

# Scénarios sécheresse sur le bassin Seine-Normandie

Julien Boé<sup>1</sup>, Milka Radojevic<sup>1</sup>, Rémy Bonnet<sup>1</sup>, Gildas Dayon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CECI, CERFACS-CNRS, Toulouse

<sup>2</sup>Maintenant à Pacific Climate Impacts Consortium, Univ. of Victoria, Victoria, Canada

Avec le suivi et les conseils de Sarah Feuillette (AESN), Frédéric Raout (DRIEE Ile de France) et Florence Habets (CNRS UPMC - Sorbonne Université).

27 avril 2018

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Objectifs de l'étude</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Données</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Définition des indices de sécheresse</b>	<b>4</b>
3.1	Sécheresses agricoles . . . . .	4
3.2	Sécheresses hydrologiques . . . . .	5
3.3	Sécheresses hydrogéologiques . . . . .	5
3.4	Notion de sévérité . . . . .	6
3.5	Discussion . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Contexte historique</b>	<b>6</b>
<b>5</b>	<b>Rappel sur les changements hydrologiques moyens</b>	<b>9</b>
<b>6</b>	<b>Evolution future projetée des sécheresses</b>	<b>11</b>
6.1	Changements sur la France . . . . .	11
6.2	Changements moyens sur le bassin Seine-Normandie . . . . .	11
<b>7</b>	<b>Choix des épisodes de sécheresse</b>	<b>19</b>
<b>8</b>	<b>Caractérisation des épisodes de sécheresse</b>	<b>20</b>
<b>9</b>	<b>Remarques conclusives</b>	<b>34</b>

# 1 Objectifs de l'étude

Comme en témoignent les études à grande échelle (Collins et al., 2013) ou à plus fine échelle (Boé et al., 2009; Dayon, 2015; Dayon et al. 2018), un des impacts hydro-climatiques du changement climatique les plus préoccupants sur l'Europe de l'Ouest et la France est un assèchement estival. Des diminutions importantes des débits et de l'humidité des sols sont ainsi projetées en été. Schématiquement, cet assèchement estival est du à la fois à une diminution des précipitations estivales projetée par la plupart des modèles climatiques et à une augmentation de l'évapotranspiration en hiver/printemps. Une augmentation de la fréquence et/ou de la sévérité des sécheresses est à attendre en association à ces changements moyens.

**L'objectif de cette étude est de décrire des "scénarios sécheresse" plausibles qui pourront ensuite être utilisés pour envisager et/ou tester les capacités d'adaptation du bassin Seine-Normandie aux changements futurs des sécheresses.** L'objectif n'est pas de caractériser l'évolution la plus probable en ce qui concerne les sécheresses, mais de sélectionner quelques épisodes de sécheresses intenses pour évaluer la capacité de différents systèmes socio-économiques du bassin à y faire face. Ces épisodes sont recherchés sur la période 2031-2060 pour rester dans un futur relativement proche, pertinent en terme d'adaptation. On choisit de s'intéresser à des périodes de 6 ans, qui permettent de considérer la répétition des conditions de sécheresses sur une période cohérente avec les cycles des plans de gestion du bassin. Il s'agit aussi de disposer d'un jeu de données pour des études plus spécifiques à certains usages ou territoires dans le cadre de la stratégie d'adaptation au changement climatique du bassin de 2016.

L'évolution des sécheresses sur le bassin Seine-Normandie dans un ensemble de projections hydrologiques récentes est tout d'abord caractérisée. La sélection de quelques épisodes intéressants pour les études d'impacts futures est ensuite réalisée. Ces derniers sont finalement décrits et analysés.

# 2 Données

Les projections hydrologiques réalisées par G. Dayon lors de sa thèse (Dayon, 2015) sont étudiées ici. Ces projections et leurs résultats sont décrits en détail dans Dayon (2015) et Dayon et al. (2018). Elles se basent sur le modèle hydro-météorologique ISBA-MODCOU (Habets et al., 2008). ISBA (Noihlan et Planton, 1989; Decharne et al., 2011) développé par Météo-France est un modèle de surface continentale calculant le bilan d'eau et d'énergie à la surface en fonction des variables météorologiques. MODCOU (Ledoux et al., 1989), développé par l'Ecole des Mines de Paris fait le routage du ruissellement calculé par ISBA dans le réseau hydrographique et calcule l'évolution des nappes là où elles sont représentées.

Les variables météorologiques à une résolution de 8km par 8km nécessaires pour forcer ISBA-MODCOU sont les précipitations liquides et solides, l'humidité spécifique et la température atmosphérique en surface, les rayonnements incidents solaire et infra-rouge, et le vent à 10m. Le modèle ISBA-MODCOU, à base physique, permet de simuler l'évolution de toutes les principales variables hydrologiques, les débits, mais aussi l'humidité des sols et les hauteurs piézométriques, importantes pour cette étude.

Pour obtenir les projections climatiques sur la France à haute résolution nécessaires à la modélisation hydrologique avec ISBA-MODCOU, les projections climatiques globales d'un ensemble de modèles climatiques du Coupled Model Intercomparisons Project Phase 5 (CMIP5, Taylor et al., 2012), notamment utilisées pour le dernier rapport du Groupe

d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC, Collins et al., 2013) sont désagrégées statistiquement avec la méthode décrite dans Dayon et al. (2015).

Des projections avec ces modèles ont été réalisées pour différents scénarios d'évolution des émissions en gaz à effet de serre (GES). Dans ce rapport, nous nous focalisons principalement sur le scénario RCP8.5 correspondant à des émissions continuant à un rythme très soutenu durant le 21ème siècle, sans mise en oeuvre de mesures d'atténuation de grande ampleur. Les résultats du scénario RCP4.5 sont aussi étudiés, plus rapidement. Ce scénario intermédiaire, moins sévère que le scénario RCP8.5, nécessite des mesures d'atténuation importantes, sans néanmoins permettre d'atteindre les objectifs de l'accord de Paris 2015 sur le climat. Comme illustré par la suite ou dans Dayon (2015), comme nous nous focalisons sur le futur proche (2031-2060), l'impact de la différence de scénarios demeure relativement limité.

Pour le scénario RCP8.5 (RCP4.5), 14 (15) projections hydrologiques sur la période 1950-2100 sont étudiées. Ces simulations proviennent de 8 (9) modèles climatiques (voire Table 2.1 dans Dayon (2015)).

Le nombre de modèles réduit par rapport à l'ensemble de tous les modèles CMIP5 (environ 40) a deux justifications principales. Tout d'abord, les données nécessaires à la méthode de désagrégation décrite dans Dayon et al. (2015) ne sont pas disponibles pour tous les modèles CMIP5. Ensuite, certains modèles CMIP5 sont très similaires et les utiliser tous n'est pas forcément souhaitable en raison des problèmes d'interdépendance associés (Boé, 2018).

Pour deux modèles, respectivement 3 et 5 projections climatiques différant uniquement par les conditions initiales (autour des années 1850) sont utilisées. Ces simulations permettent de caractériser les incertitudes dues à la variabilité interne climatique. En raison de la variabilité interne du système climatique (en l'absence même de variation des forçages externes) de petites différences de conditions initiales se traduisent par des évolutions au jour le jour très différentes. Ces différences au jour le jour (météorologiques) tendent à s'annuler lorsqu'on calcule des moyennes climatiques sur des périodes suffisamment longues (plusieurs dizaines d'années voire une centaine), mais des différences sur de plus courtes échelles de temps (même 30 ans) restent visibles. Ces simulations permettent d'évaluer cet impact de la variabilité interne sur les sécheresses.

Afin de replacer les projections dans un contexte historique, nous disposons de l'analyse réalisée avec ISBA-MODCOU forcé par l'analyse observationnelle SAFRAN (Quintana-Segui et al., 2008) sur la période 1958-2010. Nous disposons aussi de la reconstruction réalisée par Rémy Bonnet, en thèse actuellement à CECI, sur le bassin Seine-Normandie sur la période 1851-2003. La méthode est une évolution de celle sur la France décrite dans Bonnet et al. (2017). Elle combine l'information donnée par les observations météorologiques longues mais très peu denses spatialement et par des réanalyses atmosphériques longues pour reconstituer les données météorologiques nécessaires pour forcer ISBA-MODCOU sur la période 1851-2003. Cette reconstruction n'a pas a priori la qualité de l'analyse SAFRAN-ISBA-MODCOU (SIM) mais s'étend beaucoup plus loin dans le passé.

**A noter que dans toutes les simulations hydrologiques étudiées dans ce projet, les potentiels effets anthropiques non-climatiques (e.g. pompages, barrages) sur l'hydrologie ne sont pas pris en compte, ni dans le passé, ni dans le futur.**

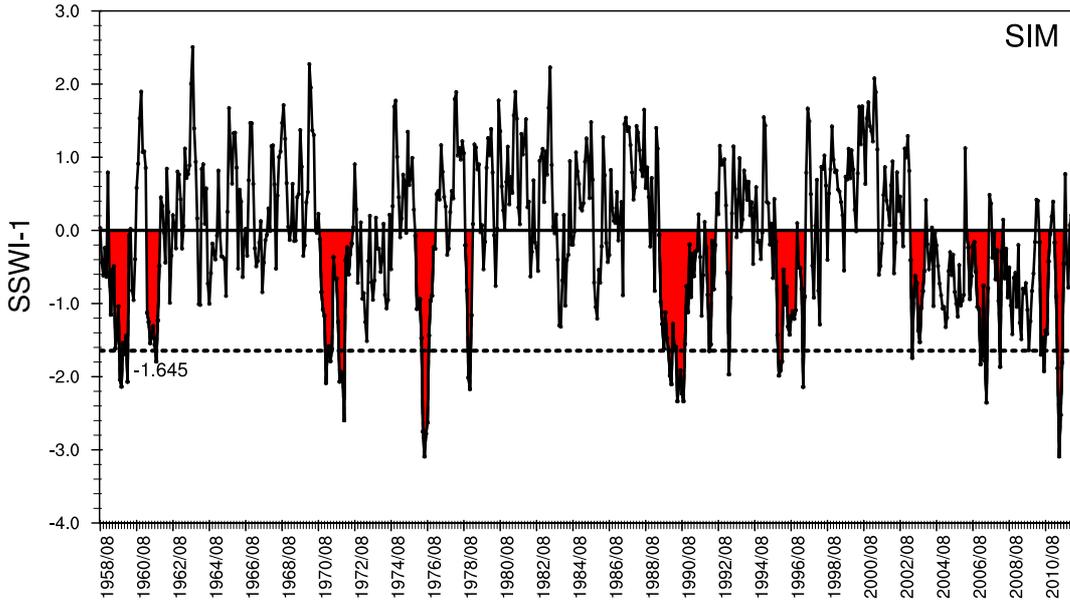


FIGURE 1 – *Illustration de la définition des sécheresses agricoles. Indice de SWI standardisé. Les périodes de sécheresse sont en rouge*

### 3 Définition des indices de sécheresse

La notion de sécheresse est en partie subjective et recouvre de multiple aspects. Une grande variété d’indices différents est ainsi utilisée dans la littérature pour caractériser ces différents aspects.

On entend généralement par sécheresse une “période limitée dans le temps au cours de laquelle les conditions sont plus sèches que la normale”. Ce qu’on appelle la normale, et donc par suite les sécheresses, est le plus souvent relatif à un lieu donné (e.g. la valeur brute d’humidité des sols pour une sécheresse dans le nord pourrait être considérée comme normale dans le sud), et peuvent être aussi relatives à une période de l’année. Par exemple, il est possible de définir des sécheresses pour les débits du mois de janvier, lorsque les conditions sont plus sèches que la normale de ce mois, même si les débits normaux sont alors climatologiquement élevés. Si on raisonne par rapport à la normale annuelle, des conditions de sécheresse en janvier seront impossibles à atteindre ou tout du moins exceptionnelles.

Additionnellement, ce que l’on entend par “conditions sèches” peut varier. Différents types de sécheresse existent ainsi : sécheresses agricoles, touchant l’humidité du sol, sécheresses hydrologiques touchant les débits, sécheresses météorologiques touchant les précipitations, sécheresses hydrogéologiques touchant les aquifères. Si ces différentes sécheresses sont en partie liées au travers de mécanismes communs, elles ne sont pas équivalentes et peuvent ne pas coïncider.

Comme les sécheresses météorologiques (en lien avec la pluie) sont surtout importantes au travers des impacts qu’elles peuvent avoir sur les débits et l’humidité des sols, on se focalise directement dans ce travail sur les sécheresses agricoles et hydrologiques. Les sécheresses hydrogéologiques sont aussi étudiées de façon secondaire.

#### 3.1 Sécheresses agricoles

Pour les sécheresses agricoles, nous utilisons un indice dérivé du très utilisé “Standardized Precipitation Index” (Guttman, 1998). Le Soil Wetness Index (SWI), un indice

d’humidité des sols remplace les précipitations dans la définition. Le SWI est défini comme suit :

$$SWI = \frac{W - W_{wilt}}{W_{fc} - W_{wilt}} \quad (1)$$

avec  $W$  le contenu en eau des sols,  $W_{wilt}$  le contenu en eau au point de flétrissement et  $W_{fc}$  le contenu en eau du sol à la capacité au champ.

Ce type d’indice de sécheresse a déjà été utilisé en France, par exemple par Vidal et al. (2010).

En pratique, la variable SWI, en chaque point, et pour chaque mois pris indépendamment, est transformée en une variable normale centrée réduite (distribution gaussienne de moyenne nulle et d’écart type unité). La procédure implique d’abord un ajustement statistique à une lois gamma sur une période de référence (un ajustement différent pour chaque mois). La transformation en distribution gaussienne est obtenue en faisant correspondre les probabilités cumulées données par la loi gamma à celle d’une gaussienne. La période de référence utilisée dans tous les cas va du 01/08/1958 au 31/07/2005.

Un seuil de -1.64 qui correspond au 5ème percentile de la distribution finale de l’indice standardisé est utilisé pour définir les sécheresses. Pour qu’une sécheresse existe, il faut que le SWI standardisé passe sous ce seuil un mois donné. On reste alors dans cet épisode de sécheresse tant que le SWI standardisé des mois autour (qu’ils soient avant ou après) du mois où le seuil a été franchi demeure à des valeurs négatives (e.g. voir les sécheresses agricoles colorées en rouge sur la Figure 1).

Cette approche tend donc à donner des événements de sécheresse assez longs. D’une part, chaque mois est standardisé indépendamment et le seuil peut être dépassé tout aussi bien en janvier qu’en aout. D’autre part, on reste dans un épisode de sécheresse même avec des anomalies faiblement négatives de SWI standardisé, du moment que le seuil a été franchi une fois au cours de cet épisode.

