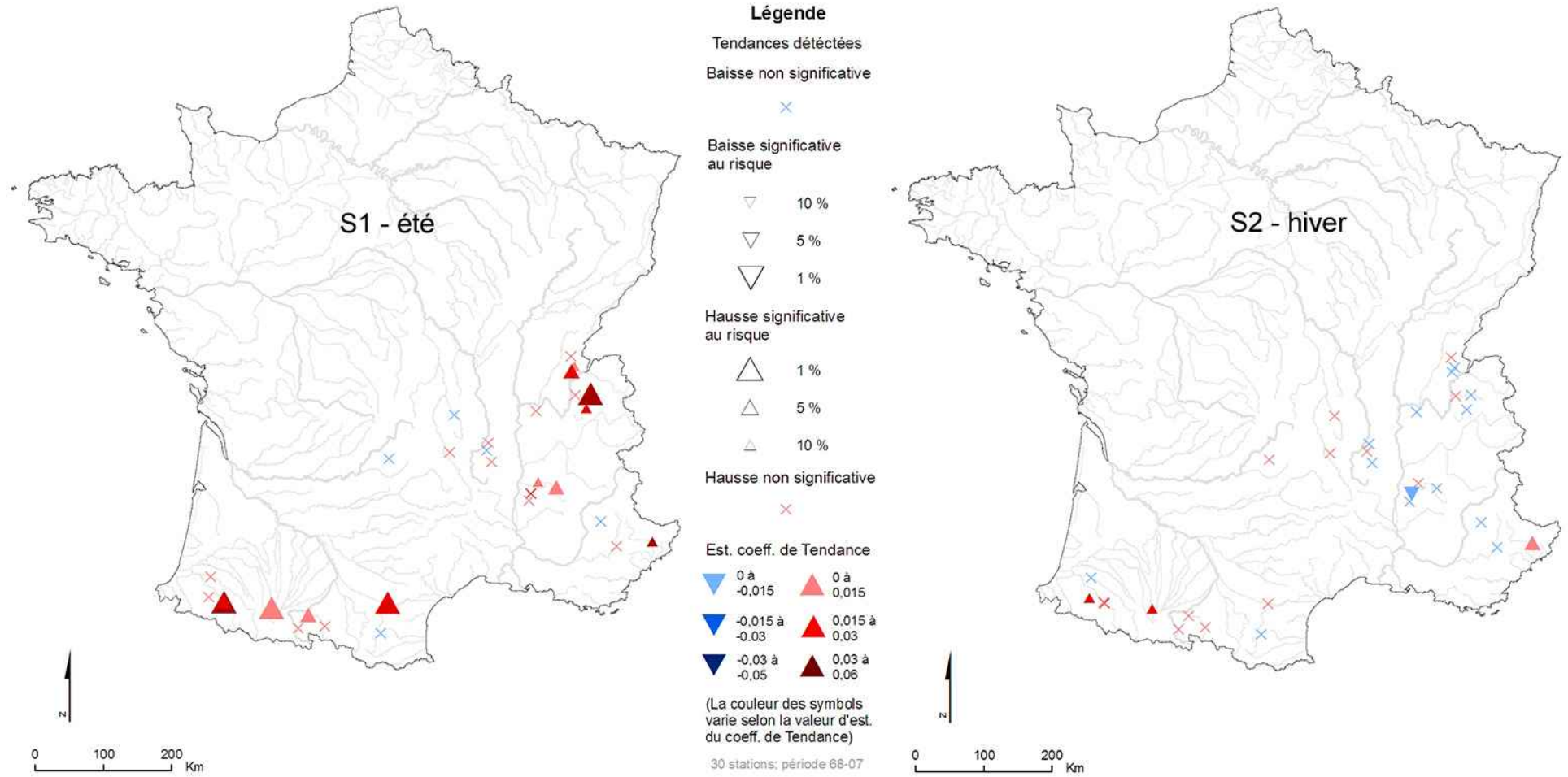


Durée





Déficit de volume



Déficit de volume

**Légende**

période env. 68-07

• stations

S1 : 25

S2 : 24

**BAISSE**



**Tendances détectées**

significatives

au risque :

10 %

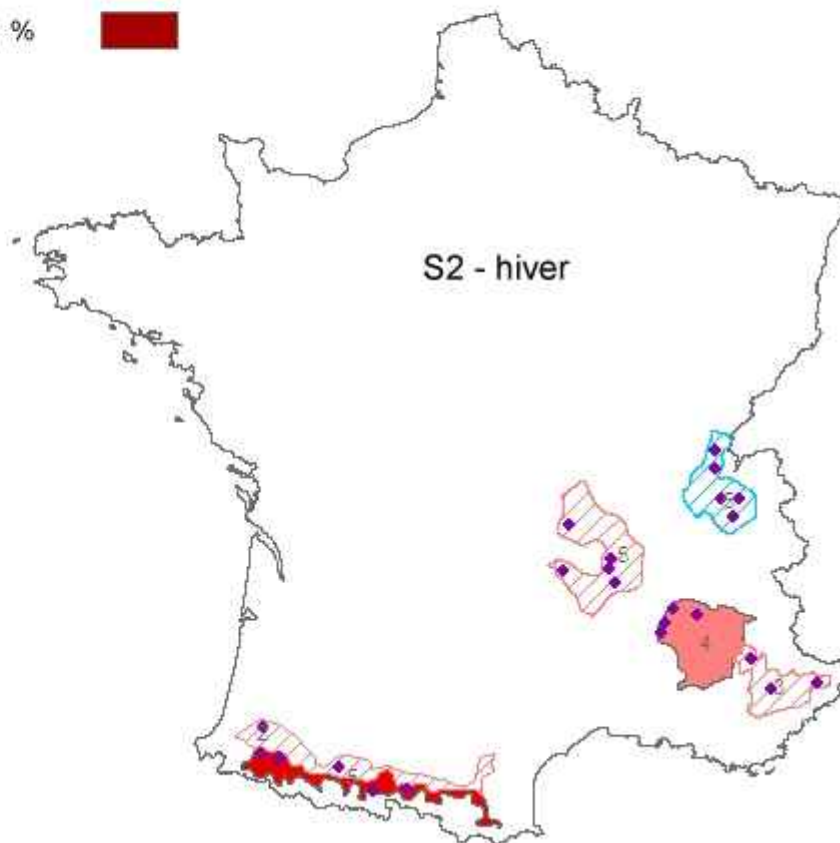
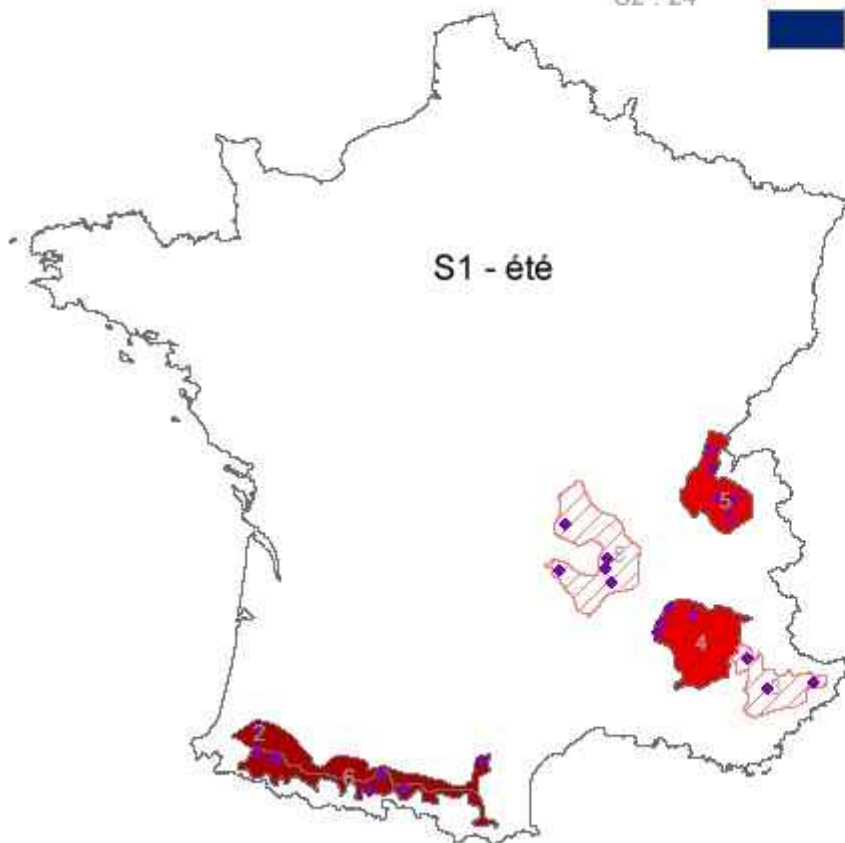
5 %

