

IMPACT RÉGIONAL DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES CARACTÉRISTIQUES SPATIO-TEMPORELLES DES SÉCHERESSES EN FRANCE

Matthieu BELIN^(1,2), Aglaé JÉZÉQUEL^(1,3) & Agnès DUCHARNE⁽²⁾

⁽¹⁾ Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD), IPSL, CNRS, ENS-PSL, Sorbonne Université, École Polytechnique, Paris, France.

⁽²⁾ Sorbonne Université, CNRS, EPHE, UMR 7619 METIS, Paris, France.

⁽³⁾ École Nationale des Ponts et Chaussées, Champs-sur-Marne, France.

E-Mail : matthieu.belin@lmd.ipsl.fr, aglae.jezequel@lmd.ipsl.fr, agnes.ducharne@sorbonne-universite.fr

Résumé : Les sécheresses en France ont d'importants impacts socio-économiques, notamment sur l'agriculture, l'énergie et les incendies de forêt. Alors que le changement climatique modifie déjà leurs caractéristiques en Europe, une analyse régionalisée des sécheresses futures s'impose pour préparer les stratégies d'adaptation à l'échelle de chaque bassin hydrographique français. Dans cette perspective, nous développons une analyse des sécheresses des sols et hydrologiques fondée sur des indices standardisés (SSWI, SRI) appliquées à 12 simulations hydro-climatiques du projet Explore2 avec le modèle de surfaces continentales ORCHIDEE. En considérant les sécheresses comme des événements continus spatialement et temporellement, nous examinons l'évolution de leurs caractéristiques (intensité, durée, surface) par rapport à 1976-2005 dans les six grands bassins hydrographiques, pour deux niveaux de réchauffement de la TRACC : +2°C et +4°C. Les résultats révèlent une divergence nord-sud marquée avec une importante amplification des sécheresses au sud et une relative stagnation au nord. Malgré cette dichotomie, tous les bassins verront émerger des extrêmes sans précédent, avec des durées multipliées par 2 à 3 pour les sécheresses des sols (jusqu'à 41 mois à +4°C) et par 1.5 à 2 pour les sécheresses hydrologiques (jusqu'à 18 mois). Ces transformations impliquent que la gestion future devra prendre en compte à la fois la disparité géographique et l'émergence de sécheresses sans précédent sur l'ensemble du territoire.

MOTS CLEFS : sécheresse, indice standardisé, niveau de réchauffement, France, changement climatique

REGIONAL IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON THE SPATIO-TEMPORAL CHARACTERISTICS OF DROUGHTS IN FRANCE

Résumé : Droughts in France have significant socioeconomic impacts across multiple sectors, including agriculture, energy production, and forest fires. As climate change is already modifying drought characteristics across Europe, a regionalized analysis of plausible future drought patterns in France is helpful to prepare adaptation strategies at the scale of each river basin. To provide stakeholders with concrete assessments of future risks, we develop a comprehensive analytical framework examining soil moisture and hydrological droughts through standardized indices (SSWI and SRI). Our analysis relies on 12 high-resolution hydro-climatic simulations over metropolitan France from the Explore2 project, using ORCHIDEE as the land surface model. By treating droughts as spatially and temporally continuous events, we examine the evolution of their key properties (intensity, duration, and spatial extent) relative to the 1976-2005 reference period across each of France's six major catchments. We adopt a warming level approach aligned with the French reference warming trajectory for climate change adaptation (TRACC), analyzing drought characteristics at regional warming levels of +2°C and +4°C over metropolitan France. The results confirm a north-south divergence in drought evolution. In the northern basins (Artois-Picardie, Seine-Normandie, Rhin-Meuse), droughts tend towards historically moderate characteristics, while southern basins (Loire-Bretagne, Adour-Garonne, Rhône-Méditerranée) experience intensification of all drought characteristics, even at +2°C. Despite this dichotomy, all basins will face historically

unprecedented extremes. The most extreme soil moisture drought durations increase by a factor of 2 to 3, reaching up to 41 months at +4°C warming, while hydrological drought durations increase by a factor of 1.5 to 2, reaching up to 18 months. This important increase in duration of the most extreme drought events, particularly in southern catchments, suggests a shift from episodic events to prolonged water deficit conditions. These transformations indicate that future drought risk management must account for both geographically differentiated evolution and the emergence of extreme events with no historical precedent across all French river basins.