A noter que les indices standardisés sont seuillés dans cette étude à + ou - 3 par construction. Ces valeurs correspondent à des événements extrêmement rares sur la période de référence, ce qui n’est pas forcément aussi vrai dans le climat futur.

### 3.2 Sécheresses hydrologiques

Pour les sécheresses hydrologiques, un indice basé sur le VCN3 (volume consécutif minimal pour 3 jours) de période de retour 5 ans est utilisé. En pratique, pour chaque station on calcule la moyenne glissante des débits journaliers sur 3 jours. On cherche alors chaque année le minimum, et on calcule sur ces minimums la valeur correspondant à une période de retour 5 ans pour définir le seuil de sécheresse, tout cela sur la période de référence (1958-2005). Une période de sécheresse est alors simplement définie comme une période pour laquelle la moyenne glissante du débit sur 3 jours est sous le seuil.

### 3.3 Sécheresses hydrogéologiques

Pour définir les sécheresses hydrogéologiques, un indice piézométrique standardisé (IPS) pour les mailles avec nappe libre ainsi que leur moyenne est calculé selon la même procédure que pour le SWI standardisé des sécheresses agricoles. Les périodes de sécheresse hydrogéologique sont ensuite définies de la même façon que les sécheresses agricoles.

### 3.4 Notion de sévérité

Afin d’avoir une notion consistante pour caractériser la sévérité des différents types de sécheresses, basés sur des définitions différentes, nous définissons la sévérité d’une sécheresse comme suit. Il s’agit de la différence relative entre l’indice (e.g. SWI standardisé ou moyenne glissante des débits sur 3 jours) moyenné pendant une sécheresse donnée et la valeur moyenne de l’indice pour toutes les sécheresses de la période 1961-1990. Pour l’indice hydrologique, on multiplie par (-1) afin qu’une valeur positive de sévérité corresponde comme pour les autres indices à une sévérité plus importante. On peut ensuite calculer la sévérité moyenne des sécheresses sur n’importe quelle période. Cette notion de “sévérité” indique simplement dans quelle mesure une sécheresse est plus ou moins intense que les sécheresses en moyenne sur la période 1961-1990.

### 3.5 Discussion

L’indice agricole (ainsi qu’hydrogéologique) et l’indice hydrologique sont construits de façon différente et les résultats obtenus pour ces deux indices ne sont pas directement comparables. Tout d’abord, pour l’indice agricole on part de données mensuelles, et pour l’indice hydrologique de données journalières (puis moyennées sur 3 jours). Pour l’indice agricole, une standardisation est faite mois par mois, alors que pour l’indice hydrologique aucune standardisation n’est faite. Avec une telle définition, le seuil de sécheresse hydrologique ne peut être franchi qu’en période de débits déjà climatologiquement faibles (autour de l’été), ce qui n’est pas le cas pour l’indice de sécheresse agricole. De plus, pour l’indice agricole, l’épisode de sécheresse dure, une fois le seuil de sécheresse franchi, tous les mois autour pour lesquels le SWI standardisé est négatif, ce qui a tendance à créer des événements de sécheresse longs. Pour l’indice hydrologique, la sécheresse ne dure que tant que le débit moyenné sur trois jours est sous le seuil de sécheresse. Il en résulte aussi que pendant une sécheresse hydrologique, la valeur du débit est toujours très faible (inférieure au seuil) et ne peut donc pas varier beaucoup. Pendant les sécheresses agricoles, l’indice peut varier plus fortement (il est simplement négatif).

**Enfin, il est important de noter que les sécheresses dans cette étude sont toujours définies par rapport aux conditions climatologiques moyennes du passé. On peut ainsi avoir des sécheresses dans le climat futur qui sont inhabituelles par rapport au passé (avec nos définitions) mais qui n’ont rien d’inhabituel par rapport au climat moyen futur, voire même qui sont normales en raison de l’assèchement climatologique projeté par beaucoup de modèles. C’est un choix justifié par le fait qu’on s’intéresse ici à des questions d’adaptation en référence au climat actuel.**

## 4 Contexte historique

Pour pouvoir replacer les scénarios sécheresse dans un contexte historique, tout en introduisant les indices de sécheresses utilisés par la suite, l’évolution passée des sécheresses agricoles, hydrologiques et hydrogéologiques sur le bassin Seine-Normandie est présentée. Les résultats de l’analyse SIM depuis 1958 et de la reconstruction de R. Bonnet (voir section 2) sont montrés. L’intérêt de cette reconstruction est d’être disponible sur une période bien plus longue que SIM, même si sa qualité est a priori inférieure à celle de SIM, en raison de la rareté des observations météorologiques sur la première moitié du 20ème siècle.

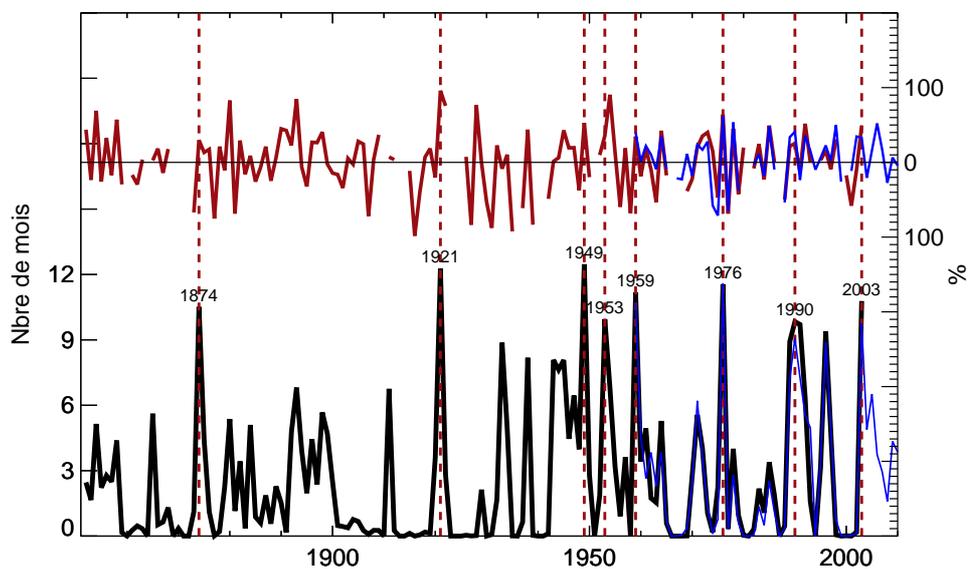


FIGURE 2 – Evolution passée des sécheresses agricoles sur le bassin Seine-Normandie. En bas, moyenne spatiale sur toutes les mailles du bassin du nombre de mois passés en situation de sécheresse agricole chaque année. En haut, sévérité moyenne des sécheresses de chaque année (la notion de sévérité est définie dans la section 3). En noir et rouge : reconstruction. En bleu : analyse SIM. Les années caractérisées par plus de 9 mois en sécheresse sont indiquées avec des barres verticales pointillées.

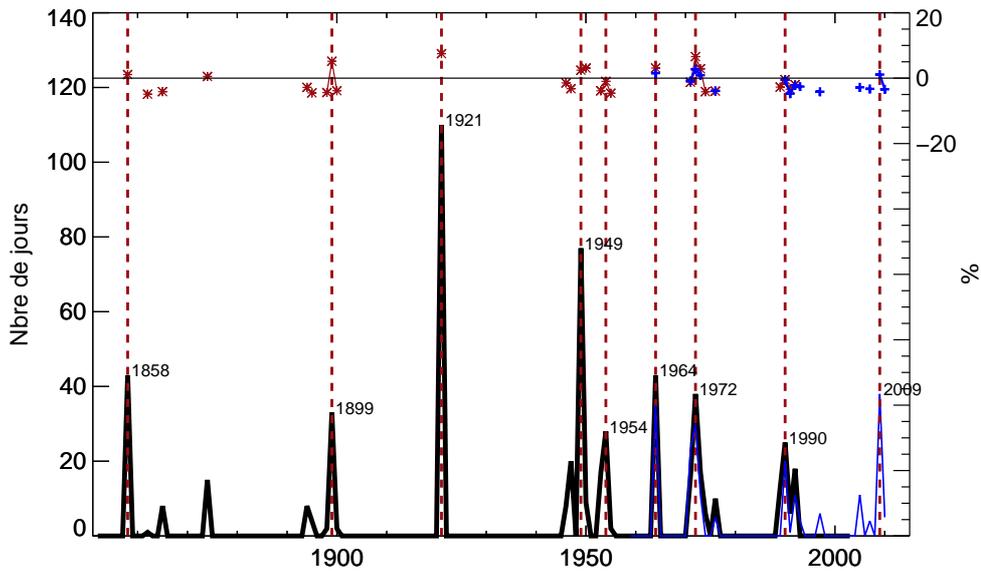


FIGURE 3 – *Evolution des sécheresses hydrologiques pour la Seine à Paris. En bas, nombre de jours passés en sécheresse hydrologique chaque année. En noir et rouge : reconstruction. En bleu : analyse SIM. En haut, sévérité moyenne des sécheresses de chaque année. Les années caractérisées par plus de 20 jours en sécheresse sont indiquées avec des barres verticales. Pour rappel, l'impact du soutien des Grands Lacs après les années 1960 n'est pas pris en compte dans la modélisation hydrologique.*

Le nombre de mois sur le bassin Seine-Normandie passés chaque année en sécheresse agricole ainsi que leur sévérité moyenne sont montrés sur la Figure 2. Tout d'abord, on constate que l'analyse SIM et la reconstruction donnent des résultats très similaires sur leur période commune, ce qui renforce la confiance dans la reconstruction sur la période plus ancienne. On retrouve les années de grandes sécheresses historiques connues comme 1921 et 1949 - équivalentes en terme d'occurrence mais avec une sévérité un peu plus importante en 1921 -, 1976 ou encore 2003. En 1921 et 1949 la quasi-intégralité du bassin Seine-Normandie était en sécheresse agricole pour tous les mois de l'année.

La Figure 3 présente le nombre de jours par an passés en sécheresse hydrologique pour la Seine à Paris. On retrouve ici la sécheresse de 1949 et encore plus celle de 1921 comme particulièrement importantes. La sécheresse de 1976 n'apparaît pas ici. Il faut noter que ces résultats ne sont pas directement comparables à ceux de la figure précédente pour les sécheresses agricoles, qui correspond à une moyenne sur le bassin entier.

Finalement, la Figure 4 présente le nombre de mois passés en sécheresse hydrogéologique (Figure 4(b)) ainsi que l'indice piézométrique standardisé moyen pour les nappes libres du bassin Seine-Normandie correspondant (Figure 4(a)). Avec une définition calquée sur l'indice de sécheresse agricole on obtient ici des épisodes très longs, de plusieurs années passés en sécheresse hydrogéologique. Ceci tient très probablement au temps de réponse plus lent pour les nappes que pour l'humidité des sols. La période autour de 1949 apparaît ici comme une sécheresse hydrogéologique tandis que 1921 n'en est pas une. On observe bien une forte diminution de l'indice piézométrique standardisé en 1921, mais comme cette année est isolée dans une période généralement humide de plusieurs décennies, le

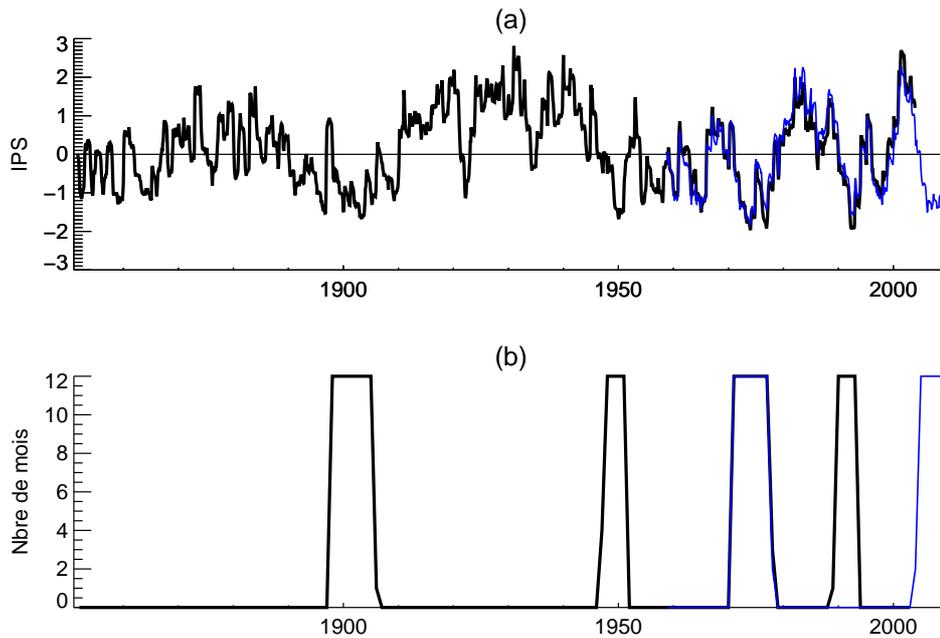


FIGURE 4 – (a) Evolution de l'indice piézométrique standardisé (sans unité) moyen pour les mailles libres du bassin (en noir) dans la reconstruction et (en bleu) l'analyse SIM. (b) Evolution du nombre de mois passés en sécheresse hydrogéologique chaque année.

seuil de sécheresse n'est pas atteint. A l'inverse 1949 apparait dans une période généralement sèche : toute la deuxième moitié des années 40 a été caractérisée par des sécheresses, agricoles par exemple (Figure 2).

## 5 Rappel sur les changements hydrologiques moyens

Afin de pouvoir replacer les résultats de cette étude sur les sécheresses dans un contexte hydrologique plus général, les changements moyens sont tout d'abord présentés. Ces résultats sont décrits avec bien plus de détails dans Dayon (2015) et Dayon et al. (2018).

Une saisonnalité très marquée des changements hydrologiques projetés dans les années 2031-2060 est visible sur la Seine. Les changements du SWI sont faibles voire très faibles sur tout le bassin en hiver (Figure 5(a)), tandis que des diminutions importantes de -0.05 à -0.15 sont projetées en été (Figure 5(b)). Pour les débits, on observe aussi des changements projetés faibles en hiver (Figure 6(a)), associés à des diminutions marquées en été (Figure 6(b)).

Ces différences saisonnières de comportement sont largement dues aux changements généralement positifs (mais limités) des précipitations en hiver sur le bassin, associés à une augmentation de l'évapotranspiration, et à des diminutions généralement marquées des précipitations estivales (Dayon 2015 ; Dayon et al. 2018).

