



**HAL**  
open science

# Changements climatiques et hydrologiques en Méditerranée nord-occidentale : évolutions au cours des 60 dernières années, pour le 21ème siècle, et impacts sur l'activité viticole

Camille Labrousse

## ► To cite this version:

Camille Labrousse. Changements climatiques et hydrologiques en Méditerranée nord-occidentale : évolutions au cours des 60 dernières années, pour le 21ème siècle, et impacts sur l'activité viticole. Sciences de la Terre. Université de Perpignan, 2021. Français. NNT : 2021PERP0043 . tel-03605688

**HAL Id: tel-03605688**

**<https://theses.hal.science/tel-03605688v1>**

Submitted on 11 Mar 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# THÈSE

## Pour obtenir le grade de Docteur

Délivré par  
**UNIVERSITE DE PERPIGNAN VIA DOMITIA**

Préparée au sein de l'école doctorale Energie et  
Environnement (ED 305)  
Et de l'unité de recherche CEFREM UMR 5110

Spécialité : **Océanologie**

Présentée par **Camille LABROUSSE**

**Changements climatiques et hydrologiques en  
Méditerranée nord-occidentale: évolutions au cours  
des 60 dernières années, pour le 21<sup>ème</sup> siècle, et  
impacts sur l'activité viticole**

Soutenue le 6 décembre 2021 devant le jury composé de

M. Bertrand DECHARME, CNRM Météo-France, CR CNRS	Rapporteur
M. Benoît LAIGNEL, M2C Rouen, PR	Rapporteur
M. Javier MARTÍN-VIDE, Département de Géographie, Université de Barcelone, PR	Examineur
M. Patrice GARIN, G-Eau Montpellier, DR INRAE	Examineur
Mme. Valérie BORELL-ESTUPINA, G-Eau, Montpellier, MCF	Examineur
M. Gil MAHE, IRD, DR	Examineur
M. Wolfgang LUDWIG, Cefrem, Université de Perpignan, PR	Directeur de Thèse
M. Guillaume LACQUEMENT, Art-Dev, Université de Perpignan, PR	Co-Directeur de Thèse











## REMERCIEMENTS

Ces 3 années de doctorat se terminent, elles auront eu leur lot de jolies découvertes, professionnelles, amicales, et personnelles !

Je tiens à remercier chaleureusement avant tout les membres de mon jury qui auront pris de leur temps pour relire et étudier de plus près mon travail et pour s'être tenu présent lors de la soutenance. Merci !

Un immense merci bien entendu à mes directeurs, Wolfgang et Guillaume, pour la confiance que vous m'aurez accordée et pour m'avoir simplement aussi donné l'opportunité de réaliser ce travail. Merci aussi pour votre patience, et pour votre aide dans les directions à prendre, les relectures d'article/manuscrit.

Je veux remercier aussi les membres de mon CSI : Jean-Daniel Rinaudo, Gil Mahe et Jean-Philippe Reichheld pour avoir donné de votre temps chaque année, pour le suivi que vous avez apporté à mes travaux, les améliorations qui en auront découlé, vos conseils et votre soutien au moment de postuler à des post-doc, ça aura été fructueux ! Merci !

Un immense merci à la grande famille du Cefrem! Beaucoup d'entre vous m'ont encouragée et soutenue tout au long de mes études. Lies, Carmen, Dominique, Maria-Angela, merci particulièrement pour l'organisation Erasmus lors de mon année en Espagne et à toi encore Maria-Angela pour m'avoir fait rencontrer les collègues de Norvège lors de mon master. Thierry, Philippe, Nicolas, François, Raphaël, Serge, Wolfgang et tous les autres cités au-dessus pour tous les enseignements et sorties de terrain en général. Merci à toi Mahrez pour m'avoir épaulée tout le long de la thèse ! Et à tous les autres collègues du labo, Bruno, Christophe, Bertil, Valérie, Brigitte et Sophie ! C'était des années bien chouettes à Perpignan, entrecoupées de passages à l'étranger, elles feront parties d'une jolie grande page de ma vie pro et perso ! Mille mercis !

Many thanks to the colleagues I have worked with over the past 8 years! To Andrea and colleagues of the JRC. To Mads, thanks for your support! I see my time in Svalbard as a turning point in the PhD. Thanks for the science, and for the fun we all had there! To Giuliana and Pierre-Antoine for my master thesis' job in Tromso, I truly had a great time! And to Pedro and the colleagues of the university of Jaén for this beautiful year I spent in Andalucía too. And finally, for the next step into this great life, thanks Nurit for giving me the opportunity to continue as a post-doc at BGU! I can't wait!

Des milliers de mercis à tous mes amis ! Je me dis souvent que le temps serait bien fadasse sans votre présence !! Merci à ma bande d'Anonymousse, Théo Juju et Marion, illustres savants de ce monde... Les randos/trails du week end-soirs-et-matins-et-n'importe-quand me manquent déjà ! Les débats sur le monde et sur la science à coup de pauses café et soirées au château aussi ! Vous me manquez beaucoup les akhim shéli :( ... Merci à toi Emilie, pour ta bonne humeur, pour toutes nos randos aussi, et tous les

bons moments passés avec toi ! ;A ti Louisa, la que actualmente está en quien-sabe-donde! Merci pour tous ces bons moments lejos de la civilización sí sí! A Sébi, et sa folie furieuse; merci pour les duos à la guitare-chant et pour les coups de pouce pendant le travail !

A mon bureau des docs, où l'entraide et les discussions sur nos projets respectifs auront démêlé bien des nœuds, et où il y a toujours eu une ambiance « de fire » ! Mateusz et Pierrot pour votre bonne humeur et vos discussions enflammées sur les spots de surf. Pierrick (kiki) pour les débats sur la vie, et sur Perpi ! Eléonore et tes 40 memes par jour, Meryl et ta positive attitude, Anne-So et tes tortues ninjas, Margot... et tes ragots (lol), Florian le tromboniste du groupe (en place pour la dernière rocket, feu! ;)). Mille mercis les copains pour tous ces bons moments au bureau, tous les rires et les histoires qui auront abondamment circuler dans cette salle. Je souhaite aux suivants que leur passage en thèse soit aussi fun que j'ai pu le connaître avec vous !!

A mes amis de lycée, Pauline, Gaëlle, Didine, Amandine, Robin, Amaury, Dorian, Guillaume, Sébastien et leur soutien inconditionnel. Mes amis du Maroc Lamia, MoHcine, Habib, le Sergio et toutes les bizarreries qui nous seront arrivées là-bas.

A ma famille, qui commence à réaliser que la recherche n'est pas un long fleuve tranquille non plus. Merci pour votre soutien toutes ces années d'études! Merci maman-papa de m'avoir renourrie/logée/blanchie comme à la belle époque pendant les mois Covid. Je suis tellement contente d'avoir fait ce retour au bercail avec toute la famille pendant les confinements, c'était incroyable ! Manon, Quentin et Mandy et votre flopée de chevaux. Merci Merci Merci!

And a huge thank you to everyone I met along the way who, even from further away, contributed greatly to all the good times! I can't wait to see what happens next!







# TABLE DES MATIERES

## -INTRODUCTION GENERALE- CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET HYDROLOGIQUES EN MEDITERRANEE ; IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT ET L'AGRICULTURE..... 17

<b>1. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE .....</b>	<b>17</b>
1.1. FONCTIONNEMENT DU SYSTEME CLIMATIQUE .....	17
1.2. RECHAUFFEMENT.....	18
1.3. LE CYCLE HYDROLOGIQUE .....	19
1.4. L'HYDROCLIMATOLOGIE .....	19
<b>2. POURQUOI ETUDIER LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES EN MEDITERRANEE ?.....</b>	<b>20</b>
2.1. VULNERABILITE DE LA MEDITERRANEE FACE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES .....	20
2.2. INEGALITES DES CHANGEMENTS EN MEDITERRANEE.....	21
2.3. REPERCUSSIONS SUR L'ENVIRONNEMENT ET L'AGRICULTURE .....	22
<b>3. CAS DES VIGNOBLES.....</b>	<b>22</b>

## MOTIVATIONS ET OBJECTIFS..... 25

## -CHAPITRE I- CONTEXTE GENERAL : ZONE D'ETUDE ET BANQUE DE DONNEES POUR L'OCCITANIE- EST..... 27

<b>1. ZONE D'ETUDE .....</b>	<b>27</b>
3.1. LOCALISATION .....	27
3.2. TOPOGRAPHIE .....	27
3.3. PRESENTATION DES FLEUVES COTIERS MAJEURS.....	28
<b>4. BANQUES DE DONNEES POUR L'OCCITANIE-EST .....</b>	<b>31</b>
4.1. DONNEES CLIMATIQUES .....	31
4.1.1. Fonctionnement de Safran-Isba-Modcou .....	34
4.1.2. Limites de Safran.....	34
4.1.3. Validation de l'utilisation de Safran .....	36
4.1.4. Choix de la période d'analyse .....	39
4.2. DONNEES HYDROLOGIQUES .....	39
4.2.1. Type de données.....	39
4.2.2. Choix des stations et comblement des lacunes .....	39
<b>5. DONNEES SUR LES PRESSIONS ANTHROPIQUES .....</b>	<b>43</b>
5.1. POPULATION.....	43

5.2. VEGETATION ET OCCUPATION DES SOLS .....	44
5.2.1. CORINE Land Cover .....	44
5.2.2. Indice de Végétation de Différence Normalisée .....	46
5.3. DONNEES SUR L'ÉVOLUTION DES PRATIQUES AGRICOLES ET DES USAGES DES TERRES AGRICOLES .....	48
5.4. PRELEVEMENTS EN EAU.....	48

**-CHAPITRE II - EVOLUTIONS HISTORIQUES DES SERIES HYDROLOGIQUES ET RELATIONS AVEC LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET ANTHROPIQUES ..... 51**

<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>51</b>
<b>2. CALCUL DE PARAMETRES HYDRO-CLIMATIQUES.....</b>	<b>52</b>
2.1. APPROXIMATION DES DEBITS SPECIFIQUES.....	52
2.2. INDICES CLIMATIQUES .....	53
2.2.1. Saisonnalité des précipitations .....	53
2.2.2. Indices de sécheresse.....	54
2.3. CALCUL DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE.....	56
<b>3. APPROCHES STATISTIQUES.....</b>	<b>57</b>
3.1. CALCUL DES CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES POUR CHAQUE BASSIN .....	57
3.2. TEST DE MANN-KENDALL .....	59
3.3. REGRESSION NON PARAMETRIQUE 'LOESS' .....	60
3.4. ANALYSES DE CORRELATION LINEAIRE .....	61
3.5. VALIDITE DU MODELE STATISTIQUE MULTI-PARAMETRES.....	62
<b>4. RESULTATS .....</b>	<b>62</b>
4.1. CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES ET D'ACTIVITES ANTHROPIQUES MOYENNES DES BASSINS VERSANTS ETUDIES	62
4.2. ÉVOLUTION DES PARAMETRES HYDRO-CLIMATIQUES .....	67
4.2.1. Températures et précipitations .....	67
4.2.2. Débits observés et débits modélisés.....	70
4.3. TENDANCE VERS DES ANNEES SECHES .....	72
4.4. PRELEVEMENTS EN EAU ET OCCUPATION DU SOL .....	73
4.5. RELATION ENTRE PARAMETRES ET MODELE LINEAIRE .....	78
4.6. VERIFICATION DE LA VALIDITE DU MODELE POUR LE BASSIN DE L'HERAULT .....	83
<b>5. DISCUSSION.....</b>	<b>84</b>
<b>6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>88</b>

**- CHAPITRE III - PROJECTIONS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET HYDROLOGIQUES A L'HORIZON 2100 ET RELATIONS AVEC LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE A GRANDE ECHELLE ..... 91**

<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>91</b>
<b>2. MATERIELS ET METHODES.....</b>	<b>95</b>
INDICES DE LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE.....	95
2.1.1. Choix des indices.....	95
2.1.2. Indices atlantiques.....	96
2.1.3. Indices méditerranéens.....	97
2.2. CALCUL DES INDICES DE TELECONNEXION.....	98
2.3. PARTITIONNEMENT EN K-MOYENNES DU RDI03.....	99
2.3.1. Fonctionnement.....	99
2.3.2. Choix du nombre de zones.....	99
2.4. CALCUL DU RDI03 ET APPLICATION DES K-MOYENNES.....	101
2.5. DEFINITION DU NOUVEAU ZONAGE CLIMATIQUE ET HYDROLOGIQUE.....	101
2.6. ANALYSES EN ONDELETTES ET ONDELETTES-CROISEES ENTRE LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE ET LES PARAMETRES HYDRO-CLIMATIQUES.....	102
2.7. PROJECTIONS DES CONDITIONS CLIMATIQUES A 2100.....	103
2.7.1. Choix des modèles climatiques régionaux.....	103
2.7.2. Méthodes de correction des données et validation de la période historique.....	104
<b>3. RESULTATS.....</b>	<b>106</b>
3.1. PARTITIONNEMENT EN K-MOYENNES.....	106
3.2. TRANSFORMEES EN ONDELETTES ET ONDELETTES-CROISEES.....	108
3.3. EVOLUTION DES INDICES DE TELECONNEXION.....	113
3.3.1. Historique.....	113
3.3.2. Evolutions futures.....	114
3.4. CORRELATIONS ENTRE LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE ET LES PARAMETRES HYDRO-CLIMATIQUES.....	115
3.5. PROJECTIONS DES EVOLUTIONS HYDROCLIMATIQUES SOUS UN SCENARIO RCP 8.5.....	117
<b>4. DISCUSSION.....</b>	<b>120</b>
4.1. FONCTIONNEMENT HYDRO-CLIMATIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE.....	120
4.2. TENDANCES LINEAIRE POUR LA FIN DU 21 <sup>ÈME</sup> SIECLE ET RELATIONS AVEC LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE ...	120
4.3. ÉVOLUTION HYDROLOGIQUES POUR LES ZONES OCCIDENTALE ET ORIENTALE.....	124
<b>5. CONCLUSIONS.....</b>	<b>127</b>

**- CHAPITRE IV - EVOLUTION DES EXTREMES CLIMATIQUES AU COURS DE LA PERIODE HISTORIQUE  
ET POUR LES PROJECTIONS CLIMATIQUES.....129**

<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>129</b>
<b>2. DONNEES ET METHODES.....</b>	<b>131</b>
2.1. EVENEMENTS CLIMATIQUES EXTREMES.....	131

2.1.1. Températures.....	131
2.1.2. Précipitations .....	132
2.2. EVENEMENTS HYDROLOGIQUES EXTREMES .....	133
2.2.1. Débits minimum.....	133
2.2.2. Débits de crues.....	134
<b>3. RESULTATS .....</b>	<b>136</b>
3.1. EVOLUTION HISTORIQUE DES EVENEMENTS EXTREMES.....	136
3.1.1. Températures.....	136
3.1.2. Précipitations .....	140
3.1.3. Débits minimum.....	145
3.1.4. Evènements de crues .....	146
3.2. EVOLUTIONS POUR LA PERIODE PROJETEE DES EVENEMENTS EXTREMES .....	150
3.2.1. Températures.....	150
3.2.2. Précipitations .....	151
<b>4. DISCUSSION.....</b>	<b>152</b>
<b>5. CONCLUSIONS .....</b>	<b>159</b>

**- CHAPITRE V - CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET INCIDENCES SUR LA PRODUCTION AGRICOLE :**

**DEVENIR ET VIABILITE DES VIGNOBLES DU LANGUEDOC-ROUSSILLON COMME CAS D'ETUDE .....161**

<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>161</b>
<b>2. COMMENT LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES AFFECTENT-ILS LA VITICULTURE ?.....</b>	<b>162</b>
2.1. CYCLE VEGETATIF DE LA VIGNE.....	163
2.2. TEMPERATURES .....	164
2.3. RESSOURCES EN EAU : PRECIPITATIONS ET SOLS.....	164
2.4. RAYONNEMENT SOLAIRE ET ULTRAVIOLET-B.....	165
2.5. BOULEVERSEMENT DES ECOSYSTEMES : MALADIES.....	166
<b>3. MATERIELS ET METHODES .....</b>	<b>167</b>
3.1. DONNEES SUR L'OCCUPATION DES SOLS .....	167
3.2. DONNEES CLIMATIQUES .....	167
3.3. DONNEES SUR L'ACTIVITE VITICOLE.....	167
3.4. RENDEMENTS.....	168
3.5. INDICES BIOCLIMATIQUES .....	168
<b>4. RESULTATS .....</b>	<b>170</b>
4.1. REPARTITION DES VIGNOBLES DU LANGUEDOC-ROUSSILLON A PROXIMITE DES BASSINS VERSANTS COTIERS ...	170
4.2. EVOLUTION DES SURFACES SELON LES CEPAGES .....	173
4.3. EVOLUTION DE LA DATE DE DEBUT DES VENDANGES .....	174

4.4. EVOLUTION DES RENDEMENTS.....	175
4.5. RELATIONS ENTRE LA CLIMATOLOGIE ET LA DATE DE DEBUT DES VENDANGES .....	176
4.6. INDICES BIOCLIMATIQUES ET RELATION AVEC LA DATE DE DEBUT DES VENDANGES ET LES RENDEMENTS.....	176
<b>5. DISCUSSION.....</b>	<b>179</b>
<b>6. CONCLUSIONS .....</b>	<b>183</b>
<b><u>CONCLUSIONS GENERALES .....</u></b>	<b><u>185</u></b>
<b><u>RÉFÉRENCES.....</u></b>	<b><u>190</u></b>
<b><u>LISTE DES FIGURES.....</u></b>	<b><u>211</u></b>
<b><u>LISTE DES TABLES .....</u></b>	<b><u>220</u></b>
<b><u>ANNEXES.....</u></b>	<b><u>I</u></b>
<b>ANNEXES DU CHAPITRE II .....</b>	<b>I</b>
<b>ANNEXES DU CHAPITRE III .....</b>	<b>XXIX</b>
<b>ANNEXES DU CHAPITRE IV .....</b>	<b>XXXI</b>







# -Introduction Générale-

## Changements climatiques et hydrologiques en Méditerranée ; impacts sur l'environnement et l'agriculture

### 1. Le changement climatique

#### 1.1. Fonctionnement du système climatique

Le système climatique doit son fonctionnement aux interactions entre les 5 grandes unités qui le composent et qui sont l'atmosphère, l'hydrosphère, la cryosphère, la biosphère et les surfaces terrestres, ainsi qu'aux mécanismes extérieurs à la Terre dont le plus important est l'énergie solaire. Le climat se réchauffe si le bilan radiatif de la Terre devient positif c'est-à-dire si la Terre reçoit plus d'énergie qu'elle n'en émet. La principale source d'énergie que la Terre reçoit provient du soleil ; au contact des différentes couches de l'atmosphère et au contact de la surface de la Terre même, une partie du rayonnement est réfléchi ou absorbé par la composition de l'air, les nuages, etc (Figure 1). La fraction d'énergie incidente qui arrive à la surface, et qui est souvent estimée à environ 50 % de l'énergie incidente au sommet de l'atmosphère, est transformée en énergie interne et réchauffe la Terre (Daniel, 2003). En échange et pour rééquilibrer le bilan radiatif, la Terre émet à sa surface des flux énergétiques sous forme de rayonnement infrarouge dont une partie atteint directement l'espace et une autre se heurte de nouveau aux phénomènes d'absorption et réflexion au contact de la vapeur d'eau et des couches de l'atmosphère.

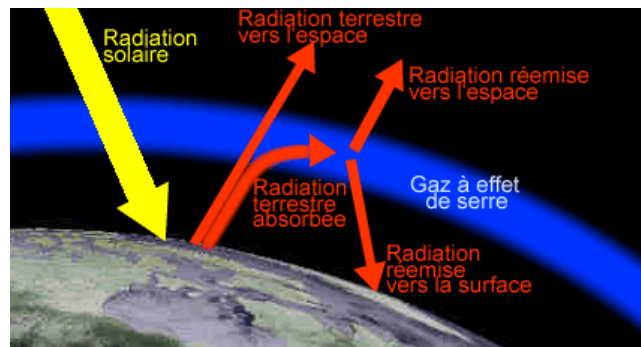


Figure 1: Schéma simplifié du fonctionnement des émissions, absorptions et réflexions/diffusions des principaux flux énergétiques ayant une incidence sur le bilan radiatif de la Terre

## 1.2. Réchauffement

Le réchauffement climatique a lieu lorsque le bilan radiatif de la Terre, normalement proche de zéro, prend des valeurs positives. La cause du bilan radiatif positif de la Terre, et donc du réchauffement des océans, continents et de l'atmosphère, est aujourd'hui indiscutablement associée à l'augmentation de la concentration en gaz à effet de serre de l'atmosphère. Ceux-ci ont une forte capacité à absorber les rayonnements émis à la surface de la Terre et à les réémettre vers l'espace et vers la Terre. Les activités humaines ont indéniablement contribué pour une large part à l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Depuis le milieu du 18<sup>ème</sup> siècle et jusqu'à l'année 2019, il est estimé que les évolutions de concentrations en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub> - +47 %), méthane (CH<sub>4</sub> - +156 %) et protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O - +23%) sont similaires à celles qui ont lieu lors des transitions naturelles entre périodes glaciaires et interglaciaires (Masson-Delmotte et al., 2021). Les concentrations en CO<sub>2</sub> actuelles seraient ainsi les plus élevées depuis les derniers 2 millions d'années. Depuis les 40 dernières années, les températures de surface globales sont à chaque décennie plus élevées que la précédente et la moyenne des températures de surface globale de la période 2011-2020 dépasse celle de la période 1850-1900 de 1,1 °C, avec une hausse plus forte sur les continents (+1,6 °C) que sur les océans (+0,99 °C). Ainsi d'après l'IPCC, la dernière période montrant une température de surface globale d'environ +1 °C au-dessus de la moyenne 1850-1900 avait probablement lieu il y a 6 500 ans (Figure 2) (Masson-Delmotte et al., 2021).

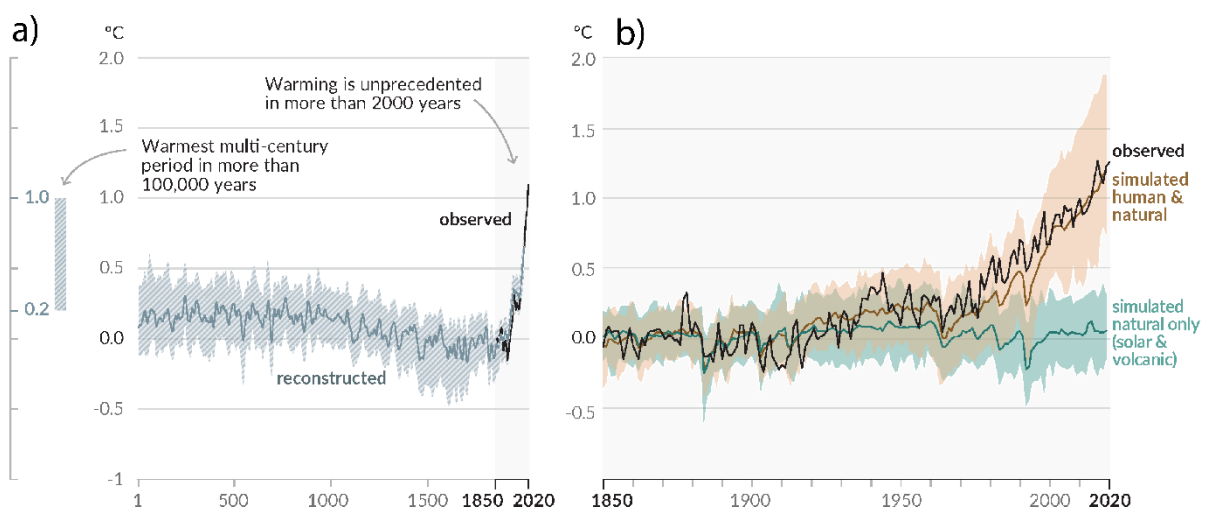


Figure 2: Changement de la température de surface globale par rapport à la période 1850-1900 a) moyenne décennale reconstruite sur la période 1-2000 (courbe et aire grisée) et observée sur la période 1850-2020 (courbe noire) b) moyenne annuelle simulée : en marron pour la part anthropique et naturelle, en vert pour la part naturelle uniquement. La moyenne annuelle observée est indiquée par la courbe noire. D'après (Masson-Delmotte et al., 2021)

### 1.3. Le cycle hydrologique

L'énergie solaire est un facteur clé dans le déroulement du cycle de l'eau. En réchauffant les océans et continents, elle provoque l'évaporation et l'évapotranspiration de grandes quantités d'eau qui s'accumulent dans l'atmosphère sous forme d'humidité ou de nuages. Le mouvement des masses d'airs, les échanges d'énergie entre atmosphère-océan et atmosphère-continent ainsi que la rotation de la Terre sont les éléments qui redistribuent l'humidité et les masses nuageuses autour du globe. Lorsque les conditions physiques (baisse de la température) et chimiques (rencontre avec des aérosols) le permettent, l'humidité condense. Si les gouttelettes ainsi formées se rejoignent et deviennent assez lourdes, celles-ci précipitent sous forme de précipitations liquides (pluie) ou solides (neige, grêle). L'eau peut alors repartir directement aux océans ou bien elle est redistribuée sur les continents. Là, elle s'écoule soit en surface et alimente directement les cours d'eau ou bien elle s'infiltré dans les sols et se scinde encore en deux fractions dont l'une est puisée par la biosphère et l'autre alimente les réserves en eaux souterraines. Pour chaque milieu rencontré, une partie de l'eau disponible repart dans l'atmosphère via la composante d'évapotranspiration. Enfin, qu'elle s'écoule rapidement en surface ou plus lentement en souterrain, l'eau finit par retourner aux océans.

### 1.4. L'hydroclimatologie

L'hydroclimatologie est un domaine scientifique multidisciplinaire qui vise à comprendre les interactions entre composantes du cycle de l'eau et composantes du fonctionnement climatique. Langbein (1967) définissait l'hydroclimatologie comme « l'étude de l'influence du climat sur l'eau des surfaces continentales ». Les processus mis en jeu dans le cycle hydrologique sont très dépendants des variations de températures. Avec des températures élevées, l'atmosphère est capable d'emmagasiner davantage d'eau, ce qui peut potentiellement favoriser des précipitations plus intenses voire extrêmes. Paradoxalement, certaines régions du monde voient leurs ressources en eau diminuer sous l'effet de l'augmentation des températures et de sécheresses plus longues et plus sévères que dans le passé. La température contrôle aussi les taux d'évapotranspiration qui, lorsqu'ils deviennent plus importants, provoquent un assèchement des sols. Finalement, les variations d'un seul paramètre climatique, qui est celui des températures, est capable de bouleverser le fonctionnement climatique à échelle locale et globale.

## 2. Pourquoi étudier les changements climatiques en Méditerranée ?

### 1.1. Vulnérabilité de la Méditerranée face aux changements climatiques

En début du 21<sup>ème</sup> siècle plusieurs études devenues largement reconnues ont montré que la Méditerranée serait soumise à un réchauffement et à un assèchement plus prononcés que dans le reste du monde (Lionello, 2012; Giorgi and Lionello, 2008; Giorgi, 2006). Elle serait alors particulièrement affectée par les changements climatiques et hydrologiques. Le réchauffement aurait lieu toute l'année et serait plus marqué encore au cours de la saison estivale. D'autre part des réductions dans les précipitations ont déjà été identifiées au cours du 20<sup>ème</sup> siècle (Ulbrich et al., 2012; Lionello, 2012). Pour le 21<sup>ème</sup> siècle, de plus en plus d'études se mettent d'accord sur le fait que la majeure partie du pourtour méditerranéen verrait ses précipitations annuelles diminuer au cours du siècle (Collins et al., 2013; Christensen et al., 2007). Seules certaines régions situées au Nord du bassin pourraient voir leurs précipitations de la saison hivernale diminuer.

C'est dans les années 1980s que les changements climatiques semblent avoir été amorcés dans le monde et à partir de ces années-là que la Méditerranée se réchauffait plus vite que la moyenne globale (Lionello and Scarascia, 2018). Au cours du 21<sup>ème</sup> siècle, il est probable que la Méditerranée se réchauffe à un taux de 20 % supérieur à la moyenne globale, et avec un maximum à 50 % supérieur pour la saison estivale. Mais plus important encore que les températures ce qui marque la différence dans les changements climatiques entre la Méditerranée et le reste du monde, c'est l'évolution des précipitations annuelles. En Méditerranée il est attendu que les précipitations annuelles diminuent de 4 % par degré de réchauffement d'ici la fin du siècle (Lionello and Scarascia, 2018). Les simulations CMIP6 réalisées par l'IPCC, et dont les premiers résultats étaient rendus publics en 2021, montrent que les modèles climatiques s'accordent sur la réduction à venir des précipitations annuelles pour le bassin méditerranéen (Figure 3).

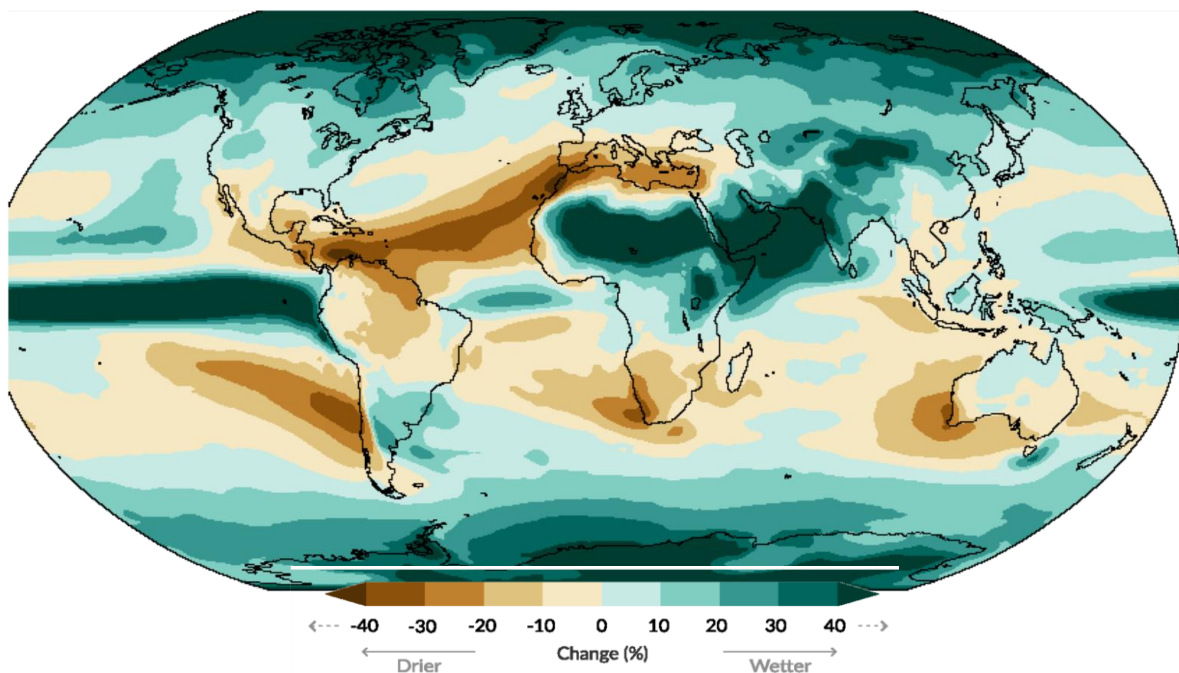


Figure 3: Changement des précipitations annuelles moyennes (%) selon un réchauffement de 4°C à échelle globale par rapport à la période de référence 1859-1900. Les simulations sont obtenues à partir de la moyenne des modèles des simulations CMIP6. Source : IPCC 2021

## 2.1. Inégalités des changements en Méditerranée

Les changements observés au cours de la période historique ainsi que ceux simulés pour les décennies à venir ne sont pas uniformes dans l'ensemble du bassin méditerranéen. Dans le Sud de France, un réchauffement de 2°C provoquerait une réduction de 10 à 15 % des précipitations annuelles alors que cette réduction serait de 30 % au Portugal pour un même réchauffement par exemple (Cramer et al., 2018). Cela est d'ailleurs plus prononcé encore pour l'évolution des événements extrêmes. Il est attendu par exemple que les événements de précipitations extrêmes de période de retour de 20 ans soient plus fréquents d'ici la fin du siècle et sous un scénario climatique extrême dans le Sud-Est de la France, l'Italie, et les Balkans, alors qu'ils seraient au contraire moins fréquents en rive Sud et Est du bassin méditerranéen (Tramblay and Somot, 2018). La région concernant l'actuelle Occitanie-Est ainsi que la Catalogne se trouve sur un entre-deux où ces événements seraient sur une hausse bien moins importante. Le dernier rapport de l'IPCC montrait par ailleurs la faible concordance entre les modèles concernant le sens des tendances dans l'évolution des précipitations en Méditerranée d'ici la fin du siècle (Masson-Delmotte et al., 2021).

