



Projet EXTREMOSCOPE

***Interprétation et attribution des
événements météorologiques et
climatiques extrêmes dans un cadre
climatique en France***

INSTITUT PIERRE-SIMON LAPLACE

Contact : Robert Vautard

CNRM-GAME

Contact : Serge Planton

Rapport final

29 Novembre 2016

Auteurs : R. Vautard [1], S. Planton [2], J.-M. Soubeyroux [3], T. Bolliet [1], P. Brockmann [1], J. Cattiaux [2], N. Caud [1], V. Daux [1], B. Dubuisson [3], N. Hempelmann [1], A. Jezequel [1], S. Joussaume [1], V. Masson-Delmotte [1], C. Nangini [1], P. Naveau [1], H. Omrani [1], G. Ouzeau [3], S. Radanovics [1], A. Ribes [2], M. Schneider [3], P. Simon [3], S. Thao [2], M. Vrac [1], P. Yiou [1]

[1] Institut Pierre-Simon Laplace

[2] Centre National de Recherche Météorologiques, Météo-France

[3] Direction de la Climatologie et des Services Climatiques, Météo-France

1. Résumé pour décideurs

Le projet Extremoscope avait pour objectif d'accroître les connaissances sur les liens entre l'intensité ou l'occurrence des extrêmes climatiques en France et le changement climatique. Les résultats de ce projet ont vocation à être intégrés dans l'ensemble des services climatiques, existants ou en cours de développement, destinés à communiquer des informations sur le passé, le présent et le futur de ces extrêmes, à un large public incluant les médias et les décideurs. En particulier, le projet vise à développer une approche permettant de déterminer dans quelle mesure un événement météorologique extrême singulier est lié au changement climatique d'origine humaine.

Le premier volet du projet a consisté à développer de nouvelles méthodes, par modélisation statistique et physique, permettant d'estimer les changements de probabilité d'occurrence et/ou d'intensité d'un événement singulier dus aux activités humaines. Une nouvelle méthode permettant de tirer parti des bases de données internationales de simulation du climat servant de base aux rapports du GIEC1 et tenant compte de l'évolution continue du climat au cours du temps (sa non-stationnarité) a ainsi été développée et évaluée. Une application au cas de la canicule de 2003 montre ainsi que la probabilité d'un événement comparable a fortement été influencée par les activités humaines. La méthode nécessite cependant d'autres développements techniques et d'autres applications avant d'être utilisable dans le cadre d'un service climatique. D'autres méthodes adaptées de méthodes existantes et appliquées sur des cas d'étude sont par contre directement utilisables au sein de services. Il s'agit d'une méthode d'analyse directe de résultats de simulations climatiques régionales2, d'une méthode statistique d'analogues recherchés dans des circulations atmosphériques passées, permettant notamment une séparation du rôle des changements thermodynamiques et des changements de circulation atmosphérique et enfin d'une méthode s'appuyant sur la réalisation de simulations climatiques régionales dans le monde réel (factuel) et un monde sans effet anthropique (contrefactuel).

Le deuxième volet important du projet concerne le développement d'indicateurs permettant de caractériser les événements singuliers et de diagnostics spécifiques permettant d'isoler certains mécanismes modifiant ces caractéristiques. Un premier indicateur original concerne la caractérisation des vagues de chaleur pouvant, au contraire des indices utilisés jusqu'ici pour le suivi climatique à Météo-France, peut être appliqué à l'échelle de régions française et est transposable à n'importe quelles conditions climatiques. Un autre indicateur original a été développé pour une étude de cas de pluies diluviennes dans le sud-est du pays permet de caractériser l'évolution de l'intensité maximale annuelle des pluies

¹ Celles du « Coupled Model Intercomparison Project »

² Celles du projet EURO-CORDEX

quotidiennes. D'autres indicateurs existants ont été sélectionnés et adaptés à l'étude d'événements singuliers concernant la circulation atmosphérique ou les sécheresses.

Ces indicateurs ainsi les outils de diagnostics spécifiques, ont été exploités dans un troisième volet du projet centré sur quelques cas d'étude. Ces cas correspondent à six événements climatiques qui se sont produits au cours du projet, trois se rapportant à des événements pluvieux et trois à des épisodes chauds, aussi sec pour l'un d'entre eux. La diversité de ces événements portant parfois sur une saison, parfois sur quelques jours, conduit à tirer des conclusions différentes concernant un possible effet anthropique. Ces conclusions vont de l'absence d'effet identifié jusqu'à une empreinte claire des activités humaines sur la probabilité d'événements comparables. Mais même lorsque différentes méthodes d'attribution s'accordent sur l'existence d'une influence humaine, elles ne s'accordent pas sur leur évaluation quantitative.

L'indicateur développé pour les vagues de chaleur a déjà commencé à être utilisé dans le cadre du suivi climatique opérationnel à Météo-France et sera prochainement pris en compte dans les portails de service existant (climat^{HD} et DRIAS). L'indicateur d'intensité des pluies diluviennes du Sud-Est de la France sera quant à lui proposé comme indicateur de changement climatique en 2017 à l'ONERC. Les études de cas ont quant à elles permis de préfigurer le fonctionnement d'un service apportant des informations sur le lien entre un événement singulier observé et le changement climatique anthropique, cela sur un laps de temps n'excédant pas quelques jours (cas de l'été 2016 notamment). Les outils de visualisation adoptés ont en particulier permis de situer les événements à partir de chroniques d'événements passés mais potentiellement aussi, pour des saisons singulières, dans un cadre d'évolution future grâce au démonstrateur développé dans le cadre du projet.

Un autre apport du projet concerne la mise en place de deux ateliers qui ont permis de faire un point sur les domaines d'étude d'impact parmi ceux qui pourraient dans un avenir proche donner lieu à l'application des méthodes de détection et d'attribution. Ces ateliers ont aussi permis d'aborder la question de la nature et de l'utilité de l'information sur la détection et l'attribution concernant les événements singuliers.

2. Rappel du contexte et des objectifs du projet

De nombreux événements météorologiques ou climatiques extrêmes ont ponctué la dernière décennie en France. Les vagues de chaleur estivales de 2003, 2006 mais aussi 2015 et 2016, les tempêtes de janvier 2009 et de février 2010, le cyclone GAMEDE à La Réunion, la sécheresse du printemps 2011 et de l'été 2015, les cumuls extrêmes de précipitations des hivers 2012-2013, 2013-2014, les pluies méditerranéennes répétées de l'automne 2014, ont particulièrement marqué notre pays, même si toutes les régions françaises n'ont pas été concernées au même degré. Cependant, il est difficile à ce jour de faire le lien entre ces événements et le changement climatique anthropique, du fait de la forte variabilité naturelle du climat. Il est aussi souvent difficile de bien discerner les mécanismes en jeu de ces événements, ce qui nécessite d'établir un ensemble de diagnostics et d'expériences de modélisation.

Les scientifiques sont régulièrement sollicités par les médias et les décideurs afin de mieux comprendre si les événements extrêmes occasionnant des dégâts sont liés au changement climatique d'origine humaine. S'il est souvent possible de donner une réponse générale sur de grandes classes d'événements (voir par exemple le 5^{ème} rapport du GIEC), il est souvent très difficile de répondre pour un événement singulier, ou à mesure que la définition de l'événement devient précise. La réponse est encore plus difficile à donner lorsque la question porte non plus sur l'événement météorologique (par exemple des pluies intense) mais sur ses impacts (des crues), car interviennent d'autres facteurs (dans ce cas par exemple la gestion des cours d'eau), et la nécessité d'une modélisation plus complexe que seulement la météorologie (dans ce cas l'hydrologie).

Le projet EXTREMOSCOPE vise à accroître la connaissance des événements extrêmes et leur lien au changement climatique, en s'appuyant sur les connaissances et services actuels, par les développements récents de la recherche. Plus précisément, il s'agit :

- de développer et d'évaluer de nouvelles méthodes d'attribution pour les événements extrêmes,
- de développer des indicateurs permettant une meilleure interprétation des événements extrêmes dans un cadre climatique, et une méthodologie permettant de replacer les événements dans les contextes climatiques passés, présent et projetés pour le 21^{ème} siècle selon plusieurs scénarios,
- d'appliquer ces méthodes à plusieurs cas d'étude concrets et de montrer comment ces méthodes peuvent être mises en œuvre, à la suite du projet, au sein de services climatiques nationaux, avec des échelles de temps allant de quelques jours à un an.

Le projet se focalise sur quatre types d'événements extrêmes, pour lesquels l'étude dans un cadre de changement climatique est possible grâce à de longues

séries d'observations : les vagues de chaleur et vagues de froid, les précipitations intenses et les sécheresses. Ce choix est fait car pour les variables météorologiques concernées de longues séries d'observations homogènes existent, ce qui est indispensable pour bien caractériser les changements de long terme. Il n'aborde pas les impacts des événements, qui nécessiteraient une étude bien plus ambitieuse.

3. Les résultats du projet

3.1 *Développement de nouvelles méthodes pour la détection et l'attribution d'événements singuliers*

3.1.1 Introduction

La mise en évidence et la quantification de l'influence humaine sur le climat s'est largement développée au cours des 25 dernières années. Les premiers travaux, au cours des années 1990, visaient à évaluer la réalité de cette influence humaine, en premier lieu sur la température moyenne globale. Au fil des rapports du GIEC, l'influence humaine est apparue de plus en plus prégnante. En 2013, le 5ème rapport affirmait notamment « Il est extrêmement probable que l'influence de l'homme est la cause principale du réchauffement observé depuis le milieu du XX e siècle. » Ce constat est le résultat de nombreuses études dites d'attribution, dans lesquelles on cherche à faire la part, dans les variations observées, de la variabilité climatique interne naturelle, de l'effet des forçages externes naturels (variation de l'activité solaire, volcanisme, etc.) et l'effet de la perturbation anthropique (émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols notamment).

Partant de ce constat sur la réalité du réchauffement climatique, la communauté scientifique a cherché à mieux cerner l'influence humaine sur le climat, par exemple via l'étude d'autres variables physiques (les précipitations, le niveau de la mer, l'humidité, etc.), ou l'étude spécifique du rôle des gaz à effet de serre. Parallèlement, une attention particulière a été portée aux événements extrêmes, notamment du fait de leur fort impact sur nos sociétés. Certains auteurs se sont intéressés à l'évolution observée des événements extrêmes, considérés collectivement, e.g. les épisodes de précipitations extrêmes sont-ils devenus plus intenses au cours des 50 dernières années – certains des travaux menés dans Extremoscope sont de cet ordre. D'autres études ont concerné des événements singuliers, comme la canicule 2003 en Europe – c'est l'objet de l'attribution d'événement, abordée dans le projet. La question alors posée est sensiblement différente : dans quelle mesure la perturbation anthropique du climat a-t-elle modifié la probabilité d'occurrence et/ou l'intensité d'un tel événement ? L'homme n'a, en général, pas causé l'événement, mais a pu le rendre plus ou moins probable.

L'attribution d'événements, outre son caractère « récent » (seulement 10 ans), présente plusieurs spécificités par rapport aux autres études d'attribution. Une première particularité concerne la définition de l'événement, qui peut influencer sensiblement le résultat. Par exemple, qu'est-ce que la canicule 2003 – 10 jours de chaleur extrême à Paris, ou bien un été (juin-juillet-août) exceptionnellement chaud sur la moitié de l'Europe ? Une deuxième spécificité concerne le fait que la variabilité naturelle joue, dans la plupart des cas, un grand rôle dans la survenue d'un événement, de sorte que l'influence humaine est, au plus, une cause nécessaire, mais pas suffisante pour expliquer l'événement. Un troisième aspect

concerne les techniques utilisées pour traiter cette question, en particulier le rôle - prépondérant - des modèles numériques. Ce projet visait notamment le développement de techniques innovantes pour traiter de façon systématique ce type de question.

3.1.2 Rappel des méthodes existantes

Dans le cadre du projet, il s'est agi principalement de rechercher de nouvelles méthodes pour l'attribution d'événements singuliers, et pour ce faire, d'évaluer dans quelle mesure la probabilité d'occurrence d'un événement climatique a pu et/ou pourra évoluer sous l'influence d'un forçage externe.

Plusieurs méthodes ont d'ores –et déjà été proposées dans la littérature pour attribuer des événements (Stott et al., 2010).

La première, qui est aussi la plus largement répandue, consiste à utiliser un modèle atmosphérique pour réaliser deux grands ensembles de simulations (parfois plus de 10.000 membres) dites forcées (l'état de l'océan étant prescrit, en particulier la température de surface de la mer, notée TSM) de l'année / saison au cours de laquelle l'événement a été observé : la première dans les conditions réelles de l'événement (TSM observée, c'est le monde factuel), la seconde dans un monde virtuel qui n'aurait pas subi de perturbation anthropique (TSM « désanthropisée », c'est le monde contrefactuel). Pour simuler ce deuxième monde, il convient d'estimer de combien les activités humaines ont réchauffé les TSM, ce qui est fait via une étude d'attribution plus classique. Cette technique a déjà été appliquée à de nombreux types d'événements (Pall et al., 2011, Otto et al., 2012, Christidis et al., 2013, Christidis et al., 2014). Plusieurs reproches peuvent être faits à cette approche « dominante » : elle est coûteuse en moyens de calcul (beaucoup de membres), les simulations doivent être réalisées de nouveau chaque année (ou pour chaque événement), ce qui rend la démarche encore plus coûteuse ; un seul modèle atmosphérique est utilisé, ce qui pose la question de la robustesse de la réponse ; les simulations sont réalisées conditionnellement à état particulier de TSM, qui peut influencer le résultat.

La deuxième grande méthode consiste à étudier les tendances observées sur les événements extrêmes (e.g. l'évolution sur 50 ans des jours chauds, si l'on étudie une vague de chaleur) pour en déduire un changement de la probabilité d'occurrence (van Oldenborgh et al., 2015). Cette approche consiste donc à décliner, pour un événement particulier, les résultats d'attribution (au sens classique) obtenus sur l'ensemble des événements observés. La principale faiblesse de cette approche, par ailleurs très pertinente est que, pour certains événements extrêmes, le rapport signal-sur bruit est très défavorable, ce qui signifie qu'il est très difficile, à partir des seules observations, de diagnostiquer le changement en cours ou à venir. Dans ces cas-là, la méthode peut être relativement imprécise (intervalles de confiance très larges). D'autres points faibles concernent le fait que tout le changement observé est par défaut réputé être entièrement lié aux activités humaines (l'effet des forçages naturels est

négligé), le fait que le changement est supposé linéaire en temps, et les imperfections / incertitudes liées aux observations elles-mêmes.

D'autres approches proposent une attribution conditionnelle à la circulation atmosphérique de l'événement étudié (Trenberth et al. 2015, Shepherd 2016). La question devient alors : l'événement étudié aurait-il été aussi extrême si la même circulation atmosphérique avait été observée dans un monde contrefactuel ? Une de ces approches, fruit de la communauté nationale, fixe la circulation atmosphérique via la technique des analogues (e.g. Cattiaux et al., 2010). Une autre technique consiste à imposer cette circulation à des modèles régionaux à haute résolution grâce à une technique de « nudging » (e.g. Meredith et al., 2015, et section 3.1.6).

D'autres méthodes ont été utilisées de façon plus ponctuelle. En particulier, quelques premières tentatives ont été menées pour utiliser en attribution d'événements les simulations couplées CMIP (Knutson et al., 2013 ; Lewis and Karoly, 2014), en se restreignant à l'étude d'événements « longs » (des températures en moyenne mensuelle ou annuelle sur une grande région). Les statistiques réalisées étaient alors élémentaires, basées sur le simple comptage des simulations CMIP5 (soit un ensemble de taille 100 environ).

Un point notable concernant l'attribution d'événement est que la communauté ne dispose pas encore d'exercice de comparaison systématique des méthodes sur un grand nombre de cas. Quelques premiers efforts vont cependant dans ce sens, via des études de cas ponctuelles (e.g. Otto et al., 2012 ; King et al., 2015), ou via des projets comme le projet européen EUCLEIA qui se termine fin 2016.

Les travaux menés visaient à (i) proposer une méthode d'attribution d'événements tirant partie des simulations CMIP existantes dans un cadre non-stationnaire (section 3.1.3), (ii) approfondir et améliorer les méthodes d'analogues (sections 3.1.4 et 3.1.5), et (iii) utiliser des simulations régionales à haute résolution (section 3.1.6).

3.1.3 Méthodes non-stationnaires

La première approche développée dans le cadre d'Extremoscope consiste à évaluer l'impact des activités humaines sur la probabilité d'occurrence ou l'intensité d'un événement à partir de simulations couplées déjà existantes et de techniques statistiques non-stationnaires.

Des simulations couplées de référence sont produites par la plupart des centres de modélisation du monde, de façon régulière (tous les 5 à 7 ans) et coordonnée via le Coupled Model Intercomparison Project (CMIP). Les simulations que nous utilisons couvrent la période historique (1850-2006 lors du dernier exercice), et sont étendues sur le reste du 21ème siècle par des scénarios climatiques (dans notre cas, RCP8.5). L'influence humaine y apparaît donc progressivement ; on

parle de simulations transitoires. L'exemple d'une telle simulation est fourni sur la Figure 3.1.a. pour le modèle CNRM-CM5.

Le nombre de simulations fournies par un modèle est en général très limité (5 pour CNRM-CM5, cf. figure 3.1), ce qui interdit, par exemple, d'évaluer la probabilité qu'une canicule survienne en 2003 à partir des seules données de l'année 2003. En revanche, en supposant que le climat change progressivement dans le temps (et avec les émissions anthropiques de gaz à effet de serre), on peut réaliser une estimation beaucoup plus précise, qui tire parti des données disponibles pour les années antérieures et postérieures, ainsi que de l'évolution dans le temps de la variable étudiée. C'est l'objet des techniques non-stationnaires.

Description de la méthode

La méthode proposée peut se décomposer en plusieurs étapes :

1. Choisir un indicateur de référence permettant de rendre compte de l'amplitude de la perturbation anthropique et de son évolution dans le temps. On note x_t cet indicateur. Plusieurs choix sont possibles, e.g. la température moyenne globale – les indicateurs de type température sont généralement privilégiés car ils offrent un bon rapport signal sur bruit. L'étude de la canicule européenne de 2003 étant la principale illustration de cette section, nous avons choisi une température moyenne estivale sur l'Europe comme indicateur.
2. Estimer la distribution statistique (non-stationnaire) des événements extrêmes, en utilisant l'indicateur x_t comme co-variable. Pour faire cette estimation, nous avons considéré plusieurs types de distributions paramétriques - l'utilisation de l'une ou l'autre dépend du type d'événement considéré (variable, durée, etc.) :

* Gaussien (adapté pour des événements « longs », i.e. une saison ou une année)

$$y_t \sim N(\mu(t), \sigma^2(t)), y_t \sim N(\mu(t), \sigma^2(t)). \quad (1)$$

$$\mu_t = \mu_0 + \mu_1 x_t, \mu_t = \mu_0 + \mu_1 x_t, \quad (2)$$

$$\sigma_t = \sigma_0 + \sigma_1 x_t, \sigma_t = \sigma_0 + \sigma_1 x_t \quad (3)$$

* GEV (adapté pour l'étude de maxima annuels)

$$y_t \sim GEV(\mu(t), \sigma(t), \xi), y_t \sim GEV(\mu(t), \sigma(t), \xi), \quad (4)$$

avec (2) et (3) inchangées,

* GPD (adapté pour décrire les dépassements d'un seuil élevé)

$$y_t | y_t > u(t) \sim GPD(\mu(t), \sigma(t), \xi), y_t | y_t > u(t) \sim GPD(\mu(t), \sigma(t), \xi), \quad (5)$$

avec (2) et (3) également inchangées.

On autorise ainsi la distribution des événements extrêmes à changer en localisation (μ) et variance (σ) en fonction de l'indicateur x_t . Dans les cas GEV et GPD, cependant, le paramètre de forme, qui décrit l'intensité des plus forts extrêmes, est supposé constant. Il s'agit d'une hypothèse courante dans la littérature, ses variations sous l'effet du changement climatique étant incertaines et particulièrement difficiles à estimer. L'estimation des paramètres de ces distributions (i.e. μ_0 , μ_1 , σ_0 , σ_1 et éventuellement ξ) est faite par maximum de vraisemblance, à partir d'outils déjà existants.

3. Distinguer les contributions anthropiques et naturelles dans l'évolution temporelle de l'indicateur. En effet, les simulations utilisées prennent en compte tous les forçages externes connus ; l'indicateur x_t inclut donc la réponse aux forçages anthropiques et naturels. Afin de quantifier l'influence humaine, il est donc nécessaire de décomposer

$$x_t = x_t^{ANT} + x_t^{NAT}. x_t = x_t^{ANT} + x_t^{NAT}.$$

Afin d'estimer les termes ANT et NAT, nous utilisons des modèles très simplifiés dits de bilan d'énergie (EBM), ainsi que les estimations des forçages radiatifs utilisées dans le rapport du GIEC. On suppose notamment que la réponse de l'indicateur choisi x_t aux forçages naturels est bien décrite par la réponse d'un EBM à l'échelle globale. Plusieurs approches ont été étudiées pour estimer x^{ANT} (il s'agit d'un point délicat) ; la technique illustrée ci-dessous autorise une certaine déformation de la réponse d'un EBM global. Cette décomposition est illustrée sur la figure 3.1.

4. Calculer la probabilité d'occurrence de l'événement (ou symétriquement, l'intensité de l'événement pour une probabilité donnée) dans les mondes factuel (p_1) et contrefactuel (p_0), puis en déduire la fraction de risque attribuable (FAR)

$$FAR = \frac{p_1 - p_0}{p_1} = 1 - \frac{p_0}{p_1}.$$

Le FAR est souvent utilisé pour quantifier l'importance de l'influence humaine, car il fournit la fraction du risque actuel (p_1) imputable aux activités humaines ($p_1 - p_0$). Ses promoteurs argumentent notamment que, dans une logique économique, il indique la part des dommages causés par l'homme. Néanmoins, il peut s'agir d'une quantité négative si $p_1 < p_0$. On peut donc préférer se concentrer sur le risque relatif p_1 / p_0 . La figure 3.2 illustre le calcul de ces quantités.

5. Évaluer les incertitudes sur le diagnostic final (e.g. FAR ou variation de l'intensité de l'événement). Il s'agit de nouveau d'une étape délicate. La procédure que nous proposons repose sur une technique de ré-échantillonnage par « bootstrap », dont plusieurs variantes ont été testées. Néanmoins, différents tests indiquent une sous-estimation des incertitudes :

la probabilité réelle qu'un intervalle de confiance à 90 % contienne la bonne valeur est inférieure à 90 %. Ce type de sous-estimation a été observé pour les différentes variantes testées.

Illustration de la méthode

Nous avons choisi la canicule Européenne de 2003 comme principale illustration. Plusieurs raisons ont motivé ce choix. Primo, il s'agit de l'un des événements majeurs ayant affecté la France au cours des dernières décennies, tant du point de vue de sa rareté que du point de vue des impacts. Secundo, cet événement a été déjà étudié par plusieurs autres études ce qui autorise une comparaison, utile pour évaluer une nouvelle méthode. Tertio, l'empreinte anthropique est plus facile à mettre en évidence sur la variable température et les événements extrêmes associés (canicules), ce qui est également souhaitable pour évaluer une méthode.

L'événement « Canicule Européenne de 2003 » peut être envisagé et défini de plusieurs façons. Nous retenons ici la définition utilisée par la première étude d'attribution à avoir étudié cet événement (Stott et al., 2004 ; ci-après SSA04), à savoir une température moyenne dépassant de plus de 1,6°C la température moyenne de la période 1961-1990, sur l'ensemble des 3 mois d'été (juin-juillet-août), et sur une vaste région couvrant l'ouest de l'Europe et la Méditerranée. Ce seuil est illustré figure 1. D'autres études (mais pas d'étude d'attribution à notre connaissance) ont considéré une période beaucoup plus courte (environs 10 jours), par exemple à l'échelle de la France. Le fait d'utiliser une définition « grande échelle » n'est pas neutre car cela tend à renforcer l'importance relative du changement climatique anthropique.

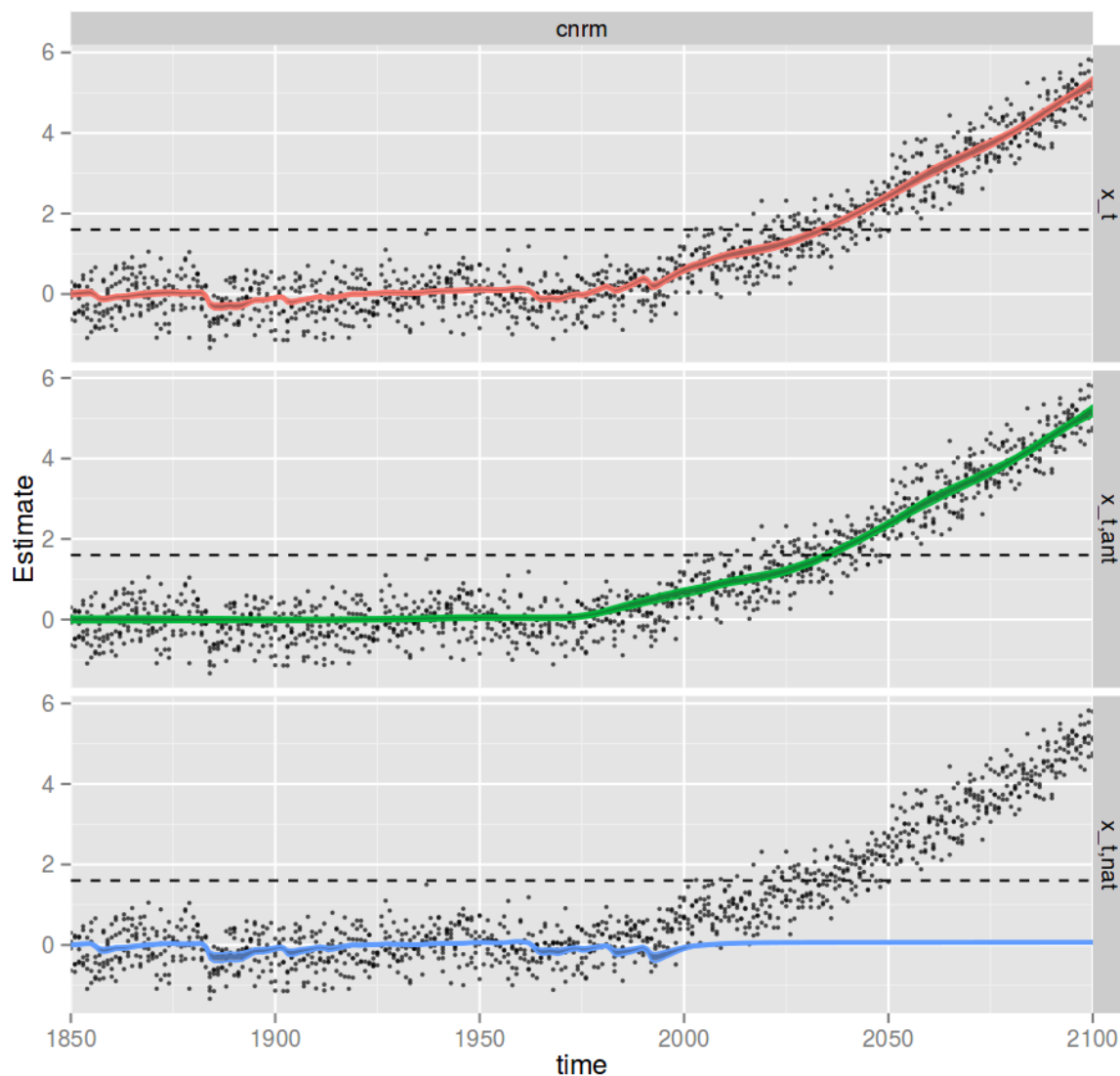


Figure 1 : Contributions naturelle et anthropique aux variations de température moyenne estivale sur l'Europe. Points noirs : Températures (°C) moyennes estivales (Juin-Juillet-Août) simulées par le modèle CNRM-CM5 (5 membres) sur la période 1850-2100 en réponse aux forçages historiques (période 1850-2005) puis sous l'hypothèse du scénario RCP8.5 (période 2006-2100), représentées comme écarts à la moyenne 1961-1990. Courbe rouge : réponse estimée à l'ensemble des forçages externes. Courbe verte : réponse estimée aux forçages anthropiques. Courbe bleue : réponse estimée aux forçages naturels. Ligne pointillée noire : seuil de 1,6°C d'anomalie utilisé pour définir l'événement de 2003.

La figure 2 montre, pour l'événement ainsi défini, l'évolution temporelle des probabilités d'occurrence dans le monde factuel (p_1) et contrefactuel (p_0) – il s'agit de l'un des avantages de cette méthode, dans la mesure où l'approche standard ne fournit pas d'évolution temporelle, mais seulement une photographie à une date fixée. La probabilité p_0 (en l'absence de toute influence humaine) demeure petite sur l'ensemble de la période, avec des variations principalement pilotées par les principales éruptions volcaniques (e.g. Krakatoa vers 1880). En 2003, cette

probabilité est de l'ordre de $1/10.000$. L'évolution de p_1 est très différente (bien noter la différence d'échelle en ordonnée), car sous l'effet de l'influence humaine, la température moyenne estivale devient nettement plus chaude que le seuil de $1,6^\circ\text{C}$ dans le courant du 21ème siècle, de sorte que la probabilité d'avoir un été « au moins aussi chaud » que 2003 est quasi-égale à 1 en fin de période (événement quasi-certain). Cette probabilité est de l'ordre de quelques pourcents en 2003. A noter que p_1 montre, comme p_0 , des variations rapides avant 2000, mais elles ne sont pas visibles sur cette échelle.

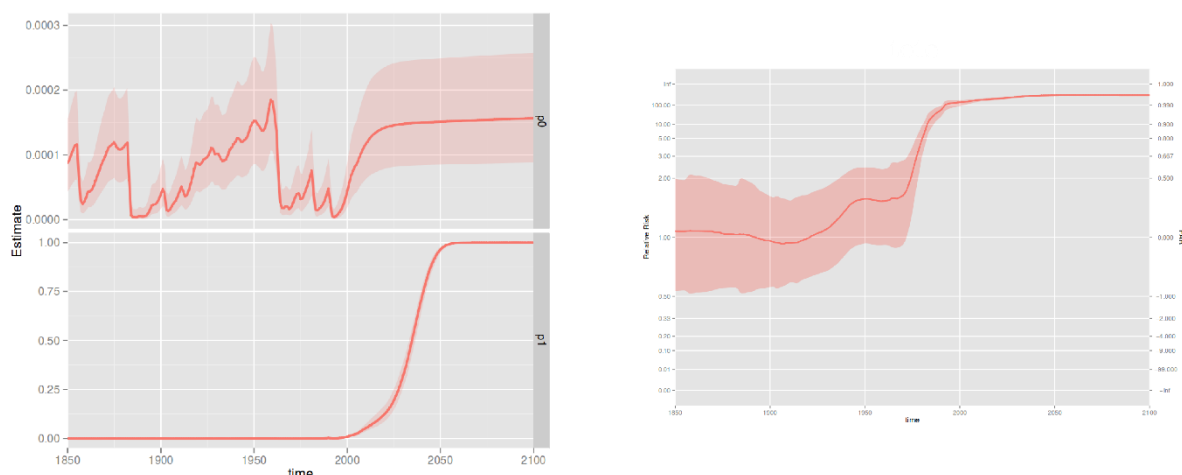


Figure 2 : Illustration des principaux résultats de la méthode non-stationnaire sur le cas de la canicule Européenne de 2003, analysée ici via les données du modèle CNRM-CM5. Gauche : évolution temporelle (1850-2100) de la probabilité d'occurrence de l'événement dans le monde contre-factuel (i.e. sans perturbation anthropique, en haut) et dans le monde factuel (i.e. tous forçages externes, en bas). La région de confiance à 90 % est surlignée en rouge. Noter la différence des échelles en y - p_0 varie entre 0 et 3‰, alors que p_1 varie entre 0 et 1. Droite : Evolution temporelle du risque relatif (axe de gauche) et du FAR (axe de droite) sur la même période.

Le FAR et le risque relatif évoluent relativement peu au cours du début de la période, jusqu'aux années 1970. Le FAR, en particulier, demeure cohérent avec 0 (i.e. 0 est dans l'intervalle de confiance). Il devient ensuite très positif (risque relatif largement supérieur à 1), lorsque la composante anthropique du réchauffement devient substantielle (cf. figure 3.1). En 2003, le FAR estimé par notre méthode et pour le modèle CNRM-CM5 est de l'ordre de 99 %, ce qui indique un événement environ 100 fois plus probable avec que sans influence humaine. Ce chiffre est cohérent avec les estimations de p_0 et p_1 décrites précédemment. Il est en revanche beaucoup plus grand que le FAR estimé par SSA04 – environ 75% - la différence portant plus sur l'estimation de p_0 ($1/10000$ contre $1/1000$) que sur celle de p_1 ($1/100$ contre $1/250$). Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces différences : plus grande variabilité (donc plus grand p_0) dans le modèle utilisé par

SSA04, contribution plus faible du réchauffement anthropique, différences méthodologiques, notamment utilisation d'une hypothèse de distribution Gaussienne des données qui peut sous-estimer la probabilité de valeurs rares. Les deux approches s'accordent au moins (qualitativement) sur le fait qu'une fraction importante du risque est due à l'influence humaine.

Parmi les avantages de notre méthode se trouve la possibilité de l'appliquer à tous les modèles de la communauté ayant participé à CMIP5. Cette possibilité est illustrée Figure 3, en termes de FAR, pour un échantillon de 17 modèles CMIP5. Ces modèles montrent des comportements très différents, notamment au cours du XXème siècle. Les résultats sont plus cohérents en fin de période, où tous les FAR sont supérieurs à 90 % - les différences qui subsistent sont liées à l'incertitude sur la valeur de p_0 , p_1 étant proche de 1 pour tous les modèles.

Ce résultat peut être interprété de plusieurs façons. Un premier point de vue consiste à dire que les modèles présentent des comportements très variés, et incohérents les uns avec les autres (les intervalles de confiance étant disjoints). Une part importante de cette dispersion est liée au fait que l'amplitude du réchauffement moyen simulé par ces modèles en 2003 est très variable, et parfois incohérent avec les observations – en lien avec une sensibilité aux aérosols également très variable. Un second point de vue consiste à remarquer que, si chaque modèle est considéré comme plausible, le FAR en 2003 est compris entre 80 % et 99.9 %, soit dans une fourchette beaucoup plus large qu'avec un seul modèle. Une approche prudente peut consister à retenir ce résultat plutôt que la réponse d'un seul modèle.

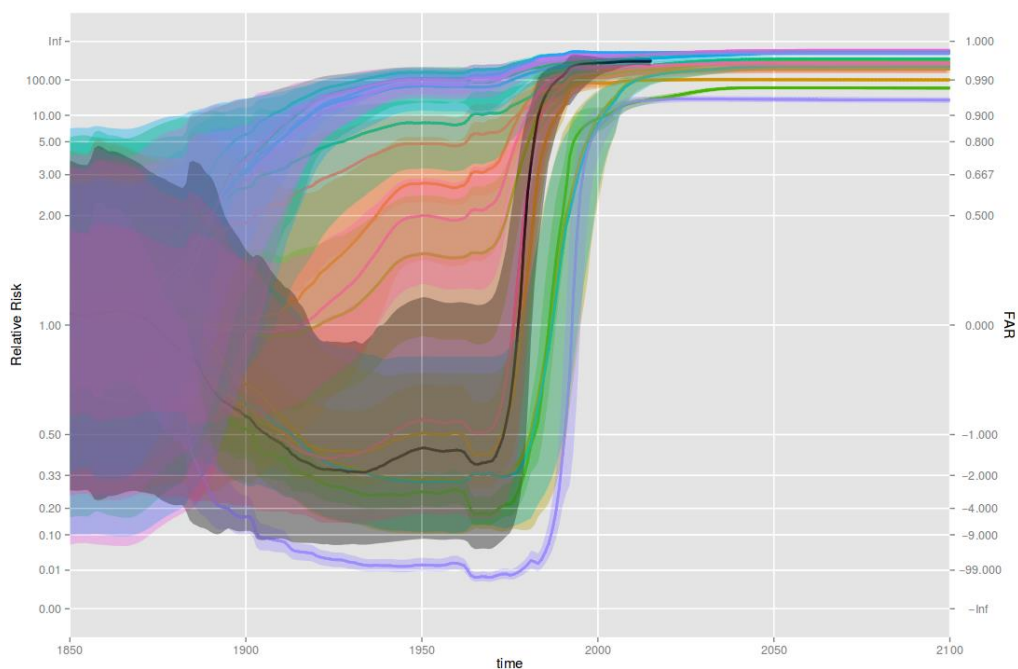


Figure 3 : Évolution du FAR et du risque relatif sur la période 1850-2100 pour 17 modèles de l'ensemble CMIP5 (couleurs). Une estimation basée sur les seules observations, avec la même méthode est illustrée en noir.

Limites et perspectives

Les travaux exploratoires menés dans le cadre d'Extremoscope en vue de la mise au point d'une nouvelle méthode d'attribution d'événements sont très encourageants, dans la mesure où la méthode proposée présente de nombreux avantages : coût de mise en œuvre limité, application possible à de nombreux modèles, et description de l'évolution du risque dans le temps - y-compris pour le futur - ce qui autorise une meilleure appréhension du risque.

Plusieurs aspects doivent cependant être approfondis avant de pouvoir disposer d'un système utilisable de façon systématique. Les points (techniques) en suspens portent notamment sur la séparation des contributions naturelles et anthropiques dans l'indicateur utilisé, et le traitement des incertitudes (par exemple en termes d'intervalle de confiance sur le FAR).

Un autre aspect important concerne les rôles joués respectivement par les modèles et les observations dans une procédure d'attribution d'événements. Dans la méthode actuelle, les observations n'interviennent que pour définir l'événement. La réponse en terme de FAR est uniquement liée au comportement du modèle, lequel peut simuler un changement irréaliste (par exemple, et en caricaturant, un réchauffement de 2°C là où les observations n'indiquent que 1°C). Une évolution importante consisterait à conditionner la réponse des modèles par le réchauffement effectivement observé. Une façon simple pourrait consister à estimer uniquement les paramètres de la non-stationnarité, i.e. μ_1 et σ_1 via les modèles, en estimant les autres paramètres (μ_0 et σ_0) à partir des observations.

Enfin, cette méthode ou ses descendantes devront être appliquées sur un éventail de cas beaucoup plus large avant de pouvoir les utiliser à des fins opérationnelles, de communication à destination du grand public ou comme service climatique plus ciblé.

3.1.4 Analyse directe d'un ensemble de projections climatiques

Une méthode plus directe consiste à faire l'hypothèse que le climat est stationnaire sur une période de temps (de 20 ou 30 ans), et de regarder les évolutions des probabilités d'extrêmes (GEV par exemple) ajustées sur les simulations sans co-facteur. Ainsi il est possible d'estimer les changements de risques entre 2 périodes de temps climatiques. Cela peut porter par exemple sur une période passée (préindustrielle), ou plus récente, en comparaison de la période climatique « actuelle ». Nous utiliserons cette approche, simple à mettre en œuvre, de façon assez systématique pour les études de cas (section 3.3), en utilisant un jeu de données issu de 10 simulations EURO-CORDEX à haute résolution (12 km) avec des combinaisons de modèles globaux-régionaux, avec ajustement des biais en utilisant la méthode CDFt (Vrac et al., 2016). L'ajustement des biais a un caractère artificiel, mais permet d'avoir un jeu de simulations. L'avantage de ces simulations est la meilleure représentation des pluies extrêmes (Prein et al., 2016). Comme certaines simulations démarrent autour de 1970, nous utiliserons pour période

passée la période 1971-2000 et pour période « actuelle » 2001-2030 pour chaque modèle.

Pour chaque période, la probabilité de dépassement d'un seuil est calculée en utilisant $30 \times 10 = 300$ ans de simulation, et les valeurs de retour estimées en fonction des périodes de retour, afin d'étudier les changements de risques.

3.1.5 Méthodes d'analogues

La méthode des analogues de circulation est utilisée pour estimer la probabilité conditionnelle (à la circulation) d'un événement comme un dépassement de seuil de température ou de précipitation. Il est important que la variable climatique locale à laquelle on s'intéresse dépende de la circulation à grande échelle, sinon la méthode ne peut pas être utilisée.

On se focalise sur les structures de la circulation atmosphérique, via la pression au niveau de la mer (SLP) ou le géopotentiel à 500hPa (Z500). Pour un jour j d'une année donnée, on dispose du champ atmosphérique à grande échelle (par exemple l'Atlantique Nord). On cherche les jours d'autres années qui minimisent la distance au champ atmosphérique du jour j . Les $N=30$ jours qui réalisent les plus petites distances au champ atmosphérique (SLP ou Z500) sont les N analogues. Cette opération est effectuée pour chaque jour.