**Ces résultats illustrent l'importance de l'assèchement estival dans les changements hydrologiques sur le bassin Seine-Normandie, et suggèrent des conditions plus favorables à la survenue de sécheresses.**

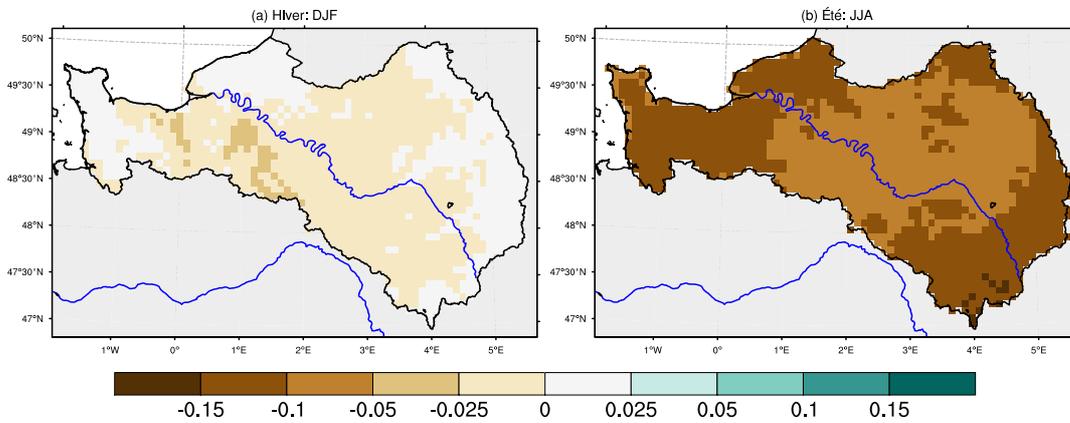


FIGURE 5 – *Changement du SWI (pas d'unité) entre 2031-2060 et 1961-1990 pour le scénarios RCP8.5 : moyenne multi-modèle. (a) Hiver, Décembre-Janvier-Février (DJF). (b) Eté, Juin-Juillet-Aout (JJA).*

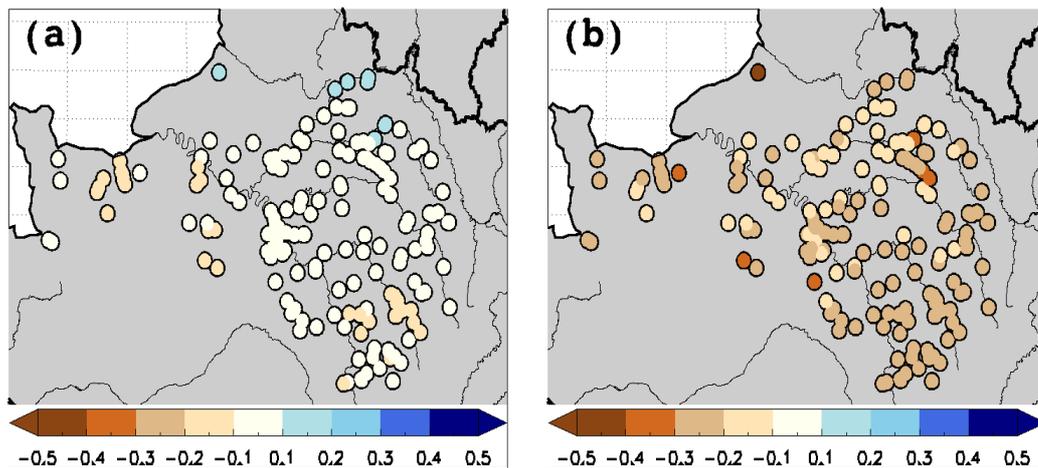


FIGURE 6 – *Changement relatif des débits (pas d'unité) entre 2031-2060 et 1961-1990 pour le scénarios RCP8.5 : moyenne multi-modèle. (a) Hiver, DJF. (b) Eté, JJA.*

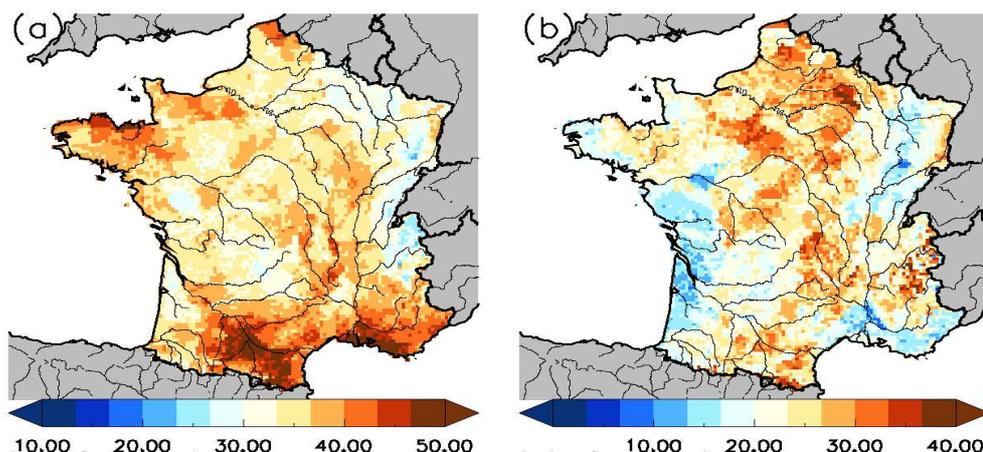


FIGURE 7 – (a) *Changement du pourcentage de temps passé en sécheresse agricole.* (b) *Changement relatif de la sévérité des sécheresses agricoles. Moyenne d'ensemble pour le scénario RCP8.5, [2031-2060] - [1961-1990].*

## 6 Evolution future projetée des sécheresses

### 6.1 Changements sur la France

Afin de replacer les résultats du bassin Seine-Normandie dans un contexte géographique plus large, les changements moyens multi-modèle d'occurrence et de sévérité des sécheresses agricoles et hydrologiques sont montrés pour la France entière. **Le temps passé en sécheresse agricole augmente généralement de 30% à 40% sur la France avec des changements allant jusqu'à 50% sur certaines régions du sud du pays (Figure 7(a)). La sévérité des sécheresses agricoles augmente généralement entre 15 et 35 %, avec des changements souvent un peu plus forts sur le bassin Seine-Normandie (Figure 7(b)).**

Le temps passé en sécheresse hydrologique augmente, de quelques pourcents sur le nord-est du pays, à des valeurs proches de 10%, voire plus pour quelques stations, dans le sud du pays (Figure 8(a)). La sévérité augmente partout à l'exception de quelques stations dans les Alpes (probablement en raison de processus liés à la neige), avec un gradient nord-sud marqué et des valeurs allant de 10% au sud, à proches de 0 sur des stations du nord-est (Figure 8(b)).

A noter que les fortes différences des changements de sécheresses agricoles et hydrologiques entre elles sont probablement dues dans une large mesure aux différences de définition des indices utilisés, et ne doivent donc pas être sur-interprétées.

A l'exception des changements de sévérité des sécheresses agricoles, les changements sur le bassin Seine-Normandie sont moins marqués que sur le sud du pays, mais les différences restent modérées. Il est important de se rappeler ici que les sécheresses sont définies relativement à l'hydro-climatologie locale et non de façon absolue.

### 6.2 Changements moyens sur le bassin Seine-Normandie

La Figure 9 montre pour chaque projection hydrologique avec le scénario RCP8.5 le temps passé en sécheresse agricole en moyenne sur le bassin Seine-Normandie sur les périodes 1961-1990 et 2031-2060. On passe de valeurs proches

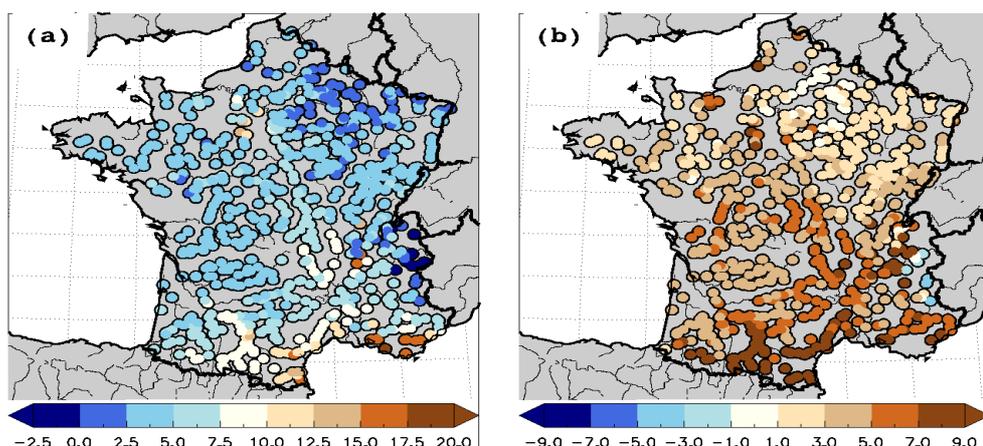


FIGURE 8 – (a) *Changement du pourcentage de temps passé en sécheresse hydrologique.* (b) *Changement relatif de la sévérité des sécheresses hydrologiques. Moyenne d'ensemble pour le scénario RCP8.5, [2031-2060] - [1961-1990].*

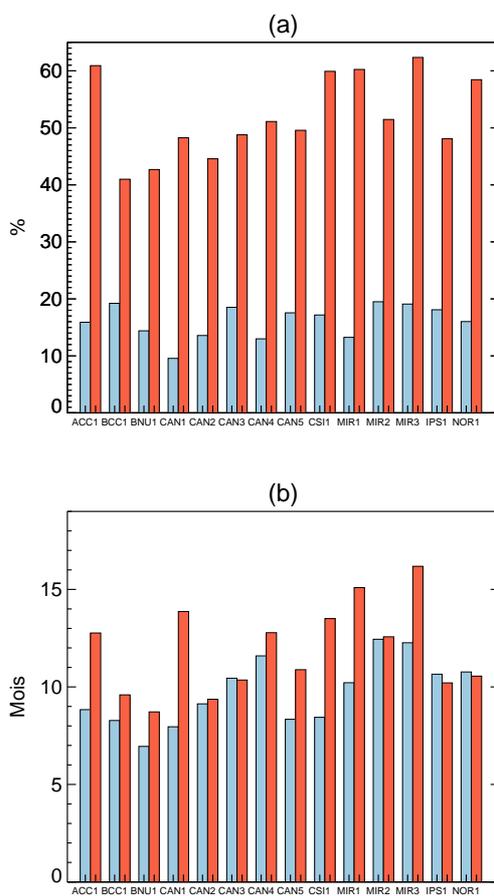


FIGURE 9 – (a) *Pourcentage de temps passé en sécheresse agricole.* (b) *Durée moyenne des sécheresses agricoles. Les barres rouges correspondent à la période 2031-2060, les barres bleues à la période 1961-1990. Scénario RCP8.5. Moyennes sur le bassin Seine-Normandie*

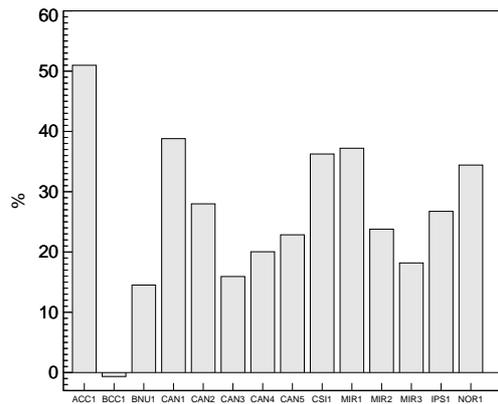


FIGURE 10 – *Changement relatif de sévérité des sécheresses agricoles en moyenne sur le bassin Seine-Normandie pour différentes projections. 2031-2060 moins 1961-1990. Scénario RCP8.5*

de 15% du temps dans le passé récent à des valeurs proches de 50% dans le futur proche. Une dispersion est notée, liée aux incertitudes des projections climatiques désagrégées, mais elle est relativement limitée. Une forte augmentation du temps passé en sécheresse agricole est une caractéristique robuste sur le bassin (Figure 9(a)). Cette augmentation du temps passé en sécheresse agricole témoigne d'une plus grande fréquence des sécheresses, mais aussi d'un allongement des épisodes de sécheresse individuels eux-mêmes, de quelques mois en moyenne, mais avec des variations importantes d'une simulation à l'autre (Figure 9(b)). Les sécheresses agricoles deviennent aussi généralement plus sévères, excepté pour une des projections (Figure 10).

Les résultats de ce rapport sont principalement basés sur le scénario RCP8.5 qui présente une augmentation très forte des concentrations en GES durant le 21ème siècle. Afin d'illustrer l'impact du scénario, la Figure 11 montre la même analyse que celle de la Figure 9, mais pour le scénario RCP4.5, caractérisé par une moindre augmentation des concentrations en GES. Une forte augmentation du temps passé en sécheresse est également constatée et les différences avec les résultats obtenus pour le scénario RCP8.5 ne sont pas toujours évidentes. Cela est largement dû à la période d'étude. Sur la première moitié du 21ème siècle les différences de concentrations en GES entre les différents scénarios restent modérées, avant de s'accroître fortement sur la deuxième moitié du siècle. A cela, il faut ajouter l'inertie du système climatique. **La Figure 6.11 de Dayon (2015) montre par exemple que jusque dans les années 2030 les changements projetés des débits de la Seine à Poses avec les différents scénarios d'émission sont extrêmement proches, et les résultats pour les scénarios RCP8.5 et RCP4.5 sont encore proches dans les années 2050. En raison de la période précoce choisie du 21ème siècle, les conclusions de ce rapport sont donc peu sensibles au scénario d'émission.**

Du fait de la définition même des indices (voir la discussion de la section 3), le temps passé en sécheresse hydrologique est bien plus limité que pour les sécheresses agricoles. Environ 1% du temps est ainsi passé en sécheresse hydrologique dans les différentes simulations sur la période 1961-1990. **Cette occurrence augmente, parfois fortement en**

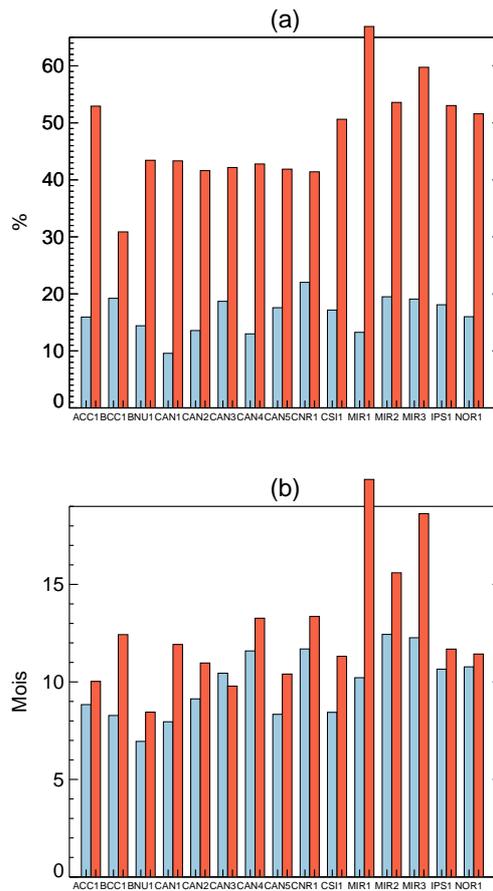


FIGURE 11 – (a) *Pourcentage de temps passé en sécheresse agricole.* (b) *Durée moyenne des sécheresses agricoles.* Scénario RCP4.5. Les barres rouges correspondent à la période 2031-2060, les barres bleues à la période 1961-1990. Moyennes sur le bassin Seine-Normandie.