1 %

**HAUSSE**

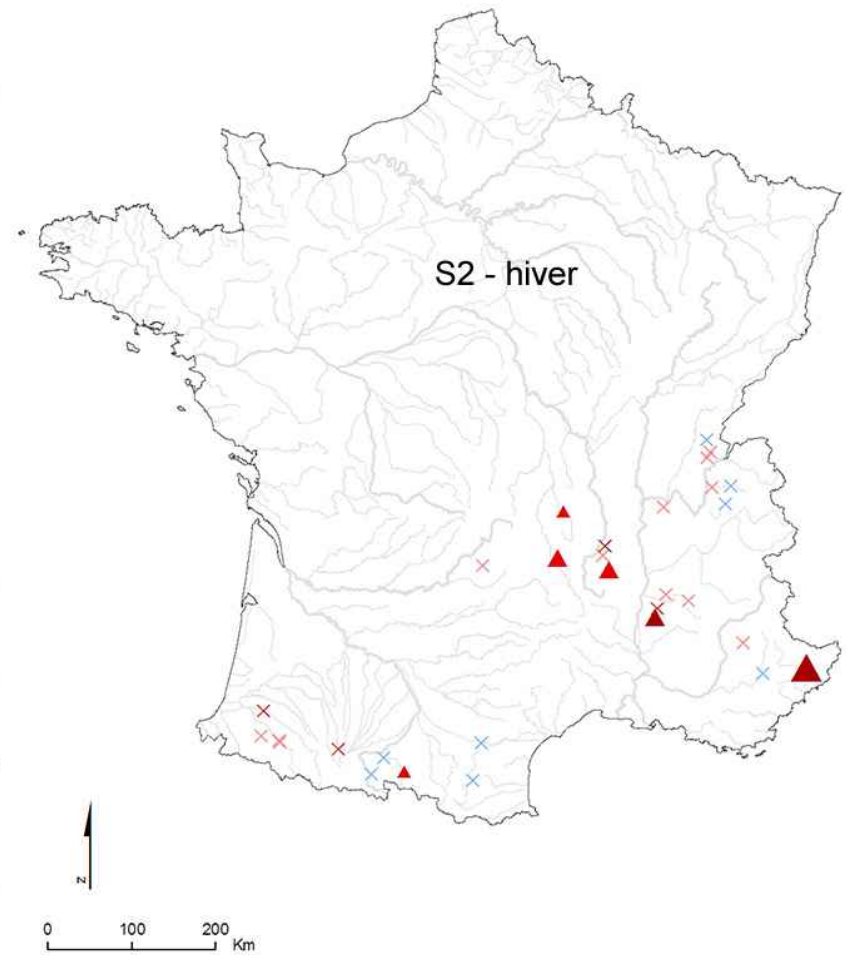
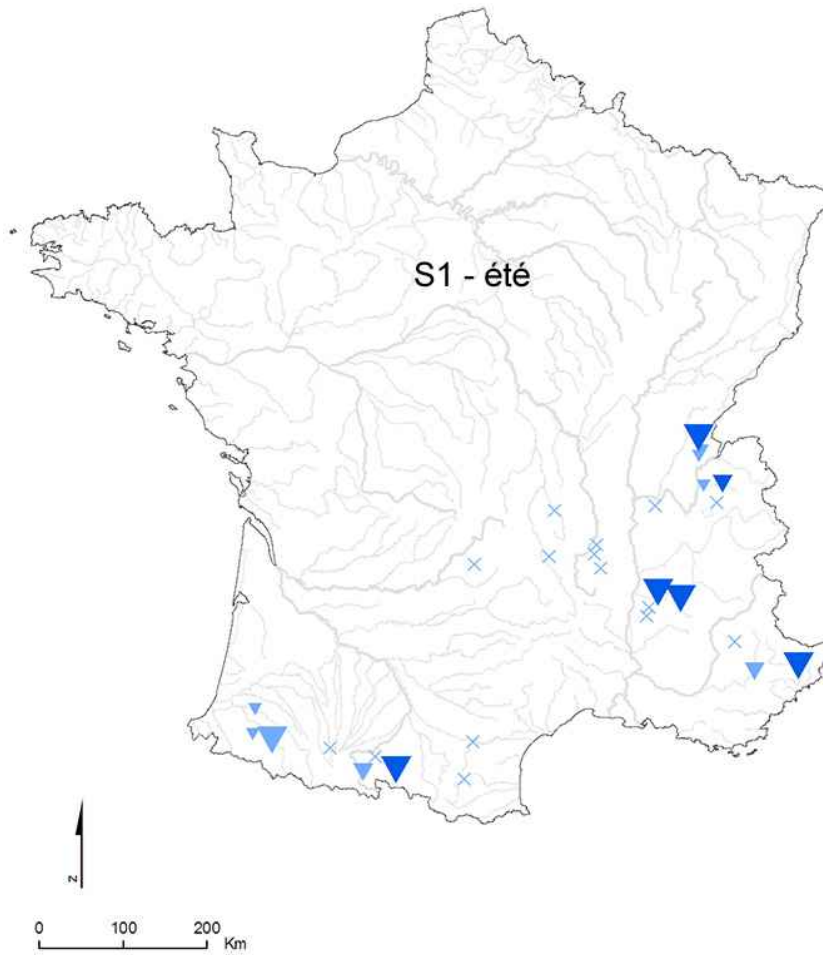


non significatives





Début



Début

**Légende**

période env. 68-07

• stations CM

S1 : 11

S2 : 10

**BAISSE**



significatives

au risque :

10 %

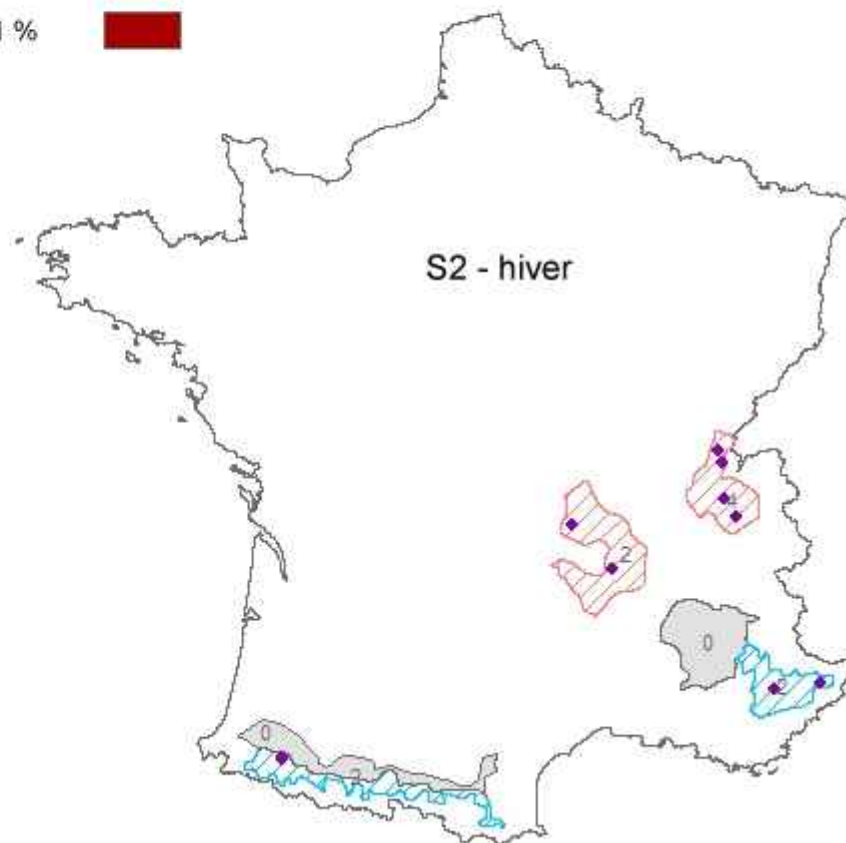
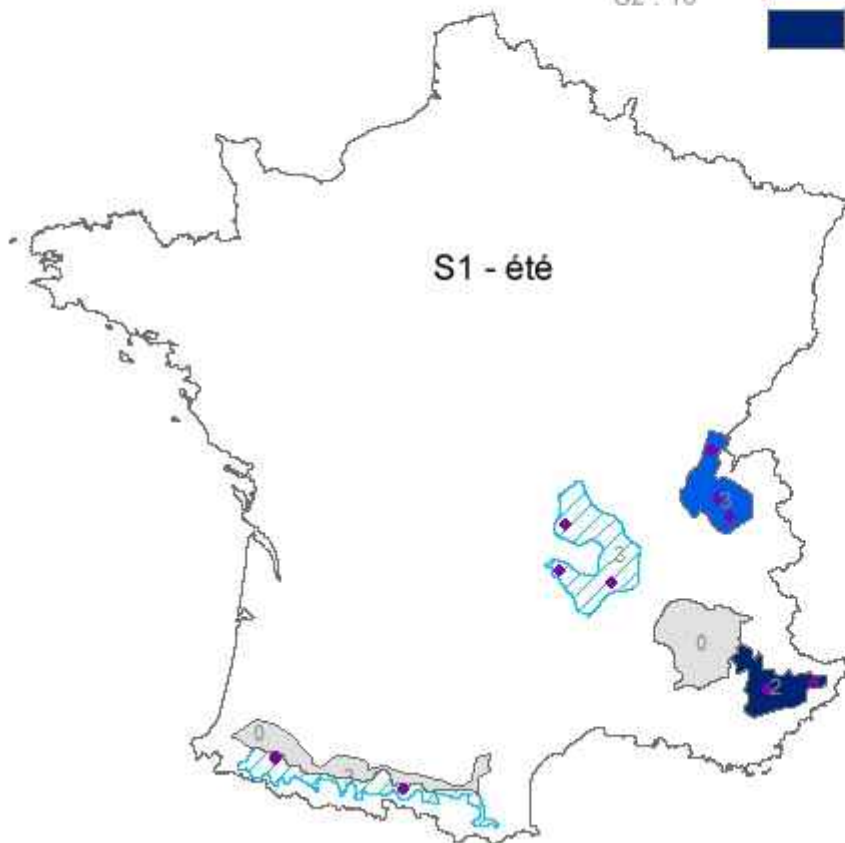
5 %