KEY WORDS: droughts, standardized drought indices, warming-level analysis, France, climate change

INTRODUCTION

De 1976 à 2022 en passant par 1989, la France a été touchée par de nombreuses sécheresses d'intensité, d'extension spatiale et de durée très variables. Ces événements ont eu d'importantes répercussions socio-économiques, soulignant la nécessité d'une meilleure préparation à la gestion des risques associés à de tels aléas [Biella et al. 2024].

Une des difficultés du travail sur les sécheresses réside dans la définition de ce phénomène. Conceptuellement, les sécheresses se définissent comme un déficit anormal et temporaire d'humidité [Wilhite et Glantz 1985]. Non applicable directement, cette définition se décline en trois types selon la partie du cycle hydrologique concernée : sécheresses météorologiques (déficit de précipitations), sécheresses des sols (humidité anormalement basse) et sécheresses hydrologiques (faibles niveaux d'eau dans les réservoirs naturels). Ces types sont interconnectés avec des délais de propagation variables.

Le changement climatique d'origine anthropique modifie la thermodynamique du climat, impactant les précipitations et l'évapotranspiration. Ce changement concerne non seulement l'évolution moyenne du système climatique mais aussi les événements extrêmes. En Europe, les sécheresses des sols et météorologiques ont vu leurs caractéristiques s'aggraver : augmentation de la fréquence des premières depuis 1981 [Řehoř et al. 2023] et amplification de l'intensité et de la durée des secondes dans le Sud-Ouest de l'Europe [Spinoni et al. 2015], avec des contrastes géographiques notables entre le nord et le sud de la France. En outre, les modèles hydro-climatiques projettent une amplification des sécheresses en France au XXI^{ème} siècle [Vidal et al. 2010]. L'évolution des précipitations révèle un gradient nord-sud : augmentation au nord, diminution au sud [André et al. 2024]. Malgré ce gradient, Sauquet et al. [2025] anticipent une diminution des débits fluviaux estivaux dans tous les bassins hydrographiques français.

Les sécheresses des sols et hydrologiques conditionnent la disponibilité de la ressource en eau pour les usages agricoles, industriels et écologiques. Analyser l'évolution de ces deux types de sécheresses permet de se préparer aux risques associés à leurs impacts sur les systèmes hydrologiques. De plus, les sécheresses sont des événements qui évoluent dans l'espace et dans le temps, justifiant leur caractérisation spatio-temporelles [Lloyd-Hughes 2012]. Enfin, au vu de l'évolution géographique différenciée des précipitations et des débits en France mise en évidence ci-dessus, une analyse régionalisée s'impose pour adapter les stratégies de gestion de l'eau aux spécificités de chaque bassin hydrographique. Plus précisément : comment les caractéristiques spatio-temporelles des sécheresses des sols et hydrologiques évoluent-elles régionalement en France avec le changement climatique ?

Nous proposons dans cet article de régionaliser l'étude de l'évolution des caractéristiques des sécheresses des sols et des sécheresses hydrologiques menée à l'échelle nationale dans l'article Belin et al. [soumis] sur les six grands bassins hydrographiques en France continentale (Artois-

Picardie, Seine-Normandie, Rhin-Meuse, Loire-Bretagne, Rhône-Méditerranée et Adour-Garonne). Nous revenons dans un premier temps sur le catalogue d'événements continus spatialement et temporellement que nous avons construit pour différents types de sécheresses à partir de l'ensemble de simulations hydroclimatiques à haute résolution sur la France développé dans le cadre du projet Explore2 avec le modèle de surface continentale ORCHIDEE avant de détailler la régionalisation de ces événements. L'évolution des caractéristiques des sécheresses est ensuite analysée en s'appuyant sur des niveaux de réchauffement définis dans la trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC, [Soubeyroux et al. \[2024\]](#)).

CATALOGUE DES ÉVÉNEMENTS DE SECHERESSE EN FRANCE

Données et variables

Nous nous appuyons dans cette étude sur l'ensemble de projections hydroclimatiques haute résolution en France le plus récent réalisé dans le projet Explore2 [[Sauquet et al. 2025](#)] et plus précisément sur les 12 simulations couvrant la période 1960-2100 [Belin et al., soumis]. Les simulations proviennent de modèles de climat régionaux corrigés en biais (ADAMONT, [Verfaillie et al. \[2017\]](#)) forçant le modèle de surfaces continentales ORCHIDEE pour les simulations hydrologiques [[Huang et al. 2024](#)]. Chacune de ces 12 simulations couvre la France continentale représentée selon une grille composée de mailles de 8km x 8km.