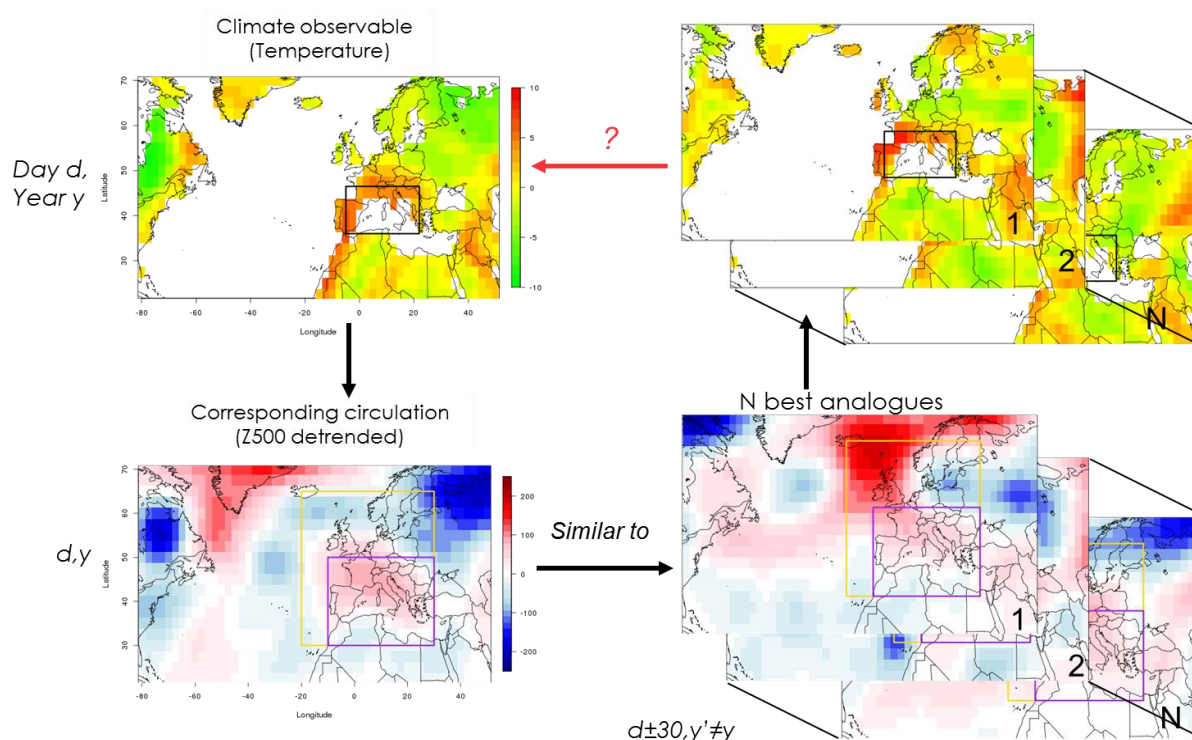


Figure 4 : résumé de la procédure de calcul et interprétation des analogues de circulation. D'après Jézéquel et al. (soumis).

Pour le jour j et ses N analogues atmosphériques, on possède le champ ou une valeur locale de température ou précipitation. Les N valeurs de température (ou

précipitation) sont qualifiées de « copies » (au sens statistique) de la valeur de température du jour j . L'objet de l'étude des analogues est d'examiner comment les statistiques des copies approximent celles des valeurs observées. La recherche d'analogues et la comparaison à un champ de température sont illustrées dans la Figure 4 ci-dessus.

L'intérêt de cette approche est de pouvoir déterminer des meilleurs analogues de circulation dans plusieurs bases de données de champs atmosphériques, par exemple un jeu factuel et un jeu contrefactuel, ou les dernières décennies à comparer à celles du début du 20ème siècle, ou des simulations numériques du présent et du futur.

La durée de la classe d'événement qu'on analyse est typiquement de l'ordre du mois ou de la saison, par exemple une vague de chaleur (voir les études de cas 4 et 5 sur l'été 2015 et le mois de décembre 2015) ou des précipitations intenses pendant une saison. En pratique, il vaut mieux exclure des événements de très courte durée (orages convectifs en été) qui ne sont pas nécessairement liés à la circulation à grande échelle ou sa persistance, mais à des phénomènes physiques locaux qu'on ne peut pas approximer par les analogues de circulation.

On peut estimer la densité de probabilité conditionnelle à la circulation d'une variable climatique en faisant des expériences de Monte-Carlo sur les analogues de circulation d'un événement. Cette procédure justifie a posteriori la nécessité de considérer des événements qui durent plusieurs semaines, afin d'obtenir une inférence statistique raisonnable.

Dans ce cas, on compare des densités de probabilité d'un seuil (de température ou de précipitation) à une circulation atmosphérique fixée (proche de celle qui a conduit à un événement observé). Ceci donne une approximation de la contribution thermodynamique d'un changement climatique à la probabilité d'observer un événement.

3.1.6 Contributions dynamiques et thermodynamiques

La contribution thermodynamique du changement climatique au changement de probabilité d'observer un événement extrême est liée à l'augmentation moyenne de la température, qui augmente la probabilité d'avoir une vague de chaleur ou bien la teneur en eau de l'atmosphère (via la relation de Clausius-Clapeyron). Cette contribution peut être estimée avec une méthode d'analogues de circulation : on examine le changement de probabilité conditionnelle à la circulation atmosphérique d'une variable climatique (température mensuelle ou cumul mensuel de précipitation), comme cela a été expliqué plus haut.

La contribution dynamique constitue quant à elle la part des changements de probabilités de dépassement d'un seuil liée aux modifications de la circulation atmosphérique induits par le changement climatique. Cette contribution peut aussi être estimée par des analogues de circulation, mais sur de grands ensembles de simulation, afin d'avoir un échantillon statistiquement représentatif de toutes les

circulations possibles, dans des mondes factuels et contrefactuels. On estime alors cette contribution en comparant les probabilités de seuils obtenues à partir des analogues factuels de chaque circulation du monde factuel avec celles obtenues à partir des analogues factuels de chaque circulation du monde contrefactuel. Cela permet de ne pas changer les relations circulation-dépassement tout en changeant les circulations factuelles en contrefactuelles. Ces méthodes, appliquées à de grands ensembles, ont été expliquées dans (Vautard et al., 2016), et appliquées à un cas du projet EUCLEIA (cumuls mensuels sur la Grande Bretagne du Sud en Janvier 2014). Nous avons pu montrer que pour cet épisode, les changements de circulation expliquent environ 30% des changements de probabilités de dépassement des valeurs observées dans le modèle HadAM utilisé par l'Université d'Oxford (Schaller et al., 2016).

3.1.7 Simulations régionales à haute résolution

Enfin une dernière méthode d'attribution a été développée, utilisant le conditionnement par la circulation. Elle permet d'examiner les changements d'amplitude de pluies ou températures extrêmes étant donné une circulation atmosphérique, pour différentes conditions. Au lieu d'utiliser les analogues, le principe consiste ici à réaliser une simulation d'un modèle de climat régional pour les conditions actuelles et une simulation avec des conditions contrefactuelles. La région considérée est l'Atlantique Est et l'Europe. L'environnement contrefactuel des simulations est réalisé en supposant que le signal anthropique est uniquement inclus dans les températures de surface de l'océan, et dans la composition atmosphérique. Afin de simuler l'incertitude sur ce signal, comme dans Schaller et al. (2016), nous retirons en fait les différences de SST obtenues à partir de 11 simulations CMIP5 entre le préindustriel et l'actuel. Cela donne un ensemble de 11 simulations contrefactuelles. En plus, ces simulations étant relativement peu coûteuses, il est également possible d'explorer l'incertitude en utilisant plusieurs combinaisons de schémas physiques.

Afin de « contrôler » l'écoulement, un guidage, ou « nudging » de type spectral est utilisé afin de guider les simulations vers les vents ré-analysés en altitude (au-dessus de la couche limite).

Dans les exemples ci-dessous nous avons utilisé plusieurs schémas de la microphysique et de la convection. Pour chaque schéma, ou combinaisons de schémas, une simulation de contrôle et 11 simulations contrefactuelles sont effectuées. Ensuite les simulations de contrôle qui ne représentent pas bien l'événement sont écartées et les simulations plus fidèles sont conservées.

3.2 Développements d'indicateurs et diagnostics pour l'interprétation

3.2.1 Introduction

Afin de placer un événement ponctuel dans le cadre du changement climatique il est nécessaire d'avoir une mesure de l'événement permettant de mesurer son

intensité, ou sa durée. Cela permet notamment de construire les probabilités de dépassement de seuils pour l'indicateur. Le problème est que bien souvent nous souhaitons prendre un indicateur différent à chaque modèle. Dans l'ensemble des cas d'étude réalisés sur les pluies extrêmes, par exemple, nous avons à faire à des phénomènes assez différents : un cas de pluies répétées sur un mois voire une saison sur la Bretagne, des pluies extrêmes journalières sur une autre région (Cévennes), ou bien des pluies abondantes sur trois jours d'affilée sur le centre de la France. Des cumuls sur différentes périodes, saisons, et régions sont ainsi utilisés. Pour certains extrêmes comme les vagues de chaleur, il est aussi intéressant de caractériser la durée de l'événement.

Enfin, il est également intéressant de développer des diagnostics associés aux extrêmes que nous rencontrons, afin de mieux comprendre leur origine. Cette section contient l'ensemble des types d'indicateurs et diagnostics utilisés au cours du projet.

La stratégie suivie a été d'une part de déterminer de façon théorique la liste des indicateurs et diagnostics à mettre en œuvre et d'autre part de travailler directement sur plusieurs cas d'étude récents pour se mettre « en situation » avec les indicateurs pertinents. Les indicateurs ont été déterminés par une mise en cohérence des approches menées dans le cadre de la recherche et dans le cadre du suivi climatique opérationnel. En particulier, les indicateurs relevant d'une approche événementielle, peu utilisés à ce jour pour les projections climatiques, ont été mis en avant pour faire ce lien entre climat passé, présent et futur : vagues de chaleur notamment.

3.2.2 Indicateurs statistiques permettant de situer l'événement par rapport aux climats passé, présent et projeté.

Un travail d'identification des indicateurs a été réalisé. Un indicateur est défini ici comme une fonction d'un champ d'une ou plusieurs variables climatiques pouvant être calculée à partir d'observations ou de sorties de modèles de climat. L'indicateur peut contenir une moyenne spatiale ou temporelle, ou toute autre statistique. Ces indicateurs ont vocation à être calculés de façon automatisée au-delà du projet, afin de fournir des éléments d'interprétation des événements extrêmes, pour les 4 types d'événements considérés dans le projet, dans un cadre climatique (mécanismes physiques, rôle des facteurs humains ou naturels, ...). Ils s'appuient sur l'expérience opérationnelle et les travaux existant de la DCSC à Météo-France et complètent la liste d'indicateurs d'extrêmes choisis pour la base DRIAS (<http://www.drias-climat.fr/decouverte/carte/experience?region=SAFRAN&generation=rcp>). Avant de décrire les indicateurs eux-mêmes, il convient de définir le cadre spatio-temporel à la base de ces indicateurs.

Dans l'ensemble des études rapportées ici, nous distinguons selon les cas trois échelles de temps :

- l'échelle journalière (pointe, record) ; interviennent l'intensité et l'échelle spatiale du phénomène
- l'échelle d'un épisode de quelques jours à une saison ; s'ajoutent alors la durée, l'intensité moyenne ou maximale sur la durée de l'événement, la possibilité de plusieurs événements sur une région mais pas nécessairement au même endroit exactement
- l'échelle saisonnière (voire annuelle) ; interviennent l'intensité moyenne (c'est à dire la valeur de l'anomalie) à différentes échelles spatiales, la fréquence d'événements au cours de la saison (ex jours chauds/froid, précipitations dépassant un seuil, jours sans pluie), les min/max, quantiles

Les échelles spatiales de calcul des indicateurs correspondent quant à elles à 4 catégories différentes :

- La **période de référence** pour définir les statistiques, comparer modèles et observations. Le choix est de la période **1981-2010** pour rester conforme aux recommandations OMM et pratiques opérationnelles. Pour les simulations, cette période sera obtenue en concaténant la période historique de 1981 à 2005 avec la période 2006-2010 issue du scénario RCP8.5 par défaut, RCP4.5 sinon.
- Le **Climat actuel** est, par choix, défini comme la période de 30 ans entourant approximativement l'année 2015. La période retenue est donc **2001 – 2030** en agrégeant 2001 – 2005 période « historique », au sens CMIP5, et 2006 – 2030 RCP4.5 ou RCP8.5 ou les deux. Cette période permettra notamment de calculer les risques « actuels » d'événements extrêmes.
- Le **Climat futur** est défini pour deux périodes : le futur **proche** : 2021 – 2050 et la **fin de siècle** : 2071 – 2100.

Indicateur thermique

Plusieurs études de cas analysées au cours du projet correspondent à des événements de fortes chaleurs étendus à l'ensemble du territoire national. La caractérisation de ces événements par rapport au climat passé peut dès lors tirer parti du calcul de l'indicateur thermique national développé à Météo-France pour des applications de suivi climatique. Cet indicateur est calculé en faisant la moyenne de la température journalière moyenne de 30 stations réparties sur l'ensemble du territoire métropolitain. Les stations ont été choisies en fonction d'un critère d'homogénéité des données sur la période de temps la plus étendue possible, couvrant la période de 1948 à nos jours. Des déclinaisons en 6 grandes régions de cet indicateur regroupant chacune 4 stations sont également disponibles et ont été exploitées dans le cadre du projet.

Indicateurs d'extrêmes

Les indicateurs d'extrêmes sélectionnés sont résumés dans la Table 1. De façon générale, le projet Extremoscope a accordé une grande importance à la qualité, la pertinence des données passées et leur cohérence avec les données de projections climatiques pour y adosser des diagnostics particulièrement sensibles sur les évolutions climatiques : les analyses sur les séries locales s'appuieront de préférence sur les Séries Quotidiennes de Référence (SQR) de Météo-France identifiées à l'issue des travaux de contrôle et d'homogénéisation ; les analyses spatiales utiliseront la ré-analyse SAFRAN, produit opérationnel éprouvée en matière de suivi climatique et base de référence pour la correction des projections en climat futur.

Un autre élément essentiel dans le projet a été d'identifier les indicateurs événementiels permettant de caractériser à une échelle spatiale donnée la survenue d'un événement, sa date de début, de fin, son intensité maximum et sa sévérité, avec la capacité de qualification à l'identique en climat passé et futur. Ces indicateurs sont surlignés en jaune dans le tableau ci-dessous. Tous les indicateurs n'ont pas été utilisés dans les études de cas ci-dessous.

Événements / Echelle temporelle	Echelle journalière	Episode intra-saisonnier	Saison
Vagues de chaleur et de froid	Quantile de température associé au jour même, pour Tmax, Tmin et Tmoy, prenant en compte la saisonnalité - sur chaque station SQR - en moyenne régionale - en moyenne nationale	Durée de Tmax et Tmoy au-dessus (Tmoy et Tmin en dessous) d'un seuil (90 ^e /95 ^e quantiles, resp. 10 ^e /5 ^e) ou moyenne + 2 fois l'écart type, voir Annexe I - en moyenne régionale - en moyenne nationale	Moyenne saisonnière de la température. - en moyenne régionale - en moyenne nationale
	Temps de retour de l'événement avec les mêmes définitions spatiales	nombre de jours de vague de chaleur (Tmax supérieur aux normales de plus de 5°C durant plus de 5 jours consécutifs) – moyenne régionale et nationale	Fréquence des jours chauds ou froids définis par les 90 ^{ème} et 95 ^{ème} centiles - en moyenne régionale - en moyenne nationale

	Identification d'un événement de vagues de chaleur/froid à partir de données quotidiennes selon 3 seuils (Spic, Sdeb et Sint) définis selon la distribution statistique	« H-facteur » : max de n où sur la période il y a plus de n jours d'anomalies supérieures à n degrés – par station et en max régional	Nombre de jours de Tmax>5°C au-dessus de la normale - par station SQR
		Nombre de points de grille (région, national) au-dessus du 90 ^{ème} ou 95 ^{ème} quantile sur plus de n jours	Nombre de jours de Tmin élevé >5°C au-dessus de la normale - par station SQR
			Nombre de jours de Tmin <-5°C en dessous de la normale - par station SQR
			Nombre de jours de Tmax<0°C - par station SQR
			Nombre de jours de Tmin<0°C - par station SQR
Précipitations intenses	Cumul journalier (stations, max régional de stations SQR)	Cumul sur n jours, n défini en fonction de l'événement (ex n=4 jours pour les pluies varoises de l'hiver 2013-2014 – en max régional	Cumul saisonnier
	Surface régionale de cumul dépassant un seuil absolu (40 à 150 mm) ou statistique (P95, p99)		Quantile du cumul saisonnier en chaque station, en moyenne régionale – par station SQR, en max régional
	Volume régional de cumul dépassant un seuil absolu (40 à 150mm) ou statistique (P95, p99)		Nombre de jours de précipitations intenses (40mm, 100mm, 150mm)

			Nombre d'épisodes de précipitations intenses (40mm, 100mm, 150mm)
Sécheresses : météorologiques et des sols		Standard Precipitation Index (SPI) au pas mensuel sur série locale, indicateur agrégé Safran ou % du territoire affectée par la sécheresse (seuil durée de retour 10 ans)	Standard Precipitation Index (SPI)
		Standardized Soil Wetness Index (SSWI) au pas décadaire et mensuel à partir d'un indicateur agrégé SIM ou % du territoire affectée par la sécheresse (seuil durée de retour 10 ans)	Standardized Soil Wetness Index (SSWI)
		Identification d'un événement selon la surface du territoire en sécheresse de durée de retour au moins décennale (pas de temps décadaire)	

Table 1: Indicateurs sélectionnés avec en couleur rouge les indicateurs de type événementiel

Des travaux spécifiques ont été menés sur la mise au point d'un indicateur événementiel « universel » sur les vagues de chaleur. Différents quantiles de la distribution statistique des températures ont été testés et évalués sur le climat passé puis appliqués à l'événement de l'été 2015 (Soubeyroux et al., 2016) et en climat futur avec les projections EURO-CORDEX (Ouzeau et al., 2016).

Cet indicateur de vagues de chaleur ainsi défini à partir de seuils statistiques sur la distribution d'une série de température a été appliqué en climat passé (réanalyse safran) et futur (ensemble Eurocordex).

La caractérisation des vagues de chaleur passées à l'échelle nationale et départementale (en termes de date d'occurrences, durée, intensité max, sévérité) a permis de constituer un référentiel opérationnel et évocateur pour les

utilisateurs, facilement mobilisable en temps réel : événements de l'été 2015 et 2016.

La détermination des vagues de chaleur avec l'ensemble EuroCordex a permis d'évaluer la capacité des modèles à reproduire de tels événements sur la période historique et de préciser les incertitudes sur la typologie des vagues de chaleur en France au XXIème siècle, par comparaison aux événements rencontrés dans le passé (notamment août 2003).

Un effort particulier a aussi été porté à la représentation des indicateurs, notamment pour traduire la notion d'événements. L'approche préconisée utilise préférentiellement la représentation tridimensionnelle sous forme de bulle : voir ci-dessous un graphe pour l'inventaire et la projection des vagues de chaleur à l'échelle nationale.

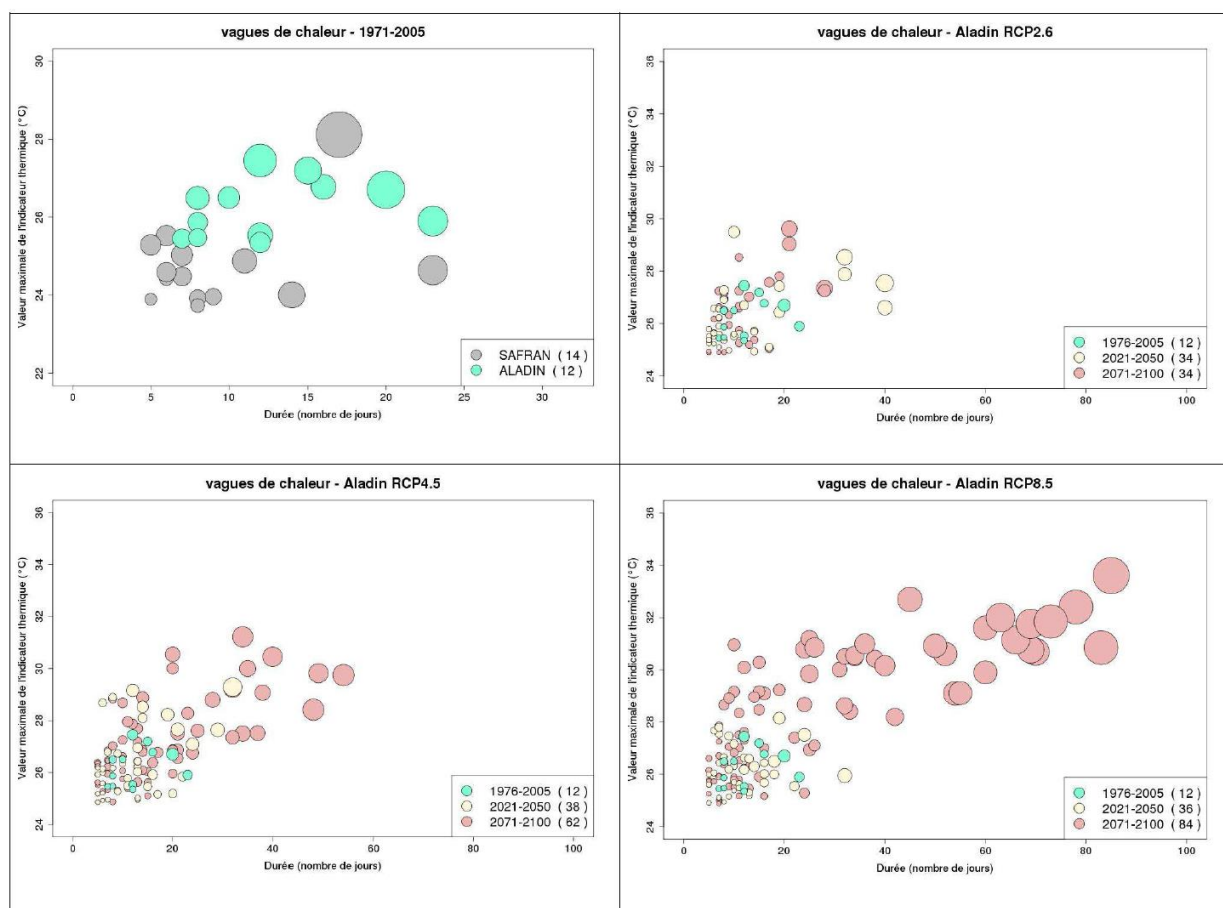


Figure 5 : Représentation de l'évolution projetée des vagues de chaleur en France avec le modèle Aladin Climat en termes de durée (abscisse), d'intensité maximale (ordonnées) et de sévérité (représentée par la taille des bulles): en haut à gauche, comparaison entre la simulation historique et la réanalyse Safran sur la période 1971-2005, en haut à droite projection avec RCP2.6 (en vert la période actuelle 1976-2005, en jaune futur proche 2021-2050, en rouge fin de siècle 2071-2100), en bas à gauche idem avec RCP 4.5, en bas à droite idem avec RCP 8.5.

Indicateurs de circulation atmosphérique

Les indicateurs de circulation atmosphériques entrent dans une catégorie particulière, puisqu'ils ne peuvent pas être mesurés localement ni de façon unidimensionnelle. Ils sous-tendent l'analyse des événements extrêmes du cycle de l'eau ou de la température. Ce sont des indicateurs particulièrement intéressants pour les événements longs (un mois à une saison), car ils permettent de caractériser une situation de circulation atmosphérique persistante occasionnant des impacts.

Un premier indicateur repose sur la notion de « régime de temps ». Les régimes de temps sont des structures de l'écoulement atmosphérique que l'on retrouve « préférentiellement ». Cela signifie soit qu'elles sont plus persistantes soit plus fréquentes, soit les deux. Dans les années 1980, les régimes de temps ont été définis comme les régions de l'« espace des phase » où la trajectoire de l'état atmosphérique aime passer du temps, par exemple au voisinage d'un point fixe du système dynamique (e.g. Legras and Ghil 1985). Ce concept a été ensuite appliqué à des observations par plusieurs approches statistiques. La plus connue est l'analyse en cluster, qui a été appliquée en particulier aux écoulements sur l'Europe et l'Atlantique Nord Est (Michelangeli et al., 1995). L'approche consiste à identifier les écoulements autour desquels on trouve le plus d'écoulements analogues. En général 4 circulations atmosphériques sont retrouvées de façon robuste dans toutes les analyses sur l'Europe, avec des structures différentes selon la saison.

Pour chaque événement extrême, mais aussi de façon continue, il est possible de classer chaque jour dans un des 4 régimes de temps, en regardant simplement la proximité de la circulation du jour à chacun des centroïdes de chaque régime. Le LSCE calcule par exemple les analogues de circulation sur les réanalyses NCEP en temps continu (une fois par semaine). Les résultats des analogues sont déposés sur un serveur DODs, et disponibles sur le site du projet A2C2 de P. Yiou, <https://a2c2.lsce.ipsl.fr/index.php/deliverables/102-continuous-time-weather-regimes>, voir la Figure 6 ci-dessous.

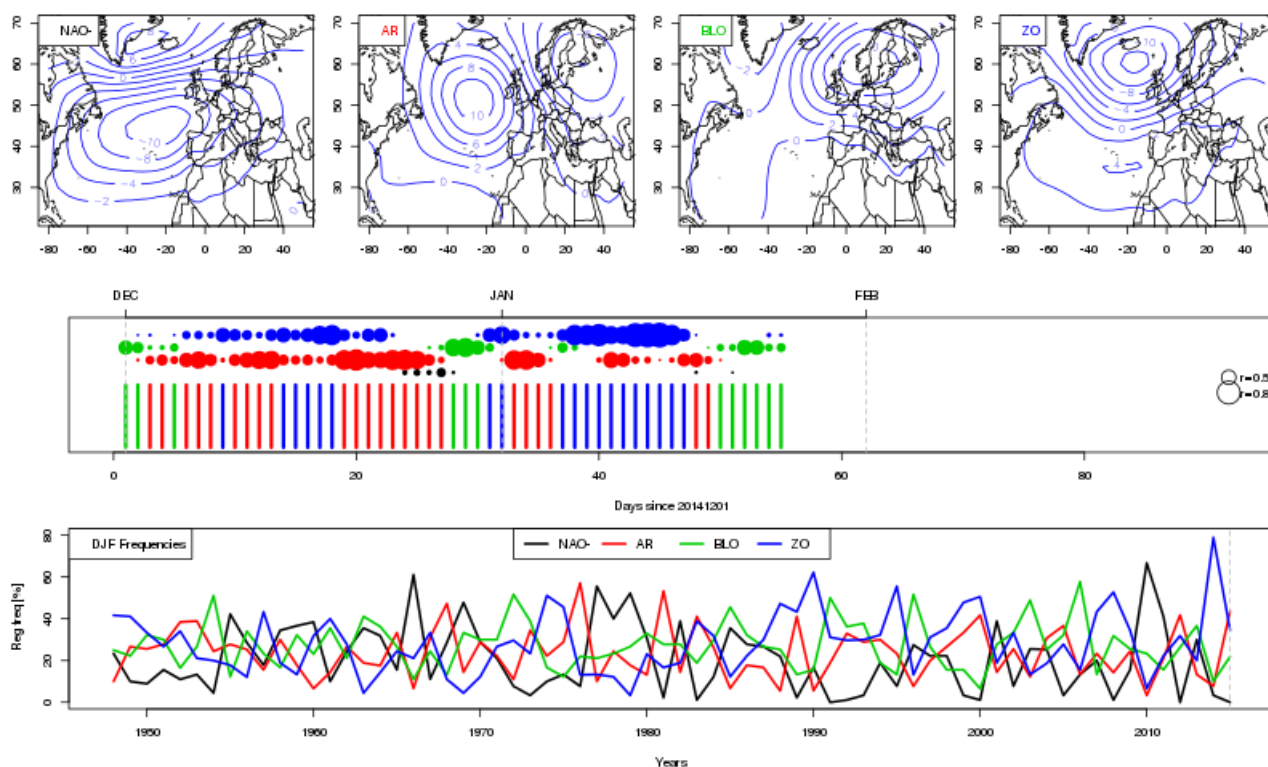


Figure 6: Classification en temps continu de la SLP en quatre régimes de temps. Exemple pour l'hiver en cours. Le panneau inférieur montre les tendances de fréquences de régimes depuis 1948.

Météo-France fait la classification du géopotential à 500mb sur les réanalyses ERA-Interim. Une comparaison visuelle entre les deux approches de régimes de temps a été effectuée: les résultats sont très cohérents. La figure 7 montre par exemple, de deux façons, les régimes quotidiens obtenus sur le mois de décembre 2015, qui a connu la plus forte anomalie de température jamais observée en Europe de l'Ouest (c'est un cas d'étude). On y voit en particulier une dominance du régime « zonal », encore appelé parfois NAO+, (écoulement apportant des masses d'air atlantiques douces).

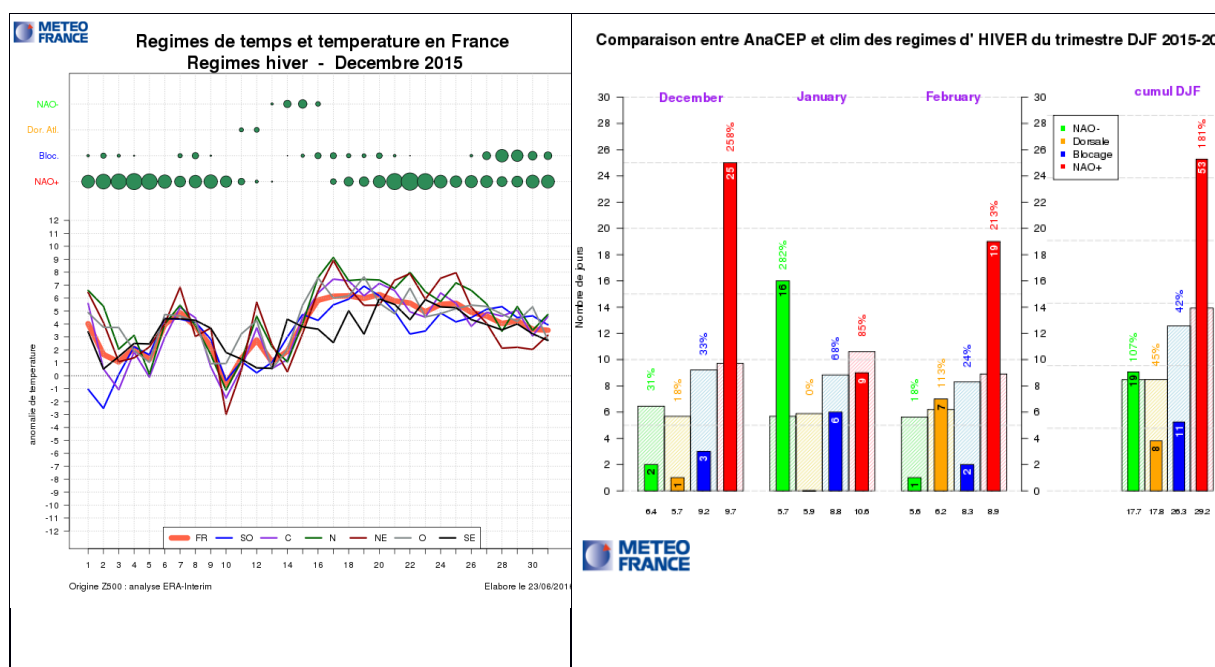


Figure 7 : Indicateurs de régimes de circulation atmosphérique appliqués au mois de décembre 2015 (gauche : régimes de temps quotidien et anomalie de des indicateurs thermiques national et régionaux; droite anomalie de la fréquence mensuelle et trimestrielle des régimes sur l'hiver 2015-2016)

En complément, Météo-France met à disposition dans le cadre du projet un ensemble de produits de caractérisation de la circulation générale calculés en temps réel sur la base de la réanalyse ERA Intérim, mêlant les informations de grande échelle et les conséquences en termes de variable météorologique sur le territoire.

On y trouve :

- des cartes mensuelles et trimestrielles d'analyse et d'anomalie sur différents domaines géographiques et pour différents paramètres (mis à jour en temps réel et disponible sur toute la profondeur de la ré-analyse ERA Intérim soit 1979) (voir Figure 7 à gauche)
- des diagnostics quotidiens mensuels et trimestriels sur les régimes de temps comparés à la climatologie et en regard d'indicateurs de température sur la France (Voir Figure 8)
- des analyses mensuelles en termes de mode de variabilité également mis en regard d'indicateurs de température et précipitation sur la France (Voir Figure 9)

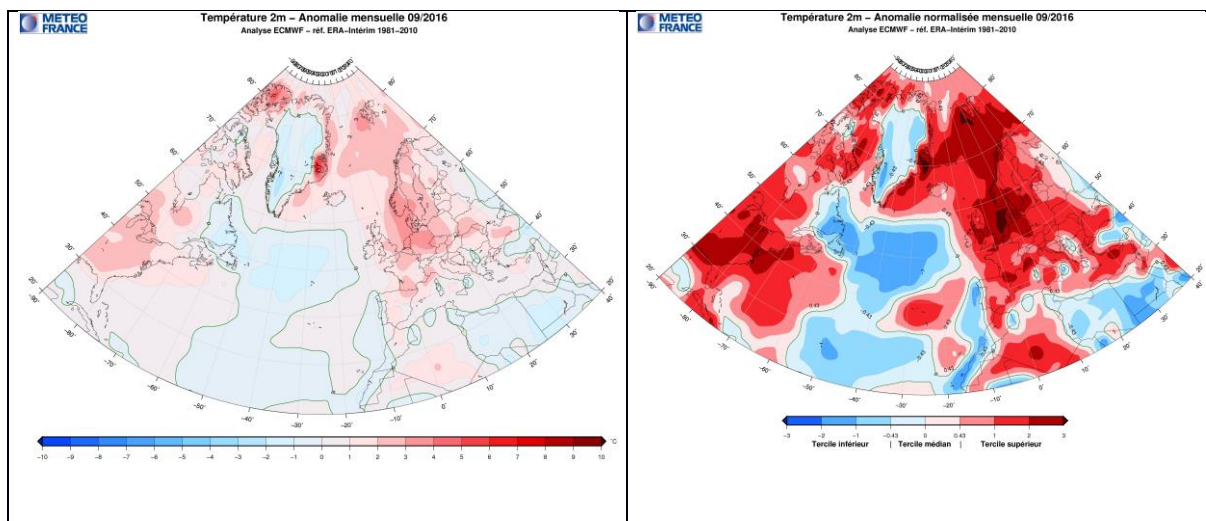


Figure 8 : Indicateurs de grande échelle basés sur l'analyse du modèle du CEPMMT comparée à la réanalyse ERA I à gauche anomalie de température à 2m en septembre 2016, à droite, anomalie normalisée classée en tercile.

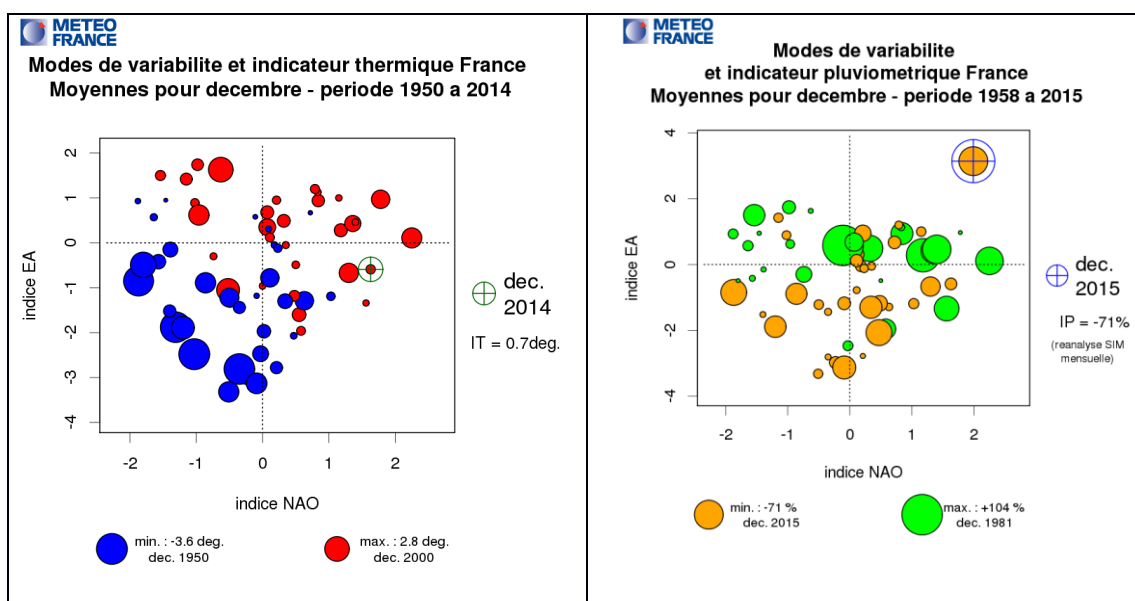


Figure 9 : Modes de variabilité principaux (NAO, Est Atlantique) en décembre 2015 et indicateur thermique France à gauche et indicateur pluviométrique France à droite.

Opérationnalité du calcul des indicateurs

Les indicateurs définis dans le cadre du projet s'appuient en partie sur des outils déjà opérationnels ou expérimentaux utilisés pour le suivi climatique national. Ils sont calculés en temps réel et mis à disposition des partenaires du projet en fonction de leurs besoins. Ainsi, les indicateurs de circulation générale, présentés ci-dessus, sont mis à disposition sur un site extranet géré par Météo-France (voir page ci-dessous).

Les études de cas et de manière générale les travaux réalisés dans le cadre du projet ont aussi vocation à définir de nouveaux indicateurs évalués en commun et à faciliter leur mise en production routinière.



Suivi Climatique

Re-analyses ERA-Interim et analyses opérationnelles du CEPMMT

Cet espace met à disposition des cartes et des diagrammes pour le suivi climatique. Dans un premier temps, ces produits sont élaborés à partir des analyses opérationnelles du CEPMMT, puis recalculés avec les re-analyses ERA-Interim dès qu'elles sont disponibles.

Cartes d'analyse et d'anomalies sur différents domaines et pour : température, précipitations, géopotentiel, pression.

• **Cartes mensuelles**

• **Cartes trimestrielles**

• **Diagrammes diagnostics mensuels et trimestriels**

Occurrence du régime le plus proche comparée à la climatologie.

• **Diagrammes diagnostics quotidiens**

Diagrammes diagnostics des régimes en regard des températures et des précipitations.

• **Modes de variabilité**

Température et précipitations pointées sur un diagramme de modes.

Climatologie

La climatologie utilisée pour calculer les anomalies est élaborée à partir de la ré-analyse Era Interim sur la période 1981-2010 .

• **Cartes mensuelles**

• **Cartes trimestrielles**

Figure 10 : Page d'accueil des indicateurs de suivi climatique, avec la liste des diagnostics proposés

3.2.3 Indicateurs d'analogie

Les indicateurs d'analogie permettent de comparer les événements météorologiques accompagnant une circulation atmosphérique donnée, et de comprendre si pour cette circulation, des changements sont observés dans d'autres variables. Un des cas les plus illustratifs a été celui de l'hiver 2009-2010 (Cattiaux et al., 2010). Pour chaque jour de cet hiver, la circulation atmosphérique a été comparée à des situations analogues au cours des ~60 hivers précédents. Il a été montré que même si l'hiver a été ressenti comme très froid en 2010, il l'aurait été bien davantage avec les températures reconstruites à partir de celles des circulations analogues passées.

Nous avons créé un logiciel de visualisation de ces indicateurs d'analogie (analogue viewer : <https://lsce-datavisgroup.github.io/analogues/>) qui fait partie d'un système

interactif d'analyses sur des données climatiques (flyingpigeon : <https://lsce-datavisgroup.github.io/analogues/>).

Ainsi il est possible d'effectuer :

Un bilan saisonnier des anomalies moyennes de températures, précipitations reconstruites à partir d'analogues de circulation pris dans une période de référence au cours des décennies passées ou dans des simulations futures ; Cela répond au besoin de comprendre à quel point les anomalies de circulation atmosphérique sont responsables des anomalies de temps sensible observées, ou si des tendances de long terme dues à d'autres forçages sont présentes. Par exemple dans le premier cas, aucune dépendance à la période de référence des analogues ne devrait être trouvée. Ces indicateurs sont en développement. Une étude de cas (cf. section 3.3) sur les précipitations de l'hiver 2013/2014 a été effectuée. Pour ce cas, nous avons comparé les précipitations reconstruites à partir d'analogues récents et plus anciens, afin d'évaluer l'effet de l'augmentation de température (à circulation atmosphérique égale) sur la précipitation.