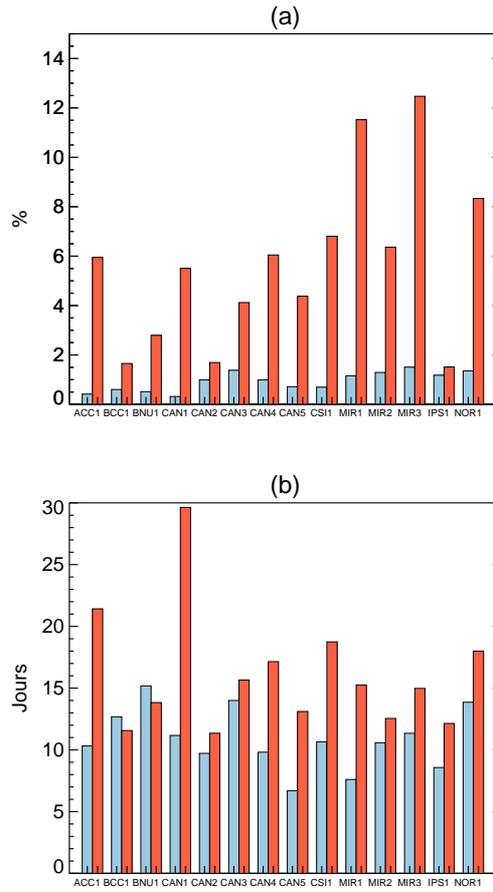


FIGURE 12 – (a) Pourcentage de temps passé en sécheresse hydrologique. (b) Durée moyenne des sécheresses hydrologiques. Les barres rouges correspondent à la période 2031-2060, les barres bleues à la période 1961-1990. Moyennes sur le bassin Seine-Normandie. Scénario RCP8.5

**relatif** : le temps passé en sécheresse hydrologique est ainsi parfois multiplié par 10. Une forte incertitude existe cependant, avec des différences très importantes entre les simulations (Figure 12(a)). La durée moyenne des sécheresses s’allonge également, de quelques jours à une ou deux dizaines (Figure 12(b)).

Il est important de noter qu’une incertitude importante et irréductible, liée à la variabilité interne et existe, comme l’illustrent ici les différences entre les simulations CAN1 et CAN2 (issues du même modèle climatique, mais pour des conditions initiales différentes). C’est d’autant plus vrai ici pour les sécheresses hydrologiques, qui sont peu fréquentes par construction.

Les changements de sévérité sont variables (Figure 13) et pas tous dans le même sens, mais modérés dans tous les cas, autour de quelques pourcents. Là encore la différence avec les sécheresse agricoles tient sans doute largement aux définitions différentes des indices utilisés.

Dans ce projet, nous sommes intéressés par des périodes courtes (6 ans) caractérisées par des conditions de sécheresse, et donc par une échelle temporelle plus fine que celle traitée dans les figures précédentes (30 ans).

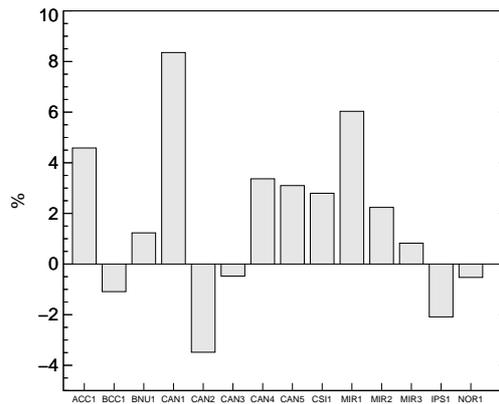


FIGURE 13 – *Changement relatif de sévérité des sécheresses hydrologiques en moyenne sur le bassin Seine-Normandie pour différentes projections. 2031-2060 moins 1961-1990. Scénario RCP8.5*

La Figure 14 montre en complément la sévérité moyenne des sécheresses agricoles d’une année donnée en fonction du temps passé en sécheresse pour cette même année, sur la période 1961-1990 (Figure 14(a)) et 2031-2060 (Figure 14(b)) et pour les différents modèles. La même analyse mais pour des périodes de 6 ans est montrée en bas de la même figure. Tout d’abord, un lien clair entre l’intensité et le temps passé en sécheresse agricole chaque année est à noter. Il est encore plus net pour les périodes de 6 ans. On constate également un fort décalage vers plus de temps passé en sécheresse agricole et des sécheresses plus sévères entre les périodes 1961-1990 et 2031-2060.

Sur ces graphes, les valeurs correspondant à des années particulières passées, issues de la reconstruction de R. Bonnet sont également montrées, en guise d’illustration. A l’échelle de temps annuelle, l’année 1921 est choisie car elle correspond probablement (aux aspects subjectifs liés au choix des définitions prêt) aux conditions les plus sévères de sécheresse à la fois hydrologiques et agricoles sur le bassin (Figure 2 et 3). Une année plus récente, 1990, et donc sans doute plus concrète dans la mémoire collective, caractérisée par une sécheresse importante (Figure 2 et 3) est aussi montrée. Les années 1921 et 1990 sont extrêmes par rapport à la distribution des modèles sur le passé récent (Figure 14(a)). Aucune année modèle n’est même caractérisée par des conditions aussi sévères que 1921 sur la période passée. Cela est dû au caractère exceptionnel de 1921. De plus, dans les projections nous nous focalisons sur la période 1961-1990, qui est courte par rapport à celle d’environ 150 ans considérée dans la reconstruction, ce qui limite les possibilités d’occurrence d’épisodes de type 1921 dans les projections. Il est également envisageable que des biais dans la queue de distribution des sécheresses simulées existent.

Des conditions de sécheresse équivalentes à 1921 ou même un peu plus intenses sont simulées sur la période 2031-2060 dans un certain nombre de modèles, même si ce type d’épisode demeure rare même sur cette période. Une année comme 1990 pourrait par contre devenir relativement fréquente dans le futur proche. A l’échelle de temps de 6 ans, un épisode d’intérêt particulier est la période 1944-1949, notée 1946 sur la figure. La deuxième partie des années 1940 est en effet caractérisée par une succession de sécheresses modérées (Figure 2) qui culmine avec la forte sécheresse de 1949. **Cet évènement exceptionnel dans la distribution des modèles sur le passé récent devient quasiment normal**

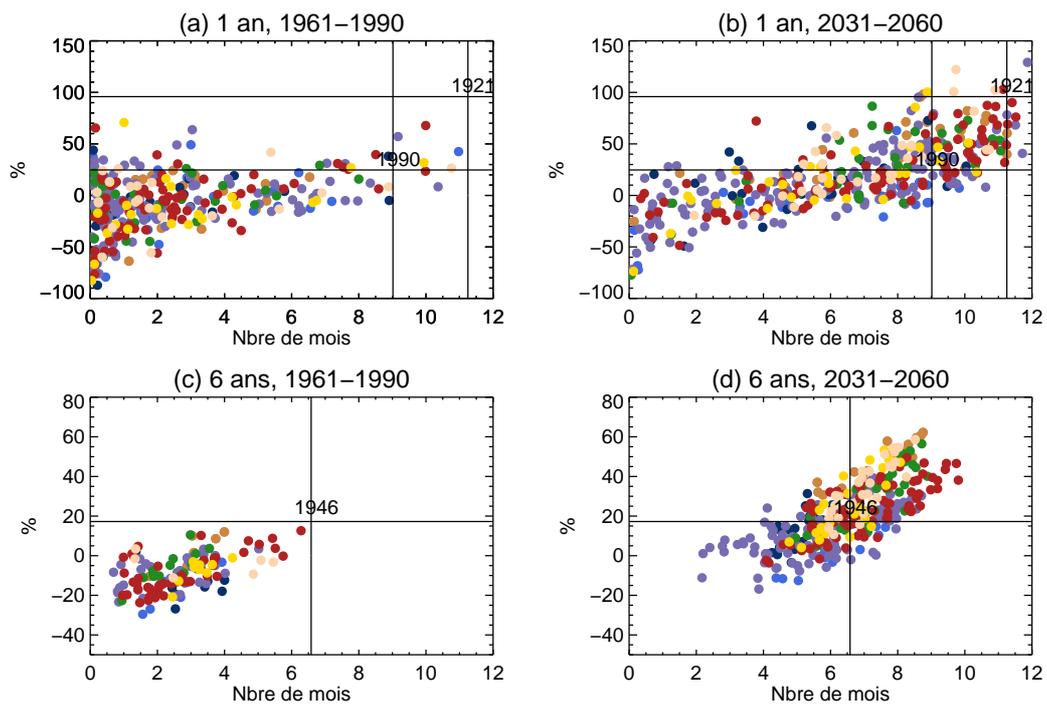


FIGURE 14 – (a) et (b) Sévérité moyenne des sécheresses agricoles chaque année en fonction du nombre de mois par an passés en sécheresse agricole, en moyenne sur le bassin. Chaque point correspond donc à une année et à un modèle. Une couleur différente par modèle climatique est utilisée. (a) : période 1961-1990 et (b) : 2031-2060. Les figures du bas montrent les mêmes analyses mais pour des moyennes glissantes sur des périodes de 6 ans. Les barres verticales et horizontales correspondent à des épisodes historiques issus de la reconstruction longue décrite dans la section 2 (1921 et 1990 pour (a) et (b) et 1944-1949 noté 1946 pour (c) et (d)).

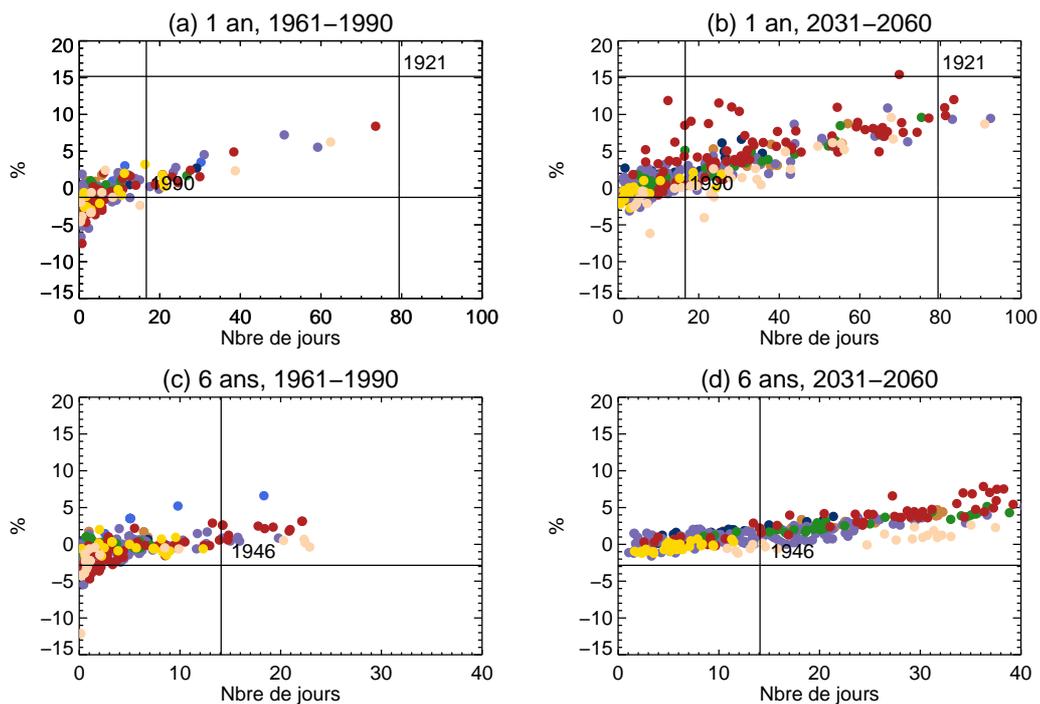


FIGURE 15 – (a) et (b) Sévérité moyenne des sécheresses hydrologiques chaque année en fonction du nombre de jours par an passés en sécheresse hydrologique, en moyenne sur le bassin. Chaque point correspond donc à une année et à un modèle. Une couleur différente par modèle climatique est utilisée. (a) : période 1961-1990 et (b) : 2031-2060. Les figures du bas montrent les mêmes analyses mais pour des moyennes glissantes sur des périodes de 6 ans. Les barres verticales et horizontales correspondent à des épisodes historiques issus de la reconstruction longue décrite dans la section 2 (1921 et 1990 pour (a) et (b) et 1944-1949 noté 1946 pour (c) et (d)).

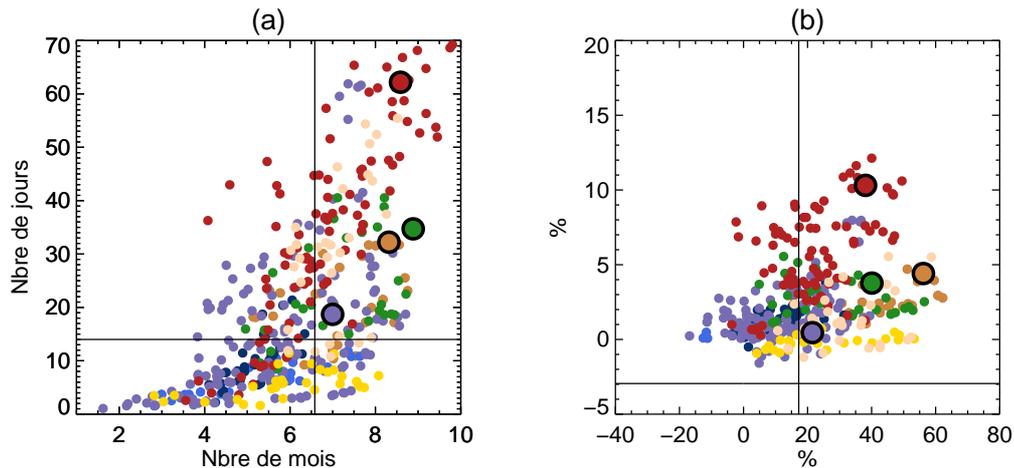


FIGURE 16 – *Nombre de jours par an passés en sécheresse hydrologique versus nombre de mois par an passés en sécheresse agricole, sur le bassin Seine-Normandie et en moyenne glissante sur 6 ans pour le scénario RCP8.5. Chaque couleur correspond à un modèle, et chaque point montre une période de 6 ans entre 2031 et 2060. (b) Même chose pour la sévérité. Les gros cercles correspondent aux épisodes sélectionnés. Les barres verticales et horizontales correspondent à la période 1944-1949 de la reconstruction longue décrite dans la section 2.*

### **dans le futur proche.**

La même analyse est faite pour les sécheresses hydrologiques (Figure 15). Si le lien entre sévérité et temps passé en sécheresse est un peu moins net dans le passé récent et à l'échelle de temps annuelle, les autres conclusions tirées pour les sécheresses agricoles restent globalement valides ici. On note cependant que l'année 1990 n'est pas exceptionnelle pour les sécheresses hydrologiques, même dans le climat présent. La sévérité moyenne des sécheresses hydrologiques sur 1944-1949 n'était pas forte.