Nous utilisons par la suite deux variables calculées par ORCHIDEE agrégées au pas de temps mensuel. L'humidité des sols est analysée à partir du *Soil Wetness Index* (SWI) évaluant la disponibilité en eau dans les deux premiers mètres du sol. En notant w la quantité d'eau dans une colonne de 2 mètres, w_{wp} celle au point de flétrissement et w_{fc} la capacité au champ, on définit $SWI = (w - w_{wp}) / (w_{fc} - w_{wp})$. Ensuite, pour évaluer les sécheresses hydrologiques, nous utilisons le ruissellement total (R), directement corrélé aux débits des rivières. Celui-ci résulte de la somme entre le ruissellement et le drainage.

Les sécheresses peuvent être définies à partir de la déviation de l'humidité par rapport à la climatologie locale. Nous standardisons donc SWI et R indépendamment en chaque maille pour obtenir le *Standardized Soil Wetness Index* (SSWI) et le *Standardized Runoff Index* (SRI) à partir du cumul sur trois mois sur la base de la méthode introduite par McKee et al. [[1993](#)]. Pour limiter les incertitudes [[Laimighofer et Laaha 2022](#)] dans la construction de ces indices de sécheresses standardisés, nous utilisons une période de 60 ans (1960-2020) pour définir la référence climatique et une estimation non-paramétrique par noyau gaussien pour représenter la distribution des variables.

Détection

Ces indices de sécheresse standardisés permettent d'évaluer la déviation du SWI et du R par rapport à la climatologie en termes de probabilité d'occurrence pendant la période de référence. En chaque point, nous fixons un seuil de sécheresse local à -0,84, correspondant à une probabilité d'occurrence d'au plus 20 %. Autrement dit, nous considérons comme secs tous les mois qui font face à une sécheresse avec une période de retour d'au moins 5 ans par rapport à la période de référence en chaque point de grille.

Le passage de la sécheresse locale en un événement de sécheresse continu spatialement et temporellement se fait en associant tous les points secs qui possèdent au moins un voisin sec

dans l'espace ou dans le temps. Nous utilisons pour ce faire l'algorithme de *connected component in 3 dimensions* utilisé à plusieurs reprises dans l'étude d'événements climatiques extrêmes [Zscheischler et al. 2013]. Cet algorithme regroupe donc les points secs adjacents dans le temps et l'espace, générant un ensemble d'événements de sécheresses.

Afin de garantir leur cohérence physique et leur représentativité, nous appliquons deux filtres définissant une condition spatiale et une temporelle sur ces événements. Spatialement, un événement de sécheresse doit affecter au moins 10 % de la France continentale chaque mois. Cette condition conserve les événements de sécheresses qui ont une importance régionale et évite la fusion artificielle d'événements distincts. Temporellement, un événement de sécheresse doit persister pendant au moins trois mois, puisque nous étudions des événements qui évoluent dans le temps.

Caractérisation Régionale

Chaque événement est détecté à l'échelle nationale pour capturer son évolution spatio-temporelle. Ce sont les caractéristiques régionales que nous calculons pour ces événements extrêmes. Plus précisément, l'intensité (respectivement la durée) d'une sécheresse dans un bassin donné est la médiane de l'intensité (resp. la durée) en chaque point de la sécheresse touchant ce bassin. Pour la surface, c'est la médiane de la surface du bassin versant affectée à chaque pas de temps. Cette caractérisation donne ainsi accès, pour chaque événement, à son intensité, sa durée et son extension spatiale dans chacun des six grands bassins.

METHODE D'ANALYSE DE L'ÉVOLUTION DES SECHERESSES

Pour analyser la transformation de ces caractéristiques avec le changement climatique, nous étudions la répartition des trois caractéristiques des sécheresses dans chacun des bassins dans trois climats distincts représentés par leur niveau de réchauffement régional, en France, par rapport à la période préindustrielle : un climat de référence, un à +2 °C et un à +4 °C. Le climat de référence correspond aux sécheresses entre 1976 et 2005 dans les simulations. Les deux autres niveaux de réchauffement ont été choisis pour s'aligner avec la TRACC. Dans ce cadre, le climat à +2 °C sert de référence pour définir les politiques d'adaptation à court terme et celui à +4 °C pour celles à long terme. Un niveau de réchauffement intermédiaire est aussi présent dans la TRACC mais nous avons montré dans Belin et al. [soumis] que les caractéristiques des sécheresses étaient similaires à celles dans un climat à +2 °C. Plus précisément, nous identifions pour chacune des 12 simulations la première période de 30 ans qui atteint ou dépasse le niveau de réchauffement considéré. Tous les événements de sécheresse qui évoluent pendant au moins 3 mois dans cette période de 30 ans sont associés au niveau de réchauffement considéré.