La recherche de circulations atmosphériques analogues à celle de l'événement extrême, afin de déterminer si la circulation atmosphérique est responsable de l'événement extrême ou bien si un autre forçage a joué ; Cela s'applique principalement aux événements extrêmes de court terme (pluies intenses, pointes de chaud ou froid). Cette partie sera développée en 2015, car elle demande le déploiement de bases de données multi-modèles.

La recherche de circulations atmosphériques sans précédent. Cela nécessite en particulier un travail de définition pour bien quantifier ce que « sans précédent » signifie, et de définir et de tester une ou plusieurs métriques permettant de quantifier la distance d'une circulation à l'ensemble des autres ; Cette partie est en cours de développement. Elle demande une recherche fondamentale amont sur des métriques optimales pour comparer des situations météorologiques, pour déterminer la probabilité de retrouver chaque situation. Une étude préliminaire en temps continu montre qu'il y a une grande variabilité de cette probabilité.

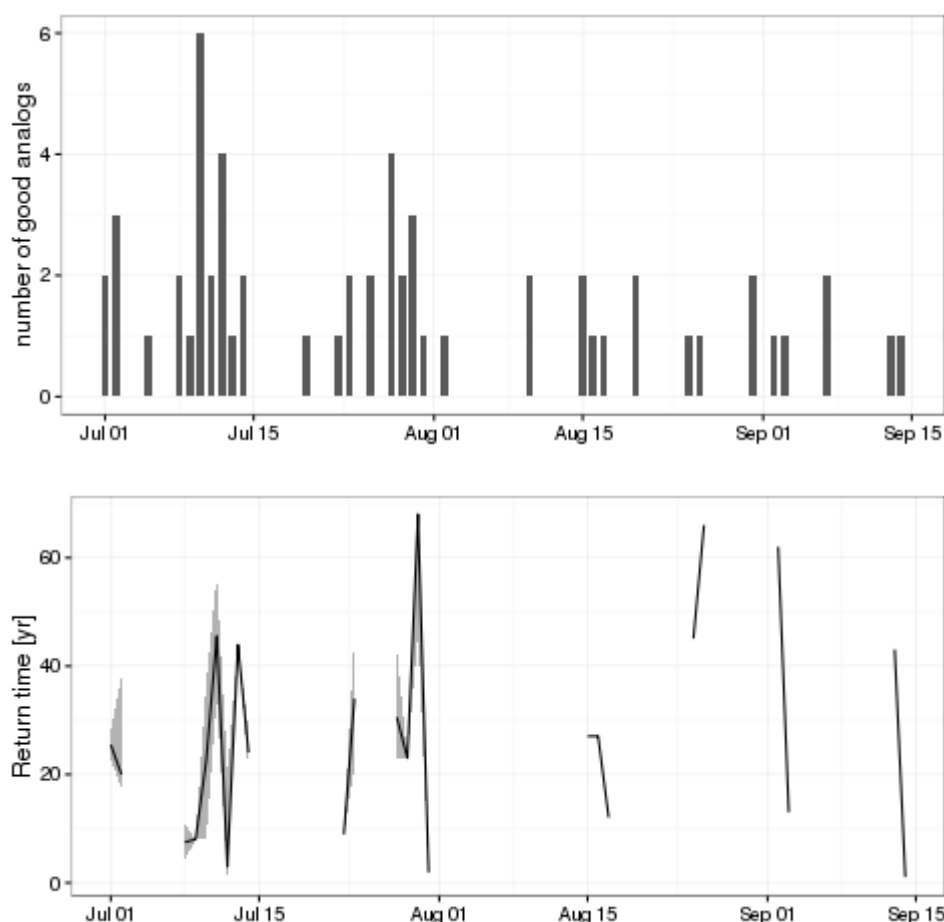


Figure 11: Estimation du nombre de jours analogues entre le 1er juillet 2016 et la mi-septembre 2016. Le calcul du temps séparant une date des dates d’analogues les plus réalistes (corrélation spatiale supérieure à 0.5) donne une idée de la période de retour de chaque situation (diagramme du dessous). Les jours sans valeurs de période de retour indiquent les situations sans « bons » analogues, et donc très rares.

3.2.4 Indicateurs de sécheresses

Indicateurs opérationnels

Les sécheresses se caractérisent par des anomalies prolongées de déficit d’une composante du cycle de l’eau : précipitation (sécheresse météorologique), édaphique ou agricole (humidité du sol), hydrologique (débits, hauteurs des nappes).

Pour les sécheresses météorologiques, l’Organisation Mondiale de la Météorologie a préconisé en 2010 d’utiliser le Standardized Precipitation Index pouvant être calculé à différents pas de temps mensuels (1 à 12 mois) selon le contexte climatique.

Pour les sécheresses du sol, un indicateur standardisé basé sur l’humidité du sol (SSWI) a été développé par Météo-France dans le cadre du projet ClimSec et

appliqué en climat passé et présent pour le suivi hydrologique opérationnel en France et en climat futur à partir de différents scénarios SRES (Soubeyroux et al., 2013).

Dans le cadre du projet Extremoscope, une approche événementielle a été définie et mise en œuvre à l'instar du travail réalisé sur les vagues de chaleur.

Un événement de sécheresse a été défini à partir d'une surface du territoire connaissant un déficit de durée de retour au moins décennale : le pas de temps temporel est ici la décade.

Les règles suivantes ont été implémentées :

- événement national si 25% du territoire affecté simultanément par une sécheresse au moins décennale
- début/fin d'événement si plus (moins) de 10% du territoire en sécheresse au moins décennale.
- arrêt d'une sécheresse si moyenne glissante sur 3 décades (1 mois) est inférieure à 10%.

D'août 1958 à décembre 2014, 32 événements de durée minimale de 3 décades (1 mois) ont été ainsi identifiés en toute saison : l'événement le plus long s'est produit en 2003 (19 décades de mars à septembre) devant 1989 (17 décades d'août à février 1990).

L'événement ayant concerné simultanément la plus grande partie du territoire est 1978 avec 94% du territoire concerné devant 2011 (90% du territoire).

L'événement ayant eu la surface cumulée la plus importante : 1985 devant 1978.

Les événements les plus long ont été respectivement ceux de 1989-1990 et 2003 avec 17 et 18 décades (soit près de 6 mois).

Cette approche permet de qualifier un événement se produisant en temps réel aux événements équivalents du passé ou à la probabilité de survenance future.

Evenement de sécheresse des sols en France (1959-2014)

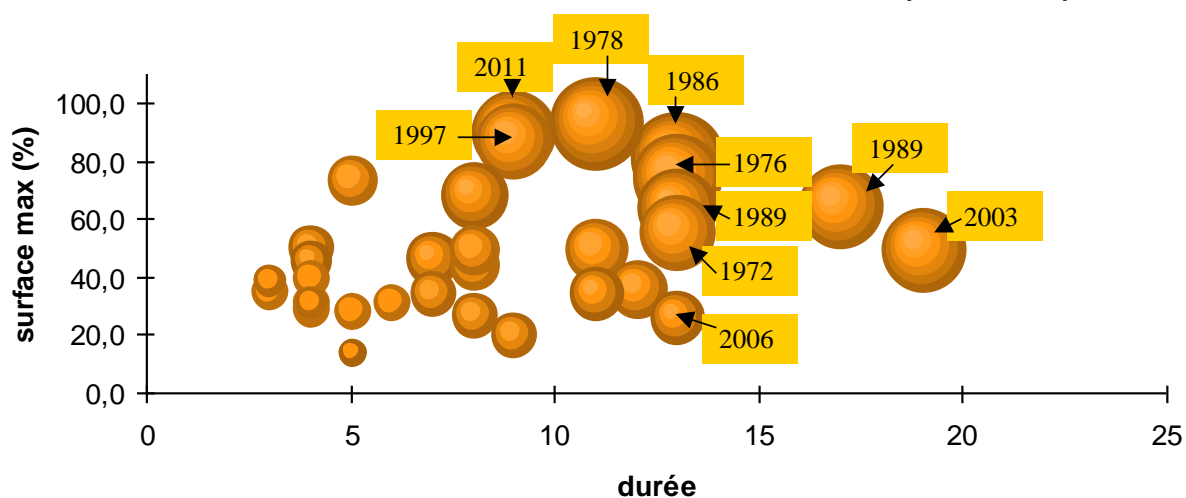


Figure 12 : Inventaire des évènements de sécheresse des sols en France sur la période 1959-2014 selon la surface du territoire national touchée par une sécheresse au moins décennale (%) et la durée (en décade).

Par ailleurs, une caractérisation des évènements de sécheresse passés par rapport à leur probabilité d'occurrence en climat futur avait été développée dans le cadre du projet ClimSec et reste pertinente pour les approches développées dans le cadre d'Extremoscope. La Figure 13 ci-dessous montre que la sécheresse rencontrée en 1990 (ici considérée sur 3 mois), record en climat passé (1961-2008) pourrait avoir une fréquence d'apparition de plus de 1 année sur 5 en milieu de siècle (scénarios SRES A1B ou A2) et de plus d'une année sur 2 en fin de siècle.

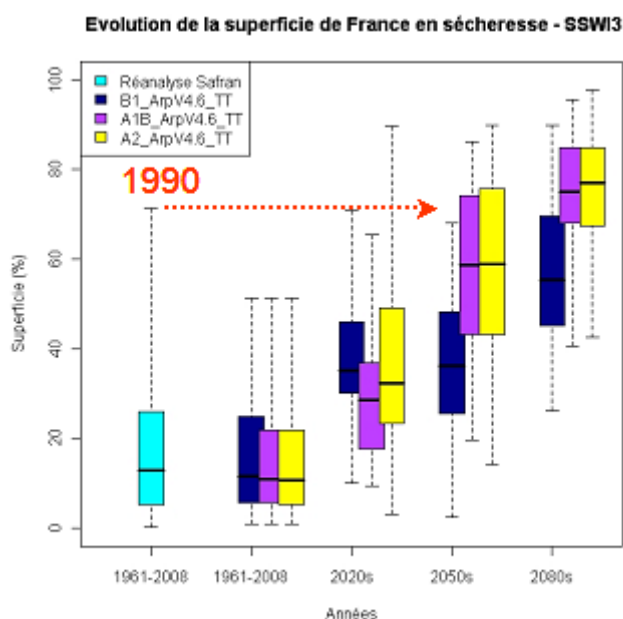


Figure 13 : Diagramme en boîtes (valeur minimale, premier quartile, médiane, troisième quartile et valeur maximale) d'évolution, entre 1961 et 2100, de la

superficie affectée par les sécheresses météorologiques (SSWI 3mois), modérées à extrêmes, sur la France (seuil 16 %), en fonction des scénarios d'émissions B1, A1B et A2 du modèle ARPÈGE V4.6, méthode de descente d'échelle type de temps (TT). Source Projet ClimSec.

Reconstitution de la variabilité hydroclimatique passée à partir des données dendrochronologiques

Par ailleurs, un travail de reconstruction des sécheresses passées a été réalisé. Les données dendrochronologiques (variations des largeurs et des compositions isotopiques des cernes d'arbres) peuvent être utilisées à des échelles spatiales larges pour reconstituer la fréquence et l'intensité des sécheresses passées et replacer ainsi la variabilité hydroclimatique dans une perspective historique (Amérique du Nord : Cook et Krusic, *The North American Atlas*, 2004 ; Asie : Cook et al., 2010 ; Europe : Cook et al., 2015). Suivant l'espèce et le site (altitude ou plaine) les arbres n'enregistrent pas dans leurs schémas de croissance ou dans leurs compositions isotopiques les variations des mêmes paramètres climatiques. D'une façon générale et un peu simplificatrice, les conifères de montagne seraient plutôt sensibles aux variations de température quand les feuillus de plaine enregistreraient plutôt les variations d'humidité.

La consultation des bases de données dendrochronologiques internationales (International Tree Ring Data Bank- ITRDB, Digital Collaboratory for Cultural Dendrochronology- DCCD, DENDRODB) révèle une relativement faible contribution française. Pourtant, au cours des dernières décennies, les dendrochronologues français et des pays environnants ont accumulé une formidable quantité de mesures dans les arbres des forêts et dans les bois d'œuvre des monuments de France. Les données sont conservées dans les bases des laboratoires qui les ont produites et le plus souvent n'ont pas été versées dans des bases nationales ou internationales.

Une première synthèse des données alpines et pyrénéennes a été réalisée dans le cadre du projet ERA-NET ELVECS (coord. M. Stoffel). Elle a permis de produire une reconstitution des températures estivales en France au cours du dernier millénaire (Corona et al., 2010 ; Stoffel et al., in press). Dans le reste de la France, les reconstitutions de température sont peu nombreuses et localisées (e.g. Etien et al., 2008). Des reconstitutions de précipitation à l'échelle régionale existent dans le sud de l'Angleterre (Wilson et al., 2013), en Allemagne (Buntgen et al., 2011) et sur le pourtour Méditerranéen (Nicault et al., 2008). En France, il n'existe rien de comparable et le territoire est représenté par extrapolation dans l'Atlas des sécheresses européennes de Cook et al., (2015). Le potentiel est pourtant important (Fig. 14).

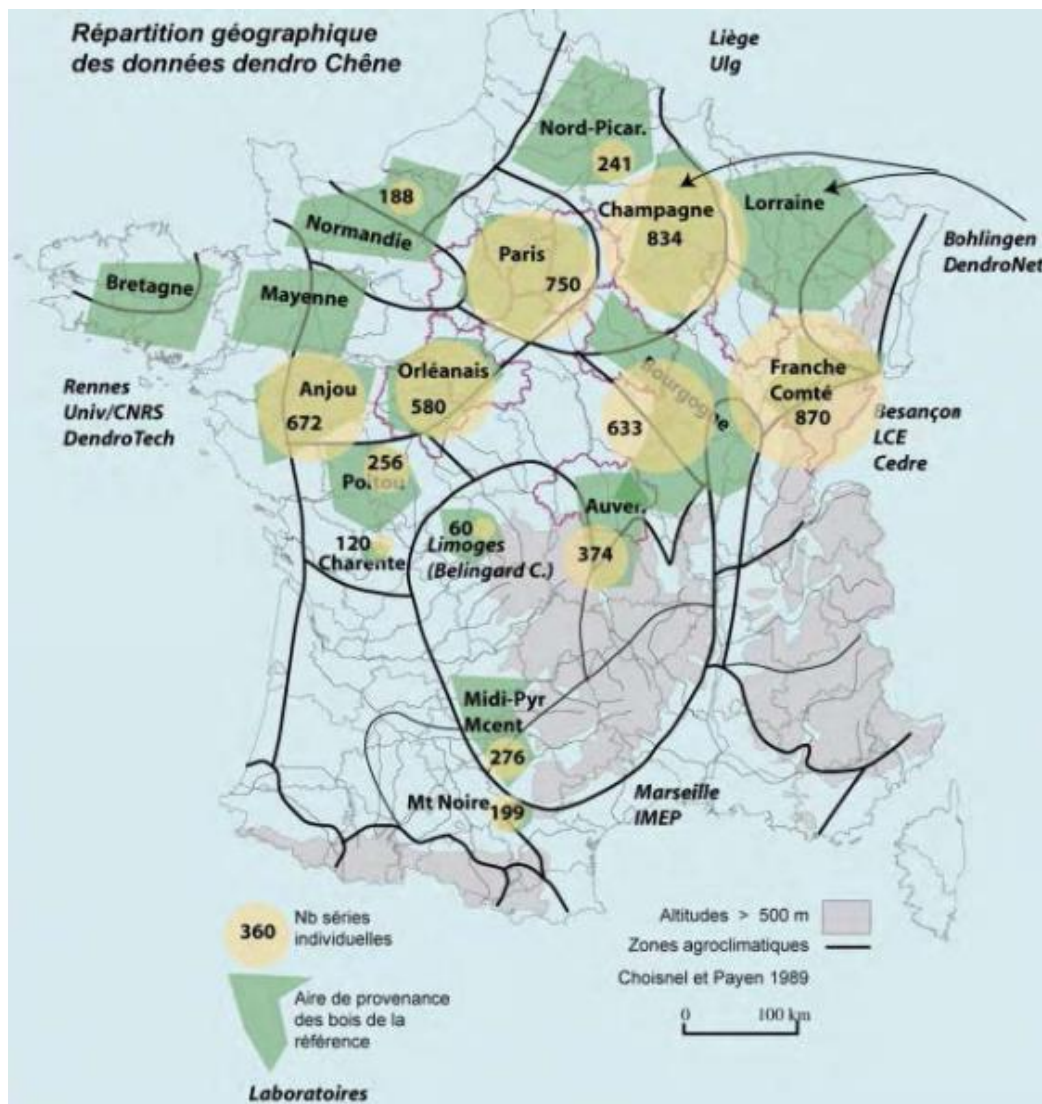


Figure 14 : Répartition géographique des données dendrochronologiques de chênes (reconstitution des précipitations). Synthèse réalisé par O. Girarclos et Perreau, 2009.

Notre but a été de réaliser une collecte de données dendrochronologiques françaises pour en extraire des informations hydroclimatiques à l'échelle du territoire national, sur plusieurs centaines d'années et avec une résolution annuelle. La première étape a consisté à rassembler et formater toutes les données disponibles dans les bases de données. Nous avons ensuite entrepris des démarches auprès de laboratoires de dendrochronologie français, belges et allemands. A ce jour, nous avons rassemblé les données de largeurs de cernes de 600 sites³ en France toutes espèces confondues (Fig. 15), la majeure partie des

³ Une chronologie de site est réalisée à partir de plusieurs arbres. Le nombre de bois intégrés dans chaque site varie suivant les auteurs et les localisations ; il est en moyenne de 35 arbres.

sites étant située dans le Nord-Est. Aux 600 sites français s'ajoutent quelques 400 autres en Europe, le tout correspondant à ~35000 arbres.

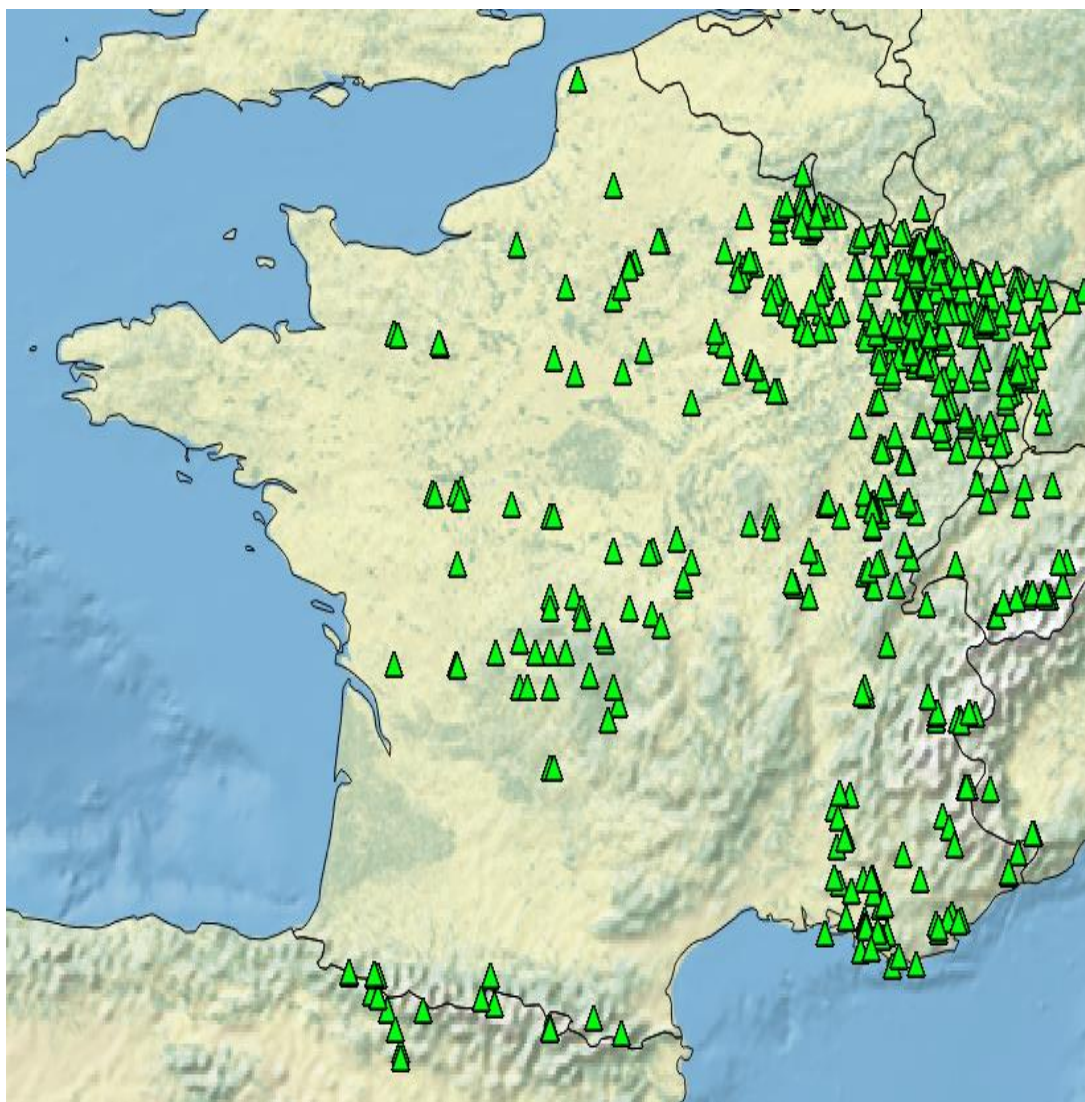


Figure 15 : Séries dendrochronologiques (un point pouvant intégrer plusieurs dizaines d'arbres) collectées à ce jour. Origine de ces données : différents sites spécialisés (ITRDB, DCCD, DENDRODB), Université de Franche-Comté et Université de Fribourg (Allemagne).

Nous avons également compilé les séries dendro-isotopiques disponibles en Europe (35). Pour les séries de largeurs de cernes, les formats et méthodes de normalisation étant différents d'un auteur à l'autre, nous avons procédé à une normalisation suivant un protocole commun pour extraire la composante tendancielle (Spline à fenêtre variable). Des séries d'indices de croissance ont ainsi été produites (une par site) et, pour le 20ème siècle, comparées aux indicateurs de sécheresse. La figure 16 représente, pour l'année 1976, une comparaison des indices de croissance des arbres aux indices SPEI3 de Juin-Août en points de grille et aux compositions isotopiques de l'oxygène de la cellulose des arbres. Les régions de faibles indices de croissance (en rouge) coïncident globalement bien avec celles

de rapports isotopiques élevés (forte évapotranspiration) et des SPEI négatifs (sécheresse). Toutefois, si certaines années sèches sur une grande partie du territoire français correspondent bien à des années de faible croissance des arbres, la concordance n'est pas totale (certaines années sèches ne sont pas de faible croissance et certaines années de faible croissance ne sont pas sèches ; Fig. 17).

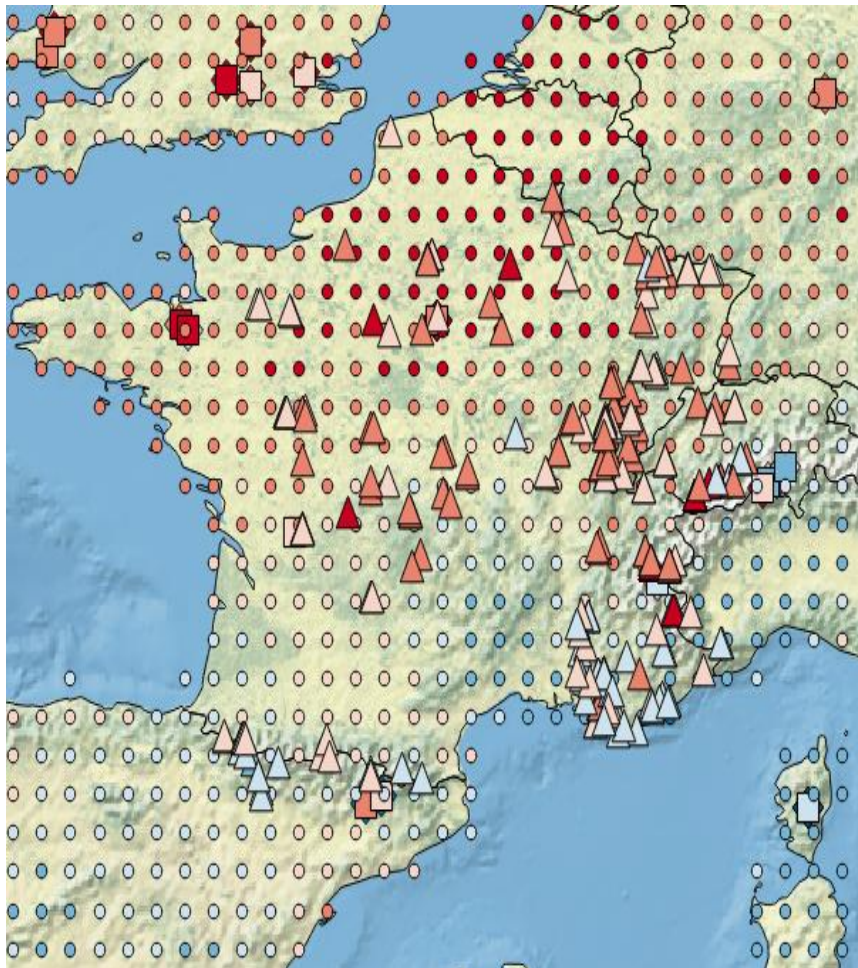


Figure 16 : Comparaison des indices de croissance des arbres (triangles) avec les indices SPEI3 de Juin-Août en points de grille et les compositions isotopiques de l'oxygène (carrés). De bleu à rouge : diminution des indices de croissance, et du SPEI de JJA et augmentation du $\delta^{18}O$.

Les premiers résultats étant encourageants, nous avons établi les bases d'une collaboration avec des dendrochronologues de laboratoire français, belge et allemand ainsi qu'avec les porteurs du projet ERA-NET ELVECS, qui poursuivent des objectifs comparables aux nôtres, pour enrichir la base de données en y intégrant des séries dendrochronologiques du centre et de l'Ouest de la France. Le consortium ainsi créé rassemble une vingtaine de chercheurs. Une première réunion, dont le but est d'établir le cahier des charges de la base de données commune, est prévue en novembre 2016. La réalisation et l'exploitation de la base commune se poursuivra dans les mois suivants.

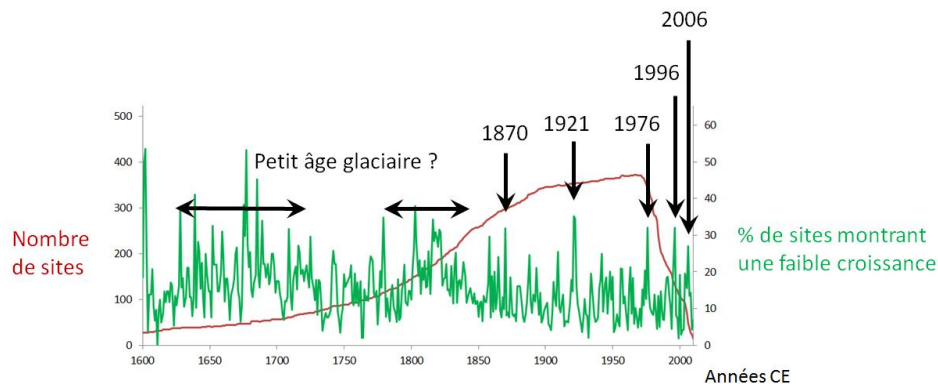


Figure 17 : Pourcentage de sites montrant une faible croissance (indice < indice moyen du site – écart-type du site) en fonction du temps (courbe verte) et nombre de sites disponibles (courbe rouge). Aux dates indiquées par une flèche, les sites à faible croissance sont nombreux et les années sont sèches.

3.2.5 Autres outils et diagnostics spécifiques permettant de renseigner sur les mécanismes en jeu lors du développement de l'événement

Rétro-panaches

Un outil intéressant à utiliser est l' « ensemble de rétro-trajectoires » de masses d'air afin de déterminer la nature advective ou non du phénomène. Nous avons utilisé au cours du projet le modèle HYSPLIT (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>) afin de caractériser la trajectographie des masses d'air. Cela permet notamment de déterminer les origines locales non locales des phénomènes observés. Ils ont été utilisés principalement pour les épisodes de chaleur, hivernale ou estivale.

La figure 18 montre un exemple de rétro-trajectoires

NOAA HYSPLIT MODEL
Backward trajectories ending at 0000 UTC 17 Dec 15
GDAS Meteorological Data

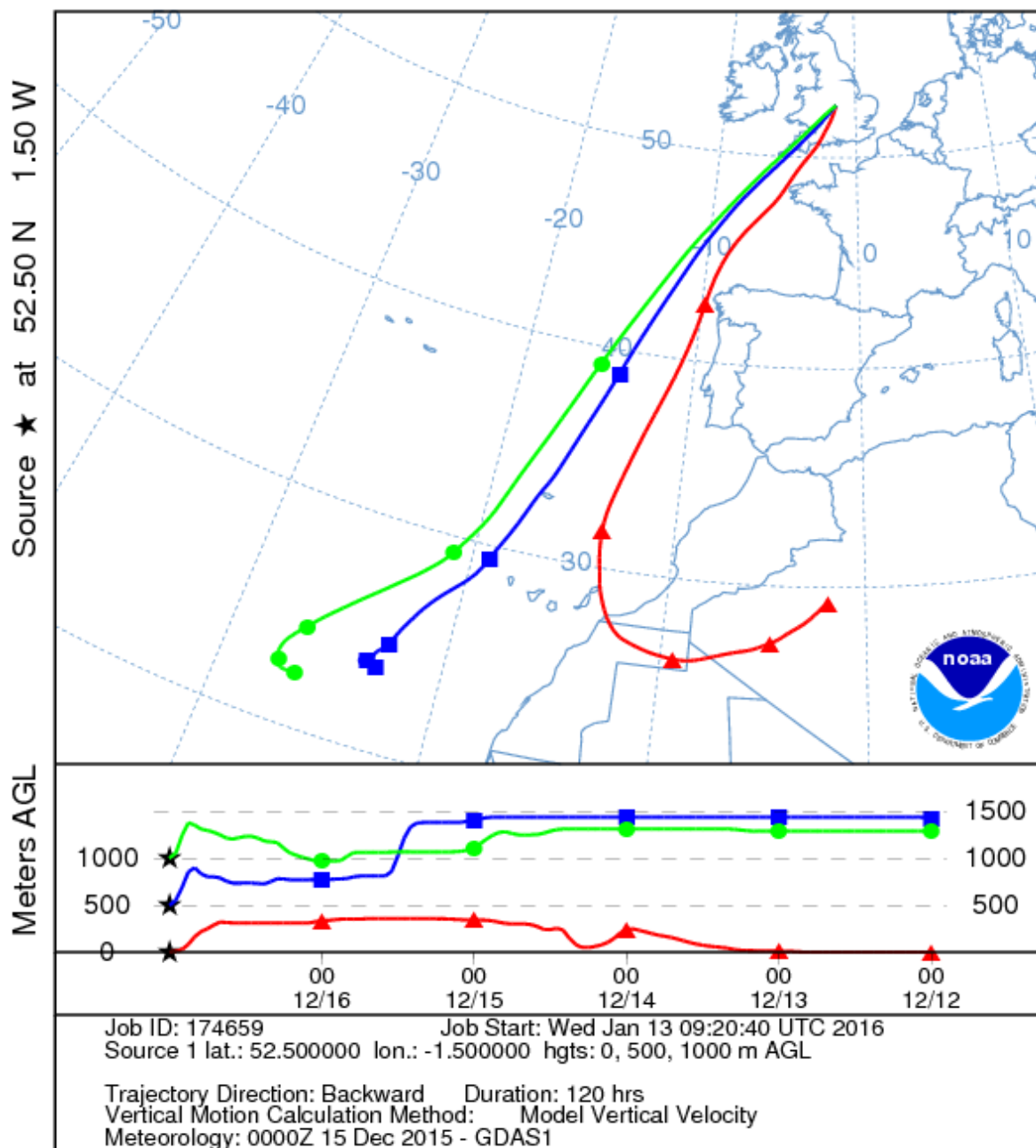


Figure 18: Exemple de retro-trajectoires atteignant l'Europe de l'ouest pour une journée chaude de décembre 2015 sur cette région. Elles montrent que l'origine des masses d'air se situe au-dessus de l'Atlantique Est tropical et au Sahara. La plupart des trajectoires de décembre 2015 étaient relativement semblables à celles-ci, expliquant en grande partie l'anomalie chaude.

Etats de surface renseignant sur les régimes d'évapotranspiration

Pour analyser le développement des vagues de chaleur et sécheresses, et plus généralement des températures des saisons estivales, des indicateurs issus de

modélisation de l'humidité des sols sont utilisés pour caractériser les régimes d'évapotranspiration. Ces indicateurs sont calculées grâce à des modèles de surface (ici Isba) forcés par des ré-analyses atmosphériques (Safran) ou des modèle de climat régional. Cela permet en particulier de déterminer les régions où se développent des rétroactions amplifiant la sécheresse et les fortes températures.

Ces cartes pourront être mises en regard de produits opérationnels de suivi climatique sur l'humidité des sols produits par Météo-France tels que la Figure 19 ci-dessous, présentant à l'échelle nationale la valeur pour une année particulière, en regard de la distribution climatologique et des records sur plus de 50 ans.

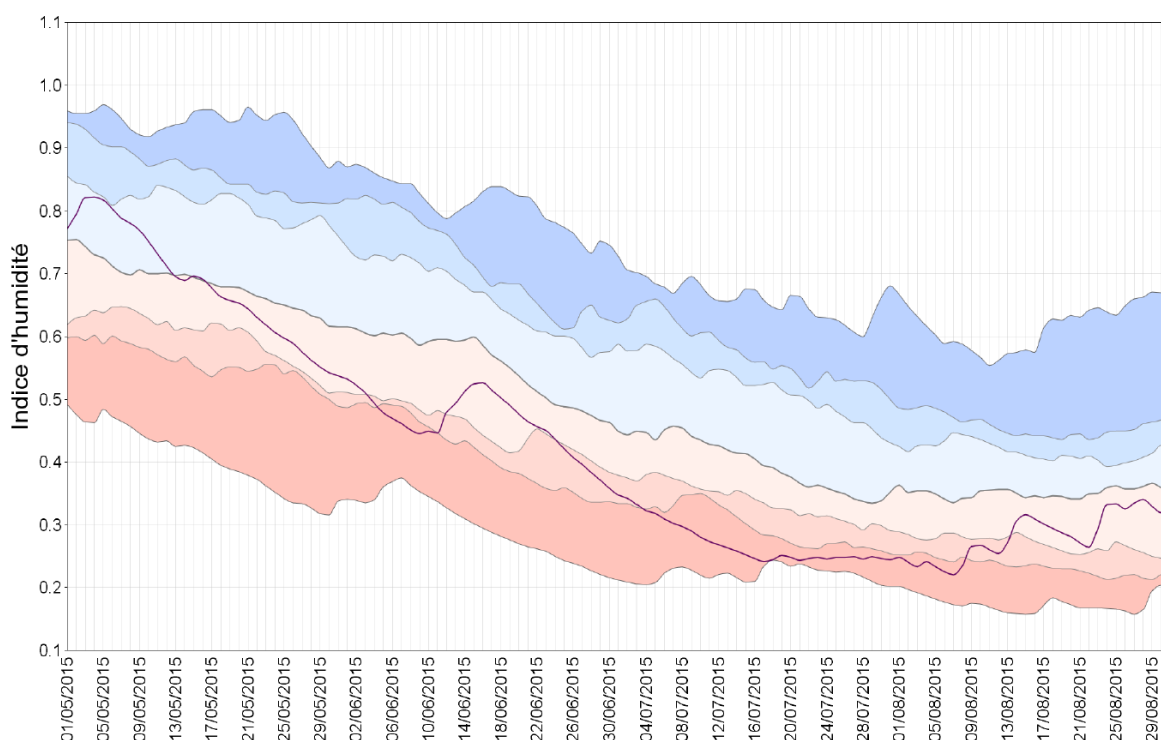


Figure 19 : Evolution en temps réel de l'indicateur SWI d'humidité des sols agrégé sur la France du 1^{er} mai au 31 août 2015 avec des valeurs basses proches des records en phase avec les évènements de vague de chaleur de l'été

A l'identique ce type d'indicateur est aussi utilisé en contexte d'inondation pour caractériser le phénomène de ruissellement en présence de sol humide proche des conditions de saturation.

Contribution de l'humidité du sol aux anomalies de température estivales

Une étude spécifique a été menée (principalement dans le cadre du projet EUCLEIA), concernant la contribution de la structure de l'humidité des sols avant les périodes propices aux vagues de chaleur (Juillet et Août) à l'anomalie de température en Europe. Cette étude a été initiée par le stage de Martha Vogel (ETHZ), et est actuellement poursuivie dans le cadre de la thèse de A. Stegehuis au LSCE. Il s'agit de déterminer quelle est la part de l'anomalie de température

des mois de juillet et août attribuable à l'anomalie d'humidité du sol au 30 juin de chaque été. Pour cela, une simulation de contrôle (CTRL) est effectuée avec le modèle WRF (domaine EURO-CORDEX), continue entre 1980 et 2011, forcée par les ré-analyses ERA-Interim (Dee et al., 2011). Ensuite chaque mois de juillet et août sont re-simulés en initialisant l'humidité des sols avec les conditions des 31 autres années, en guidant toujours le modèle sur les vents en altitude des réanalyses de l'année en cours. La différence des températures obtenues dans la simulation de contrôle et la moyenne des températures obtenues sur les 32 simulations de sensibilité peut ainsi être interprétée comme la contribution de l'anomalie d'humidité des sols.

Les résultats montrent qu'avec la configuration de WRF utilisée, la contribution de l'humidité initiale des sols est significative mais n'est pas dominante, même dans le cas de grandes vagues de chaleur comme celle de 2003, pour laquelle la circulation semble être le facteur dominant. La figure 20 montre par exemple la contribution de l'anomalie d'humidité des sols à la température des mois de juillet et août 2003. Une contribution sur l'Europe centrale et la France atteignant un peu plus de un degré est obtenue. Sur les anomalies journalières moyennées sur la France on constate une contribution atteignant 1 à 2 degrés dans la période de la grande vague de chaleur d'août, et ½ à 1 degré dans les autres périodes.

Cette étude est actuellement étendue en refaisant les simulations avec un ensemble de paramétrisations multi-physiques. Ce diagnostic peut être effectué tous les étés, et être focalisé sur la France.

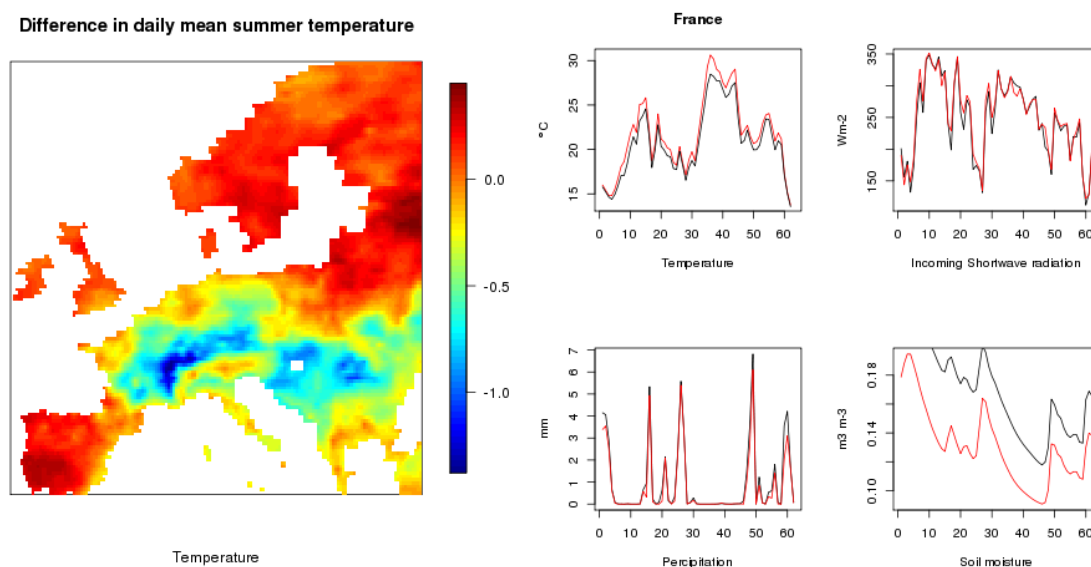


Figure 20 : A gauche : différence entre la moyenne des 32 simulations initialisées avec toutes les configurations d'humidité des sols et la simulation de contrôle. A droite, moyenne journalière sur la France de 4 paramètres entre le 30 juin et le 31

août, pour la simulation de contrôle (en rouge) et la moyenne des simulations de sensibilité.

