



Projet AP3C  
Adaptation des Pratiques Culturelles  
au Changement Climatique.

# Robustesse des projections climatiques et agro-climatiques

Avril 2021



Avec la participation de



# TABLE DES MATIERES

## INTRODUCTION

|        |  |      |
|--------|--|------|
| 1.     | Panel de simulations   | p 1  |
| 2.     | Robustesse paramètres climatiques standard                   | p 2  |
| 2.1.   | Températures   | p 3  |
| 2.2.   | ETP  | p 3  |
| 2.3.   | Précipitations   | p 3  |
| 2.3.1. | Station de Le Montat (46)                                    | p 4  |
| 2.3.2. | Station de Fontannes (43)                                    | p 4  |
| 3.     | Robustesse paramètres climatiques extrêmes                   | p 4  |
| 3.1.   | Températures   | p 5  |
| 3.1.1. | Station de Le Montat (46)                                    | p 5  |
| 3.1.2. | Station de Saugues (43)                                      | p 6  |
| 3.2.   | Précipitations   | p 6  |
| 3.2.1. | Dépassements de seuils                                       | p 6  |
| 3.2.2. | Cumul quotidien décennal                                     | p 8  |
| 4.     | Stabilité des distributions des indicateurs agro-climatiques | p 9  |
| 4.1.   | Repérage de biais  | p 9  |
| 4.2.   | Proposition de correction des biais                          | p 11 |

## CONCLUSION

ANNEXES (consulter les fichiers téléchargeables indépendamment)

# INTRODUCTION

Les méthodes de projections climatiques statistiques mises au point par le projet AP3C, et avant lui son précurseur centré sur la Creuse, ont été imaginées au départ dans un but d'adaptation agronomique. Nous nous sommes donc orientés initialement vers l'explicitation des dérives tendanciennes, qui nous semblaient mal prises en compte, plutôt que vers l'appréciation de l'évolution des aléas « extrêmes », qui nous semblaient faire l'objet d'un panel d'études déjà engagées.

L'objectif initial s'est peu à peu amendé, à la fois du fait de raffinements techniques qui ont eu un impact collatéral sur l'estimation des événements « rares » et aussi du fait de demandes qui ont commencé à se faire jour après la publication de nos premiers résultats.

Le point qui n'avait pas été explicité jusqu'à présent c'est jusqu'à quel niveau de « rareté » nos projections climatiques sont utilisables, en particulier d'un point de vue agro-climatique. Nous avons opéré selon 2 approches.

Premièrement, est-ce que les formules de l'ensemble des indicateurs agro-(pédo-)climatiques calculés jusqu'à présent utilisent des seuils qui sont contenus dans la zone robuste des projections climatiques effectuées par AP3C ?

Deuxièmement, est-ce que les probabilités rares des projections des indicateurs agro-climatiques (IAC) présentent des biais évidents face aux calculs sur les données observées ?

Pour le premier point, nous étudierons dans ce document les évolutions d'événements ordinaires d'un côté, concernant les paramètres températures, ETP et précipitations, et « extrêmes » d'un autre, concernant les températures maximales et les précipitations. Concernant les ETP, il n'y aurait guère de sens dans une détermination d'événements extrêmes vu qu'elles sont bornées par la physiologie et que cette limitation est retranscrite dans la formule de calcul. Quant aux températures minimales, elles sont projetées de manière conjointe aux températures maximales et elles n'ont pas fait l'objet d'un indicateur s'intéressant à des événements très froids, jusqu'à présent.

Pour le second point, le critère sera une appréciation graphique visuelle, pour chaque IAC et chaque point de mesure, d'un biais « évident ». Elle sera suivie de statistiques descriptives de fréquences des biais, indicateur par indicateur, et d'une proposition de réduction de ces biais.

## 1. Panel de simulations

La manière habituelle d'argumenter sur la robustesse d'un processus consiste généralement à le répéter un grand nombre de fois, dans des conditions presque identiques de déroulement. On fabrique ainsi des grands ensembles où seul un paramètre varie à la fois.

Nous ne pouvions agir exactement de cette manière avec les projections climatiques effectuées par AP3C, pour des raisons évidentes de moyens humains et matériels.

En effet, les diverses procédures utilisées dans ce projet, durant ses phases 1 et 2 qui se sont terminées au 31/12/2019, ont été exécutées en mode de développement, c'est-à-dire avec une supervision importante et manuelle du concepteur. Si on ne considère que les projections climatiques, effectuées en 10 000 exemplaires, on peut estimer le temps de travail à 18 mois pleins, pour l'ensemble du réseau et tous les paramètres (températures mini et maxi, précipitations et ETP). En ôtant le temps de développement, il resterait un minimum de 6 mois de travail à temps plein pour une réplique, ce qui est particulièrement prohibitif pour une seule itération.

Certes, il y avait la possibilité théorique de ne traiter que quelques stations (3 à 5) sur le domaine mais la robustesse n'aurait pas pu être testée dans toute la variété des conditions du Massif central. Donc nous avons mis au point un programme différent et progressif. Tout d'abord, nous avons automatisé (ou semi-automatisé en cas de nécessité) l'ensemble des procédures, aboutissant à une efficacité de traitement améliorée d'un facteur 3 environ. Ceci nous a permis d'envisager la répétition des projections sur un réseau plus important, soit les quelques 30 points de mesure de l'ETP.

Ensuite, plutôt que de répliquer la démarche à l'identique un grand nombre de fois, nous avons introduit de légères modulations méthodologiques sur un ensemble total de 6 modèles, chacun exécuté « une fois » mais en 10 000 exemplaires. Dans le détail, nous avons agi sur les modalités d'ajustements de la distribution des résidus désorganisés (voir le rapport technique sur la méthode climatique pour plus de détail) et de la distribution des paramètres complets, sur la période d'observation (qui est donc une réanalyse pour les simulations).