1 %

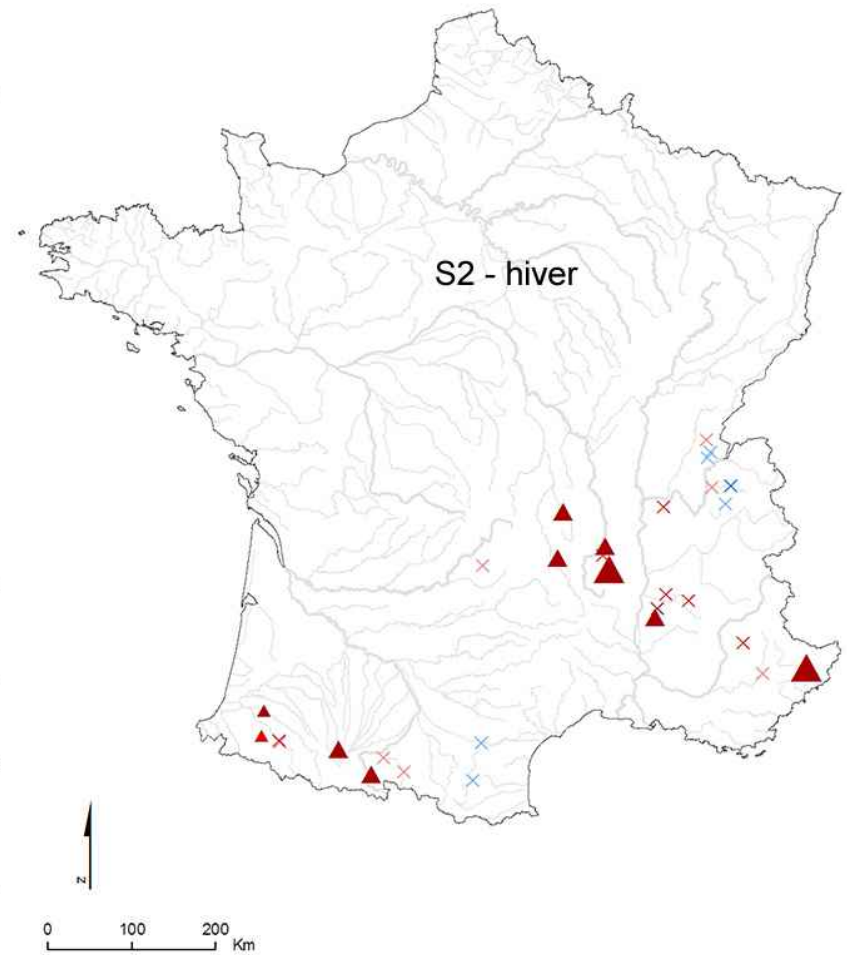
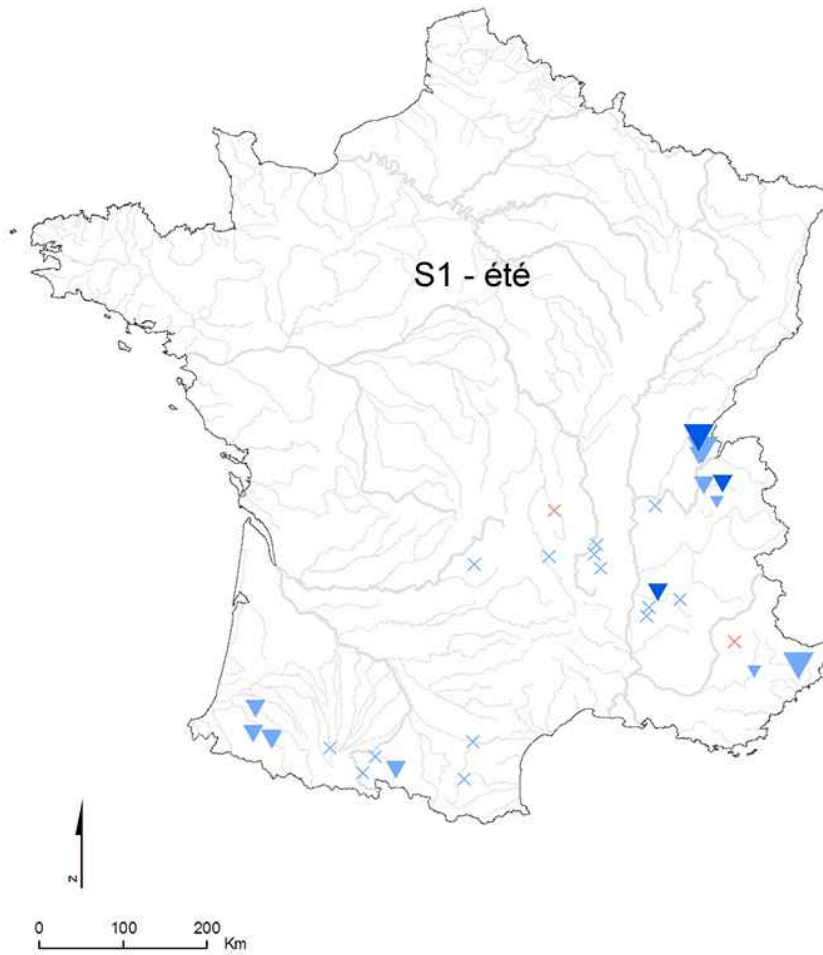
**HAUSSE**



non significatives



Centre



Centre

**Légende**

période env. 68-07

• stations CM

S1 : 11

S2 : 10

**BAISSE**



significatives

au risque :