RESULTATS

Historiquement, l'exposition aux sécheresses des sols et hydrologiques est relativement similaire entre les six bassins : une maille est en moyenne en état de sécheresse des sols un peu moins de deux ans et en état de sécheresse hydrologique environ un an sur une période de dix ans (**Figure 1**). Cette homogénéité coïncide avec notre définition de sécheresse comme un état de déficit hydrique relatif à la climatologie locale définit sur une période de 60 ans (1960-2019).

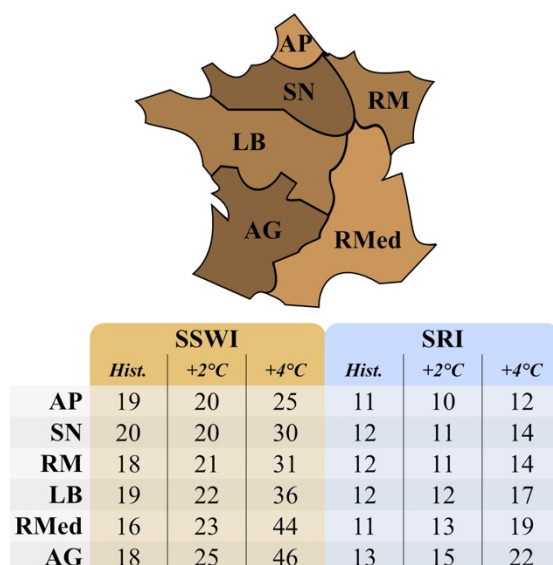


Figure 1 : Nombre de mois par décennie faisant face à un événement de sécheresse pour une maille moyenne de chaque bassin hydrographique sur trois périodes. Les six bassins hydrographiques sont présentés sur la carte de France en haut de la figure avec leurs diminutifs. Ceux-ci correspondent à Artois-Picardie pour AP, Seine-Normandie pour SN, Rhin-Meuse pour RM, Loire-Bretagne pour LB, Rhône-Méditerranée pour RMed et Adour-Garonne pour AG. Les valeurs sont une moyenne sur l'ensemble des simulations. La période Hist. Correspond à la période historique, soit 1976-2005. Les périodes +2°C et +4°C sont les périodes de 30 ans correspondant pour chacune des simulations à des niveaux de réchauffement régionaux de respectivement +2°C et +4°C. Les valeurs sont exprimées en mois par décennies.

Toutefois, l'évolution de cette exposition avec le réchauffement régional est géographiquement différenciée. Les sécheresses des sols et les sécheresses hydrologiques suivent des trajectoires d'évolution semblables. Si les bassins du nord (Artois-Picardie, Seine-Normandie et Rhin-Meuse) observent une faible augmentation voire une stagnation, ceux du sud (Rhône-Méditerranée et Adour-Garonne) connaissent une importante augmentation de cette exposition. Ces derniers doublent la durée en état de sécheresse des sols, passant ainsi d'un peu moins de deux ans à presque quatre ans par décennie à un niveau de réchauffement de +4°C en France. L'augmentation est similaire pour les sécheresses hydrologiques passant d'environ un an à un peu moins de deux ans. L'augmentation à court-terme (climat à +2°C en France) est déjà importante pour les bassins du sud avec une augmentation d'environ 41% de l'exposition aux sécheresses des sols et d'environ 17% aux sécheresses hydrologiques en Adour-Garonne et en Rhône-Méditerranée.

Les évolutions des caractéristiques des sécheresses (intensité, durée et surface) sont aussi géographiquement inégales. Les trois bassins du nord connaissent des sécheresses des sols similaires voire modérées à +2°C et +4°C par rapport à la référence historique ([Figure 2](#)). Par exemple, en Seine-Normandie, 52% des événements dans un climat à +4°C sont moins intenses que la médiane historique. Au sud, les caractéristiques augmentent dès +2°C : 77% des sécheresses en Rhône-Méditerranée dépassent la médiane historique en intensité et 17% des événements touchant Adour-Garonne dure plus longtemps que le 90^e centile historique.