Examinons brièvement ces 6 modèles :

- **Méthode manuelle initiale** : c'est celle qui a effectivement été utilisée pour produire (presque) tous les résultats opérationnels de AP3C. Les résidus simulés suivent une loi gaussienne (normale), entièrement définie par sa moyenne et son écart-type, paramètres qui sont repris avec l'incertitude associée sur les résidus désorganisés des observations. La distribution reconstituée sur la période observée, en moyenne des simulations, est ajustée de manière statique. On passe par l'intermédiaire d'un graphe Quantile-Quantile qu'on idéalise par 5 à 10 segments de droites. Le choix du nombre et de la position des segments est laissé à l'expert.

- **Méthode automatique 0-S** : elle a été utilisée pour produire effectivement quelques résultats climatiques de stations situées en dehors du périmètre des 11 départements engagés dans AP3C mais incluses dans le périmètre du Massif central. C'est également cette méthode dont on a utilisé les résultats pour la cartographie en adaptation aux reliefs de proximité, au pixel de 500m. Il s'agit de la réplique la plus proche possible de la méthode manuelle et c'est celle qui fait l'objet de la documentation technique complète de la méthode climatique AP3C. Les résidus suivent une loi gaussienne (d'où un ajustement « 0 » par rapport à cette gaussienne...). Les distributions simulées sur la période observée sont ajustées de manière « S »tatique. Les points de définitions des segments qui idéalisent la correspondance Quantile-Quantile sont déterminés de manière automatique, en positions fixes. Ceci implique donc un nombre bien plus important de ces segments d'ajustement.

Pour les températures, nous sommes partis d'une suite de Fibonacci sur les séries ordonnées, depuis chaque extrémité de la distribution (n°2, n°8, n°10...) ce qui aboutit à 32 points de détermination. Ceci a pu être répliqué pour les ETP. Cependant, avec les précipitations, la démarche était en échec, avec de forts écarts résiduels, vers le milieu de la fonction de répartition. Donc, nous avons abandonné la tentative de mathématisation stricte, et des points supplémentaires de contrôle ont été ajoutés pour arriver à un total de 62 points.

- **Méthode automatique D-S1** : Les résidus simulés sont ajustés sur 30 quantiles « D » dynamiques par rapport aux résidus observés. Pour le futur, on poursuit l'évolution de la paramétrisation des quantiles, sans accélération. Les distributions reconstituées sur la période d'observation sont ajustées de manière « S » statique avec le même nombre de segments de contrôle que la méthode 0-S.

- **Méthode automatique D-S2** : La seule modification par rapport à la méthode D-S1 est l'augmentation du nombre de segments de contrôle pour l'ajustement de la distribution totale reconstituée. On passe à 62 points de détermination pour les températures et l'ETP et 72 pour les précipitations. Les dix points supplémentaires ont été choisis sur les portions de la courbe Quantile-Quantile qui pouvaient contenir de rapides variations. Ceci s'est fait grâce à l'expérience acquise sur la méthode D-S1.

- **Méthode automatique D-D1S** : Avant l'étape d'ajustement « S » statique final, effectué de la même manière que pour la méthode D-S2, on ajoute une opération d'ajustement « D » dynamique de quantiles, autrement dit paramétrisé par le temps. L'étape statique finale reste indispensable car l'ajustement dynamique se fait sur un nombre restreint de 30 quantiles.

- **Méthode automatique D-D2S** : Par rapport à la méthode D-D1S, on ne change que le nombre de quantiles ajustés sur la distribution totale soit 60 au lieu de 30.

Nous avons donc obtenu en tout 6 itérations des projections climatiques du projet AP3C, et même 12 pour les températures si on considère qu'elles sont obtenues à la fois seules et via les relations avec l'ETP. Sur ces itérations, nous avons effectué 2 types de vérifications de robustesse, sur les éléments standard de la climatologie (regroupés sur les résumés climatiques) et sur des valeurs extrêmes de températures maximales et de hauteur de précipitations.

Nous avons également effectué des vérifications directes de stabilité des distributions des Indicateurs Agro-Climatiques (IAC) produits à partir de ces projections.

## **2. Robustesse paramètres climatiques standard**

Pour chacune des 33 stations (29 seulement pour les projections initiales manuelles) ayant subi le processus des projections AP3C, on a édité un résumé climatique à longue période (échéances 2000, 2020 et 2050) pour chaque type de simulations. Ensuite, ces 6 ou 12 résumés ont été « empilés » et résumés en 3 fiches synthétiques : une fiche de moyenne multi-modèles, une autre d'écart-type et une dernière de rapport entre les deux, en pourcentage, qu'on appelle le coefficient de variation. On a également effectué une synthèse générale en 3 fiches de l'ensemble du réseau. Autant que possible, on utilisera cette synthèse générale pour les descriptions ci-après mais tous les documents originaux sont disponibles en annexe.

## 2.1. Températures

Pour les 3 premières lignes des résumés climatiques (des moyennes de températures), seuls les écart-types sont pertinents pour décrire la robustesse. Sur la synthèse de l'ensemble du réseau, on remarque une certaine croissance de la variabilité inter-simulations, avec le temps qui avance, mais ça reste très contenu. Les valeurs annuelles d'écart-type, de 0,05°C à 0,06°C vers 2050, sont très inférieures à l'évolution des températures en 50 ans, qui sont respectivement de +1,6°C, +2,1°C et +1,8°C en températures minimales (Tn), maximales (Tx) et moyennes (Tm). Au pire la variabilité inter-modèles représente 3 % de l'évolution. Pour les valeurs mensuelles, c'est à peine plus marqué, les écart-types plafonnent à 0,11°C en Tn, 0,22°C en Tx et 0,13°C en Tm. En automne, comme l'évolution des Tx est faible, l'écart-type peut approcher les 20 % de l'évolution prévue en 50 ans.

Pour les 5 lignes suivantes, qui sont des dépassements de seuils, la variabilité des résultats des projections progresse avec la rareté des phénomènes. Ainsi, pour les  $T_x \geq 25^\circ\text{C}$ , l'écart-type annuel à l'échéance 2050 atteint 1,46j pour une évolution de 24,75j en 50 ans, soit 5,9 %. Mais, pour les  $T_x \geq 30^\circ\text{C}$ , l'écart-type progresse à 1,65j pour des évolutions en 50 ans de 14,04j, soit 11,8 %.