10 %

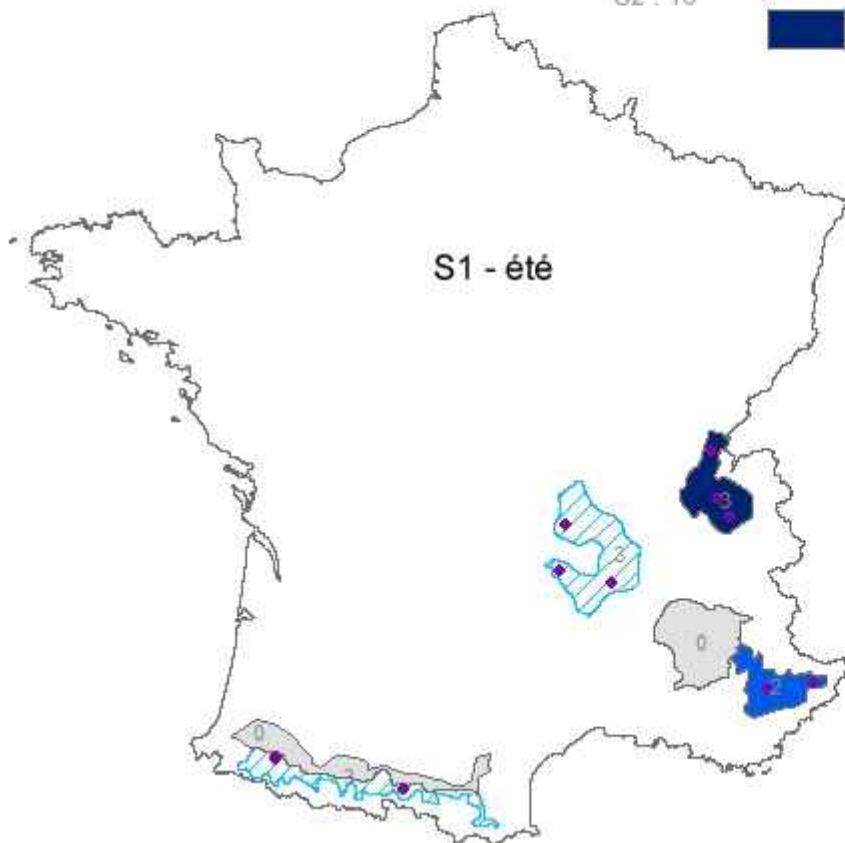
5 %

1 %

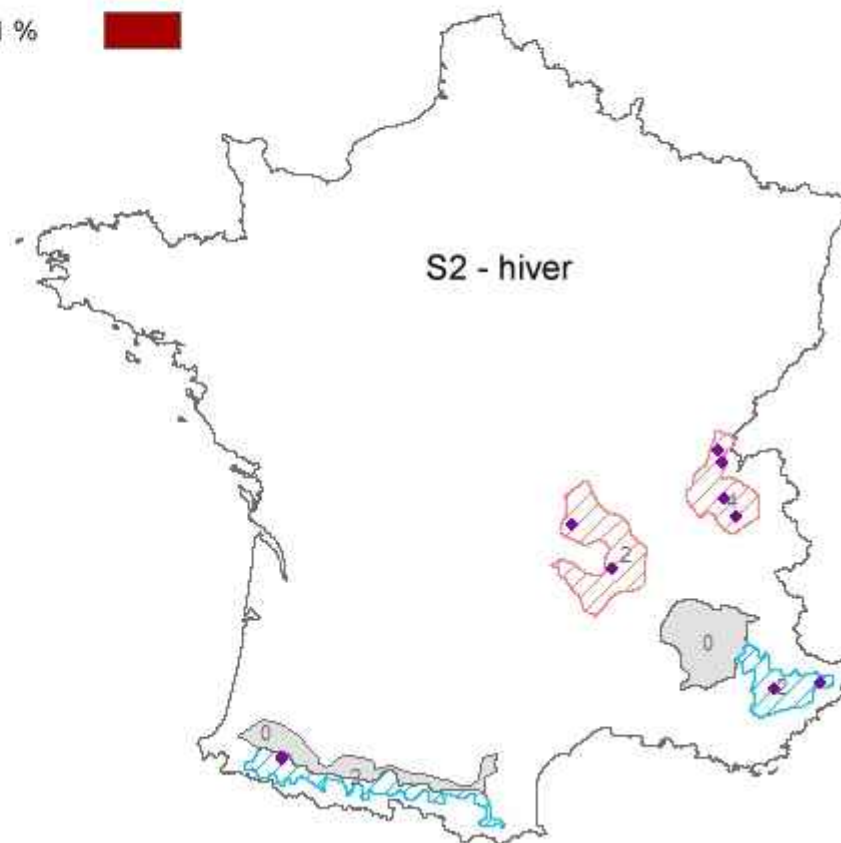
**HAUSSE**



non significatives

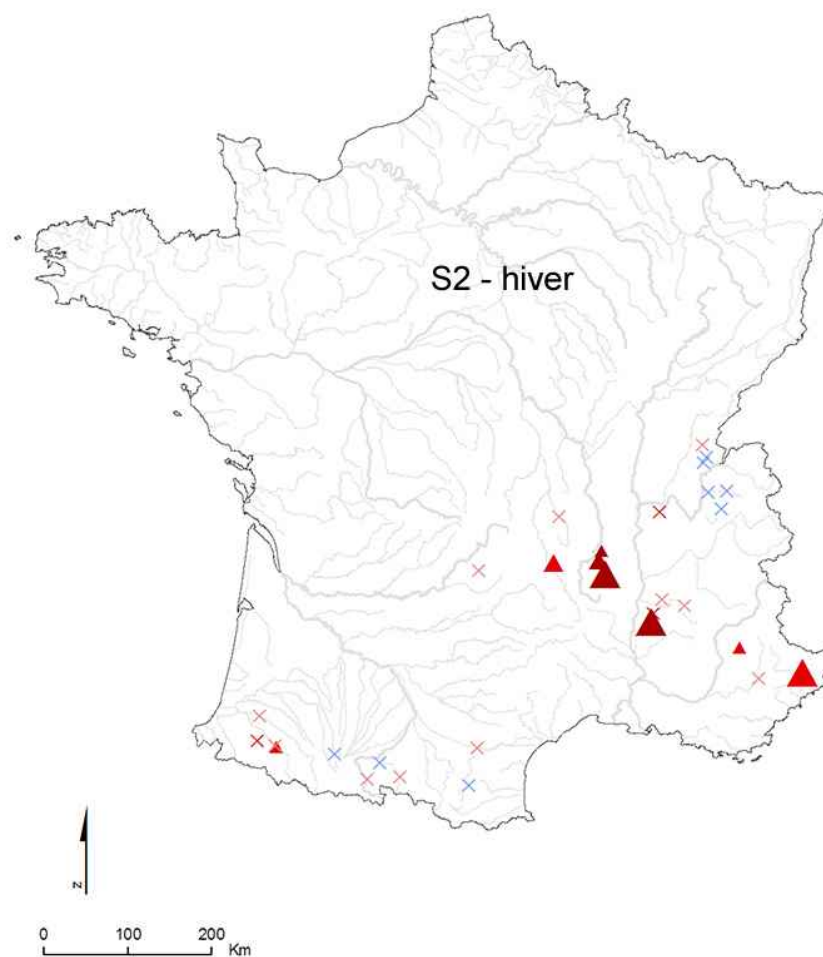
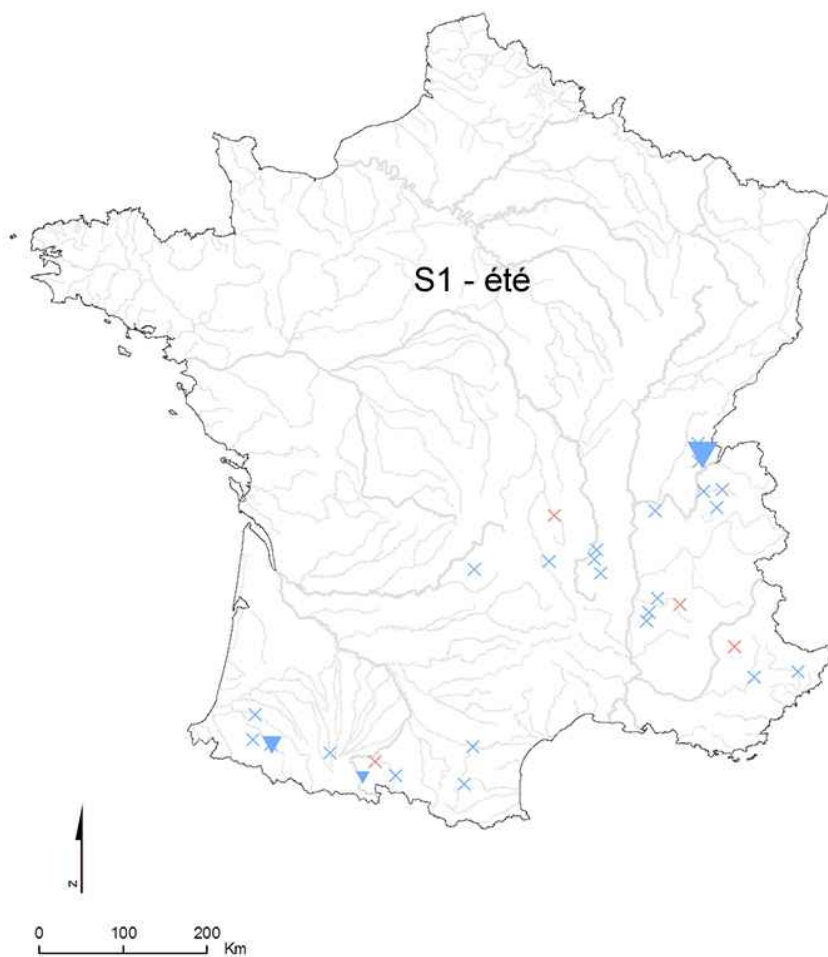


S1 - été



S2 - hiver

Date du débit minimum



**Date du débit minimum**

**Légende**

période env. 68-07

● stations

S1 : 25

S2 : 24

**BAISSE**

**Tendances détectées**

significatives

au risque :