3.3 Etude de cas

3.3.1 Introduction

Cette section a pour objectifs de démontrer comment les méthodes et indicateurs ont pu être appliqués à un ensemble de cas d'étude varié. Parmi les objectifs initiaux figuraient :

- (i) L'application des méthodes, diagnostics et indicateurs sur les événements extrêmes principaux (typiquement un par an) rencontrés pendant la durée du projet,
- (ii) Le développement d'un site internet de projet regroupant l'ensemble des résultats d'applications à ces cas étudiés, la description des méthodes utilisées.
- (iii) l'organisation de deux ateliers interdisciplinaires dont l'objectif est de déterminer la pertinence des informations proposées par le projet pour l'analyse des impacts dans différents secteurs et d'élargir les actions, au-delà du projet, sur les impacts de ces phénomènes, en lien avec une communauté interdisciplinaire plus large
- (iv) la proposition d'une organisation d'activité de service pérennisé au-delà du projet

Sur ces 4 grands objectifs, seuls trois ont été atteints (i), (iii) et (iv), le développement du site internet étant resté en construction en novembre 2016. Nous prévoyons néanmoins de réaliser cet objectif après la remise de ce rapport, mais nous avons souhaité mettre en priorité les analyses scientifiques des études de cas, qui ont finalement été nombreuses et riches en enseignements.

Six cas d'étude ont été effectués :

- les forts cumuls de pluie de l'hiver 2013-2014 en Bretagne
- les fortes et nombreuses pluies cévenoles de l'automne 2014
- la vague de chaleur et la sécheresse de l'été 2015
- le mois de décembre 2015 très chaud
- les pluies extrêmes de Mai 2016 sur les bassins de la Seine et de la Loire
- les vagues de chaleur tardives de l'été 2016

Les différents cas d'étude sont présentés sous un format normalisé ci-dessous :

- Une synthèse communicable des résultats en 100 mots

- L'événement, en bref
- Indicateurs utilisés
- Modèles et évaluation
- Détection & Attribution par une ou plusieurs méthodes
- Brève discussion

3.3.2 Les pluies de l'hiver 2013-2014

Synthèse communicable de 100 mots

Les cumuls de pluie hivernales sur la Bretagne en 2013-2014 ont été un record et engendré des inondations. Ils sont dus à la persistance d'une circulation atmosphérique avec des vents de Sud-ouest, chargés d'humidité. Pour des circulations analogues prises entre 1951 et 1982, les cumuls auraient été plus faibles que pour les circulations de la période plus récente. Les simulations EURO-CORDEX reproduisent difficilement les forts cumuls, et ne montrent pas de changement significatif des propriétés des extrêmes depuis 1971. Il est impossible, avec les résultats obtenus ici, de conclure à un changement dû aux activités humaines pour ce type d'extrême.

L'événement, en bref

Après un mois de novembre et un début décembre 2013 relativement sec et assez frais, la France a été sous l'influence dominante d'un courant perturbé atlantique, à partir du 10 décembre. La Bretagne a connu une succession de perturbations très actives souvent accompagnées de forts cumuls de précipitations, qui ont contribué à saturer les sols.

Ainsi, le nombre de jours de pluie significative (pluie supérieure à 1 mm) est compris entre 50 et 80 jours, de l'Ille-et-Vilaine au Finistère, soit 15 à 20 jours de plus que la normale.

Les cumuls, compris sur la saison entre 350 et 1000 mm, sont une fois et demi voire localement plus de deux fois supérieurs à la normale. Sur l'ensemble de la Bretagne, la pluviométrie de cet hiver 2013-2014 est la plus élevée de la période 1959-2014, devant celle de l'hiver 1994-1995.

Ces pluies exceptionnelles, conjuguées aux submersions marines lors des grandes marées de janvier et février ont provoqué de sévères inondations.

Quelques valeurs représentatives :

Station	Cumul de Pluie sur l'hiver (rapport à la normale)	Cumul annuel moyen	Nombre de jours de pluie sur l'hiver (écart à la normale)
Brest-Guipavas (29)	752 mm (187 %)	1210 mm	66 jours (+17 jours)
Quimper (29)	725 mm (171 %)	1250 mm	67 jours (+22 jours)
Rostrenen (22)	750 mm (198 %)	1146 mm	67 jours (+21 jours)
Lorient (56)	507 mm (167 %)	951 mm	62 jours (+23 jours)
Guiscriff (56)	995 mm (206 %)	1365 mm	69 jours (+23 jours)
Ploermel (56)	525 mm (228 %)	750 mm	58 jours (+23 jours)
Rennes (35)	376 mm (199 %)	694 mm	53 jours (+20 jours)

Table 2 : Valeurs de cumul relevées durant l'hiver 2013-2014

Indicateurs utilisés

1. Indicateurs agrégés de précipitation Safran

Sur l'ensemble de la saison et à l'échelle de la région Bretagne, le cumul de précipitation de l'hiver arrive au 1^{er} rang depuis 1959. A l'échelle départementale, le caractère exceptionnel des précipitations de l'hiver apparaissent à la fois sur l'Ouest de la France et le Sud Est

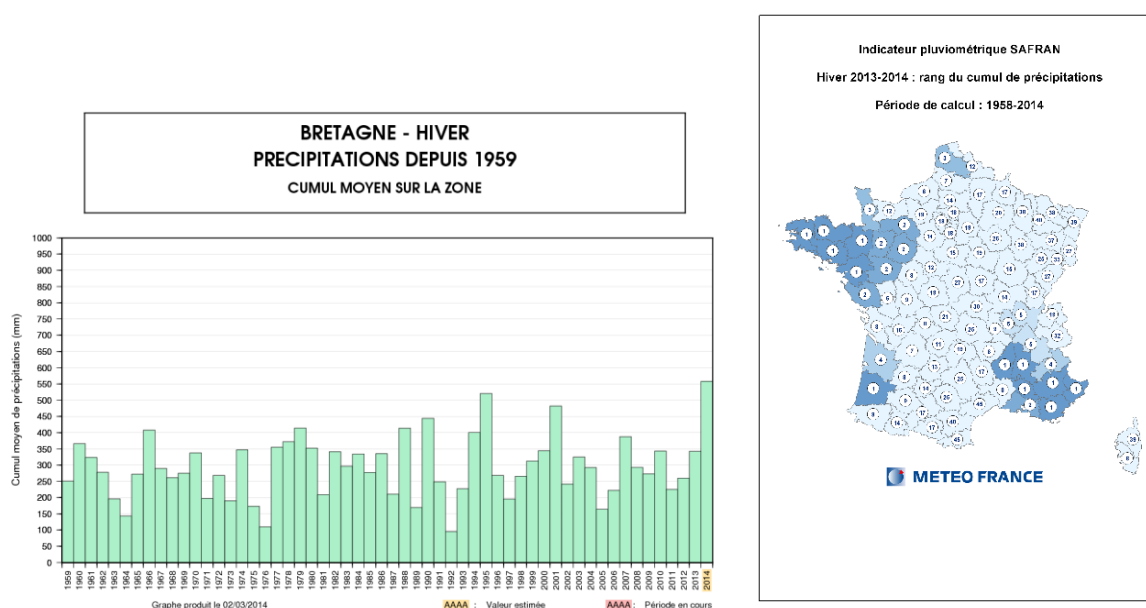


Figure 21 : Caractérisation du caractère exceptionnel des précipitations de l'hiver 2013-2014 avec l'indicateur agrégé Safran à l'échelle départementale et régionale.

2) Indicateur de cumul construit seulement avec des observations sur des stations

Nous utiliserons aussi le cumul saisonnier (DJF) moyenné sur 6 sites bretons pour les analyses. La figure 22 montre l'évolution de cet indicateur depuis 1950, comparé au cumul sur plusieurs stations normandes et du sud de la Grande Bretagne. Pour la Normandie, la valeur est élevée mais sans excès, alors que pour la Grande-Bretagne du Sud il s'agit d'un record comme en Bretagne. Ces comparaisons montrent le caractère régional de l'extrême, sur la Bretagne et la Grande-Bretagne du Sud.

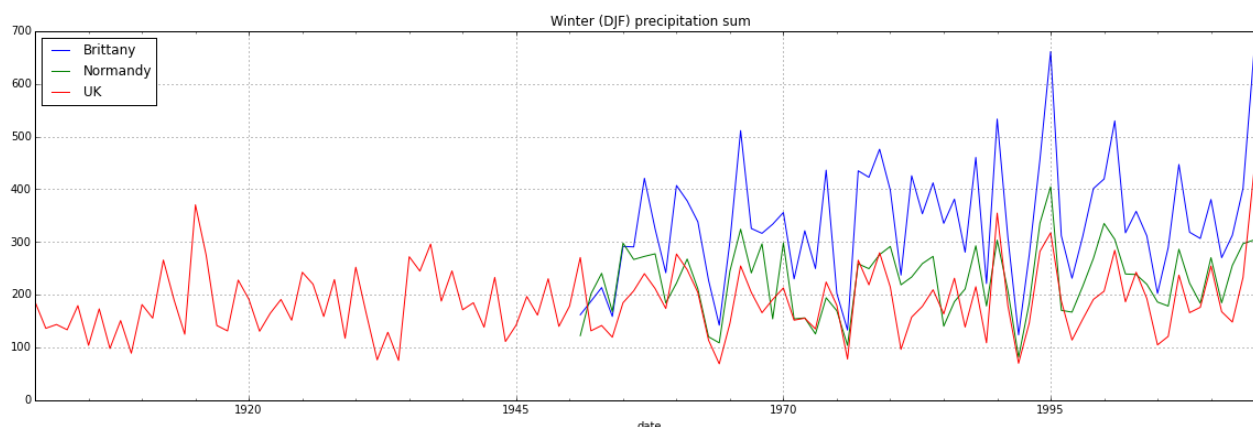


Figure 23 : Evolution temporelle des indicateurs de moyennes sur quelques stations bretonnes, normandes et anglaises (sud) du cumul saisonnier hivernal.

3) Indicateur de circulation générale

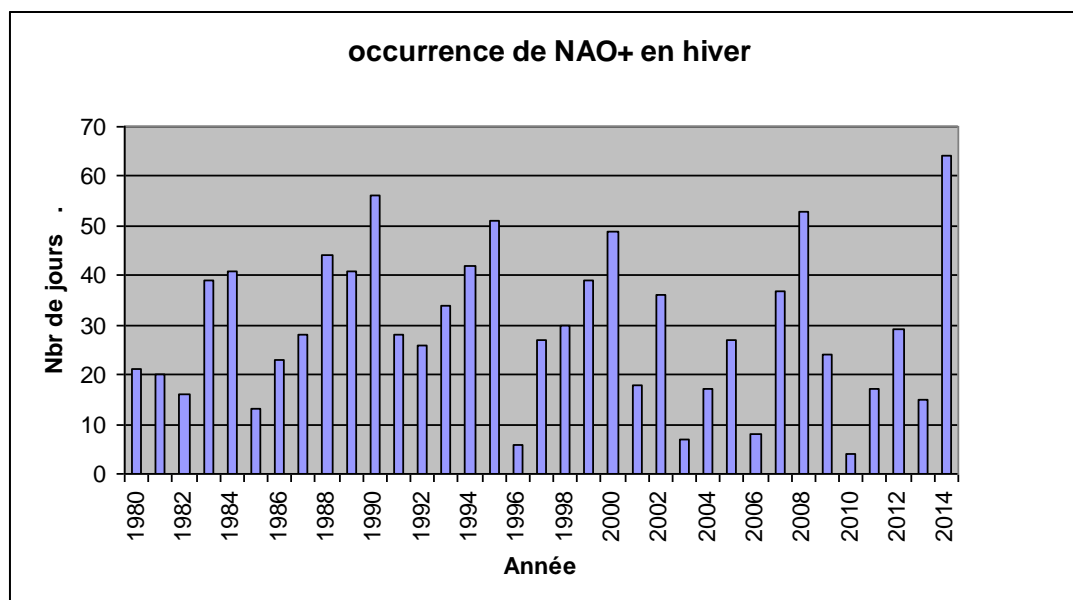


Figure 23: Nombre de jours de régimes ZO en hiver sur la période 1980-2014 (base ERA Intérim)

La persistance remarquable au cours de l'hiver des circulations zonales peut être mise en évidence avec l'indicateur sur les régimes où le nombre de jours du régime

ZO (appelé ici NAO+, voir Figure 23) (plus de 2 jours sur 3) est record depuis 1980, devançant même l'hiver 1989-1990. Le régime ZO est caractéristique d'écoulements d'Ouest-Sud-Ouest sur l'Europe et apporte généralement douceur, pluie et vent. Ces trois propriétés ont été vérifiées car l'hiver a été très doux et venteux.

Une autre façon de représenter la circulation sur l'Europe de l'Ouest est via l'indicateur de blocage de Tibaldi et Molteni (1990). Le très faible nombre de jours de blocage est un record séculaire (voir Figure 24).

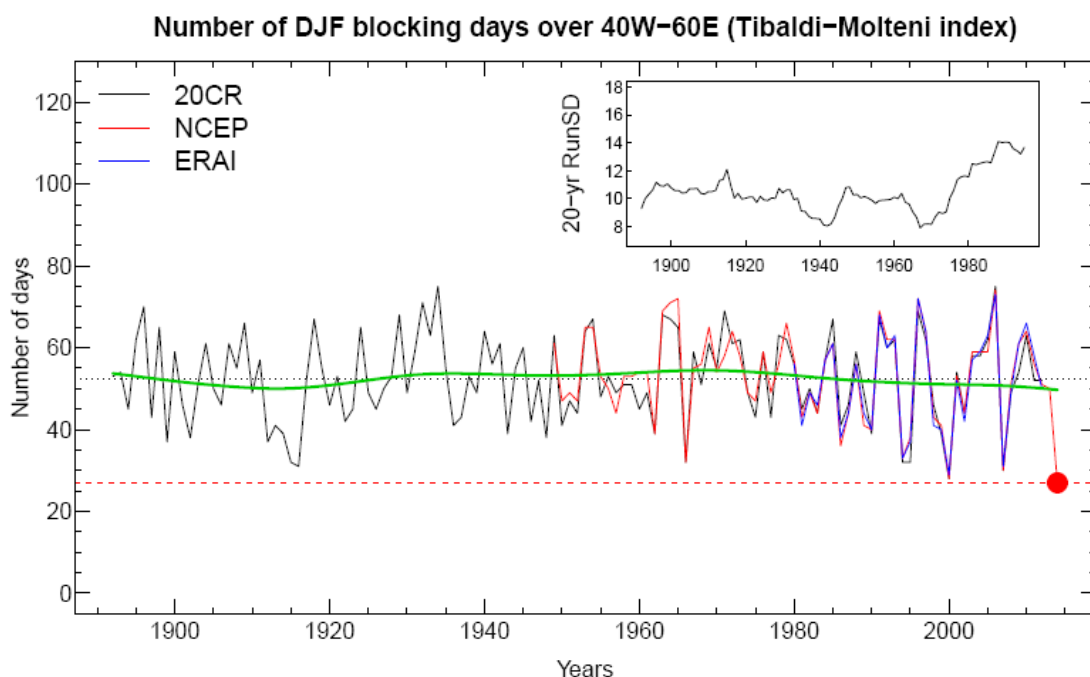


Figure 24 : Evolution du nombre de jours de blocage dans le domaine 40°O – 60°E pour les hivers 1891/92 à 2013/14. Un jour est déclaré « bloqué » quand le gradient méridien du champ de hauteur de géopotential à 500mb remplit certaines conditions, voir http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/Cwlink/blocking/index/index_nh.shtml (et Tibaldi and Molteni 1990). L'hiver est défini comme Décembre-Janvier-Février (90 ou 91 jours). Les hauteurs de géopotential sont tirées des ré-analyses 20CR (noir) ; NCEP (rouge) et ERA-Interim (bleu). L'insert correspond à l'écart-type glissant sur une fenêtre de 20 hivers de la série concaténée 20CR 1892-1948 et NCEP 1949-2014. L'hiver 2014 se distingue par un record bas, et s'il n'y a pas de tendance dans le nombre de blocage, la variance interannuelle semble avoir légèrement augmenté ces dernières années.

Modèles et évaluation

Nous utilisons ici l'ensemble EURO-CORDEX récent corrigé des biais avec les réanalyses ajustées WFDEI (Weedon et al., 2011), comme décrit en Section 3.1, utilisant le scénario RCP8.5 au-delà de 2005. La figure 25 montre les valeurs de retour en fonction des périodes de retour pour l'indicateur (2) pris sur les 6 stations bretonnes. Les valeurs de la figure sont calculées par un fit d'une distribution GEV.

Comme le montre la figure l'incertitude est très forte (le temps de retour estimé pour la valeur observée est supérieur à 40 ans avec les observations depuis une soixantaine d'années, sans borne supérieure d'incertitude clairement définie, pour EURO-CORDEX. On observe aussi que les modèles parviennent difficilement à produire des valeurs extrêmes aussi fortes que l'estimation avec les observations. Pour les périodes actuelles ou passées, peu différenciées, l'estimation des périodes de retour est supérieure à 500 ans. Ce biais potentiel sur les cumuls mensuels est possible malgré la correction de biais, puisque cette dernière est faite sur les valeurs journalières. Un tel biais signifierait que les simulations ont du mal à reproduire la persistance des pluies dans cette région.

Détection et attribution

La figure 25 montre aussi bien les valeurs de cumuls pour la période actuelle que pour une période passée et deux périodes futures. Avec l'ensemble utilisé l'incertitude sur les changements est clairement trop forte pour déduire un changement significatif de probabilité des extrêmes. Cela vaut aussi bien pour le passé récent que pour le futur proche. Les valeurs extrêmes inférieures à 600 mm montrent toutefois une évolution apparemment significative pour le milieu de siècle.

La méthode utilisant les analogues a également été utilisée. Une différence significative est trouvée entre les hivers reconstruits avec des analogues de 1951 à 1982 et des analogues de 1983 à 2014 (Figure 26). Cette dernière reconstruction donne une valeur similaire à celle observée, pourtant légèrement inférieure. Cette différence peut être interprétée comme une augmentation des risques de fortes précipitations dans les conditions de circulation de l'hiver 2013-2014. Toutefois il est nécessaire de rester prudent quant à une interprétation en termes d'attribution, la variabilité inter-décennale étant forte et les observations utilisées sont courtes (65 ans).

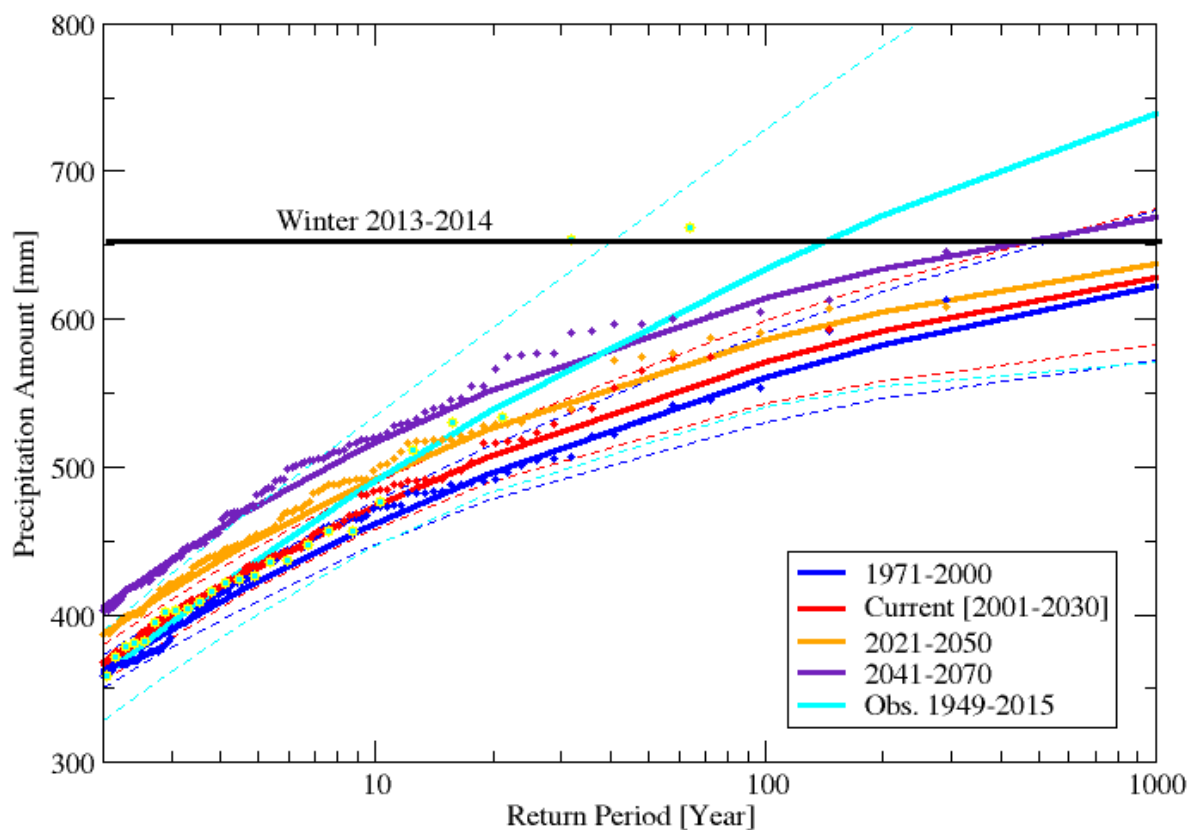


Figure 25 : Valeurs de retours estimées du cumul saisonnier d'hiver en fonction de la période de retour, pour les observations (en noir, 1950-2014) et pour les simulations de EURO-CORDEX-ajustées, pour plusieurs périodes : 1971-2000 (bleu), actuelle, 2001-2030 (rouge), et 2 périodes futures ; incertitude à 95% (traits fins en pointillés, pour chaque jeu de données [observations, modèles]) et les points de données [points].

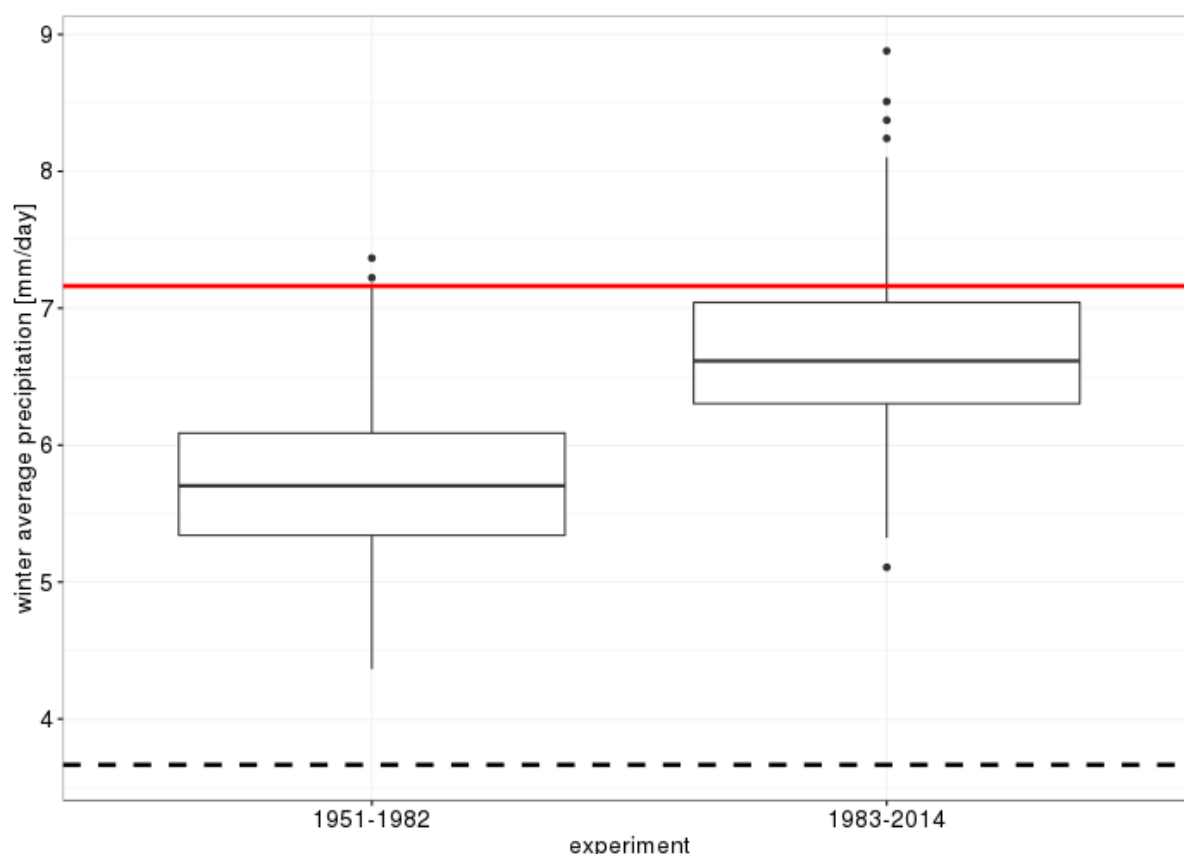


Figure 26 : « Box & whiskers plot » des précipitations moyennes journalières (indicateur No 2) sur la Bretagne observées en 2013-2014 (trait rouge), et reconstruites avec les précipitations des hivers pour les circulations journalières analogues prises au cours de 2 périodes passées. La ligne pointillée représente la valeur moyenne des cumuls hivernaux.

Conclusion et enseignements

Ce premier cas d'étude (cumuls hivernaux sur la Bretagne en 2013-2014) est un extrême de cumul saisonnier de précipitation. Pour ce cas il n'a pas été possible de détecter des changements significatifs dans les extrêmes des simulations EURO-CORDEX. Dans les observations, on détecte un changement significatif d'amplitude de l'ordre de 10% en 30 ans, semblant montrer un changement thermodynamique pour ce type de circulations. La méthode d'analogues montre que l'événement est quasiment entièrement dû à la dynamique très particulière et persistante durant cet hiver. Les modèles EURO-CORDEX, après ajustement des biais journaliers, reproduisent avec difficulté la persistance des pluies. En conclusion, même si l'on détecte un changement thermodynamique, il est impossible, avec les résultats obtenus ici de conclure à un changement de risques dû aux activités humaines.

3.3.3 Les pluies cévenoles de l'automne 2014

Synthèse communicable de 100 mots

Les pluies journalières les plus fortes sur le pourtour méditerranéen ont une amplitude qui a augmenté de 20% environ (incertitude $\pm 15\%$) entre 1960 et aujourd'hui. En automne, sur les Cévennes, la probabilité de dépasser aujourd'hui des seuils élevés (300 mm/jour) a environ triplé en 65 ans. Ces évolutions sont probablement liées aux effets des activités humaines sur le climat, car les simulations climatiques retrouvent ces tendances. Toutefois, les modèles sont encore trop imprécis en résolution pour simuler explicitement les phénomènes orageux. De nouveaux résultats sont attendus dans les deux ans à venir avec les expériences prévues dans le projet CORDEX.

L'événement, en bref

Durant tout l'automne, la France est restée sous l'influence d'un régime perturbé de sud piloté par un vaste système dépressionnaire persistant. Cette situation a favorisé la remontée de masses d'air chaud et très humide en provenance de la Méditerranée. A partir de mi-septembre, dix épisodes de pluies particulièrement violents ont touché le sud-est du pays. Ce type de situation n'est pas rare dans cette région et à cette période de l'année. Toutefois, cette succession d'épisodes méditerranéens revêt cette année un caractère remarquable par sa fréquence et par l'intensité des précipitations, même si des séquences similaires ont déjà été observées par le passé par exemple en 1995 (neuf épisodes en automne) et en 2003 (huit épisodes en automne).

Les dix épisodes recensés sont les suivants :

- Du 16 au 20 septembre 2014 du Languedoc aux Cévennes
- Le 29 septembre dans l'Hérault
- Les 6 et 7 octobre dans l'Hérault
- Les 9 et 10 octobre 2014 sur l'Hérault, le Gard, la Lozère et l'Ardèche
- Les 12 et 13 octobre 2014 sur le Gard, la Lozère et l'Ardèche
- Du 3 au 5 novembre 2014 sur le sud-est et l'est du pays
- Du 9 au 12 novembre 2014 sur la Provence et la Corse
- Les 14 et 15 novembre 2014 sur les Cévennes et la Côte d'Azur
- Du 24 au 26 novembre 2014 sur l'Aude et le Var
- Du 27 au 30 novembre sur le Sud-Est et la Corse

Ainsi, de nombreux records de cumuls sur la saison ont été battus avec par exemple 722 mm à Bormes-les-Mimosas (Var), 1072 mm à Saint-Gervais (Hérault), 1366 mm à Génolhac (Gard), 1469 mm à Villefort (Lozère) et 1744 mm à Montpezat (Ardèche).

Sur l'automne, on a recueilli en moyenne sur le département de l'Hérault plus de 600 mm, soit près de deux fois la normale, ce qui constitue un record sur la saison. De même, l'Ardèche avec plus de 1000 mm, soit plus de deux fois la normale, a également battu un record sur la saison.

Indicateurs utilisés

1) Précipitation

Deux études ont été réalisées : la première (Vautard et al., 2015) utilise les données de 14 stations cévenoles afin d'étudier les tendances des cumuls maximaux journaliers d'automne. Ces 14 stations sont sélectionnées pour avoir des distributions d'automne relativement similaires et être les moins corrélées possible (elles restent néanmoins corrélées). La figure 27 montre la distribution de ces stations, avec la moyenne des maxima d'automne en France d'après les données SAFRAN moyennées sur une longue période historique.

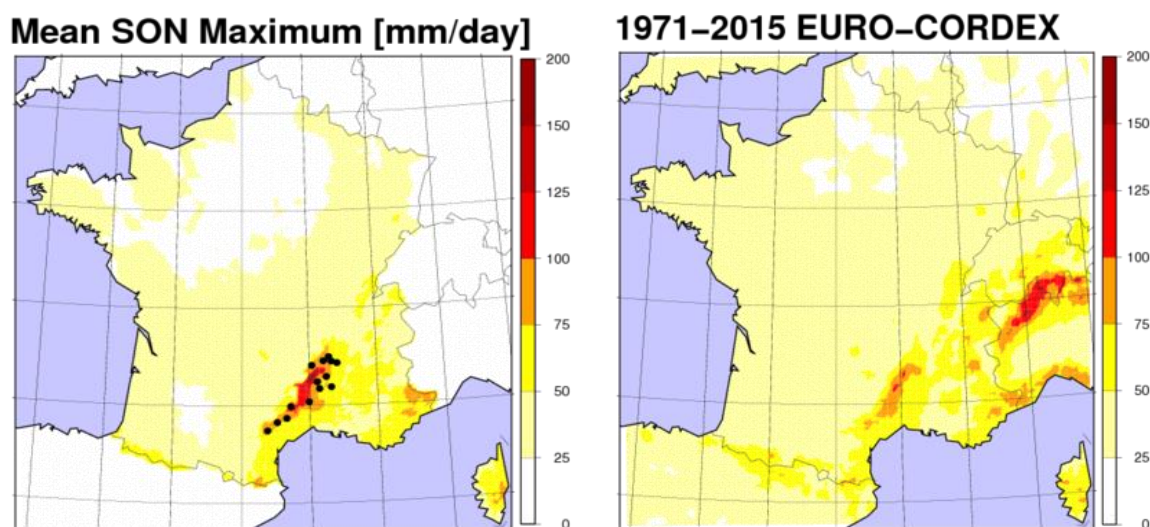


Figure 27 : (gauche) distribution de ces stations, avec la moyenne des maxima d'automne en France d'après les données SAFRAN moyennées sur une longue période historique ; (droite) figure équivalente pour la moyenne d'ensemble de la moyenne des maxima d'automne.

La seconde étude (Ribes et al., en cours) généralise la première et utilise l'ensemble des stations météorologiques disponibles sur le pourtour méditerranéen afin de ne pas particulariser le massif des Cévennes. Trois réseaux différents sont considérés, correspondant à différents niveaux de qualité des données : réseau complet (toutes les stations disponibles), réseau constant (stations couvrant l'intégralité de la période 1961-2015), et réseau homogène (stations couvrant

l'intégralité de la période et présentant de bonnes garanties d'homogénéité temporelle).

2) Circulation atmosphérique

La persistance remarquable au cours de l'automne 2014 des situations de blocage peut être mise en évidence à partir de l'analyse en régime où le nombre de jours de blocage (plus d'un jour sur 2) arrive largement en tête (depuis 1979) devant 2003 et 2011. Dans ce cas, une analyse des régimes est effectuée sur une zone plus réduite (voir Figure 28 à droite).

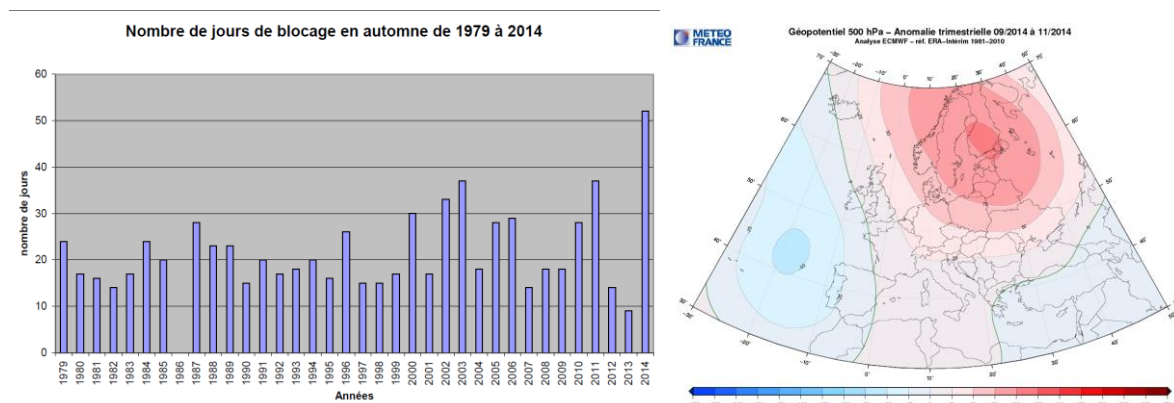


Figure 28 : (à gauche) évolution du nombre de jours de blocage en automne ; (à droite) structure du régime de blocage. Base : ERA-Interim

Modèles et évaluation

Nous utilisons ici également l'ensemble EURO-CORDEX, avec biais ajustés ou non. La figure 27 montre que les modèles EURO-CORDEX simulent correctement la structure des maxima d'automne en France, en comparaison à SAFRAN : les modèles, avec ou sans correction de biais, simulent bien la structure des maxima d'automne en France en comparaison aux données de SAFRAN, même si la moyenne des modèles sous-estime les valeurs sur la région des Cévennes. Dans ce cas les biais ne sont pas ajustés. Après ajustement, la structure et l'amplitude des extrema sont retrouvés, ce qui est sans surprise.

Détection et attribution

La première étude sur les Cévennes a analysé les tendances des maxima d'automne pour chaque station et sur l'ensemble des 14 sites. Elle a montré que des tendances sont aujourd'hui détectables mais la significativité reste faible compte tenu de la variabilité d'une année à l'autre. Cette analyse a été effectuée en groupant toutes les stations ensemble (Figure 29). Une tendance sur la moyenne sur les 14 sites mais aussi sur les valeurs mises ensemble est obtenue, avec un accroissement de 30% en près de 65 ans.

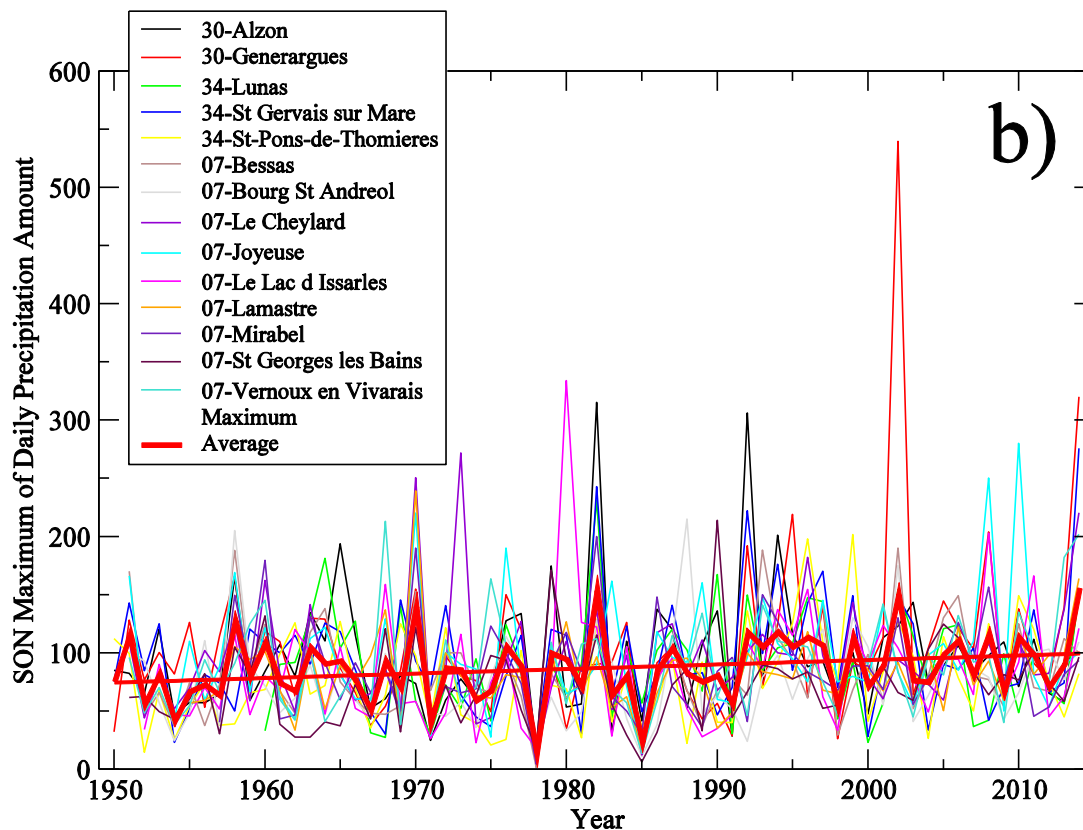


Figure 29 : tendances des maxima d'automne des cumuls journaliers des SQR de l'Hérault, du Gard et de l'Ardèche pour 14 stations, et leur moyenne (courbe rouge).

L'ajustement d'une loi de Gumbel sur l'ensemble des données (14 stations prises ensemble) a été réalisé (par nos collègues du KNMI), et a permis de montrer que dans le climat de 2014, la probabilité de dépasser une valeur de 300 mm/jour à un endroit donné a environ triplé par rapport à 1950, avec une incertitude très forte (figure 30; facteur de 1.3 à 12).

Une analyse comparable (mais avec ajustement d'une distribution GEV sans contrainte ni co-facteur sur deux périodes de 30 ans distinctes) a été réalisée avec les données EUROCORDEX avec biais ajustés (Figure 31). Cette analyse montre des résultats très similaires. Dans l'ensemble EUROCORDEX, la période de retour d'un dépassement de la valeur maximale de 2014 est supérieure (environ 300 ans) et un facteur d'environ 3 est trouvé avec la période de retour pour les années 1971-2000.

Une analyse comparable (mais avec un fit d'une distribution de GEV sans contrainte ni co-facteur et deux périodes de 30 ans distinctes) a été réalisée avec les données EURO-CORDEX avec biais ajustés (Figure 31). Cette analyse montre des résultats très similaires. Dans l'ensemble EURO-CORDEX, la période de retour d'un dépassement de la valeur maximale de 2014 est supérieure (environ 300 ans) et un facteur d'environ 3 est trouvé avec la période de retour pour les années 1971-2000.