Même chose avec les jours de gel. Pour les gels faibles  $T_n \leq 0^\circ\text{C}$ , l'écart-type est de 1,56j pour une évolution en 50 ans de 24,74j soit 6,3 %. Tandis que pour les gels forts avec  $T_n \leq -5^\circ\text{C}$ , l'écart-type est de 1,05 pour une évolution de -10,7j en 50 ans, soit 9,8 %.

D'une manière générale, cependant, la robustesse reste élevée sur ces éléments climatiques thermiques standard. Les incertitudes ne font que moduler légèrement les estimations d'évolutions entre 2000 et 2050.

## 2.2. ETP

Pour le cumul annuel de l'ETP, l'écart-type inter-simulations atteint 7,03mm pour une évolution moyenne projetée de +152,1mm en 50 ans, soit 4,6 %.

En ce qui concerne les jours avec ETP fort ( $ETP \geq 5\text{mm}$ ), il faut compter avec un écart-type qui atteint 1,74j, face à une évolution de +28,13j en 50 ans, soit 6,2 %.

Par contre, le nombre de jours d'ETP faible ( $ETP \leq 1\text{mm}$ ) évolue peu, de 8,5j en 50 ans, donc l'écart-type inter-simulations de 2,12j en constitue une part importante, soit 26 %.

Certes, les évolutions faibles sont plus incertaines quant au signe, ce qui est attendu, mais les projections climatiques de AP3C sont suffisamment robustes pour ne pas remettre en cause le sens de l'évolution des ETP.

## 2.3. Précipitations

Nous sommes face à une difficulté de mélange de situations très diverses au regard de l'évolution des précipitations. Ainsi, l'évolution du nombre de jours de précipitations supérieures à 1, 5 ou 10mm est elle très faible et toujours dominée par l'écart-type inter-simulations vers 2050, et ceci pour la moyenne du réseau.

Donc, nous allons plutôt regarder 2 stations particulières, à priori dans des situations d'évolution contrastées.

### **2.3.1 Station de Le Montat (46)**

Nous nous trouvons dans le cas d'une station avec baisse significative des précipitations, de 10 à 15 % en 50 ans en cumul annuel comme en jours de dépassement de seuil, donc sans grande modification de la répartition des intensités.

Pour le cumul annuel, l'écart-type inter-simulations en 2050 atteint 8,07mm face à une diminution entre 2000 et 2050 de 90,7mm soit 11 %.

Pour les jours très pluvieux ( $RR \geq 10\text{mm}$ ), l'écart-type atteint 1,08j face à une diminution entre 2000 et 2050 de 3,6 soit 30 %.

Ces valeurs sont certes plus élevées que celles des ETP ou des températures, mais elles ne remettent pas en cause le sens des évolutions projetées par AP3C (car l'écart-type est nettement inférieur à l'évolution).

### **2.3.2 Station de Fontannes (43)**

Nous nous trouvons dans un cas inverse où le cumul annuel des précipitations augmente légèrement et avec une modification significative de la distribution des intensités, moins de pluies faibles et plus de pluies fortes.

Pour le cumul annuel, l'écart-type inter-simulations atteint 9mm en 2050, soit 100 % de l'évolution prévue entre 2000 et 2050 mais 30 % seulement de celle prévue entre 2020 et 2050.

Pour les jours de faible pluie ( $RR \geq 1\text{mm}$ ), l'écart-type en 2050 atteint 5,5j face à une diminution prévue de 16,5j en 50 ans, soit 33,3 %.

Pour les jours de forte pluie ( $RR \geq 10\text{mm}$ ), l'écart-type inter-simulations atteint 1,59j en 2050, face à une augmentation prévue de 2,4j en 50 ans, soit 66,3 %.

Pour les deux stations, les valeurs d'écart-type inter-simulations sont plus élevées pour les précipitations que pour les autres paramètres, mais là encore, elles ne remettent pas en cause le signe des évolutions projetées (écart-type inférieur à l'évolution).

Pour l'ensemble des paramètres climatiques standard, les projections climatiques apparaissent donc robustes. De plus, tous les IAC et IAPC (Indicateurs Agro-Pédo-Climatiques) calculés pour le projet AP3C, à l'exception d'un seul IAC concernant le maïs, utilisent des valeurs qui sont intégralement contenues dans le domaine décrit par les paramètres climatiques standard. Par exemple les seuils de cumul de précipitations quotidiennes retenus sont tous inférieurs ou égal à 10mm, de même que les seuils de température maximale quotidienne sont inférieurs à 30°C.

On peut donc déjà en conclure que ces IA(P)C sont également robustes, au moins en valeurs centrales.

## **3. Robustesse paramètres climatiques extrêmes**

On abordera dans cette partie les dépassements annuels de seuils de températures maximales et de hauteurs de précipitations quotidiennes. Pour les précipitations, on ajoutera l'étude du cumul

quotidien décennal, qui a une importance particulière dans le domaine de l'hydrologie et qui pourrait donc faire l'objet d'un intérêt spécifique.

Pour chacune des 33 stations concernées, et pour chacune des 6 ou 12 projections, on a édité des tableaux de dépassement de seuils, qu'on pourra consulter en annexe.

### 3.1. Températures

A noter un point important et spécifique aux températures, c'est que les seuils ne sont pas fixes car ça n'aurait pas de sens de comparer directement les températures à basse altitude dans le Lot avec celles d'altitude supérieure à 1000 mètres dans le Cantal ou la Haute-Loire. Le seuil de base pour chaque station est la plus haute moyenne mensuelle des Tx (en climat-type 2000). C'est souvent le mois de juillet qui est concerné, mais parfois aussi le mois d'août.

Ensuite, on a étudié les dépassements de ces seuils de base de +8°C, +9°C... jusqu'à +14°C pour chacune des 12 simulations. Puis, on les a agrégés pour avoir la moyenne et l'écart-type des dépassements de seuils côte à côte. Les échéances choisies sont habituelles pour AP3C, soit 2000, 2020, 2030, 2040 et 2050. On a reporté 4 valeurs statistiques dans 4 tableaux individuels, en moyenne, en quintile 4 (p=0,8), en décile 9 (p=0,9) et en « vingtile » 19 (p=0,95).