10 %

5 %

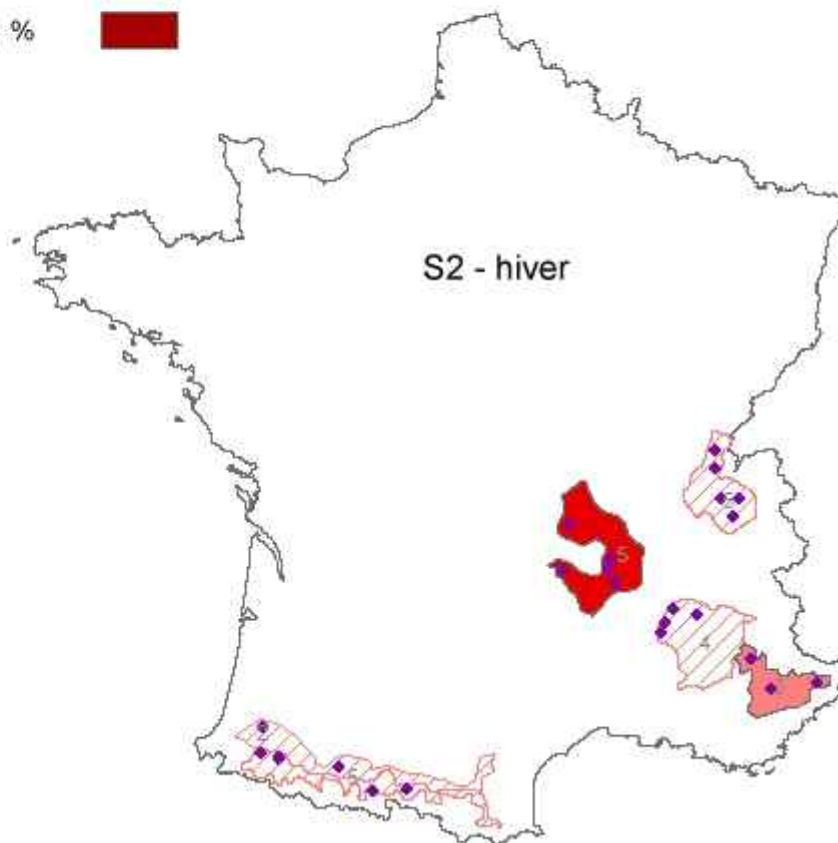
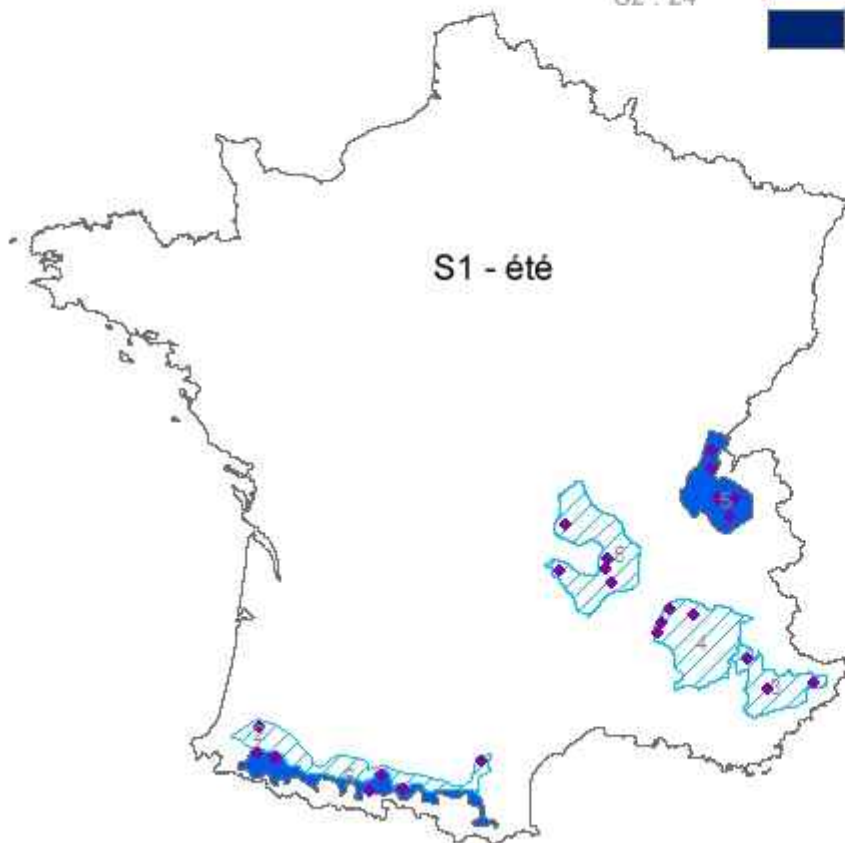
1 %

**HAUSSE**

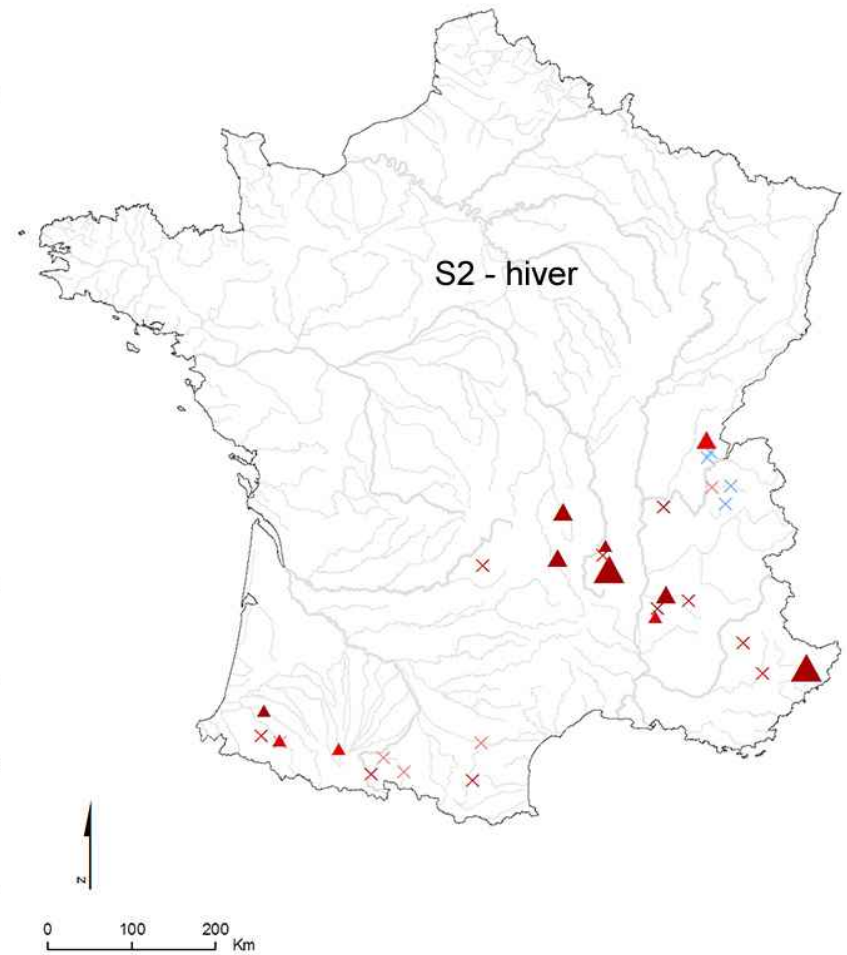
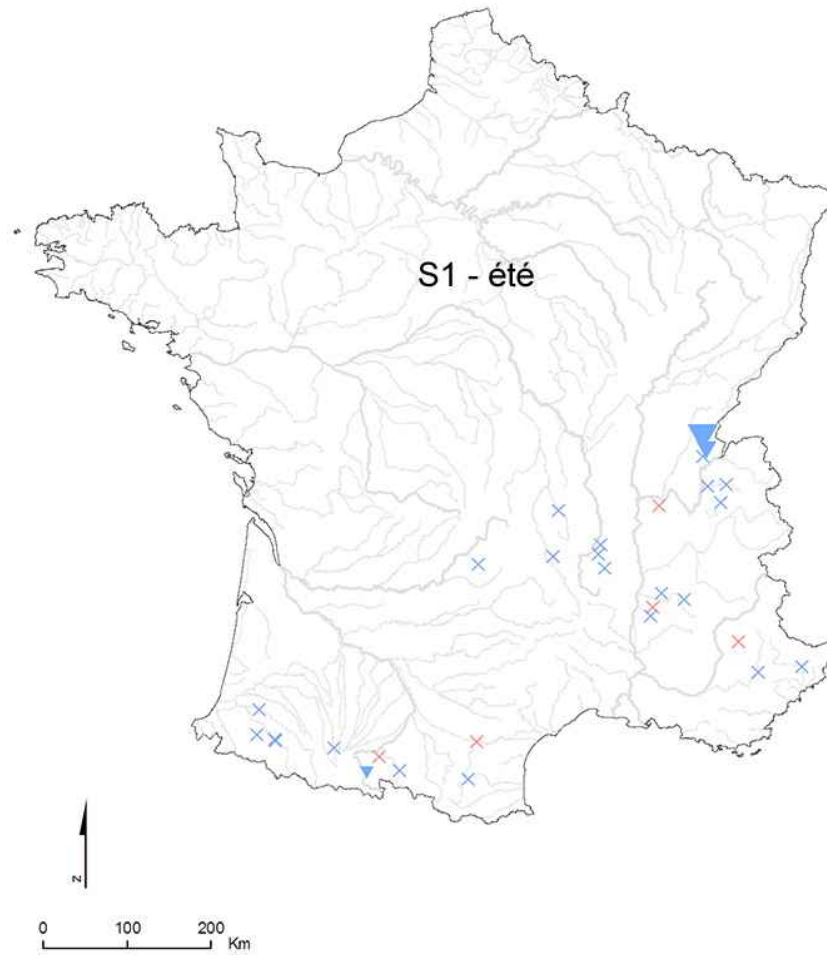
non significatives