## **7 Choix des épisodes de sécheresse**

Les diagnostics précédents fournissent les informations nécessaires pour la sélection des épisodes de sécheresse. Pour rappel, on s'intéresse à des périodes de 6 ans, caractérisées à la fois par des conditions de sécheresse agricole et hydrologique sévères. Un épisode caractérisé par des conditions de sécheresse futures fréquentes sera par ailleurs aussi sélectionné, pour comparaison.

Le choix des épisodes de sécheresse, partiellement subjectif, se base à la fois sur l'occurrence et la sévérité des sécheresses agricoles et hydrologiques. Comme la période d'intérêt est de 6 ans, ces informations sont visibles sur les Figure 14(d) et 15(d). La Figure 16 présente les mêmes diagnostics mais en montrant cette fois-ci les liens entre le temps passé en sécheresse agricole et celui passé en sécheresse hydrologique, ainsi que ceux pour leur sévérité. Les quatre épisodes sélectionnés sont montrés à l'aide de cercles plus gros.

Une certaine relation est logiquement visible, bien que non linéaire, entre le nombre de jours passés en sécheresse hydrologique et le nombre de mois passés en sécheresse agricole en moyenne glissante sur 6 ans. Ceci est vrai dans une moindre mesure pour la sévérité. Il est donc relativement aisé de trouver des périodes de six ans caractérisées par des sécheresses hydrologiques et agricoles récurrentes et sévères.

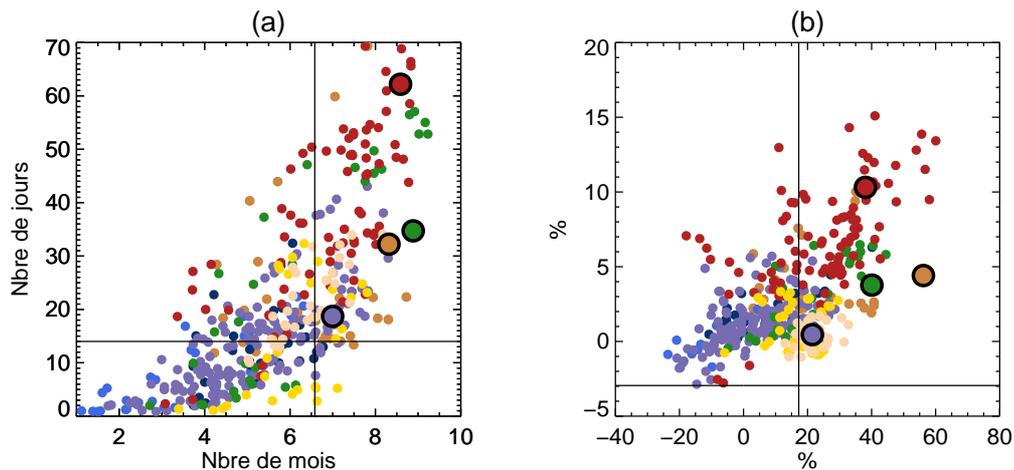


FIGURE 17 – Nombre de jours par an passés en sécheresse hydrologique versus nombre de mois par an passés en sécheresse agricole, sur le bassin Seine-Normandie et en moyenne glissante sur 6 ans pour le scénario RCP4.5. Chaque couleur correspond à un modèle, et chaque point montre une période de 6 ans entre 2031 et 2060. (b) Même chose pour la sévérité. Les gros cercles correspondent aux épisodes sélectionnés dans le scénario RCP8.5. Les barres verticales et horizontales correspondent à la période 1944-1949 de la reconstruction longue décrite dans la section 2.

Une période dans les années 2031-2060 de 6 ans pour 3 simulations différentes (ACC1 pour sécheresse (a), cercle brun ; CSI1 pour épisode (b), cercle vert ; MIR3 pour épisode (c), cercle rouge sur Figure 16) est sélectionnée, pour échantillonner les résultats de différents modèles. La période exacte n’a pas d’intérêt, elle est très influencée par la variabilité interne de chaque modèle. Finalement, un épisode correspondant à des conditions de sécheresse futures modérées est également sélectionné, pour contraster avec les résultats des autres épisodes (simulation CAN4, point violet, épisode (d)).

Afin de voir comment se situent les épisodes sélectionnés dans les distributions des projections pour le scénario RCP4.5, la même analyse que celle de la Figure 16 est faite pour le scénario RCP4.5. On conserve par contre les 4 épisodes sélectionnés dans le scénario RCP8.5 (Figure 17). **Les trois épisodes sévères sélectionnés dans le scénario RCP8.5 le sont aussi par rapport à la distribution RCP4.5. Ils peuvent néanmoins également se produire pour le scénario RCP4.5. Les épisodes choisis sont donc pertinents même en cas d’augmentation modérée des émissions de GES.**

## 8 Caractérisation des épisodes de sécheresse

Les épisodes de 6 ans sélectionnés et les conditions hydro-climatiques associées sont maintenant caractérisés. Entre 6 et 11 mois par an en moyenne sont passés en sécheresse agricole pendant les trois épisodes de sécheresse forte et quelques mois de moins pour l’épisode modéré. Tout le bassin Seine-Normandie est touché avec des structures spatiales relativement bruitées (Figure 18).

Les anomalies moyennes de SWI sur les 6 ans des épisodes sont fortement négatives, entre -0.05 et -0.15 selon la sécheresse et la zone (Figure 19), ce qui témoigne donc d’un

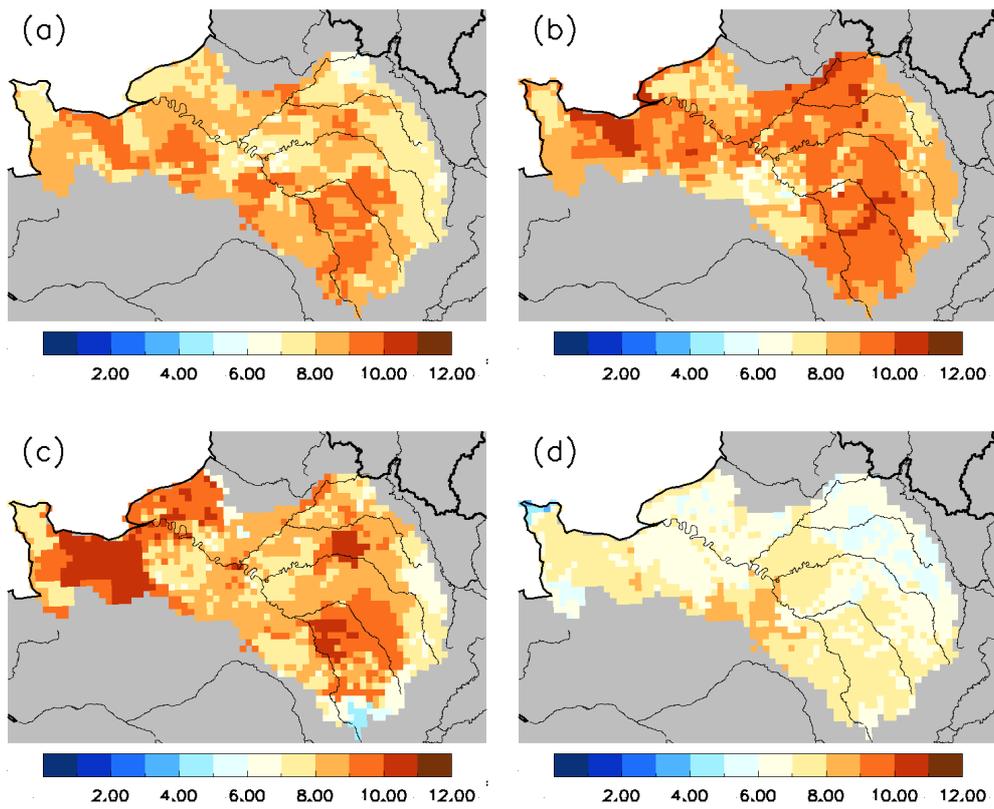


FIGURE 18 – Nombre de mois par an passés en sécheresse agricole pour les quatre épisodes de 6 ans sélectionnés. L'épisode de (a) est extrait de la simulation ACC1, celui de (b) de CSI1, celui de (c) de MIR3 et celui de (d) de CAN4.

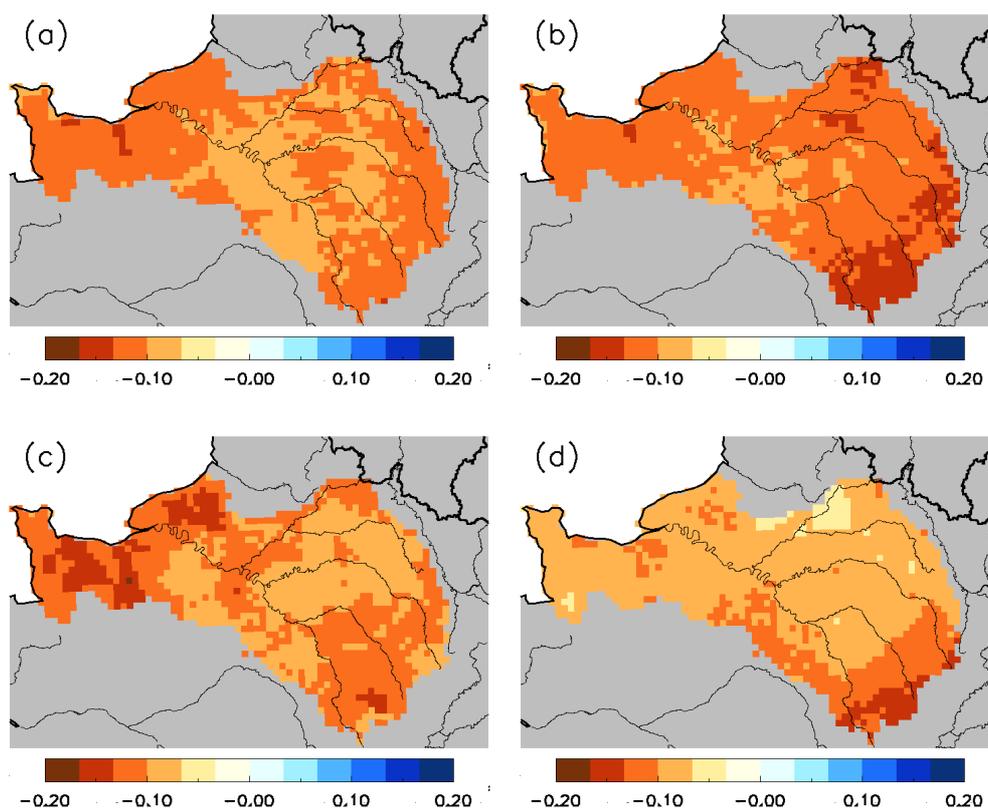


FIGURE 19 – Anomalies de l'indice d'humidité des sols (SWI, sans unité) en moyenne pendant les quatre épisodes de 6 ans sélectionnés. Des valeurs négatives témoignent d'un assèchement des sols en moyenne annuelle. La référence est la période 1961-1990. L'épisode de (a) est extrait de la simulation ACC1, celui de (b) de CSI1, celui de (c) de MIR3 et celui de (d) de CAN4.

fort assèchement moyen des sols au cours des épisodes. Pour ce qui est des débits, une forte variabilité spatiale du nombre de jours par an passés en sécheresse existe au sein des épisodes sélectionnés (et entre les différents épisodes), avec des valeurs allant de 10 à 80 jours pour les épisodes sévères (Figure 20). Les anomalies relatives moyennes des débits sont marquées pendant les 6 ans des trois épisodes sévères, avec des diminutions des débits de 20 à 50% (Figure 21). Pour l'épisode modéré (Figure 21(d)), les baisses des débits sont faibles sur le nord du bassin, mais marquées sur le sud.

L'évolution temporelle projetée au cours du 21ème siècle de l'occurrence et de la sévérité des sécheresses en moyenne sur le bassin est montrée sur les Figures 22 et 23 pour les quatre projections dont sont extraits les épisodes sélectionnés.

Les épisodes sélectionnés, en particulier les 3 épisodes sévères, sont caractérisés par un nombre important de mois passés en sécheresse chaque année plutôt que par une alternance d'années de sécheresses extrêmes entrecoupées d'années sans aucune sécheresse. Pour ce qui est des sécheresses hydrologiques, la variabilité interannuelle au sein des épisodes sélectionnés est généralement forte, avec des années caractérisées par un grand nombre de jours de sécheresse sur le bassin et des années avec peu voire quasiment pas de sécheresse hydrologique.