Enfin, on a empilé les 33 feuilles par station pour en faire une synthèse de l'ensemble de la zone, qu'on va pouvoir commenter ci-après.

Si on considère les valeurs moyennes et qu'on regarde les évolutions relatives entre 2000 et 2050, on passe d'un accroissement d'un facteur 3 des dépassements de 24,5+8°C (soit 32,5°C) à un accroissement d'un facteur 10 des dépassements de 24,5+14°C (soit 38,5°C). Degré par degré ces facteurs d'accroissement valent 3 ; 3,4 ; 4 ; 4,8 ; 6 ; 8,4 et 10,3.

Certes, la variabilité inter-simulations augmente avec l'avancée en temps vers le futur et avec la hauteur du seuil, mais pas au point de remettre en cause le sens et la progressivité de l'évolution. Le coefficient de variation (écart-type/moyenne) varie de 2,9 % à 39 % du climat 2000 avec dépassement de seuil à +8°C, au climat 2050 avec dépassement de seuil à +14°C.

Il y a cependant quelques modulations selon les stations. On va étudier plus particulièrement un exemple de station chaude (Le Montat dans le Lot) et un exemple de station froide (Saugues en Haute-Loire).

#### 3.1.1 Station de Le Montat (46)

En année moyenne, on remarque que les valeurs sont plus basses que celles de la moyenne zonale en début de période (2000) mais la progression est plus rapide vers le futur. Les facteurs d'accroissement entre 2000 et 2050, degré par degré, sont respectivement de 4,8 ; 5,7 ; 6,8 ; 8,5 ; 11,6 ; 16,1 et 21.

Il est probable que cette évolution très rapide des températures extrêmes est à mettre en lien avec un assèchement croissant vers le futur, qui favorise les variations de températures.

Ce qu'on avait en 2000, en dépassement de seuil de base +8°C, on le retrouve en 2040 à +11°C. Donc, dans certaines gammes de températures élevées (mais pas les plus extrêmes), les évolutions sont de +3°C en 40 ans, soit +7,5°C par siècle. Si on regarde les températures vraiment extrêmes, ce qu'on a en 2030 en dépassement de seuil de +13°C, on le retrouve en 2050 à +14°C, soit une évolution de +1°C en 20 ans, soit +5°C par siècle, c'est-à-dire un peu moins virulent.



Cet épuisement relatif de la hausse des températures, est probablement à mettre en lien avec des limites physiques : quand on arrive à une sécheresse intense, un surcroît de sécheresse ne modifie plus beaucoup la capacité calorifique de l'air, c'est-à-dire sa propension à être réchauffé ou refroidi.

On peut penser que ces chiffres sont cohérents, en termes de situations météorologiques, avec des vagues de chaleur en évolutions différenciées vers le futur. Celles résultant de flux de Sud intenses contenant des valeurs réellement extrêmes mais avec une forte variabilité intra-période ne sont pas en évolution la plus rapide. Celles correspondant à des situations de blocages de durée importante, avec des valeurs moins extrêmes et assez stables en intra-période, sont en évolution très rapide à la hausse.

Le coefficient de variation (écart-type/moyenne) varie de 2,4 % à 52 % du climat 2000 avec dépassement de seuil à +8°C, au climat 2050 avec dépassement de seuil à +14°C.

### **3.1.2 Station de Saugues (43)**

En année moyenne, on remarque que les valeurs sont plus hautes que celles de la moyenne zonale en début de période (2000) mais la progression entre 2000 et 2050 est plus lente vers le futur. Les facteurs d'accroissement °C par °C sont respectivement de 1,7 ; 1,9 ; 2,1 ; 2,4 ; 2,7 ; 3,6 et 5.

Il est probable que cette évolution limitée est à mettre en lien avec une augmentation des précipitations instables estivales ce qui perturbe le cycle diurne des températures. On peut remarquer que malgré la non-évolution des températures maximales moyennes estivales qui en résulte, les extrêmes de températures évoluent significativement à la hausse.

Ce qu'on avait en 2000, en dépassement de seuil de base +8°C, on le retrouve en 2040 à +9°C. Donc, dans certaines gammes de températures élevées (mais pas les plus extrêmes), les évolutions sont de +1°C en 40 ans, soit +2,5°C par siècle. Si on regarde les températures vraiment extrêmes, ce qu'on a en 2000 en dépassement de seuil de +13°C, on le retrouve en 2050 à +14°C, soit une évolution de +1°C en 50 ans, soit +2°C par siècle, c'est-à-dire un peu moins fort, comme dans le cas de Le Montat (46).

Le coefficient de variation (écart-type/moyenne) varie de 3,8 % à 80 % du climat 2000 avec dépassement de seuil à +8°C, au climat 2050 avec dépassement de seuil à +14°C.

D'une manière générale, les simulations d'extrêmes de températures sont robustes. La robustesse diminue avec la rareté et le décalage vers le futur mais pas au point de remettre en cause le sens de l'évolution. Pour quelques stations, les dépassements de seuils de base +14°C peuvent être entachés d'une incertitude supérieure à 50 %, donc on conseillera de limiter les considérations de dépassement à +13°C.

Concernant l'IAC relatif à l'échaudage du maïs (avec un indicateur de  $T_x \geq 32^\circ\text{C}$ ), on se trouve en limite de fonctionnement uniquement pour la station de St Nicolas (Allier, alt. 1022m). On peut remarquer que, en ce cas, la valeur absolue du risque d'échaudage restera très faible. Donc on peut considérer que tous les IA(P)C thermiques sont robustes, au moins en valeurs centrales.

## **3.2. Précipitations**

### **3.2.1 Dépassements de seuils**

Les valeurs choisies pour le nombre annuel de dépassement de seuils partent de 10mm, soit la plus haute valeur des éléments statistiques standard et aussi la plus haute valeur utilisée par les IA(P)C de AP3C, et vont jusque 100 mm, en passant par 20, 30, 40, 50 et 70 mm.

Plus encore que pour les éléments climatiques standard, l'étude de la moyenne zonale n'apporte guère d'informations pertinentes parce qu'elle résulte de la superposition de situations différenciées. La variabilité inter-simulation en 2050 dépasse toujours l'évolution prévue entre 2000 et 2050.