**B**

**H**



Fin



Fin

**Légende**

période env. 68-07

• stations CM

S1 : 11

S2 : 10

**BAISSE**



significatives

au risque :

10 %

5 %

1 %

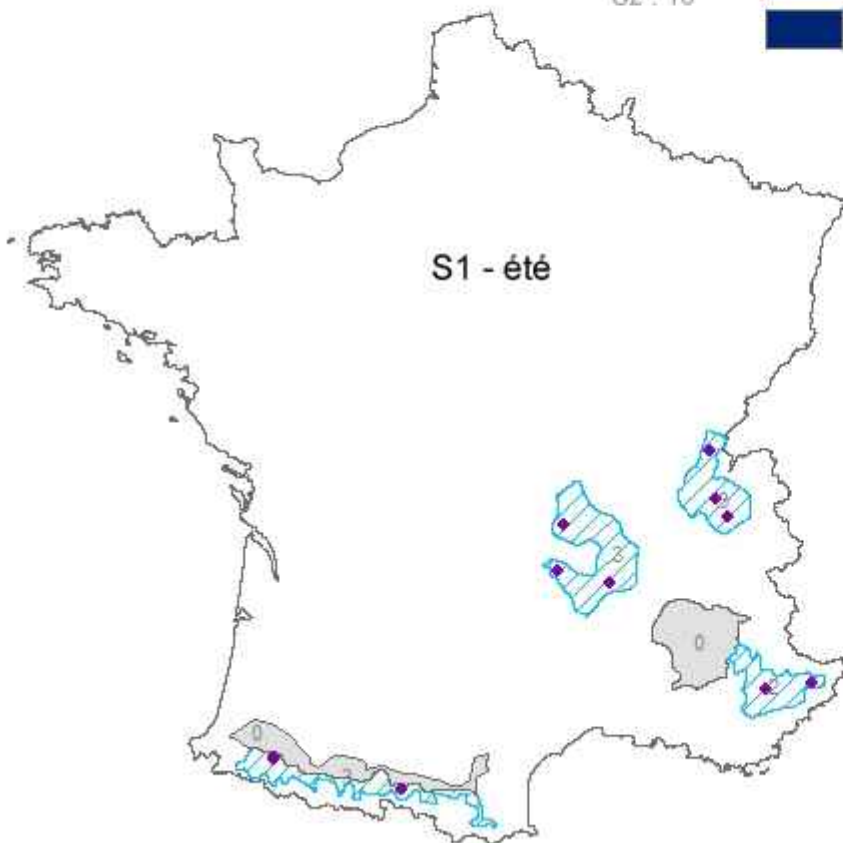
**HAUSSE**



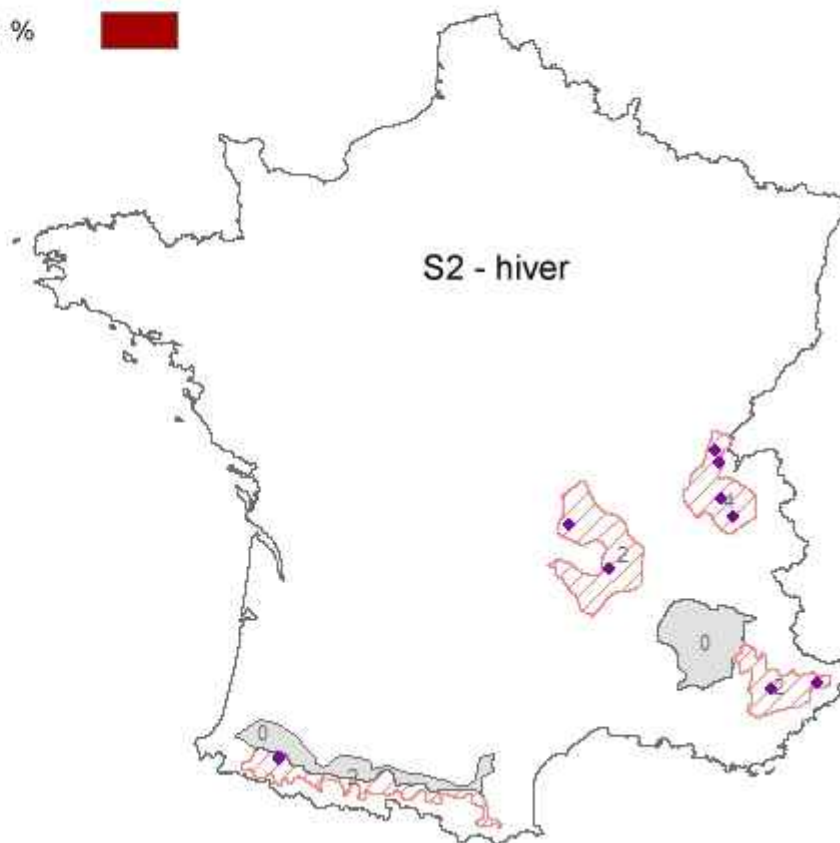
non significatives



S1 - été

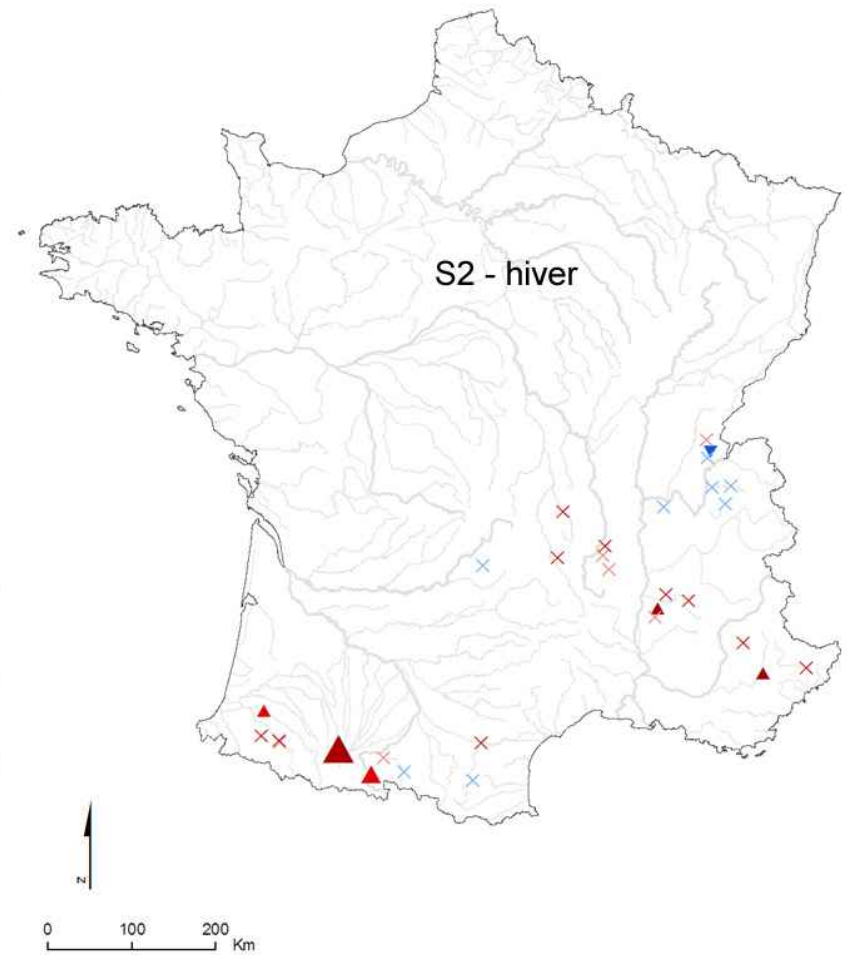
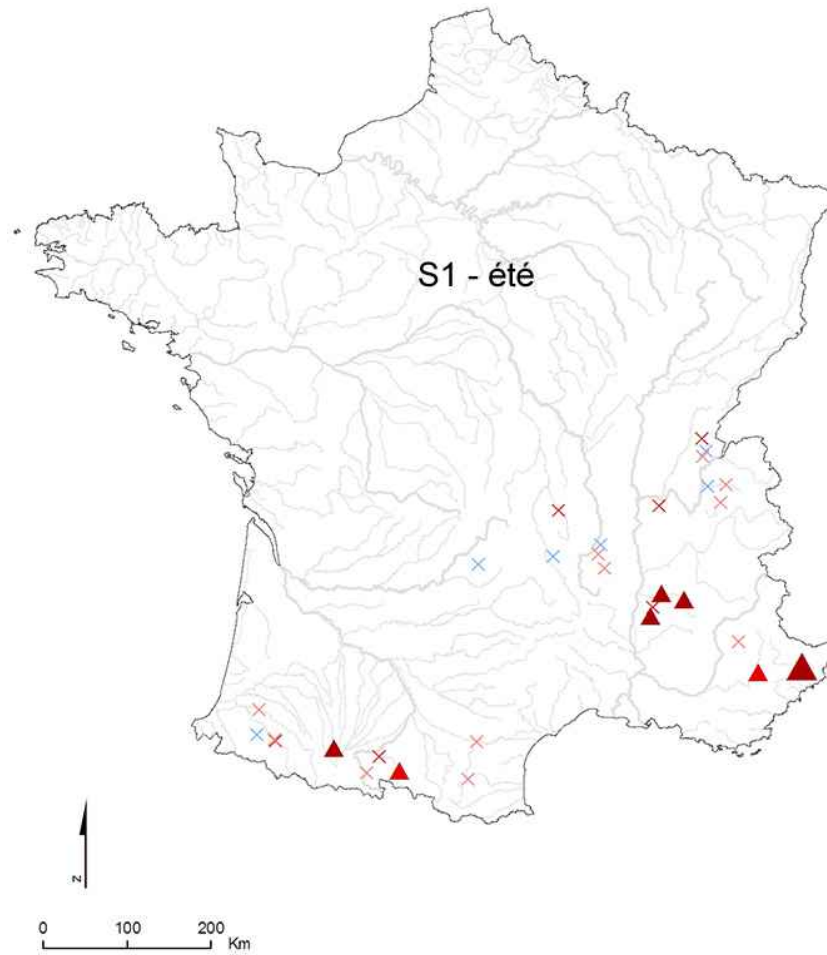