## **2.2. Répercussions sur l'environnement et l'agriculture**

Ces changements climatiques ne seront pas sans conséquences sur les environnements naturels du bassin méditerranéen et les activités anthropiques pourraient être fortement impactées, notamment l'agriculture qui est très dépendante des conditions climatiques et de la disponibilité de la ressource en eau. La réduction des précipitations et l'augmentation de l'évapotranspiration pourraient rapidement avoir pour conséquences des événements de pénuries en eau de plus en plus fréquentes et touchant des aires géographiques croissantes. Certaines régions, notamment localisées dans le sud du bassin méditerranéen ont déjà fait l'expérience de tels événements (García-Ruiz et al., 2011; Iglesias et al., 2007).

Pourtant, l'agriculture représente un secteur économique majeur pour la population majoritairement rurale des pays méditerranéens. Elle consiste essentiellement de cultures permanentes (vignes, agrumes, oliviers, fruits secs). Dans les pays du Sud et de l'Est cependant, ce sont les cultures céréalières qui prédominent, elles occupent environ 60 % des superficies récoltées dans cette région en 2016 (FAO, 2018), bien que les cultures permanentes prennent une part croissante et occupent environ 20 % des superficies cultivées la même année. L'agriculture occupe aussi une part très importante des sols disponibles en Méditerranée. Des observations récentes montraient cependant que certains pays du Sud de la Méditerranée rencontrent déjà des difficultés pour assouvir leurs besoins alimentaires (FAO, 2018). En faute, une productivité agricole généralement en baisse accompagnée de rendements faibles et de contraintes physiques et climatiques qui limitent la superficie dans laquelle les sols présentent de bonnes caractéristiques pour leurs exploitations à des fins agricoles. La continuité des changements climatique, accompagnée d'une réduction du contenu en eau des sols (Masson-Delmotte et al., 2021) et d'une réduction générale de la ressource en eau auraient des conséquences importantes sur de multiples aspects du secteur agricole en Méditerranée (production, rendements, pratiques d'irrigation, etc) (Bindi and Olesen, 2011).

## **3. Cas des vignobles**

Les plus anciennes traces archéologiques témoignant de la culture de la vigne situent cette pratique dans la frange géographique allant des montagnes du Caucase et bordure de la mer Noire (actuelles Géorgie et Turquie) aux reliefs du Proche-Orient (actuelles Egypte, Israël et Cis-Jordanie) en passant par les pays actuels de l'Iran, l'Irak, le Liban et s'étalant à l'Est jusqu'au Turkménistan et ses origines sont estimées entre le 7<sup>ème</sup> et le 4<sup>ème</sup> millénaire av. J.-C (McGovern et al., 2003, 1996; Badler, 1996; H.James, 1996; Reynolds, 2017; Badler, 1996).

C'est en Iran, sur le site de Godin Tepe, que les premières traces de consommation de vin sont aujourd'hui connues et elles ont été datées d'environ 3500 ans av. J.-C (Badler, 1996). En Grèce antique, la culture du vin était telle que la mythologie est affectée du Dieu Dionysos comme Dieu de la vigne, de ses vendanges, ses vins et les fêtes associées à son breuvage. Dans l'histoire des Empires Romain et Byzantin, la vigne occupait une place prépondérante dans la vie de tous les jours, et avec le développement des voies de communication terrestres et maritimes, les empires ont grandement contribué à la diffusion de la culture en Afrique du Nord, le long de la péninsule ibérique et du Golfe du Lion. Dans le désert du Negev (actuelle Israël), la production de vin et son exportation dans toute la Méditerranée, y compris la France, et via les ports de Gaza et Ashkelon a fluctué en fonction du contexte économique qui régnait dans l'Empire Byzantin (Fuks et al., 2020). La culture du vin apparaît ainsi comme une marque de manifestation des colonisations successives du pourtour méditerranéen au cours de l'Antiquité et du Moyen-Age.

Le genre *Vitis* donne une déclinaison d'environ une soixantaine d'espèces qui ont évolué dans le monde entier depuis au moins l'ère secondaire (Galet, 2000), dont *Vitis vinifera* qui est devenu le plus répandu pour la production de vin et la consommation de raisins en général. En France, la vigne utilisée pour la production de vin a probablement été apportée par l'Empire Romain (Reynolds, 2017). En 2016, la surface en vignoble dans le monde atteignait 7 453 532 ha (OIV) dont 50,7 % de celle-ci se trouve dans seulement 5 pays qui sont l'Espagne, la France, la Chine, l'Italie et la Turquie. De même, 51 % de la production mondiale de vin (qui totalisait 266 014 hl) était produite dans trois de ces pays, qui sont l'Italie (19,1 %), la France (17 %) et l'Espagne (14,9 %). Ainsi, hormis la présence de la Chine qui prend une place importante, la production viti-vinicole garde toujours aujourd'hui un caractère véritablement méditerranéen. Les pays berceaux de la viticulture (pays du Caucase, Géorgie et Turquie et Proche et Moyen-Orient avec l'Iran, le Liban, Israël et les territoires Palestiniens) ont perdu de leur importance dans la production de vins mondiale 0,33 % de vins produits par la Géorgie en 2016, 0,08 % par Israël et 0,04 % par le Liban.

Les changements climatiques affectent les activités viticoles en Méditerranée et dans le monde. Parmi les causes majeures, l'augmentation des températures provoquent une précocité des cycles végétatifs des grappes et une plus grande concentration en sucres au moment des vendanges (Wolkovich and Morales, 2019; Leeuwen and Darriet, 2016; Chuine et al., 2004). Lorsque la maturation d'un vignoble a lieu trop précocement, le rapport en sucres et composés acides des raisins est bouleversé, impactant à leur tour la saveur et le degré alcoolique (Leeuwen



and Seguin, 2006; Duchêne and Schneider, 2005). Pour la plupart des vignobles du monde entier, les changements climatiques pourraient provoquer une remontée vers le Nord ainsi que vers des zones plus montagneuses des conditions idéales pour la plantation des vignes (Ausseil et al., 2021; Sánchez et al., 2019; Hannah et al., 2013). La hausse de l'évapotranspiration ainsi que les changements dans les précipitations, avec possiblement plus d'évènements extrêmes de précipitations mais moins de cumul annuel, entraîneraient aussi des modifications dans les stades phénologiques des vignobles (Ramos, 2017).

## Motivations et objectifs

Cette thèse de doctorat s'intéresse aux changements climatiques et hydrologiques qui ont affecté les bassins versants méditerranéens majeurs de la région Occitanie-Est en France. La zone d'étude s'étend à peu près sur l'ancienne région Languedoc-Roussillon et comprends alors six fleuves côtiers et leurs bassins versants majeurs qui sont du Nord au Sud l'Hérault, l'Orb, l'Aude, l'Agly, la Têt et le Tech. L'économie de la région repose en grande partie sur les activités agricoles où la viticulture détient une place prédominante. Dans un contexte de réchauffement climatique, hausse de la variabilité climatique et modifications du grand cycle de l'eau, la région pourrait être particulièrement impactée par ces changements et les conséquences sur la ressource en eau disponible sont susceptibles, à leur tour, de bouleverser les pratiques agricoles. Cette thèse fait suite aux travaux de Lespinas (2008) qui montrait une première réduction des ressources en eau de 20 % en moyenne dans ces mêmes bassins versants et leur sous-entités hydrologiques sur la période 1965-2004 associée à l'augmentation de l'évapotranspiration. L'auteur montrait par ailleurs des relations fortes entre le fonctionnement hydro-climatique des bassins versants et la circulation atmosphérique générale. Ce présent travail propose ainsi de reprendre les analyses amorcées dix ans plus tôt et, à l'aide d'une nouvelle approche, d'étudier plus en détails les évolutions climatiques et leurs impacts sur la ressource en eau et sur l'activité viticole. Le manuscrit est alors décliné selon les chapitres qui suivent.

Le **Chapitre I** propose de décrire plus amplement la zone d'étude et présente les données essentielles utilisées tout le long de cette thèse.

Dans le **Chapitre II**, la thèse se focalise sur les liens reliant climat et ressource en eau dans les six bassins versants côtiers au cours de la période 1959-2018 (60 ans). Pour cela, des données à la fois climatiques, hydrologiques et d'activités anthropiques comme l'occupation des sols et de prélèvements en eaux superficielles ont été utilisées. Les séries hydrologiques, représentées par les débits hydrologiques de chaque fleuve côtier, sont analysées afin de connaître l'évolution de la ressource en eau superficielle dans les bassins versants majeurs de la région. En parallèle, l'évolution climatique et l'évolution des activités anthropiques sont étudiées afin d'identifier les facteurs qui contrôlent l'évolution de la ressource en eau. Un modèle statistique multi-paramètre a été développé pour chaque bassin versant (Hérault, Orb, Aude, Agly, Têt, Tech).

Faisant suite à l'étude rétrospective proposée dans le Chapitre II, le **Chapitre III** s'intéresse aux évolutions futures possibles du climat et de la ressource en eau à l'horizon 2100 et sous plusieurs scénarios climatiques présentés lors du rassemblement du GIEC en 2014. Un autre objectif de ce travail est d'étudier si le fonctionnement hydro-climatique au sein de la zone d'étude est uniforme ou si des sous-entités peuvent être définies qui devraient évoluer différemment en fonction de la circulation atmosphérique.

Les évènements climatiques extrêmes jouent un rôle important dans la disponibilité de la ressource en eau ainsi que dans la saisonnalité climatique et hydrologique. Ils sont en outre des éléments déterminants pour le fonctionnement agricole. Pour la Méditerranée, l'augmentation du nombre et intensité des extrêmes de température fait de plus en plus l'unanimité, en revanche l'évolution des extrêmes de précipitations sont bien plus discutées et le sens de leur évolution semble se jouer à échelle géographique locale. C'est sur cette thématique, appliquée à notre zone d'étude que se concentre le **Chapitre IV**. Ce travail propose de faire le point sur l'évolution passée des extrêmes de températures et précipitations dans les bassins versants côtiers d'étude et propose également d'analyser quel pourrait être leur évolution au cours des décennies à venir.

Un dernier volet de ce travail de thèse, présenté dans le **Chapitre V**, propose d'étudier les possibles répercussions des changements climatiques sur l'agriculture. L'activité agricole principale de notre d'étude étant la viticulture, nous retraceons l'évolution de paramètres indicateurs de l'activité viticole sur les dernières décennies et les confrontons à l'évolution climatique, notamment lors de la saison de croissance. En outre, nous utilisons un ensemble d'indicateurs bioclimatiques dépendants de la température et travaillons à échelle de la zone en vignoble de notre zone d'étude. Le vignoble ainsi concerné est celui du Languedoc-Roussillon, premier vignoble en termes de superficie en France et également l'un des plus vastes au monde.

# **-CHAPITRE I-**

## **Contexte Général : Zone d'étude et banque de données pour l'Occitanie-Est**

### **1. Zone d'étude**

#### **1.1. Localisation**

La région Occitanie-Est (OE) est située au Sud Est de la France. Elle est constituée de cinq départements qui sont du Nord au Sud : la Lozère, le Gard, l'Hérault, l'Aude et les Pyrénées-Orientales et avoisine ainsi les régions de l'Auvergne-Rhône-Alpes au Nord, de la Provence-Alpes-Côte d'Azur à l'Est et de la Nouvelle-Aquitaine à l'Ouest. Le Sud de la région est frontalier avec l'Espagne et l'Est est bordé par la Mer Méditerranée.

#### **1.2. Topographie**

L'OE dispose de plusieurs entités morphologiques et dont l'histoire géologique diffère de l'une à l'autre, donnant lieu à une grande variété de paysages, végétations et de climats au sein-même de la région. Ainsi le Sud est marqué par la chaîne des Pyrénées qui comprend le massif de moyenne montagne des Albères qui s'étend de la côte Vermeille aux hauts sommets de la vallée du Vallespir, le massif granitique du Canigou et, plus à l'Est le plateau Nord de la Cerdagne (la partie Sud du plateau appartenant à l'Espagne). Plus au Nord, le massif plus bas des Corbières s'est formé suite à la surrection des Pyrénées ; c'est un massif principalement calcaire, caractérisé par une végétation de type garrigue, et qui s'élève jusqu'à 1000 m d'altitude au-dessus des vallées de l'Agly (au Sud) et de l'Aude (au Nord). Du fait de sa lithologie, les cours d'eau qui traversent le massif s'infiltrent et ont façonné au cours du temps un réseau karstique très développé (Salvayre, 1989; Aunay et al., 2003). La vallée ouverte en Ouest-Est de l'Aude souligne les plaines du Lauragais (Ouest) et du Minervois (Est) ; elle est surplombée au Nord par les massifs calcaires du haut-Languedoc et des Grands Causses qui forment les piémonts sud du Massif Central. La région fléchit ensuite au Nord-Est vers la vallée ouverte du Rhône, sur le département administratif du Gard.

L'OE compte principalement trois grandes plaines. Deux d'entre elles constituent une interface entre les massifs montagneux situés dans les terres et le Golfe du Lion. Celle du Languedoc au Nord est traversée et façonnée principalement par les fleuves côtiers de l'Hérault et de l'Orb, dont la source se situe dans les Causses du Larzac et le massif des Cévennes. Celle du Roussillon au Sud, et située entre les Corbières et les Pyrénées, est traversée par trois fleuves côtiers qui drainent le massif des Corbières et les Pyrénées ; du Nord au Sud il s'agit de l'Agly, la Têt et le Tech. La troisième plaine est celle parcourue par la vallée de l'Aude ; elle s'étend d'ouest en est depuis le Lauragais au sud-est de Toulouse au minervois, au nord-est de Carcassonne. Elle sépare le Massif Central de la chaîne des Pyrénées. La localisation de la zone d'étude, des bassins versants étudiés dans cette thèse et des principaux massifs montagneux qui les composent sont présentés dans la Figure I.1.

### **1.3. Présentation des fleuves côtiers majeurs**

L'OE compte six fleuves côtiers drainant les massifs montagneux et plaines littorales et s'écoulant dans la frange ouest du Golfe du Lion (Figure I.1). Les bassins versants associés sont de petite taille, en moyenne 1900 km<sup>2</sup>, les plus grands étant celui de l'Aude (4800 km<sup>2</sup>) suivi de l'Hérault (2500 km<sup>2</sup>), et les plus petits sont le bassin du Tech (700 km<sup>2</sup>) et celui de l'Agly (900 km<sup>2</sup>). Les bassins de la Têt et de l'Orb sont de superficie égale (1300 km<sup>2</sup>).

Les bassins versants sont marqués par une topographie variée allant de 0 m à presque 3000 m d'altitude dans les Pyrénées. L'Hérault prend sa source dans les Cévennes à 1500 m d'altitude ; il est d'abord alimenté par un réseau enchevêtré de petits recs qui drainent le massif. Il recoupe ensuite les plateaux ruraux des Causses où deux de ses principaux affluents, la Vis puis la Lergue, le rejoignent, puis il s'écoule lentement en méandres dans la plaine du Languedoc jusqu'à son embouchure à Agde. Ses principaux affluents sont d'amont en aval l'Arre, la Vis, la Lergue, la Boyne, la Peyne et la Thongue. Le cours d'eau est approximativement rectiligne et s'écoule dans une direction Nord-Est – Sud-Ouest. Deux ouvrages hydrauliques se trouvent dans son bassin versant ; il s'agit du barrage du Salagou, sur le bassin de la Lergue et du barrage des Olivettes, construit sur le cours de la Peyne.

L'Orb a un parcours de 135 km depuis les Causses du Larzac à une altitude de presque 900 m jusqu'à son embouchure à Béziers. Il remplit le barrage des Monts d'Orb, à Avène, avant de creuser des gorges dans la partie sud des Causses puis recoupe la plaine du Languedoc. Sa direction d'écoulement est d'abord Nord-Sud dans les monts d'Orb, devient Est-Ouest le long

des reliefs de l'Espinouse puis Nord-Ouest – Sud-Est jusqu'à l'embouchure. Ses principaux affluents sont la Marre, le Jaur, le Vernazobre et le Taurou d'amont en aval. Le barrage des Monts d'Orb et l'usine hydraulique électrique de Montahut sont les deux ouvrages hydrauliques majeurs situés sur le bassin versant : le premier a pour rôle de soutenir l'irrigation et l'approvisionnement en eau potable, le second est l'usine hydroélectrique de Montahut qui utilise les eaux de l'Agoût et de la Vèbre, captées sur le bassin versant atlantique voisin et les restitue dans le cours d'eau du Jaur.

L'Aude prend sa source dans le massif du Carlit, dans le département des Pyrénées-Orientales. Elle est orientée Sud-Nord des Pyrénées à Carcassonne, présentant les caractéristiques d'un cours d'eau de montagne, elle traverse le Carlit puis se faufile dans des gorges, délimitant à l'Ouest puis au Nord le massif des Corbières. Le fleuve s'oriente après son passage à Carcassonne Ouest-Est où il recoupe les plaines du Minervois puis se jette dans la mer au Nord de Narbonne. L'Aude parcourt en tout 220 km, c'est le plus long fleuve côtier de l'OE. Ses principaux affluents sont l'Argent-Double, l'Orbieu et la Cesse. Parmi les ouvrages hydrauliques principaux, on compte les deux barrages situés tout en amont du cours d'eau et dédiés à la production hydroélectrique principalement, il s'agit des barrages de Matemale et de Puyvalador. Egalement situés en zone montagneuse et se remplissant de petits affluents de l'Aude, les barrages du Lampy et de Galaube permettent d'alimenter en eau le Canal du Midi et remplissent aussi des fonctions récréatives.

L'Agly possède un petit bassin versant (900 km<sup>2</sup>) de forme ovale et orienté Ouest-Est. Le fleuve s'écoule dans la même direction et draine à la fois le massif du Fenouillèdes qui occupe la partie amont et sud du bassin, celui des Corbières qui constitue sa partie nord, puis la plaine du Roussillon qu'il traverse jusqu'à son embouchure au niveau du Barcarès. L'Agly tombe souvent à sec en été du fait d'une importante infiltration des eaux de surface dans les réseaux karstiques ; le barrage de Caramany, le seul barrage du cours d'eau permet la régulation du débit du fleuve tout au long de l'année. Ses affluents majeurs sont la Boulzane et la Désix (qui drainent le Fenouillèdes) puis la Rivière de Maury et le Verdoble (lui-même alimenté par le Torgan et le Tarrassac).

La Têt prend sa source dans le massif du Carlit, au pied des pics Pérics. Elle s'écoule en torrent de montagne entre les forêts de la Bolquère et de Barrès jusqu'à Mont-Louis, puis elle s'insère dans la vallée du Conflent où elle prend une direction Ouest-Est jusqu'à son embouchure à Canet-en-Roussillon. Elle draine d'amont en aval le massif granitique du Canigou sur sa partie

sud et celui du Madres sur sa partie nord, plus en aval les piémonts pyrénéens des Aspres au sud et le Fenouillèdes au Nord, puis la plaine du Roussillon. Les massifs qui surplombent le bassin versant sont entaillés de vallées très encaissées parallèles les unes aux autres et qui alimentent la Têt. Ses affluents sont principalement situés sur les versants nord du Canigou et des Pyrénées, il s'agit de la Rotja, le Cady, la Lentilla, le Boulès, et la Castellane qui est le seul affluent majeur drainant la partie nord du bassin versant. Tout en amont du cours d'eau, la Têt remplit le barrage des Bouillouses situé dans le Capcir ainsi que celui de Vinça plus en aval dans la partie ouverte de la vallée du Conflent. Le premier ouvrage était historiquement construit pour assouvir les besoins en électricité du bassin et du plateau de Cerdagne. Le second sert d'écrêteur des crues et soutient les besoins en irrigation. Une dernière retenue, celle de Villeneuve-de-la-Raho a aussi été construite à des fins agricoles.

Le Tech serpente parallèle à la Têt, il draine les versants sud du Canigou et le massif des Albères au sud du bassin, plus en aval. Sa source se trouve au pied du cirque du Costabonne, le cours d'eau emprunte ensuite la vallée encaissée du Vallespir, puis draine la partie sud de la plaine du Roussillon, en passant par les urbanisations de Céret puis le Boulou et termine sa course entre les villages de Saint-Cyprien (nord) et Argelès-sur-mer (sud). Il est lui aussi alimenté par tout un réseau de torrents de montagne qui ont creusé des vallées parallèles orientées Nord-Sud. Aucun ouvrage hydraulique d'importance n'est situé sur le bassin versant.

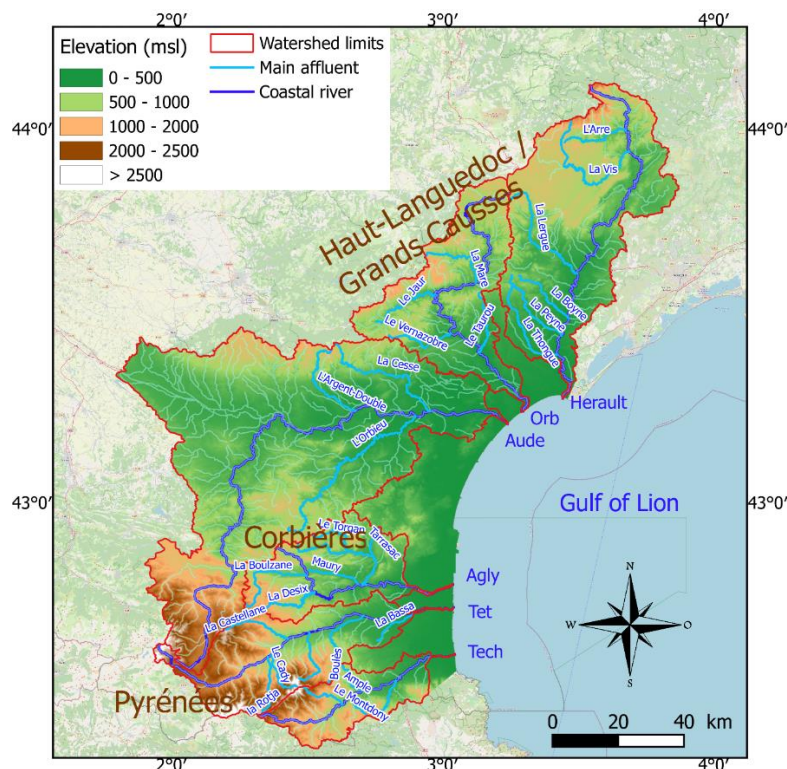


Figure I.1 : Principaux fleuves côtiers de la région Occitanie-Est, leurs affluents et les massifs montagneux qu'ils drainent

## 2. Banques de données pour l'Occitanie-Est

### 2.1. Données climatiques

Le service Publiothèque de Météo-France a permis de collecter un grand nombre de données climatiques spatialisées. Ces données sont issues d'un système d'analyse de forçages atmosphériques appelé Safran (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige) développé par Météo-France (Habets et al., 2008; Durand et al., 1993). Les données sont mises à jour chaque mois au pas journalier, mensuel et décadaire, à résolution spatiale de 8 km (Figure I.2). Ainsi, des paramètres de températures, précipitations solides et liquides, vitesse de vent, humidité de l'air, rayonnement infrarouge et visible sont disponibles sur la période 01/08/1958 – 31/12/2018. La Publiothèque recueille également les données issues d'un schéma de surface, appelé ISBA (qui est couplé à Safran et dont on décrira le fonctionnement au paragraphe suivant) qui fournit des renseignements sur l'évapotranspiration réelle et potentielle (ETP) ainsi que sur les caractéristiques du manteau neigeux. Au total, ce sont 25 variables analysées au pas quotidien depuis le 01/08/1958 qui sont rendues disponibles par la banque de données Publiothèque de Météo-France (Table I.1).

Table I.1: Données collectées par le schéma de surface Safran-Isba et rendues disponibles sur le site de Météo-France

MNEMONIQUE	PARAMETRE	UNITE
LAMBX :	E en Lambert II étendu	hm
LAMBY :	N en Lambert II étendu	hm
DATE :	Date	AAAAMMJJ
PRENEI_Q :	Précipitations solides (cumul quotidien 06-06 UTC)	mm et dixièmes
PRELIQ_Q :	Précipitations liquides (cumul quotidien 06-06 UTC)	mm et dixièmes
PE_Q :	Pluies efficaces (cumul quotidien)	mm et dixièmes
T_Q :	Température (moyenne quotidienne)	°C et dixièmes
TINF_H_Q :	Température minimale des 24 températures horaires	°C et dixièmes
TSUP_H_Q :	Température maximale des 24 températures horaires	°C et dixièmes
FF_Q :	Vent (moyenne quotidienne)	m/s et dixièmes
DLI_Q :	Rayonnement atmosphérique (cumul quotidien)	J/cm2
SSI_Q :	Rayonnement visible (cumul quotidien)	J/cm2
EVAP_Q :	Evapotranspiration réelle (cumul quotidien 06-06 UTC)	mm et dixièmes
ETP_Q :	Evapotranspiration potentielle (formule de Penman-Monteith)	mm et dixièmes
Q_Q :	Humidité spécifique (moyenne quotidienne)	g/kg
HU_Q :	Humidité relative (moyenne quotidienne)	%



SWI_Q :	Indice d'humidité des sols (moyenne quotidienne 06-06 UTC)	%
DRAINQ_Q :	Drainage (cumul quotidien 06-06 UTC)	mm et dixièmes
RUNC_Q :	Ruissellement (cumul quotidien 06-06 UTC)	mm et dixièmes
WG_RACINE_Q :	Contenu en eau liquide dans la couche racinaire à 06 UTC	m3/m3
WGI_RACINE_Q :	Contenu en eau gelée dans la couche de racinaire à 06 UTC	m3/m3
RESR_NEIGE_Q :	Equivalent en eau du manteau neigeux (moyenne quotidienne 06-06 UTC)	mm et dixièmes
RESR_NEIGE6_Q :	Equivalent en eau du manteau neigeux à 06 UTC	mm et dixièmes
HTEURNEIGE_Q :	Epaisseur du manteau neigeux (moyenne quotidienne 06-06 UTC)	m
HTEURNEIGE6_Q :	Epaisseur du manteau à 06 UTC	m
HTEURNEIGEX_Q :	Epaisseur du manteau neigeux maximum au cours de la journée	m
:		
SNOW_FRAC_Q :	Fraction de maille recouverte par la neige (moyenne quotidienne 06-06 UTC)	%
ECOULEMENT_Q :	Ecoulement à la base du manteau neigeux	mm et dixièmes

Safran était à l'origine utilisé pour alimenter le modèle de neige CROCUS dans la prévision du risque avalanche dans les massifs alpins (Durand et al., 1993). L'objectif était de simuler l'évolution du manteau neigeux en temps réel sur plusieurs massifs montagneux, en tenant compte des différences d'orientation des versants; le système analysait les paramètres de température et humidité de l'air à 2 m, vitesse du vent à 10 m, précipitations solides et liquides, et rayonnements infrarouges et visibles au pas horaire (sauf pour les précipitations, analysées au pas journalier), avec une discrétisation verticale de 300 m. Certaines zones d'intérêt se trouvant trop éloignées des stations météorologiques, le système devait être capable d'interpoler les valeurs des paramètres suivis.

Au début des années 2000, Safran a été étendu à la France et couplé à un schéma de surface (Isba) et un modèle hydrologique (Modcou), initiant la suite Safran-Isba-Modcou SIM (Soubeyroux et al., 2008; Habets et al., 2008, 1999) utilisée depuis 2003 par Météo-France entre autres dans les domaines de suivi de la ressource en eau, prévision des crues et suivi des épisodes de sécheresse. Dans la suite SIM, dont on détaillera le fonctionnement dans le paragraphe qui suit, Safran apparaît comme le premier maillon de la chaîne. Il rassemble en entrée les données issues des observations (stations météorologiques du réseau de Météo France) et des modèles météorologiques ARPEGE ou ECMWF pour produire en sortie les caractéristiques des forçages atmosphériques, c'est-à-dire les cumuls de précipitations solides et liquides, taux d'humidité, rayonnements incidents et diffus, températures et vents. Les analyses de ces paramètres sont effectuées sur la base de polygones géographiques considérés

climatiquement homogènes dont les limites ont une position bien choisie (c'est le découpage SYMPOSIUM II réalisé par Météo France). Il en résulte 615 zones homogènes (Figure I.2) sur l'ensemble du territoire français d'une superficie d'environ 1000 km<sup>2</sup> pour chaque et dont le gradient climatique horizontal au sein d'eux est minimale. Chaque zone comprend au moins une station météorologique de surface ainsi que deux pluviomètres. Elles ne sont pas non plus isolées les unes des autres, les observations réalisées sur les zones voisines sont utilisées si nécessaire. Pour chaque variable, Safran utilise les données produites par les stations météorologiques et les modèles. Il tient d'abord compte de l'altitude; il effectue une analyse par interpolation optimale pour assigner des valeurs de sortie sur un profil vertical de la zone dont la résolution est de 300 m. Les analyses sont itérées toutes les 6 h et les données sont ensuite interpolées au pas horaires. Les quantités de précipitations sont cependant estimées au pas journalier et prennent en compte à la fois les mesures des pluviomètres répartis sur le territoire et le taux d'humidité de l'air. La distinction précipitations liquides-précipitations solides se fait selon l'isotherme 0,5°C ; en deçà de cette valeur, les précipitations sont considérées comme neigeuses. Les données de rayonnement sont obtenues via l'utilisation d'un schéma de transfert radiatif. Une fois le profil vertical de chaque polygone réalisé, les valeurs sont interpolées en horizontal, selon une maille de 64 km<sup>2</sup>.

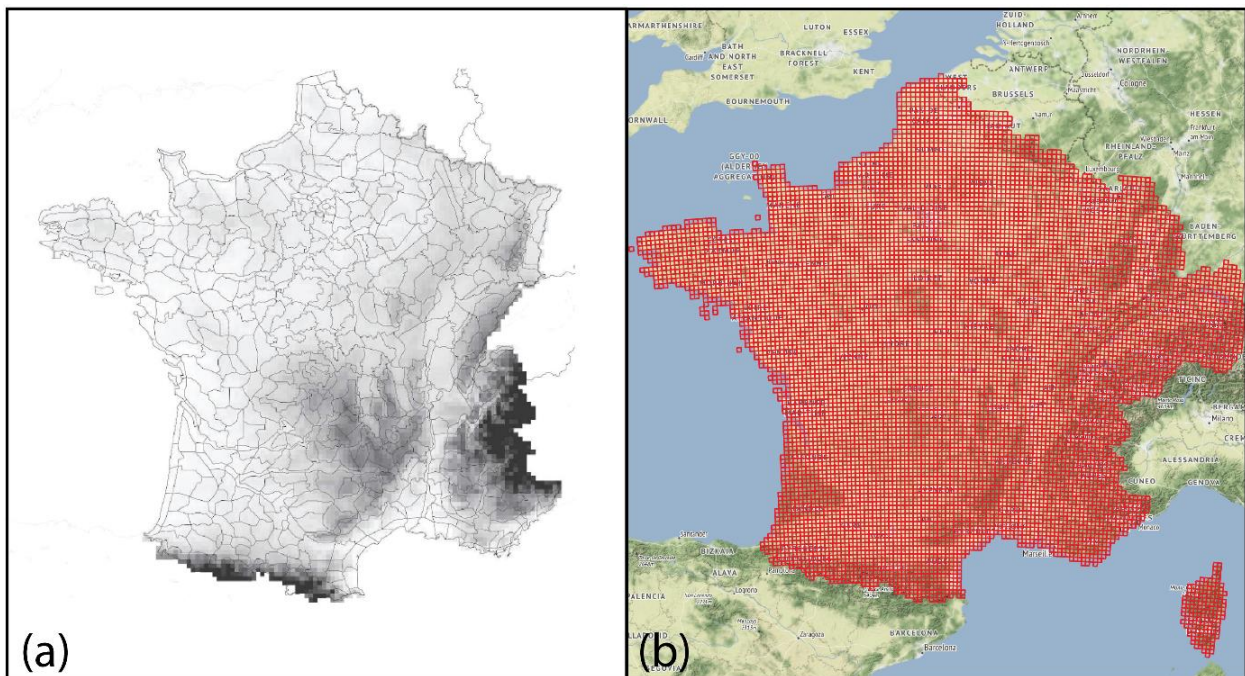


Figure I.2: (a) Présentation des 615 zones homogènes de Safran (adapté de Thirel (2009)) et (b) Grille de résolution 8 km résultante

### 1.1.2. Fonctionnement de Safran-Isba-Modcou

Safran a été étendu à l'ensemble de la France et intégré à la chaîne Safran-Isba-Modcou en 2002 (Le Moigne, 2002). La chaîne fonctionne comme suit : Safran reconstitue les forçages atmosphériques qui alimentent le schéma de surface Isba qui à son tour quantifie les transferts d'énergie et de masse aux interfaces sol-biosphère-atmosphère et dont les résultats servent d'entrée au module hydrologique Modcou qui estime le débit des eaux de surface et l'évolution des aquifères (Ledoux et al., 1989).