Malgré cette dichotomie nord-sud, tous les bassins connaissent de nouveaux extrêmes. En nous concentrant sur les valeurs des 95^e centiles de chaque distribution des caractéristiques de sécheresses, les extrêmes de toutes les caractéristiques augmentent dans un climat plus chaud, sauf l'intensité et la surface en Artois-Picardie. En particulier, à +4°C en France, les six bassins hydrographiques connaissent des sécheresses qui couvrent plus de 60 % de leurs territoires. Les durées extrêmes dépassent largement les records historiques en atteignant entre 33 mois (Seine-Normandie) et 41 mois (Adour-Garonne et Artois-Picardie). Enfin, les intensités de ces sécheresses les plus extrêmes augmentent entre 10 et 20 % sauf en Loire-Bretagne et Artois-Picardie (respectivement +1% et -1%) entre le climat de référence et une France à +4°C.

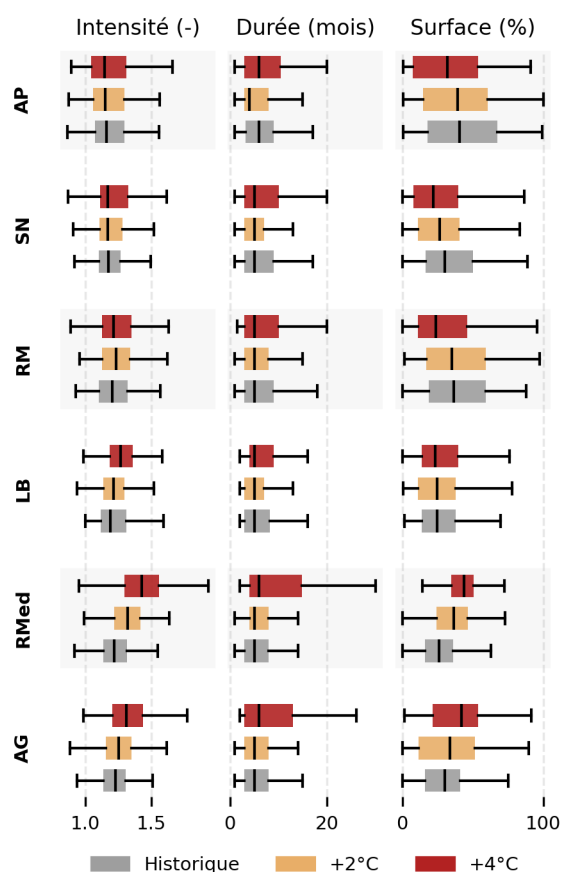


Figure 2 : Répartition des caractéristiques des sécheresses des sols (SSWI) pour les six grands bassins hydrographiques français sur trois périodes. Les six bassins sont notés par leurs labels : AP pour Artois- Picardie pour, SN pour Seine-Normandie, RM pour Rhin-Meuse, LB pour Loire-Bretagne, RMed pour Rhône-Méditerranée et AG pour Adour-Garonne. Les boîtes à moustaches représentent la répartition des caractéristiques (intensité, durée et surface) pour la période de référence (1976-2005) et les niveaux de réchauffement régionaux de +2°C et +4°C.

L'évolution des caractéristiques des sécheresses hydrologiques ([Figure 3](#)) est similaire à celle des sécheresses des sols. En ce qui concerne les caractéristiques les plus extrêmes (95^e centile des caractéristiques), le changement est plus limité pour l'intensité (entre -4% et +6% entre le climat historique et une France à +4°C) et la surface (entre -21% et +26%). Les durées extrêmes des sécheresses hydrologiques augmentent dans tous les bassins, passant de 7-10 mois dans le climat de référence à 11-18 mois à +4°C. Notons que le bassin hydrographique

Artois-Picardie rencontre la sécheresse hydrologique extrême la plus longue (18 mois) malgré la stagnation observée de la répartition des durées des sécheresses par rapport au climat de référence.