A noter cependant que sur l'échéance initiale (climat-type 2000) qui correspond de près à ce qui est déterminé sur la période observée (1980-2015), les valeurs sont robustes avec des coefficients de variation de 1,8 % ; 3,1 % ; 4,2 % ; 5,1 % ; 6,3 % ; 6,7 % et <25 % pour les seuils respectifs de 10, 20, 30, 40, 50, 70 et 100 mm.

L'évolution vers le futur est extrêmement contrastée, ainsi par exemple la station de Brive (19) voit ses occurrences diminuer significativement jusque 30 mm au moins tandis que c'est l'inverse pour Fontannes (43).

Pour aller un peu plus loin, on va regarder la situation station par station sur 2 critères : la valeur du coefficient de variation pour le seuil 10 mm en 2050 et le dernier seuil où ce coefficient reste en-dessous de 15 %, en 2050 également :

| Station         | Coef. Variation à 10 mm | Dernier seuil sous 15 % | Station               | Coef. Variation à 10 mm | Dernier seuil sous 15 % |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| 03-Vichy        | 2%                      | 30 mm                   | 42-Perreux            | 4%                      | 10 mm                   |
| 03-Lurcy-Levis  | 9%                      | 10 mm                   | 43-Le Puy             | 10%                     | 20 mm                   |
| 03-St Nicolas   | 14%                     | 10 mm                   | 43-Fontannes          | 8%                      | 10 mm                   |
| 07-Colombier    | 8%                      | 30 mm                   | 43-Landos             | 7%                      | 20 mm                   |
| 12-Millau       | 8%                      | 20 mm                   | 43-Mazet              | 8%                      | 30 mm                   |
| 12-Aubrac       | 5%                      | 30 mm                   | 43-Saugues            | 5%                      | 40 mm                   |
| 12-Salles       | 10%                     | 20 mm                   | 46-Gourdon            | 7%                      | 10 mm                   |
| 12-Villefranche | 5%                      | 10 mm                   | 46-Le Montat          | 5%                      | 10 mm                   |
| 15-Coltines     | 5%                      | 20 mm                   | 58-Chinon             | 2%                      | 20 mm                   |
| 15-Marcenat     | 4%                      | 30 mm                   | 63-Ambert             | 7%                      | 20 mm                   |
| 15-Maurs        | 4%                      | 20 mm                   | 63-Clermont           | 3%                      | 30 mm                   |
| 19-Brive        | 6%                      | 10 mm                   | 63-St Genès           | 4%                      | 10 mm                   |
| 19-Naves        | 4%                      | 20 mm                   | 63-St Gervais         | 3%                      | 20 mm                   |
| 19-Ussel        | 3%                      | 10 mm                   | 81-Montredon          | 2%                      | 40 mm                   |
| 23-Ahun         | 8%                      | 10 mm                   | 87-Limoges            | 3%                      | 10 mm                   |
| 23-Bourganeuf   | 1%                      | 10 mm                   | 87-St Yrieix          | 6%                      | 10 mm                   |
| 42-St Etienne   | 2%                      | 20 mm                   | <b>Moyenne zonale</b> | <b>5%</b>               | <b>20 mm</b>            |

Tableau 1 : Coefficients de variation pour 10mm de cumul de précipitations quotidiennes et dernières valeurs de ce cumul avec un coefficient de variation restant sous les 15 %.

Si on veut être certain que toutes les stations donnent un résultat robuste à échéance 2050, il convient donc de se limiter au seuil de 10 mm quotidien, ce qui a été effectivement fait.

Il est à noter que c'est un test sévère pour les projections AP3C car il mélange des simulations où rien de particulier n'a été fait pour l'appréciation des fortes valeurs et d'autres où des opérations ont été initiées pour ajuster des quantiles correspondant généralement à des hauteurs

quotidiennes jusque 15-25mm pour la méthode D-D1S et 20-30mm pour la méthode D-D2S, mais avec une incertitude statistique importante.

En ce qui concerne les précipitations, l'étude des extrêmes en cumul quotidien ne peut être raisonnablement effectuée en utilisant directement les valeurs produites par la méthodologie climatique de AP3C. On suggère plutôt une méthode à deux facettes, c'est-à-dire un calcul de variabilité sur les projections et d'autre part une comparaison entre les moyennes de ces projections et les valeurs obtenues par une méthode classique d'étude des valeurs extrêmes sur les données observées.

### 3.2.2 Cumul quotidien décennal

Etant donnée l'étude sur les dépassements de seuils qui vient d'être déroulée, il est inutile d'étudier la robustesse des projections jusqu'en 2050 de ce cumul quotidien décennal, qui évolue autour de 50 à 100 mm. Par contre, il reste utile d'étudier la distribution de ce cumul sur l'échéance 2000. Ceci permettra d'accéder à l'incertitude statistique de détermination, sur une période équivalente à la période observée 1980-2015.