Le schéma de surface Isba (Interaction Soil Biosphere Atmosphere) a été développé par Noilhan and Planton (1989). Il décrit les échanges de chaleur et de masses d'eau entre la première couche de l'atmosphère, la végétation, le sol, l'hydrologie superficielle et la neige. Isba a fait l'objet de nombreuses optimisations lors des décennies suivantes (Noilhan and Mahfouf, 1996; Boone et al., 1999; Decharme and Douville, 2006) notamment en ce qui concerne l'hydrologie superficielle, qui couvre les variables de drainage et de ruissellement. En effet, la version originale de Isba ne présentait que 2 couches de sol hydriques dont une couche de surface incluse dans l'épaisseur totale du sol. En 1999, Boone et ses collègues ajoutent une troisième couche qui tient compte de la profondeur racinaire. Ces 3 couches permettent ainsi de mieux tenir compte des quantités et échanges d'eau entre les différents compartiments du sol et de la surface. D'autres améliorations d'importance ont été l'introduction d'un drainage et ruissellement sous-maille, présentés dans l'étude de Decharme and Douville (2006).

Les valeurs de ruissellement de surface et de drainage servent ensuite d'entrée au modèle hydrogéologique Modcou (Girard, 1974; Ledoux et al., 1989). Celui-ci simule l'évolution spatiale et temporelle des nappes d'eau souterraines ainsi que du débit d'un cours d'eau. Il est utilisé sur des bassins versants de différentes tailles (Violette et al., 1997; Ambroise et al., 1995; Ledoux et al., 1989); une de ses premières applications a été réalisée sur le bassin de l'Adour où le débit du cours d'eau a été simulé sur la période 1972-1996 (Boukerma, 1987; Habets et al., 1999).

### 2.1.2. Limites de Safran

Les résultats de sortie du système SIM présentent des biais liés aux interpolations à la fois spatiales et temporelles qui sont réalisées.

Dans le cas de l'analyse des températures, les erreurs dans l'espace peuvent être dues à une considération inexacte du polygone climatiquement homogène, ou bien aussi à une perception

des effets de l'altitude inexacte (Vidal et al., 2010); en effet, Safran produit une valeur pour chaque polygone et pour chaque 300 m d'altitude. Si une station d'observation se trouve à une certaine altitude, une interpolation entre deux valeurs analysées de Safran est effectuée pour estimer la valeur à la même altitude que la valeur observée. Ainsi, dans chaque zone d'analyse, la valeur de température à un moment donné ne dépend que du relief de la zone ; si celui-ci est nul, la valeur résultante est constante.

Des statistiques sur les valeurs de biais et sur l'erreur de la moyenne quadratique (RMSE) obtenue entre les valeurs observées et celles calculées sur l'interpolation horaire ont permis d'évaluer les limites de Safran. Ces statistiques sont présentées dans les travaux de Quintana-Seguí et al., (2008), nous les utilisons pour ce travail et en présentons quelques-unes dans les paragraphes qui suivent.

Pour les températures, considérant la période 2004-2005, la RMSE est de 1,5°C sur l'ensemble du territoire français et le biais nul. La région qui comprend le sud des Alpes et la bordure méditerranéenne du bassin du Rhône est celle qui enregistre les plus grandes erreurs de valeurs.

En ce qui concerne les biais dans les analyses de vitesse du vent, peu de stations d'observations existent ; sur les régions littorales, ces stations sont en plus localisées dans des endroits peu représentatifs (sur les falaises, où les vents soufflent d'autant plus forts). Ainsi, les régions en France qui enregistrent le biais le plus fort entre valeurs observées et valeurs analysées sont une fois de plus le pourtour méditerranéen, la région des Alpes du Sud et aussi la côte Atlantique (notamment, Nord-Ouest). Sur la période 2004-2005 la RMSE est ainsi élevée (1,4 m.s<sup>-1</sup> pour une moyenne de 3,0 m.s<sup>-1</sup>) ; Safran présente en général, une vitesse de vent d'environ 10% moins importante que les observations.

Bien que les précipitations constituent un des paramètres climatiques les plus importants pour les études menées avec l'outil Safran, leur caractère très hétérogène tant dans le temps que dans l'espace rend la reconstitution des séries temporelles difficile. Safran peut ne pas détecter les effets locaux de variabilité des précipitations au sein des polygones puisqu'il les considère comme climatiquement homogène. C'est pour cette raison que Quintana-Seguí et al.(2008) montraient une RMSE élevée, notamment dans les zones de montagne et dans les Cévennes où la variabilité spatiale des précipitations est particulièrement grande. Néanmoins, l'analyse Safran s'est avérée globalement proche des valeurs observées.

### 3.1.2. Validation de l'utilisation de Safran

Dans ses travaux de thèse qui s'intéressaient à la même zone d'étude, Lespinas (2008) effectuait une spatialisation manuelle des données climatiques de températures et précipitations enregistrées par des stations météorologiques. Au total, 49 stations météorologiques étaient retenues dans l'ensemble des 6 bassins pour la spatialisation des températures, donnant une résolution moyenne de 15,4 km environ, et 117 stations retenues pour les précipitations, donnant une résolution de 9,6 km. La période d'analyse sur laquelle Lespinas travaillait était 1965-2004. Ceci nous a donné la possibilité de comparer les données Safran pour notre zone d'étude en les confrontant aux résultats de ces précédents travaux. Ainsi, nous avons procédé à la validation des données Safran en réalisant une comparaison entre celles-ci et les résultats de Lespinas. Nous avons pris en compte 2 éléments :

(i) les valeurs annuelles moyennes de température et précipitations obtenues sur l'ensemble de la période 1965-2004

(ii) les valeurs de tendances linéaires de ces mêmes paramètres effectuées avec un test de Mann-Kendall, aussi sur la période 1965-2004 et pour chaque bassin

Pour la majorité des bassins, les moyennes annuelles de températures sur la période 1965-2004 sont très semblables entre le travail de Lespinas et Safran (Figure I.3 et Table I.2). L'écart entre les valeurs n'oscille qu'entre 0,01(Aude) et 0,24°C (Orb). Seuls les bassins de la Têt et du Tech présentent une différence notable de 2,18 et 1,88°C respectivement. Ceci peut s'expliquer par le fait que Safran peut sous-estimer ou au contraire surestimer l'effet de l'altitude. La Têt et le Tech sont les bassins qui présentent le plus grand gradient d'altitude de la région, avec un point culminant à 2500 m pour le Tech et 2900 m pour la Têt. Après interpolation spatiale, Safran effectue une correction de chaque paramètre en fonction de l'altitude qui fonctionne comme suit. A chaque maille de 8 km de résolution horizontale de Isba est assignée une altitude. Safran corrige ses paramètres de sortie en réalisant une interpolation verticale des deux variables situées à 300 m d'intervalle l'une de l'autre et encadrant la valeur d'altitude de la maille considérée. Mais malgré les désaccords sur la valeur moyenne des températures annuelles, les tendances obtenues par les tests de Mann-Kendall pour les deux méthodes sont très proches (Figure I.3). L'Agly est le seul bassin qui montre une différence notable, montrant une hausse de 1,35°C en 40 ans dans l'étude de Lespinas contre seulement 0,80°C avec les données Safran. Pour les autres bassins, les différences vont de 0,15 (Tech) à 0,30 °C (Aude). On note que pour tous les bassins où l'on constate une différence, Safran sous-estime les tendances.

Pour les précipitations annuelles, aucune tendance linéaire significative n'a été détectée, ni dans l'étude de Lespinas, ni avec les données Safran. La comparaison entre les deux méthodes se limite donc aux cumuls annuels moyens (Table I.2 et Figure I.4). Seul le bassin du Tech présente une différence notable avec 158 mm de plus dans la méthode Safran que dans la méthode Lespinas. Pour les autres bassins, la différence oscille de 10 (Aude) à 77 mm (Hérault). Globalement, Safran surestime les précipitations.

De manière générale, la comparaison entre les résultats de caractéristiques climatiques obtenues par spatialisation manuelle des données de stations et par l'emploi de Safran est satisfaisante. Pour cette raison, nous avons jugé convenable d'utiliser les données Safran pour ce travail de thèse. Nous resterons critiques néanmoins sur l'interprétation de certains résultats où les limites de l'outil Safran pourraient avoir quelques conséquences.

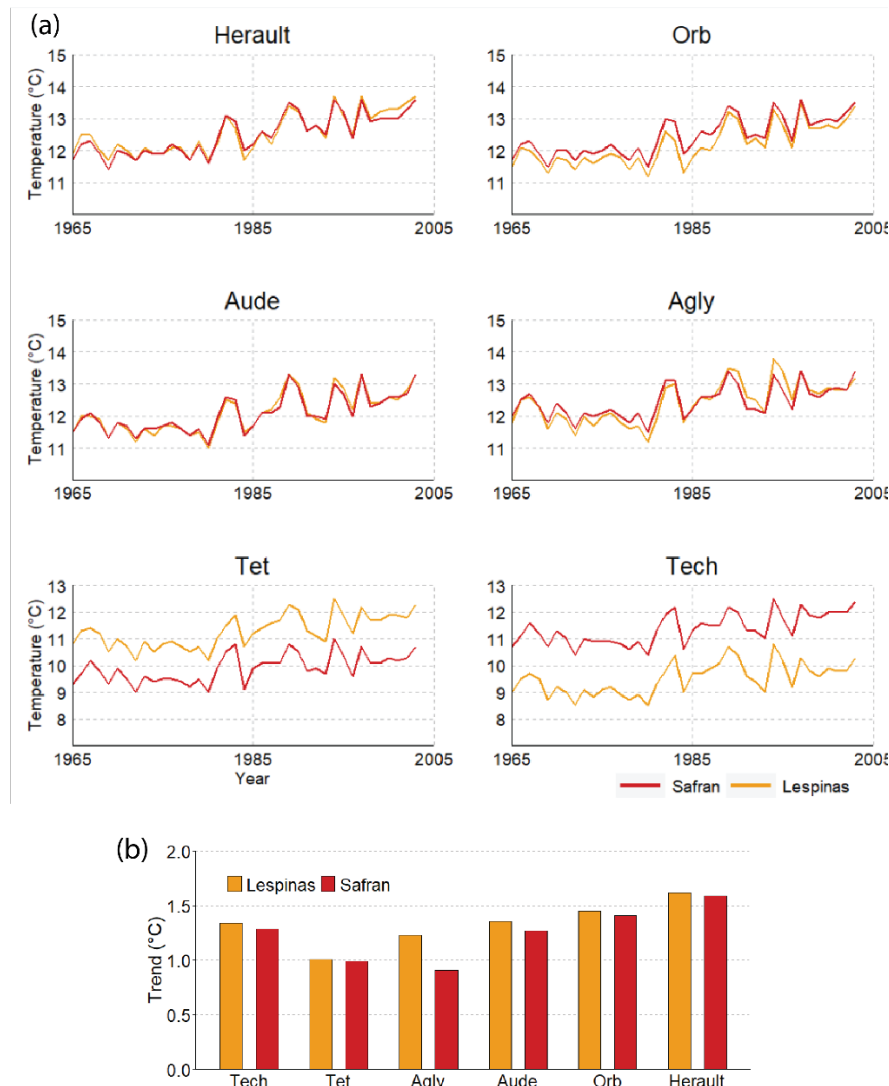


Figure I.3: Comparaison des températures annuelles par bassin sur la période 1965-2005 entre Lespinas (2008) et Safran (a) Moyennes annuelles et (b) Tendances linéaires obtenues avec un test de Mann-Kendall

Table I.2: Comparaison sur la période 1965-2005 entre Lespinas (2008) et Safran des (a) températures annuelles moyennes et (b) cumuls de précipitations annuelles moyens

(a)

Basin	Elevation (m)	Lespinas (2008)	Safran	Difference
Herault	367	12.5	12.5	0.04
Orb	444	12.2	12.2	0.24
Aude	462	12.1	12.1	0.01
Agly	508	12.4	12.2	0.03
Tet	1061	12.1	9.9	2.18
Tech	778	9.5	11.4	1.88

(b)

Basin	Elevation (m)	Lespinas (2008)	Safran	Difference
Herault	367	1023	1100	77
Orb	444	986	1027	42
Aude	462	825	862	10
Agly	508	824	836	13
Tet	1061	791	836	45
Tech	778	872	1029	158

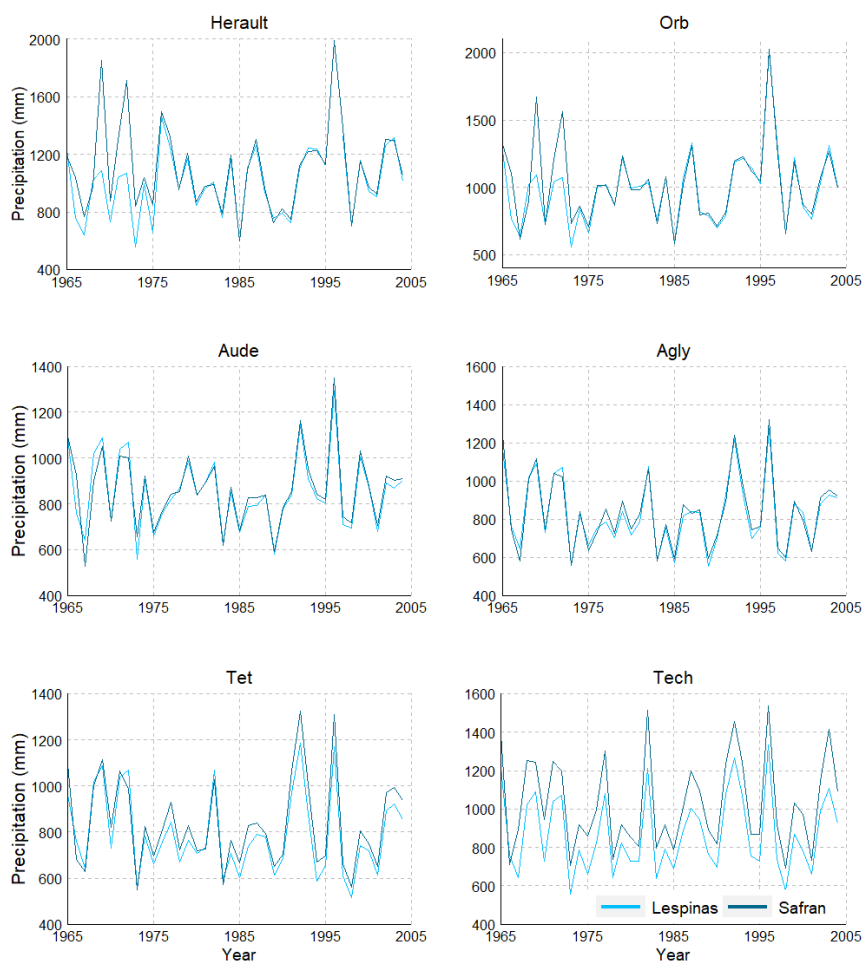


Figure I.4: Comparaison des cumuls annuels de précipitations par bassin sur la période 1965-2005 entre Lespinas (2008) et Safran

#### 4.1.2. Choix de la période d'analyse

Dans ce travail, nous utilisons les données Safran de température (moyennes quotidiennes), précipitations totales (solides + liquides récupérées entre les heures 06-06 UTC), vitesse des vents (moyennes quotidiennes), évapotranspiration réelle (cumul quotidien enregistré entre les heures 06 UTC) et évapotranspiration potentielle (calculée selon la formule de Penman-Monteith), le drainage et ruissellement quotidiens, l'humidité relative et l'Indice d'Humidité des Sols (SWI) au pas journalier et sur la période 01/01/1959-31/12/2018. Ces données sont disponibles sur la période 01-08-1958 à aujourd'hui ; nous avons choisi de travailler à partir de l'année 1959 afin d'avoir des séries saisonnières et annuelles complètes et jusqu'à l'année 2018, année de commencement de ce projet de thèse. La longueur des séries climatiques est par conséquent de 60 ans. Par rapport aux autres variables, également disponibles dans Safran, le choix de travailler avec ces variables présentées ici-même tient du fait qu'elles sont plus proches des observations, notamment en ce qui concerne les données de températures et précipitations.

## 2.2. Données hydrologiques

### 1.2.2. Type de données

Des données de débits hydriques observés ont été collectées à partir de la banque de données HYDRO ([www.hydro.eaufrance.fr](http://www.hydro.eaufrance.fr)) gérée par le ministère français de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie. Ce sont des données journalières, que l'on convertit en  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , qui sont calculées à partir d'une courbe de tarage et des valeurs de hauteur d'eau. La banque HYDRO actualise les valeurs lorsqu'une courbe de tarage ou hauteur d'eau est modifiée. Actuellement, environ 3200 stations hydrologiques sont en service parmi un total de 5000 stations implantées sur les cours d'eau en France.

On utilise également les données issues des variables de drainage et ruissellement de Safran ; la somme de ces deux donnant un écoulement superficiel total ( $Q_s$ ) que l'on compare aux données observées de débits par les stations de jaugeages. Nous apportons plus de détails sur cette nouvelle variable dans la section II.1.

### 2.2.2. Choix des stations et comblement des lacunes

Dans ce projet de thèse, nous cherchons à caractériser les évolutions hydrologiques sur la même période d'analyse que les évolutions climatiques : soit 60 ans de série temporelle couvrant la période 1959-2018. Nous intéressons également aux disparités spatiales de ces évolutions ;



celles-ci seront approchées par la comparaison des différentes réponses ‘inter-bassin’, c’est-à-dire d’un bassin versant à l’autre.

Dans la plupart des cas, un même cours d’eau possède plusieurs stations hydrologiques. Mais les séries enregistrées par celles-ci présentent un certain nombre de biais qu’il est important de détecter. Par exemple, une même station peut avoir été déplacée à plusieurs reprises ; la morphologie du cours d’eau n’étant pas tout à fait la même d’un emplacement à l’autre et il faut alors que la courbe de tarage soit bien mise à jour pour que les valeurs traduites en débits soient correctes. Certains évènements extrêmes comme les crues peuvent eux aussi modifier la morphologie du cours d’eau et donc impacter les valeurs enregistrées. De même lors des crues, il arrive fréquemment que les débits associés à ces évènements soient mal mesurés du fait d’une lame d’eau trop importante qui déborde de la section de base sur laquelle les mesures s’appuient. La mise à jour régulière de la courbe de tarage est donc un élément indispensable pour une bonne fiabilité des données hydrologiques. Ainsi pour ces raisons, les variables de type débits maximum ou débits d’étiage sont des éléments qui sont particulièrement affectés par ce type de biais. Des méthodes comme les tests de rupture permettent de détecter des changements significatifs dans la valeur des données enregistrées dans une série temporelle et renseignent sur le moment où ces changements ont eu lieu. Enfin, une même série peut présenter des périodes plus ou moins longues de non-fonctionnement. Plusieurs méthodes de comblement des données manquantes existent.

Pour notre étude, nous avons sélectionné 6 stations (Figure I.5, Table I.4) , soit 1 station par fleuve, qui couvrent d’au moins 70 % la période 1959-2018 au pas journalier. Nous avons tenté de considérer les stations situées les plus près de l’embouchure de chaque fleuve (de 5 km pour le Tech à 32 km pour l’Agly) pour étudier la réponse aux changements hydro-climatiques de chaque bassin dans leur ensemble et sans négliger leur partie aval où les interactions entre la ressource et les activités humaines sont particulièrement importantes.

Les données manquantes ont été comblées à hauteur maximale de 0.2 % de la totalité de la série temporelle selon deux méthodes : la première consiste en une interpolation linéaire à partir des données encadrant la donnée manquante. Dans ce cas, la longueur temporelle maximale de la donnée manquante retenue est de 7 jours consécutifs. La seconde consiste en une régression linéaire, au-delà de 7 jours consécutifs de données manquantes, avec la série temporelle d’une station de jaugeage voisine. La régression est validée lorsque le coefficient de détermination  $r^2$  est supérieur à 0.9. Seule la station de l’Agly à Estagel a fait l’objet d’un comblement par

régression linéaire. Les stations sélectionnées sont présentées, avec leurs caractéristiques et les méthodes de comblement des données manquantes, en Table I.3. L'Hérault est le fleuve qui montre la série temporelle la plus longue ; il couvre l'ensemble de la période d'analyse sur 60 ans parmi lesquels seulement 6.9 % de données sont manquantes. Au contraire le Tech est celui qui montre la période la plus courte ; il couvre néanmoins une période complète de 42 ans et 3 mois et a un maximum de 29.6 % de données manquantes lesquelles se trouvent exclusivement sur la période non enregistrée de 1959-1976.

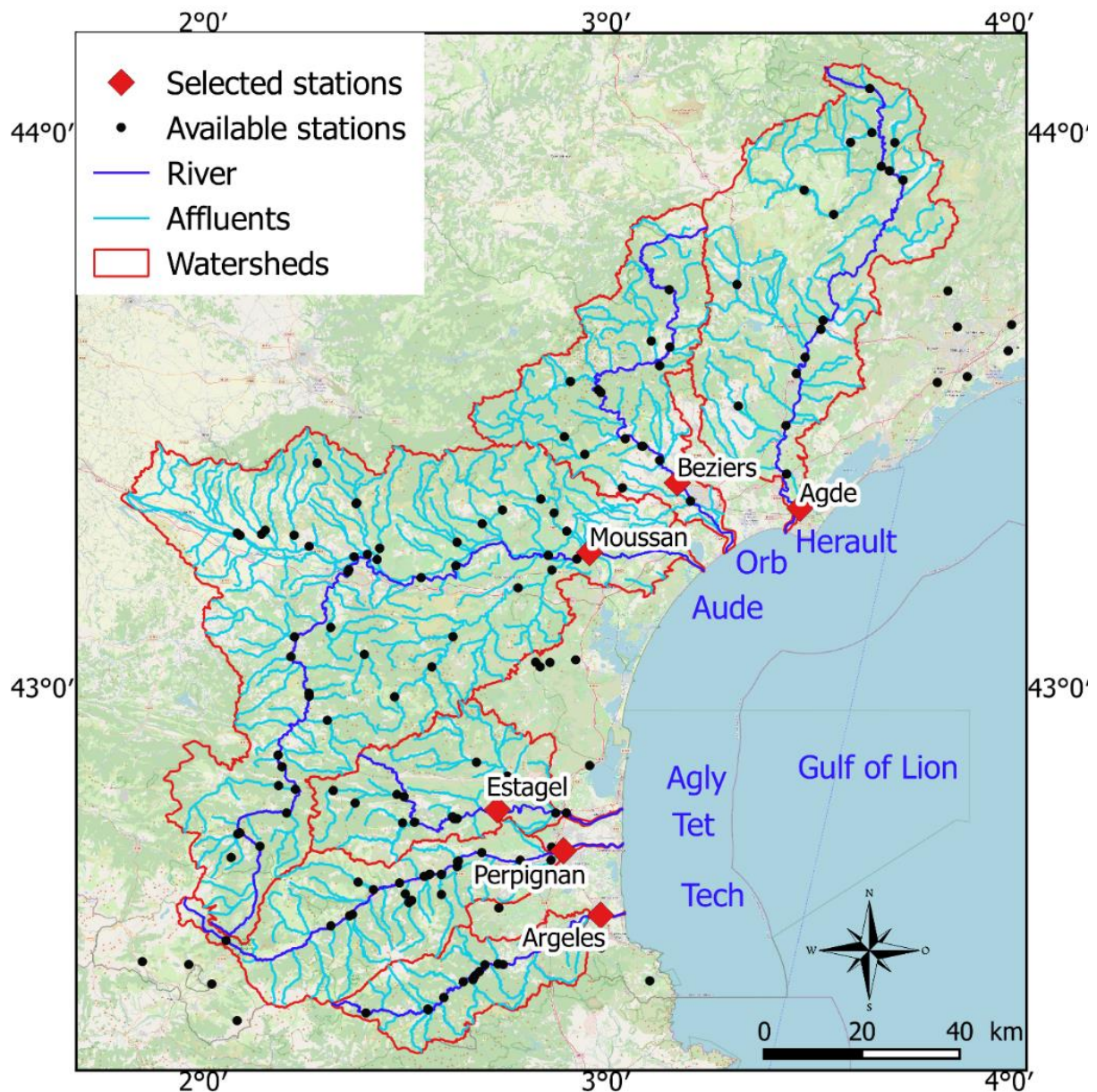


Figure I.5: Position des stations hydrologiques disponibles sur l'ensemble de la région et celles sélectionnées pour la réalisation de cette thèse

Table I.3: Caractéristiques des stations hydrologiques utilisées dans ce travail de thèse. Elevation, taux de couverture de la période 1959-2018, taux de correction des données manquantes ou aberrantes. r : comblement par régression linéaire ; i : comblement par interpolation linéaire

Name	Code	River	Elevation (msl)	Distance from the mouth (km)	Total basin area (km <sup>2</sup> )	Period	Number of complete years	% Raw data	% Filled	% Total
<b>Herault at Agde</b>	Y2372010	Herault	2	6.1	2550	1959-01-01 2018-12-31	60	97.1	0	97.1
<b>Orb at Beziers</b>	Y2584010	Orb	9	21	1330	1966-01-01 2018-12-31	53	88.3	0.02 i	88.3
<b>Aude at Moussan</b>	Y1612010	Aude	8	26.4	4838	1965-01-01 2018-12-31	54	82.1	0.02 i	82.1
<b>Agly at Estagel</b>	Y0664040	Agly	59	31.6	903	1967-01-01 2018-12-31	52	86.5	0.2 r.i	86.7
<b>Tet at Perpignan</b>	Y0474030	Tet	23	13.6	1300	1973-01-01 2018-12-31	49	81.5	<0.01 i	81.5
<b>Tech at Argeles</b>	Y0284060	Tech	10	5.2	729	1976-09-30 2018-12-31	42	70.4	0	70.4

### 3. Données sur les pressions anthropiques

#### 1.1. Population

Les données issues des recensements démographiques sont disponibles sur le site de l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (Insee) au lien <https://www.insee.fr/fr/statistiques>. Les résultats du recensement du nombre d'habitant par communes en 2020 est présenté pour la zone d'étude dans la Figure I.6. La bordure littorale est de loin la zone la plus peuplée en ce sens que c'est elle qui concentre les villes principales de la zone d'étude, à l'exception de quelques zones urbaines d'importance situées dans la vallée de l'Aude et concernant les villes de Carcassonne et Castelnaudary, plus en retrait par rapport à la façade maritime. Les trois autres villes principales qui rassemblent plus de 50000 habitants chacune sont Perpignan, située à l'aval de la Têt, Narbonne, située en bordure de la partie aval du bassin versant de l'Aude, et Béziers, située à l'aval de l'Orb. Le reste de la bordure littorale ne rassemble que des communes qui comptent au moins 1000 habitants. La partie amont de la majorité des bassins versants, à l'exception du Tech, présentent des communes de moins de 1000 habitants.

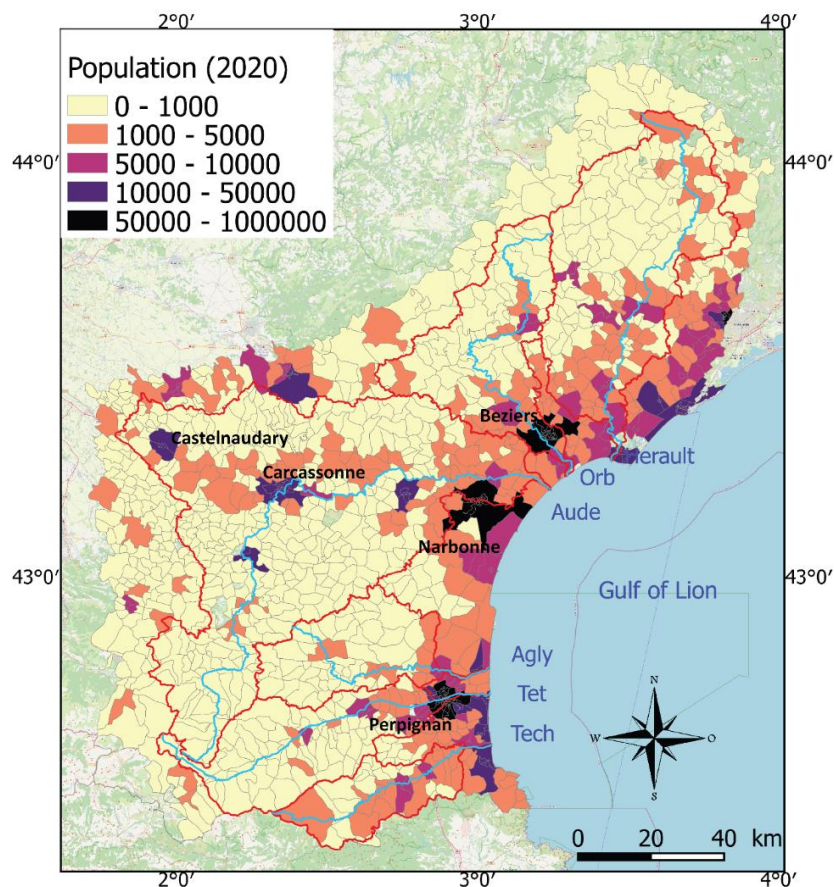


Figure I.6: Population en nombre d'habitants pour l'année 2020 et par communes. Données de l'Insee (2020)

### 3.1. Végétation et occupation des sols

#### 1.1.3. CORINE Land Cover

La base de données CORINE Land Cover (CLC) renseigne sur l'occupation biophysique des sols à l'échelle de tous les pays européens. Elle couvre 39 pays et est disponible auprès du programme européen d'observation de la Terre (Copernicus) sur le lien <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>. Le projet démarrait en 1985. Les jeux de données ont été produits à partir d'images satellites qui ont ensuite été interprétées et numérisées. La base de donnée possède 5 versions renseignant sur l'occupation des sols des années 1990, 2000, 2006, 2012 et 2018. La nomenclature est hiérarchisée en 3 niveaux de classes avec 5 postes sur le niveau 1 qui représentent les grandes catégories d'occupation des sols soit :

- Les territoires artificialisés (1)
- Les territoires agricoles (2)
- Les forêts et milieux semi-naturels (3)
- Les zones humides (4)
- Les surfaces en eau (5)

Le niveau 2 se compose de 15 postes, et le niveau 3 en 44 postes.

Cependant, par soucis de lisibilité et d'autres contraintes associées à la réalisation du projet, la surface de la plus petite unité cartographiée n'est que de 25 hectares, ce qui peut donner lieu à certaines imprécisions. Par exemple le document technique d'utilisation de la base de données CORINE de 2009 souligne que le poste 242 « systèmes parcellaires et cultureux complexes » désigne bien souvent des petites parcelles de type cultures annuelles diversifiées, prairies et cultures permanentes qui occupent bien moins de 25 ha chacune et n'atteignent même pas les 75% de couverture de l'unité paysagère. De même, le poste 243 « territoires principalement occupés par l'agriculture, avec présence de végétation naturelle importante » désigne des terres agricoles interrompues par des espaces naturels et qui peinent à couvrir plus de 75 % de l'unité paysagère. Enfin, le poste 324 « forêts et végétation arbustive en mutation » désigne souvent des terrains ambigus, en évolution probable.

Pour ce projet de thèse, l'utilisation des données rastérisées CORINE Land Cover, permet de retracer l'évolution de l'occupation biophysique des sols de notre zone d'étude sur les dernières 30 années. Nous avons réalisé une analyse à l'échelle du niveau 3, et avons regroupé certains

postes afin de détecter les évolutions au sein de chaque type d'occupation. L'occupation des sols en 2018 pour la zone d'étude est présentée en Figure I.7 et en Table I.4. Parmi les caractéristiques notables, on remarque que les zones fortement urbanisées se concentrent sur les zones côtières, sauf pour le bassin de l'Aude qui présente une vallée large de basse altitude qui s'étend d'Est en Ouest et abrite plusieurs grandes villes comme Carcassonne et Castelnaudary (Figure I.6, Figure I.7). Ce même bassin versant se distingue également des autres par le fait qu'il comporte un pourcentage important de terres arables (8.2 % de la totalité de l'occupation des sols en 2018), une classe agricole quasi absente dans les autres bassins versants (de 0 % pour l'Agly à 0.8 % pour l'Hérault en 2018). Pour le secteur agricole, les cultures permanentes représentent la classe majeure pour tous les bassins, à l'exception du Tech, occupant 10.3 % à 19.9 % de la totalité de l'occupation des sols pour la Têt et l'Hérault respectivement. Le Tech et la Têt sont néanmoins occupés principalement par de la végétation naturelle de type forêt (plus de 70 %), ceci est dû au fort gradient d'altitude qui occupe ces bassins et surtout aux fortes pentes qui limitent fortement l'utilisation de ces espaces; le Tech et la Têt comptent ainsi 9.5 et 14.6 % respectivement de leurs espaces situés sur des pentes de plus de 30° (Figure I.8).