La distribution de l'indice piézométrique standardisé, sur les périodes d'intérêt de 6

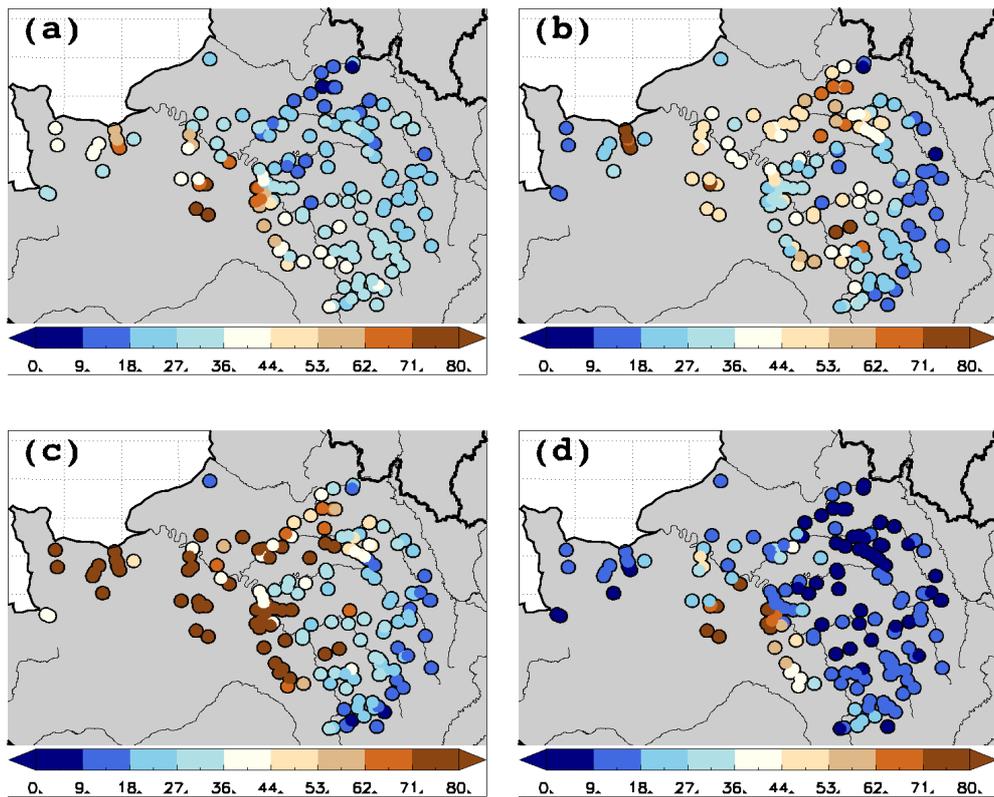


FIGURE 20 – Nombre de jours par an passés en sécheresse hydrologique pour les quatre épisodes de 6 ans sélectionnés. L'épisode de (a) est extrait de la simulation ACC1, celui de (b) de CSI1, celui de (c) de MIR3 et celui de (d) de CAN4. (Attention, la couleur bleue ne signifie pas des conditions plus humides : elle témoigne d'une très faible à modérée augmentation du nombre de jours de sécheresse hydrologique.)

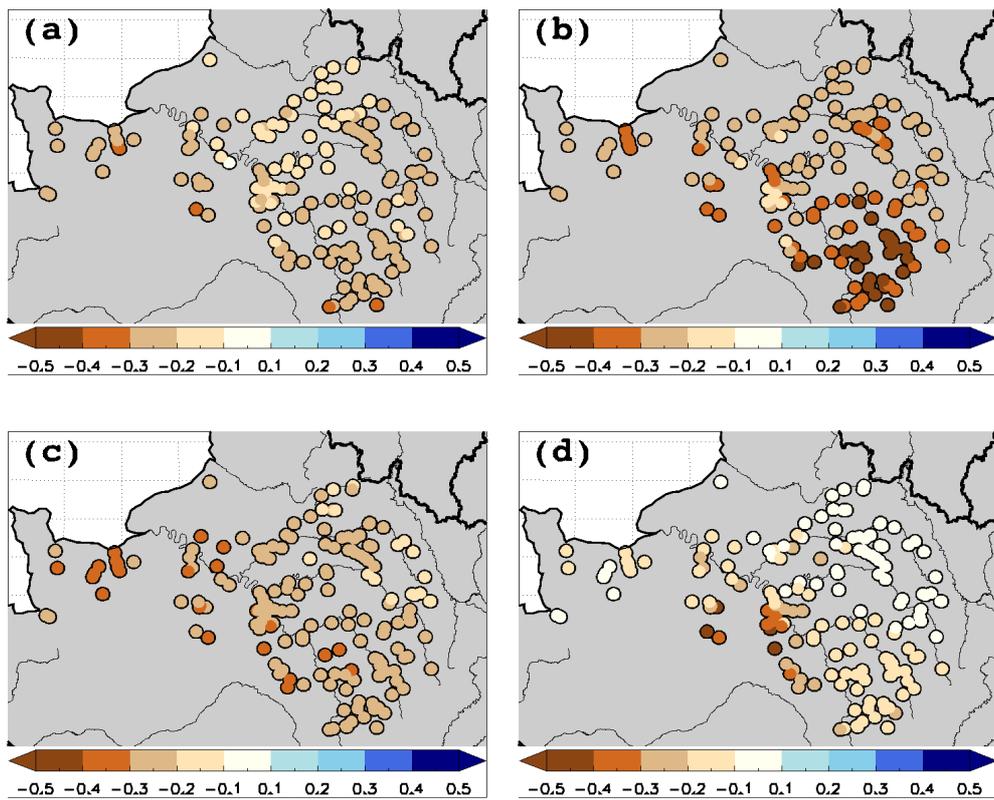


FIGURE 21 – Anomalies relatives de débits (sans unité) en moyenne pendant les quatre épisodes de 6 ans sélectionnés. La référence est la période 1961-1990. L'épisode de (a) est extrait de la simulation ACC1, celui de (b) de CSI1, celui de (c) de MIR3 et celui de (d) de CAN4.

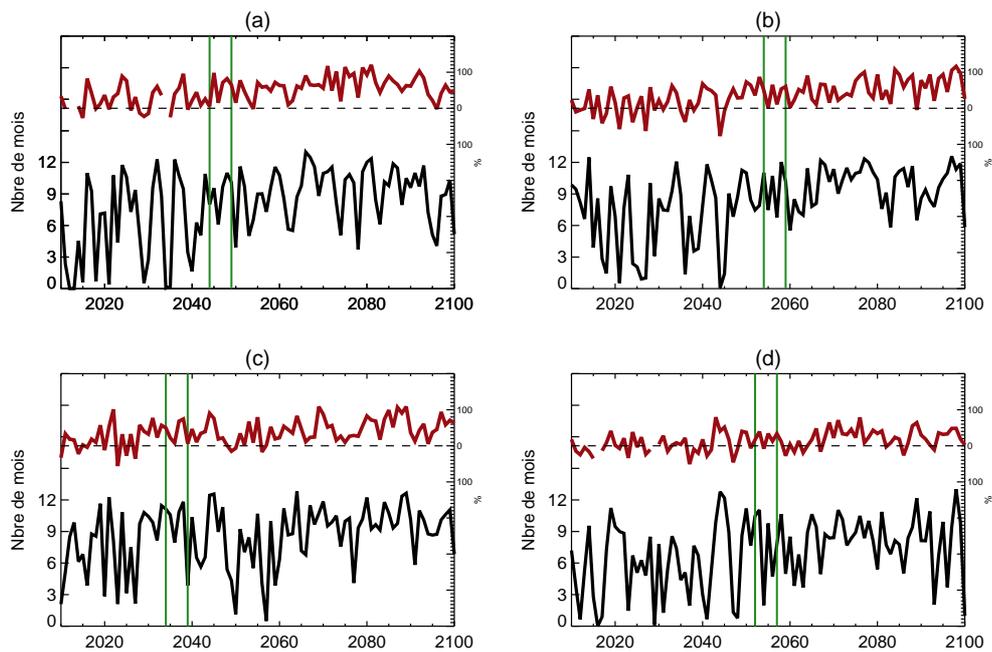


FIGURE 22 – *Evolution des sécheresses agricoles en moyenne sur le bassin Seine-Normandie sur le 21ème siècle pour les projections dont sont extraits les quatre épisodes sélectionnés. (noir) Nombre de mois par an passés en sécheresse agricole en moyenne sur le bassin et (rouge) sévérité associée. Les 6 années des épisodes sélectionnés sont délimitées avec des traits verticaux verts. L'épisode de (a) est extrait de la simulation ACC1, celui de (b) de CSI1, celui de (c) de MIR3 et celui de (d) de CAN4.*

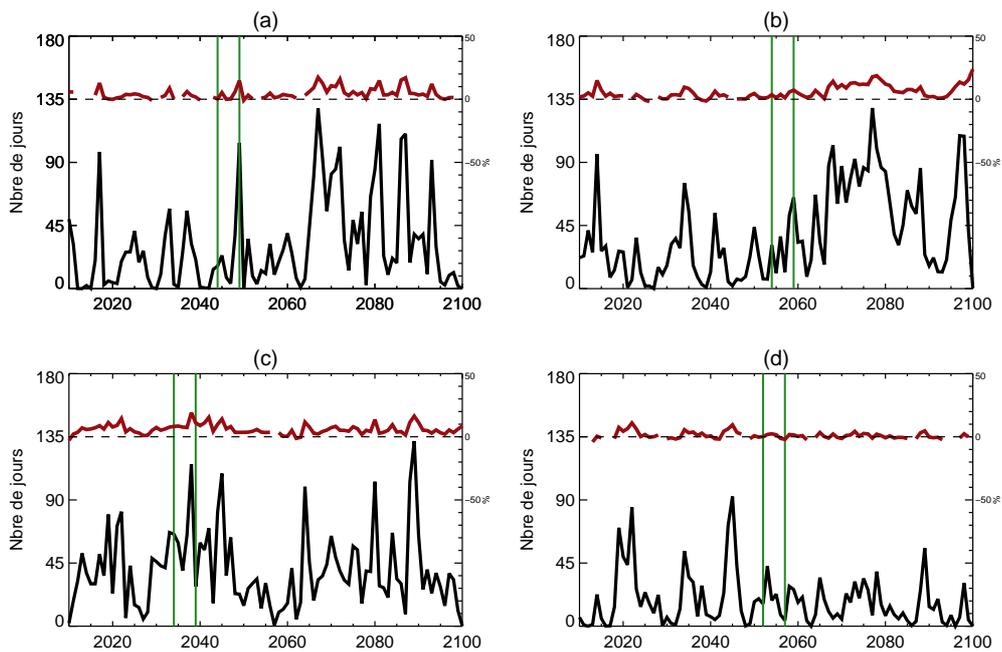


FIGURE 23 – Evolution des sécheresses hydrologiques en moyenne sur le bassin Seine-Normandie sur le 21ème siècle pour les projections dont sont extraits les quatre épisodes sélectionnés. (noir) Nombre de jours par an passés en sécheresse agricole en moyenne sur les stations simulées du bassin et (rouge) sévérité associée. Les 6 années des épisodes sélectionnés sont délimitées avec des traits verticaux verts. L'épisode de (a) est extrait de la simulation ACC1, celui de (b) de CSI1, celui de (c) de MIR3 et celui de (d) de CAN4.

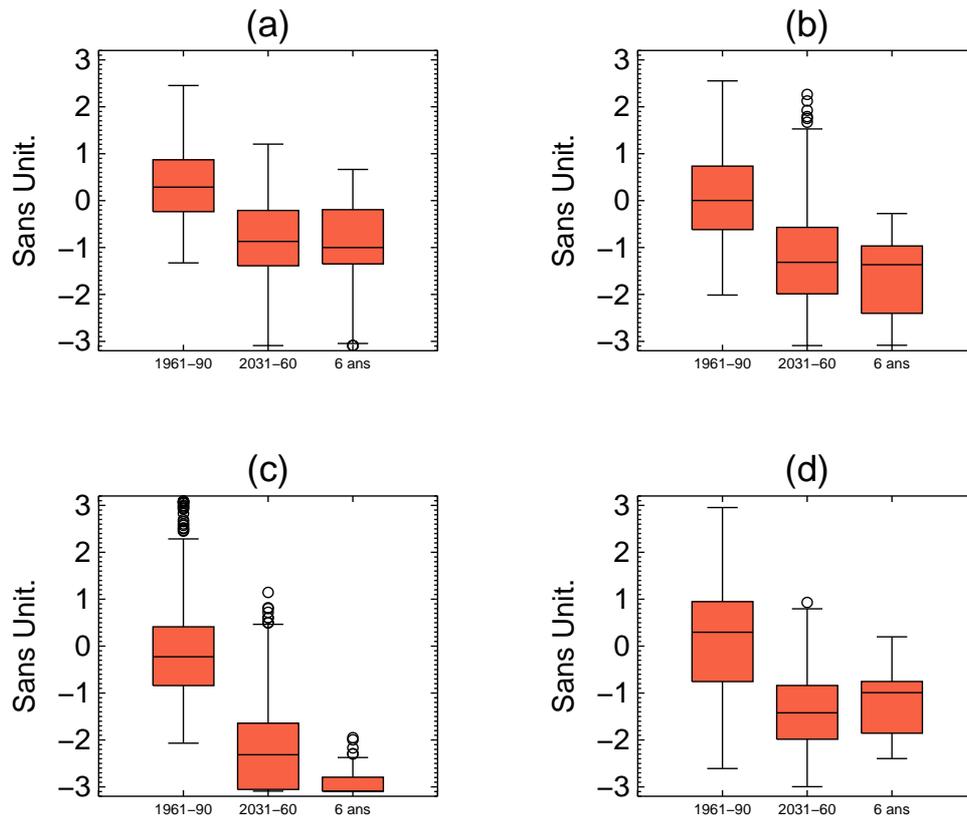


FIGURE 24 – *Distribution de l'indice piézométrique standardisé moyen sur le bassin Seine-Normandie, sur la période 1961-1990, sur la période 2031-2060 et pendant les quatre épisodes de 6 ans sélectionnés. La boîte montre le 25ème et 75ème centile ainsi que la médiane. Les moustaches s'étendent soit jusqu'au minimum et maximum soit jusqu'à 1.5 fois l'écart interquartile plus (moins) le 75ème (25ème) centile. Dans ce cas, les valeurs au delà de cet intervalle sont montrées avec des cercles. L'épisode de (a) est extrait de la simulation ACC1, celui de (b) de CSI1, celui de (c) de MIR3 et celui de (d) de CAN4.*

ans ainsi que sur les périodes 1961-1990 et 2031-2060 pour les projections hydrologiques correspondantes est montrée pour les épisodes sélectionnés (Figure 24).

Les périodes de 6 ans sélectionnées sont caractérisées par des anomalies négatives fortes de l'indice et donc une baisse importante du niveau piézométrique, par ailleurs proches des distributions moyennes sur 2031-2060 pour (a), (b), and (d). **Ces épisodes sont donc caractérisés par des déficits hydrogéologiques importants.** Une baisse très sévère de l'indice piézométrique standardisé durant l'épisode (c), bien plus forte que dans les autres épisodes est notée. Ce résultat contraste avec ceux obtenus précédemment pour les débits et l'humidité des sols, variables pour lesquelles l'épisode (c) ne se démarque pas par des anomalies particulières. La distribution spatiale des changements de l'IPS est montrée sur la Figure 25, avec des différences importantes entre les épisodes.