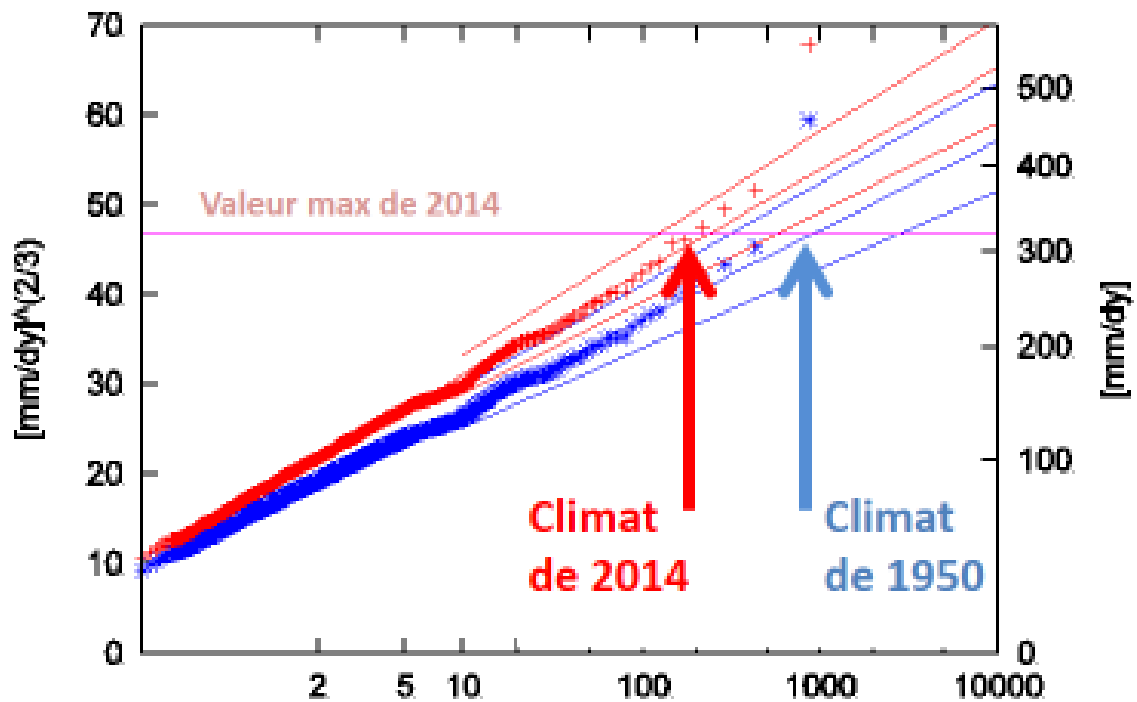


Figure 30 : Valeurs de retour en fonction de la période de retour pour les cumuls journaliers sur les 14 stations des Cévennes. D'après Vautard et al., (2015).

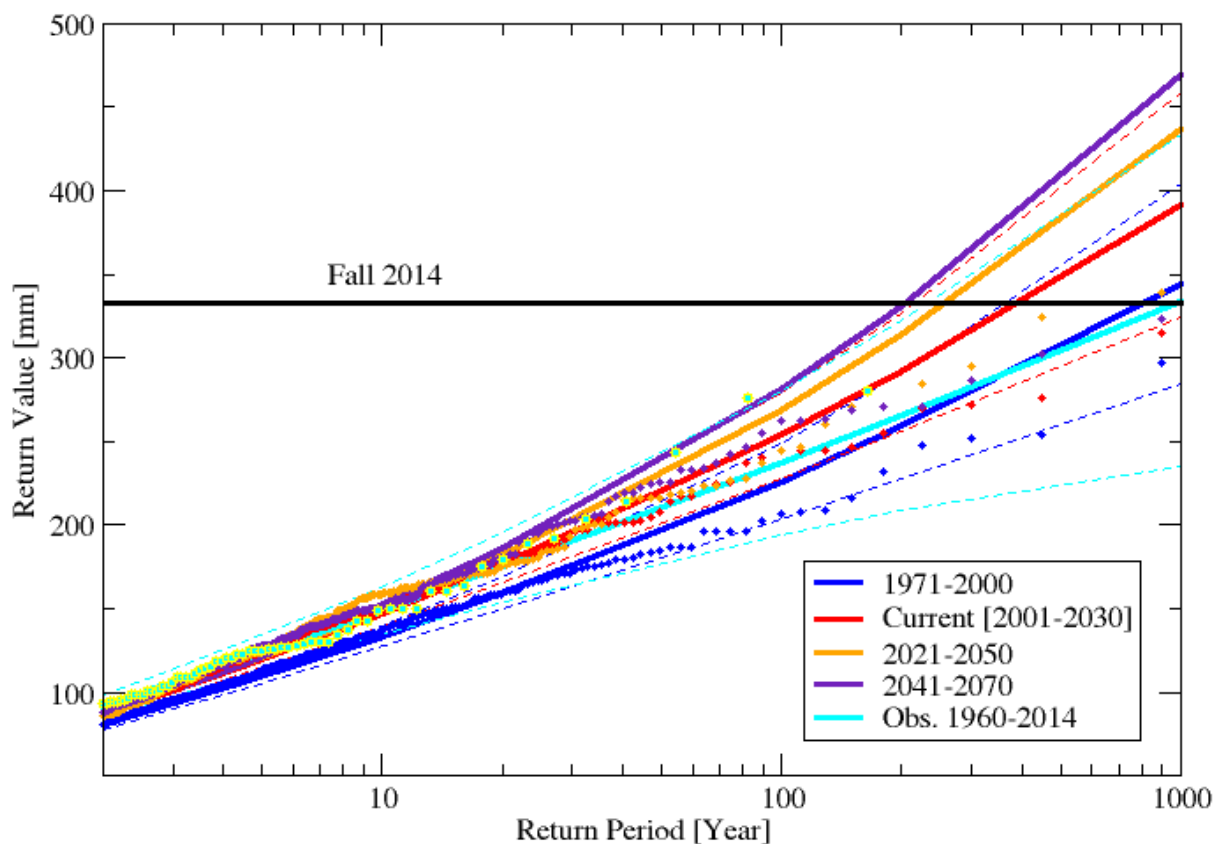


Figure 31 : Valeurs de retour en fonction de la période de retour pour les maxima d'automne des cumuls journaliers sur les 14 stations des Cévennes ensemble et

leurs incertitudes, pour différentes périodes, et pour les observations. Afin de prendre en compte le nombre réel de degrés de libertés (estimé à 3.2 dans Vautard et al., 2015), seulement 3 des 14 stations sont tirées au hasard, chaque année, pour chaque jeu de données.

L'étude élargie sur le Sud-Est de la France a confirmé ces résultats. L'analyse a été effectuée avec plusieurs méthodes et sur plusieurs réseaux d'observations en agrégeant les stations par classes, en fonction de leur similarité. L'analyse des tendances montre un résultat robuste quant à la technique d'agrégation et au changement de réseau (Figure 32), avec une augmentation des maxima d'environ 20% +/-15 %. L'analyse montre aussi que le taux de changement observé est environ une à trois fois plus fort que le taux de changement prédit par la loi de Clausius Clapeyron, un fait qui demande à être expliqué.

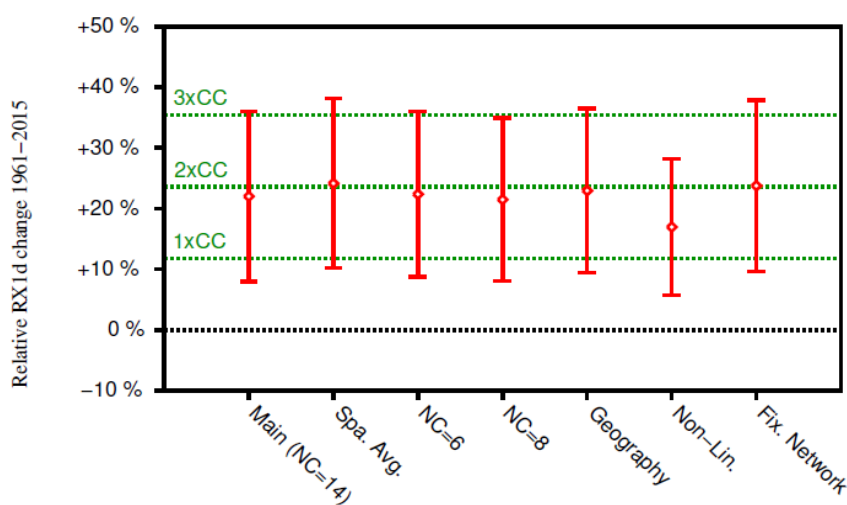


Figure 32 : tendance des maxima annuels (et intervalle de confiance à 90%) obtenue de différentes façons : (i) avec 14 classes, méthode de référence, (ii) en moyennant simplement toutes les valeurs sans regroupement par classes, (iii et iv) avec 6 et 8 classes au lieu de 14, (v) avec un algorithme de classification différent, (vi) en fittant une tendance non-linéaire, (vii) avec le réseau « fixe ». D'après Ribes et al. (2016, in preparation).

Une analyse des fréquences d'événements dépassant un seuil fixe a également été réalisée (Ribes et al., 2016, in preparation). La figure 33 montre la significativité (p -value) de la tendance linéaire sur le nombre de jours dépassant un seuil (en ordonnée), calculée sur les périodes de 1958 ou 1961 (selon le réseau) à l'année A (en abscisse). Cette figure montre qu'un signal significatif ne peut être obtenu que pour des valeurs élevées du seuil (200 mm au moins) et pour une période allant au moins jusqu'au milieu des années 1990.

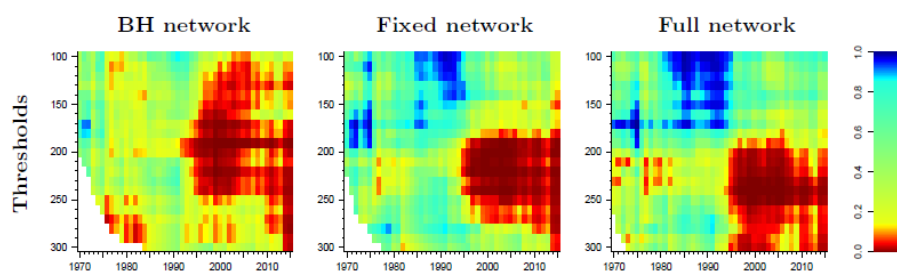


Figure 33 : Significativité (p -value) de la tendance linéaire sur le nombre de jours dépassant un seuil (en ordonnée), calculée sur les périodes de 1958 ou 1961 (selon le réseau) à l'année A (en abscisse). Chaque figure correspond à un réseau différent.

Conclusions et enseignements

Les pluies méditerranéennes, particulièrement marquées dans le massif des Cévennes, ont subi une augmentation importante (20% à 30% selon les cas étudiés, 20% semblant un nombre assez robuste). Le signal a pu être détecté dans les observations malgré une variabilité interannuelle très forte, qui explique une incertitude d'environ $\pm 15\%$ sur le signal d'intensification. Le signal est émergent, il ne devient significatif que récemment, et il n'est présent que pour les forts cumuls. Par exemple, le nombre de jours de dépassement d'un seuil n'est significatif que pour un seuil au-delà de 200 mm/jour.

Des résultats similaires sont obtenus à partir des simulations EURO-CORDEX, en comparant deux périodes de climat décalées de 30 ans. Ces éléments semblent montrer un rôle du changement climatique d'origine humaine dans l'augmentation des probabilités d'événements observés. Toutefois une certaine prudence est à conserver, car les phénomènes qui sont en jeu sont représentés de façon paramétrisée dans ces modèles. Les nouvelles expériences prévues dans le cadre de CORDEX devraient permettre de mieux répondre à cette question.

3.3.4 Les pluies extrêmes de Mai 2016

Note importante : La partie « attribution » de cette étude a été réalisée par le KNMI, en lien avec l'Université d'Oxford. Météo-France et l'IPSL ont contribué par l'apport des observations, d'informations sur l'hydrologie, et des simulations pour ce rapport. Un article a été soumis à la revue HESS (van Oldenborgh et al., 2016). L'analyse est encore en cours et devrait encore conduire à d'autres études et, peut-être, publications. Nous ne faisons ici qu'en résumer les résultats actuels.

Synthèse communicable en 100 mots

Un épisode de 3 jours de pluies quasi-continues a eu lieu sur le centre de la France les 29-30-31 mai 2016, occasionnant des inondations dans les bassins de la Loire et de la Seine. L'augmentation de fréquence de ce type

d'événement n'est pas détectable dans les observations. En revanche, les simulations de plusieurs ensembles de modèles montrent une augmentation robuste d'un facteur 1.5-2 environ par rapport à un climat sans activités humaines ou à une période climatique de la fin du 20^{ème} siècle. Il est donc probable que les activités humaines aient provoqué une augmentation de ces phénomènes.

L'événement, en bref

A partir du week-end des 28 et 29 mai 2016, de nombreuses régions du Nord de la France ont connu des cumuls de précipitations particulièrement importants, dans certains cas exceptionnels. Sur la période du 28 (10h) au 31 mai (10h), les départements les plus affectés par ces fortes pluies ont été le Loir-et-Cher, le Loiret et l'Yonne. Avec en moyenne 92,9 mm* sur le département du Loiret, la quantité d'eau tombée en trois jours est sans équivalent sur la période 1960 à nos jours. De tels cumuls sont atteints en moyenne tous les 10 à 50 ans, localement tous les 100 ans.

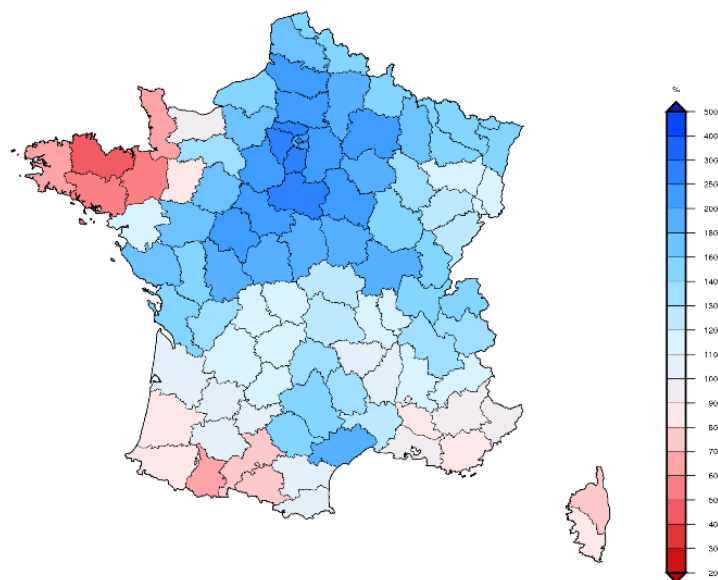
En Île-de France, les cumuls relevés sur ces 3 jours sont atteints en moyenne tous les 10 à 50 ans (à Paris-Montsouris, on a relevé 83 mm).

Dans sa globalité, le mois de mai 2016 est exceptionnel. De nombreux records mensuels de précipitations ont en effet déjà été battus : à la station de Paris-Montsouris, on a relevé depuis le début du mois 176 mm, soit environ 3 mois de précipitations (ancien record : 133 mm en mai 1992). À Orléans, on a relevé 178 mm, également environ 3 mois de précipitations (ancien record : 148 mm en mai 1985).

À l'échelle de la région Île-de- France, c'est le mois le plus pluvieux, tous mois confondus, depuis 1960.

Rapport à la normale de référence 1981-2010 des cumuls mensuels
de précipitations agrégées
France

Mai 2016



 **MÉTÉO FRANCE**
Toujours un temps d'avance

Edité le : 31/05/2016 - Données du : 31/05/2016 à 13:30 UTC

Figure 34 : Rapport à la normale de référence 1981-2010 des cumuls mensuels de précipitations par département en mai 2016 (source SAFRAN)

Indicateurs utilisés

Les indicateurs utilisés sont ici les cumuls printaniers (Avril-Mai-Juin) sur 3 jours maximaux. Les domaines géographiques utilisés sont (Figure 35):

- Le bassin de la Seine
- Le bassin de la Loire

Dans cette première phase de l'étude, les données historiques disponibles en accès libre ont été utilisées

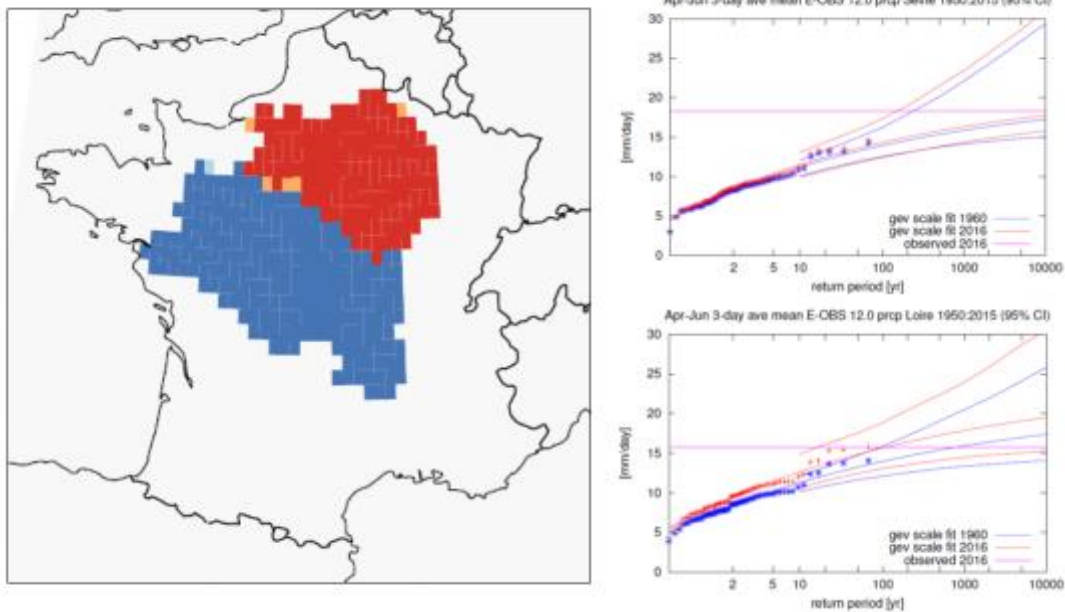


Figure 35 : (gauche) domaines utilisés pour calculer l'indicateur ; (droite) : Valeurs de retour vs. Période de retour pour les maxima printaniers de cumul sur 3 jours, avec l'analyse GEV avec co-facteur, pour la Seine (haut) et la Loire (bas). D'après van Oldenborgh et al. (2016)

Modèles et évaluation

Pour l'analyse de la détection et l'attribution de cet événement, plusieurs ensembles de modèles ont été utilisés :

L'ensemble EURO-CORDEX (8 modèles, résolution 12 km), avec un ajustement des biais simplement multiplicatif pour avoir une moyenne égale,

L'ensemble HadGEM3-A réalisé au sein du projet EUCLEIA (Christidis et al., 2013), constitué de 15 membres de simulations atmosphériques forcées par les SSTs observées,

Un ensemble réalisé avec EC-Earth (Hazeleger et al., 2010), constitué de 16 simulations couplées transitoires,

Un ensemble « weather@home » de 200 membres par an utilisant des SSTs forcées et de plusieurs milliers de membres pour re-simuler les années 2014-2015-2016 avec une méthodologie similaire à Schaller et al. (2016),

Un ensemble de 16 membres du modèle EC-EARTH avec une descente d'échelle régionale à 12 km par le modèle RACMO

Dans la plupart des cas les simulations ont été jugées de qualité suffisante pour réaliser les expériences sauf pour l'ensemble EC-EARTH pour lequel les précipitations ont un biais trop important. Cet ensemble a donc été écarté.

Détection et attribution

La figure 35 montre qu'une légère tendance à l'augmentation est observée, mais n'est pas statistiquement significative. En revanche, la Table 3 ci-dessous montre que les ensembles de modèles trouvent généralement une augmentation robuste du risque du aux activités humaines, d'un facteur 2 environ en combinant les expériences.

Seine	1960–2016	natural–2016
HadGEM3A	1.9 (1.1... 3.4)	2.5 (1.1... 6.3)
HadGEM3A Nat		2.0 (0.6... 7.2)
Weather@Home		2.1 (0.6... 5.0)
RACMO	2.0 (1.3... 4.9)	2.8 (1.4... 11)
CORDEX	1.6 (0.5 to 4.9)	2.0 (0.3... 11)
Combined		2.3 (>1.6)
Loire	1960–2016	preind.–2016
HadGEM3A	1.2 (0.8... 2.4)	1.3 (0.8... 3.7)
HadGEM3A Nat		1.8 (0.7... 4.1)
Weather@Home		1.8 (1.2... 2.7)
RACMO	1.8 (1.3... 3.2)	2.5 (1.4... 5.8)
CORDEX	2.0 (1.1... 3.6)	2.6 (1.1... 6.8)
Combined		2.0 (>1.4)

Table 3 : Résumé des changements de risques de cumuls maximaux sur 3 jours au printemps entre le climat de 2016 et un climat contrefactuel (soit période passée soit expérience sans activités humaines). D'après van Oldenborgh et al. (2016).

Conclusion et enseignements

Les pluies du printemps 2016 sur la France ont occasionné des cumuls exceptionnels. S'il n'a pas été possible de détecter une tendance significative dans les observations, en combinant plusieurs ensembles de simulations réalisées dans plusieurs centres, un signal significatif a été détecté. La probabilité d'accumulation de pluie sur 3 jours excédant celle observée sur les bassins de la Seine et de la Loire a augmenté d'un facteur 2 environ dans ces simulations.

On peut donc conclure que le changement climatique a certainement joué un rôle dans l'augmentation des risques de telles fortes pluies. Pourtant là encore une certaine prudence doit être apportée, car les modèles utilisés ne simulent pas explicitement la convection. Néanmoins le résultat est en accord avec la physique des processus.

Enfin, il est important de signaler que cet exercice a, de façon volontaire, été réalisé en temps quasi-réel. La version finale des résultats était obtenue deux semaines après l'événement. Ont été utilisés les observations et simulations disponibles en temps réel pour pouvoir y arriver. Ainsi, d'autres jeux d'observations (par exemple SAFRAN), de simulations, peuvent être utilisés dans une analyse en temps différé. Toutefois l'analyse a pu être réalisée avec un nombre important de simulations, suffisamment pour que des conclusions robustes puissent être tirées.

Ce type d'analyse rapide fait intervenir des jeux de données et des chaînes de calcul existants en temps réel, et peuvent, dans un cadre ultérieur, être réalisés en temps quasi-réel.

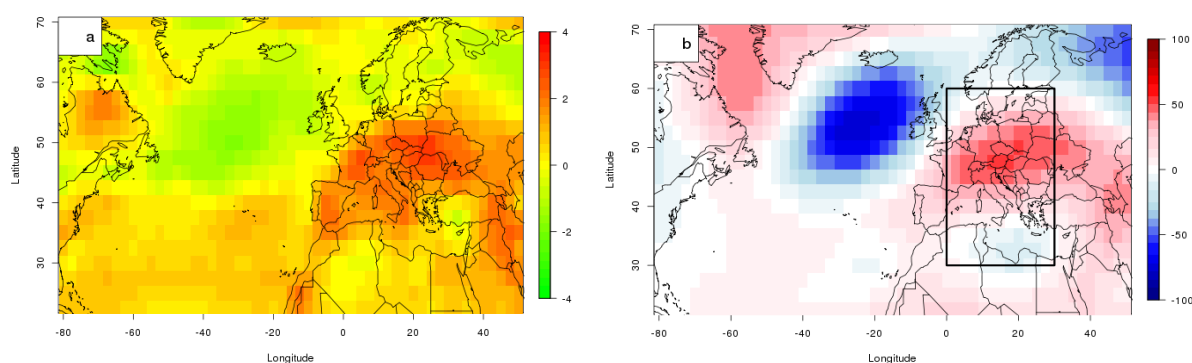
3.3.5 La vague de chaleur et a sécheresse de l'été 2015

Synthèse communicable en 100 mots

L'été 2015 est le deuxième été le plus chaud observé en France. Il a notamment été marqué par deux vagues de chaleur en Juillet. L'anomalie de température a été accompagnée d'une anomalie anticyclonique sur l'Europe. Il a été étudié à travers deux méthodes de détection et attribution conditionnelle à la circulation atmosphérique. Si les deux méthodes s'accordent pour dire que le changement climatique a augmenté l'intensité de l'événement, elles diffèrent quant à leur quantification de cette augmentation. La méthode des analogues de circulation détecte une augmentation de 1,1°C tandis que la méthode des simulations régionales attribue 0,3°C au changement climatique.

L'événement, en bref

L'été 2015 a été le deuxième été le plus chaud depuis le début des données dont nous disposons, avec une anomalie de 2°C par rapport à la moyenne de référence sur la période 1949-2015 (voir la figure 36c). La tendance linéaire (ligne rouge sur la figure 36c) est significative ($p\text{-value} < 0.05$). Elle est de 0.3°C/décennie. Cette anomalie de température a touché l'Europe centrale et méditerranéenne (voir la figure 356a). Elle a été accompagnée par une anomalie anticyclonique persistante (voir la carte de Z500 36b).



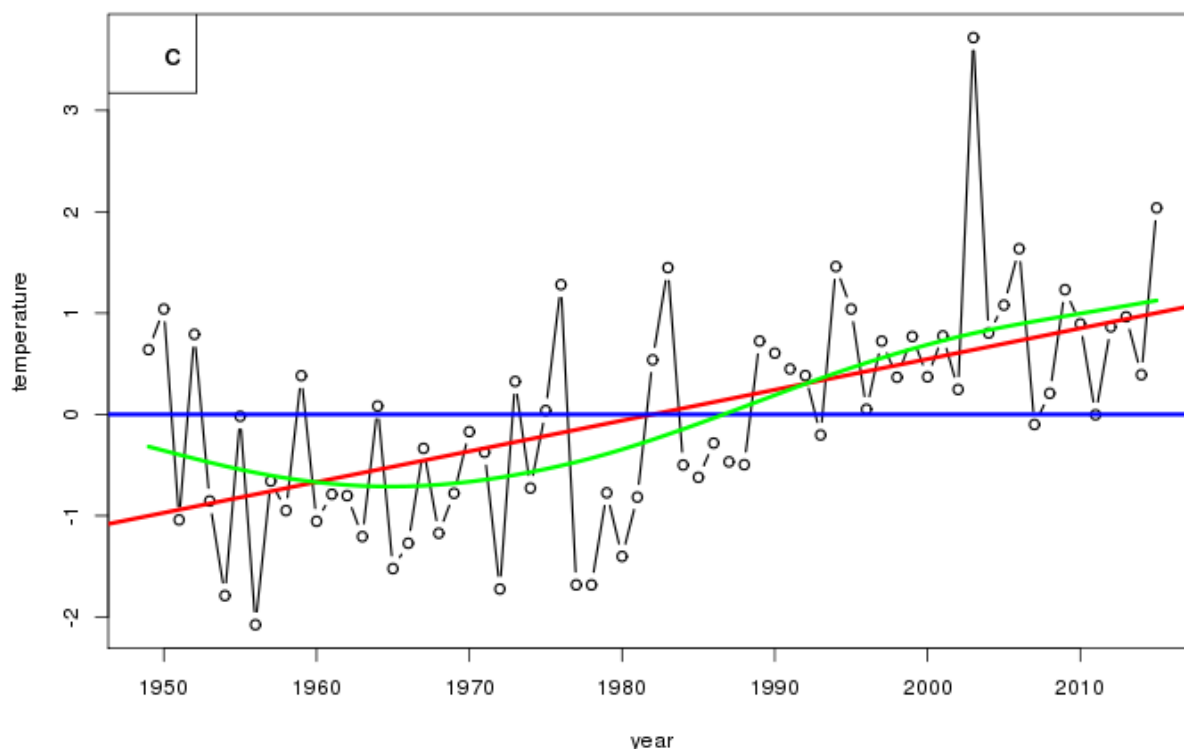


Figure 36 : Caractéristiques de l'été 2015. a) Anomalie de température sur la région Nord Atlantique moyennées sur tout l'été b) Anomalie de géopotentiel à 500 hPa (Z500) sur la région Nord Atlantique, moyennée sur tout l'été. Le rectangle noir délimite la région de calcul des analogues. c) Evolution de l'indicateur thermique national de Météo France entre 1948 et 2015.

A l'échelle nationale, deux épisodes de canicule ont concerné la France en juillet 2015, entrecoupées d'un léger rafraîchissement du 8 au 14 sur la quasi-totalité des régions. De nombreux records absolus de températures ont été battus. Sur la période, les températures maximales sont restées généralement 2 à 9 °C au-dessus des normales, hormis les 8 et 9. Les nuits ont été également très chaudes notamment du 1^{er} au 5. Ces températures élevées associées à une faible pluviométrie ont engendré un assèchement très important des sols, notamment sur un large quart nord-est du pays.

- Du 30 juin au 7 juillet, une puissante dorsale anticyclonique axée du Maroc à la France et au sud des îles Britanniques a généré un flux de sud - sud-ouest sur le pays. Cette configuration météorologique particulière a favorisé une, remontée d'air d'origine saharienne sur la France, via la péninsule ibérique, qui a été à l'origine de la vague de fortes chaleurs. Un premier épisode caniculaire précoce a ainsi affecté une partie de l'Europe occidentale, notamment la France. Sa durée et le niveau des températures atteintes ont été variables selon les régions (de 4 jours dans la moitié ouest, jusqu'à 8 jours dans le Centre-Est). Les régions méditerranéennes ont été relativement épargnées.

- La seconde vague de chaleur, survenue entre le 15 et le 22 juillet, a particulièrement affecté les régions s'étendant du Sud-Ouest au Nord-Est ainsi que

les régions méditerranéennes. Les remontées d'air chaud ont concerné le sud et le nord-est du pays alors que les régions du Nord et du Nord-Ouest subissaient un flux perturbé plus frais. Sur le quart sud-est, la forte chaleur a perduré jusqu'au 24.

Des températures supérieures à 35 °C ont été souvent observées des plaines du Sud-Ouest à la basse vallée du Rhône, dépassant 40 °C le 16 dans le Limousin.

Les sols superficiels se sont asséchés sur la majeure partie du pays suite à un déficit pluviométrique depuis le début du printemps. Du Limousin au Nord-Est, cet assèchement s'est accentué au cours du mois de juillet suite aux faibles précipitations et aux températures exceptionnellement élevées.

En juillet, de nombreux records de faible pluviométrie ont été battus notamment dans le Limousin, en Bourgogne et en Champagne avec 12.2 mm à Limoges (Haute-Vienne), 8.6 mm à Châtillon-sur-Seine (Côte d'Or) et seulement 5.4 mm à Troyes (Aube). Sur la Côte d'Azur et en Corse, les pluies ont été quasiment absentes : à Nice (Alpes-Maritimes), à Bastia (Haute-Corse) et à Figari (Corse-du-Sud), il n'est pas tombé une goutte.

Ainsi, fin juillet, la sécheresse superficielle des sols a été une des plus sévères depuis 1959. Elle a perduré jusqu'à la fin de l'été du nord du Massif central à la Lorraine et à l'Alsace.

Indicateur utilisé

L'indicateur utilisé est l'anomalie par rapport à la période 1948-2015 de l'indicateur thermique national de Météo-France (Section 3.2).

A partir de l'indicateur thermique national, on met en évidence 2 évènements successifs du 30 juin au 7 juillet et du 15 au 24 juillet (Figure 1). A l'échelle départementale, le nombre de vagues de chaleur rencontrées au cours de l'été a été très variable avec de 0 à 3 évènements pour des durées dépassant parfois les 20 jours.

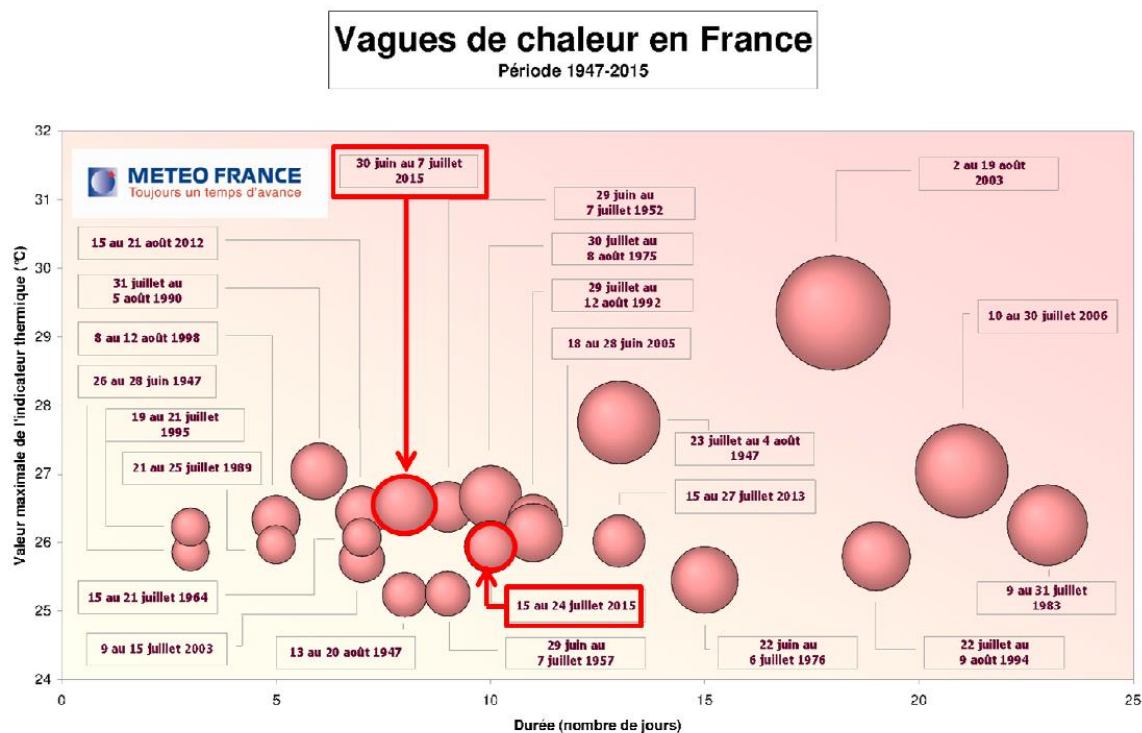


Figure 37 : Recensement national des vagues de chaleur en France de 1947 à 2015 selon la méthode opérationnelle basée sur l'indicateur thermique national. La surface des bulles indique la sévérité des vagues de chaleur. Les deux vagues de chaleur de l'été 2015 sont encadrées par un cercle rouge.

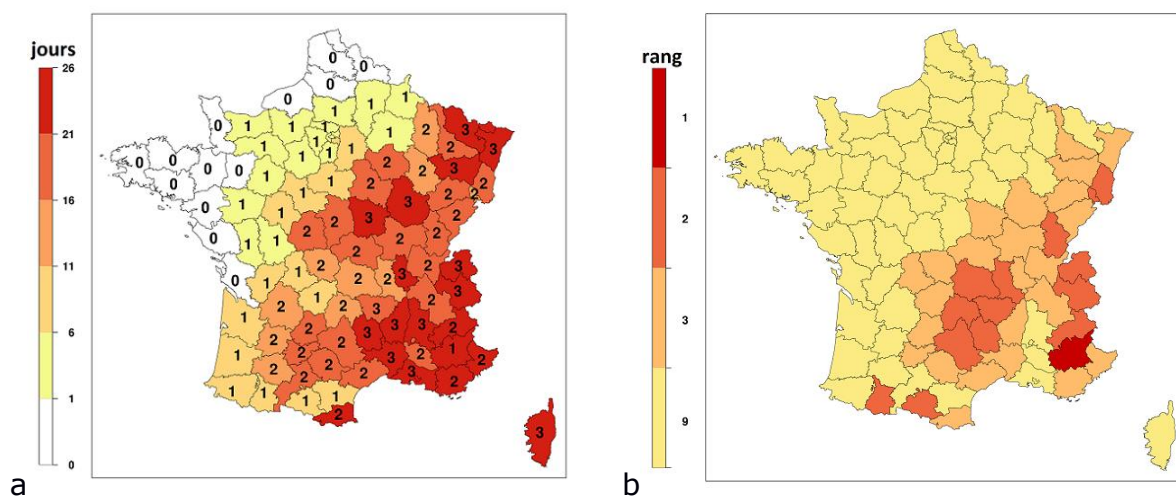


Figure 38 : Caractérisation spatiale des vagues de chaleur de l'été 2015 en France : a) nombre de vagues de chaleur (chiffres à l'intérieur de chaque département) et durée totale en jours (échelle de couleur) ; b) rang depuis 1959 des vagues de chaleur de l'été 2015 en termes de sévérité.

Données, modèles et méthodologies

Deux méthodes de détection et attribution conditionnelles à la circulation ont été effectuées pour ce cas d'étude. La première repose sur les analogues de circulation (cf. section 3.1.4 pour le détail de la méthode). Le géopotential à 500 hPa (Z500) utilisé pour calculer les analogues est issu de la réanalyse NCEP I (Kalnay et al. 1996). L'étude est en deux parties. Il s'agit d'abord de mettre en évidence le rôle de la circulation de grande échelle dans les températures élevées de l'été 2015. On compare donc les températures reconstituées à partir d'analogues à celles reconstituées en piochant des jours aléatoirement (Figure 39a). Afin de mieux simuler les anomalies de température aléatoire, en intégrant la persistance de la circulation, on les reconstitue en piochant un jour sur trois (boîte à moustache au milieu de la figure). Il est ensuite possible de comparer les reconstitutions de température pour des analogues piochés dans les périodes ancienne (1949-1981), et récentes (1982-2014) (Figure 39b).

La seconde méthode repose sur des simulations régionales (cf. section 3.1.6 pour le détail de la méthode) réalisées à partir du modèle WRF (Skamarock et al., 2005). Deux ensembles de simulation sont effectués, à dynamique fixée, dans un monde factuel (avec les températures de surface de la mer (TSM) et les concentrations de gaz à effet de serre (GES) observées) et dans un monde contrefactuel (avec des TSM et des GES préindustrielles). Les températures obtenues dans les deux mondes sont comparées dans la Figure 38. Les diagrammes de la Figure 38 sont obtenus en utilisant les coordonnées des stations utilisées pour calculer l'indicateur thermique national, de sorte que les résultats des deux méthodes soient comparables.

Détection et attribution

Pour la méthode des analogues, on peut observer sur la Figure 38 a) que la dynamique permet en effet d'expliquer une partie de l'anomalie de température observée (en moyenne, les températures analogues sont de 0.9°C d'anomalie sur 2°C au total). Lorsque que l'on compare la distribution à circulation fixée à l'anomalie de température de l'été 2015 une fois la tendance retranchée (ligne orange), l'événement n'apparaît plus comme un extrême conditionnellement à la circulation. La différence d'anomalies de température à circulation fixée entre les périodes ancienne et récente est de 1,1°C (voir figure 38b)

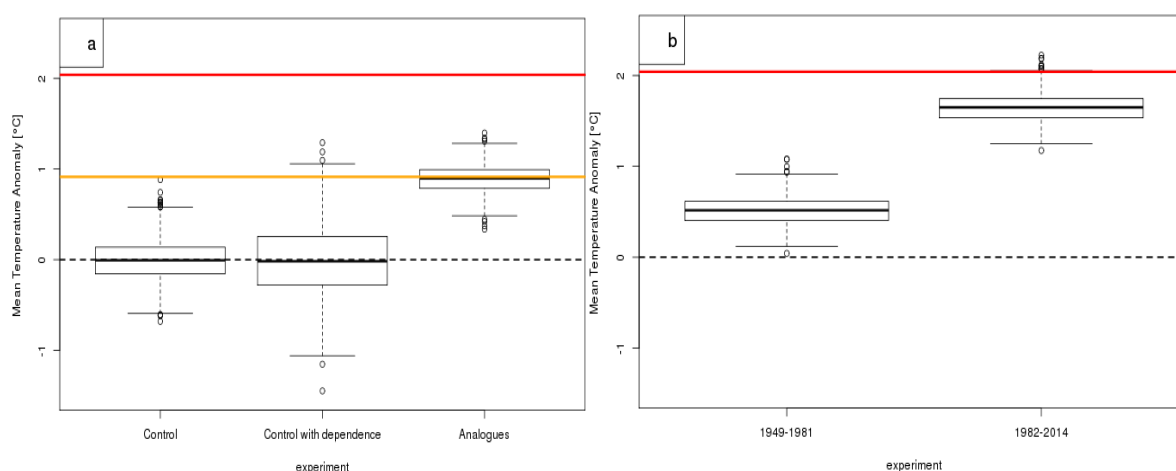
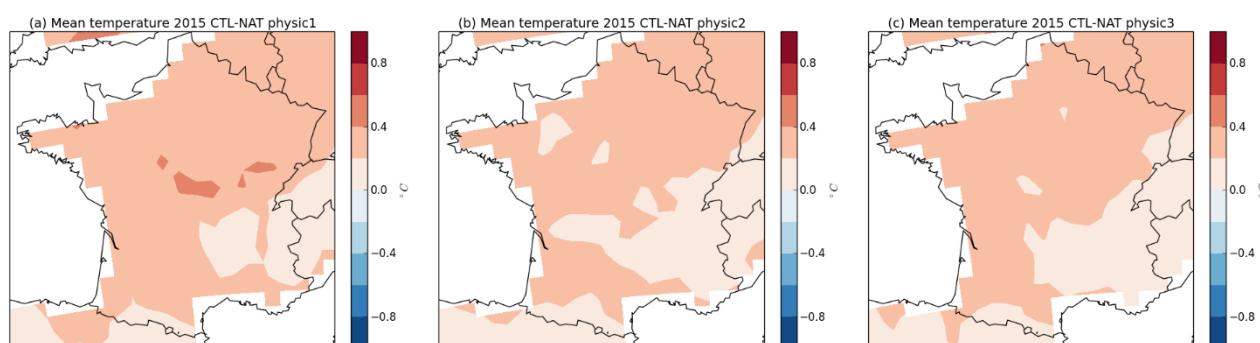


Figure 38 : Analyse de l'été 2015 par la méthode des analogues. a) Comparaison des densités de probabilités d'anomalie de température auxquelles on a retranché la tendance (indicateur thermique national) entre des événements reconstitués aléatoirement ou en piochant des analogues. En rouge, l'anomalie de température pour l'été 2015, en orange la même anomalie à laquelle on a retranché la tendance. b) Comparaison des densités de probabilités d'anomalie de température pour des événements reconstitués en piochant des analogues dans les périodes 1949-1981 et 1982-2014. En rouge, l'anomalie de température pour l'été 2015.