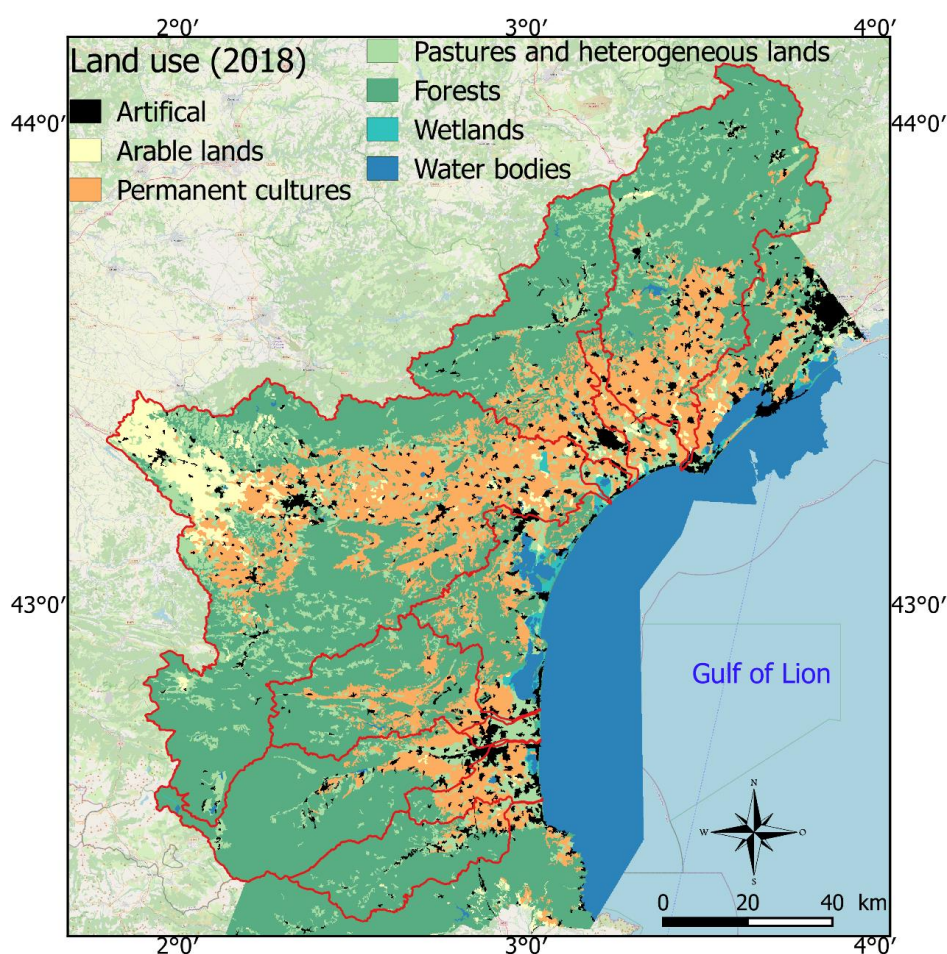


Figure I.7: Carte d'occupation des sols d'après Corine Land Cover pour l'année 2018

Table I.4: Pourcentage occupé par chaque type d'usage des sols par bassin en 2018 selon Corine Land Cover

Basin	Artificial	Arable lands	Permanent cultures	Pastures and heterogeneous	Forests	Wetlands	Water bodies
Herault	3.4	0.8	19.9	10.5	65	0	0.3
Orb	4.7	0.5	16.9	12.9	64.8	<0.1	0.2
Aude	3.3	8.2	23.9	15.5	48.7	0.2	0.2
Agly	1.9	0	18.1	7.9	71.9	0	0.2
Tet	3.6	0.1	10.3	8.7	76.9	<0.1	0.3
Tech	3.8	0.2	7.4	10.1	78.5	0	<0.01

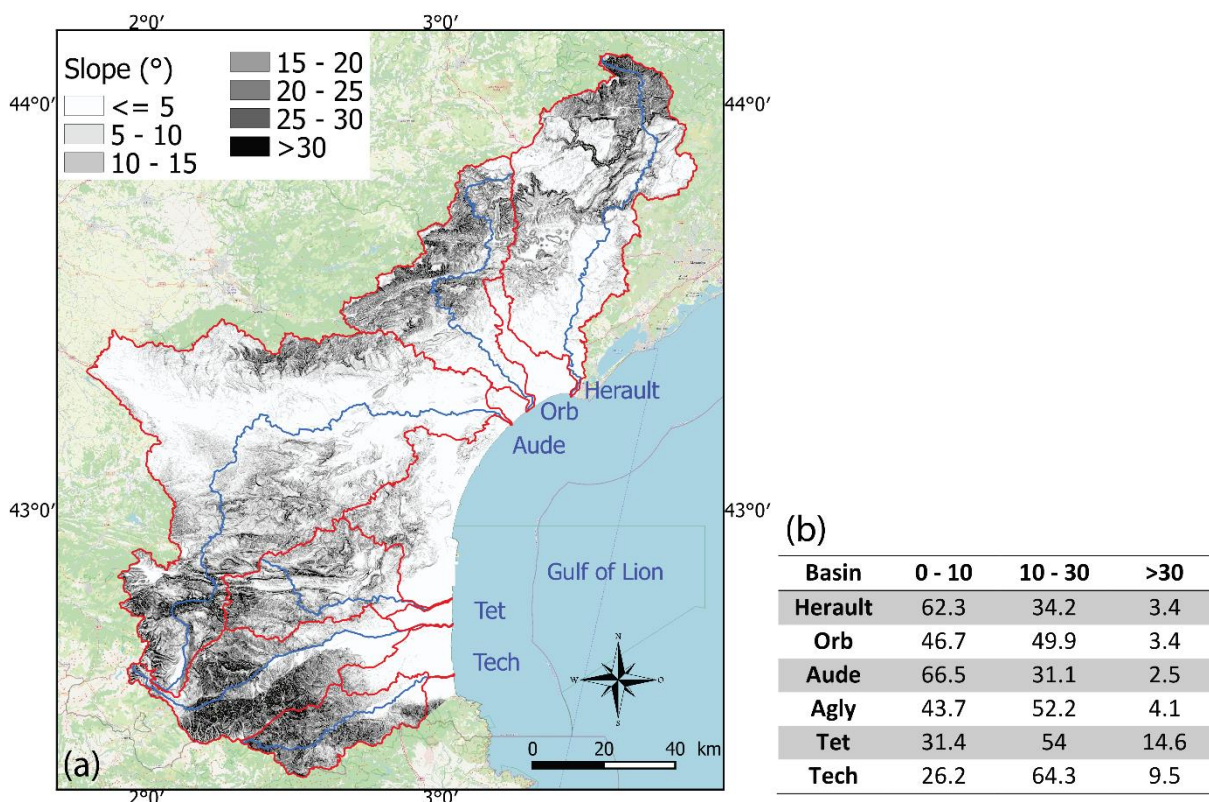


Figure 1.8: (a) Pente en degrés sur l'ensemble de la zone d'étude et (b) pourcentage occupé par différentes classes de degrés de pente et par bassin

### 2.1.3. Indice de Végétation de Différence Normalisée

Les outils de télédétection sont capables d'identifier et quantifier la fraction des rayonnements photosynthétiques actifs absorbés par la végétation. Les pigments contenus dans les feuilles des plantes, type chlorophylle, absorbent fortement les longueurs d'onde du domaine visible (400  $\mu\text{m}$  – 700  $\mu\text{m}$ ) et les utilisent dans le processus de photosynthèse. En revanche les cellules des feuilles reflètent les longueurs d'onde du proche infrarouge (700  $\mu\text{m}$  - 1000  $\mu\text{m}$ ). Plus une plante a de feuilles et est en bonne santé, plus elle absorbe le visible et reflète les infrarouges. Le capteur AVHRR (pour en anglais, Advanced Very High Resolution Radiometer) contient 5 bandes de large spectre, dont 2 sont sensibles aux longueurs d'ondes comprises dans les gammes 550 - 700  $\mu\text{m}$  et 730 - 1000  $\mu\text{m}$ . Ces bandes permettent donc de détecter et quantifier la lumière

visible et infrarouge renvoyée par la Terre, donc l'activité photosynthétique, à résolution de 1 km. Les capteur AVHRR sont embarqués sur les satellites d'orbite polaire de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Le paramètre issu de ces observations s'appelle l'Indice de Végétation de Différence Normalisée (en anglais, Normalized Difference Vegetation Index -NDVI-); il est calculé comme suit :

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$$

Où NIR et Red désigne la réflectance du proche infrarouge et du rouge visible respectivement.

Le NDVI oscille entre des valeurs de -1 et +1, avec -1 indiquant un terrain qui ne reflète pas les infrarouges et par conséquent n'est pas de type végétation mais plutôt eau. Une valeur de NDVI proche de 0 indique des sols artificialisés, alors qu'une valeur au-dessus de 0.7 indique plutôt de la végétation dense de type forêts. La Figure I.9 montre que la plupart des espaces à la végétation dense sont localisés en altitude dans notre zone d'étude. Les bassins du Tech et de la Têt sont particulièrement occupés par cette végétation dense, cela rejoint les données Corine Land Cover décrites dans le paragraphe précédent et qui montrait des pourcentages d'occupation des sols par la forêt particulièrement élevé dans ces deux bassins versants.

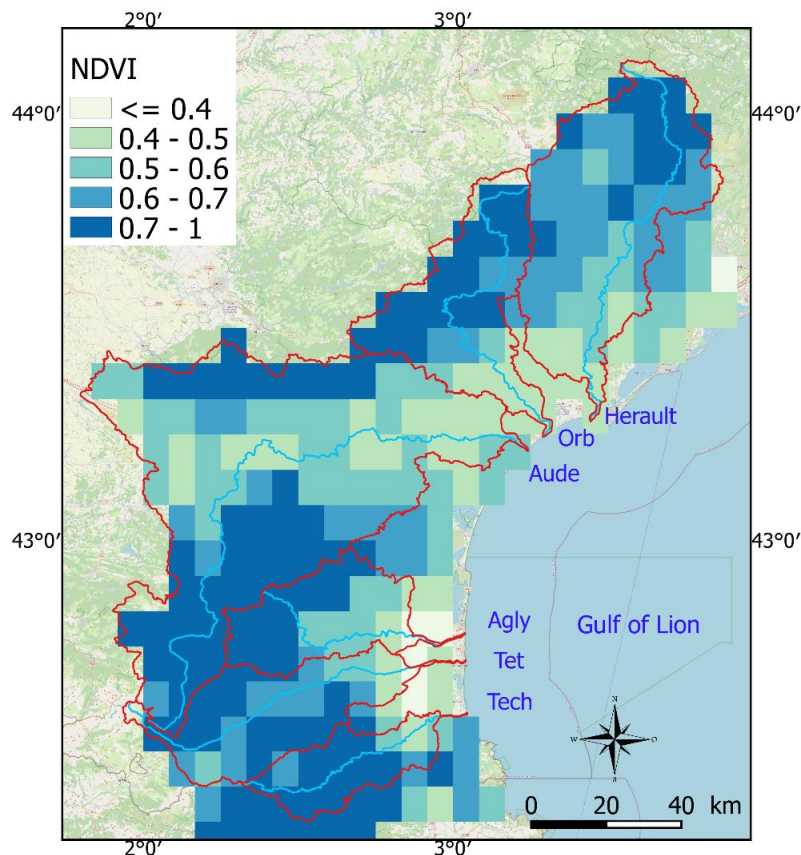


Figure I.9: Valeurs de NDVI pour le mois de Juillet 2015



### 3.2. Données sur l'évolution des pratiques agricoles et des usages des terres agricoles

Outre l'emploi de CORINE Land Cover, l'essentiel des informations sur l'agriculture en France et pour chaque région provient de recensements généraux organisés tous les dix ans environ et appelés recensements généraux de l'agriculture. Les données issues de ces recensements sont rendues publiques et accessibles sur le site nommé AGRESTE hébergé par le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (Agreste). La Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt (DRAAF) met également à disposition les données des recensements agricoles. La Draaf est un service déconcentré du ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, placée sous autorité du Préfet de chaque région, et de ce fait, depuis le redécoupage des régions en France en 2015, il existe un service Draaf propre à la région Occitanie. Le site est accessible au lien [draaf.occitanie.agriculture.gouv.fr](http://draaf.occitanie.agriculture.gouv.fr). Jusqu'alors, 5 recensements agricoles ont été réalisés et retracent les changements majeurs au sein du secteur sur une période de 40 ans. Ces 5 années de recensement sont 1970, 1988, 2000, et 2010. Le recensement agricole de 2020 étant en cours, ce projet de thèse arrive à termes un peu trop tôt pour pouvoir exploiter les résultats de ce tout dernier recensement. Aussi, un recensement antérieur à 1970, celui de 1955, avait été réalisé et aurait constitué une information précieuse puisque ces années représentent une période de mutations rapides dans l'histoire agricole française et même européenne. Malheureusement, les résultats issus de ce recensement de 1955 seraient jugés douteux (Richard-Schott, 2009).

### 3.3. Prélèvements en eau

La Banque Nationale des Prélèvements quantitatifs en Eau (BNPE) est l'outil dédié à la collecte des données renseignant sur la ressource en eau et ses prélèvements en France. Différents acteurs sont engagés pour la collecte des données, ceux-ci comprennent les Directions Départementales des Territoires (DDT), les Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL), et les agences de l'eau. Chacun de ces organismes fixe le seuil de déclaration des prélèvements en eau et retransmettent ensuite leurs données à la BNPE. Ainsi, les prélèvements en France sont disponibles au pas de temps annuel et depuis l'année 2012, sur différentes échelles spatiales administratives qui sont la commune, le département, la région, et la France entière. Les données sont disponibles au lien [bnpe.eaufrance.fr/acces-donnees](http://bnpe.eaufrance.fr/acces-donnees). Elles sont disposées selon 3 volets déroulants détaillant le type d'usage (irrigation, production d'énergie, eau potable, canaux, eau turbinée, usages

exonérés et/ou industries et autres activités économiques), l'année considérée, et le type d'eau (superficielle, souterraine et/ou littorale).

L'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée dispose également de documents faisant état des prélèvements jusqu'à l'année 1997. Malheureusement, les modes de calcul des redevances et des prélèvements ont changé suivant l'évolution de la réglementation. Ces démarches ont pu induire des biais dans les jeux de données. C'est le cas notamment de l'année 2008 où des modifications sont intervenues du fait de la mise en œuvre de la nouvelle loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (la loi LEMA) de 2006. De même, « l'arrêté du 19/12/2011 relatif aux modalités de calcul de l'assiette de la redevance prélèvements sur la ressource en eau » a eu un impact sur la valeur des volumes captés par ouvrage. En effet ceux-ci possèdent deux modes de comptage qui sont forfaitaire ou estimé. Or, la loi LEMA et l'arrêté de 2012 ont modifié, à la baisse ou à la hausse selon les cas, les volumes captés par un même ouvrage. Ces données dans leur ensemble doivent donc être manipulées avec précaution (L'eau dans le bassin Rhône-Méditerranée, 2020).

Pour ce projet de thèse, nous avons utilisé les données extraites de la BNPE. Pour chaque bassin, nous avons compté les prélèvements de chaque commune dont les dispositifs de prélèvements sont supposés être situés dans le périmètre du bassin hydrologique. Nous avons également distingué les prélèvements d'eaux superficielles, des eaux souterraines, et nous avons distingué les prélèvements pour les usages agricoles des autres types d'usages.



## **-CHAPITRE II -**

# **Evolutions historiques des séries hydrologiques et relations avec les changements climatiques et anthropiques**

### **1. Introduction**

L'eau est une ressource qui s'insère comme un facteur limitant pour le développement économique et pour les sociétés locales. De plus en plus, celles-ci doivent faire face à une demande en eau croissante liée à une population en augmentation et à un développement en continu des secteurs agricoles et touristiques, avec en parallèle, une réduction générale des ressources en eau (Cudennec et al., 2007). Observer les comportements climatiques et identifier les tendances passées, actuelles et futures ainsi que leurs processus et les liens existants entre climat et ressource en eau deviennent des actions nécessaires si l'on entend élaborer des stratégies d'adaptation pour la gestion des ressources en eau sur le long terme.

De nombreuses études ont analysé les tendances hydro-climatiques dans la région méditerranéenne au cours des dernières décennies (García-Ruiz et al., 2011; Merheb et al., 2016). En Espagne et en France notamment, une série d'études ont fait état de tendances saisonnières et annuelles à la baisse du débit des fleuves côtiers, en lien avec l'évolution climatique récente (Masseroni et al., 2020; Blöschl et al., 2019; Morán-Tejeda et al., 2011; Lespinas et al., 2010; Ludwig et al., 2004). Mais les tendances des séries hydrologiques peuvent être attribuées à plusieurs facteurs qui, outre le climat, sont également les changements d'occupation des sols, ainsi que les extractions et la gestion de l'eau (García-Ruiz et al., 2011). Il reste donc complexe de déterminer quelle proportion de la réduction est induite par l'homme et quelle proportion est induite par le climat. Cela est particulièrement vrai dans la zone méditerranéenne où les petits bassins versants côtiers avec des caractéristiques hydro-climatiques, morphologiques et d'utilisation des sols contrastées sont nombreux. Cela rend difficile l'extrapolation des tendances locales à des échelles plus grandes.

Ce chapitre de thèse aborde ces problèmes. Il étudie l'évolution annuelle du débit des six fleuves côtiers de la région OE au cours des 60 dernières années et propose de détecter statistiquement les contrôles dominants sur les ressources en eau. L'un des objectifs est de pouvoir produire un

outil qui pourrait être ensuite utilisé dans le cadre d'évaluations quantitatives des évolutions futures de la ressource en eau. Nous développons des modèles statistiques multi-paramètre qui visent à reproduire les écoulements superficiels au pas de temps annuel pour chaque fleuve côtier.

Des études précédentes ont déjà détecté une baisse significative du débit des rivières de l'OE (Lespinas et al., 2010; Morán-Tejeda et al., 2011; Blöschl et al., 2019; Lespinas et al., 2014), ce qui rend cette région particulièrement adaptée pour tester la validité des relations empiriques dans des conditions non stationnaires. La capacité des modèles hydrologiques à simuler les évolutions hydrologiques dans des conditions climatiques futures est aujourd'hui de plus en plus discutée. Celle-ci dépend non seulement de leur habilité à reproduire des moyennes saisonnières ou à long terme réalistes, mais aussi de leur capacité à reproduire fidèlement les tendances observées dans les séries chronologiques qui décrivent des conditions non stationnaires (Thirel et al., 2015 et les références qui y sont faites).

## **1. Calcul de paramètres hydro-climatiques**

### **1.1. Approximation des débits spécifiques**

Les données fournies par Safran-Isba ont permis de caractériser de deux façons l'écoulement de surface total pour chaque bassin qui peut approximer les valeurs de débits spécifiques de chaque fleuve.

(i) Dans Isba l'écoulement total est obtenu en effectuant la somme des paramètres ruissellement et drainage, tous deux sont modélisés et exprimés en millimètre (mm). Le ruissellement sur une maille de modèle s'obtient lorsque celle-ci est saturée ou que l'intensité des précipitations dépasse sa capacité d'infiltration. Cependant, avant correction, les mailles de Isba couvraient un terrain vaste où ni le seuil de saturation du sol ni la capacité d'infiltration ne pouvait être homogène en tout point. C'est pour cette raison qu'un calcul « ruissellement sous-maille » (Wood et al., 1992; Decharme and Douville, 2006) a été agrémenté. Le drainage s'obtient lorsque le contenu en eau de chacune des 3 couches du modèle passe en-dessous de la capacité au champ. Comme le ruissellement, le drainage a fait l'objet d'un nouveau calcul à échelle « sous-maille » (Habets et al., 1999; Etchevers et al., 2001). La quantité journalière d'écoulement est ensuite ramenée sur la superficie de chaque bassin. Le débit modélisé par Safran est alors un produit à haute résolution temporelle (journalière) et basé en partie sur des

observations qui servent de paramètres d'entrée au modèle calculant les deux variables (ruissellement et drainage) qui le composent.

(ii) L'approche de Pike (1964) propose de calculer un coefficient d'écoulement (*Runoff Ratio*, RR) résultant d'un rapport entre le cumul des précipitations annuelles (P) et le cumul de l'évapotranspiration potentielle annuelle (ETP). Un débit modélisé spécifique (Q<sub>pike</sub>) peut être ensuite obtenu comme étant le produit de RR avec P. Q<sub>pike</sub> se calcule alors suivant l'équation :

$$Q_{pike} = \left( 1 - \frac{1}{\left( 1 + \left( \frac{P}{PET} \right)^2 \right)^{0.5}} \right) * P$$

L'approche de Pike a déjà été utilisée avec succès pour produire une estimation des débits en région méditerranéenne (Sadaoui et al., 2018; Ludwig et al., 2009). La différence avec le débit modélisé de Safran réside dans le fait que Q<sub>pike</sub> se calcule sur une période longue dans le temps et à échelle spatiale d'un bassin versant entier. Nous testerons l'approche de Pike avec les données climatiques dont nous disposons.

## 1.2. Indices climatiques

### 1.2.1. Saisonnalité des précipitations

Deux indices de saisonnalité des précipitations ont été utilisés pour suivre l'évolution de cette caractéristique climatique dans les bassins versants étudiés. Nous les calculons à partir des données Safran.

i. L'indice de saisonnalité (SI) est développé par Walsh and Lawler (1981) et est toujours largement utilisé dans les études climatiques en Afrique notamment mais aussi en Méditerranée (Yasuda et al., 2018; Fenta et al., 2017; Pryor and Schoof, 2008; Livada and Asimakopoulos, 2005; Sumner et al., 2001). Il est calculé selon la formule :

$$SI = \frac{1}{P} * \sum_{i=1}^{i=12} \left| P_i - \frac{P}{12} \right|$$

Où P est le cumul annuel des précipitations (mm), P<sub>i</sub> le cumul des précipitations au mois *i* (mm). L'index varie de 0 si tous les mois de l'année reçoivent la même quantité de précipitations à

1,83 si toutes les précipitations ont lieu sur un seul mois. A partir des valeurs possibles de l'index, les auteurs ont construit une classification qualitative (Table II.1).

ii.L'indice de Fournier (1960) est normalement calculé selon le ratio du carré du mois aux précipitations moyennes maximales sur les précipitations annuelles. Nous avons choisi de modifier légèrement cette équation et nous proposons de calculer cet indice selon la somme des précipitations maximales journalières de chaque mois  $i$  sur les précipitations annuelles. L'équation s'écrit alors :

$$F.index = \sum_{i=1}^{i=12} \frac{Pmax_i^2}{P}$$

Où F.index est l'indice de Fournier modifié (mm), P est le cumul annuel des précipitations (mm),  $Pmax_i$  le maximum des précipitations au mois  $i$  (mm).

Table II.1 : Classification de l'Indice de Saisonnalité, d'après Walsh et Lawler (1981)

Rainfall regime	SI values
Very equable	$\leq 0.19$
Equable but with a definite wetter season	0.20-0.39
Rather seasonal with a short definite drier season	0.40-0.59
Seasonal	0.60-0.79
Markedly seasonal with a long drier season	0.80-0.99
Most rain in 3 months or less	1.0-1.19
Extreme, almost all rain in 1 or 2 months	$\geq 1.20$

### 2.2.1. Indices de sécheresse

De même que pour les indices de saisonnalité des précipitations, nous produisons 3 indices de sécheresse à partir des données Safran.

i.L'indice standardisé des précipitations (SPI) développé pour la première fois par McKee (1993) permet de détecter des périodes de sécheresses météorologiques, liées à un déficit de précipitations. Travaillant seulement à partir de données de précipitations mensuelles sur un espace donné, il compare les cumules des précipitations sur un pas de temps choisi (généralement 1 mois, 3 mois, 6 mois ou 12 mois) au cumul moyen sur le même pas de temps sur l'ensemble de la période étudiée. Il calcule donc le cumul des précipitations sur les 12 premiers mois, puis décale le calcul d'un mois, jusqu'au dernier mois de la période étudiée. Une période d'analyse longue d'au moins 30 ans est requise pour calculer le SPI. Chacun des

ensembles de données est ajusté à une fonction de densité de distribution gamma qui suit la formule suivante :

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}$$

Où  $\alpha > 0$  est un paramètre de forme,  $\beta$  un paramètre d'intensité,  $\Gamma$  est la fonction gamma, et  $x > 0$  le cumul des précipitations. Les résultats sont ensuite utilisés pour tracer une courbe de probabilités cumulés de chaque événement (cumul de précipitations) sur le pas de temps voulu (Edwards and McKee, 1997). Puis cette dernière est ajustée à une distribution normale, de moyenne nulle et variance égale à 1, qui donne les valeurs de SPI. La classification des valeurs obtenues de SPI et leur signification en termes de sécheresse est présentée dans la Table II.2.

Dans notre cas, nous choisissons de retenir le pas de temps de 12 mois pour effectuer notre analyse ; en effet, 12 mois, ou 1 an est la période de temps nécessaire pour détecter l'effet d'un changement dans la quantité de précipitations sur la quantité d'eau qui s'écoule dans les fleuves.

ii. L'indice standardisé des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle (SPEI) (Vicente-Serrano et al., 2010) se calcule de façon similaire au SPI à la différence qu'il prend en compte l'effet de la température via l'ETP. La donnée d'entrée pour calculer ce paramètre est ainsi la différence entre les précipitations et l'ETP mensuelle. Cette différence est ensuite additionnée sur le pas de temps considéré (soit 12 mois si le pas de temps considéré est annuel) puis ajustée à une fonction de distribution log-logistique à 3 paramètres. Enfin, le SPEI est la valeur standardisée de la fonction de distribution ; le SPEI a donc une moyenne de 0 et un écart-type de 1. Le calcul du SPEI est proposé via une commande disponible dans le logiciel R. La classification des valeurs de SPEI et leur signification est la même que celle du SPI.

iii. L'indice de reconnaissance de sécheresse (RDI) (Tsakiris, 2004) est lui aussi un indice récent basé sur le ration des précipitations et de l'ETP. Il est calculé selon les trois expressions suivantes :

$$\alpha_0^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^{12} P_{ij}}{\sum_{j=1}^{12} ETP_{ij}}, i = 1 \dots n \wedge j = 1 \dots 12$$

Où  $P_{ij}$  et  $ETP_{ij}$  sont les précipitations et ETP des mois  $ij$  et  $n$  le nombre d'années considéré.



$$RDI_n^{(i)} = \frac{\alpha_0^{(i)}}{\bar{\alpha}_0} - 1$$

Où  $\bar{\alpha}_0$  est la moyenne arithmétique des valeurs  $\alpha_0$ , calculée pour le nombre d'années  $n$  considérées.

$$RDI_{st(k)}^{(i)} = \frac{y_k^{(i)} - \bar{y}_k}{\sigma_{y_k}}$$

Où  $y_k^{(i)}$  est le logarithme naturel de  $\alpha_0^{(i)}$ ,  $\bar{y}_k$  la moyenne arithmétique de  $y_k$  et  $\sigma_{y_k}$  l'écart-type de  $y_k$ .

De même que pour les deux indices précédents, le RDI partage la même classification et signification des valeurs.

Afin d'obtenir une série temporelle d'échelle égale aux autres paramètres, ces indices de sécheresse ont été moyennés sur un pas annuel.

Table II.2: : Classification des valeurs de SPI d'après McKee (1993), valable pour les valeurs obtenues de SPEI et RDI

Drought status	SPI values
Extremely wet	$\geq 2$
Very wet	1.5 – 1.99
Moderately wet	1.0 – 1.49
Near normal	-0.99 - 0.99
Moderately dry	-1.49 - -1.0
Severely dry	-1.99 - -1.5
Extremely dry	$\leq -2.0$

### 1.3. Calcul de l'évapotranspiration potentielle

L'ETP est un paramètre important et très utilisé dans les études d'impact des changements climatiques et pour des applications de modélisation pluie-débit. Malheureusement, les formules permettant de calculer l'ETP avec beaucoup de précision, comme la méthode de Penman-Monteith (FAO Penman-Monteith equation) demandent un certain nombre de paramètres souvent indisponibles. Les formules développées pour calculer l'ETP sont nombreuses et plusieurs auteurs ont cherché à reconstruire l'ETP à partir des seules données de températures (Venkataraman et al., 2016; Oudin et al., 2005; Folton and Lavabre, 2004).

Nous utilisons la formule de Folton et Lavabre, qui a été validée dans des bassins versants du Sud de France et qui calculait l’ETP à partir des températures enregistrées dans 68 stations météorologiques. La formule a été reprise et validée dans l’étude de (Lespinas et al., 2014) qui avait les mêmes fleuves côtiers pour objet d’étude. La formule suit l’équation :

$$ETPt (mm) = \alpha \cdot \left(\frac{T + 20}{10}\right)^\beta + \left(\frac{Z}{100}\right)^\gamma$$

Où ETPt est l’évapotranspiration potentielle dérivée de la température, T est la température moyenne en °C, Z l’élévation moyenne en m,  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  des coefficients sans unité qui varient d’un mois de l’année à l’autre. Ces valeurs sont représentées dans la Table II.3.

Par la suite, nous désignons l’ETP dérivée de la température par ETPt.

Table II.3: Valeurs mensuelles des coefficients  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  présentés dans l’équation de reproduction de l’évapotranspiration potentielle

Mois	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
Janvier	0,21	4,70	1,00
Février	0,29	4,70	1,00
Mars	2,54	3,10	1,30
Avril	2,65	3,10	1,30
Mai	2,62	3,10	1,30
Juin	2,19	3,10	1,30
Juillet	1,96	3,10	1,30
Août	1,73	3,10	1,30
Septembre	0,16	4,70	1,30
Octobre	0,15	4,70	1,00
Novembre	0,15	4,70	1,00
Décembre	0,18	4,70	1,00

## 2. Approches statistiques

### 2.1. Calcul des caractéristiques climatiques pour chaque bassin

Les variables Safran sont présentées sous la projection Lambert II étendue. Nous utilisons le système de coordonnées de référence Lambert zone II (de code EPSG 27572) dont les caractéristiques sont les suivantes :  $+proj=lcc +lat_1=46.8 +lat_0=46.8 +lon_0=0 +k_0=0.99987742 +x_0=600000 +y_0=2200000 +a=6378249.2 +b=6356515 +towgs84=-$

168,-60,320,0,0,0,0 +pm=paris +units=m +no\_defs. Pour ne retenir que les données qui appartiennent à la zone géographique de l'OE, nous sélectionnons un rectangle de coordonnées  $x_{max}=7508$   $x_{min}=5315$  et  $y_{max}=19147$   $y_{min}=16643$ , x et y désignant respectivement la longitude et la latitude exprimées en hectomètres. Le logiciel spatialise ensuite les données selon leur position dans la région et en créant une série de couches en format raster qui représentent chacune un jour, soit une mesure.

Nous avons créé un fichier raster de résolution 8 km et d'origine égale aux jeux de données Safran qui représente une délimitation approximative de chaque bassin. La commande « zonale » du logiciel R permet d'effectuer une opération statistique sur les données Safran tombant dans les pixels du fichier raster partageant la même valeur (Figure II.1) ; dans le cas des températures, l'opération effectuée est la moyenne, pour les précipitations c'est la somme. Le fichier texte qui résulte de ce processus est un tableau où figurent en colonne la date de la mesure et les valeurs d'un paramètre climatique pour chaque bassins versants. En ligne on retrouve la valeur journalière allant donc du 01/01/1959 au 31/12/2018. Nous procédons selon la même méthodologie pour extraire les variables climatiques à échelle des sous-bassins versants.

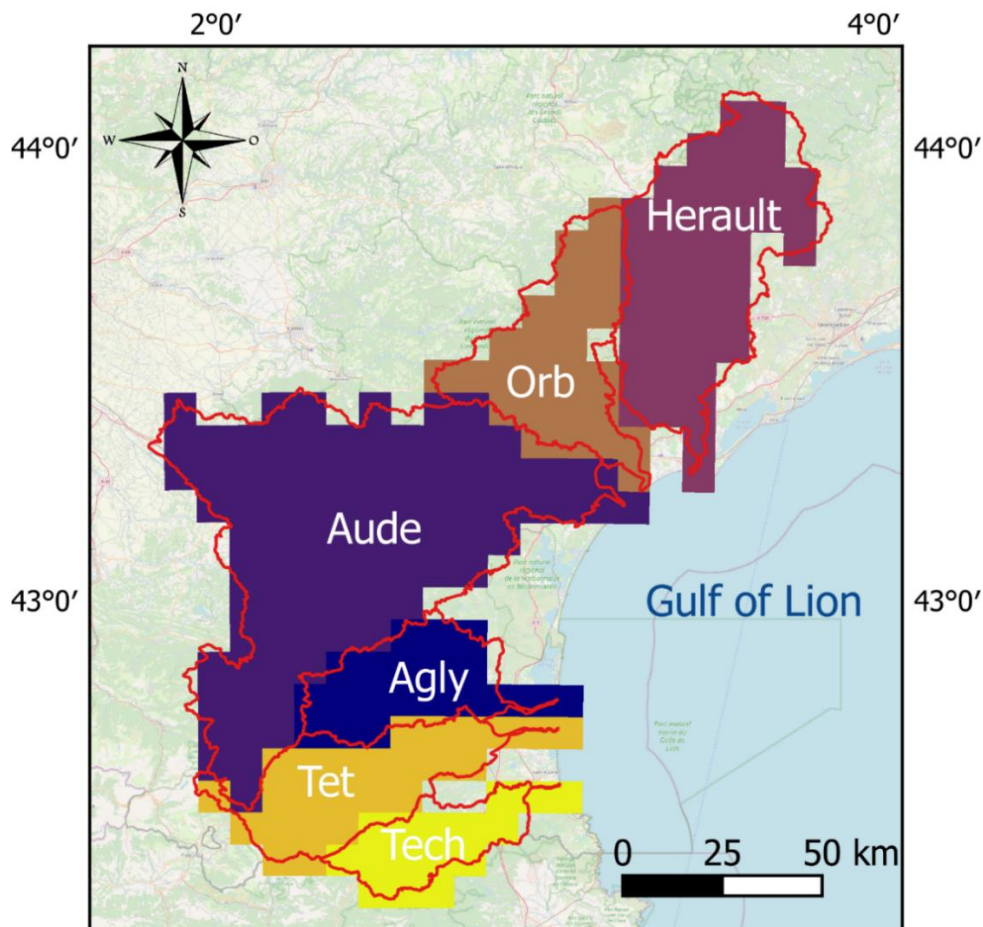


Figure II.1: Sélection des mailles Safran par bassin versant pour l'extraction des paramètres climatiques

## 2.2. Test de Mann-Kendall

Nous avons réalisé des analyses de tendances linéaires sur les séries temporelles des paramètres hydro-climatiques dont nous disposons. L'objectif de l'analyse d'une série temporelle est d'effectuer une synthèse, ou résumé, de l'allure d'une variable dans le temps ; il devient ainsi plus aisé de décrire l'évolution de cette variable et de pouvoir éventuellement la comparer à d'autres. Plusieurs éléments d'une série temporelle peuvent être distingués comme la tendance, les cycles, les effets saisonniers (Grun-Rehomme and Vasyechko, 2013).