| INSEE  | Station            | Période 1980-2015, observation | Climat-type 2000, 6 simulations, moyenne |   | Climat-type 2000, 6 simulations, écart-type |
|--------|--------------------|--------------------------------|--|---|---|
| 03060  | Vichy-Charmeil     | 63,1                           | 61,3                                     | ± | 0,6   |
| 03155  | Lurcy-Levis        | 49,8                           | 49,4                                     | ± | 0,2   |
| 03248  | St-Nicolas         | 107,1                          | 103,7                                    | ± | 4,2   |
| 07107  | Colombier Jeune    | 164,8                          | 139,7                                    | ± | 2,2   |
| 12145  | Millau             | 70,3                           | 74,6                                     | ± | 1,4   |
| 12214  | Aubrac             | 93,8                           | 88,8                                     | ± | 1,0   |
| 12254  | Salles la Source   | 66,6                           | 68,3                                     | ± | 1,4   |
| 12300  | Villefranche       | 56,3                           | 55,5                                     | ± | 0,4   |
| 15053  | Coltines           | 66,6                           | 65,3                                     | ± | 0,8   |
| 15114  | Marcenat           | 74,2                           | 76,5                                     | ± | 2,0   |
| 15122  | Mauris             | 62,5                           | 62,9                                     | ± | 0,8   |
| 19031  | Brive              | 59,7                           | 58,6                                     | ± | 1,2   |
| 19146  | Naves              | 54,9                           | 57,3                                     | ± | 1,7   |
| 192754 | Ussel les Plaines  | 63,2                           | 62,1                                     | ± | 0,6   |
| 23001  | Ahun               | 65,4                           | 65,4                                     | ± | 1,0   |
| 23030  | Bourganeuf         | 56,3                           | 55,7                                     | ± | 0,2   |
| 42005  | St Etienne         | 76,5                           | 77,9                                     | ± | 1,4   |
| 42170  | Perreux            | 73,4                           | 65,3                                     | ± | 1,7   |
| 43062  | Le Puy             | 69,2                           | 68,7                                     | ± | 0,8   |
| 43096  | Fontannes          | 55,7                           | 56,1                                     | ± | 0,3   |
| 43111  | Landos-Charbon     | 78,5                           | 79,5                                     | ± | 1,9   |
| 43130  | Mazet-Volamont     | 101,5                          | 104,6                                    | ± | 0,9   |
| 43234  | Saugues            | 67,7                           | 65,3                                     | ± | 0,4   |
| 46127  | Gourdon            | 68,8                           | 66,6                                     | ± | 0,5   |
| 46197  | Le Montat          | 59,7                           | 64,5                                     | ± | 1,3   |
| 58062  | Chateau-Chinon     | 59,5                           | 60,8                                     | ± | 0,4   |
| 63003  | Ambert             | 81,8                           | 88,2                                     | ± | 2,9   |
| 63113  | Clermont-Ferrand   | 55,4                           | 54,3                                     | ± | 0,1   |
| 63345  | St Genès           | 60,6                           | 60,4                                     | ± | 0,3   |
| 63354  | St Gervais         | 70,3                           | 70,8                                     | ± | 0,8   |
| 81182  | Montredon          | 84,3                           | 83,7                                     | ± | 0,8   |
| 870856 | Limoges-Bellegarde | 53,7                           | 55,3                                     | ± | 1,2   |
| 87187  | St Yrieix          | 49,3                           | 48,9                                     | ± | 0,3   |

Tableau 2: Précipitations quotidiennes décennales. Comparaison des calculs sur observations et via les répétitions de simulations.

Tant qu'on en reste à l'échéance 2000, le cumul quotidien décennal est très robuste, avec un écart-type inter-simulations qui atteint au maximum 4 % de la valeur. Sur l'ensemble du réseau le biais systématique de détermination entre les données observées et la réanalyse à l'échéance 2000 est de l'ordre de 1 %, soit tout à fait négligeable.

Il est probable que c'est la réanalyse à l'échéance 2000 qui est très généralement un meilleur estimateur du cumul décennal sur la période observée (1980-2015), plutôt que la détermination directe, sur une période de 36 ans seulement.

Attention cependant à la réaction particulière de Colombier Jeune (valeur réanalysée inférieure de 15 % à l'observée et biais nul en son absence sur le réseau). Elle incitera à effectuer une analyse spécifique en cas d'extension de la méthode AP3C sur un domaine où interviennent les précipitations de type méditerranéen.

#### **4. Stabilité des distributions des indicateurs agro-climatiques**

Des contraintes de temps et de moyens nous ont conduit à utiliser des méthodes faisant une large part à l'expertise humaine. Ainsi nous avons utilisé l'analyse visuelle des représentations graphiques de l'évolution des IAC entre 1980 et 2050, sur lesquelles figure également le calcul sur les données observées entre 1980 et 2015.

##### **4.1. Repérage de biais**

Les premières analyses visuelles des représentations graphiques des IAC nous ont permis de spécifier des critères de contrôle des biais qui nous ont semblé efficaces.

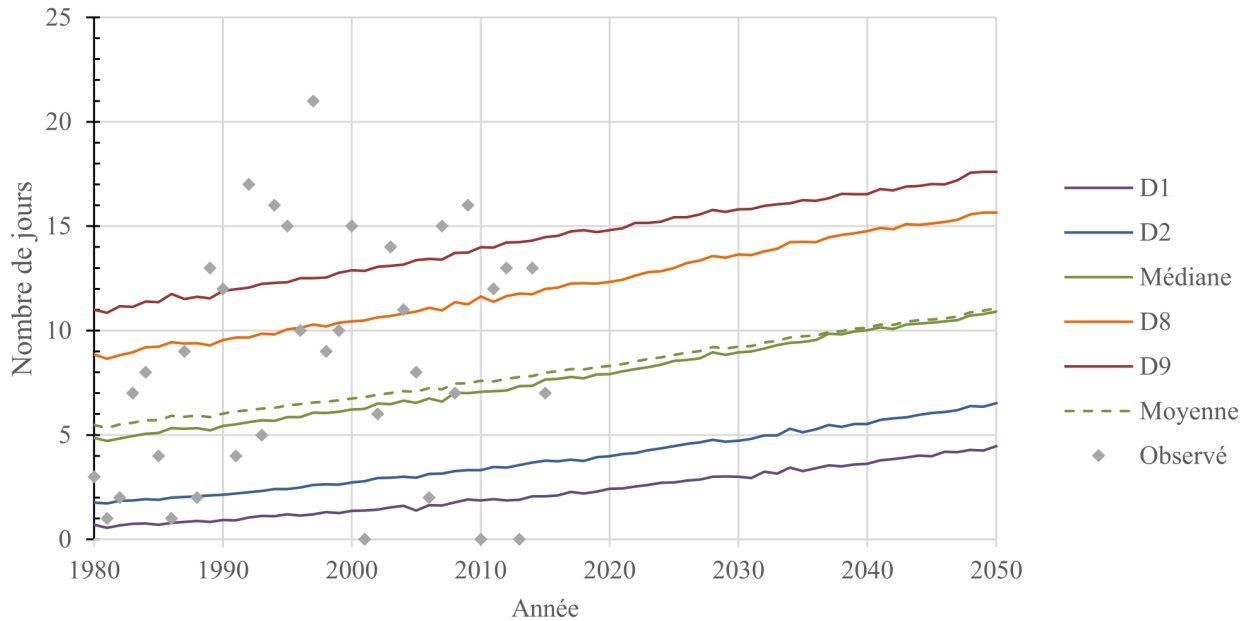
On s'est donc concentré sur le repérage de la « sous-variabilité » des projections par rapport aux observations, car d'une part on confirme qu'il n'y a pas de dérives des valeurs centrales et d'autre part, il n'apparaît pas de « sur-variabilité » de ces projections. En bref, s'il y a un défaut, c'est une concentration un peu trop forte des simulations autour de leurs valeurs centrales.