Avec la méthode à base de simulations régionales, la différence de température entre les mondes factuel et contrefactuel est de 0.27°C en moyenne. Cette différence est très faible, comparée à la tendance de $0,3^{\circ}/\text{décennie}$ sur la moyenne de l'indicateur thermique. A noter que l'essentiel de l'anomalie de température observée en été 2015 se concentre sur l'Est et le Sud-Ouest de la France, et que cette différence ne se retrouve pas sur les cartes de différences de températures représentées sur la figure 39a).



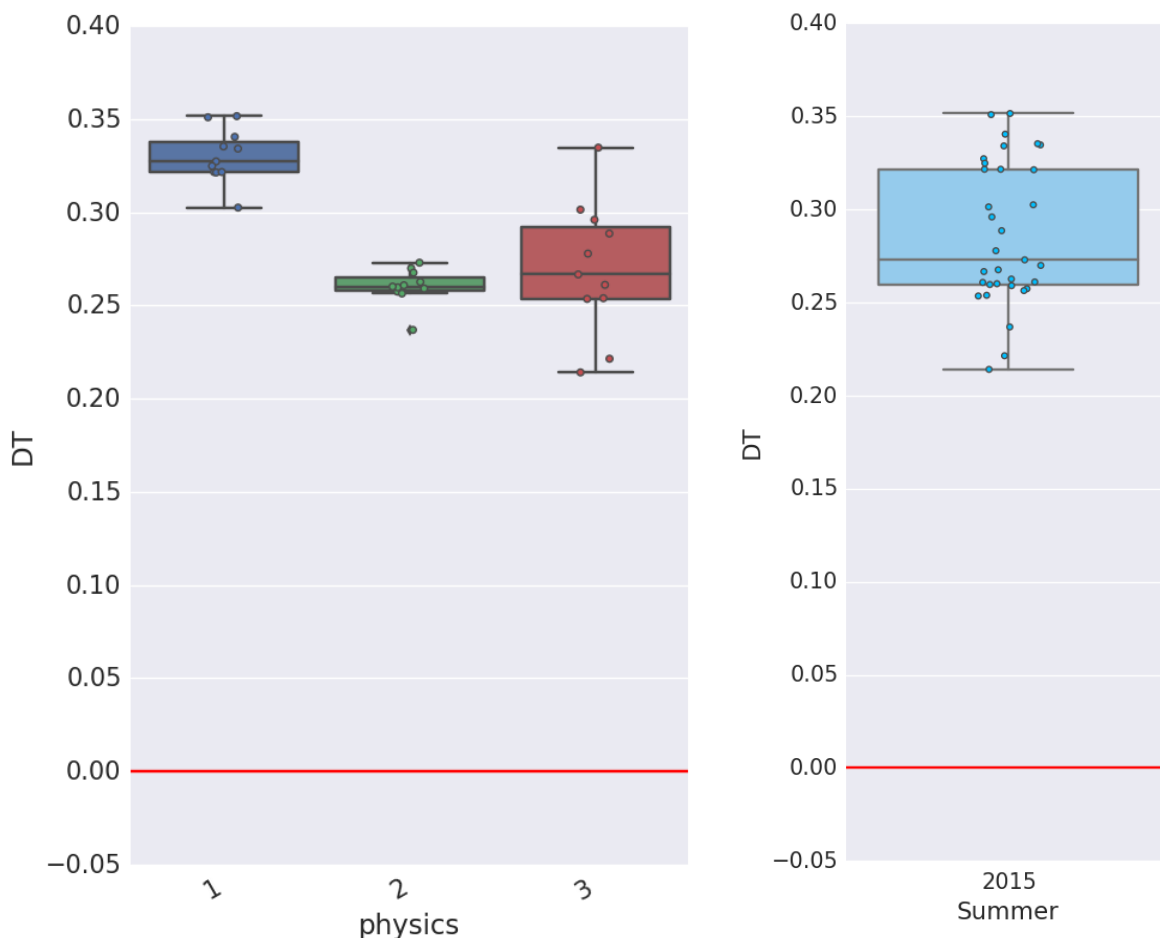


Figure 39 : Analyse de l'été 2015 par la méthode des simulations régionales à haute résolution. a) Cartes de France des différences de température entre les mondes factuel et contrefactuel pour chacune des 3 physiques étudiées. b) Distribution des différences d'indicateur thermique national entre monde factuel et contrefactuel pour chacune des 3 physiques étudiées. c) Distribution des différences d'indicateur thermique national entre monde factuel et contrefactuel pour les 3 physiques étudiées ensemble.

Discussion

Les résultats obtenus pour les deux méthodes sont donc assez différents. On pourrait s'attendre a priori à ce que la différence entre monde factuel et contrefactuel soit plus grande que celle entre monde récent et monde ancien, car il y a moins d'années de changement climatique entre ces deux derniers mondes qu'entre les deux premiers. Pourtant, dans le premier cas, on trouve une différence de moins de 0,3 °C et dans le second, une différence de plus d'1°C. Cette différence est à modérer par la différence entre les deux méthodes. Dans un cas, on utilise uniquement des observations, tandis que dans l'autre on utilise un modèle. Le conditionnement à la circulation se fait différemment. Les analogues reproduisent moins fidèlement la circulation de l'événement étudié que le « nudging » des vents. La définition des mondes est également différente. Dans le premier cas, on ne peut que détecter une différence de température, sans pouvoir l'attribuer directement au changement climatique, puisqu'elle peut être liée à de la

variabilité interne entre deux sous périodes de 33 ans tandis que dans le second cas, on peut réellement parler d'attribution au changement climatique conditionnée à la circulation et à une structure de la TSM.

Ceci étant dit, l'intérêt de comparer ces deux méthodes est qu'elles ont justement beaucoup de points communs, par rapport aux autres méthodes de détection et attribution que l'on peut trouver dans la littérature. La différence peut s'expliquer par la variabilité interne qui noie le signal du changement climatique pour la méthode des analogues, et par les difficultés du modèle WRF à reproduire correctement les conditions caniculaires de l'été 2015.

Une approche événementielle a également été menée en climat futur à partir des projections EURO-CORDEX (RCP 4.5 et RCP8.5). Une analyse spécifique a été menée pour comparer les vagues de chaleur projetées à différents horizons temporels avec la vague de chaleur de l'été 2015 (idem 2006 et 2003) (Figure 40).

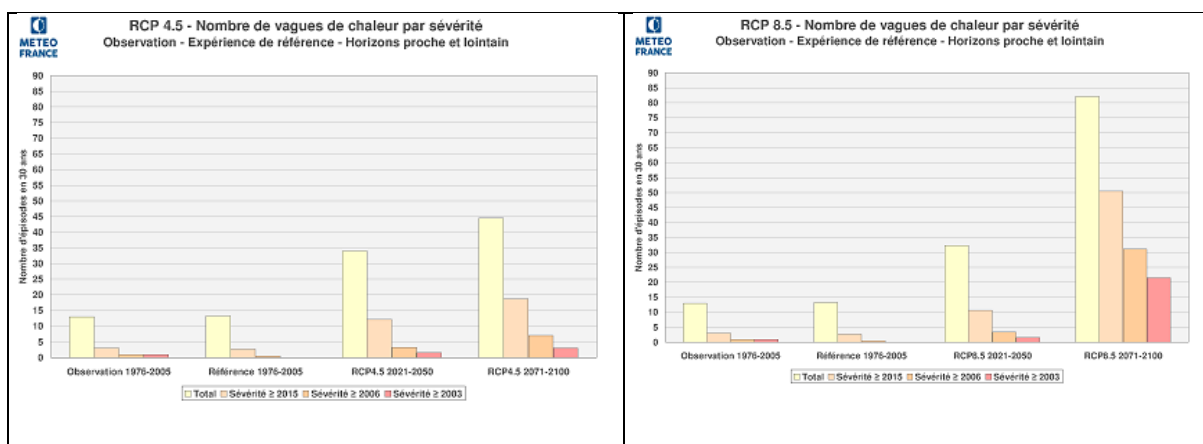


Figure 40 : Nombre de vagues de chaleur par sévérité en climat futur (EURO-CORDEX RCP4.5 et RCP8.5) par comparaison à celle des étés 2015, 2006 et 2003

3.3.6 Le mois de décembre 2015 très chaud

Synthèse communicable en 100 mots

Le mois de décembre 2015, mois de décembre le plus chaud jamais observé en France, a été étudié à travers plusieurs méthodes de détection et attribution. Les résultats d'attribution conditionnelle à la circulation montrent que les activités humaines ont modifié de façon significative la température de cet épisode. La méthode des analogues détecte un changement d'intensité de 0,6°C en 33 ans, tandis que la méthode de 0,25°C. D'après l'analyse faite sur les simulations EUROCORDEX, ce type d'événement ne peut pas se produire dans un climat sans influence humaine, et deviendra plus probable au cours du XXIème siècle.

L'événement, en bref

Le mois de décembre 2015 a été le mois de décembre le plus chaud depuis le début des données dont nous disposons, avec une anomalie de 4°C par rapport à la moyenne de référence sur la période 1949-2015 (voir la figure 41c). La tendance linéaire (ligne rouge sur la figure 41c) est significative ($p\text{-value} < 0.05$). Elle est de 0.2°C/décennie. Cette anomalie de température à l'ensemble de l'Europe, en particulier l'Allemagne et la France (voir la figure 41a). Elle a été accompagnée par une anomalie anticyclonique persistante (voir la carte de Z500 41b).

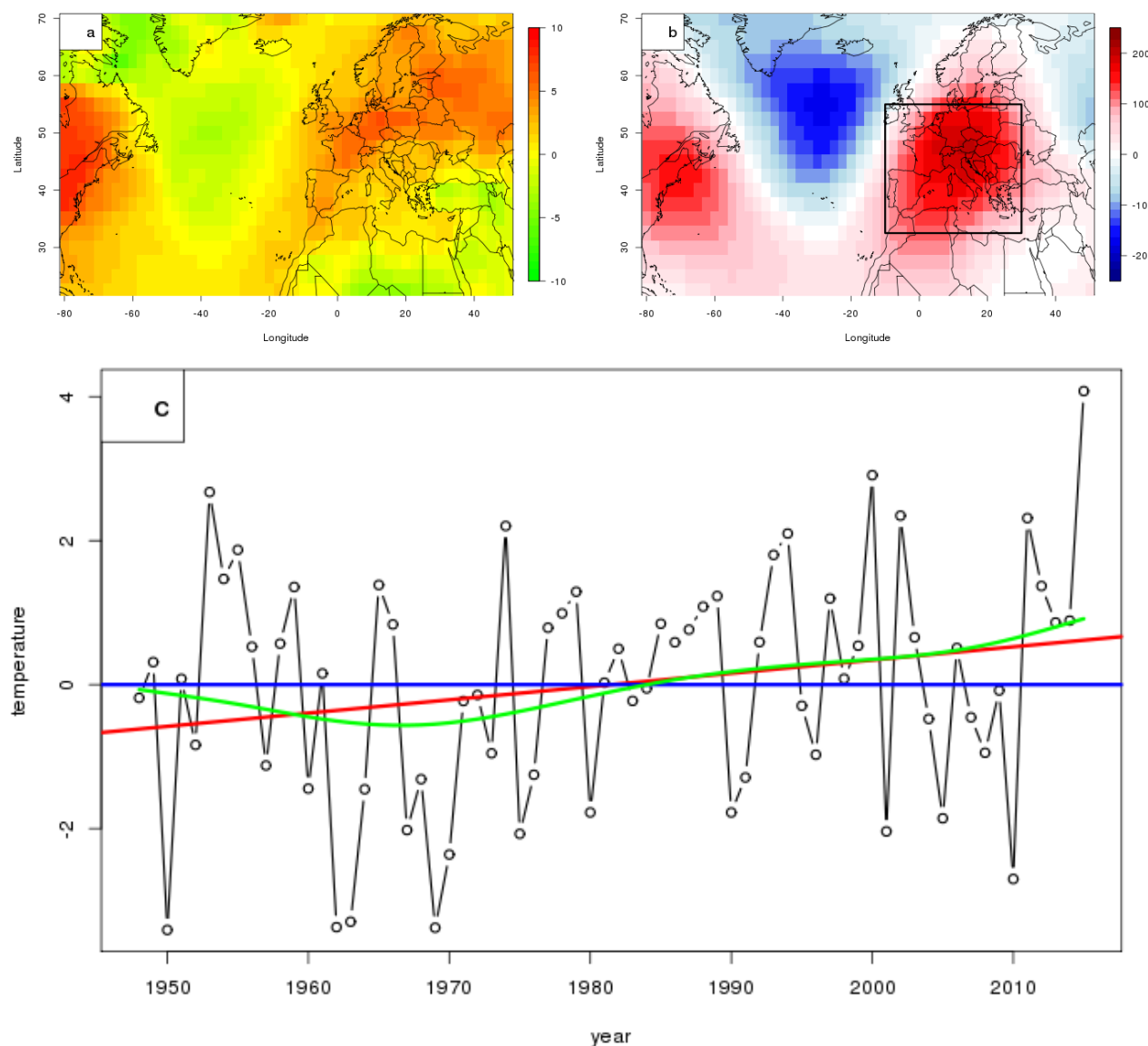


Figure 41 : Caractéristiques du mois de décembre 2015. a) Anomalies de température sur la région Nord Atlantique b) Anomalies de géopotentiel à 500 hPa (Z500) sur la région Nord Atlantique. Le rectangle noir délimite la région de calcul des analogues. c) Evolution de l'indicateur thermique de Météo France entre 1948 et 2015.

Dans la continuité du mois de novembre, décembre 2015 a été marqué par des températures inhabituelles pour la saison, supérieures à celles d'un mois de mars!

En moyenne sur la France et sur le mois, les températures maximales ont dépassé 13 °C, soit près de 5 °C au-dessus de la normale*. La durée de l'épisode de douceur a été remarquable pour la saison, comme le faible nombre de jours de gel notamment sur la moitié nord du pays. Avec une température moyenne qui a dépassé les valeurs de saison de 3.9 °C, c'est le mois de décembre le plus chaud en France depuis 1900, loin devant 1934 et 2000 (anomalies de +2.8 °C).

La pluviométrie a également présenté un caractère exceptionnel : les cumuls ont été extrêmement faibles pour cette période de l'année sur l'ensemble du pays comme le nombre de jours de pluie significative (cumul quotidien supérieur ou égal à 1 mm). Seuls le sud de la Bretagne et la Loire-Atlantique ont présenté un déficit moins important. En moyenne sur la France et sur le mois, la pluviométrie, déficitaire* de plus de 70 %, a été la plus faible enregistrée en décembre sur la période 1959-2015.

Indicateurs utilisés

1. Indicateurs agrégés

L'indicateur thermique agrégé (Section 3.2) a été utilisé. La figure 42 montre son évolution pour la moyenne sur chaque mois de décembre depuis le milieu du 20^{ème} siècle. La figure 43 représente l'anomalie tant en termes de température que de précipitation pour Décembre 2015.

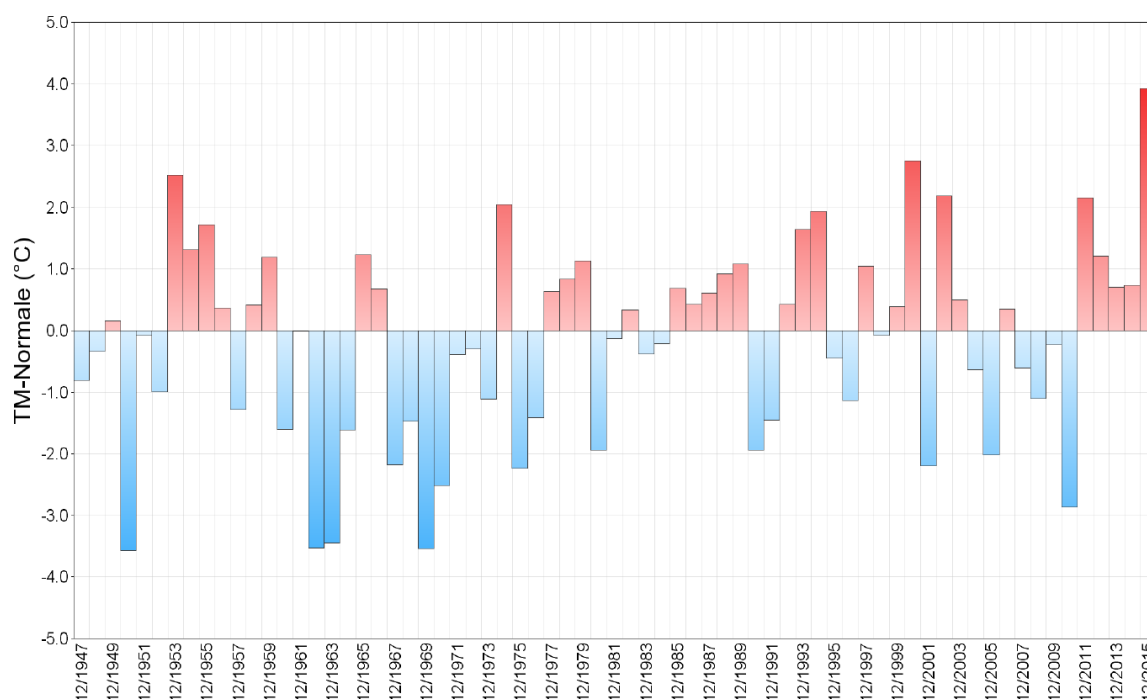


Figure 42 : Anomalie mensuelle de température moyenne en France en décembre de 1947 à 2015 (base indicateur thermique national)

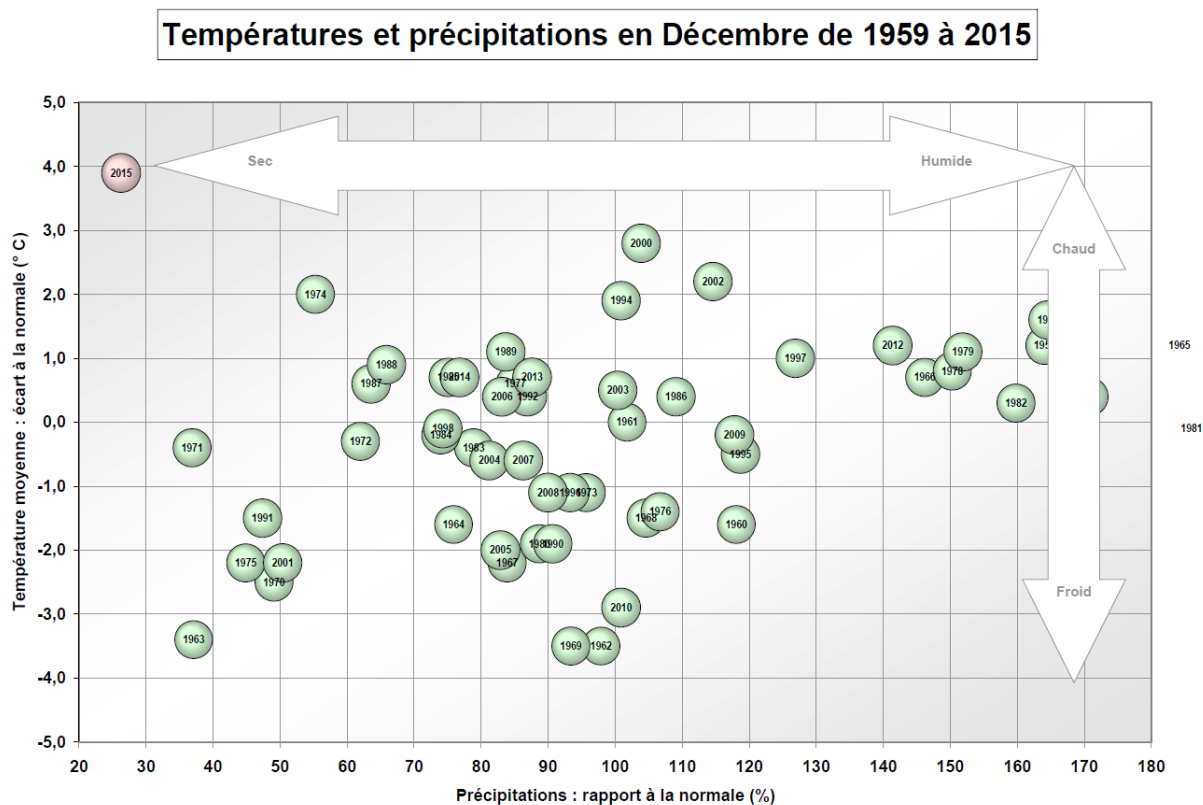


Figure 43 : Caractérisation des mois de décembre en France en rapport à la normale pour les précipitations (axe des abscisses) et écart à la normale des températures (ordonnée).

2. Indicateur de circulation générale

La circulation générale moyenne du mois de décembre 2015 (Figure 44 : Pression Mer) met en évidence un contraste remarquable entre une dépression s'étirant de l'Islande aux Iles Britanniques et un anticyclone centré sur la Méditerranée, justifiant un flux rapide d'ouest sur l'Europe Occidentale avec une composant sèche sur la France, en marge sud du flux perturbé.

Cette configuration est à l'origine de l'anomalie chaude et sèche exceptionnelle de ce mois.

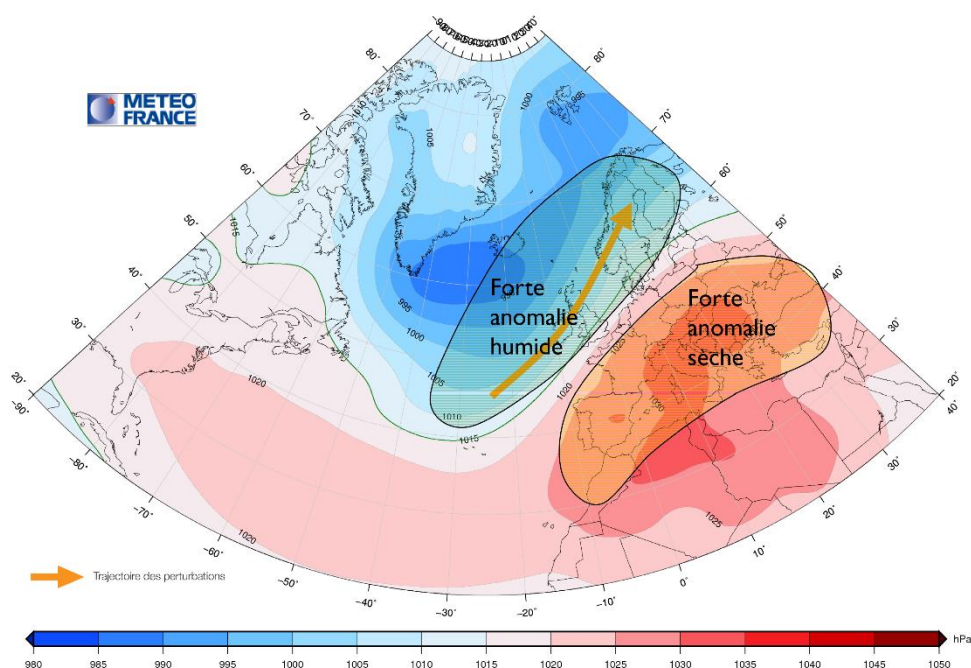


Figure 44 : Pression moyenne au niveau de la mer (hPa) entre le 1^{er} et le 31 décembre 2015 (en bleu, les zones dépressionnaires, en rouge les zones anticycloniques)

L'indicateur sur la température utilisé pour l'attribution est l'anomalie de l'indicateur thermique national de Météo-France, disponible sur la période 1948-2015.

Données, simulations et méthodologies

Plusieurs méthodes de détection et attribution conditionnelles à la circulation ont été effectuées pour ce cas d'étude. La première repose sur les analogues de circulation (cf. section 3.1.4 pour le détail de la méthode). Le géopotentiel à 500 hPa (Z500) utilisé pour calculer les analogues est issu de la réanalyse NCEP I (Kalnay et al. 1996). Il s'agit d'abord de mettre en évidence le rôle de la circulation de grande échelle dans les températures élevées du mois de décembre 2015. On compare donc les températures reconstituées à partir d'analogues à celles reconstituées en piochant des jours aléatoirement (figure 45a). Afin de mieux simuler les anomalies de température aléatoire, en intégrant la persistance de la circulation, on les reconstitue en piochant un jour sur trois (boîte à moustache au milieu de la figure). Il est ensuite possible de comparer les reconstitutions de température pour des analogues piochés dans les périodes ancienne (1949-1981), et récentes (1982-2014) (figure 45b).

La seconde méthode repose sur des simulations régionales (cf. section 3.1.6 pour le détail de la méthode) réalisées à partir du modèle WRF (Skamarock et al., 2005).

Deux ensembles de simulation sont effectués, à dynamique fixée, dans un monde factuel (avec les températures de surface de la mer (TSM) et les concentrations de gaz à effet de serre (GES) observées) et dans un monde contrefactuel (avec des TSM et des GES préindustrielles). Les températures obtenues dans les deux mondes sont comparées dans la figure 46. Les diagrammes des figures 46 b) et c) sont obtenus en utilisant les coordonnées des stations utilisées pour calculer l'indicateur thermique national, de sorte que les résultats des deux méthodes soient comparables.

Enfin les simulations d'ensemble EURO-CORDEX (10 membres) avec ajustement des biais est utilisée pour plusieurs périodes climatiques.

Détection et attribution

Pour la méthode des analogues, on peut observer sur la figure 3.3.4.2 a) que la dynamique permet en effet d'expliquer une partie de l'anomalie de température observée (en moyenne, les températures analogues sont de 2,3°C d'anomalie sur 4°C au total). Lorsque que l'on compare la distribution à circulation fixée à l'anomalie de température de décembre 2015 une fois la tendance retranchée (ligne orange), l'événement n'apparaît plus aussi extrême conditionnellement à la circulation, bien qu'il soit toujours dans la queue de la distribution. La différence d'anomalies de température à circulation fixée entre les périodes ancienne et récente est de 0,6°C (voir figure 3.3.4.2.b)

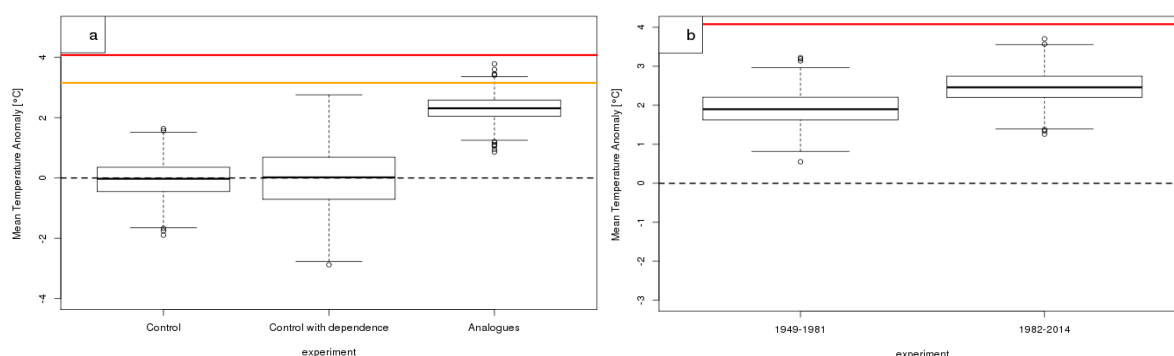


Figure 45 : Analyse du mois de décembre 2015 par la méthode des analogues. a) Comparaison des densités de probabilités d'anomalie de température auxquelles on a retranché la tendance (indicateur thermique national) entre des événements reconstitués aléatoirement ou en piochant des analogues. En rouge, l'anomalie de température pour décembre 2015, en orange la même anomalie à laquelle on a retranché la tendance. b) Comparaison des densités de probabilités d'anomalie de température pour des événements reconstitués en piochant des analogues dans les périodes 1949-1981 et 1982-2014. En rouge, l'anomalie de température pour décembre 2015.

Avec la méthode à base de simulations régionales, la différence de température entre les mondes factuel et contrefactuel est de 0.26°C en moyenne. Cette

différence est très faible, comparée à la tendance de $0,3^{\circ}$ /décennie sur la moyenne de l'indicateur thermique.

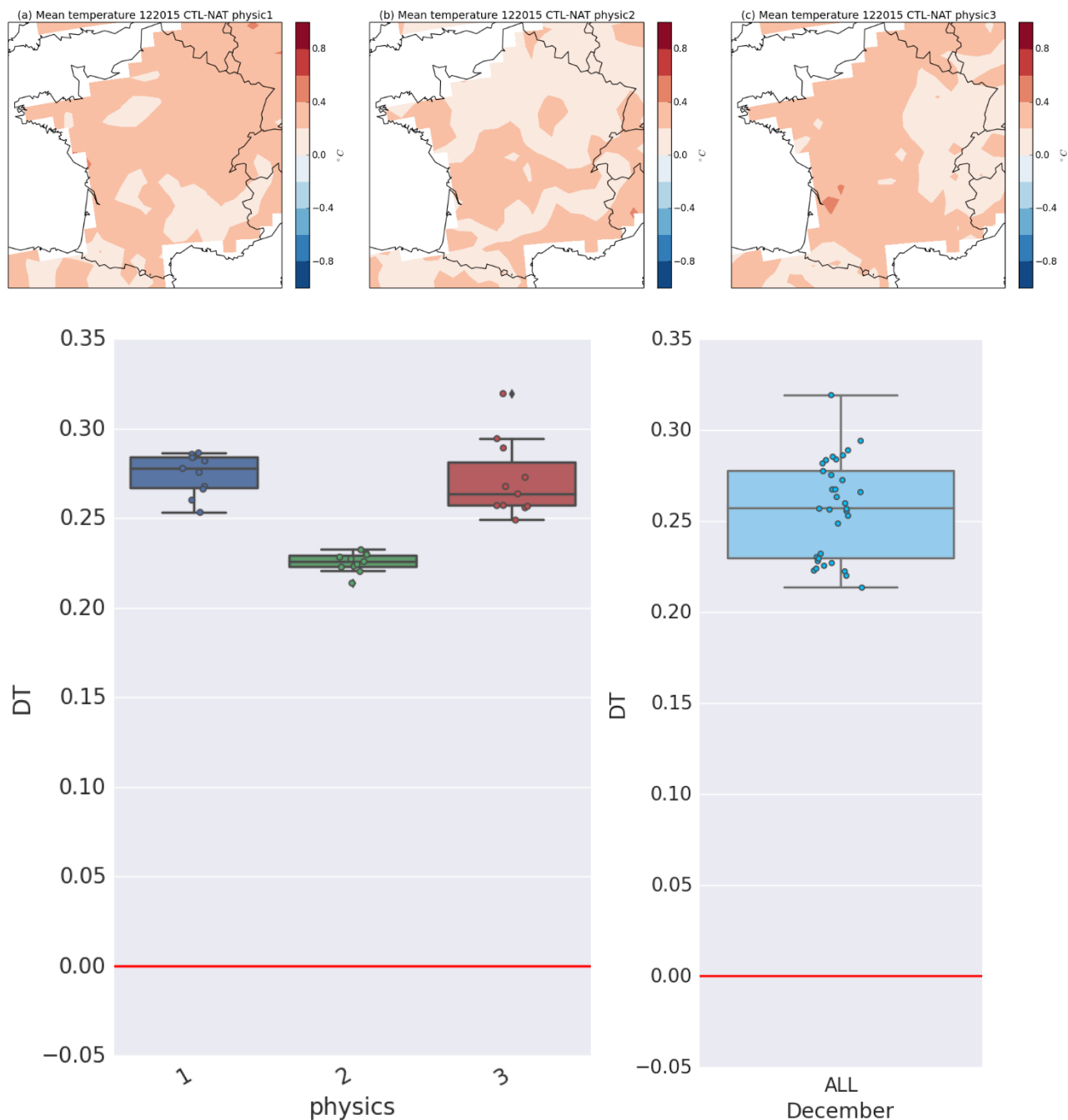


Figure 46 : Analyse du mois de décembre 2015 par la méthode des simulations régionales à haute résolution. a) Cartes de France des différences de température entre les mondes factuel et contrefactuel pour chacune des 3 physiques étudiées. b) Distribution des différences d'indicateur thermique national entre monde factuel et contrefactuel pour chacune des 3 physiques étudiées. c) Distribution des différences d'indicateur thermique national entre monde factuel et contrefactuel pour les 3 physiques étudiées.

La comparaison des probabilités de dépassement de l'indicateur thermique pour différentes périodes en utilisant l'ensemble EURO-CORDEX montre un signal anthropique très clair (Figure 47). Pour EURO-CORDEX, la probabilité d'obtenir une température mensuelle supérieure à l'observation est très faible, aujourd'hui sa période de retour est estimée à plusieurs centaines d'années. Pour la période 1971-2000, ce type de température n'est pas inclus dans l'intervalle d'estimation pour 1000 ans de période de retour. De telles températures se produiraient avec une période de retour d'une cinquantaine d'années dans le futur proche, et une quinzaine d'années vers le milieu du siècle. Il s'agit donc d'un signal en forte émergence.

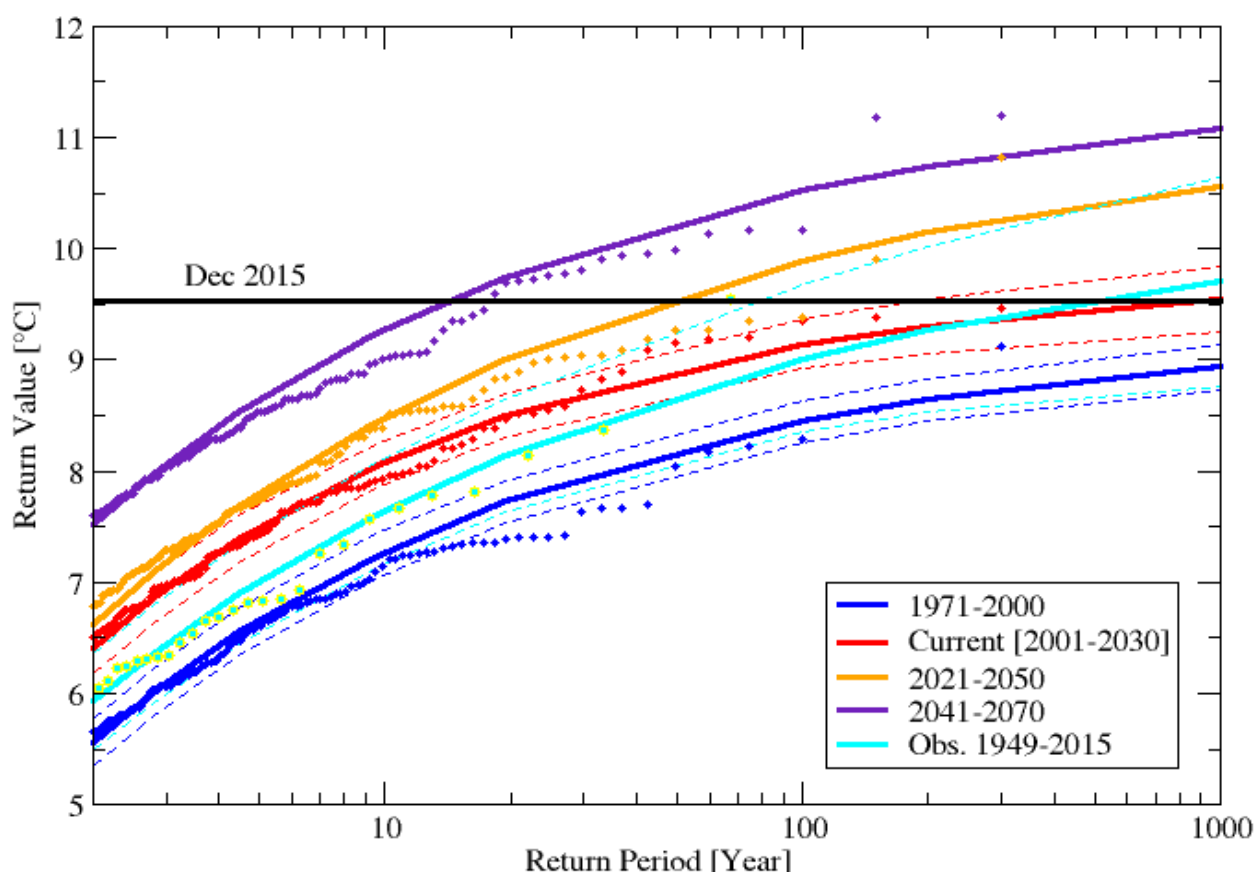


Figure 47: Valeurs de retour des dépassements de l'indicateur thermique pour le mois de décembre en fonction de la période de retour pour les observations durant la période récente et pour différentes périodes pour EURO-CORDEX, et pour le jeu des observations de l'indicateur.

Discussion

Bien que les résultats obtenus entre les deux méthodes d'attribution conditionnelle soient plus proches que dans le cas de l'été 2015, ils restent différents, de l'ordre du simple (0,25 °C) au double (0,6°C). La discussion est similaire à celle de l'été 2015. Pour la méthode non conditionnelle, nous voyons que des températures égales ou supérieures à celles de Décembre sont à attendre dans le siècle à venir avec une fréquence croissante, mais ils restent quand même exceptionnels.

D'après l'analyse faite sur les simulations EURO-CORDEX, ce type d'événement ne peut quasiment pas se produire dans un climat sans influence humaine (période de retour > 1000 ans).

3.3.7 Les vagues de chaleur tardives de l'été 2016

Synthèse communicable des résultats en 100 mots

La France a connu des températures très élevées en fin d'été 2016. Bien que classiques pour une vague de chaleur de milieu d'été, les températures rencontrées ont été très exceptionnelles pour la fin de l'été. Une analyse à partir des simulations EURO-CORDEX montre que ce type de températures n'aurait probablement pas pu se produire sans la modification du climat par les activités humaines. Elle montre aussi que dans le futur des températures aussi élevées entre le 16 août et le 15 septembre seront fréquentes. Cela montre que les mesures d'adaptation aux vagues de chaleur doivent s'étendre au mois de septembre.

L'événement, en bref

L'anticyclone des Açores s'est installé sur la France lundi 22, avant de se décaler un peu plus à l'Est. Il a permis la mise en place d'un flux de sud durable sur le pays, apportant une masse d'air particulièrement chaude et sèche durant toute la semaine.

Dès le 22, un dôme d'air chaud s'est positionné sur l'Hexagone et les températures ont atteint des valeurs caniculaires entre le 23 et le 27 août sur de nombreuses régions. Durant cette vague de chaleur, des températures exceptionnellement chaudes pour une fin août ont été enregistrées de la côte aquitaine aux frontières du Nord et du Nord-Est. La journée de dimanche 28 a marqué la fin de l'épisode excepté sur le Nord-Est où les fortes chaleurs ont perduré.

Une vague de chaleur aussi tardive est un événement rare. La dernière en date s'était produite du 17 au 21 août 2012, certes un peu plus tôt dans la saison, mais aussi un peu plus intense. Plus en arrière, une vague de chaleur s'était déjà produite de 15 au 20 août 2009. En 2001, les quatre journées du 24 au 27 août avaient été, elles aussi, exceptionnellement chaudes.

Avec la persistance remarquable de remontées d'air très chaud par la péninsule ibérique, la France a aussi connu une première quinzaine de septembre record avec une température moyenne de 22 °C à l'échelle nationale, près de 4 °C supérieure à la normale (1981-2010). Le précédent record pour la première quinzaine de septembre était conjointement détenu en 2006 et 1949 avec 21.2 °C (sur la période 1900-2016).

Cette période a été marquée par une série de records mensuels de température (de minimale et de maximale). Durant les huit premiers jours, des records ont été

battus tous les jours quelque part sur le territoire, la plupart du temps dans le Sud, et parfois jusqu'en Bretagne. La journée du 13 a été la plus chaude à l'échelle nationale avec 24.7 °C en moyenne, soit 7 °C de plus que la normale. Cette valeur égale le record de la journée la plus chaude pour un mois de septembre (le 4 septembre 1949) mais presque 10 jours plus tard dans le mois.