Nous utilisons le test non-paramétrique de Mann-Kendall (Kendall, 1975; Mann, 1945) pour détecter des tendances monotones significatives. C'est un test statistique largement utilisé dans les domaines de l'environnement et l'hydrologie (Hirsch et al., 1982; Hirsch and Slack, 1984) où le type de données ne suit généralement pas une distribution statistique supposée (loi normale, homogénéité des variances, etc). Avant d'appliquer le test, nous devons nous assurer que les séries temporelles ne soient pas auto-corrélées. Le test de Mann-Kendall est appliqué sur les séries temporelles de moyennes annuelles des paramètres sur chaque sous-zone étudiée.

L'hypothèse nulle  $H_0$  de ce test désigne l'absence de tendance monotone, par conséquent l'hypothèse alternative  $H_A$  indique la présence d'une tendance, ascendante ou descendante significative. La statistique de test est donnée par :

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(X_j - X_k)$$

Où  $X_j$  désigne les valeurs de données,  $n$  la longueur de la série temporelle et  $\text{sgn}(X_j - X_k)$  est égal à 1, 0 ou -1 selon si  $X_j - X_k$  est plus grand, égal ou plus petit que zéro respectivement. Le résultat  $S$  indique la force du test et donc la possible présence d'une tendance à condition qu'il soit significativement différent de 0. La valeur statistique du test est indiquée par  $Z$ , si celui-ci est positif, cela indique une tendance positive et inversement. En choisissant un niveau de significativité  $\alpha$  (par exemple 0.05), si  $Z$  est supérieur ou égal à 1.96, cela montre une tendance significative croissante. Au contraire si la valeur de  $Z$  est inférieure ou égale à -1.96, cela montre une tendance significative décroissante. Le Tau de Kendall est, lui, une mesure non-paramétrique de la force du lien (corrélation) entre les variables d'étude. Ainsi un Tau proche de 0 indique une faible voire inexistante corrélation, au contraire la corrélation est à son maximum si tau atteint la valeur 1.

### 2.3. Régression non paramétrique 'Loess'

On affiche pour chaque paramètre une courbe lissée des données afin de visualiser l'allure générale de leur évolution dans le temps. La régression Lowess de R est celle que l'on utilise. Elle est classiquement employée pour traiter des vecteurs numériques représentant des séries temporelles. Il s'agit d'une régression non-paramétrique, qui applique la méthode des moindres carrés à échelle locale pour trouver les coordonnées  $X, Y$  qui représentent le mieux le vecteur d'analyse. La méthode des moindres carrés fonctionne comme suit :

On cherche à établir un modèle qui représente au mieux la distribution des valeurs d'une variable. La qualité de l'ajustement modèle-valeurs est mesuré par les résidus, c'est-à-dire la différence entre les valeurs de la variable dépendante et celles prédites par le modèle. La courbe de régression à retenir est celle qui rend minimale la somme des carrés des résidus. Considérons une variable  $H$  à  $n$  points de coordonnées  $(x_i, y_i)$  avec  $i=1, \dots, n$  et dont  $x$  est elle-même une variable indépendante (par exemple le nombre d'années) et  $y$  une variable dépendante (par exemple des températures), et un modèle  $I$  de forme  $f(x, \beta)$  où  $\beta$  est un vecteur régi par plusieurs paramètres ajustables. L'équation donnant les résidus de  $H$  et  $I$  est :

$$r_i = y_i - f(x_i - \beta)$$

Les paramètres à employer dans le modèle sont trouvés en minimisant la somme  $S$  des carrés des résidus, donnée par :

$$S = \sum_{i=1}^n r_i^2$$

Pour mesurer la qualité d'approximation d'une droite des moindres carrés à un nuage de points on calcule le coefficient de corrélation linéaire, défini par :

$$r_{xy} = \frac{cov_{xy}}{S_x S_y}$$

C'est un nombre compris entre -1 et +1 qui mesure la dispersion du nuage de points et l'approximation du modèle de régression. Plus le modèle se rapproche de l'allure du nuage de points, plus  $r_{xy}$  se rapproche de +1 (-1) si la pente du modèle est positive (négative,

respectivement). Autour de 0 le modèle de régression est considéré mauvais. On estime que la régression est satisfaisante si  $|r_{xy}| \geq \sqrt{32} = \sqrt{0,75} = 0.866$ .

La fonction Lowess de R effectue des régressions multiples le long du vecteur numérique considéré et s'appuie sur les proches voisins. La taille de chaque 'voisinage' est contrôlée avec l'argument span ; elle varie entre 0 et 1, contrôlant alors le degré de 'lissage' de la courbe. Plus le degré de span est élevé, plus la taille de voisinage prise en compte est grande et par conséquent, plus le lissage de la courbe est important.

## 2.4. Analyses de corrélation linéaire

L'intérêt d'une analyse de corrélation linéaire est de déterminer si plusieurs variables sont liées ou non, c'est-à-dire si les valeurs d'une variable augmentent ou diminuent conjointement avec les valeurs d'une autre variable ou si ces deux variables sont indépendantes (Helsel and Hirsch, 1992). L'analyse de corrélation sert donc à quantifier l'intensité de la relation entre deux variables et à donner le sens de la relation. Cependant, elle n'établit pas de relation de cause à effet entre les deux variables. Par exemple deux variables corrélées positivement, peuvent subir l'effet d'un facteur commun qui cause l'augmentation ou diminution de leurs variables en même temps et à un degré égal ou différent.

La force de la corrélation se mesure avec un paramètre appelé le coefficient de détermination, noté  $r^2$ . Il mesure le pourcentage de valeurs expliquées par le modèle de régression défini par l'équation de régression. Le  $r^2$  est compris entre -1 et 1 : lorsqu'il est nul, l'équation de régression détermine 0 % de la distribution des points. Lorsqu'il vaut -1 (1), cela signifie que l'équation de régression explique 100 % de la distribution des points et que le sens de la relation est négatif (positif).

Les tests de corrélation de Pearson (1931) et de Spearman (1904) sont les plus couramment employés. Le coefficient de corrélation, ou produit-moment de Pearson évalue la relation linéaire entre deux variables continues. Le changement des valeurs d'une variable est proportionnel à celui des valeurs de l'autre variable. Le coefficient de corrélation ou rang-ordre de Spearman évalue la relation monotone entre deux variables continues ou ordinales, c'est-à-dire que lorsque les valeurs d'une variable sont modifiées, celles de l'autre le sont également mais pas au même rythme. Par exemple, dans une relation où les deux variables augmentent de

façon non constante, le coefficient de Pearson sera positif mais inférieur à 1 alors que celui de Spearman sera égal à 1.

La significativité d'une valeur de corrélation est évaluée en utilisant un test d'hypothèse où l'hypothèse nulle  $H_0$  indique qu'il n'y a pas de corrélation entre les deux variables, soit  $\rho=0$ , et l'hypothèse alternative  $H_1$  indique qu'une corrélation existe entre les deux variables, soit  $\rho \neq 0$ .

## **2.5. Validité du modèle statistique multi-paramètres**

Nous construisons un modèle de régression linéaire à partir des données décrites dans les sections précédentes. La relation linéaire du modèle est validée en réalisant un test d'adéquation appelé test de Rainbow (Utts, 1982), puis s'assurant que les résidus de celui-ci soient :

- (i) Indépendants
- (ii) Distribués selon une loi normale et de moyenne 0
- (iii) Distribués de façon homogène, c'est-à-dire que leur variance est constante

L'objectif du test de Rainbow est de s'assurer de la validité du modèle en le comparant à un modèle bis reconstitué à partir des valeurs centrales de l'échantillon initial. Le modèle bis est constitué de 50 % des valeurs de l'échantillon initial mais situés au milieu de celui-ci. La comparaison des deux modèles est soumise à un test de Fisher (1935). L'hypothèse nulle ( $H_0$ ) est rejetée si le modèle initial et le modèle bis ne sont pas adéquates.

Par soucis de simplicité et lisibilité, les résultats de ces tests qui seront présentés dans la section 3.6 de ce chapitre sont obtenus pour le modèle effectué sur le bassin de l'Hérault uniquement.

## **3. Résultats**

### **3.1. Caractéristiques climatiques et d'activités anthropiques moyennes des bassins versants étudiés**

Nous résumons dans la Table II.4 les caractéristiques hydro-climatiques de chaque bassin versant évaluées au cours de la période de disponibilité des données hydrologiques. Les températures moyennes annuelles sont les plus basses dans les bassins élevés en altitude ; le bassin de la Têt enregistre une température moyenne de 10,1°C sur 49 ans, celle du Tech est de

11,7 sur 43 ans contre 12,6°C pour l'Hérault, l'Orb et l'Agly et 12,2°C pour l'Aude. Pour la même raison, la part des précipitations neigeuses dans les précipitations totales est plus importante dans le bassin de la Têt (20,7 %) suivi de celui du Tech (9,4 %). Cette part ne représente qu'entre 2,4 % (Hérault et Orb) et 7,2 % (Aude) dans les autres bassins. Les précipitations totales (somme des précipitations pluvieuses et neigeuses) sont plus importantes dans les deux bassins du Nord de la région, l'Hérault et l'Orb, où elles atteignent 1103 et 1013 mm en moyenne respectivement. Dans les autres bassins, elles atteignent entre 802 (Agly et Têt) et 998 mm (Tech) en moyenne. Les débits spécifiques oscillent entre 191 mm (Agly) et 615 mm (Orb) et représentent alors entre 24 % et 61 % des précipitations totales de ces bassins respectivement. Cependant, la part importante obtenue dans le bassin de l'Orb est due au fait que de l'eau est importée du bassin de la Vèbre, un affluent de l'Adour-Garonne, via le fonctionnement d'une centrale majeure de production d'énergie hydroélectrique (Lespinas et al., 2014). Au contraire, les faibles valeurs de débits spécifiques obtenues pour l'Agly et la Têt peuvent être expliquées par un écoulement important en milieu souterrain karstique pour l'Agly et des prélèvements et détournements de l'eau dans des réseaux de canaux d'irrigation particulièrement développés dans le bassin de la Têt. Ainsi, il est estimé que les pertes d'eau dans la Têt totalisent environ 1/3 des débits mesurables proche de l'embouchure du fleuve (Ludwig et al., 2004).

Les écoulements superficiels totaux modélisés par Safran-Isba ( $Q_s$ ) avoisinent les valeurs de débits observés dans un intervalle de -20 % (Orb) à +50 % (Agly). De façon générale,  $Q_s$  surestime les valeurs de  $Q_{obs}$ , sauf pour l'Orb. Cependant, comme souligné précédemment, l'Orb reçoit de l'eau d'un autre bassin, et l'Agly en perd par infiltration dans le karst. Aussi, la modélisation menée par Safran-Isba ne tient pas compte de paramètres climatiques et non anthropiques. Les valeurs obtenues ignorent ainsi les effets des interactions entre activités humaines et ressource en eau. Par exemple, dans le bassin de la Têt les prélèvements pour l'eau d'irrigation représentent une lame d'eau de 186 mm en moyenne entre 2012 et 2018, ce qui représente presque 82 % de la lame d'eau écoulée en moyenne et en surface sur la période 1970-2018. Il s'agit cependant des prélèvements bruts, c'est-à-dire qu'ils ne tiennent pas compte de la part importante du volume total qui retourne au cours d'eau, en aval des lieux de prises d'eau (BRLi, 2011).

La saisonnalité des précipitations est particulièrement marquée pour les bassins de l'Hérault, de l'Orb et, dans une moindre mesure, du Tech. Ces bassins enregistrent des précipitations moyennes d'environ 30 (Hérault et Orb) et 63 mm (Tech) au mois de juillet contre 166/149 mm



(Hérault/Orb) et 119 mm (Tech) au mois d'octobre (Figure II.2). Cet écart est plus important que dans les bassins versants de l'Aude, l'Agly et la Têt où les précipitations sont de 37,30 et 45 mm (Aude, Agly, Têt respectivement) au mois de juillet contre 89, 96 et 90 mm au mois d'octobre. Les températures sont plus homogènes inter-bassins et affichent un maximum moyen de 21°C en juillet et août pour les bassins de l'Hérault, l'Orb, l'Aude et l'Agly, 20°C pour le Tech et 18°C pour la Têt. C'est au mois de janvier que les températures moyennes les plus basses sont enregistrées avec 5°C pour tous les bassins, sauf la Têt qui montre 3°C. La différenciation de la Têt au niveau des températures moyennes, plus basses que dans les autres bassins, se doit à son altitude plus élevée.

Pour les débits, la saisonnalité est également très marquée dans les bassins de l'Hérault et de l'Orb avec des minimums bien définis au mois de Juillet et Août qui atteignent 8/7 mm (juillet/août) et 14/13 mm pour l'Hérault et l'Orb respectivement (Figure II.3). Les débits moyens maximum sont eux atteint au mois de janvier et février avec 66/72 mm (janvier/février) et 84/83 mm pour l'Hérault et l'Orb respectivement. L'Aude, l'Agly, la Têt et le Tech montrent une période aux débits bas plus prolongée de juillet à septembre avec des moyennes atteignant 4, 1, 5 et 9 mm pour chaque bassin respectivement au mois d'août. De même les mois aux débits moyens maximums sont plus étalés dans l'année avec les mois de février et mars pour l'Aude et l'Agly qui ont tendance à enregistré les débits maximums de 30/30 mm (février/mars) pour l'Agly et 38/37 pour l'Aude. La Têt et le Tech montrent des débits moyens maximum plus tardifs, au mois de mai, atteignant 48 et 40 mm respectivement pour la Têt et le Tech.

Table II.4: Caractéristiques hydro-climatiques des six bassins versants étudiés sur la période couverte par les stations de jaugeage disponibles pour chacun d'eux. \*moyenne calculée sur les années 2012 et 2018. Données sur l'élévation moyenne d'après (Lespinas et al., 2014)

Basin	Number of years	Area basin (km <sup>2</sup> )	Mean elevation (m)	Annual temperature (°C)	Annual rainfall (mm)	Snowfall (%)	Qobs (mm)	Qs (mm)	Qpike (mm)	Agricultural withdrawal (mm)*	Drinking water withdrawal (mm)*
Herault	59	2550	367	12.6	1103	2.4	518	537	381	23	0
Orb	53	1330	444	12.6	1013	2.4	615	462	324	29	9
Aude	50	4838	462	12.2	838	7.2	263	296	215	29	2
Agly	52	903	508	12.6	802	5.5	191	277	183	60	1
Tet	49	1300	1061	10.1	802	20.7	228	293	187	186	11
Tech	43	729	778	11.7	998	9.4	370	386	295	76	2

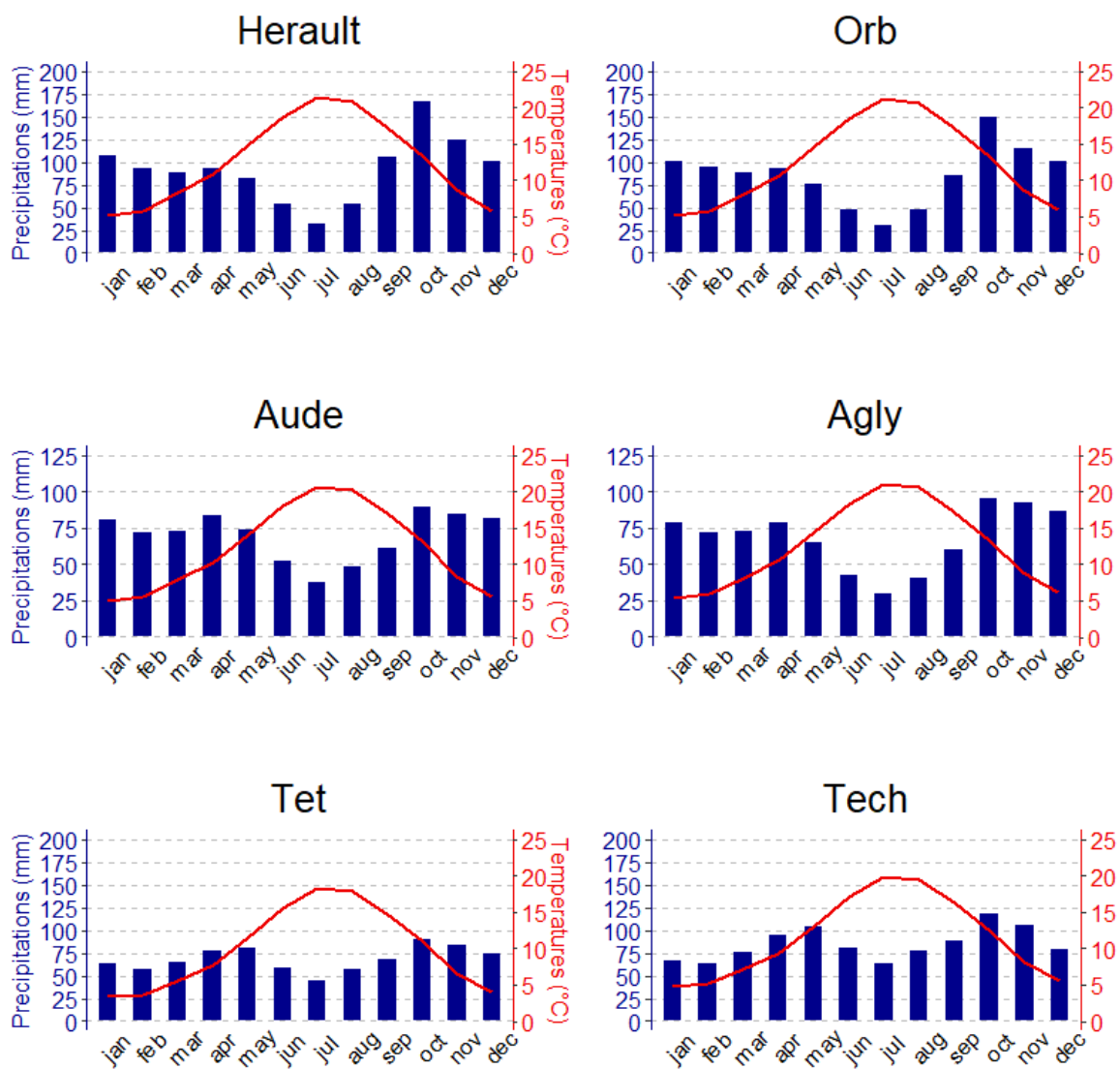


Figure II.2: Climatologie mensuelle moyenne de chaque bassin versant sur la période 1959-2018

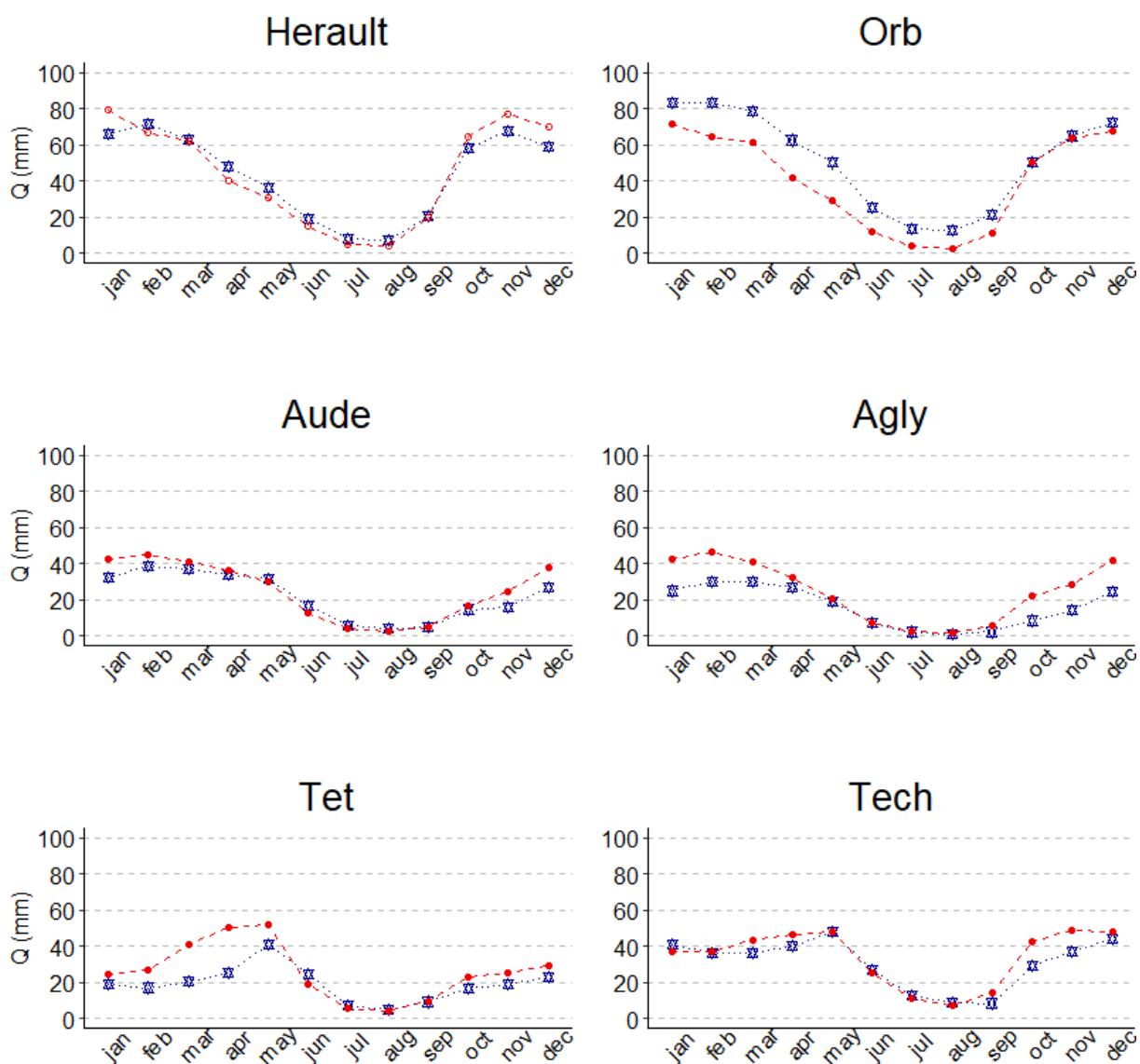


Figure II.3: Débits spécifiques mensuels moyens pour chaque bassin versant sur la période 1959-2018. Les lignes aux pointillés rouges correspondent aux débits modélisés avec les valeurs de drainage et ruissellement par Safran  $Q_s$ , les lignes aux pointillés bleus correspondent aux débits observés par les stations de jaugeage  $Q_{obs}$ . Remarque : les valeurs affichées pour chaque mois ne tiennent pas compte des données manquantes

### 3.2. Evolution des paramètres hydro-climatiques

#### 1.2.3. Températures et précipitations

Des tests de Mann-Kendall et de Sen ont été appliqués pour chaque paramètre hydro-climatique dans le but de déceler leur évolution sur les 6 dernières décennies (Figure II.4, Figure II.5). Les températures moyennes annuelles montrent une augmentation hautement significative ( $p$ -value < 0.01) allant de +1,2°C dans l'Agly à +2,1°C dans l'Hérault donnant alors une augmentation de 0,23 à 0,35°C par décennie. Ceci est moins important que ce qui avait été

reporté en 2008 par la thèse de Lespinas (2008) qui trouvait une augmentation de 0,38°C par décennie sur la même zone d'étude et entre 1965 et 2004. Ces différences de résultats peuvent être dues à la longueur de la série temporelle analysée, plus longue dans notre cas, et dont les conditions climatiques aux bornes influent beaucoup le résultat des tests. La Figure II.4 montre cependant que l'augmentation qui avait lieu entre 1965 et 2004 (étude de Lespinas) s'est légèrement atténuée au cours des années plus récentes. La haute significativité des tests pour tous les bassins confirme que le réchauffement, généralisé à toute la zone au moins. Les tendances pour l'évolution de l'ETPt sont proches de celles obtenues pour les températures ce qui démontre bien la relation étroite entre les deux paramètres. Cependant, ETPt et ETP montrent quelques désaccords, notamment dans les bassins du Nord, sur les résultats de tendance. L'ETP montre des tendances à la hausse plus importantes que ETPt, néanmoins, les deux variables indiquent bien une même direction des tendances et une significativité très élevée ( $p < 0.05$ ).

L'évolution des précipitations annuelles est assez variable d'un bassin à l'autre et une tendance faiblement significative a pu être détectée dans le bassin de la Têt seulement ( $p < 0.1$ ). Dans ce bassin, les précipitations auraient diminué de 18% entre 1959 et 2018. Dans les bassins du Tech, de l'Agly et de l'Aude, une légère réduction de -13,9% en moyenne serait également notée mais à une significativité faible ( $p < 0.2$ ). Ceci dit, l'évolution vers des valeurs plus faibles de précipitations est en accord avec les études de prédictions climatiques (IPCC, 2014), bien que notre région se situe justement dans la zone de transition entre des précipitations amoindries en Méditerranée et en Europe du Sud en général, et des précipitations plus importantes en Europe Centrale et de l'Est.

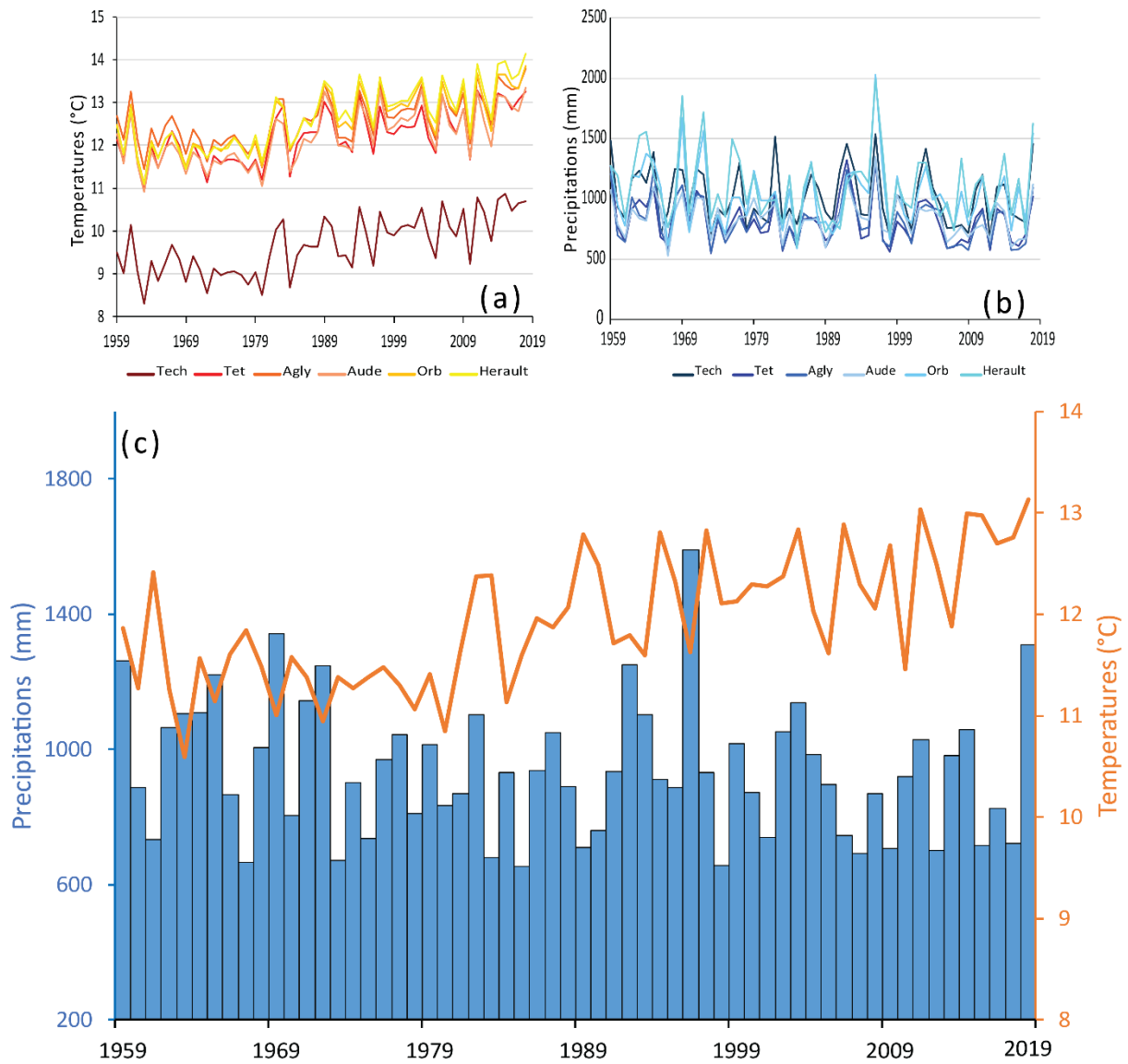


Figure II.4: (a) Evolution annuelle des moyennes de températures pour chaque bassin, (b) Evolution des cumuls annuels de précipitations pour chaque bassin et (c) Evolution annuelle des moyennes de températures et cumuls de précipitations pour l'ensemble de la zone d'étude (moyennes des 6 bassins versants).

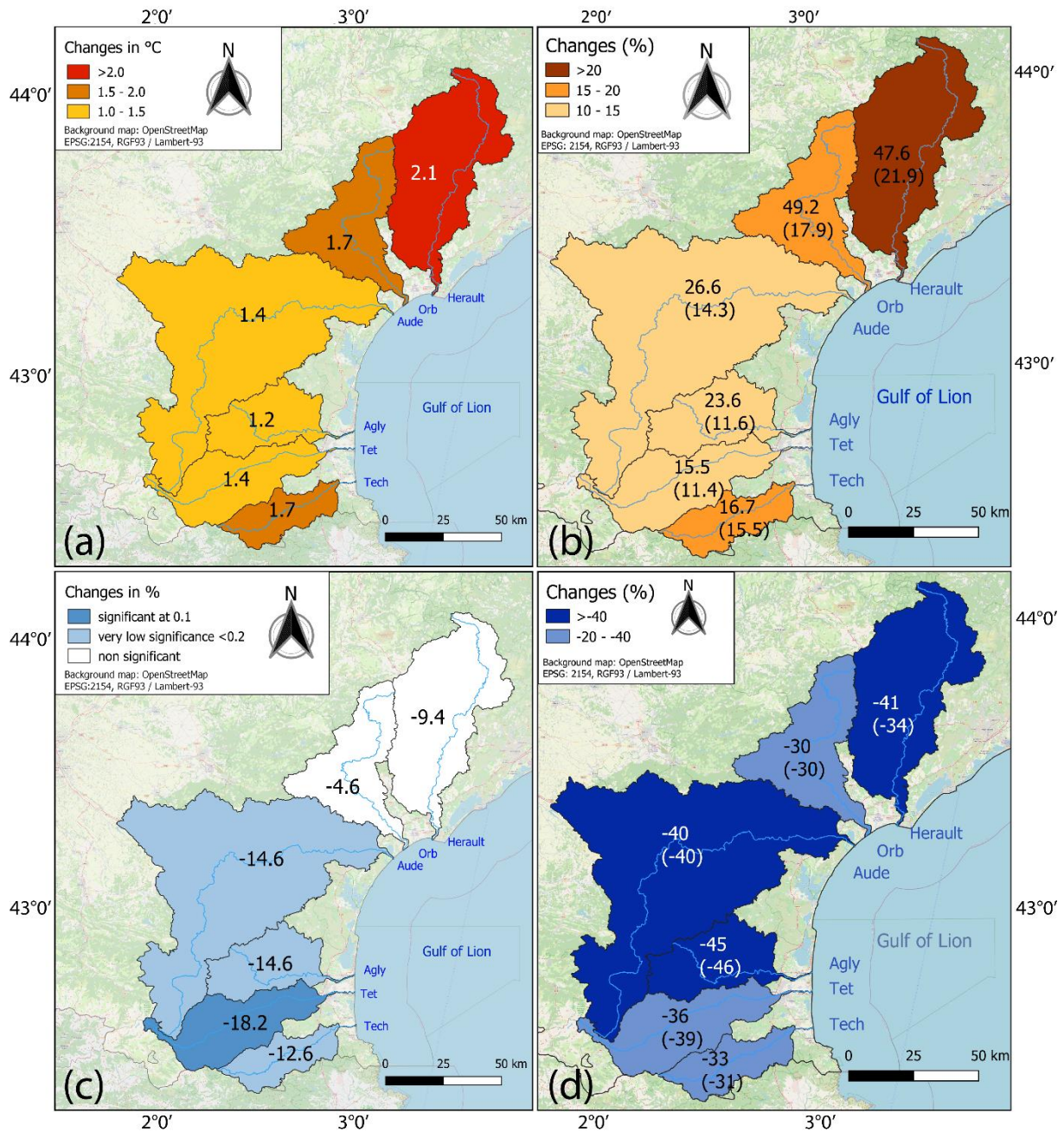


Figure II.5: Tendances linéaires annuelles sur la période 1959-2018 pour les paramètres hydro-climatiques de (a) Températures (b) Evapotranspiration potentielle. Remarque : les valeurs entre parenthèses sont celles obtenues avec les données Safran, sans parenthèses ce sont celles obtenues avec la modélisation de Folton et Lavabre (2004) (c) précipitations et (d) débits spécifiques. Remarque : les valeurs entre parenthèses sont celles obtenues avec les données Safran (somme du drainage et ruissellement), sans parenthèse, celles obtenues avec le modèle statistique multiparamètre présenté dans cette étude

### 2.2.3. Débits observés et débits modélisés

La quantification des tendances linéaires pour les débits observés est plus difficile à évaluer du fait que les séries temporelles pour chaque fleuve ne sont pas de longueur égale et donc les

conditions hydro-climatiques sont différentes d'un fleuve à l'autre aux bornes de la série, ce qui influence grandement le résultat des tests. Cependant, en termes quantitatifs, les séries de Qs sont très proches des séries Qobs pour chaque fleuve (Figure II.6). Cette variable modélisée couvre la période 1959-2018 et il est alors intéressant de pouvoir l'utiliser statistiquement afin d'avoir un aperçu de l'évolution des débits sur la même période temporelle que les séries observées. La comparaison des tests de Mann-Kendall entre Qs et Qobs est réalisée pour chaque fleuve sur leur période d'enregistrement respective (Figure II.7). Les résultats des tests montrent que Qs reproduit assez fidèlement les tests obtenus pour Qobs, bien qu'il ait tendance à sous-estimer les tendances dans les bassins de l'Hérault, le Tech et l'Orb (et fortement les deux premiers) avec -54/-31/-23 % de tendances respectivement pour chaque bassin et contre -34/-52/-30 % obtenu avec Qobs. Au contraire Qs surestime plus légèrement les tendances pour la Têt, l'Agly et l'Aude avec -43/-55/-45 % pour chaque bassin respectivement et contre -39/-46/-40 % obtenus avec Qobs.