En pratique, on pourra se focaliser sur le positionnement des observations extrêmes par rapport aux valeurs décennales (déciles extrêmes) des simulations, sur la période de référence 1980-2015, sachant que sur 36 années, il devrait y avoir en espérance 3 ou 4 observations au-dessus du décile 9 et la même dose en-dessous du décile 1.

Pour tenir compte de l'incertitude statistique, on n'a retenu que les cas où 4 observations étaient sensiblement au-delà des déciles extrêmes.

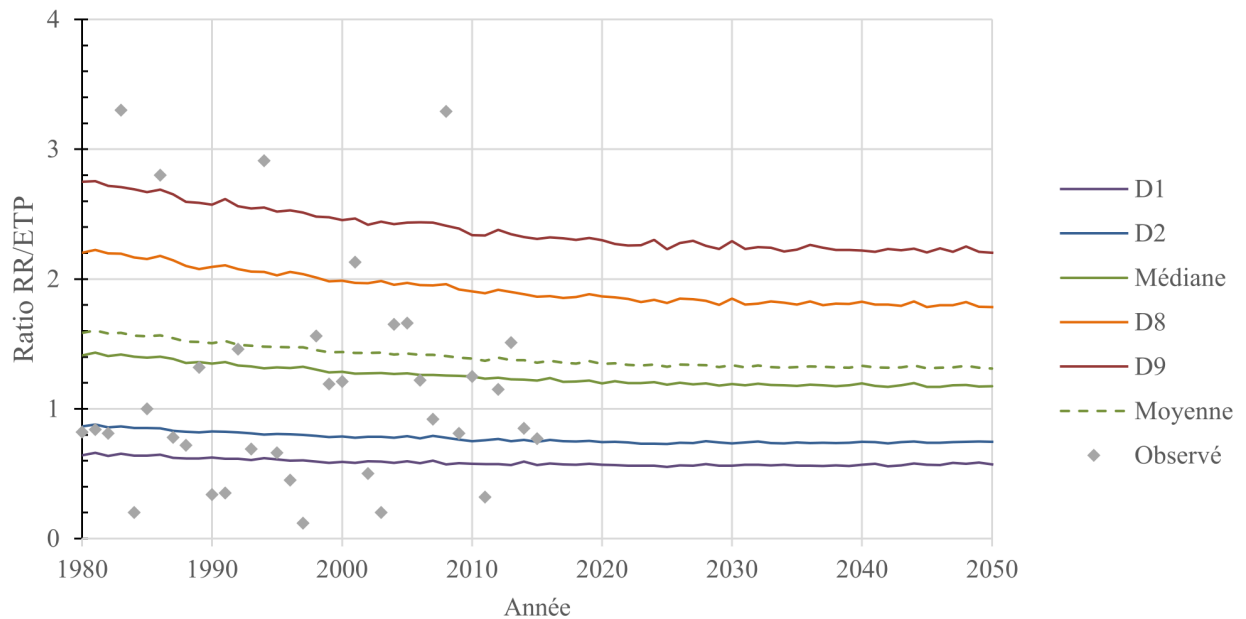
Pour chaque indicateur, ce sont au minimum 67 graphes qui ont été scrutés. On pourra voir ci-après un exemple typique de graphe avec sous-estimation du décile supérieur et un autre avec sur-estimation du décile inférieur.

*Evolution de l'IAC 29 "Périodes favorables à la mise en place des semis de prairies de printemps" de 1980 à 2050*



Graphique 1 : Sous-variabilité des projections d'un IAC, en valeurs hautes

*Evolution de l'IAC 13 "Périodes sèches du démarrage de végétation à la mise à l'herbe" de 1980 à 2050*



Graphique 2 : Sous-variabilité des projections d'un IAC, en valeurs basses

C'est le cas correspondant au premier graphique qui s'est révélé ultra-majoritaire. On présente, dans le tableau qui suit, la synthèse des quelques 2000 analyses visuelles. Pour la signification des IAC, prière de se reporter aux tableaux des pages 81 à 83 du rapport technique complet sur la méthodologie climatique.

| IAC, code chrono | Code fonctionnel | Occurrences sous-variabilité | IAC, code chrono | Code fonctionnel | Occurrences sous-variabilité | IAC, code chrono | Code fonctionnel | Occurrences sous-variabilité |
|------------------|------------------|------------------------------|------------------|------------------|------------------------------|------------------|------------------|------------------------------|
| IAC01            | Pr01             | 3                            | IAC11            | Gé02             | 18                           | IAC21            | Dé01             | 0                            |
| IAC02            | Pr02             | 3                            | IAC12            | Vi01             | 0                            | IAC22            | Dé02             | 4                            |
| IAC03            | Pr03             | 0                            | IAC13            | Pr06             | 19                           | IAC23            | Cé03             | 21                           |
| IAC04            | Pr04             | 0                            | IAC14            | Pr07             | 12                           | IAC24            | Cé04             | 48                           |
| IAC05            | Pr05             | 0                            | IAC15            | Pr08             | 17                           | IAC25            | Pr12             | 50                           |
| IAC06            | Cé01             | 18                           | IAC16            | Pr09             | 20                           | IAC26            | Pr13             | 50                           |
| IAC07            | Cé02             | 28                           | IAC17            | Pr10             | 51                           | IAC27            | Pr14             | 7                            |
| IAC08            | Ms01             | 8                            | IAC18            | Pr11             | 41                           | IAC28            | Pr15             | 25                           |
| IAC09            | Ms02             | 37                           | IAC19            | Ms04             | 3                            | IAC29            | Pr16             | 60                           |
| IAC10            | Gé01             | 3                            | IAC20            | Ms05             | 0                            | IAC30            | Ms06             | 4                            |

Tableau 3 : Occurences de sous-variabilité des déciles extrêmes des projections d'IAC

Dans le détail, quelques occurrences de décile inférieur sur-estimé se sont produites pour les IAC06, IAC10, IAC14 et IAC23 et seuls les IAC13 et IAC27 n'ont que des déciles inférieurs sur-estimés. Dans tous les autres cas, cela correspond à de la sous-estimation des déciles supérieurs.