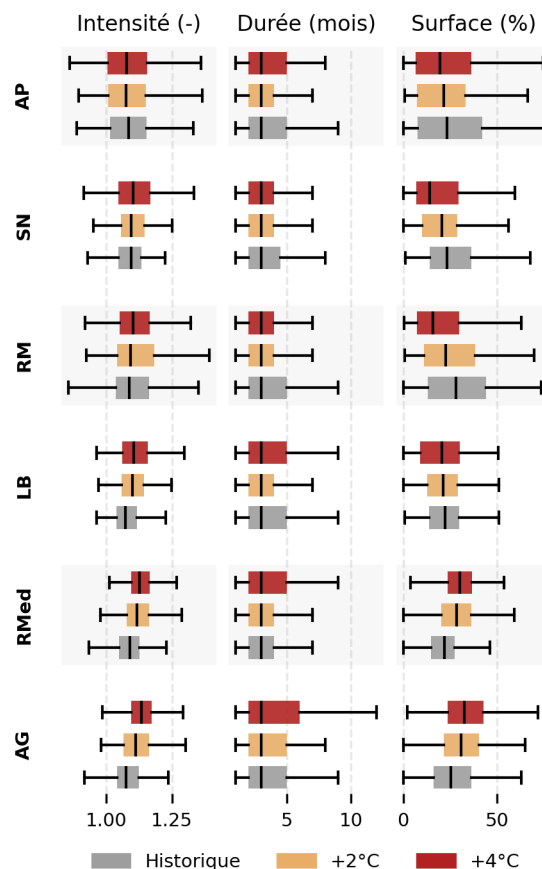


Figure 3 : Répartition des caractéristiques des sécheresses hydrologiques (SRI) pour les six grands bassins hydrographiques français sur trois périodes. Comme la Figure 2, mais pour les sécheresses hydrologiques.

DISCUSSION

Quelles Incertitudes ?

Nos résultats peuvent être influencés par nos choix méthodologiques, en particulier concernant notre méthode de détection des événements de sécheresse avec le seuil local de sécheresse à -0,84 (en indice standardisé), la surface minimale de 10 %, et les indices standardisés construits à partir du cumul des variables sur 3 mois. Belin et al. [soumis] montrent que ces choix ne modifient pas les conclusions de l'analyse à l'échelle nationale.

Les projections hydroclimatiques comportent aussi plusieurs sources d'incertitude [Evin et al. 2025] notamment liées au choix des modèles, et à la variabilité interne. Les incertitudes liées aux modèles climatiques régionaux incluent notamment la représentation des aérosols : la moitié des modèles utilisés considèrent une concentration constante. Belin et al. [soumis] montrent que la prise en compte de la diminution des aérosols amplifie l'augmentation des caractéristiques des sécheresses des sols avec le changement climatique. En effet, la présence d'aérosols réduit

les flux radiatifs directs et donc l'évapotranspiration. Par ailleurs, la méthode de correction de biais (ADAMONT) appliquée aux variables atmosphériques introduit également des biais, qui ont été évalués comme limités comparativement aux autres sources d'incertitude de la chaîne de modélisation [Sauquet et al. 2025]. Malgré ces sources d'incertitudes, la validation sur la période historique (1960-2020) montre que les événements de sécheresse détectés dans les simulations présentent des caractéristiques similaires à ceux issus de la réanalyse SAFRAN à l'échelle nationale.

L'utilisation d'ORCHIDEE comme unique modèle hydrologique conditionne les résultats à ce modèle. ORCHIDEE étant le modèle hydrologique projetant le futur le plus humide de l'ensemble Explore2 [Evin et al. 2025], nos résultats présentent une borne humide sur l'évolution des sécheresses en France. Cette différence avec les autres modèles de l'ensemble s'explique par une spécificité d'ORCHIDEE qui modélise les effets physiologiques du CO₂ sur la végétation (fertilisation et fermeture stomatique), impactant significativement les projections en atténuant partiellement l'augmentation de l'évapotranspiration. Ce mécanisme se répercute sur les caractéristiques des sécheresses futures plausibles en limitant leur augmentation [Belin et al., soumis].

Évolution Géographiquement Différenciée des Sécheresses

La régionalisation de notre analyse nationale [Belin et al., soumis] révèle une différence entre bassins du nord et du sud, tant en termes de fréquence que de l'évolution des caractéristiques des sécheresses. Cette différenciation géographique est cohérente avec les projections d'évolution des précipitations [André et al. 2024] et des débits fluviaux [Sauquet et al. 2025] et avec l'hypothèse d'un équilibre différencié entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle (ETP) [Spinoni et al. 2015]. Dans les bassins du nord, l'augmentation des précipitations pourrait compenser partiellement l'augmentation de l'ETP due au réchauffement. Au contraire, les bassins du sud subiraient un double effet : la diminution des précipitations couplée à l'augmentation de l'ETP, amplifiant ainsi le déficit hydrique [Spinoni et al. 2015].