Afin d'avoir une meilleure idée des mécanismes en jeu, les précipitations moyennes de chaque mois sur les six ans des épisodes ainsi que les climatologies présentes et futures des simulations correspondantes sont comparées sur le bassin Seine-Normandie (Figure 26).

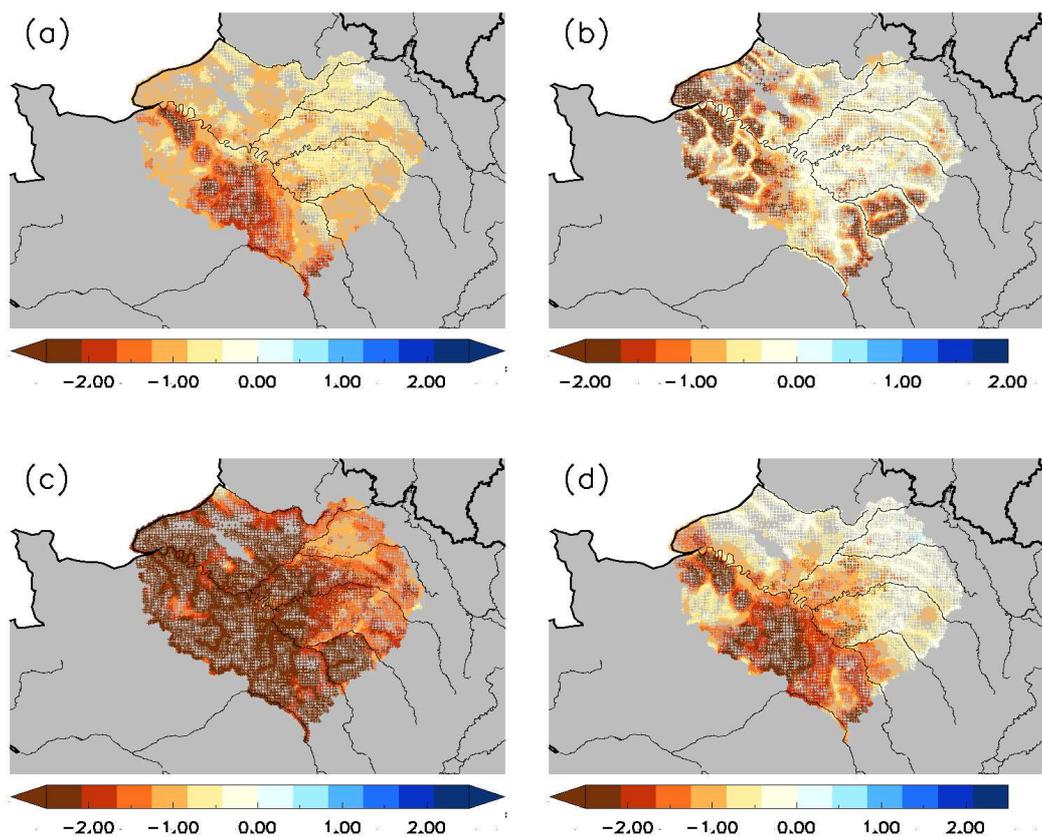


FIGURE 25 – Anomalies relatives de l'IPS en moyenne pendant les quatre épisodes sélectionnés. La référence est la période 1961-1990. L'épisode de (a) est extrait de la simulation ACC1, celui de (b) de CSI1, celui de (c) de MIR3 et celui de (d) de CAN4.

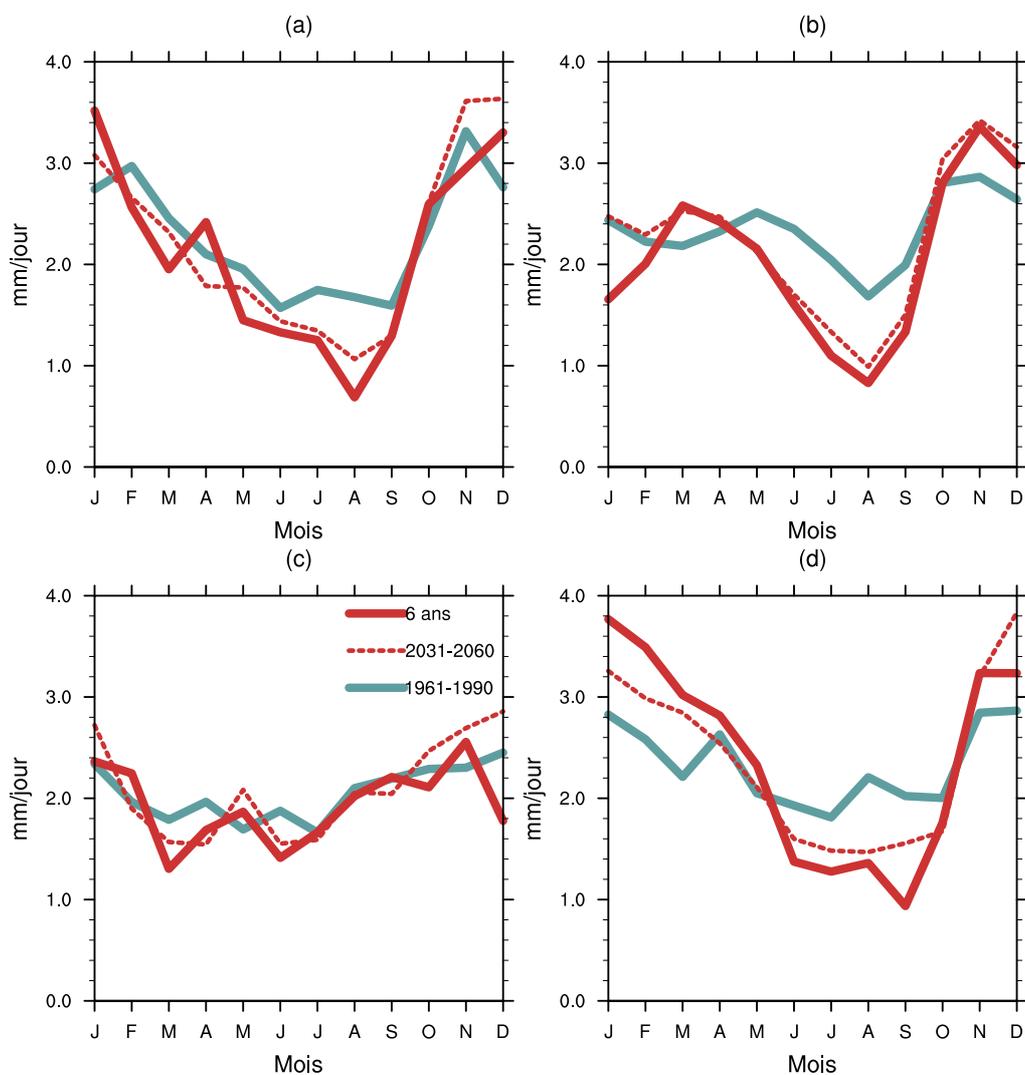


FIGURE 26 – Cycle annuel moyen des précipitations en moyenne sur le bassin Seine-Normandie (mm/jour) sur (bleu) la période 1961-1990, sur (rouge pointillé) la période 2031-2060 et (rouge) pendant les épisodes de 6 ans sélectionnés. L'épisode de (a) est extrait de la simulation ACC1, celui de (b) de CSI1, celui de (c) de MIR3 et celui de (d) de CAN4.

Les épisodes (a) et (b) sont caractérisés par un fort déficit de pluie à la fin du printemps et en été, par rapport au climat présent. Ces périodes de 6 ans sont par ailleurs proches de la climatologie des simulations respectives sur 2031-2060. **Pour la sécheresse (c), on ne constate pas de telles anomalies estivales.** Un déficit de précipitation modéré est vu en début du printemps. Pour l'épisode modéré (d), de très fortes anomalies négatives en été sont notées mais avec également de fortes anomalies positives en hiver.

L'évapotranspiration moyenne sur le bassin Seine-Normandie est présentée de la même manière (Figure 27). Les changements d'évapotranspiration sur la période 2031-2060 et au cours des épisodes sélectionnés, très proches, correspondent à un schéma connu. **Une tendance à l'augmentation de l'évapotranspiration dans la saison humide est généralement projetée, lorsque le facteur limitant l'évapotranspiration est l'énergie disponible en surface et que les sols sont climatologiquement humides.** Cela est dû au fait que le changement climatique mène à une augmentation de l'énergie disponible à la surface. L'augmentation printanière et hivernale de l'évapotranspiration ainsi que la fréquente diminution des précipitations estivales conduisent à un assèchement des sols fort en été, qui ne peuvent plus soutenir l'évapotranspiration. Cette dernière diminue alors. Des différences d'intensité existent cependant entre les épisodes. **On constate ainsi une bien plus forte augmentation de l'évapotranspiration au printemps pour (c) et encore plus (d) que pour les autres épisodes (Figure 27).** Cette forte augmentation pour (d) s'explique très probablement par la forte augmentation des précipitations hivernales, conduisant à des sols suffisamment humides au printemps pour alimenter une forte évapotranspiration.

Afin de mieux comprendre l'évolution de l'évapotranspiration, l'évolution de l'évapotranspiration potentielle (ETP) est analysée. On constate une bien plus forte augmentation de l'ETP (calculée avec la formule de Penman–Monteith) au printemps pour l'épisode (c) que pour (a) et (b), en particulier en mars-avril (Figure 28) ce qui est cohérent avec les différences d'évapotranspiration. L'augmentation de l'ETP est plus forte ensuite au cours de l'été pour les autres épisodes, mais en cette période où l'évapotranspiration est contrôlée par l'humidité des sols, cela ne se traduit pas par une augmentation d'évapotranspiration. L'épisode (d) est intermédiaire en ce qui concerne l'hiver et le printemps, avec une augmentation importante de l'ETP sur ces saisons.

Au final, la différence entre précipitation et évapotranspiration (Figure 29), qui correspond à l'eau disponible en surface pour le ruissellement et la recharge du sol et des nappes, pour l'épisode (c) (et la climatologie future correspondante) a un comportement particulier par rapport aux autres épisodes sévères. La période de l'année pour (c) où la différence entre précipitation et évapotranspiration devient négative avance beaucoup par rapport au climat présent. Cette transition se fait fin février contre début avril dans le présent.

Comme il s'agit d'une période normalement favorable à la recharge des nappes et du sol, c'est sans doute ce qui explique la forte réponse de l'indice piézométrique pour (c) et les conditions de sécheresses hydrologiques et agricoles marquées, malgré des changements de précipitations estivaux plus faibles que pour les épisodes (a) et (b). Pour (d), la différence entre précipitation et évapotranspiration augmente sur les premiers mois de l'année en raison de la forte augmentation des pluies. Malgré la forte augmentation d'évapotranspiration en hiver et au printemps vue précédemment, et la diminution importante des précipitations en été et automne, cet épisode est modéré en raison des anomalies positives fortes des précipitations hivernales.

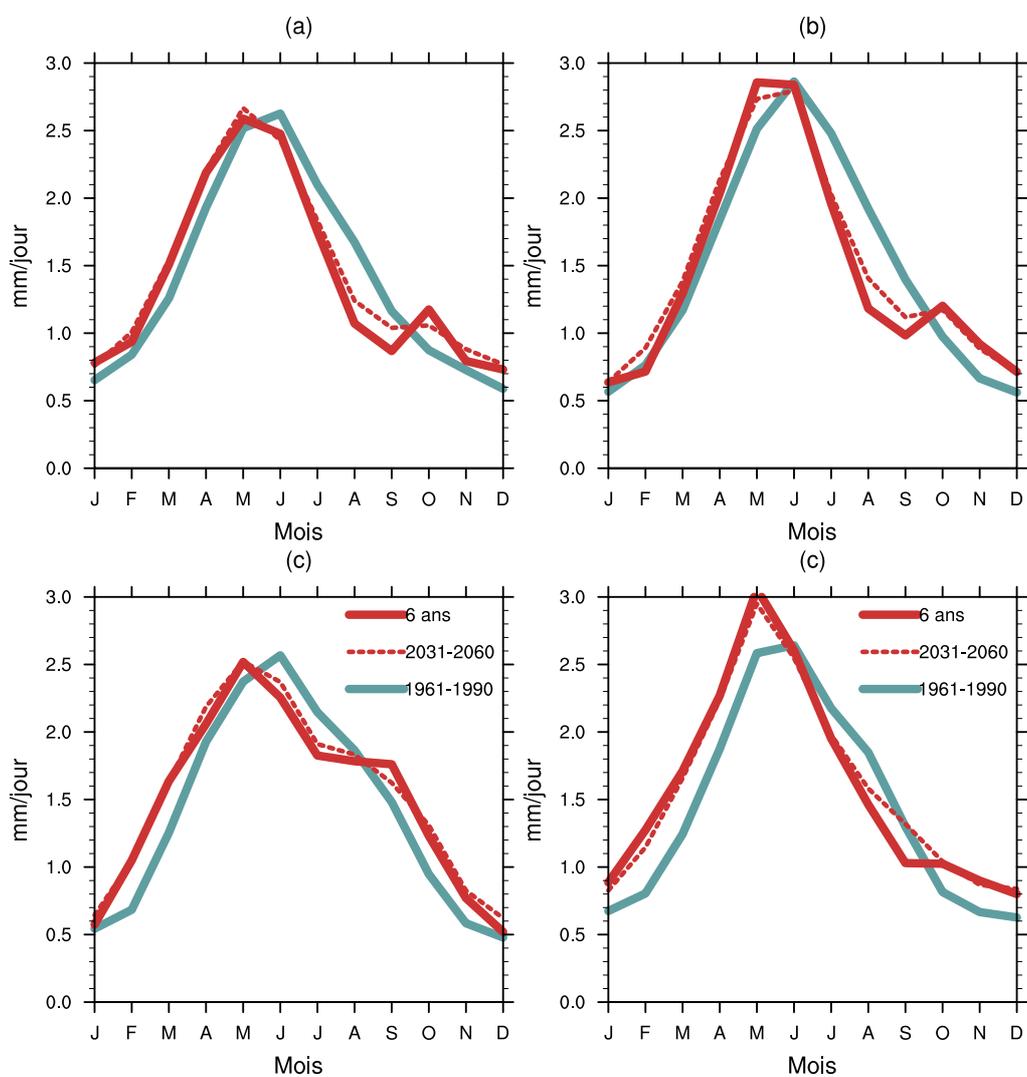


FIGURE 27 – Cycle annuel moyen de l'évapotranspiration sur le bassin Seine-Normandie (mm/jour) sur (bleu) la période 1961-1990, sur (rouge pointillé) la période 2031-2060 et (rouge) pendant les épisodes de 6 ans sélectionnés. L'épisode de (a) est extrait de la simulation ACC1, celui de (b) de CSI1, celui de (c) de MIR3 et celui de (d) de CAN4.