Les indicateurs utilisés

Nous utilisons ici uniquement l'indicateur thermique défini en section 3.2, et l'indicateur de vagues de chaleur. La figure 48 montre le positionnement des vagues de chaleur de fin août 2016 parmi les vagues de chaleur observées jusqu'à maintenant. La figure 49 montre l'évolution au cours de la fin de l'été 2016 de l'indicateur thermique à l'échelle journalière.

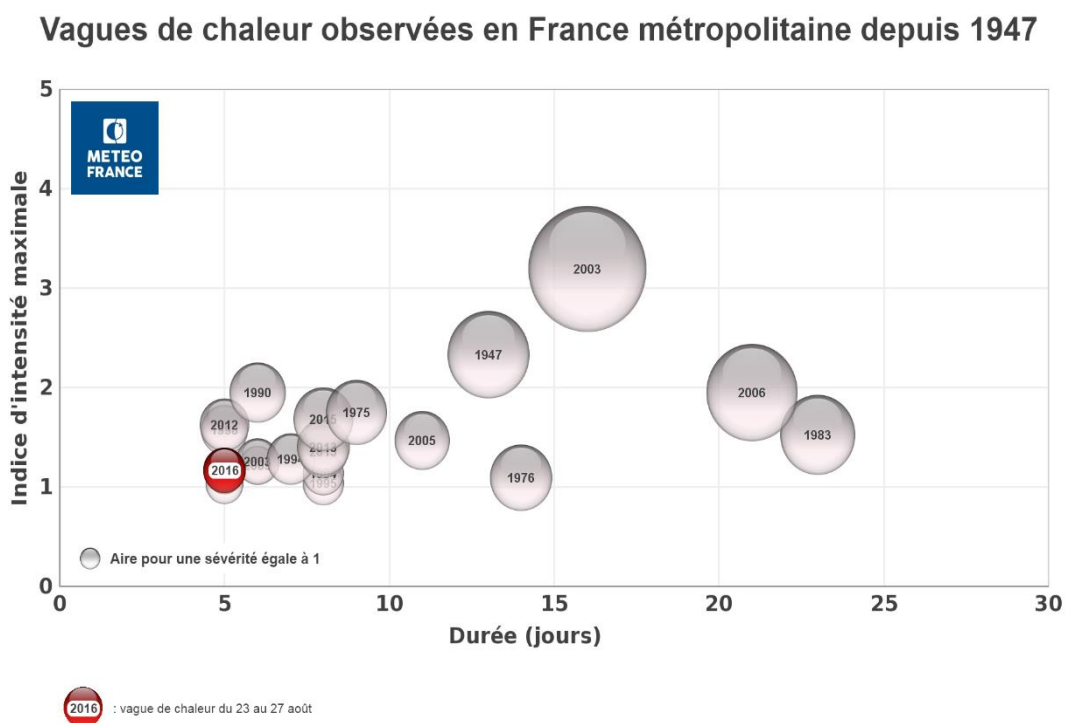


Figure 48 : Caractérisation de la vague de chaleur du 23 au 27 août 2016.

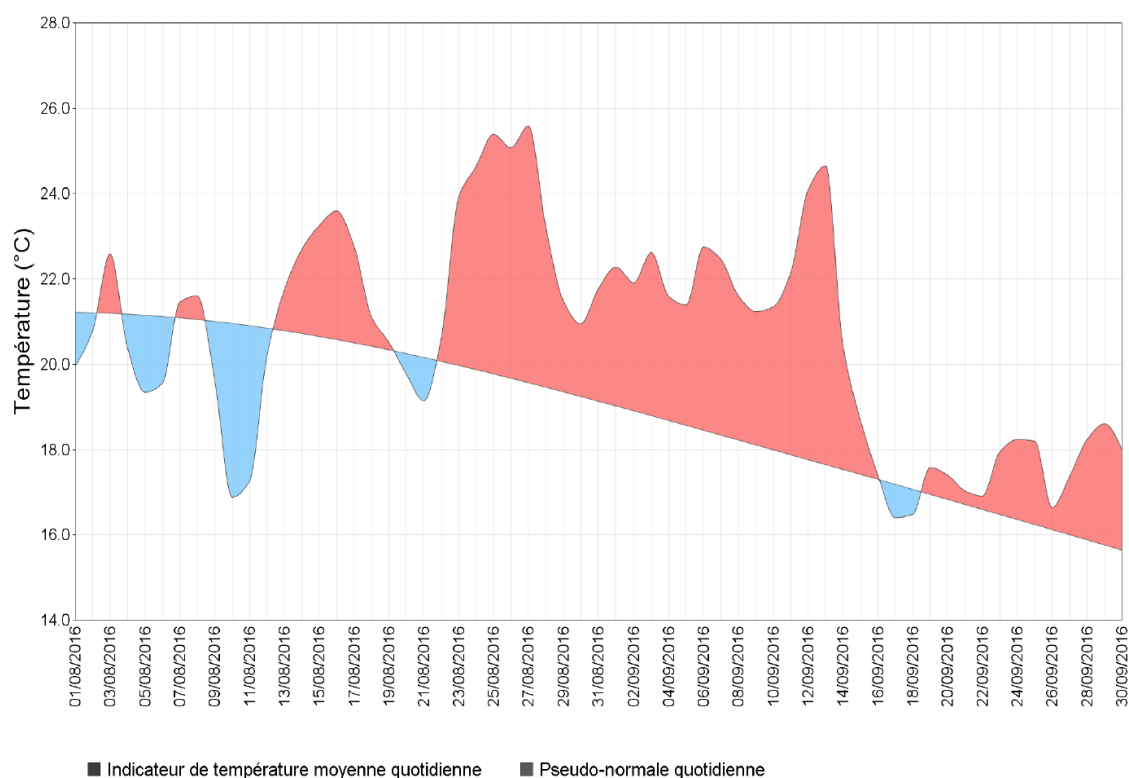


Figure 49 : Evolution de l'indicateur thermique France du 1^{er} août au 30 septembre 2016

Pour l'attribution nous utiliserons la valeur de l'indicateur journalier mais aussi sa valeur moyennée sur la période du 16 août au 15 Septembre, période pendant laquelle l'anomalie est la plus forte.

Une analyse de l'origine des masses d'air, par rétro-trajectoires, donne quelques indications sur l'origine physique de l'événement. Deux situations distinctes se produisent : durant la première partie de la vague de chaleur, des trajectoires extrêmement stagnantes sont obtenues (par exemple le 25/08, Figure 50 à gauche). Venant lentement de l'Atlantique, elles stationnent sur la France, et bénéficient d'un sol très sec à cette période de l'année, particulièrement en 2016. Cela fait monter rapidement les températures par des effets de rétroaction positive. Le même type de mécanisme était présent en août 2003.

Lors de la pointe de Septembre, les fortes températures observées à Paris s'expliquent plutôt par une masse d'air originaire d'Espagne, bien qu'encore très stagnante (Figure 50, à droite).



Origine des masses d'air

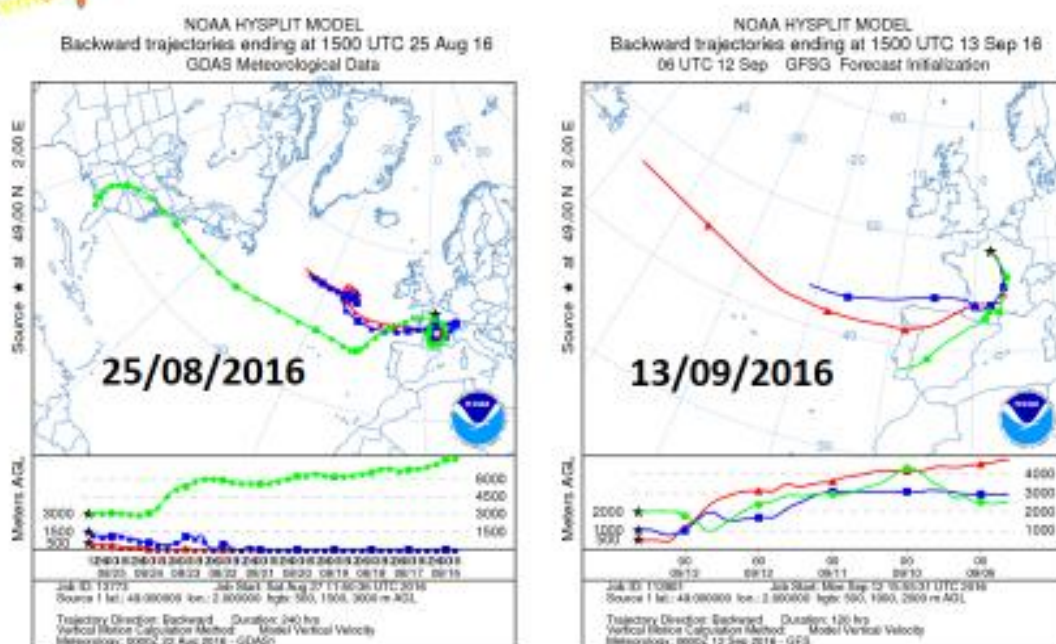


Figure 50 : rétro-trajectoires calculées avec le modèle HYSPLIT (10 jours précédents pour le 25/08, figure de gauche, et 5 jours précédents pour le 13/09).

Modèles et méthodes

Nous utilisons ici uniquement les simulations EURO-CORDEX et examinons les évolutions des probabilités d'extrêmes en fonction de la période climatique étudiée.

Détection et attribution

La figure 51 montre l'évolution des valeurs de retour avec la période climatique pour la moyenne de l'indicateur thermique entre le 16 août et le 15 Septembre. La valeur observée de cet indicateur est de 22.3°C. Un tel événement a donc une probabilité nulle ou quasiment nulle de se produire dans le climat de 1971-2000, alors que sa période de retour actuelle se situe vers quelques décennies, et dans le futur ces températures seront courantes.

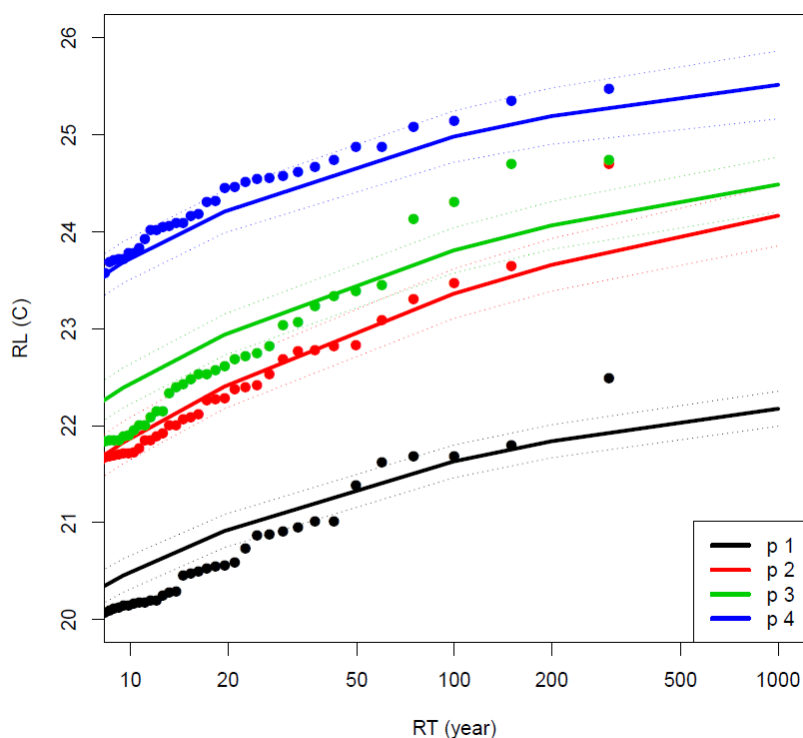


Figure 51 : Valeurs de retour vs. Période de retour pour l'indicateur thermique moyen sur la période du 16 Août au 15 Septembre. P1=1971-200 ; P2=2001-2030 ; P3=2021-2050 ; P4=2041-2071.

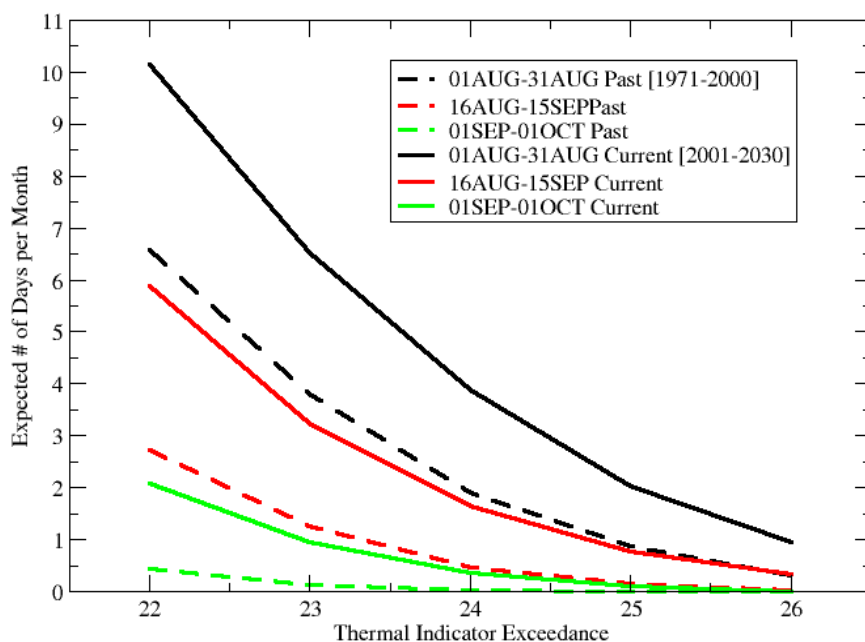


Figure 52 : Nombre de jours moyen trouvé dans l'ensemble EURO-CORDEX ajusté des biais, pour des valeurs de l'indicateur thermique journalier supérieures à un seuil (en abscisse), pour différentes périodes estivales et pour la période 1971-2000 et 2001-2030.

En ce qui concerne l'indicateur thermique journalier, les valeurs comme celles obtenues par exemple le 13 Septembre (>24 degrés), restent rares dans le climat actuel mais sont de probabilité nulle ou quasi nulle dans un climat de la fin du 20^{ème} siècle. Cela n'est pas le cas si l'on considère des températures identiques mais en août (Figure 52). Elles sont plutôt typiques de vagues de chaleur de milieu d'été.

Conclusion et enseignements

Ces résultats montrent que nous avons vécu en 2016 des vagues de chaleur tardives qui avaient une probabilité nulle ou quasiment de se produire dans un climat contrefactuel. Même si les températures sont plutôt classiques des grandes vagues de chaleur de milieu d'été, elles sont très exceptionnelles pour une fin d'été, et montrent que nous devons nous attendre à de tels phénomènes après la période estivale.

3.4 Démonstration et phases ultérieures

3.4.1 Le bilan des ateliers interdisciplinaires

Deux ateliers interdisciplinaires ont été organisés au cours du projet, avec pour double objectif de faire le point sur les recherches menées au sein du projet Extremoscope et de faire un point sur les recherches pouvant être menées dans le domaine de la détection et de l'attribution des impacts des changements climatiques. Sur ce second objectif, le second atelier s'est focalisé sur la question des événements singuliers dans les domaines concernés par ces impacts.

Le premier atelier a réuni une vingtaine de participants principalement scientifiques de différentes disciplines (statistiques, climatologie, hydrologie) et le deuxième une trentaine de participants aussi scientifiques de différentes disciplines mais certains travaillant dans des domaines non couverts par le premier atelier (santé, sociologie), employés du ministère de l'environnement ou employés d'entreprises du secteur privé.

Les résumés des présentations et des discussions, ainsi que les informations sur la participation et le déroulement des ateliers figurent en annexe de ce rapport. Nous ne relevons ici que les principales conclusions issues des discussions.

Atelier de Juillet 2015

Outre les présentations faisant le point sur l'avancement du projet, cet atelier comprenait des présentations sur les études pouvant être menées dans le domaine des impacts du changement climatique sur l'hydrologie continentale, l'indice foliaire, le niveau de la mer et les régions côtières.

Ce premier atelier a permis de refaire sortir quelques défis à relever concernant le développement de nouvelles méthodes pour les études de détection et d'attribution appliquées aux événements singuliers et aux impacts du changement climatique :

- le défi de l'absence de données non climatiques sur de longues périodes de temps,
- le défi de la présélection des modèles utilisés pour les études afin d'en améliorer les performances,
- le défi concernant l'application de méthodes statistiques multivariées
- le défi concernant l'estimation de la variabilité interne dans le cas des impacts régionaux

Les discussions ont également permis de mettre en évidence deux domaines d'étude parmi ceux qui pourraient dans un avenir proche donner lieu à l'application des méthodes de détection et d'attribution. Il s'agit de celui de l'analyse des débits d'étiage des fleuves français et celui de l'analyse des surcotes dans les régions

côtières. Elles ont également fait ressortir la nécessité de mobiliser les communautés de recherche françaises sur d'autres domaines d'application sur lesquels de données sont d'ores et déjà disponibles comme l'agriculture ou la santé.

Atelier d'Octobre 2016

Outre les présentations concernant les avancées du projet Extremoscope, cet atelier comprenait des présentations sur les études en cours ou pouvant être potentiellement être menées sur la détection ou l'attribution d'impacts d'événements singuliers en France sur l'hydrologie continentale (étiages), les régions côtières (érosion et niveau d'eaux extrêmes) et la santé. Dans une dernière présentation, la question de la réception de la société à un service climatique portant sur la détection et l'attribution d'extrême a quant à elle été abordé sous un angle sociologique.

Il ressort des discussions de cet atelier que, pour un grand nombre d'utilisateurs d monde extérieur à la recherche, il s'agit en priorité de savoir comment les probabilités d'occurrence des événements extrêmes sont actuellement et vont évoluer avant de savoir pourquoi elles ont évolué dans le passé.

Une estimation quantitative de la fraction du risque attribuable pourrait prendre un intérêt particulier dans un contexte de recours juridique faisant suite à un événement climatique extrême, mais aucun des participants à l'atelier n'a connaissance de recours dans ce domaine.

Cependant l'information « qualitative » sur l'attribution des événements extrêmes aux sources anthropiques paraît utile pour certains intervenants dans une optique de définition de priorités dans des actions à mener pour s'adapter aux changements climatiques et à ses effets. Toujours sur la question des stratégies d'adaptation, d'autres intervenants soulignent l'intérêt d'identifier les pires situations pouvant se produire même s'il n'est pas possible de leur affecter des probabilités, ou encore la nécessité de tenir compte de la difficulté à connaître la capacité de l'homme à s'adapter à certains extrêmes climatiques comme les vagues de chaleur.

L'atelier s'est conclu sur l'évocation de la réflexion menée dans le cadre de la préparation de la phase 2 du PNACC au cours de laquelle la présentation du projet dans certains groupes de travail, dont celui consacré à la « gouvernance », pourrait susciter un intérêt.

3.4.2 La visualisation et la production de diagnostics

Deux outils de visualisation interactive ont été développés durant le projet : un premier démonstrateur d'événements d'échelle saisonnière ou annuelle, et un explorateur d'analogues.

Le démonstrateur Extremoscope (<https://lsce-datavisgroup.github.io/Extremoscope/>) est un tableau de bord interactif qui synthétise, pour deux scénarios, les diagnostics extrême de 7 modèles dans les 13 régions de France entre 1972 – 2100, référencé aux données de SAFRAN (1976 – 2005). Il se permet de filtrer à la volée les différentes propriétés des données (leurs dimensions, cf. Table 4) pour trouver des relations entre les données, vérifier les données en les visualisant, interpréter l'information produite et établir des connaissances.

Le démonstrateur comprend une carte et 5 graphes pour toutes les dimensions du jeu de données (la région, l'échelle temporelle [saison / année], l'indicateur, le centile, le modèle, et la période d'intérêt). Ces éléments sont liés et filtrables à la volée selon ces dimensions. Plus précisément, chaque élément affiche la probabilité (%) de saisons / années extrêmes qui sont supérieurs / inférieurs à un seuil (90^e, 95^e centile / 5^e, 10^e centile) selon la période de référence 1976 – 2005 des données SAFRAN.

Dimension	Valeurs
région de France (13)	Alsace, Champagne-Ardenne et Lorraine ; Aquitaine, Limousin et Poitou-Charentes ; Auvergne et Rhône-Alpes ; Bourgogne et Franche-Comté ; Bretagne ; Centre-Val de Loire" ; Corse ; Languedoc-Roussillon et Midi-Pyrénées ; Nord-Pas-de-Calais et Picardie ; Normandie ; Pays de la Loire ; Provence-Alpes-Côte d'Azur ; Île-de-France
Intégration temporelle	DJF, JJA, MAM, SON, année
Indicateur (10 : 3 chaleur, 7 précip)	"GD4": "Growing degree days (sum of TG > 4 degC) (degC)" "HD17": "Heating degree days (sum of 17degC - TG) (degC)" "TG": "Mean daily temp (degC)" "R20mm": "Days where precipitation > 20mm (days)" "RR1": "Wet days (RR ≥ 1 mm) (days)" "RR": "Precipitation sum (mm)" "RX1day": "Highest 1-day precipitation amount (mm)" "RX5day": "Highest 5-day precipitation amount (mm)" "CWD": "Maximum number of consecutive wet days (RR ≥ 1 mm) (days)" "CDD": "Maximum number of consecutive dry days (RR < 1 mm) (days)"

Centile (4)	5, 10, 90, 95
Modèle (7)	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_RCA4 ICHEC-EC-EARTH_HIRHAM5 ICHEC-EC-EARTH_RCA4 IPSL-IPSL-CM5A-MR_WRF331F MetEir-ECEARTH_RACMO22E MPI-ESM-LR_CCLM4-8-17 MPI-ESM-LR_REMO019
An	1972 – 2100
Scenario	RCP 4.5, 8.5

Table 4 : Dimensions du jeu de données pour le démonstrateur.

En plus, les séries temporelles (annuelles et saisonnières) de SAFRAN et tous les modèles sont disponibles, ainsi que les seuils de centiles, après la sélection d'une région et un indicateur.

La figure 52 montre un capture d'écran pour une sélection des filtres selon les dimensions suivantes : DJF, indicateur TG (température moyenne journalière), RCP 8.5, seuil définie par le 90^e centile, modèle CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_RCA4, années ~2016 – 2045. La probabilité d'un hiver extrême moyennée sur toutes les régions de France pour les dimensions sélectionnées est 43 %, et pour chaque région de France la probabilité est entre 19 – 65 %, indiquée par une échelle de couleurs. La probabilité pour chaque année et aussi indiquée par la hauteur de barres dans le « year chart ».

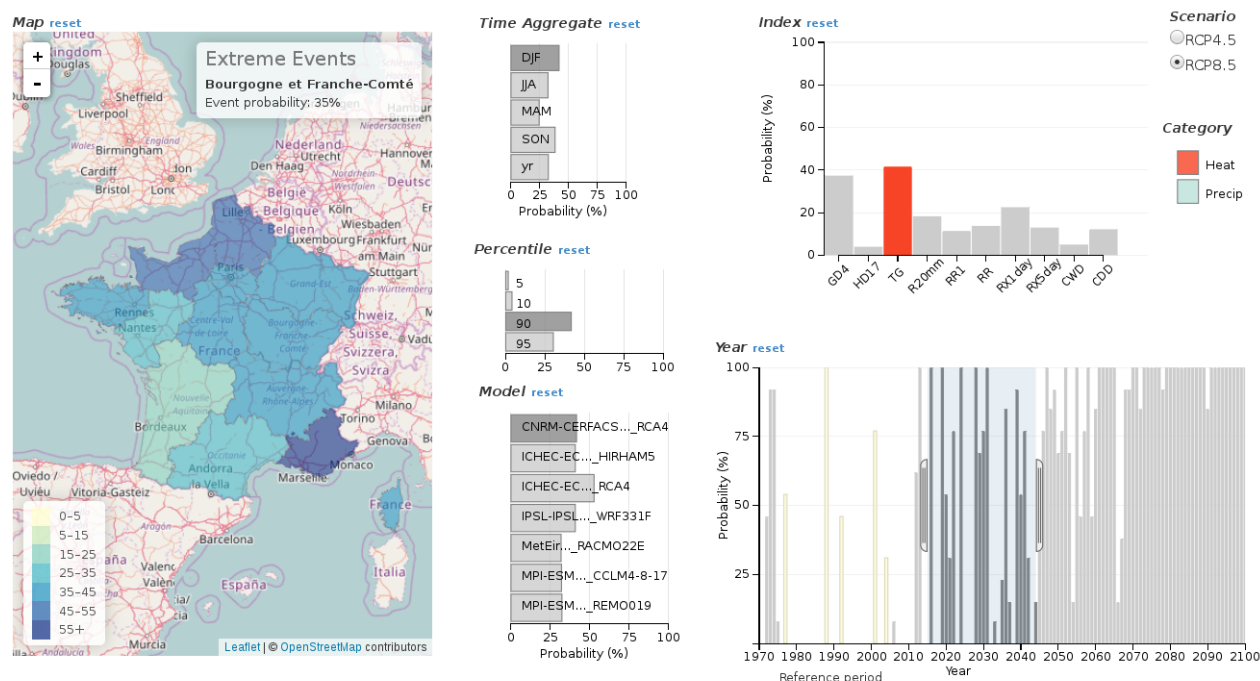


Figure 53 : Capture d'écran du démonstrateur Extremoscope. Le « dashboard » montre l'évolution de la probabilité de saisons / années extrêmes en France selon plusieurs indicateurs basés sur 7 modèles et deux scénarios entre 1972 – 2100. Les extrêmes sont caractérisés par des valeurs < le 5^e ou 10^e centile ou > le 90^e ou 95^e centile selon la période de référence 1976 – 2005 des données SAFRAN. Cette figure montre les probabilités (> le 90^e centile, RCP 8.5) d'un DJF extrême selon TG pour le modèle CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_RCA4 projetées pour ~2016 – 2045 en moyenne (43 %) et pour chaque région de France (19 – 65 %). La période de référence est indiquée en jaune dans l'histogramme.

Le démonstrateur utilise en arrière-plan les technologies web à la pointe des techniques de visualisation des données. Elles sont identifiées ci-dessous :

- Dimensional Charting JavaScript library (dc.js, <https://dc-js.github.io/dc.js/>)
- Data-Driven Documents JavaScript library (d3.js, <http://d3js.org>)
- Crossfilter JavaScript library (crossfilter.js, <http://square.github.io/crossfilter> Erreur ! Référence de lien hypertexte non valide.
- Leaflet JavaScript library for interactive maps (leaflet.js, <http://leafletjs.com> Erreur ! Référence de lien hypertexte non valide.
- Highstock JavaScript library for timeseries plots (highstock.js, <http://www.highcharts.com/>),

Il utilise aussi des outils d'interface (HTML, CSS, Bootstrap) qui gèrent l'esthétique de la page.

Le jeu de données pour le démonstrateur était préparé au format netCDF par un « notebook ipython ».

Explorateur d'analogues

Le deuxième outil de visualisation interactive développé durant le projet est un explorateur d'analogues, disponible sur <https://lsce-datavisgroup.github.io/analogues/> pour la SLP circulation (NCEP) sur l'Atlantique du Nord. La visualisation récupère les analogues pré-calculés pour une période d'intérêt à sélectionner par l'utilisateur entre 01/01/1948 – et les jours les plus récents. Pour notre exemple, la date de fin est 21/09/2016, et les plus proches 20 analogues étaient calculés pour chaque jour dans la base de données (les paramètres du calcul sont affichés au-dessus des graphiques). La période d'intérêt est choisie soit par une zone de texte, soit par un graphique de barres. En plus, il y a un camembert pour raffiner la sélection de périodes d'intérêt selon la saison. Ensuite, les analogues associés avec chaque jour dans la période d'intérêt sont classifiés dans un histogramme par décennie (1948 – 1955, 1956 – 1965, 1966 – 1975, 1976 – 1985, 1986 – 1995, 1996 – 2005, 2006 – 2015, 2016). Un autre histogramme montre le nombre d'analogues dans chaque décennie (les décennies historiques en bleu foncé, les décennies récentes en bleu clair), et les deux histogrammes à côté montrent la distribution de la corrélation et de la distance, respectivement, d'analogues. Tous les graphiques statistiques sont interactives, donc on peut filtrer à-la-volée les données selon la période d'intérêt, la corrélation, et / ou la distance. Par exemple, on peut glisser la fenêtre qui précise la période d'intérêt pour voir le changement de la distribution d'analogues par décennie. La Figure 54 montre, par exemple, les analogues trouvés pour chaque jour entre 01/11/2015 – 29/02/2016, filtrés par corrélation entre 0.7 – 1.0. On remarque qu'il y a une tendance de plus d'analogues dans les décennies récentes que les décennies historiques.

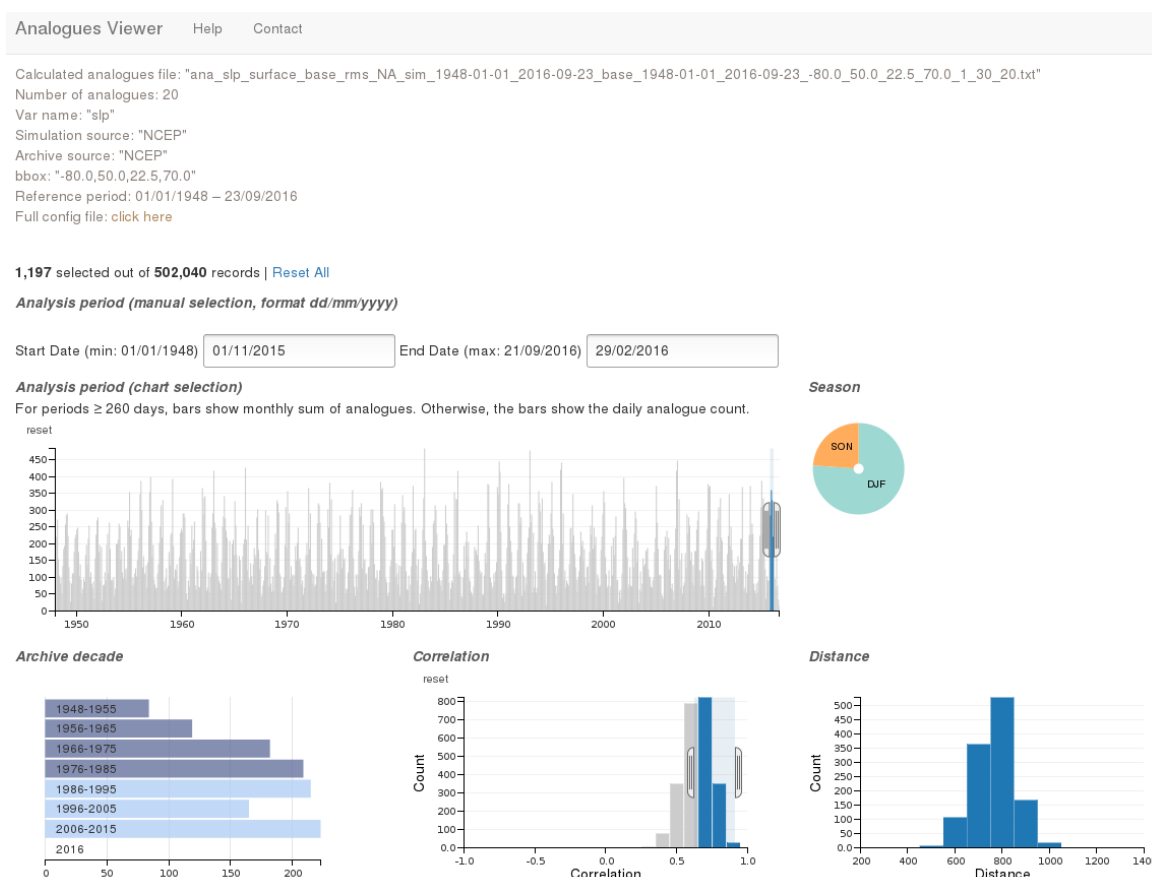


Figure 54 : Capture d'écran d'explorateur d'analogues. L'histogramme (coin gauche) montre la distribution d'analogues de NCEP SLP dans l'Atlantique du Nord par décennie (les décennies historiques en bleu foncé, les décennies récentes en bleu clair), avec la distribution de la corrélation (centre) et de la distance (coin droit) pour une période d'intérêt préciser dans la zone de texte (01/11/2015 – 29/02/2016). Le camembert indique la fraction de jours par saison dans cette période.

Comme le démonstrateur Extremoscope, l'explorateur d'analogues utilise les mêmes technologies web dans le back-end qui poussent les frontières de la data visualisation, y compris dc.js, d3.js, et crossfilter.js.

3.3.3 Le site web

Il était prévu que le site web du projet, résumant les résultats, soit ouvert assez tôt. Cela n'a pas été possible car l'expertise pour le faire manquait au LSCE, et nous n'avions pas prévu une prestation. C'est pourquoi la priorité a été mise sur d'autres actions (méthodes scientifiques, chaînes de traitement des données et visualisation expérimentale). Toutefois, d'une part les résultats seront intégrés dans le serveur DRIAS et d'autre part une page web sera néanmoins développée à l'IPSL dans les mois à venir, reprenant les études de cas et résumant les méthodes et donnant accès aux outils expérimentaux de visualisation. Cela est rendu possible grâce à la participation d'une personne chargée de communication apportant son concours pour les services climatiques.

3.4.4 Les pistes d'organisation au-delà du projet

Les actions s'organisent autour de plusieurs actions

- **Valoriser ces résultats dans les serveurs existant**, par exemple en incluant les indicateurs développés dans ce projet dans les diagnostics actuels de suivi opérationnel de Météo-France, ainsi que sur les serveurs de l'ONERC et DRIAS. L'indicateur développé pour les vagues de chaleur a commencé à être utilisé pour le suivi climatique opérationnel à Météo-France et le sera prochainement dans le cadre de portails de service existants (ClimatHD et DRIAS) et. L'indicateur d'intensité des pluies diluviennes du Sud-Est de la France est quant à lui proposé en 2017 comme indicateur de changement climatique à l'ONERC. Les études de cas ont quant à elles permis de préfigurer le fonctionnement d'un service apportant des informations sur le lien entre un événement singulier observé et le changement climatique anthropique, cela sur un laps de temps n'excédant pas quelques jours (cas de l'été 2016 notamment). Les outils de visualisation adoptés ont en particulier permis de situer les événements à partir de chroniques d'événements passés mais potentiellement aussi, pour des saisons singulières, dans un cadre d'évolution future grâce au démonstrateur développé dans le cadre du projet.
- Développer une organisation pour appliquer les méthodes en « temps quasi-réel », incluant par exemple :
 - Une cellule scientifique définissant l'événement, produisant une synthèse formatée comme celle proposée pour les études de cas.
 - La récupération des scripts automatisés permettant un calcul rapide de probabilités, temps de retour, analogues, etc... l'interprétation étant laissée à la cellule scientifique ; cela demande qu'une ou plusieurs équipes se répartissent les tâches, qui ne peuvent, sans financement supplémentaire, qu'être extrêmement légères
 - La réalisation d'une synthèse commune communicable, diffusion via les portails de services climatiques, tels que DRIAS. Ces portails pourront dès à présent faciliter l'accès aux études de cas réalisés dans le cadre du projet.
 - **Contribuer au développement d'un service pré-opérationnel de niveau européen** ; la collaboration avec les Pays Bas, la Grande Bretagne et d'autres pays pour la réalisation d'une plate-forme commune technique d'échange des données, simulations et méthodes, et synthétisant ces actions a été proposée au programme ERA4CS, et un développement plus opérationnel pourrait être effectué dans le cadre du programme Copernicus. Elle développera également une capacité à analyser les impacts de certaines catégories d'événements extrêmes.

- **Développer l'attribution sur les impacts** ; il s'agit d'une action de recherche, pour laquelle des financements devront être trouvés. Cela inclue notamment les défis du traitement des séries de données non climatiques, les défis sur les méthodes, la séparation des effets climatiques et non climatiques, la modélisation des impacts.

4. Références

- Büntgen, U., Tegel, W., Nicolussi, K., McCormick, M., Frank, D., Trouet, V., ... & Luterbacher, J. (2011). 2500 years of European climate variability and human susceptibility. *Science*, 331(6017), 578-582.
- Cattiaux, J., Vautard, R., & Yiou, P. (2009). Origins of the extremely warm European fall of 2006. *Geophysical Research Letters*, 36(6).
- Cattiaux, J., Vautard, R., Cassou, C., Yiou, P., Masson-Delmotte, V., & Codron, F. (2010). Winter 2010 in Europe: a cold extreme in a warming climate. *Geophysical Research Letters*, 37(20).
- Cattiaux, J., Yiou, P., & Vautard, R. (2012). Dynamics of future seasonal temperature trends and extremes in Europe: a multi-model analysis from CMIP3. *Climate dynamics*, 38(9-10), 1949-1964.
- Cattiaux, J., Douville, H., & Peings, Y. (2013). European temperatures in CMIP5: origins of present-day biases and future uncertainties. *Climate dynamics*, 41(11-12), 2889-2907.
- Christidis, N., Stott, P. A., Hegerl, G. C., & Betts, R. A. (2013). The role of land use change in the recent warming of daily extreme temperatures. *Geophysical Research Letters*, 40(3), 589-594.
- Christidis, N., & Stott, P. A. (2014). Change in the odds of warm years and seasons due to anthropogenic influence on the climate. *Journal of Climate*, 27(7), 2607-2621.
- Cook, E. R., Anchukaitis, K. J., Buckley, B. M., D'Arrigo, R. D., Jacoby, G. C., & Wright, W. E. (2010). Asian monsoon failure and megadrought during the last millennium. *Science*, 328(5977), 486-489.
- Cook, E. R., & Krusic, P. J. (2003, December). The North American Drought Atlas. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 1, p. 01).
- Corona, C., Guiot, J., Edouard, J. L., Chalieu, F., Büntgen, U., Nola, P., & Urbinati, C. (2010). Millennium-long summer temperature variations in the European Alps as reconstructed from tree rings. *Climate of the Past*, 6(3), 379-400.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., ... & Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), 553-597.
- Etien, N., Daux, V., Masson-Delmotte, V., Stievenard, M., Bernard, V., Durost, S., ... & Pierre, M. (2008). A bi-proxy reconstruction of Fontainebleau (France) growing season temperature from AD 1596 to 2000. *Climate of the Past*, 4(2), 91-106.

Francis, J. A., and S. J. Vavrus (2012), *Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes*, *Geophys. Res. Lett.*, *39*, L06801, doi:10.1029/2012GL051000.

Hazeleger, W., Severijns, C., Semmler, T., Stefanescu, S., Yang, S., Wang, X., ... & Bougeault, P. (2010). EC-Earth. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *91*(10), 1357.

Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., ... & Zhu, Y. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American meteorological Society*, *77*(3), 437-471.

King, A. D., van Oldenborgh, G. J., Karoly, D. J., Lewis, S. C., & Cullen, H. (2015). Attribution of the record high Central England temperature of 2014 to anthropogenic influences. *Environmental Research Letters*, *10*(5), 054002.

Knutson, T. R., Zeng, F., & Wittenberg, A. T. (2013). Multimodel assessment of regional surface temperature trends: CMIP3 and CMIP5 twentieth-century simulations. *Journal of Climate*, *26*(22), 8709-8743.

Legras, B., & Ghil, M. (1985). Persistent anomalies, blocking and variations in atmospheric predictability. *Journal of the atmospheric sciences*, *42*(5), 433-471.

Lewis, S. C., & Karoly, D. J. (2014). The role of anthropogenic forcing in the record 2013 Australia-wide annual and spring temperatures. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *95*(9), S31.

Meredith, E. P. et al. *Nature Geosci.* **8**, 615–619 (2015).

Michelangeli, P. A., Vautard, R., & Legras, B. (1995). Weather regimes: Recurrence and quasi stationarity. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *52*(8), 1237-1256.

Mori, M., Watanabe, M., Shiogama, H., Inoue, J., & Kimoto, M. (2014). Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades. *Nature Geoscience*.

Nicault, A., Alleaume, S., Brewer, S., Carrer, M., Nola, P., & Guiot, J. (2008). Mediterranean drought fluctuation during the last 500 years based on tree-ring data. *Climate Dynamics*, *31*(2-3), 227-245.

van Oldenborgh, G. J., Haarsma, R., De Vries, H., & Allen, M. R. (2015). Cold extremes in North America vs. mild weather in Europe: The winter of 2013–14 in the context of a warming world. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *96*(5), 707-714.

Otto, F. E., Massey, N., van Oldenborgh, G. J., Jones, R. G., & Allen, M. R. (2012). Reconciling two approaches to attribution of the 2010 Russian heat wave. *Geophysical Research Letters*, *39*(4).