En prolongeant les séries sur la période 1959-2018, alors comparable aux changements climatiques qui opèrent sur la même période, Qs indique que les débits auraient diminué de -30% (Orb) à -46% (Agly) au cours des derniers 60 ans (Figure II.5). Comme pour les tendances climatiques, ces résultats sont hautement significatifs ( $p < 0.05$ ).

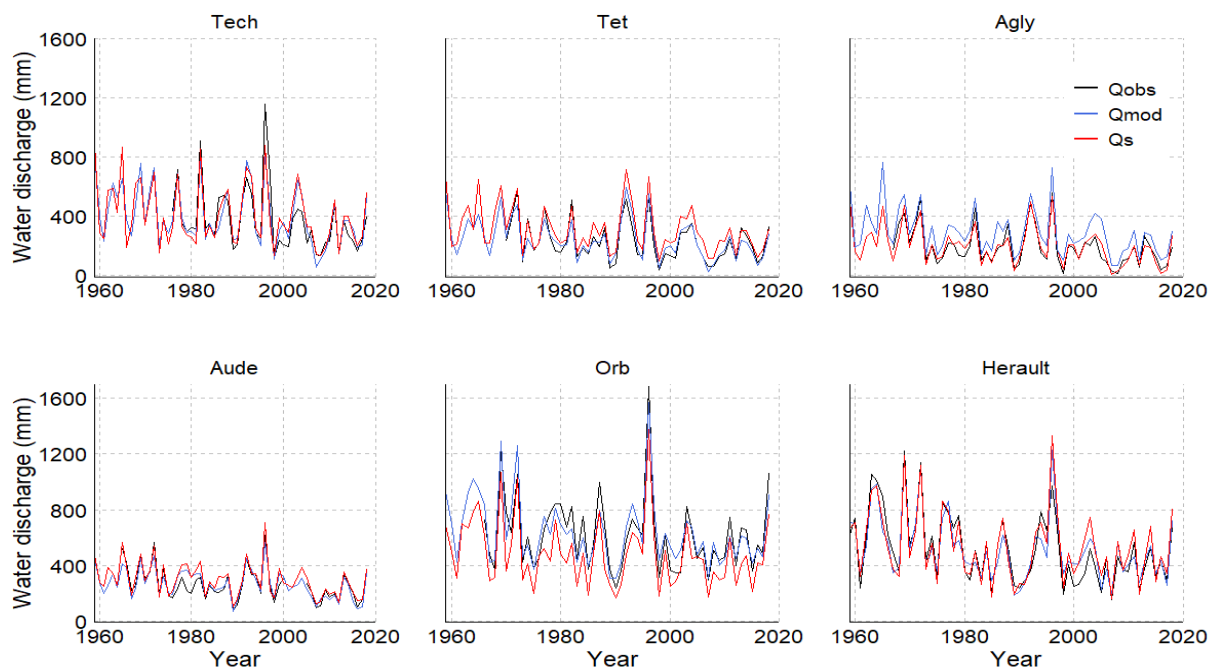


Figure II.6: Evolution annuelle des débits observés (Qobs, ligne noire), des débits modélisés selon Safran (Qs, ligne rouge) et des débits modélisés selon notre modèle (Qmod, ligne bleue)



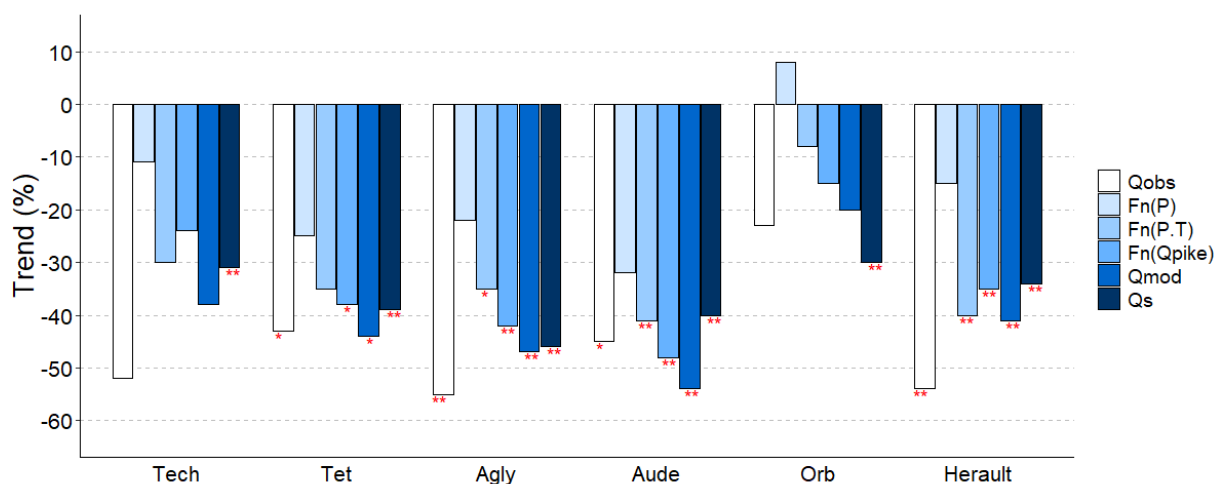


Figure II.7: Comparaison des tendances linéaires obtenues entre les débits observés ( $Q_{obs}$ ), les débits modélisés par Safran ( $Q_s$ ) et les débits modélisés à partir des variables climatiques en considérant différents modèles statistiques ( $F_n(P)$ ,  $F_n(P.T)$ ,  $F_n(Q_{pike})$ , et  $F_n(Q_{mod})$ ). Les périodes analysées sont variables et correspondent aux périodes couvertes par  $Q_{obs}$  pour chaque fleuve, soit 59 ans maximum (Hérault) et 43 minimum (Tech)

### 3.3. Tendence vers des années sèches

La Figure II.8 montre les résultats d'évolution du RDI-12, SPEI-12 et SPI-12 pour chacun des bassins versants. Au cours des dernières années, et notamment depuis le début des années 2000, on note que tous les indices penchent vers des valeurs négatives, indiquant des conditions climatiques plus sèches. On note également que pour les bassins de l'Hérault et de l'Orb, et dans une moindre mesure celui de l'Aude, les trois indices indiquent que les années 1990 se trouvaient dans des anomalies négatives. Ceci serait en accord avec les travaux de plusieurs auteurs qui montraient que des événements de sécheresse au début des années 1990s avaient particulièrement affecté l'Ouest de l'Europe et la Méditerranée (Bradford, 2000; Hanel et al., 2018; Spinoni et al., 2015). En Espagne, des restrictions d'eau importantes en milieux urbains avait dû être maintenues pendant plusieurs années consécutives à cause de ces sécheresses (Llamas, 2000). Hanel et ses collègues soulignent également que les été 2003, 2010, 2013 et 2015 étaient particulièrement chauds et secs en Europe en général et que les automnes/hiver de 2006/2007 ont été désignés comme les plus doux depuis les derniers 500 ans.

Les indices de sécheresse que l'on présente ici sont donc bien en accord avec les résultats de ces études. Un autre élément intéressant et mis en avant est le rôle de la température dans les événements de sécheresse. Le SPI-12, qui mesure les anomalies de précipitations seules sur un pas de temps de 12 mois, s'incline légèrement vers des valeurs négatives, alors que le RDI-12

et SPEI-12 qui intègrent dans leur calcul l'ETP basculent clairement en-dessous de la normale. La température serait alors un facteur déterminant dans l'occurrence des sécheresses. Pour cette raison, dans la suite de nos analyses, nous choisissons de travailler avec l'indice RDI.

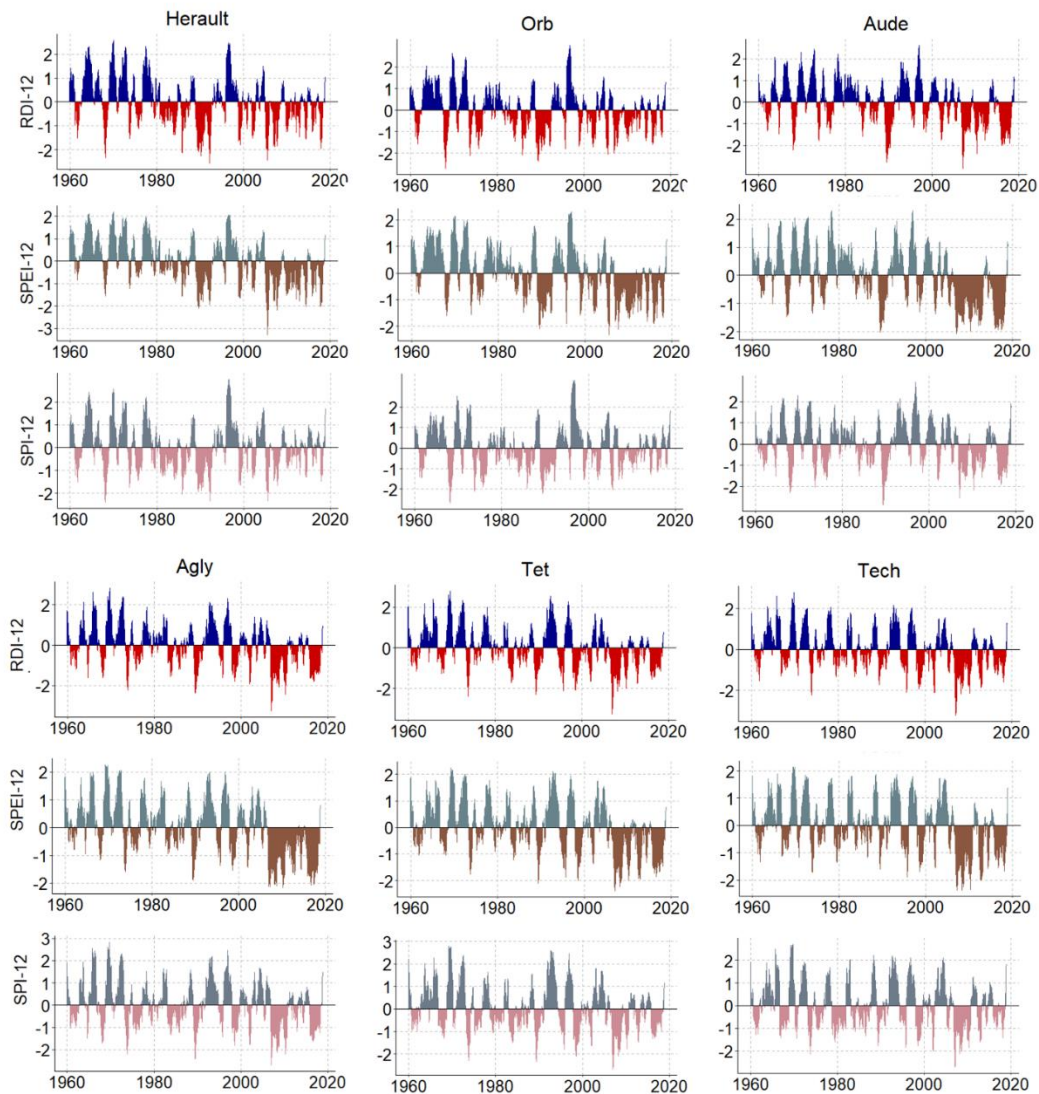


Figure II.8: Evolution des indices de sécheresses RDI-12, SPEI-12 et SPI-12 pour chaque bassin sur la période 1959-2018

### 3.4. Prélèvements en eau et occupation du sol

La Table II.5 apporte un aperçu des impacts potentiels des prélèvements en eau sur les débits des fleuves côtiers. Les prélèvements superficiels pour l'eau potable sont quasiment négligeables et clairement beaucoup moins importants que les prélèvements destinés aux usages agricoles ; les prélèvements pour l'eau potable sont néanmoins importants dans le bassin de la Têt où ils représentent 6 % de la lame d'eau écoulee en moyenne entre 2012 et 2018. Les prélèvements pour les usages agricoles sont plus importants dans les bassins du Sud que les

bassins du Nord où ils totalisent environ 55 % en moyenne de la lame d'eau écoulee des fleuves entre 2012 et 2018 contre 8 % en moyenne dans les bassins du Nord. De même, les extractions totales (tous usages confondus et tenant compte des masses d'eau superficielles et souterraines) sont bien plus importantes dans les bassins du Sud où elles représentent en moyenne 61 % de l'eau écoulee dans les bassins et qu'elles ne représentent que 24 % de cette part dans les bassins du Nord. Le bassin de la Têt se fait remarquer en ce sens que les extractions totales sont plus importantes que la totalité de l'eau écoulee à la station de Perpignan. Rappelons ici que le débit à cette station est fortement anthropisé et le débit naturel est environ 30 % plus important.

Table II.5: Part de l'eau totale écoulee par bassin versant prélevée pour les activités agricoles et l'eau potable sur la période 2012-2018

Bassin	Qobs (mm)	Agricultural withdrawal (mm)	Drinking water withdrawal (mm)	Total withdrawal (mm)
Hérault	405	23 (6 %)	0 (0 %)	23 (6 %)
Orb	597	29 (5 %)	9 (2 %)	29 (5 %)
Aude	220	29 (13 %)	2 (1 %)	29 (13 %)
Agly	133	60 (45 %)	1 (1 %)	60 (45 %)
Têt	206	186 (90 %)	11 (6 %)	224 (109 %)
Tech	261	76 (29 %)	2 (1 %)	76 (29 %)

La Figure II.9 montre les prélèvements effectués en 2018 par commune pour les eaux de surface et pour l'ensemble des masses d'eau de surface et souterraines. Les prélèvements en eau de surface représentent ainsi près de 72 % des prélèvements en eau totaux en 2018. Les prélèvements pour l'eau potable sont ceux qui utilisent davantage les eaux souterraines. Au contraire, les usages agricoles prélèvent davantage les masses d'eau superficielles.

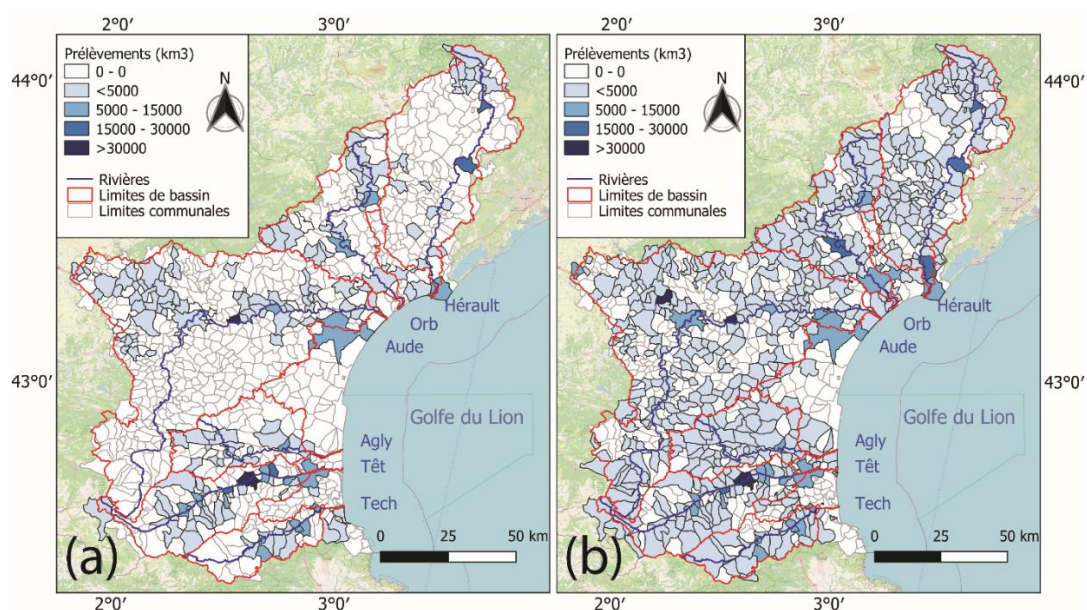


Figure II.9: Prélèvements sur l'année 2018 pour (a) les eaux superficielles et (b) les eaux superficielles et souterraines

Les données CORINE Land Cover permettent de retracer les changements d'occupation des sols majeurs qui ont lieu entre 1990 et 2018, avec 5 images disponibles pour les années 1990, 2000, 2006, 2012 et 2018. La Figure II.10 rend compte de ces changements entre tous types d'occupation (a) et au sein du secteur agricole (b).



Figure II.10: (a) Evolution des grandes classes d'occupation des sols (Agriculture, Urbain, Forêts, Espaces herbacés) d'après CORINE Land Cover entre 1990 et 2018 (b) Evolution des classes d'occupation du sol au sein de l'agriculture entre 1990 et 2018 d'après CORINE Land Cover

Ces données permettent de mettre en évidence une légère augmentation de la couverture forestière, notamment dans les bassins du Tech (+3,4%), de l'Orb (+2,0%) et de l'Hérault (+4,8%) qui s'accompagne d'une réduction des espaces en herbes dans les mêmes bassins (-3,3%, -4,1% et 5,2% respectivement). De même, les espaces urbanisés ont légèrement augmenté de +0,4% à +1,2% dans l'Agly et l'Orb respectivement. Au contraire, les surfaces occupées par l'agriculture indiquent une légère baisse pour tous les bassins mais qui n'excède pas les -2% (de -0,8% à -1,6% dans les bassins de l'Orb et du Tech respectivement). Au sein du secteur agricole, le changement le plus important revient aux vignobles qui montrent une réduction dans tous les bassins (de -2,7% à -6,8% dans l'Hérault et l'Orb respectivement) (Figure II.11). Les cultures hétérogènes sont celles qui augmentent davantage (de +1,3% à +12,2% dans l'Hérault et le Tech respectivement). Ces données CORINE montrent que les terrains occupés par l'agriculture n'ont été que légèrement impactés par les changements récents.

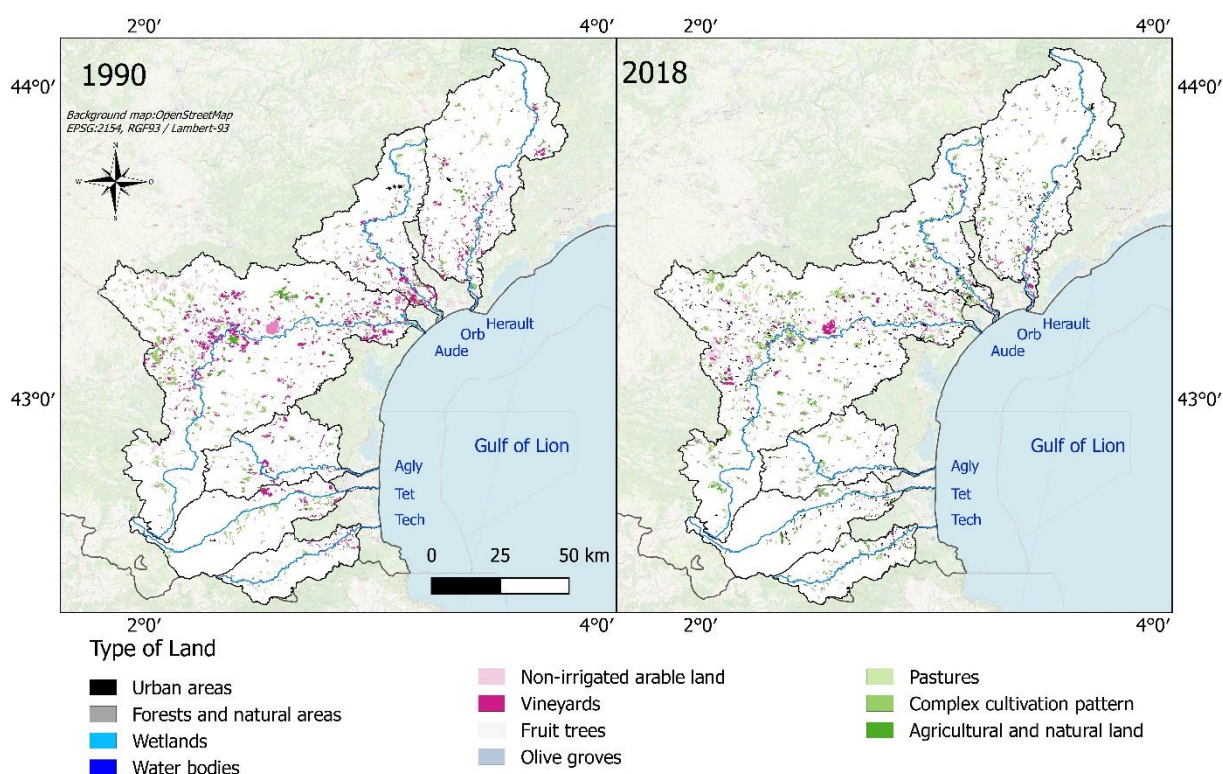


Figure II.11: Changement de l'occupation des sols entre 1990 et 2018 d'après CORINE Land Cover. Les zones en blanc sont celles qui n'ont pas changé de type d'occupation entre 1990 et 2018. Les zones colorées indiquent quel type d'occupation était présent en 1990 et en quel autre type elles sont devenues en 2018

Cette information est contrastée par les données AGRESTE issues des recensements agricoles. D'après elles, la surface agricole utilisée (SAU) a baissé de -21% entre 1970 et 2018 dans l'ex-région Languedoc-Roussillon (Figure II.12), avec une réduction plus importante de -34% dans

le département des Pyrénées-Orientales (PO), une réduction dans l’Hérault de -28%, et une réduction plus modérée dans l’Aude de -9%. C’est donc un résultat 3 à 3,5 fois plus important par rapport à ce qui est observé à partir des données CORINE. La difficulté du traitement d’image, qui est à la base de la production des données CORINE, est un élément qui pourrait expliquer les différences entre les deux sources. Par exemple, les terres agricoles abandonnées pourraient être un type de terrain assez hétérogène est donc difficile d’interprétation. Aussi, la taille des terrains minimales pour l’interprétation des images CORINE qui est de 25 ha, rend probablement difficile l’attribution d’une classe aux terrains petits et variés. Néanmoins, sur le plan qualitatif, CORINE permet bel et bien de mettre en avant la réduction des surfaces agricoles et notamment le recul des vignobles dans le paysage agricole. AGRESTE confirme que les cultures permanentes, qui sont dans nos régions en grande majorité des vignobles (ainsi que des arbres fruitiers, très présents dans le bassin de la Têt) sont en nette baisse. Ainsi, cette réduction atteint -46% dans les PO et -33% dans l’Hérault et l’Aude. Les classes agricoles qui enregistrent une hausse de leur répartition sont les surfaces en herbe (+36% et +20% dans les PO et l’Aude respectivement) et les terres arables (+42% dans l’Hérault).

En parallèle de la réduction de la SAU, l’irrigation aurait chuté de -28% entre 1970 et 2018 dans l’ex-région Languedoc-Roussillon. Entre 2000 et 2010 les surfaces irriguées ont diminué de -23% dans les PO, qui est pourtant le département concentrant les extractions d’eau superficielles les plus importantes (Table II.5). Dans l’Aude et l’Hérault cependant, les surfaces irriguées auraient augmenté entre ces deux années (de +19% et +18% respectivement), et dans l’ensemble de la région Languedoc-Roussillon (qui comporte en plus des trois départements évoqués, le département du Gard et de la Lozère) l’irrigation aurait diminué de -5,3%.

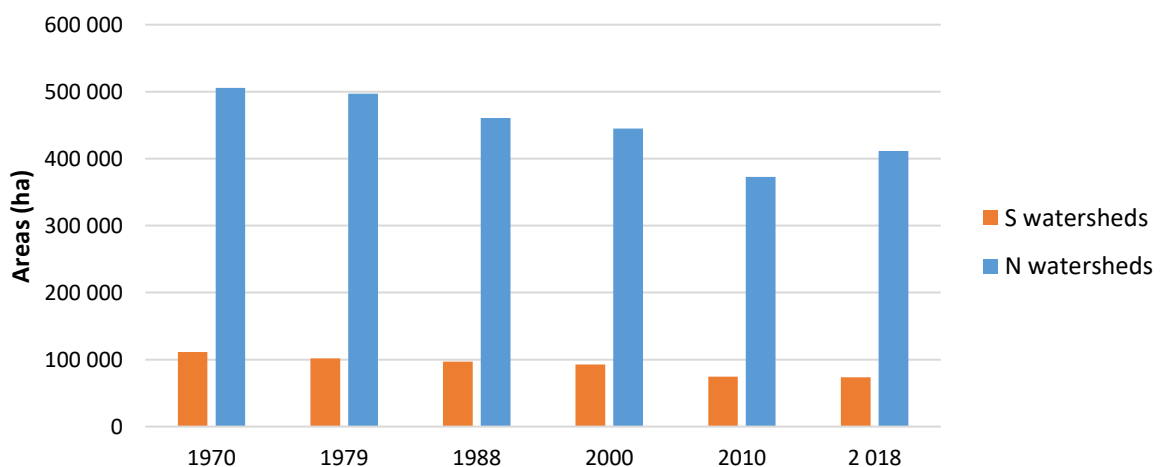


Figure II.12: Evolution de la SAU entre 1970 et 2018 dans les départements de l’Hérault et l’Aude (notés en bleus, ils contiennent les bassins versants de l’Hérault, l’Orb et l’Aude), et des Pyrénées-Orientales (notés en orange, il contient les bassins versants de l’Agly, la Têt et le Tech) . Données issues de la DRAAF Occitanie (2020)

L'évolution de l'indice NDVI est également un outil qui permet de retracer l'évolution de la couverture végétale, et donc l'usage du sol, sur un lieu donné. L'indice a déjà été utilisé dans plusieurs études qui visaient à analyser l'évolution de la couverture forestière dans les Pyrénées et sur des bassins versants situés en Espagne (Juez et al., 2020; Khorchani et al., 2020). Entre autres, l'indice a déjà été identifié comme un des facteurs conduisant à une réduction des débits des cours d'eau pyrénéens au cours des décennies récentes (López-Moreno et al., 2011). Dans nos bassins versants d'étude, le NDVI ne suit qu'une faible tendance vers des valeurs plus importantes de 1982 à 2015 (Figure II.13) ce qui recoupe les résultats de CORINE montrant une augmentation des espaces occupés par les forêts.

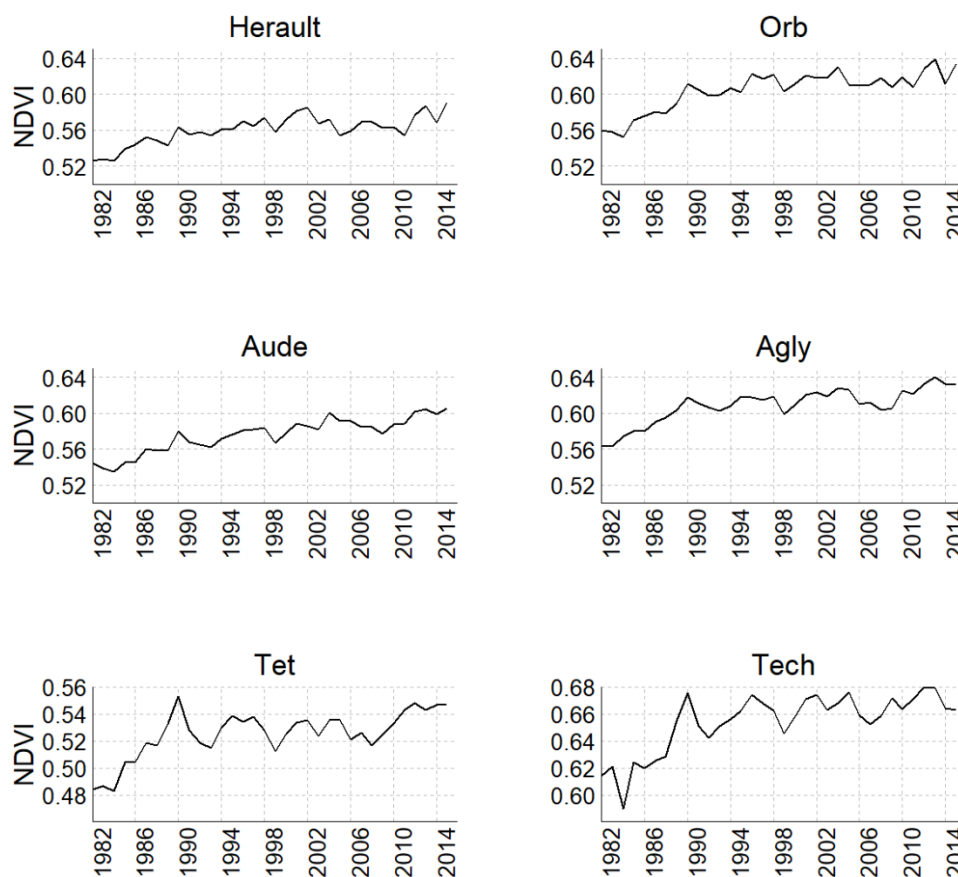


Figure II.13: Evolution annuelle des valeurs de NDVI sur la période 1982-2015 par bassin versant

### 3.5. Relation entre paramètres et modèle linéaire

Les relations entre paramètres et indices climatiques décrits dans les sections 3.1 et 4.2 sont illustrées sous forme de matrice de corrélation dont le résultat affiché pour chaque test est le  $r^2$  de Pearson (Figure II.14). Malheureusement, les données d'activités anthropiques sur l'occupation des sols et la ressource en eau présentent une résolution temporelle trop grossière pour qu'elles aient pu être représentées dans cette matrice de corrélation. Pour chaque bassin,

la matrice nous indique la force de la relation entre chaque paramètre hydrologique et climatique à échelle temporelle annuelle qui sont dans l'ordre d'apparition dans la figure : le débit spécifique observé (Qobs), la température (T), les précipitations (P), l'évapotranspiration potentielle modélisée par la température (PETt), l'évapotranspiration potentielle issue des données Safran (PET), l'indice de saisonnalité (SI), l'indice de Fournier (F.index), l'indice standardisé des précipitations (SPI), l'indice standardisé de l'évapotranspiration et des précipitations (SPEI), l'indice de reconnaissance des sécheresses (RDI), le débits spécifique selon Pike (Qpike), l'écoulement total superficiel issu de Safran (Qs).