On pourrait être impressionné par le nombre de cas de biais significatif de détermination des valeurs décennales, jusque 95 % (60/64) des possibilités pour l'IAC29. Il faut cependant pondérer cette remarque par une quantification de ces biais. Si on prend comme critère l'écart entre la médiane (toujours correctement estimée) et le décile extrême, alors la quasi-totalité des biais est inférieur à 20 % de cet écart.

#### 4.2. Proposition de correction des biais

Vu le temps imparti, cette proposition se résume à l'usage des projections climatiques les plus élaborées (alias D-D2S, voir page 2). La vérification de l'amélioration de la situation sera la répétition de l'analyse de comparaison entre les déciles extrêmes des projections des IAC sur la période observée 1980-2015 et les valeurs extrêmes de ces IAC issues directement des valeurs observées.

Cette vérification n'a pu être menée de manière exhaustive sur l'ensemble des 30 IAC, en particulier ceux qui incluaient une estimation de l'ETP n'ont pas été recalculés. Elle a pu être conduite sur 18 IAC dont 14 calculables sur le réseau de mesure des températures et 4 sur le réseau plus étendu de mesure des précipitations. Au total, ce sont 1284 comparaisons manuelles qui ont été réalisées et qui ont donné lieu chacune à une appréciation d'Amélioration (A) de la situation vis à vis de la sous-variabilité, de Dégradation (D) ou du caractère Inchangé (I).

| IAC, code chrono | Code fonctionnel | Occurences d' (A)mélioration | Occurences (I)nchangées | Occurences de (D)égradation |
|------------------|------------------|------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| IAC06            | Cé01             | 18                           | 39                      | 7                           |
| IAC07            | Cé02             | 30                           | 30                      | 4                           |
| IAC08            | Ms01             | 19                           | 41                      | 4                           |
| IAC09            | Ms02             | 31                           | 24                      | 9                           |
| IAC10            | Gé01             | 22                           | 28                      | 14                          |
| IAC11            | Gé02             | 25                           | 21                      | 18                          |
| IAC16            | Pr09             | 13                           | 44                      | 7                           |
| IAC17            | Pr10             | 37                           | 22                      | 5                           |
| IAC19            | Ms04             | 4                            | 55                      | 5                           |
| IAC21            | Dé01             | 4                            | 52                      | 8                           |
| IAC22            | Dé02             | 3                            | 50                      | 11                          |
| IAC26            | Pr13             | 62                           | 2                       | 0                           |
| IAC28            | Pr15             | 23                           | 41                      | 0                           |
| IAC29            | Pr16             | 14                           | 33                      | 17                          |
| <b>Moyenne</b>   |                  | <b>21,8</b>                  | <b>34,4</b>             | <b>7,8</b>                  |

Tableau 4 : Qualification de l'apport de projections climatiques élaborées sur la conformité de dispersion, jugée sur les déciles extrêmes. IACs sur réseau thermométrique.

Pour les IAC comprenant des valeurs de températures, les résultats résumés sont les suivants : 53,8 % de situations inchangées, 34,0 % d'amélioration et 12,2 % de dégradation.

| IAC, code chrono | Code fonctionnel | Occurences d' (A)mélioration | Occurences (I)nchangées | Occurences de (D)égradation |
|------------------|------------------|------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| IAC20            | Ms05             | 35                           | 56                      | 6                           |
| IAC23            | Cé03             | 24                           | 31                      | 42                          |
| IAC24            | Cé04             | 28                           | 36                      | 33                          |
| IAC30            | Ms06             | 52                           | 34                      | 11                          |
| <b>Moyenne</b>   |                  | <b>34,7</b>                  | <b>39,3</b>             | <b>23,0</b>                 |

Tableau 5 : Qualification de l'apport de projections climatiques élaborées sur la conformité de dispersion, jugée sur les déciles extrêmes. IACs sur réseau pluviométrique.

Pour les IAC ne comprenant que des valeurs de précipitations, on trouve : 40,5 % de situations inchangées, 35,8 % d'amélioration et 23,7 % de dégradation.

On peut noter que la proportion de situations améliorées avec le passage aux projections climatiques les plus élaborées est environ 2 fois plus élevée que celle des situations dégradées. Mais on notera aussi que les situations inchangées sont majoritaires. De plus, dans les cas d'amélioration ou de dégradation, les modifications sont de faible envergure.

## CONCLUSION

La robustesse des éléments climatiques standard, regroupés dans les résumés climatologiques de températures, d'ETP ou de précipitations, est très élevée.

Concernant les valeurs extrêmes, cette robustesse reste très étendue pour les températures maximales. Elle est plus limitée pour les précipitations. L'exploitation directe des valeurs extrêmes de précipitations quotidiennes, à partir des projections climatiques de AP3C, est déconseillée, sauf si on se cantonne à la période de réanalyse, soit 1980-2015 c'est-à-dire en climat-type 2000.

Aucun indicateur agro-climatique calculé par le projet AP3C ne rentre (dans sa définition paramétrique) dans la zone de non-robustesse d'un paramètre climatique quel qu'il soit, y compris en projection.

Cependant, les probabilités rares (décennales) d'environ 1/3 de ces indicateurs présentent une sous-dispersion modérée par rapport à ce qui peut en être attendu, eu égard aux observations. En ce cas, les distributions de probabilité sont un peu trop concentrées autour des valeurs centrales.

A noter que l'usage de projections climatiques plus élaborées (nécessitant sensiblement plus de moyens) n'apporte qu'une amélioration modeste de ce biais de concentration. Dans ce but, il serait probablement plus efficace de mettre au point une correction directe spécifique des IAC correspondants.