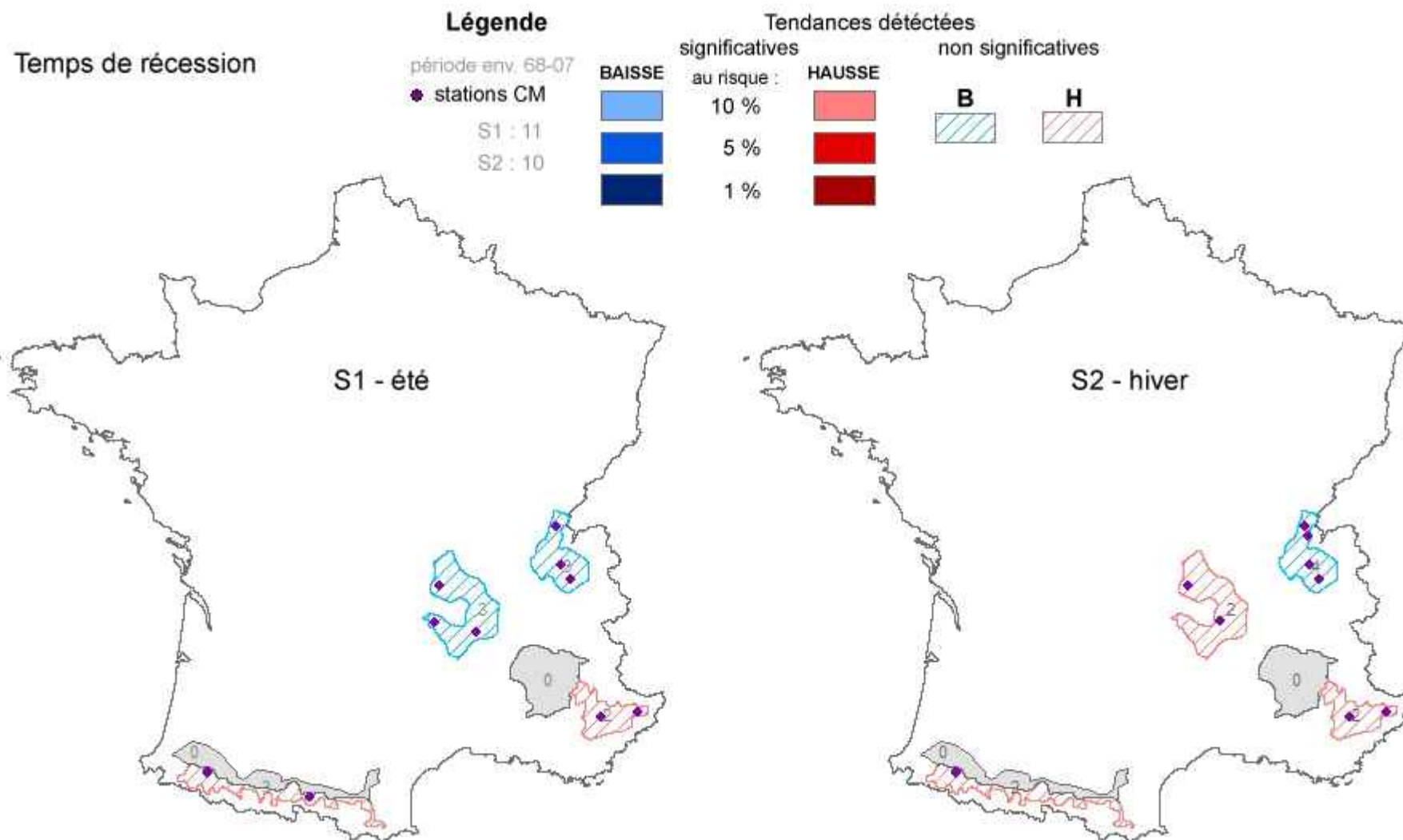
S2 - hiver



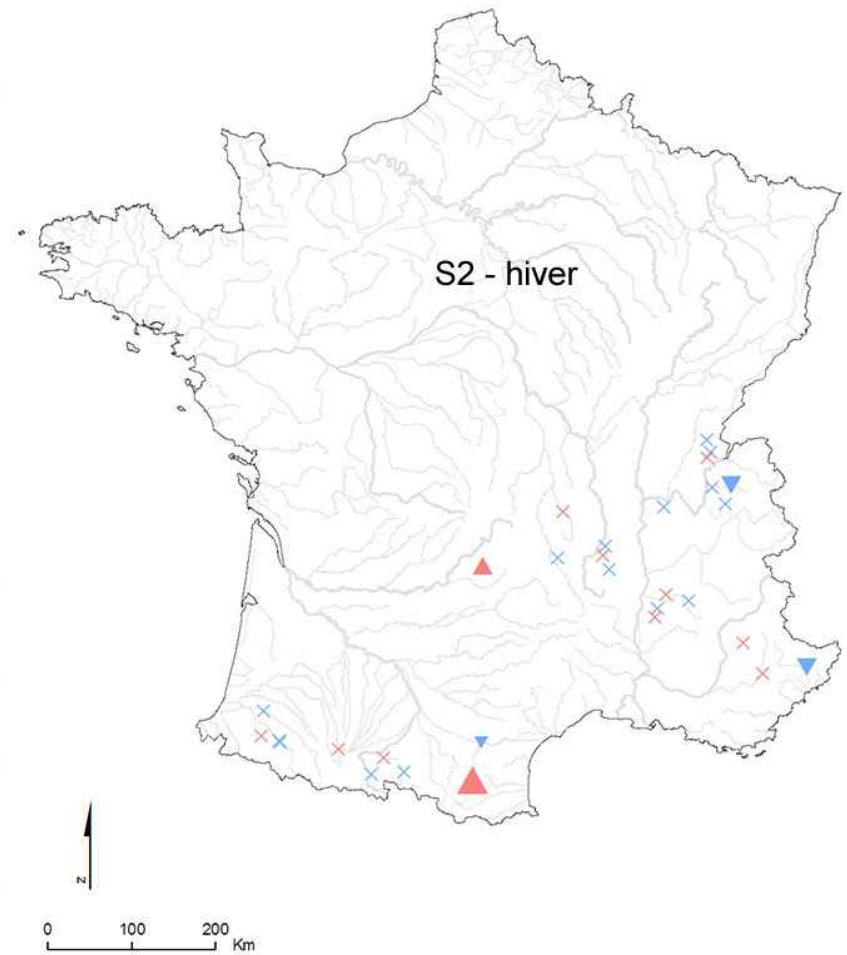
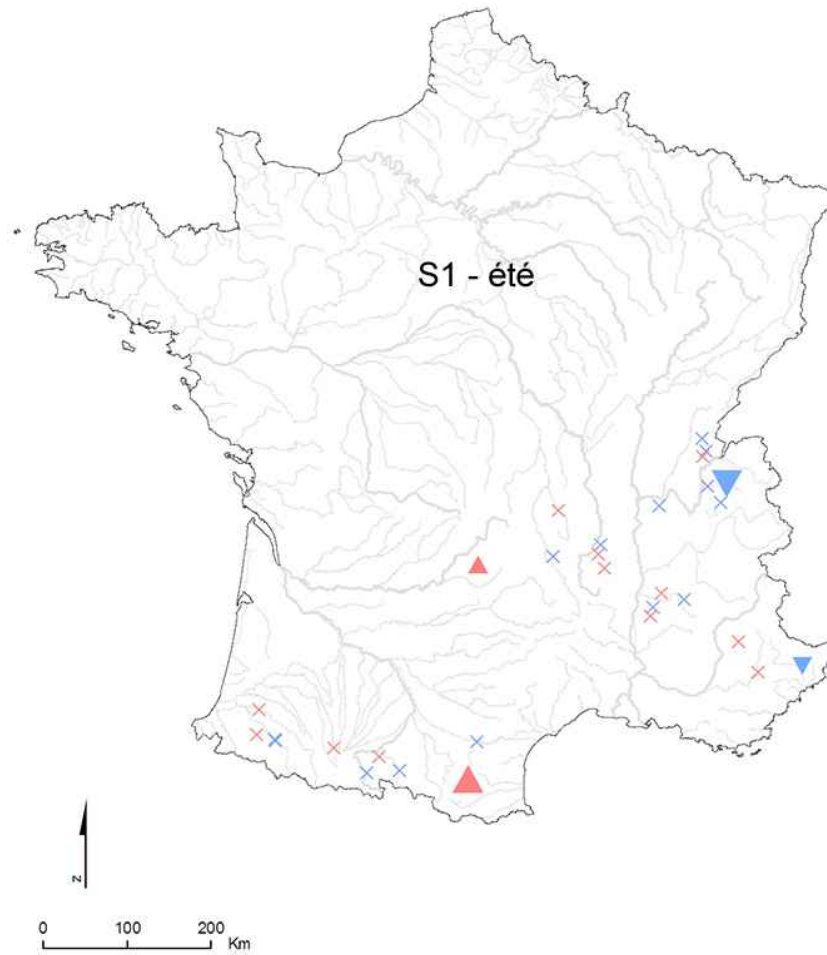


Temps de récession





Base Flow Index



**Base Flow Index**

**Légende**

période env. 68-07

• stations

S1 : 25

S2 : 24

**BAISSE**



significatives

au risque :

10 %