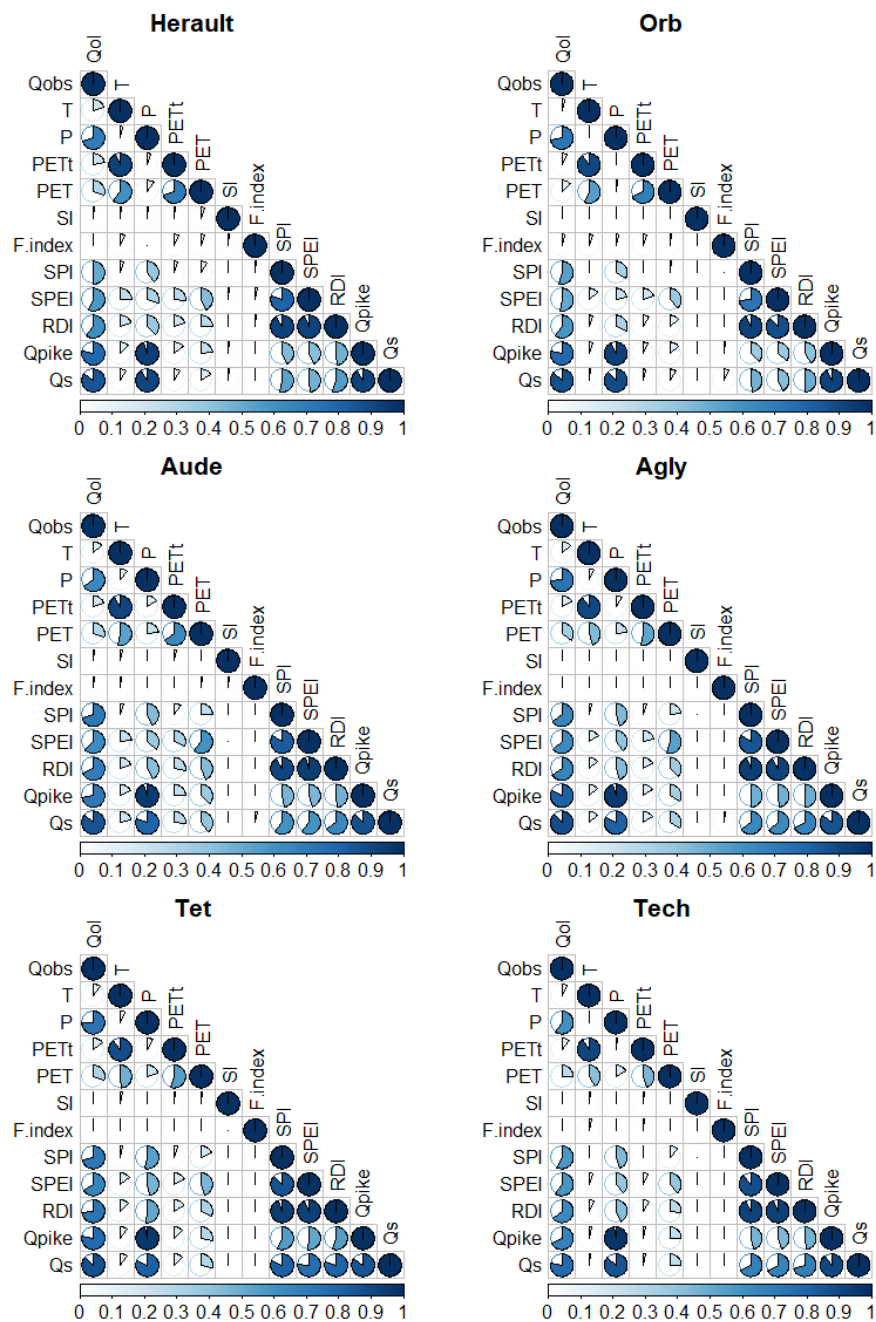


Figure II.14: Matrice des corrélations avec un test de Pearson pour les paramètres et indices hydro-climatiques de chaque bassin versant sur la période 1959-2018



En prenant l'exemple de l'Hérault (Figure II.15), on note que la meilleure corrélation avec Qobs est obtenue avec Qs où le  $r^2$  atteint 0.85. Après lui, Qpike présente également une bonne corrélation de 0.79. Qobs corrèle aussi bien avec les indices de sécheresses ; le  $r^2$  est de 0.51, 0.57 et 0.61 pour le SPI, SPEI et RDI respectivement. La relation entre Qobs et P est également haute, elle atteint 0.70, ce qui n'est pas étonnant puisque les précipitations sont en grande partie responsable des débits mesurés dans un cours d'eau. On note également que l'ETP de Safran corrèle mieux que l'ETP modélisée à partir de la température ; ceux-ci obtiennent un  $r^2$  de 0.29 et 0.21 respectivement.

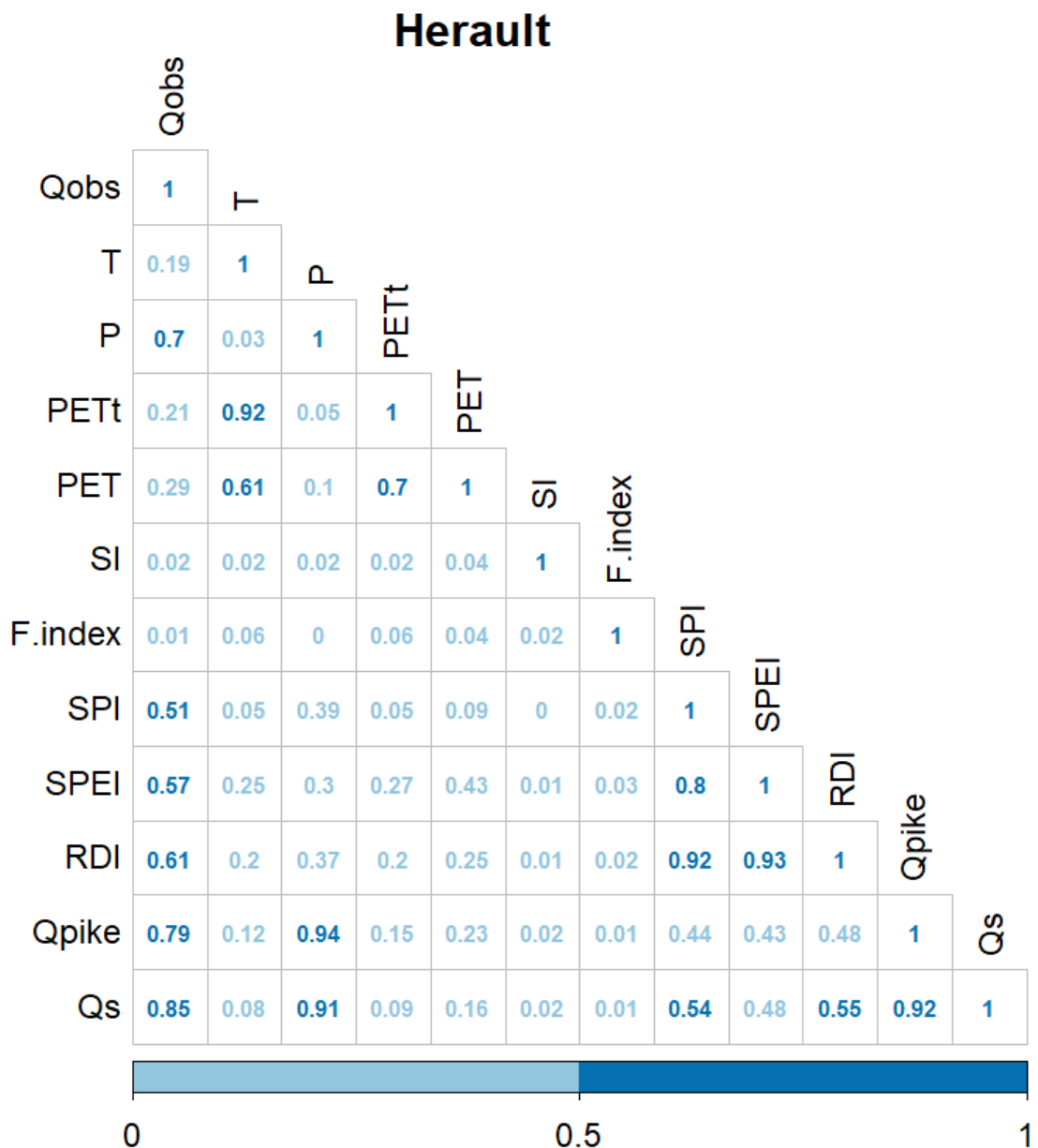


Figure II.15: Matrice des corrélations avec un test de Pearson entre les paramètres et indices climatiques pour le bassin versant de l'Hérault sur la période 1959-2018

Nous construisons un modèle empirique multi-paramètre destiné à reconstruire les séries de débits observés  $Q_{obs}$  pour chaque fleuve. La variable de débit modélisé est appelée  $Q_{mod}$ . La contribution des indices de sécheresses et de l'approche de Pike décrits au-dessus améliore de façon significative la capacité du modèle à reproduire  $Q_{obs}$ . La Figure II.16 montre que le  $r^2$  augmente à mesure que les paramètres d'entrée au modèle sont :

- i. les précipitations seules ( $F_n(P)$ ),
- ii. les précipitations combinées aux températures ( $F_n(P.T)$ ),
- iii. le paramètre  $Q_{pike}$  ( $F_n(Q_{pike})$ ),
- iv. la combinaison de  $Q_{pike}$  et du RDI ( $F_n(Q_{pike}.RDI)$ ).

Cependant, dans le cas des modèles  $F_n(P)$  et  $F_n(P.T)$ , le paramètre de température est seulement significatif ( $p \leq 0.1$ ) dans les bassins de l'Hérault, l'Orb, l'Agly et le Tech. Dans le modèle ( $F_n(Q_{pike}.RDI)$ ), les deux paramètres sont hautement significatifs ( $p < 0.01$ ) et les résultats de  $r^2$  (Table II.6) sont comparables à ceux obtenus lors de la corrélation entre  $Q_{obs}$  et  $Q_s$  ( $r^2 = 0.77, 0.88, 0.89, 0.87, 0.87, 0.85$  pour les bassins du Tech, la Têt, l'Agly, l'Aude, l'Orb et l'Hérault respectivement). La contribution du RDI avec le  $Q_{pike}$  augmente de façon importante le  $r^2$  comparé à l'emploi du  $Q_{pike}$  seul. Le modèle explique alors entre 78 % (Tech) et 88 % de la variabilité des valeurs annuelles observées de débits au cours des années disponibles (43 ans pour le Tech étant la série la plus courte, 59 pour l'Hérault étant la plus longue). En outre, ce modèle montre une bonne reproduction des tendances linéaires comparé à celles des séries  $Q_{obs}$  et des séries  $Q_s$  (Figure II.6 ; Figure II.7). L'équation du modèle s'écrit alors :

$$Q_{mod} = \gamma + \alpha.RDI + \beta.Q_{pike}$$

Où  $Q_{mod}$  est le débit modélisé obtenu annuellement,  $\gamma$  l'intercepte,  $\alpha$  et  $\beta$  deux coefficients.

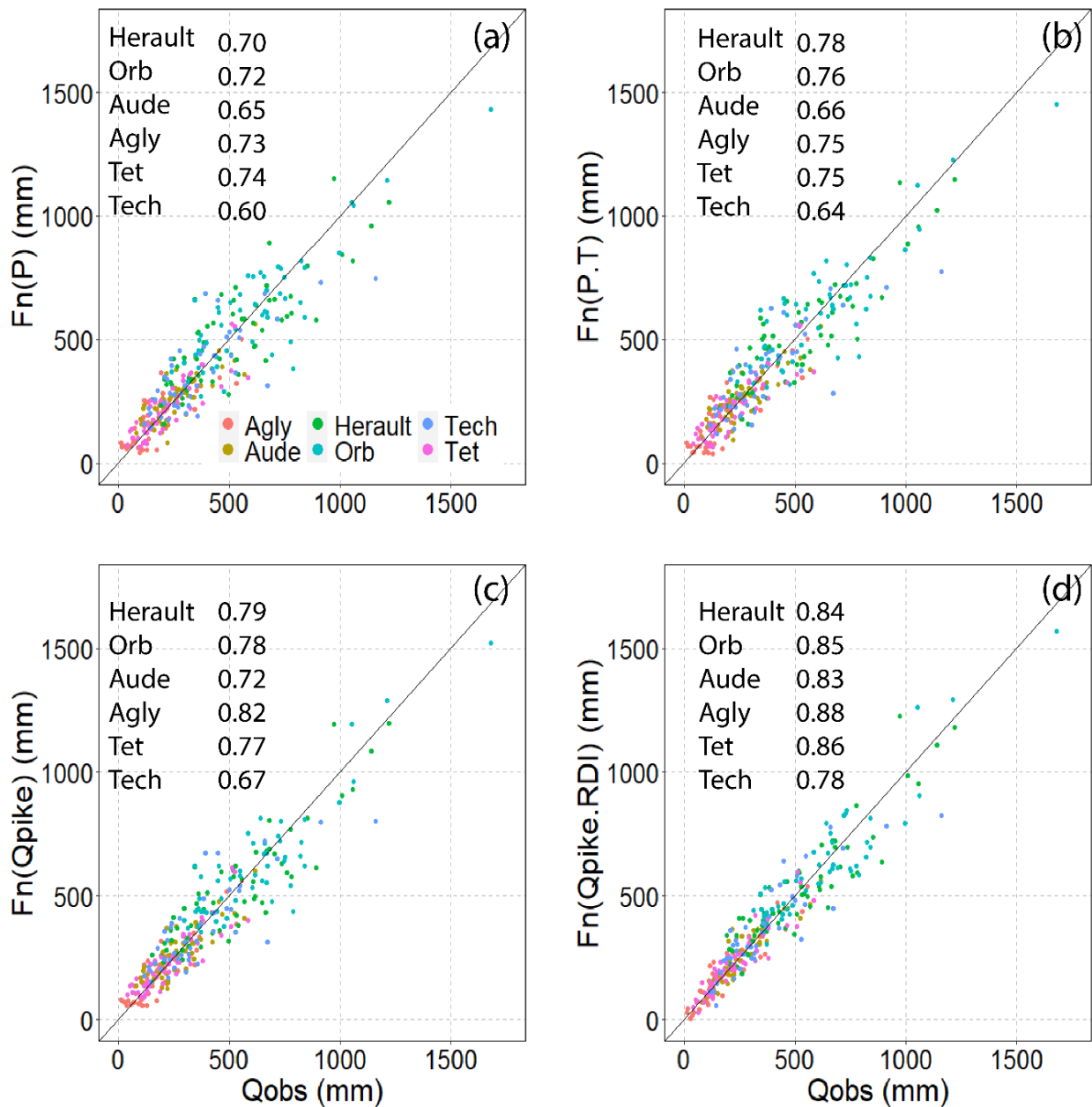


Figure II.16: Performance des modèles de régression pour la reproduction des séries hydrologiques annuelles de chaque fleuve ( $Q_{obs}$ ) (a) précipitations, (b) précipitations et températures, (c)  $Q_{pike}$ , (d)  $Q_{pike}$  et RDI

Table II.6: Détails des coefficients de chaque indice et des  $r^2$  pour la reconstitution des séries hydrologiques de chaque fleuve sur sa période d'observation

(a)

PET Safran	QPIke	RDI	intercept	$r^2$	n
<b>Herault</b>	0.7183	96.9	244	0.85	59
<b>Orb</b>	0.8531	95.5	346	0.84	53
<b>Aude</b>	0.6041	55.1	135	0.81	50
<b>Agly</b>	0.7829	50.4	51	0.88	52
<b>Tet</b>	0.6930	66.1	104	0.85	49
<b>Tech</b>	0.6847	104.0	179	0.76	43

(b)

<b>PETt</b>	<b>QPike</b>	<b>RDI</b>	<b>intercept</b>	<b>r<sup>2</sup></b>	<b>n</b>
<b>Herault</b>	0.7173	95.6	243	0.84	59
<b>Orb</b>	0.8184	109.9	356	0.85	53
<b>Aude</b>	0.5613	63.6	143	0.83	50
<b>Agly</b>	0.7723	54.0	53	0.88	52
<b>Tet</b>	0.6644	72.1	111	0.86	49
<b>Tech</b>	0.6354	121.4	198	0.78	43

### 3.6. Vérification de la validité du modèle pour le bassin de l'Hérault

Pour le bassin de l'Hérault, le test de Rainbow affiche une p-value de 0.9578 (donc  $p > 0.05$ ), ce qui signifie que les deux modèles sont bien adéquates. Un graphique représentant les résidus en fonction des valeurs de sortie du modèle permet de lire et avoir une idée de l'adéquation du modèle ; le nuage de points doit être proche de la valeur 0 des résidus. Ce graphique est montré en Figure II.17a pour l'Hérault.

(i) L'indépendance des résidus signifie qu'ils ne doivent pas être corrélés les uns aux autres. Autrement dit, la valeur d'un résidu de rang 1 ne doit pas être capable d'influencer la valeur d'un résidu situé sur un rang suivant. Le test de Durbin and Watson (1950) est le test de référence pour évaluer l'existence de dépendance ou non entre les résidus. La  $H_0$  du test de Durbin-Watson soutient que les résidus sont indépendants. Nous obtenons une p-value de 0,428, ce qui nous indique bien que les résidus du modèle pour l'Hérault sont bien indépendants. Une représentation de l'autocorrélation des résidus (Figure II.17b) est aussi capable de donner un aperçu de la relation de dépendance des résidus entre eux.

(ii) La distribution normale des résidus signifie simplement que la répartition des résidus doit se rapprocher de la loi Normale. On réalise un test de Shapiro and Wilk (1965) où la  $H_0$  désigne la normalité de la distribution. On obtient un p-value de 0,9573, ce qui signifie que les résidus suivent bien une distribution proche de la loi Normale. Un graphique appelée Quantile-Quantile (ou Q-Q plot) permet de rendre compte de l'allure de la distribution des résidus (Figure II.17c).

(iii) La constance de la variance des résidus (ou distribution homogène) est testée avec un test de Breusch and Pagan (1979) ou de Goldfeld and Quandt (1965) où la  $H_0$  indique une variance constante. Nous obtenons un p-value de 0,1621 et de 0,3856 pour l'Hérault suivant les

tests de Breusch-Pagan et de Goldfeld-Quandt respectivement ; ce qui signifie que les résidus présentent bien une variance homogène.

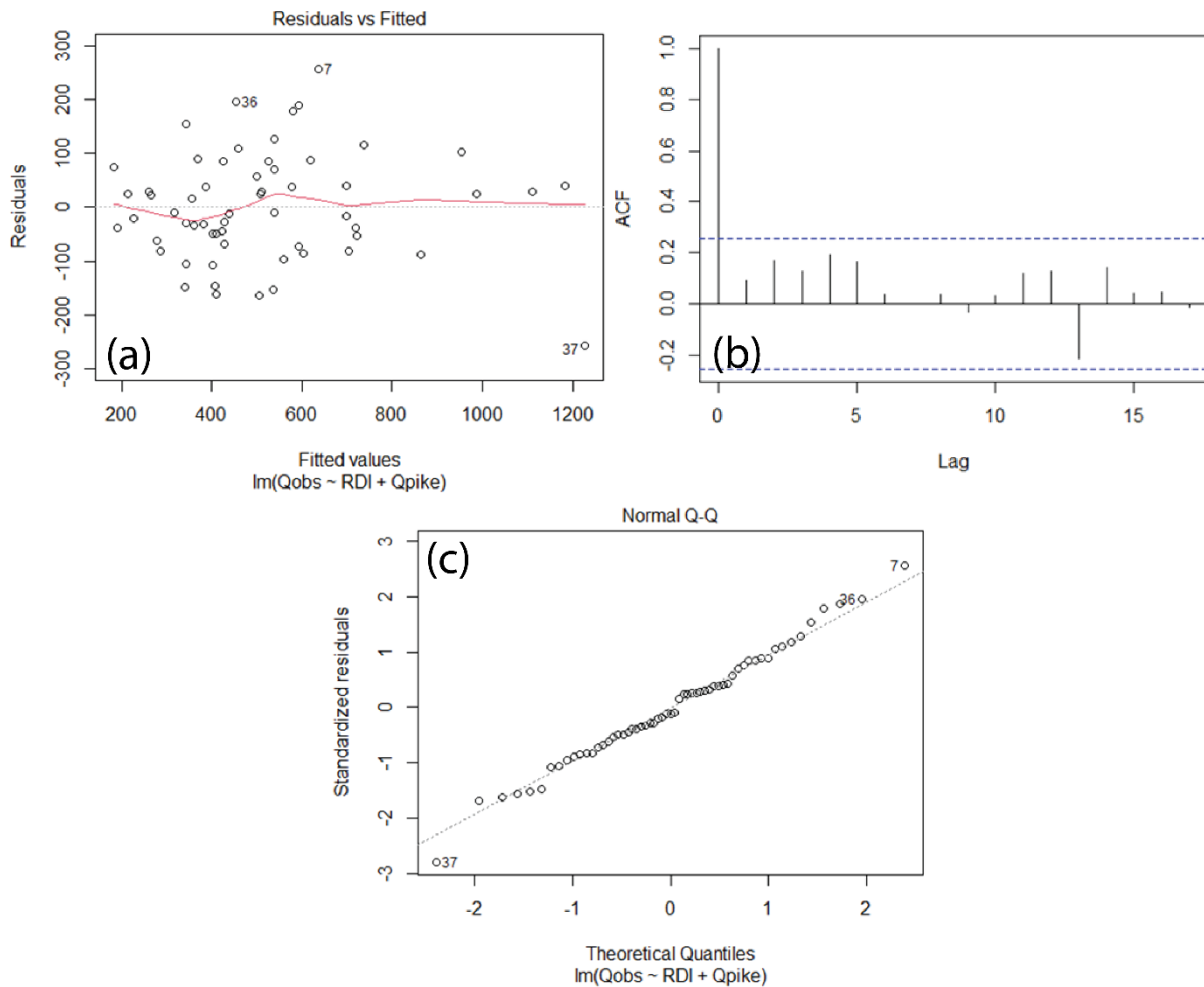


Figure II.17: Validation du modèle de régression pour le bassin de l'Hérault (a) Distribution en nuage de points des résidus (b) test d'autocorrélation des résidus (c) test de normalité des résidus

#### 4. Discussion

Au cours des derniers 60 ans, les conditions hydro-climatiques dans la région d'étude démontrent clairement une évolution vers des conditions plus sèches et plus chaudes. D'après les analyses de séries temporelles, la température moyenne annuelle a augmenté de 1,6°C en moyenne dans la zone d'étude. Les bassins qui enregistrent la hausse la plus importante sont l'Hérault, qui atteint 2,1°C, ainsi que le Tech et l'Orb à égalité à 1,7°C. C'est dans les années 1980s que ce réchauffement trouve réellement son élan (Figure II.4a), ce qui est en accord avec les travaux effectués sur le réchauffement global (Susskind et al., 2019). Les précipitations montrent des tendances moins marquées, mais qui vont à la baisse néanmoins dans tous les bassins avec une significativité allant de non-significatif ( $p > 0.1$ ) à faiblement significatif

( $p \leq 0.1$ ) dans les bassins du sud (de -13% à -18% dans le bassin du Tech et de la Têt respectivement). Les tendances les plus importantes ont été trouvées pour les séries annuelles de débits qui sont à la baisse de -30% à -45% pour l'Orb et l'Agly respectivement (Figure II.5, Figure II.7). Des tendances similaires ont cependant déjà été reportées dans d'autres bassins méditerranéens. Par exemple, Piervitali et al., (1998) observaient une réduction de -20% des précipitations sur la période 1951-1995 en Méditerranée du Centre-Ouest. Plus récemment, Valdes-Abellan et al., (2017) indiquaient une réduction de -15% dans les précipitations annuelles dans le Sud-Est espagnol au cours des derniers 30 ans. De même, la réduction des débits a été documentée sur différents sites et à différentes échelles de temps en Méditerranée. Romano et al., (2011) signalaient une diminution du débit du Tibre entre 1952 et 2008 associée à une réduction des précipitations et à une augmentation des températures. Dans la péninsule ibérique, plusieurs études ont identifié des réductions du débit des rivières pour les périodes 1950-1999, 1945-2005 et 1966-2005 (Romano et al., 2011; López-Moreno and Vicente-Serrano, 2007; Lorenzo-Lacruz et al., 2012). L'évolution que nous documentons s'inscrit donc bien dans l'image générale de la Méditerranée comme l'une des "régions critiques", notamment en ce qui concerne la diminution de la ressource en eau.

Deux grandes questions sont soulevées dans cette étude. D'une part, elle propose d'explorer les facteurs responsables des tendances observés sur les variables hydrologiques. Les changements climatiques sont-ils les responsables exclusifs de ces tendances ? Les activités anthropiques, notamment via l'occupation des sols et les prélèvements en eau, y ont-ils aussi participé ? Au premier abord, la forte diminution des ressources en eau de surface, combinée à une faible tendance négative des précipitations, peut surprendre et indiquer des facteurs supplémentaires jouant un rôle important dans ces observations tels que les prélèvements en eau pour l'agriculture. D'autre part, il est important de déterminer si les tendances détectées sont représentatives des évolutions à long terme, ou si elles sont le résultat d'autres facteurs tels que la cyclicité des phénomènes de circulation atmosphérique (Martínez-Fernández et al., 2013). Les résultats des analyses de tendances dépendent fortement du fait qu'elles commencent (finissent) dans des conditions relativement humides (sèches), et les projeter au-delà des séries chronologiques documentées doit naturellement être manipulé avec prudence.

Ces deux questions peuvent cependant être traitées avec nos données. Les prélèvements en eau sont en effet importants dans les bassins versants étudiés, en particulier dans la partie sud de la région où le bassin de la Têt possède un important réseau de canaux d'irrigation anciens (Ruf, 2001). L'utilisation des terres agricoles est cependant en déclin, et ceci est davantage prononcé

encore dans le département des PO, où les prélèvements en eau pour l'agriculture sont les plus importants en comparaison avec les autres bassins. Aussi, la diminution des zones irriguées est généralement plus forte que la diminution des zones agricoles en général, ce qui soutient l'idée d'un impact antagoniste des changements d'occupation du sol sur les ressources en eau de surface.

Le couvert forestier est un autre facteur qui pourrait entrer en jeu dans les tendances sur les débits de surface via le changement d'occupation du sol. En effet, les forêts peuvent intercepter les pluies et donc réduire le ruissellement de surface grâce à une évapotranspiration accrue (Lespinas, 2008). La couverture forestière a effectivement augmenté de manière significative dans la région étudiée (Lespinas et al., 2010), mais cela s'est surtout produit entre 1950 et 1970. L'évolution plus récente, au cours des 30 dernières années, est plutôt caractérisée par des évolutions stationnaires, à côté de quelques légères augmentations dans les bassins versants de Tech, Orb et Hérault. Cette observation renforce alors l'hypothèse que les évolutions hydrologiques seraient davantage contrôlées par les changements climatiques.

Enfin, l'argument le plus fort en faveur d'un contrôle climatique dominant sur l'évolution des ressources en eau de surface est que dans tous les bassins versants, les paramètres climatiques peuvent à eux seuls expliquer statistiquement entre 78% et 88% de la variabilité observée du débit annuel de chaque fleuve (Figure II.16). Ces paramètres sont, d'une part, l'indice hydrologique  $Q_{pike}$  et, d'autre part, l'indice de sécheresse RDI. Il a été démontré que le premier représente un estimateur réaliste du débit moyen spécifique des rivières méditerranéennes en général (Ludwig et al., 2009, 2010; Sadaoui et al., 2018), tandis que le second tient compte des conditions climatiques antérieures à l'année d'étude et peut donc représenter le conditionnement des différentes masses d'eau retenues dans chaque bassin versant, y compris et notamment les eaux souterraines. Parmi les différents indices de sécheresse que nous avons testés, et qui ont également été utilisés dans d'autres études à des fins de modélisation hydrologique (Afzal and Ragab, 2020; Schulz et al., 2020), l'indice RDI a produit les meilleures performances de modèle, bien que l'indice SPEI ait obtenu des résultats presque aussi bons. Combinés dans un simple modèle de régression multi-paramétrique ( $Q_{mod}$ ), les deux indices reproduisent avec fidélité non seulement les débits moyens des fleuves côtiers dans tous les bassins versants étudiés, mais aussi les tendances associées. Il est intéressant de noter que l'analyse de corrélation et de tendance avec les débits observés  $Q_{obs}$  donne des performances similaires à celles des débits modélisés  $Q_s$  (2.2.3), qui sont basés sur les algorithmes de modélisation des écoulements de surface totaux (somme des drainages et ruissellement superficiel) intégrés dans Safran-Isba. Par

rapport à Qobs, Qs a néanmoins tendance à surestimer le débit moyen (Figure II.3), sauf dans le bassin versant de l'Orb, car il ignore les extractions faites sur la ressource dans tous les bassins en général.

Le modèle statistique simple que nous proposons peut être facilement adapté également à d'autres bassins versants pour reconstruire l'évolution à long terme du débit moyen, ou pour produire des projections pour le futur proche en combinaison avec des scénarios climatiques basés sur des modèles. Il doit donc être considéré comme un outil d'aide à la décision pour la gestion de l'eau. Les modèles hydrologiques sophistiqués nécessitent généralement de nombreux paramètres et sont souvent sujets à de grandes incertitudes (Gudmundsson et al., 2012), ce qui réduit à la fois leur utilité et leur fiabilité pour les décideurs. Avec une variable de ETP exclusivement liée à la température, et c'est souvent avec ce type de paramètres que sont réalisées les études de modélisation hydrologique (Thompson et al., 2009; Oudin et al., 2005), le modèle statistique que nous proposons a l'avantage de n'utiliser que deux paramètres d'entrée, qui sont les précipitations mensuelles et la température mensuelle. Le modèle permet donc, par ailleurs, de quantifier de façon simple le rôle de chaque paramètre dans les tendances hydrologiques à long terme et propose ainsi de quantifier l'effet des changements climatiques sur la ressource en eau. Nous avons donc effectué des tests de sensibilité en exécutant nos modèles avec des séries chronologiques de précipitations et température modifiées pendant la période d'étude. Dans ces tests, les modifications de température et précipitations ont été appliquées uniformément à tous les mois et ne tiennent donc pas compte des éventuels changements de saisonnalité dans les séries chronologiques. Le RDI a été calculé par normalisation avec les moyennes et les écarts types des séries chronologiques non modifiées, permettant ainsi au RDI d'évoluer vers des conditions généralement plus humides ou plus sèches par rapport à la période de référence.

Ces tests indiquent que les débits moyens des fleuves côtiers réagissent de manière significative aux changements de température (Figure II.18). Selon nos résultats, les tendances de température que nous avons détectées pendant la période d'étude pourraient expliquer une diminution de -18% (Orb) à -27% (Tech) du débit annuel. Cette diminution est du même ordre qu'une diminution généralisée des précipitations de -10% (qui provoquerait une diminution de -17% (Orb) à -29% (Agly) du débit). La Figure II.18 montre également que les bassins versants de l'Orb et de l'Hérault dans le Nord sont moins sensibles aux changements de précipitations et température, alors que la réactivité est plus grande dans le bassin versant de l'Agly. En effet, l'Agly peut avoir un débit d'eau intermittent à cause de l'infiltration de l'eau vers les eaux



souterraines karstiques (Petelet-Giraud et al., 2003). Finalement, en faisant la moyenne de tous les bassins versants, et en pondérant par les volumes moyens respectifs des débits, la température seule pourrait être responsable d'une diminution des ressources en eau de surface de -23% dans la région étudiée.

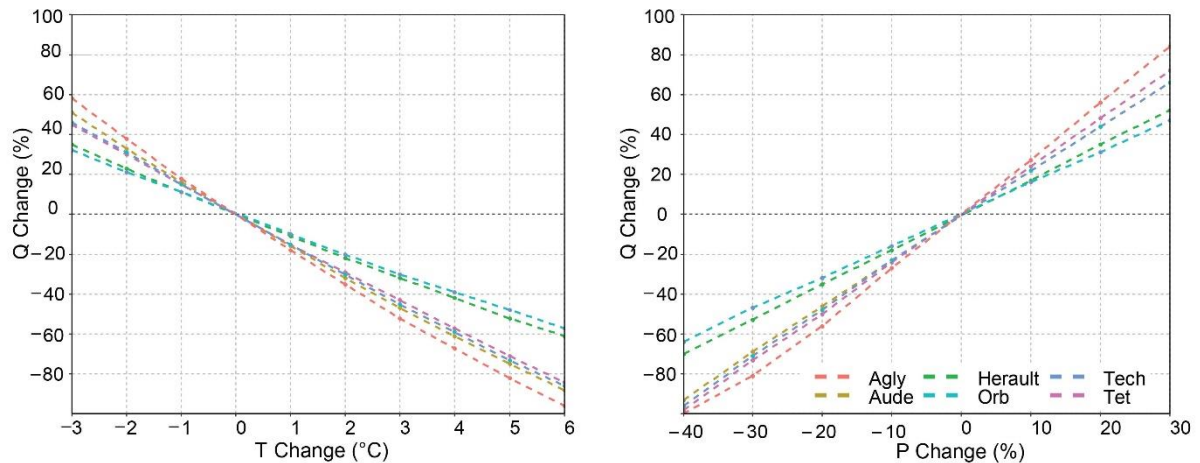


Figure II.18: Test de sensibilité des séries hydrologiques de chaque fleuve au changement de température et précipitations calculé pour la période 1959-2018

## 5. Conclusions et perspectives

L'objectif général de ce chapitre est d'analyser et quantifier l'évolution des séries hydrologiques des six fleuves côtiers de la zone sur la période 1959-2018 (60 ans) et de peser la part d'évolution qui peut être attribuée aux changements climatiques et activités anthropiques. Une analyse statistique des relations entre les indices climatiques et d'évolution des activités humaines avec l'évolution des séries hydrologiques a permis d'arriver aux conclusions principales qui suivent :

- La zone d'étude présente un réchauffement moyen annuel de 1,6°C indubitablement lié au changement climatique. Ce réchauffement est plus fortement déclenché au début des années 1980s, étant en accord avec ce qui s'est observé dans de nombreuses autres régions du monde.
- L'évolution des précipitations ne montre pas de tendances claires ; outre un réel changement climatique, la variabilité naturelle peut peut-être davantage expliquer ces changements
- Les séries hydrologiques des fleuves côtiers indiquent une réduction allant de 30 à 45% ; compte des conclusions précédentes, l'attribution de ces réductions aux seuls changements climatiques doit être effectuée avec prudence

- Néanmoins, nos résultats montrent que sur la seule base des relevés de température, il est probable que les changements climatiques récents aient effectivement réduit les ressources en eau de surface de la région de près de 25 %.
- Les variables rendant compte de l'évolution des usages de l'eau proviennent de diverses sources qui utilisent différentes méthodes pour leurs mesures et à des résolutions temporelles distinctes. Il reste alors complexe de confronter ces variables aux variables climatiques qui sont-elles enregistrées à des pas de temps réguliers et sur des échelles spatiales et temporelles beaucoup plus fines.
- Mais malgré ces difficultés, notre étude montre qu'en dépit d'un secteur agricole qui prélève des quantités très importantes d'eaux superficielles dans les bassins versant étudiés; les jeux de données utilisés montrent que ce secteur est en déclin depuis les années 1970. D'après les données des recensements agricoles, la SAU a chuté de -21% dans l'ensemble de l'ex-région Languedoc-Roussillon entre 1970 et 2018, accompagnée d'une réduction des surfaces irriguées de -28%. Ceci mène à affirmer que l'utilisation de la ressource en eau pour le secteur agricole a plutôt diminué au cours des dernières décennies en raison d'un abandon général des terres cultivées.