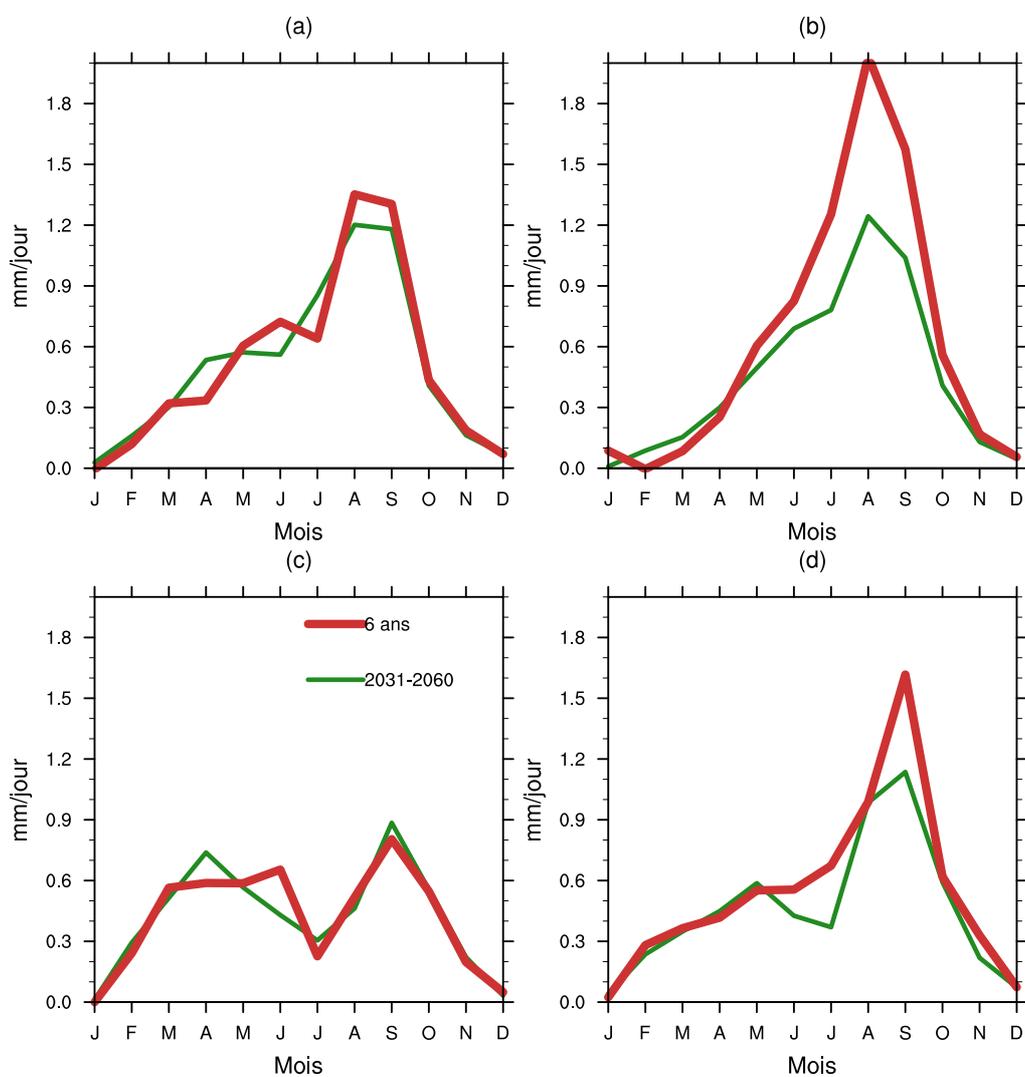


FIGURE 28 – Cycle annuel moyen des différences d'évapotranspiration potentielle (mm/jour) en moyenne sur le bassin Seine-Normandie entre (rouge) les épisodes de 6 ans ou (vert) 2031-2060 et 1961-1990. L'épisode de (a) est extrait de la simulation ACC1, celui de (b) de CSI1, celui de (c) de MIR3 et celui de (d) de CAN4.

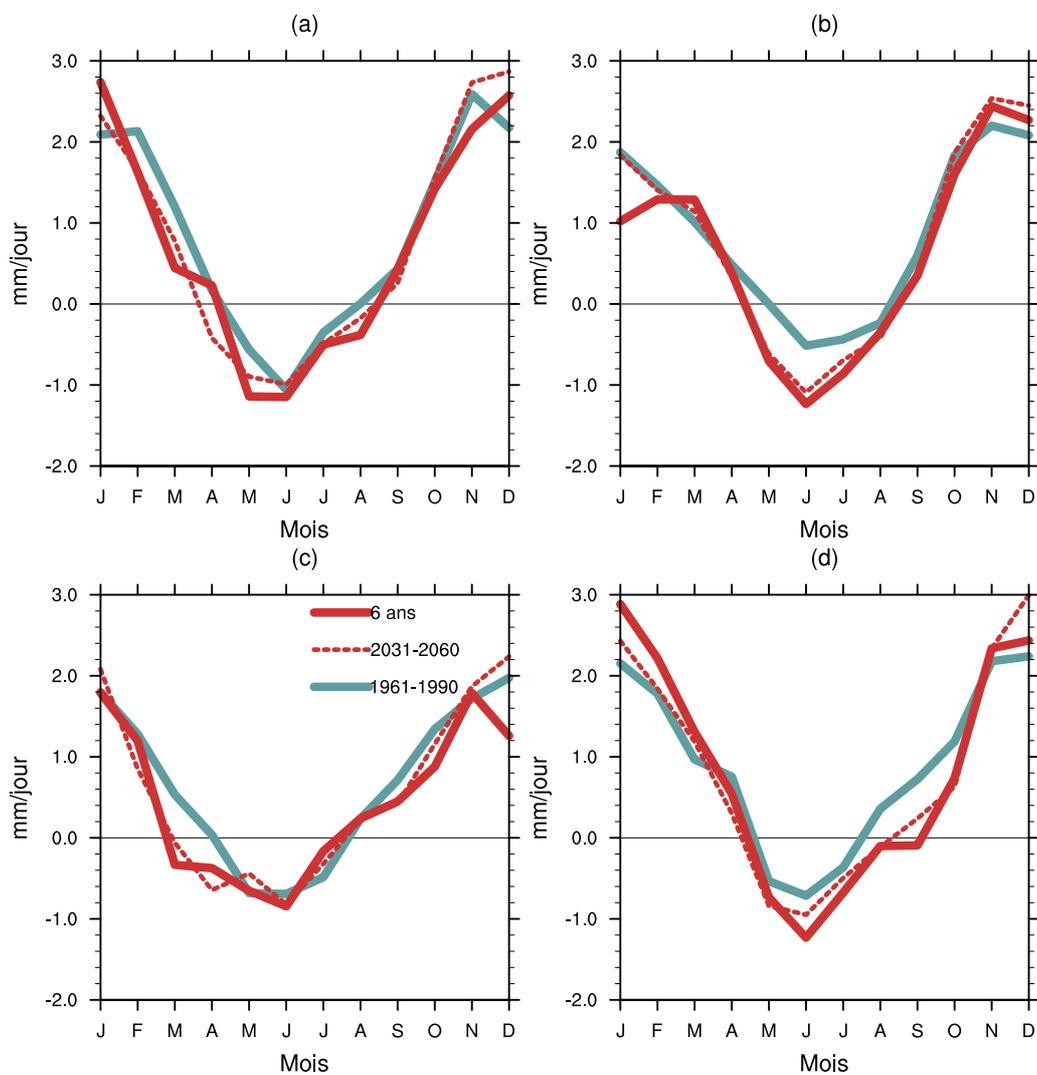


FIGURE 29 – Cycle annuel moyen de la différence [précipitation moins évapotranspiration] en moyenne sur le bassin Seine-Normandie (mm/jour) sur (bleu) la période 1961-1990, sur (rouge pointillé) la période 2031-2060 et (rouge) pendant les épisodes de 6 ans sélectionnés. L'épisode de (a) est extrait de la simulation ACC1, celui de (b) de CSI1, celui de (c) de MIR3 et celui de (d) de CAN4.

## 9 Remarques conclusives

**Les travaux décrits dans ce document montrent que des conditions de sécheresse plus fréquentes et plus sévères sont à attendre sur le bassin Seine-Normandie avant la moitié du 21<sup>ème</sup> siècle et qu’il s’agit bien d’un des impacts hydro-climatiques majeurs pour le bassin.**

Les analyses de la section précédente montrent une diversité dans les épisodes sécheresses sélectionnés, même entre les épisodes sévères, avec des variations spatiales, et des différences de caractère (agricole, hydrologique, hydrogéologique) notables. Les mécanismes de genèse des sécheresses pour les épisodes sélectionnés sont eux même variables. **Cette diversité sera utile pour les futures études d’impacts afin de pouvoir quantifier les réponses à différentes configurations de sécheresses.**

Les changements sur les périodes de 6 ans sélectionnées sont souvent assez proches des changements climatologiques futurs sur 2031-2060 dans les projections correspondantes. Cela montre que le caractère sec de ces périodes est dans une mesure importante représentatif des changements moyens du climat, plutôt qu’exceptionnel par rapport au climat moyen de cette période. Ceci est cohérent avec le fait que, classiquement, nous ayons défini les sécheresses futures par rapport à une normale climatologique présente plutôt que future et que les changements climatologiques moyens vont dans le sens d’un assèchement, en particulier estival.

Comme mentionné précédemment, il ne faut pas sur-interpréter les différences des changements entre sécheresses hydrologiques et sécheresses agricoles : elles proviennent probablement largement des définitions différentes des indices de sécheresse utilisés.

**Les incertitudes dues aux modèles hydrologiques sont importantes dans les changements simulés des débits (e.g. Dayon 2015 ; Dayon et al. 2018 ; Habets et al. 2013), notamment en été en raison de la sensibilité à la représentation des écoulements lents de sub-surface. Cette incertitude n’est pas considérée dans cette étude. Ceci n’est pas critique pour l’objectif final du présent rapport de sélectionner des évènements de sécheresse. Leur genèse dépend avant-tout des conditions météorologiques : les évènements sélectionnés resteraient des sécheresses avec d’autres modèles hydrologiques. Néanmoins l’intensité des sécheresses hydrologiques pourraient être impactée de façon notable.**

**Il est également crucial de noter dans le cadre d’une utilisation des scénarios sécheresse que les projections hydrologiques étudiées ici ont des biais moyens. D’une part, les projections climatiques désagrégées ont des biais, parfois importants, avec souvent notamment une certaine surestimation des précipitations hivernales, qui impactent les simulations hydrologiques. D’autre part, le modèle hydrologique utilisé, non calé sur les débits observés, et ne prenant pas en compte les effets anthropiques non climatiques, a aussi des biais intrinsèques, avec par exemple des débits trop forts en été pour certaines stations.**

Il est également important de noter que les sécheresses sont définies relativement à la climatologie présente de la projection hydrologique correspondante, qui peut être biaisée. Les situations de sécheresse le sont par rapport à la climatologie du modèle. Si il y a un biais humide dans la projection hydrologique, les conditions météorologiques et hydrologiques absolues des épisodes de sécheresse ne seront pas forcément des conditions absolues de sécheresses par rapport aux observations. Il est donc nécessaire de toujours se placer par rapport à une référence climat présent de la projection correspondante et non des observations lors de l’utilisation des ces scénarios sécheresse.

## Références

- [1] Boé J., L. Terray, E. Martin and F. Habets (2009) Changes in components of the hydrological cycle in French river basins during the 21st century. *Water Resources Research*, 45, W08426
- [2] Boé, J. (2018) Interdependency in multimodel climate projections : Component replication and result similarity. *Geophysical Research Letters*, 45.
- [3] Bonnet R., J. Boé, G. Dayon and E. Martin (2017) 20th century hydro-meteorological reconstructions to study the multi-decadal variations of the water cycle over France. *Water Resources Research*, 53, 8366–8382
- [4] Collins, M., R. Knutti, J. Arblaster, J.-L. Dufresne, T. Fichet, P. Friedlingstein, X. Gao, W.J. Gutowski, T. Johns, G. Krinner, M. Shongwe, C. Tebaldi, A.J. Weaver and M. Wehner (2013) Long-term Climate Change : Projections, Commitments and Irreversibility. In : *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- [5] Dayon, G. (2015) Evolution du cycle hydrologique continental en France au cours des prochaines décennies. PhD Thesis. Université Toulouse III Paul Sabatier
- [6] Dayon G., J. Boé et E. Martin (2015) Transferability in the future climate of a statistical downscaling method for precipitation in France. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 120, 1023–1043
- [7] Dayon G., J. Boé, E. Martin et J. Gailhard (2018) Impacts of climate change on the hydrological cycle over France and associated uncertainties. *Comptes Rendus Geoscience*, In press.
- [8] Decharme, B., A. Boone, C. Delire et J. Noilhan (2011) Local evaluation of the interaction between Soil Biosphere Atmosphere soil multilayer diffusion scheme using four pedotransfer functions. *Journal of Geophysical Research*, 116(D20) :D20126
- [9] Guttman, N.B. (1998) Comparing the Palmer Drought Index and the Standardized Precipitation Index. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 113-121
- [10] Habets, F., A. Boone, J.L. Champeaux, P. Etchevers, L. Franchistéguy, E. Leblois, E. Ledoux, P. Le Moigne, E. Martin, S. Morel, J. Noilhan, P. Quintana Segui, F. Rousset-Regimbeau et P. Viennot (2008) The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. *Journal of Geophysical Research*, 113(D06) :113
- [11] Habets, F., J. Boé, M. Déqué, et al. (2013) Impact of climate change on the hydrogeology of two basins in northern France. *Climatic Change*, 121 :771
- [12] Ledoux, E., G. Girard, G. de Marsily, J. Villeneuve et J. Deschenes (1989) Spatially Distributed Modeling : Conceptual Approach, Coupling Surface Water And Groundwater. In Morel-Seytoux, H., éditeur : *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling*, pages 435-454
- [13] Noilhan, J. et S. Planton (1989) A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Monthly Weather Review*, 117 :536-549.
- [14] Quintana-Segui, P., P. Le Moigne, Y. Durand, E. Martin, F. Habets, M. Baillon, C. Canellas, L. Franchistéguy, and S. Morel (2008) Analysis of Near-Surface Atmo-

spheric Variables : Validation of the SAFRAN Analysis over France. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47, 92–107

- [15] Taylor, K. E., R.J. Stouffer, G.A. Meehl (2012) An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 485-498
- [16] Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Habets, F., Soubeyroux, J.-M., Blanchard, M., and Baillon, M. : Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 459-478