Au-delà des changements de tendance moyenne, un résultat majeur de cette analyse régionalisée concerne l'évolution des queues de distribution des caractéristiques des sécheresses. À l'échelle nationale, nous avons observé non seulement une augmentation de la fréquence d'événements similaires aux sécheresses historiquement impactantes (1976, 1989), mais surtout l'apparition de caractéristiques extrêmes sans équivalent dans la période historique [Belin et al., soumis].

Cette émergence d'extrêmes inédits concerne l'ensemble du territoire français, y compris les bassins du nord. Dans un climat à +4°C de réchauffement régional, tous les bassins hydrographiques voient apparaître des événements dont au moins deux caractéristiques (intensité, durée ou extension spatiale) dépassent largement le 95^e centile historique. Cette analyse révèle une augmentation particulièrement préoccupante pour les bassins du sud (Adour-Garonne, Rhône-Méditerranée). L'augmentation des extrêmes les plus sévères est marquée avec jusqu'à 38 % des événements futurs présentant une intensité supérieure au 90^e centile de référence, et l'apparition d'événements dépassant les caractéristiques extrêmes historiques. Même dans les bassins du nord comme Artois-Picardie, qui présente la plus faible fréquence historique de sécheresses et connaît une stagnation de la répartition des événements autour de la médiane de référence pour toutes les caractéristiques avec le changement climatique, on observe l'apparition de sécheresses aux caractéristiques inédites, dépassant le 95^e centile historique.

Vers une Modification de la Nature du Risque ?

À +4°C, l'exposition des bassins du sud de la France aux sécheresses des sols double. L'allongement considérable de la durée de ces sécheresses conduit à la diminution du nombre d'événements : deux événements distincts de 18 mois deviennent un seul événement continu de plusieurs années. Cette augmentation de l'exposition est la conséquence d'un assèchement général : les sécheresses deviennent si persistantes qu'elles perdent leur caractère épisodique.

Cette conjonction d'événements plus longs, plus intenses et spatialement plus étendus modifie qualitativement la nature du risque. Les événements extrêmes futurs pour les sécheresses des sols ne sont plus simplement des versions amplifiées des sécheresses historiques, mais acquièrent des caractéristiques qui posent la question de la persistance d'un état de sécheresse sur plusieurs années consécutives, particulièrement dans les bassins du sud. Ce changement de temporalité remet en question la notion même d'« événement » de sécheresse dans un tel climat et suggère une évolution vers des conditions de déficit hydrique chronique dans certaines régions, en particulier dans le sud de la France où la convergence de toutes les caractéristiques extrêmes est la plus marquée.

Au contraire, bien que ce phénomène d'allongement soit également observé pour les sécheresses hydrologiques, celui-ci se fait dans une moindre mesure et avec des durées historiques plus faibles. Cette augmentation ne pose donc pas la même question de changement de régime. Pour autant, cela ne minimise pas l'amplification des sécheresses hydrologiques dans le sud du pays dans un climat à +4°C : l'exposition de ces bassins y double presque aussi.

CONCLUSION

Cette étude régionalisée révèle une évolution contrastée des caractéristiques des événements extrêmes que sont les sécheresses des sols et hydrologiques en France continentale avec le changement climatique. L'évolution de ces extrêmes est cohérente avec les projections climatiques, notamment l'évolution différenciée des précipitations et des débits fluviaux entre le nord et le sud du territoire. Dans les bassins du nord (Artois-Picardie, Seine-Normandie, Rhin-Meuse), les sécheresses des sols et hydrologiques tendent vers des événements avec des caractéristiques similaires à ceux observés dans la période historique. À l'inverse, les bassins du sud (Loire-Bretagne, Adour-Garonne, Rhône-Méditerranée) connaissent une amplification de toutes les caractéristiques des deux types de sécheresses dès +2°C. Cette divergence s'accompagne d'un résultat majeur : l'émergence d'événements aux caractéristiques extrêmes sans précédent historique concerne l'ensemble du territoire, y compris les bassins du nord. Les durées extrêmes des sécheresses des sols sont multipliées par un facteur 2 à 3, atteignant jusqu'à 41 mois à +4°C, tandis que celles des sécheresses hydrologiques sont multipliées par un facteur 1.5 à 2, atteignant 18 mois. Ces allongements drastiques transforment qualitativement la nature du risque. Ainsi, si l'inégalité géographique de l'exposition aux événements de sécheresse s'accroît avec le changement climatique, aucun bassin n'est épargné par l'apparition d'extrêmes dépassant largement le cadre de référence historique.