Ouzeau G., Soubeyroux J.-M., Schneider M., Vautard R., & Planton S. (2016), Heat waves analysis over France in present and future climate: application of a new method on the EURO-CORDEX ensemble. *Climate Services*, Doi : 10.1016/j.cliser.2016.09.002

Pall, P., Aina, T., Stone, D. A., Stott, P. A., Nozawa, T., Hilberts, A. G., ... & Allen, M. R. (2011). Anthropogenic greenhouse gas contribution to flood risk in England and Wales in autumn 2000. *Nature*, 470(7334), 382-385.

Prein, A. F., Gobiet, A., Truhetz, H., Keuler, K., Goergen, K., Teichmann, C., ... & Vautard, R. (2016). Precipitation in the EURO-CORDEX 0.11° and 0.44° simulations: high resolution, high benefits?. *Climate dynamics*, 46(1-2), 383-412.

Schaller, N., A. L. Kay, R. Lamb, N. R. Massey, G.-J. van Oldenborgh, F. E. L. Otto, S. N. Sparrow, R. Vautard, P. Yiou, A. Bowery, S. M. Crooks, C. Huntingford, W. Ingram, R. Jones, T. Legg, J. Miller, J. Skeggs, D. Wallom, S. Wilson & M. R. Allen, 2015, Human influence on climate in the 2014 Southern England winter floods and their impacts. *Nature climate change*, doi:10.1038/nclimate2927.

Shepherd, T. G., 2016: A common framework for approaches to extreme event attribution, *Curr Clim Change Rep* (2016) 2:28–38

Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., & Powers, J. G. (2005). *A description of the advanced research WRF version 2* (No. NCAR/TN-468+ STR). National Center For Atmospheric Research Boulder Co Mesoscale and Microscale Meteorology Div.

Soubeyroux, J.-M., Neppel, L., Veyssiere, J.-M., Trambly, Y., Carreau, J., Gouget, V.(2015) Evolution des précipitations extrêmes en France en contexte de changement climatique, *La Houille Blanche*, n°1, 2015, p 27-31

Soubeyroux JM, Ouzeau G, Schneider M, Cabanes O and Kounkou R 2016, Les vagues de chaleur en France : analyse de l'été 2015 et évolutions attendues en climat futur. *La Météorologie*, **94** 45-51

Soubeyroux, J.-M., Vidal, J.-P., Najac, J., Kitova, N., Blanchard, M., Dandin, P., Martin, E., Pagé, C. et Habets, F., 2011 : Projet ClimSec - Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol, rapport final, Météo-France, CNRM-GAME, CERFACS, UMR Sisyphe, Cemagref, 72 pp

Stott, P., N. Christidis, F. Otto, Y. Sun, J.-P. Vanderlinden, G. J. van Oldenborgh, R. Vautard, H. von Storch, P. Walton; P. Yiou, F. Zwiers, 2016, Attribution of extreme events. *WIREs Climate Change*, 2016, 7:23–41. doi: 10.1002/wcc.380.

Tibaldi, S., and F. Molteni, 1990: On the operational predictability of blocking. *Tellus*, 42A, 343-365.

Trenberth, K. E., Fasullo, J. T. & Shepherd, T. G. *Nature Clim. Change* **5**, 725–730 (2015).

Vautard, R., & Yiou, P. (2009). Control of recent European surface climate change by atmospheric flow. *Geophysical Research Letters*, 36(22).

Vautard, R., van Oldenborgh, G.-J. , Thao, S., Dubuisson, B., Lenderink, G., Ribes, A., Planton, S., Soubeyroux, J.-M., & Yiou, P. (2015) Extreme fall 2014 precipitation in the Cévennes Mountains, in « Explaining Extreme Events of 2013 from a Climate Perspective ». *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(9), S56-S60, Doi: 10.1175/BAMS-D-15-00088.1.

Vautard, R., P. Yiou, F. Otto, P. Stott, N. Christidis, G. J. van Oldenborgh and N. Schaller, 2016: Attribution of human-induced dynamical and thermodynamical contributions in extreme weather events. *Environ. Res. Letters*, 11 114009.

Vrac, M., Noël, T. and R. Vautard, 2015: Bias correction of precipitation through Singularity Stochastic Removal: Because occurrences matter, *J. Geophys. Res.*, in press.

Weedon, G. P., Gomes, S., Viterbo, P., Shuttleworth, W. J., Blyth, E., Österle, H., ... & Best, M. (2011). Creation of the WATCH forcing data and its use to assess global and regional reference crop evaporation over land during the twentieth century. *Journal of Hydrometeorology*, 12(5), 823-848.

Wilson et al., *Clim. Dyn.* 2013, 40(3-4) :997-1017

Yiou, P., Vautard, R., Naveau, P., & Cassou, C. (2007). Inconsistency between atmospheric dynamics and temperatures during the exceptional 2006/2007 fall/winter and recent warming in Europe. *Geophysical Research Letters*, 34(21).

Annexe: Résumés des ateliers pluridisciplinaires

Atelier : « Détection et attribution des événements singuliers et des impacts du changement climatique ».

1^{er} et 2 juillet 2015

Centre International de Conférence de Météo-France,

42 av. G. Coriolis, Toulouse

Le premier objectif de l'atelier était de faire le point des recherches pouvant être menées dans un cadre national et international dans le domaine de la détection et l'attribution des impacts du changement climatique en se focalisant sur quelques domaines disposant d'un accès à des observations de long terme.

Un deuxième objectif était de faire le point de recherches en cours sur la détection et l'attribution des événements singuliers en mettant l'accent sur les recherches menées dans le cadre du projet Extremoscope.

Sur le premier volet, l'atelier a couvert la question des impacts du changement climatique sur le niveau de la mer moyen et sur les surcotes dans les régions côtières, sur l'hydrologie et le stockage de l'eau sur continents, sur l'indice foliaire. La question des observations aujourd'hui disponibles pour mener ces études et celle des méthodologies pouvant être mises en œuvre a été abordée au cours des présentations et des échanges qui ont suivi. La question de la prise en compte des données satellitaires a aussi été abordée.

Sur le deuxième volet, l'atelier a couvert la façon d'aborder la relation entre événements extrêmes et changement climatique, allant jusqu'aux impacts, via quelques exemples. Une réflexion sur les méthodes d'attribution a été abordée. Une question cruciale est aussi le rôle que joue la circulation atmosphérique. La caractérisation des événements et la représentation pour mieux comprendre la place d'un événement singulier est aussi une question clef qui a été discutée.

L'atelier a rassemblé une vingtaine de statisticiens, climatologues, hydrologues, spécialistes de la télédétection pour l'environnement ou de la modélisation des effets des changements climatiques.

Résumé des présentations

La première session principalement consacrée à la question des événements singuliers est introduite par une présentation d'Anne-Laure Gibelin faisant le point sur les données climatiques homogénéisées aujourd'hui disponibles pour la France métropolitaine. Elle mentionne les nouvelles séries de températures et

précipitations débutant autour de 1960, homogénéisées à partir du logiciel européen HOMER, et les études d'analyse en cours menées à partir de ces données notamment sur les extrêmes de température. Philippe Naveau fait la première présentation sur les méthodologies de détection et attribution des extrêmes. Il expose une méthode originale de détermination de la « Fraction de Risque Attribuable » (FAR) basée sur les records plutôt que sur les dépassements de seuil. Il démontre la simplification de l'approche dans un contexte d'application de la théorie GEV (« Generalized Extreme Value »). Dans sa présentation portant sur le sujet de l'attribution des événements extrêmes, Soulivanh Thao expose aussi une application de la théorie GEV dans un contexte non stationnaire, s'appuyant elle sur des simulations de type Monte-Carlo. Il montre l'apport d'une méthode de « vraisemblance profilée » utilisée pour calculer les intervalles de confiance de la FAR. Dans une première présentation d'application des méthodes de détection/attribution à l'analyse d'extrêmes observés, Aurélien Ribes montre quant à lui que l'on peut détecter une intensification des extrêmes de pluies méditerranéennes dans les observations. Ces résultats sont cohérents avec la relation de « Clausius-Clapeyron » liant la température et le contenu en eau atmosphérique à saturation. Dans la présentation suivante Julien Cattiaux présente une synthèse de résultats sur le rôle de la dynamique atmosphérique sur les changements d'extrêmes de température en Europe. Il montre le désaccord entre les tendances déduites des observations concernant la persistance ou la récurrence de régimes de circulation et ce que l'on attend pour le futur selon les projections climatiques actuelles. La présentation de Robert Vautard fait ressortir la difficulté de mettre en évidence un rôle de la circulation atmosphérique sur la fraction de risque attribuable aux activités humaines dans le cas de l'hiver humide 2013-2014. Sur le même événement, à partir de résultats de simulations climatiques régionales prenant ou pas en compte l'effet de réchauffement de la température de la mer liée au changement climatique anthropique, Hiba Omrani montre que les précipitations en Angleterre sont plus fortes dans le premier cas. Mais elle montre aussi que la différence dépend de la physique du modèle et varie fortement selon la région. Nils Hempelmann met quant à lui en évidence la différence des effets du changement climatique sur les distributions d'extrêmes de précipitations projetées par méthode d'analogie, selon que l'on considère le Sud de la Grande Bretagne ou l'Ouest de la France. Cette session se termine par une présentation d'Alexis Hannart sur l'application de la théorie causale contrefactuelle à l'attribution des événements singuliers ou de tendances. Il souligne les clarifications de définitions apportées par cette théorie mais aussi la nécessité de définir avec précision l'événement objet de l'étude.

La deuxième session consacrée à l'application des méthodes de détection et d'attribution aux effets du changement climatique débute par une présentation d'Hervé Douville sur le cycle hydrologique. Il présente des résultats publiés d'études s'appliquant notamment à l'écoulement de surface, à la couverture de neige, à l'évapotranspiration et à des indices de sécheresse. Dans la présentation suivante, Aurélien Ribes présente les résultats d'une étude en cours concernant le « Leaf Area Index » (LAI). Il montre la détection d'un signal de « verdissement »

de la surface terrestre attribuable aux activités humaines. Benoît Meyssignac insiste quant à lui sur l'origine de la dispersion des modèles climatiques dans le calcul de l'évolution de la composante thermostérique du niveau de la mer moyen. Il précise que les résultats actuels des modèles permettent de réaliser des études d'attribution sur cette composante. Dans sa présentation, Thierry Bulteau montre les résultats d'une analyse statistique des niveaux de la mer extrêmes. Il explique notamment que les informations historiques relativisent les niveaux extrêmes observés à la suite du passage de la tempête Xynthia. Philippe Rogel évoque quant à lui les études portant sur l'érosion côtière principalement fondées sur l'analyse de données. Il conclut que l'effet de l'augmentation du niveau de la mer ne peut pas à ce stade être isolé parmi les facteurs contribuant à cette érosion, mais que des études de cas peuvent s'avérer intéressantes dans le futur. Dans sa présentation, Jean-Philippe Vidal montre qu'il est déjà possible de détecter des tendances sur les débits d'étiage et sur la fonte précoce de la neige en France ou encore sur des inondations majeures de certains bassins versants en Europe et aux Etats-Unis mais avec une forte variabilité interbassins. Il précise que des recherches s'orientent aujourd'hui vers la caractérisation de la relation entre variabilité hydrologique et variabilité climatique permettant de dépasser la seule détermination de tendances passées. Enfin la session se termine par une présentation de Pascal Yiou d'un travail mené dans le cadre du projet EUCLEIA sur le risque d'inondation comparable à l'événement qui s'est produit au Sud de l'Angleterre au cours de l'hiver 2014. Il apparaît que le risque d'inondation a été augmenté d'environ 40% du fait des activités humaines, mais avec une large incertitude dans cette détermination.

Discussion générale

Les discussions après chaque présentation et au cours de l'après-midi du 2 juillet ont permis de faire ressortir quelques points saillants et des perspectives de recherches à mener.

A propos des résultats des études menées jusqu'ici, la discussion sur les changements détectés fait ressortir des différences d'interprétation concernant les changements dans la dynamique atmosphérique : certains changements sont détectés dans des simulations récentes mais ils restent à confirmer avec des ensembles multi-modèles.

Concernant les modèles, un des points de discussion concerne la validité des simulations utilisées dans les études de détection/attribution. Il en ressort que les modèles peuvent être utilisés sans corrections mais que les performances des études seraient meilleures si certains d'entre eux étaient présélectionnés. Par ailleurs, l'application des techniques de détection/attribution apparaît comme potentiellement très utile pour contraindre les simulations du climat futur. Pour un modèle donné, la détection de l'effet d'un forçage dans les observations passées pourrait être un critère d'évaluation du niveau de confiance à accorder à une projection de l'effet de ce forçage.

A propos des développements méthodologiques, il apparaît que l'un des principaux défis à relever concerne l'application de méthodes multivariées, les méthodes actuelles portant le plus souvent sur une seule variable. Par ailleurs la séparation des effets des gaz à effet de serre et celui des particules d'aérosols reste un défi scientifique important. Une difficulté supplémentaire mentionnée concerne l'évaluation de la variabilité interne dans le cas des études d'impact régionaux. Dans le cas du niveau de la mer notamment, la dynamique devient importante aux échelles régionales. Les données satellitaires et de réanalyses océaniques apparaissent comme potentiellement très utiles dans ce contexte. Plus généralement, une difficulté majeure dans les études de détection/attribution des effets du changement climatique vient de l'absence de données non climatiques sur de longues périodes de temps.

Concernant les domaines d'application des méthodologies de détection/attribution, des perspectives semblent se dégager des discussions concernant en particulier l'utilisation des méthodes mises en œuvre pour l'attribution des événements singuliers pour l'étude des surcotes. Ces techniques pourraient être notamment utilisées dans une perspective de dimensionnement des ouvrages de protection. Des études d'attribution doivent aussi être menées pour distinguer les facteurs climatiques d'autres facteurs notamment dans le cas des changements de débits d'étiage. Dans le domaine de l'hydrologie continentale certaines études d'impact des barrages sont d'ores et déjà utilisables et exploitables.

Le constat est cependant tiré par les participants d'un manque d'intérêt par les communautés de recherche françaises pour le thème de la détection et attribution des impacts des changements climatiques. L'enjeu de ces recherches est pourtant important compte tenu des questions liées à l'adaptation aux changements dans un futur proche qui dépendent des constats faits pour le climat actuel. Il est convenu que d'autres domaines non explorés au cours de l'atelier devront être pris en compte dans un atelier à venir, à organiser en lien avec le projet Extremoscope. Cela concerne en particulier l'agriculture, la santé et d'autres domaines pour lesquels des données sont d'ores et déjà disponibles. La prise en compte des décideurs dans cet atelier paraît nécessaire pour mieux sélectionner les domaines d'études à conduire.

Programme :

Mercredi 1^{er} juillet

14h00-14h10 Serge Planton (CNRM-GAME) et Robert Vautard (LSCE) :
Présentation de l'atelier

Session événements singuliers

14h10-14h30 : Anne-Laure Gibelin (Dclim) : Les nouvelles séries homogénéisées

14h30-14h50 : Philippe Naveau (LSCE) : Attributable risks for extremes : a statistical perspective

14h50-15h10 : Soulivanh Thao (CNRM-GAME) : Attribution of extreme weather events using non-stationary extreme value analysis

15h10-15h30 : Aurélien Ribes (CNRM-GAME) : Investigating human influence on Southern France heavy precipitation events

15h30-15h50 : Pause

15h50-16h10 : Julien Cattiaux (CNRM-GAME) : Contribution of the atmospheric dynamics to European temperature extremes

16h10-16h30 : Robert Vautard (LSCE) : Conditional attribution keyed to atmospheric circulation

16h30-16h50 : Hiba Omrani (LSCE) : Regional modeling sensitivity experiments for interpreting the Winter 2013-2014 extreme rain

16h50-17h10 : Nils Hempelmann (LSCE) : The extreme rain amount of Winter 2013-2014

17h10-17h30 : Alexis Hannart (IFAECI) : Causal counterfactual theory for the attribution of weather and climate-related events : The extreme rain amount of Winter 2013-2014

17h30-18h00 : Discussion générale

Jeudi 2 juillet

9h00-9h10 Serge Planton (CNRM-GAME) : Introduction à la journée

Session impacts du changement climatique

9h10-9h30 : Hervé Douville (CNRM-GAME) : D&A of changes in the terrestrial water budget: Motivations, preliminary CNRM-GAME studies and prospects

9h30-9h50 : Aurélien Ribes (CNRM-GAME) : Human-induced changes in the Leaf Area Index

9h50-10h10 : Benoit Meyssignac (LEGOS) : Explaining the spread in thermosteric sea level rise among climate models

10h10-10h30 : Pause

10h30-10h50 : Thomas Bulteau (BRGM) : Usefulness of historical information in extreme value analysis of coastal water levels or how to relativize outliers

10h50-11h10 : Philippe Rogel (CERFACS) Détection de l'impact du niveau de la mer sur l'érosion littorale: exemples tirés du projet CECILE

11h10-11h30 : Jean-Philippe Vidal (IRSTEA) From hydrological trend detection to the exploration of relations between climate variability and hydrological variability

11h30-11h50 : Pascal Yiou (LSCE) : Attributing floods and damages in the U.K. in 2014

11h50-12h30 : Discussion générale

12h30-14h00 : Pause déjeuner

14h00-15h00 : Séminaire Francis Zwiers (PCIC) : The challenge of event attribution - When and how should we pose the question ?

15h00-16h30 : Discussion générale

Liste de participants

Azais Jean-Marc, IMT
Bulteau Thomas, BRGM
Cattiaux Julien, CNRM-GAME
Charles Elodie, LEGOS
Douville Hervé, CNRM-GAME
Gibelin Marie-Laure, DClm
Hannart Alexis, IFAECI
Hempelmann Nils, LSCE
Meyssignac Benoit, LEGOS
Nangini Cathy, LSCE
Naveau Philippe, LSCE
Rogel Philippe, CERFACS
Omrani Hiba, LSCE
Planton Serge, CNRM-GAME
Ribes Aurélien, CNRM-GAME
Rogel Philippe, CERFACS
Terray Laurent, CERFACS
Thao Soulivanh, CNRM-GAME
Vautard Robert, LSCE
Vidal Jean-Philippe, IRSTEA
Yiou Pascal, LSCE

Atelier : « Atelier de discussion interdisciplinaire sur les événements météorologiques extrêmes et le changement climatique ».

24 octobre 2016

Université Pierre et Marie Curie, salle Darcy du Laboratoire Metis,
4 place Jussieu, Paris

Le premier objectif de l'atelier était de faire un point sur des résultats concernant la détection et l'attribution des événements singuliers obtenus dans le cadre du projet EXTREMOSCOPE. Un deuxième objectif était de faire le point de recherches en cours sur la détection et l'attribution des événements singuliers dans des domaines concernés par les impacts du changement climatique.

L'atelier a rassemblé des ingénieurs et chercheurs climatologues impliqués dans le projet, des chercheurs et experts dans différents domaines affectés par les changements climatiques (hydrologie, santé, régions côtières), un sociologue, des représentants d'entreprises et différents représentants du ministère de l'environnement de l'énergie et de la mer.

Résultats du projet EXTREMOSCOPE

L'atelier débute par une introduction générale notamment sur les notions de détection et d'attribution particularisées au cas des événements singuliers, suivie d'une brève présentation du projet. Quelques résultats marquants concernant le développement de nouvelles méthodes et de nouveaux indicateurs réalisés dans le cadre d'EXTREMOSCOPE sont ensuite présentés. La présentation d'une synthèse du traitement de six cas d'étude d'événements singuliers qui se sont produits pendant le déroulement du projet conclut le déroulement de cette première session.

Dans son introduction générale, Isabelle Bénézeth rappelle que le projet était inscrit dans l'une des actions de recherche recommandées pour la première phase du Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC). Robert Vautard souligne par ailleurs, qu'à l'origine, l'idée d'un projet de ce type avait émergé d'un atelier du GIS-Climat et que si la focalisation portait d'abord sur les événements météorologiques extrêmes, l'ouverture vers une approche de caractère interdisciplinaire était à terme un objectif.

Dans sa présentation, Robert Vautard introduit ensuite les notions et le cadre général des études de détection et d'attribution du changement climatique tout en soulignant qu'aucune approche formelle exhaustive n'est menée pour les événements singuliers. Il insiste sur la nécessité d'une approche multi-méthodes et multi-modèles. Serge Planton complète quant à lui la présentation du cadre méthodologique en rappelant qu'au-delà d'approches formelles, d'autres méthodes

potentiellement applicables aux impacts du changement climatique et aux événements singuliers ont été proposées par le GIEC. Il présente ensuite les principaux objectifs et les principales activités du projet avant d'introduire le programme de la journée.

Dans sa présentation Aurélien Ribes débute par un état de l'art des méthodes formelles employées pour l'étude de la détection et de l'attribution des événements singuliers. Il expose ensuite une méthode non-stationnaire développée dans le cadre du projet et son application à la canicule de 2003. Les résultats montrent une multiplication par environ un facteur 100 de la probabilité d'occurrence de cet événement en 2003 par rapport à une période antérieure aux années 2000. Les résultats dépendent cependant du modèle climatique choisi pour le calcul et le facteur est au moins égal à 5 lorsque les calculs sont réalisés avec l'ensemble des modèles du projet CMIP5.

Pascal Yiou présente ensuite d'autres approches méthodologiques fondée sur la réalisation de grands ensembles de simulations, des modélisations statistiques ou des simulations climatiques régionales permettant de faire le lien entre les événements singuliers et la grande échelle. Il illustre en particulier le traitement du mois de décembre 2015 en montrant une figure de valeurs d'anomalies de température selon les durées de retour des événements. Il y apparaît que les simulations régionales d'EURO-CORDEX de la période 2001-2030 sont en bon accord avec les observations et seulement pour cette période. L'application de la méthode des analogues à la série des températures moyennes d'été, semble indiquer par ailleurs un changement au cours du temps de la dynamique atmosphérique.

Michel Schneider détaille ensuite le calcul d'un nouvel indicateur de vagues de chaleur développé dans le cadre d'EXTREMOSCOPE. Il s'agit d'un indicateur événementiel pouvant être calculé à partir des observations ou à partir des résultats des modèles climatiques, qui a l'avantage de pouvoir distinguer l'évolution des vagues de chaleur (durée, intensité, sévérité) dans leur variabilité d'une région à une autre. Il montre différents graphiques de visualisation des résultats dont une représentation permettant de situer dans le futur des événements au moins aussi intenses que les vagues de chaleur de 2003, 2006 ou autres années particulières. Les messages sur les changements de fréquence d'occurrence peuvent être adaptés selon ces modes de visualisation.

D'autres indicateurs développés ou en cours de développement sont ensuite présentés tour à tour par Aurélien Ribes et Robert Vautard. Un indicateur des épisodes de pluies les plus fortes sur le Sud-est méditerranéen de la France montre ainsi une augmentation de l'intensité des épisodes de l'ordre de 20% en fin de période, un facteur de l'ordre de 2 fois l'augmentation attendue de la relation de Clausius-Clapeyron. Cet indicateur sera proposé à l'ONERC et Jérôme Duvernoy en confirme l'intérêt. Un indicateur de régimes de temps est aujourd'hui disponible et permet des calculs quotidiens à la DCSC de Météo-France. Un indicateur de sécheresse utilisant les cernes d'arbres et la dendrochronologie est quant à lui en

cours de développement. Enfin, l'indicateur thermique révisé a par ailleurs été utilisé pour les cas d'études analysés pendant le cours du projet.

Les cas d'étude correspondant à des situations exceptionnelles rencontrées pendant le déroulement du projet sont présentés par Robert Vautard. Il débute son exposé en présentant la méthodologie générale appliquée à tous les cas avant d'illustrer les résultats obtenus pour chacun des six cas analysés : les pluies intenses de l'hiver 2013-2014, les événements méditerranéens de l'automne 2014, les pluies printanières de mai 2016, les vagues de chaleur de l'été 2015, les records de température et la sécheresse de décembre 2015 et la vague de chaleur de la fin 2016. Il conclut son exposé par les limites de cet exercice : des marges d'incertitudes très fortes, une coordination entre équipes encore insuffisante, une difficulté de comparer les méthodes sur des bases communes et une communication calibrée encore à développer.

Pour terminer cette session, Cathy Nangini présente les fonctionnalités d'un « Analog viewer » (<https://lsce-datavisgroup.github.io/analogues/>) permettant de visualiser de manière interactive les analogues qui sont découverts. Elle présente aussi un outil WPS (FLYingpigeons) permettant plus largement de faire des calculs/visualisation sur des analogues

Attribuer les impacts des extrêmes ?

La deuxième session de l'atelier porte sur l'avancement de recherches ou de réflexions menées sur la détection et l'attribution d'événements singuliers dans quelques domaines affectés par les changements climatiques.

Cette session débute par une présentation de Jean-Philippe Vidal des travaux de thèse de Laurie Caillouet portant sur la détection de tendance des étiages extrêmes. Il présente la méthode de descente d'échelle statistique par méthode d'analogues (SCOPE) utilisée à partir des données des réanalyses 20CR du NCEP et Safran de Météo-France pour reconstruire la variabilité hydrométéorologique historique. L'analyse montre l'absence de tendance pour ce qui concerne la durée des étiages, leur sévérité et leurs dates de début. Par contre, elle met en évidence une tendance positive sur les superficies maximales des étiages les plus sévères.

Dans sa présentation sur le thème de la santé, Mathilde Pascal souligne la difficulté de faire le lien entre les phénomènes météorologiques extrêmes et les données de santé. La relation entre température et santé est complexe car elle fait intervenir des facteurs aggravants et les effets des chaleurs extrêmes est très supérieur à celui des extrêmes froids. A la question de savoir si la connaissance d'une attribution permettrait d'améliorer le traitement des risques, elle répond que cela permettrait notamment de mieux percevoir l'intérêt de l'adaptation. Elle considère que cette communication serait utile au niveau des décideurs mais que pour le public, il faut privilégier la promotion et l'éducation sur les comportements à adopter.

Les deux présentations réalisées par Gonéri Le Cozannet et Jérémie Rohmer concernent les impacts des extrêmes et du changement climatique sur l'érosion côtière, privilégiée en raison des nombreuses données disponibles. L'augmentation du niveau de la mer entraîne une augmentation des extrêmes mais d'autres éléments doivent être pris en compte à l'échelle locale. Ces effets locaux conduisent à des tendances sur les extrêmes pouvant différer fortement de la tendance sur les niveaux moyens. Ils présentent des méthodes basées sur des lois statistiques d'extrêmes avec un objectif d'aboutir à terme à l'établissement de courbes d'iso-période de retour de dépassements conjoints (niveaux, vagues), afin ensuite de s'interroger sur leurs évolutions.

La dernière intervention de la session par Jean-Paul Vanderlinden concerne quant à elle la question générale de la réception de la société à un service climatique portant sur la détection et l'attribution des extrêmes. Comme il s'agit du résultat d'une interaction entre des groupes sociaux qui comprennent différemment le même objet, la question de base peut être reformulée comme celle de l'articulation sociale autour de cet objet. Parmi les conclusions issues du projet européen EUCLEIA, il mentionne le besoin d'une interaction forte entre les utilisateurs potentiels et les producteurs de services. Les services climatiques qui traversent les secteurs doivent à la fois être indépendants, compréhensibles et au courant des besoins des acteurs. Mais il souligne aussi que l'adaptation aux changements climatiques occupe une toute petite place par rapport à tout ce qui change et que le besoin d'information immédiate concerne surtout les journalistes. Par ailleurs l'information sur l'attribution devrait être intégrée à celle qui porte sur les impacts du changement climatique.

Discussion générale

Une grande partie de la discussion a porté sur la question de savoir si des utilisateurs ont besoin d'une évaluation par un chiffre de la fraction du risque d'occurrence d'un événement extrême attribuable aux activités humaines (FAR). La question est posée aux participants de l'atelier potentiellement utilisateurs de ce type d'information. Pour Marc Bagarry (GROUPAMA) il y a des intérêts économiques à savoir quel est l'effet du climat aujourd'hui. Il cite la mise sur le marché par RMS (Risk Management Solutions) d'un modèle prenant en compte le changement climatique et dont il est utile de connaître la pertinence. Pour Sylvie Parey (EDF), il n'y a pas nécessité à évaluer la FAR sur des événements passés mais de quantifier les risques dans le futur proche. Une attribution non quantifiée permet toutefois de clarifier les conséquences des changements climatiques actuels et donc de prioriser les adaptations nécessaires. Pour le domaine de la santé, Mathilde Pascal mentionne le fait que l'attribution d'un événement récent au changement climatique anthropique peut conditionner la façon dont les plans de prévention sont conçus. Pour Sylvain Mondon, l'aspect qualitatif de l'attribution est utile à la planification publique mais pas l'aspect quantitatif. Il souligne le besoin d'information pour prioriser les financements et pour satisfaire la demande des politiques au plus haut niveau. Pour Gonéri Le Cozannet, une quantification

des niveaux extrêmes centennaux qui évoluent dans le temps est par ailleurs nécessaire car ils sont intégrés aux Plans de Prévention des Risques. Le cas des journalistes est aussi évoqué par Thibault Lescuyer mais pour préciser que leur intérêt, limité à une durée très courte après l'occurrence d'un événement, vient principalement des journalistes environnementaux tandis que les autres sont davantage préoccupés par leurs conséquences. Il ressort donc de cette discussion que pour un grand nombre d'utilisateurs, il s'agit en priorité de savoir comment les probabilités d'occurrence des événements extrêmes vont évoluer avant de savoir pourquoi elles ont évolué dans le passé.

Une autre question a ensuite été brièvement abordée à savoir celle de recours juridiques s'appuyant sur une connaissance de l'attribution des événements extrêmes. Sylvain Mondon mentionne à ce sujet un travail réalisé par le Comité de la Prévention et de la Précaution sur la méthodologie à mettre en place dans le domaine de la justice climatique. Aucun cas de recours n'est cependant connu de la part des participants à l'atelier.

Les stratégies d'adaptation sont également évoquées par les participants. Pour EDF, il est important d'identifier les pires situations même si elles sont très improbables et donc de probabilité non quantifiable. Matilde Pascal souligne le fait que le temps d'adaptation des individus aux vagues de chaleur n'est pas connu créant ainsi une difficulté particulière. Sylvain Mondon rappelle en conclusion les travaux de préparation à la phase 2 du PNACC et l'intérêt qu'il y aurait à présenter le projet EXTREMOSCOPE auprès de certains groupes comme le groupe « gouvernance ».

Programme :

Résultats du projet EXTREMOSCOPE

9h30-9h45 : Isabelle Bénézeth (MEEM) : Introduction à la journée

9h45-10h00 : Robert Vautard (LSCE) et Serge Planton (CNRM): Le projet EXTREMOSCOPE

10h00-10h30 : Aurélien Ribes et Pascal Yiou (LSCE) : L'attribution, la question et les méthodes

10h30-11h00 : Michel Schneider (DCSC), Aurélien Ribes (CNRM) et Robert Vautard (LSCE) : Les indicateurs d'événements extrêmes

11h00-11h15 : Pause

11h15-12h00 : Robert Vautard (LSCE) : Cas d'études

12h00-12h15 : Cathy Nangini (LSCE) : Outils de calcul et de visualisation des analogues

12h15-14h00 : Pause déjeuner

Attribuer les impacts des extrêmes ?

14h00-14h25 : Jean-Philippe Vidal (IRSTEA) : Sur l'hydrologie

14h25-14h50 : Mathilde Pascal (ANSP) : Sur la santé

14h50-15h15 : Gonéri Le Cozannet et Jérémie Rohmer (BRGM) : Sur les côtes

15h15-15h40 : Jean-Paul Vanderlinden (UVSQ) : Le point de vue des sciences sociales

15h40-15h50 : Pause

15h50-17h30 : Discussion générale et conclusion

Liste de participants

Bagarry Marc, GROUPAMA

Bénézeth Isabelle, MEEM

Brouillet Audrey, LSCE

Caillouet Laurie, IRSTEA

Carroget Aurélie, MEEM/DGALN

Cattiaux Julien, CNRM

Caud Nada, LSCE

Depoues Vivian, I4CE

Duvernoy Jérôme, ONERC

Graff Benjamin, CNR
Jézéquel Aglaé, LSCE
Le Cozanet Gonéri, BRGM
Lescuyer Thibault, UVSQ
Mondon Sylvain, ONERC
Nangini Cathy, LSCE
Naveau Philippe, LSCE
Parey Sylvie, EDF
Pascal Mathilde, ANSP
Planton Serge, CNRM
Ribes Aurélien, CNRM
Rohmer Jérémy, BRGM
Schneider Michel, DCSC
Simon Pascal, DCSC
Soubeyroux Jean-Michel, DCSC
Vanderlinden Jean-Paul, UVSQ
Vautard Robert, LSCE
Vidal Jean-Philippe, IRSTEA
Vullierme Emmanuel, DGPR
Yiou Pascal, LSCE

Annexe: Fiche d'indicateur destinée à l'ONERC

Pluies diluviennes dans le sud-est méditerranéen de la France

19 octobre 2016

Cet indicateur rend compte de l'évolution de l'intensité des pluies diluviennes se produisant sur le sud-est méditerranéen de la France sur la période 1961-2015.

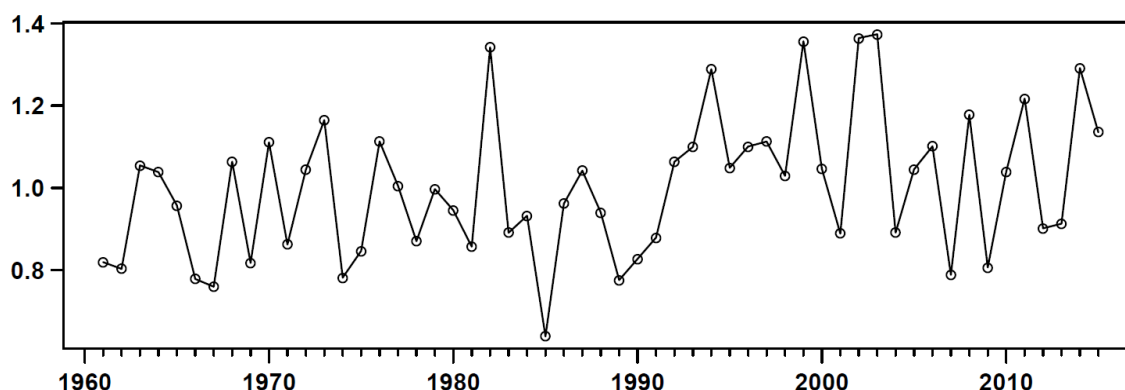
En bref

On observe à partir des années 1990 une tendance à l'augmentation du maximum annuel des pluies quotidiennes sur les régions méditerranéennes de la France.

Chiffre-clé : La tendance à l'augmentation de l'intensité du maximum annuel des pluies quotidiennes est de 22% (+/- 8%) sur la période 1961-2015.

Analyse technique et données

Evolution de l'indicateur d'intensité des pluies sur les régions méditerranéennes de la France à partir de 1961.



Le graphe présente l'évolution de l'indicateur d'intensité du maximum annuel des pluies quotidiennes sur les régions méditerranéennes de la France (à l'exception de la Corse), calculé à partir de 1961. On observe qu'après une période de 30 ans (1961-1990) au cours de laquelle aucune tendance à la hausse ou à la baisse n'est visible, une tendance à la hausse se dessine à partir des années 1990.

Une analyse des tendances (Ribes et al., 2016) montre un accroissement de la valeur de l'indicateur sur la période 1961-2015 qui est comprise entre 14% et 30% (intervalle de confiance de 90%). Cette tendance est statistiquement significative (probabilité inférieure à 1% d'observer cette valeur en l'absence de tendance). Cette augmentation représente de 1 à 3 fois, et même possiblement 4 fois, l'augmentation déduite de l'augmentation de l'humidité atmosphérique en fonction de la température (relation de Clausius-Clapeyron).

Couverture spatiale et temporelle des données

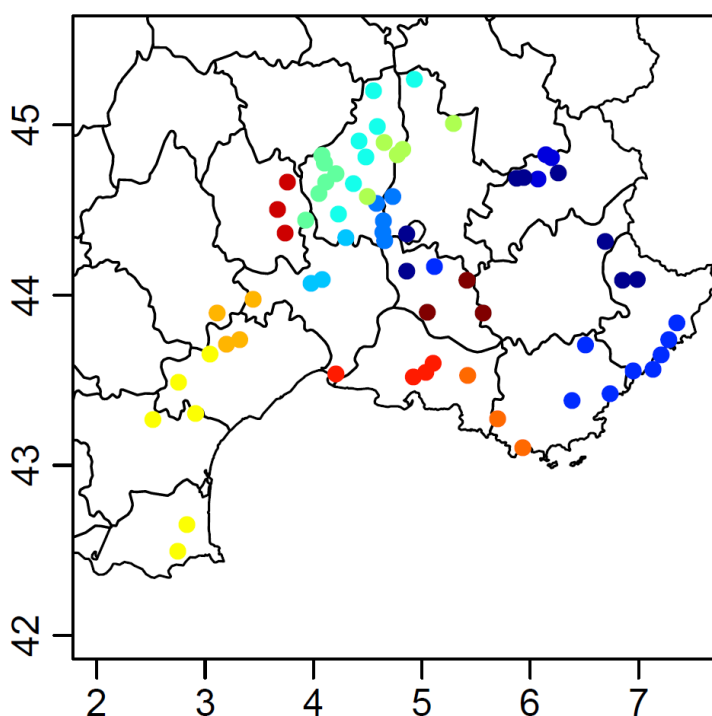
Régionale

Période : 1961 à 2015 - Fréquence : annuelle

Provenance

[Météo France](#)

Regroupement en 14 classes, identifiées par des couleurs spécifiques, des 69 stations utilisées pour le calcul de l'indicateur d'intensité des pluies.



Responsable de l'indicateur

A définir.

Organisme propriétaire des données

[Météo France](#)

Définition de l'indicateur

Cet indicateur présente l'évolution de l'intensité du maximum annuel des pluies quotidiennes sur les régions méditerranéennes de la France (à l'exception de la Corse) calculée à partir de 1961. Une moyenne pondérée de 69 séries sélectionnées en font un indicateur représentatif de l'ensemble de ces régions.

Méthode de calcul de l'indicateur

Les données de base sont des séries de mesures de précipitations quotidiennes collectées à des stations météorologiques et satisfaisant à différents critères. Les critères de sélection concernent : (i) une contrainte de couverture temporelle (au moins 335 jours d'observation par an et pas plus de 3 années manquantes sur la période 1961-2015) ; (ii) une contrainte d'homogénéité temporelle (nombre limité de ruptures d'homogénéité de faible amplitude dans les séries de moyennes mensuelles associées) ; (iii) une contrainte sur la moyenne du maximum annuel calculée sur la période 1961-2015 qui doit être au moins égale à 60mm/jour.

Chaque série du maximum annuel des pluies quotidiennes retenue est normalisée par sa moyenne sur la période 1961-2015. Les séries normalisées sont ensuite regroupées par classe de proximité évaluée à partir d'une mesure de la ressemblance entre les séries et par application de la méthode de classification PAM (Partitionnement Autour des Médoïdes). Le nombre de classes, déterminé à partir du critère « silhouette » de la classification, est égal à 14. Les moyennes des séries normalisées sont calculées pour chacune des classes et chaque année, puis les 14 moyennes sont elles-mêmes moyennées pour former la série temporelle de l'indicateur.

Cette méthode est détaillée dans l'article de Ribes et al. (2016).

Fiabilité de l'indicateur

Les données de base ont profité des contrôles communs à l'ensemble des données de Météo-France. Les données utilisées sont celles de la BDClîm, base de données climatologiques de référence de Météo-France. Les séries mensuelles de précipitations sont homogénéisées avec un objectif de renouvellement de l'ensemble des séries tous les 5 ans. Les stations retenues dans le calcul de l'indicateur sont considérées comme prioritaires pour leur maintien dans le Réseau Climatologique d'Etat.

Justification de l'indicateur

Les régions méditerranéennes de la France sont régulièrement touchées par des épisodes de pluies diluviennes pouvant apporter des quantités d'eau très importantes sur un court laps de temps : très souvent, la hauteur normale mensuelle en seulement une journée, et pour les épisodes les plus paroxystiques, la moitié (voire plus) de la normale annuelle en seulement quelques heures. Les pluies diluviennes qui se produisent régulièrement sur les régions méditerranéennes de la France, même si elles font partie intégrante du climat « méditerranéen », ont souvent des conséquences désastreuses (pertes de vie humaines, nombreux dégâts). Dans un contexte avéré d'évolution climatique, déjà visible sur les températures, il est important de pouvoir caractériser l'évolution de ce type d'événement du point de vue de l'intensité.

Date de dernière actualisation de l'analyse technique et des données de l'indicateur

Mis à jour le 19 octobre 2016.

Perspectives pour l'indicateur

L'indicateur est mis à jour tous les ans et recalculé sur la période s'étendant de 1961 à l'année précédant l'année en cours, en prenant en compte un ensemble de séries actualisé de façon à respecter les critères de sélection (voir méthode de calcul de l'indicateur).