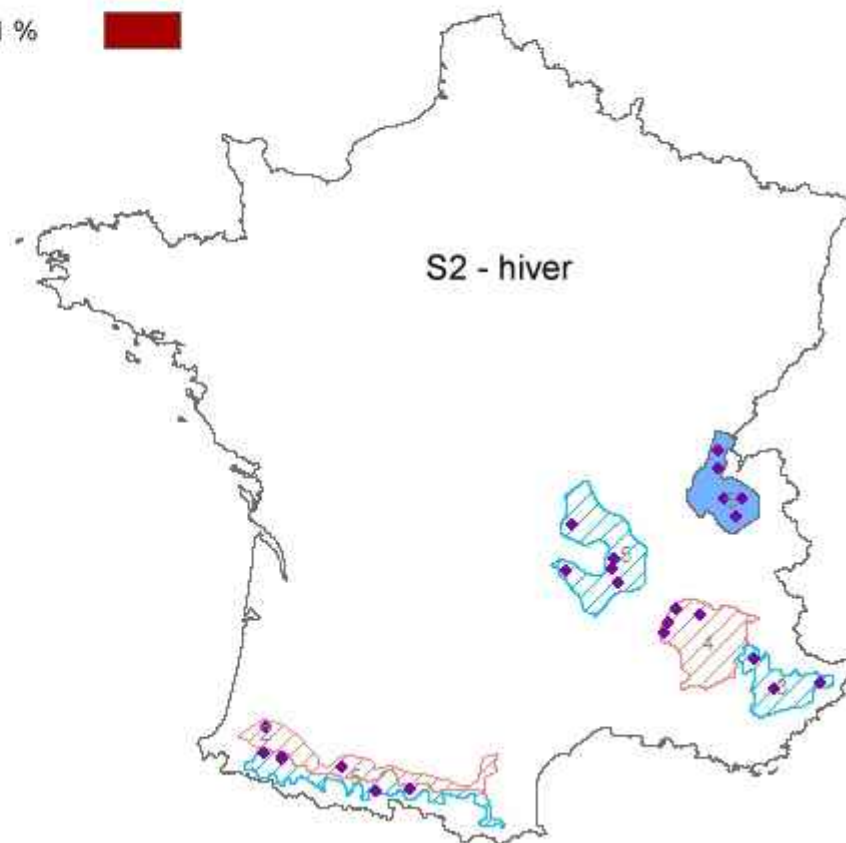
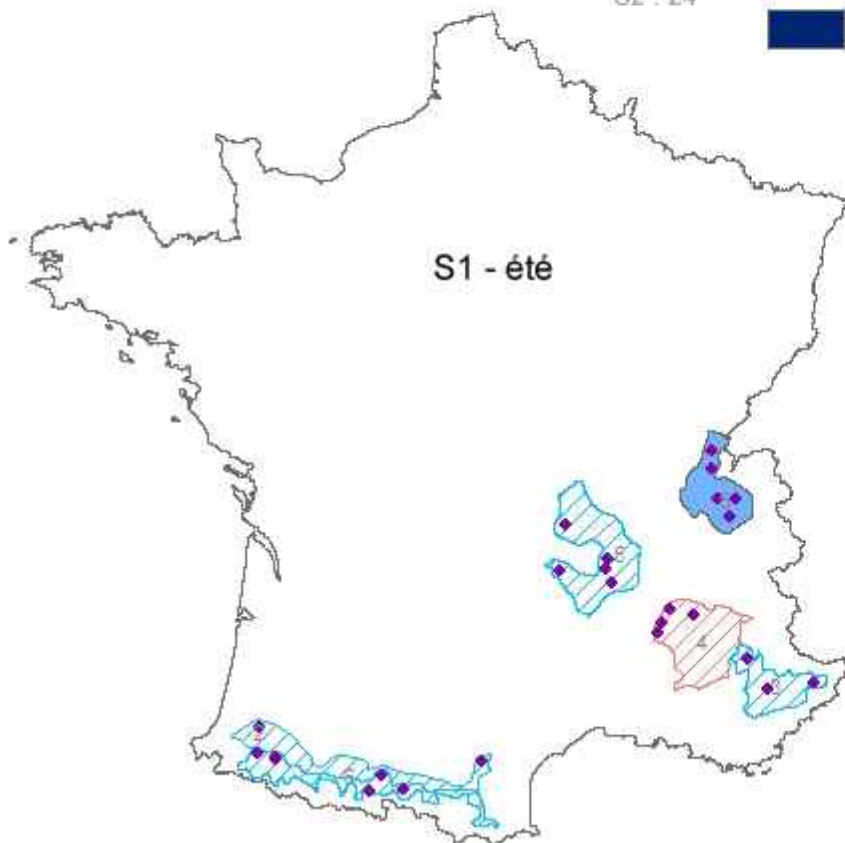
5 %

1 %

**HAUSSE**



non significatives



Onema  
Hall C – Le Nadar  
5 square Félix Nadar  
94300 Vincennes  
01 45 14 36 00  
[www.onema.fr](http://www.onema.fr)

*Cemagref*  
*Parc de Tourvoie*  
BP 44,  
92163 Antony cedex  
01 40 96 61 21  
*www.cemagref.fr*