Ces résultats mettent en évidence des défis d'adaptation différenciés selon les bassins hydrographiques concernant la gestion de l'eau. Dans le sud, l'amplification généralisée des caractéristiques des sécheresses, en particulier l'allongement de leurs durées, suggèrent une évolution vers des conditions de déficit hydrique chronique, particulièrement à +4°C. Dans le nord, malgré une atténuation relative des événements moyens, l'apparition d'extrêmes historiquement inédits pose des défis spécifiques pour des territoires historiquement moins

exposés au risque de sécheresses. L'approche par niveaux de réchauffement régional, en s'appuyant sur la TRACC, vise à rendre ces projections directement interprétables par les différents acteurs impliqués dans la définition des politiques d'adaptation à court terme (+2°C) et à long terme (+4°C). Si le changement climatique anthropique influence les sécheresses, notre société interagit par ailleurs avec ces extrêmes pouvant les aggraver voire les créer [Van Loon et al. 2016]. Une meilleure compréhension de ces interactions socio-hydrologiques, à l'échelle régionale et dans un climat changeant, constitue une perspective de recherche essentielle pour affiner les stratégies d'adaptation.

REFERENCES

- André J, D'Andrea F, Drobinski P, Muller C (2024) Regimes of Precipitation Change Over Europe and the Mediterranean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 129:e2023JD040413. <https://doi.org/10.1029/2023JD040413>
- Biella R, Shyrokaya A, Pechlivanidis I, et al (2024) [The 2022 Drought Shows the Importance of Preparedness in European Drought Risk Management](#)
- Evin G, Hingray B, Thirel G, et al (2025) Uncertainty Sources in a Large Ensemble of Hydrological Projections: Regional Climate Models and Internal Variability Matter. *EGU sphere* 1-43. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-2727>
- Huang P, Ducharme A, Rinchiuso L, et al (2024) Multi-Objective Calibration and Evaluation of the ORCHIDEE Land Surface Model over France at High Resolution. *Hydrology and Earth System Sciences* 28:4455-4476. <https://doi.org/10.5194/hess-28-4455-2024>
- Laimighofer J, Laaha G (2022) How Standard Are Standardized Drought Indices? Uncertainty Components for the SPI & SPEI Case. *Journal of Hydrology* 613:128385. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128385>
- Lloyd-Hughes B (2012) A Spatio-Temporal Structure-Based Approach to Drought Characterisation. *International Journal of Climatology* 32:406-418. <https://doi.org/10.1002/joc.2280>
- McKee TB, Doesken NJ, Kleist J (1993) The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. In: *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. California, p 179-183
- Řehoř J, Trnka M, Brázdil R, et al (2023) Global Hotspots in Soil Moisture-Based Drought Trends. *Environmental Research Letters* 19:014021. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad0f01>
- Sauquet E, Evin G, Siauve S, et al (2025) A Large Transient Multi-Scenario Multi-Model Ensemble of Future Streamflow and Groundwater Projections in France. *EGU sphere* 1-41. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-1788>
- Soubeyrou J-M, Dubuisson B, Bernus S, et al (2024) [À Quel Climat s'adapter En France Selon La TRACC ?](#)
- Spinoni J, Naumann G, Vogt J, Barbosa P (2015) European Drought Climatologies and Trends Based on a Multi-Indicator Approach. *Global and Planetary Change* 127:50-57. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.01.012>
- Van Loon AF, Gleeson T, Clark J, et al (2016) Drought in the Anthropocene. *Nature Geoscience* 9:89-91. <https://doi.org/10.1038/ngeo2646>
- Verfaillie D, Déqué M, Morin S, Lafaysse M (2017) The Method ADAMONT v1.0 for Statistical Adjustment of Climate Projections Applicable to Energy Balance Land Surface Models. *Geoscientific Model Development* 10:4257-4283. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4257-2017>
- Vidal J-P, Martin E, Franchistéguy L, et al (2010) Multilevel and Multiscale Drought Reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou Hydrometeorological Suite. *Hydrology and Earth System Sciences* 14:459-478. <https://doi.org/10.5194/hess-14-459-2010>
- Wilhite DA, Glantz MH (1985) Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International*. <https://doi.org/10.1080/02508068508686328>
- Zscheischler J, Mahecha MD, Harmeling S, Reichstein M (2013) Detection and Attribution of Large Spatiotemporal Extreme Events in Earth Observation Data. *Ecological Informatics* 15:66-73. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2013.03.004>