Il est également probable que le changement climatique futur continue à réduire les ressources en eau. En combinant un modèle hydrologique (GR2M) avec des simulations climatiques pour la fin du 21e siècle provenant d'une série de modèles climatiques régionaux, Lespinas et al (2014) ont conclu que dans le pire des cas (un réchauffement de 4,3 à 4,5 °C accompagné d'une diminution des précipitations de 10 à 16 %), le débit moyen des rivières Têt, Orb et Hérault pourrait diminuer d'environ 85 %, 83 % et 71 %, respectivement. Selon nos tests de sensibilité, les valeurs correspondantes sont de 83%, 63% et 71%. En accord avec nos résultats, les auteurs ont également conclu que l'augmentation de la température devrait avoir un impact important sur les débits des fleuves, un fait qui aurait pu être négligé dans les paramétrages des modèles hydrologiques et les études d'impact du changement climatique auparavant. Naturellement, ces scénarios de cas extrêmes doivent être considérés avec prudence, car un réchauffement et un assèchement aussi importants pourraient modifier profondément la végétation et les modes d'utilisation des sols dans ces bassins, avec d'éventuelles rétroactions sur les débits d'eau. Il devient néanmoins évident que les tendances actuelles au réchauffement pourraient rapidement entrer en conflit avec une utilisation durable de l'eau dans les bassins versants étudiés.

C'est entre autre autour de ces questions que s'articule le chapitre suivant. En reprenant la méthodologie présentée lors de ce chapitre, nous utilisons des données de modèles climatiques régionaux pour explorer l'évolution future des séries hydrologiques des six fleuves côtiers de la région.

Un article associé à ce chapitre de thèse est paru en Décembre 2020 dans le journal Water du groupe MDPI. L'article est disponible en Annexe de ce manuscrit.

## - CHAPITRE III -

# Projections des changements climatiques et hydrologiques à l'horizon 2100 et relations avec la circulation atmosphérique à grande échelle

### 1. Introduction

Les tous premiers modèles décrivant la circulation climatique globale et les interactions océan-atmosphère ont été développés à la fin des années 1960 au *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* rattaché à la NOAA, à l'université de Princeton (Manabe and Bryan, 1969; Manabe and Wetherald, 1967). Au cours des décennies, les modèles se sont complexifiés en incluant de nouvelles variables et en devenant de plus en plus précis. Le premier rapport du Groupe d'Expert Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) a été publié en 1990 suite à la prise de conscience à échelle mondiale du problème climatique. A présent en 2021, le GIEC est à la rédaction de son sixième rapport sur les changements climatiques et sociétaux. En août 2021, le rapport issu du Groupe de travail I sur les évolutions climatiques même est paru (Masson-Delmotte et al., 2021). Les contributions des autres Groupes de travail (II et III) feront suite courant 2022. La nouveauté dans ce sixième volet réside dans le type de scénarios utilisés pour évaluer l'évolution du climat dans les décennies à venir. Ces scénarios ne tiennent plus compte uniquement de la quantité des gaz à effet de serre émis dans le monde, mais aussi des trajectoires sociétales empruntées. Celles-ci comprennent les caractéristiques de développement socio-économiques ainsi que les diverses stratégies d'adaptation. C'est donc un travail de collaboration entre spécialistes du climat et des sciences de la Terre, économistes, sociologues et modélisateurs. Les nouveaux scénarios qui forcent les simulations des modèles dans le cadre du 6<sup>ème</sup> Programme d'Intercomparaison des Modèles de Climat (CMIP6) sont ainsi appelés Shared Socioeconomic Pathways (SSP). Malheureusement, cette thèse s'achève à peine trop tôt pour pouvoir exploiter les données issues de ces nouvelles simulations, celles-ci n'étant pas encore disponibles à échelle des Modèles Climatiques Régionaux (RCMs). Nous utilisons donc les données issues des simulations CMIP5 dont les scénarios ont été présentés à la sortie du 5<sup>ème</sup> rapport du GIEC (IPCC, 2014) . Ceux-ci se déclinent en 4 possibilités en fonction des valeurs de forçage radiatif d'ici 2100 qui donnent par la suite une valeur de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Le forçage radiatif à la surface de la

Terre désigne la différence entre l'énergie reçue par la Terre via les rayonnements solaires et l'énergie qu'elle réémet sous forme de rayonnement à l'extérieur de l'atmosphère. La valeur du forçage radiatif est positif ; les facteurs anthropiques principaux capables de modifier la valeur du forçage radiatif vers des valeurs positives croissantes sont (i) l'augmentation de la concentration en gaz à effet de serre de l'atmosphère, (ii) l'augmentation de la concentration en aérosols de l'atmosphère, et (iii) les cotras, trainées de condensation laissées par les avions lors de leur passage dans des zones suffisamment froides et humides (IPCC, 2007). Notons que l'occupation des sols, qui est fortement bouleversée sous l'action des activités anthropiques, possède dans certains cas la capacité inverse de diminuer la valeur du forçage radiatif en conséquence d'une réflexion plus importante des rayonnements. En revanche, la fonte des glaces associée au réchauffement laisse place à une couverture du sol qui absorbe davantage les rayonnements et possède donc l'effet inverse sur le forçage radiatif. La valeur de référence du forçage radiatif est de  $0 \text{ W.m}^{-2}$ , considérée comme étant telle en 1750. En 2011, le forçage radiatif était de  $2,3 \text{ W.m}^{-2}$ , avec une incertitude allant de  $1,1 \text{ W.m}^{-2}$  à  $3,3 \text{ W.m}^{-2}$ . Le scénario impliquant les plus grands changements climatiques est le RCP 8.5, signifiant un forçage radiatif de  $8.5 \text{ W.m}^{-2}$  en 2100 et qui correspondrait à une élévation de température globale de  $4,3^\circ\text{C}$  par rapport à la période de référence 1986-2005 (Figure III.1). La cohérence de ce scénario avec la trajectoire actuelle des émissions de gaz à effet de serre est aujourd'hui controversée ; néanmoins, il a l'avantage de représenter un scénario de « statu quo » où les dirigeants mondiaux défendraient l'utilisation des combustibles fossiles et où les émissions annuelles resteraient importantes. La Figure III.1a montre les 4 scénarios du GIEC de 2014 et leurs implications en termes de températures de l'air et de l'océan d'ici 2100.

Les changements climatiques sont capables de bouleverser la circulation atmosphérique (et océanique) globale (Gastineau, 2008; Lespinas, 2008). La circulation atmosphérique désigne le mouvement à grande échelle spatiale des masses d'air ; elle permet de redistribuer l'énergie solaire sur l'ensemble de la Terre et est due à la différence entre le réchauffement de celle-ci liée à l'énergie solaire et son refroidissement. Selon l'exposition aux rayons incidents du soleil et selon les échanges thermodynamiques qui s'effectuent entre océan et atmosphère, la pression pour une même altitude n'est pas égale en tout point du globe. Lorsqu'une région reçoit de la chaleur, l'air se réchauffe et se dilate ; il monte en altitude et s'étale en un mouvement horizontal dans des couches plus hautes de l'atmosphère. Ces régions sont donc dites de basses pressions, les géopotentiels de l'atmosphère se trouvent relativement plus hauts en altitude. Mais en montant, l'air se refroidit, se densifie et retombe en des régions dites de hautes

pressions, où l'air se concentre et les géopotentiels sont donc relativement plus bas en altitude. L'air se déplace ainsi en haute altitude des zones de basses pressions où il se charge d'humidité vers les zones de hautes pressions, créant à échelle planétaire trois grands type de cellules de convection de l'air, dupliquées chacune dans chaque hémisphère (Figure III.2). En plus des différences de réchauffement solaire perçu entre les zones intertropicales et les pôles, les masses d'air sont ainsi également mises en mouvement par les phénomènes de convection, qui donnent une composante verticale impulsant le mouvement, et la rotation de la Terre, qui donne une composante horizontale.

Le terme de « modes de variabilité » est souvent utilisé pour décrire les liens climatiques entre des régions géographiquement éloignées (généralement de plusieurs milliers de kilomètres) et leurs fluctuations à différentes échelles temporelles (journalières, saisonnières, annuelles, pluriannuelles, etc). Depuis le 20<sup>ème</sup> siècle, les modes majeurs de la circulation atmosphérique globale ont été identifiés et mesurés (Rossby, 1939; Lorenz, 1951; Wallace and Gutzler, 1981; Hsu and Lin, 1992; Livezey and Mo, 1987). Ils se caractérisent par une structure spatiale quasi fixe et leur série temporelle indique à la fois l'amplitude et la phase par rapport à une période de référence. De nombreuses études aujourd'hui identifient les variations des modes principaux de la circulation atmosphérique comme facteurs essentiels des variations climatiques, hydrologiques, et influent indirectement sur l'état des écosystèmes (De Vita et al., 2012; Yang and Villarini, 2021; López-Moreno et al., 2011a; Forchhammer et al., 2002).

Ainsi, dans ce chapitre, nous explorons les évolutions possibles des séries hydrologiques des fleuves côtiers de la région Occitanie-Est en utilisant le modèle hydrologique développé lors du chapitre précédent à l'horizon 2100 et sous un scénario RCP 8.5. Par ailleurs, les résultats présentés jusqu'à présent montraient des disparités géomorphologiques, climatiques et d'occupation des sols importantes entre bassins. Ce chapitre soulève alors également la question de l'homogénéité du changement climatique au sein de la zone d'étude : y a-t-il des bassins versants plus vulnérables que d'autres et pourquoi ? Pour répondre à ces deux questions, nous utilisons des données issues de Modèles Climatiques Globaux (GCMs) et de Modèles Climatiques Régionaux (RCMs). Les premiers concentrent les données nécessaires à l'étude de l'évolution de la circulation atmosphérique et ses indices d'oscillations principaux affectant le climat local. Les seconds fournissent les données nécessaires à l'étude des évolutions climatiques, et donc hydrologiques. Les liens existants entre climatologie des bassins versants et circulation atmosphérique sont analysés dans un premier sur la base des séries historiques observées. Par la suite leur évolution à l'horizon 2100 est étudiée.

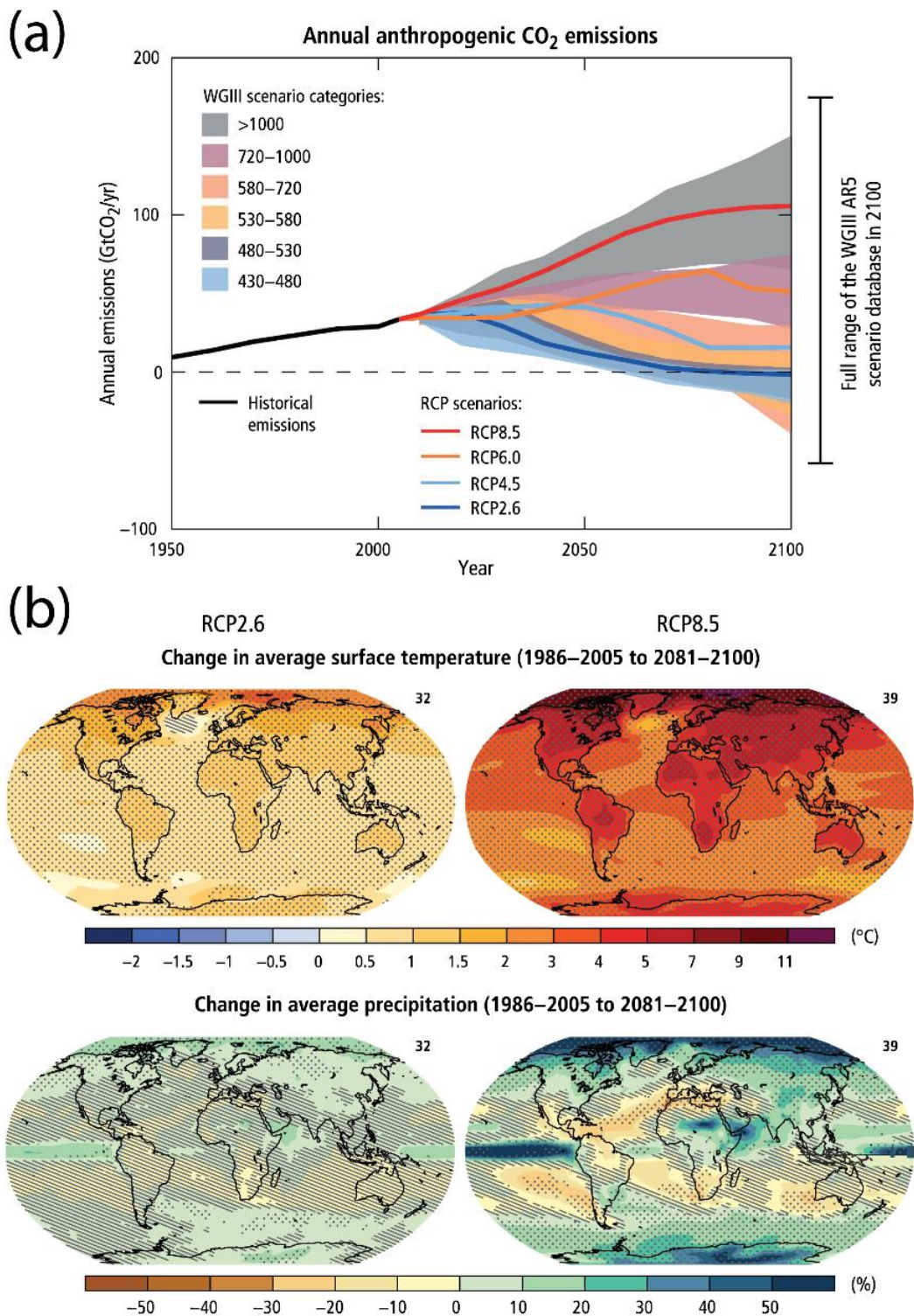


Figure III.1 : Présentation des scénarios RCP du GIEC en 2014 (a) Equivalent en émissions annuelles d'ici 2100 selon les scénarios (b) Evolution de la température (haut) et des précipitations (bas) annuelles mondiales d'ici 2100 et par rapport à la période 1986-2005

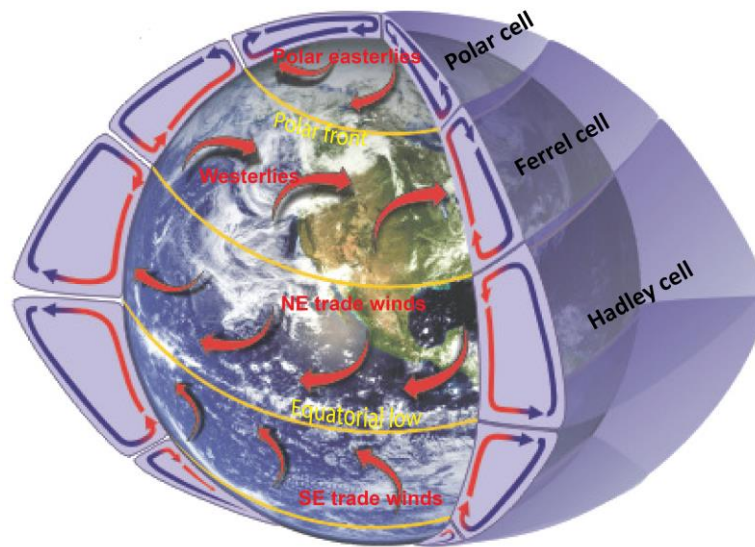


Figure III.2 : Cellules de convection de l'air dans les hémisphères Nord et Sud et principaux mouvements des masses d'air atmosphériques à échelle globale. Source : (National Weather Service - Global Circulations)

## 1. Matériels et Méthodes

### Indices de la circulation atmosphérique

#### 1.1.1. Choix des indices

Le climat du bassin Méditerranéen est placé sous l'influence des circulations atmosphériques à échelle synoptique des latitudes moyennes et tropicales (Salameh, 2008; Trigo et al., 2006). Cette circulation repose sur des successions de zones de dépressions et anticyclones (basses et hautes pressions respectivement) dont la pression au niveau de la mer (appelée Sea Level Pressure en anglais –SLP-) ou au niveau des hauteurs de géopotentiels dans l'atmosphère est mesurable. A grande échelle spatiale (plusieurs centaines de kilomètres) et temporelle (du pas de temps journalier à pluriannuel), des motifs de position des pôles de basses pressions et hautes pressions se répètent et sont déterminants dans la circulation des vents et des perturbations au-dessus de la vaste région qu'ils surplombent et les régions qu'ils avoisinent. Ces pôles de hautes ou basses pressions s'étalent sur de grandes étendues et sont appelés « centres d'action ». Un indice de la circulation atmosphérique représente ces mouvements associés au jeu entre deux centres d'action, l'un de haute pression, l'autre de basse pression.

Le fonctionnement des indices contrôlant le climat au-dessus de l'Atlantique et en Europe est déterminant pour le fonctionnement climatique méditerranéen. C'est pourquoi nous avons choisi de travailler avec deux indices majeurs de la circulation se jouant au-dessus de



l'Atlantique et de l'Europe dont l'influence sur le climat méditerranéen est indéniable : il s'agit de la North Atlantic Oscillation (NAO) et de la circulation Scandinavian (Scand) (Jourdié, 2015; Moore et al., 2013; Vicente-Serrano et al., 2011; Lionello and Sanna, 2005). Deux autres indices résultant des circulations atmosphériques surplombant le bassin méditerranéen et influençant son climat ont également été sélectionnés : il s'agit de la Mediterranean Oscillation (MO) et de la Western Mediterranean Oscillation (WeMO) (Mathbout et al., 2020; Martin-Vide et al., 2008; Lopez-Bustins et al., 2008; Martin-Vide and Lopez-Bustins, 2006).

### 2.1.1. Indices atlantiques

NAO: l'Oscillation Nord Atlantique (NAO) est un des modes principaux de la circulation atmosphérique qui a été parmi les premiers identifiés (Walker, 1924). Elle représente une redistribution des masses d'airs entre un pôle de hautes pressions au niveau de la mer situé dans l'atlantique subtropical (couloir allant des Açores au Portugal) et un pôle de basses pressions situées dans l'atlantique subpolaire (région entre le Groenland et l'Islande) (Figure III.3). Dans sa phase positive, les différences de pressions entre les deux pôles se creusent, dirigeant l'air humide et doux de l'Atlantique vers les régions d'Europe du Nord et, donnant au Sud de l'Europe et la Méditerranée un climat plutôt sec et frais. Le jeu inverse s'observe lors des phases négatives de la NAO. Plusieurs études ont déjà fait état du liens entre la NAO et les conditions climatiques en Méditerranée Occidentale (López-Moreno et al., 2011; Vicente-Serrano et al., 2009; Lopez-Bustins et al., 2008; Lespinas, 2008; Trigo et al., 2002). La NAO est entre autres anti-corrélée avec les précipitations en hiver.

Scand : L'oscillation Scandinave (Scand) (le mode Eurasiatique de type 1 dans Barnston and Livezey, 1987) se compose d'un centre d'action de haute pression qui s'étend sur la Scandinavie et l'océan Arctique et d'un second centre, plus faible, de basse pression qui s'étend sur le sud de l'Europe, la Méditerranée et la Sibérie occidentale (Figure III.3). La Scand a elle aussi été identifiée comme l'un des modes jouant sur le climat en Méditerranée Occidentale (Toreti et al., 2010; Xoplaki, 2002; Lespinas, 2008). Sa phase positive est généralement associée à des précipitations supérieures à la normale dans le centre et le sud de l'Europe, et des précipitations inférieures à la normale en Scandinavie.



Figure III.3 : Représentation schématique des modes atlantiques de la circulation atmosphérique ONA (gauche) et Scand (droite). D'après (Neves et al., 2019)

### 3.1.1. Indices méditerranéens

MO : L'Oscillation Méditerranéenne (MO) se joue entre la Méditerranée Occidentale et Orientale (Figure III.4). Conte et al., (1989) la définit comme la différence d'altitude du géopotential 500 hPa à Alger et au Caire. Plusieurs versions aux pôles hautes/basses pressions émergent plus tard tenant compte de la pression au niveau de la mer : (Palutikof, 2003) considère la différence entre Gibraltar et l'aéroport de Lod en Israël, et (Papadopoulos et al., 2012) prend plus généralement les différences de pression au niveau de la mer entre le Sud de France et le bassin Levantin.

WeMO : Plus récemment, l'Oscillation Méditerranéenne Occidentale (WeMO) est proposée par (Martin-Vide and Lopez-Bustins, 2006b). Elle est définie comme la différence de pressions au niveau de la mer entre un pôle de basses pressions situé à Padoue (Italie) et un pôle de hautes pressions situé à San Fernando (Espagne) (Figure III.4).

Les données mensuelles historiques de la NAO et de la Scand ont été prises sur le site du Service météorologique national Américain (NOAA) (NOAA, 2021). La MO et WeMO sont disponibles aussi au pas de temps mensuel sur le site de l'Unité de Recherche sur le Climat de l'Université East Anglia (MOI data, 2021). Les caractéristiques de leurs pôles sont présentées en Figure III.4 **Error! Reference source not found.**

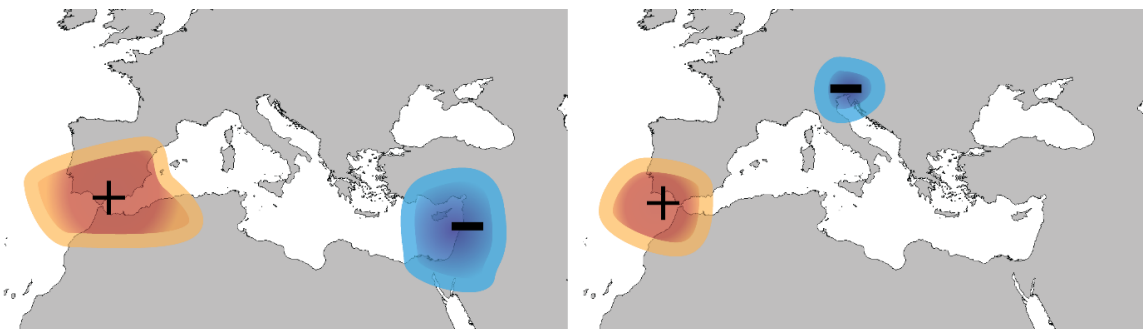


Figure III.4 Représentation schématique des modes méditerranéens de la circulation atmosphérique MO (gauche) et WeMO (droite)

## 1.2. Calcul des indices de téléconnexion

Pour le calcul des indices modélisés par les MCGs, nous avons suivi la méthodologie proposée par Compo et al., (2011) et présentée au laboratoire des Sciences Physiques de la NOAA (NOAA Physical Sciences Laboratory, 2021). Cette méthodologie propose la NAO définie comme la différence entre les séries mensuelles standardisées de pressions atmosphériques au niveau de la mer entre Lisbonne (étant le pôle positif de la NAO) et Reykjavik (pôle négatif de la NAO). Pour chaque indice, nous avons ainsi défini la localisation de chaque pôle positif et négatif, et avons réaliser la moyenne des pixels entourant l’exact localisation. La localisation des pôles de chaque indice est indiquée en Table III.1.

Nous avons sélectionné 4 MCGs produits par différents instituts de recherche en Europe et dont les données au as de temps journalier sont disponible sur le site de du programme d’observation de la Terre de l’Union Européenne, appelé Copernicus (Copernicus, 2021). Pour chacun d’eux les modèles de couplage de la contribution de l’Atmosphère, l’Océan, les masses continentales, le couvert de glace, etc sont différents. La résolution spatiale est de 125 à 208 km. Leurs caractéristiques sont présentées en section 1.7.1 dans la Table III.3.

Pour la reconstitution des indices de téléconnexion, nous avons réalisé une analyse en boîte-à-moustaches accompagnée d’un test de Tukey de différence honnêtement significative (TukeyHSD) (Tukey, 1949). Le test de Tukey permet de faire une comparaison de toutes les moyennes en paires en une seule étape en se basant sur une distribution de Student (similaire à la distribution associée au test-t). Il compare les moyennes de chaque entité, les unes entre les autres et identifie toute différence entre deux moyennes qui serait supérieure à l’erreur-standard attendue. Le test de TuckeyHSD s’écrit ainsi :

$$T_k = \frac{Y_a - Y_b}{Sd}$$

Avec  $Y_a$  la moyenne la plus grande étant comparée,  $Y_b$  la moyenne la plus petite étant comparée, et Sd l’erreur standard de la somme des moyennes.

Table III.1: Localisation des pôles choisis pour le calcul de chaque indice. HP et LP signifient respectivement Hautes Pressions et Basses Pressions

TP	HP location	LP location
NAO	Lisbon (38.7°N9°W)	Reykjavik (64°N 22°W)
Scand	Kautokeino (69°N23°E)	Porto (41.2°N8.6°W)
MO	Gibraltar (36.1°N5.3°W)	Tel Aviv (32.1°N34.8°E)
WeMO	San Fernando (36.5°N6.3°W)	Padua (45.4°N11.9°E)

### 1.3. Partitionnement en K-moyennes du RDI03

#### 1.3.1. Fonctionnement

Le partitionnement en K-moyennes (Lloyd, 1982; Cam and Neyman, 1967) est une méthode de classification non-supervisée qui consiste à analyser un jeu de données en fonction de ses caractéristiques statistiques afin de regrouper les observations similaires en différentes zones (ou groupes). Le centre d'une zone est appelé « centroid ». Le but de l'algorithme en K-moyennes est d'identifier chaque centroid et d'assigner chaque observation à l'un d'eux, en essayant de garder le plus petit nombre possible de centroid. Comme décrit dans (Jin and Han, 2010), le partitionnement en K-moyennes suit une série d'étapes:

- (i) On indique le nombre de centroids attendus,
- (ii) L'algorithme relocalise chaque point au centroid le plus proche
- (iii) L'algorithme met à jour le partitionnement en calculant la moyenne des observations appartenant à chaque zone
- (iv) La répétition du processus de relocalisation et de mise à jour est faite pour  $n$  nombres d'itérations jusqu'à ce que l'attribution de chaque observation à une zone soit satisfaite

#### 2.3.1. Choix du nombre de zones

Pour le nombre de zones que nous devons fixer avant de lancer l'algorithme, nous avons 2 possibilités qui sont soit un découpage en 2 zones, soit un découpage en 3 zones. Par le découpage en 2 zones, nous attendions à ce que les bassins de l'Orb et l'Hérault forment un groupe, et les bassins de l'Aude, l'Agly, la Têt et le Tech, un autre. En effet, le fonctionnement climatologique et hydrologique de ces deux bassins a montré des différences sur la période historique par rapport aux autres (Labrousse et al., 2020 et II.1.2.3).

Par exemple, les moyennes annuelles de cumul de précipitations totales (c'est-à-dire neigeuses et liquides) sur la période 1959-2018 indiquent 1103 et 1030 mm pour l'Hérault et l'Orb respectivement, contre 839, 816 et 822 mm pour l'Aude, l'Agly et la Têt (Table III.2). Le Tech enregistre également des valeurs proches de celles de l'Hérault et l'Orb avec 1018 mm. Un autre aspect d'importance est la part de précipitations neigeuses. Elle est la plus importante dans le bassin de la Têt où elles occupent 20% des précipitations totales. C'est la hauteur des massifs Pyrénéens et l'espace important qu'ils occupent dans ce bassin qui expliquent ce résultat. Et

c'est dans les bassins de l'Hérault et de l'Orb que les précipitations neigeuses sont le moins importantes ; elles représentent seulement 2% des précipitations totales. En termes de débits spécifiques, l'Hérault et l'Orb présentent un débit annuel plus conséquent de 523 et 634 mm respectivement sur la période 1959-2018 contre 268, 209, 265 et 417 mm respectivement pour l'Aude, l'Agly, la Têt et le Tech.

Mais l'élément majeur qui nous permet de distinguer, a priori, deux zones distinctes est l'ensemble des résultats de tendances linéaires pour chaque bassin et chaque paramètre hydro-climatique présentés en chapitre II de cette thèse. Ceux-ci témoignent d'une réponse aux changements climatiques et hydrologiques différentes qui sont susceptibles de se prolonger au cours du 21<sup>ème</sup> siècle. Les tendances de températures indiquent un réchauffement plus important dans les bassins de l'Hérault et l'Orb avec +2.1 et +1.7°C respectivement contre +1.4°C en moyenne sur l'Aude, l'Agly et la Têt. En revanche le Tech montre une augmentation plutôt proche de celle de l'Hérault et l'Orb avec +1.7°C (Table III.2). Celles des précipitations au contraire montre des tendances dans les bassins de l'Aude, l'Agly et la Têt (de -15% pour l'Agly et l'Aude à -18% pour la Têt et qui est cependant le seul à être significatif à  $p < 0.1$ ) alors qu'aucune tendance significative n'est détectée dans l'Hérault ou l'Orb (et dont la réduction n'est que de -5 à -10 % respectivement). Là encore le Tech se situe sur un entre-deux avec une réduction de -13%. Pour l'hydrologie en revanche et les tendances associées à l'évolution annuelle des débits de chaque fleuve, les résultats sont plus homogènes. Néanmoins, l'Orb et le Tech montrent tous les deux des réductions (-30 et -33 % respectivement) moins importantes que dans les autres bassins.

Table III.2: Hydro-climatologie et tendances linéaires annuelles pour chaque bassin versant sur la période 1959-2018. Ptot désigne le cumul total des précipitations (solides et liquides), Ps désigne les précipitations solides uniquement, Q désigne les débits spécifiques calculés à partir du modèle hydrologique développé dans le chapitre II. \*les caractères en gras (soulignés) indiquent une significativité à  $p < 0.05$  ( $p < 0.1$ ). Les caractères standards sont non significatifs

Bassin	Mean hydro-climatology					Linear trends*		
	T (°C)	Ptot (mm)	Ps (mm)	% Ps	Q (mm)	T (°C)	Ptot (%)	Q (%)
Herault	12.6	1103	26	2	523	<b>2.1</b>	-9.4	<b>-41</b>
Orb	12.6	1030	25	2	634	<b>1.7</b>	-4.6	<b>-30</b>
Aude	12.2	839	60	7	268	<b>1.4</b>	-14.6	<b>-40</b>
Agly	12.6	816	44	5	209	<b>1.2</b>	-14.6	<b>-45</b>
Tet	11.2	822	164	20	265	<b>1.4</b>	<u>-18.2</u>	<b>-36</b>
Tech	10.7	1018	90	9	417	<b>1.7</b>	-12.6	<b>-33</b>

#### 1.4. Calcul du RDI03 et application des K-moyennes

A partir des données spatialisées de Safran, nous calculons sur la base de chaque pixel la variable RDI-03 à échelle mensuelle (Figure III.5). Le RDI-03 se calcul de la même façon que le RDI-12 à la différence que l'état de sécheresse est considéré sur un pas de temps trimestriel au lieu d'annuel. La standardisation est faite sur la période 1959-2018. L'intérêt de ce pas de temps trimestriel est de pouvoir connaître l'état de sécheresse à chaque saison par rapport à son état de référence. Nous appliquons la méthode des K-moyennes à la série mensuelles de RDI-03 sur la période 1959-2018 (ce qui donne 720 couches raster) en choisissant de fixer le nombre de zones à 2 et 3.

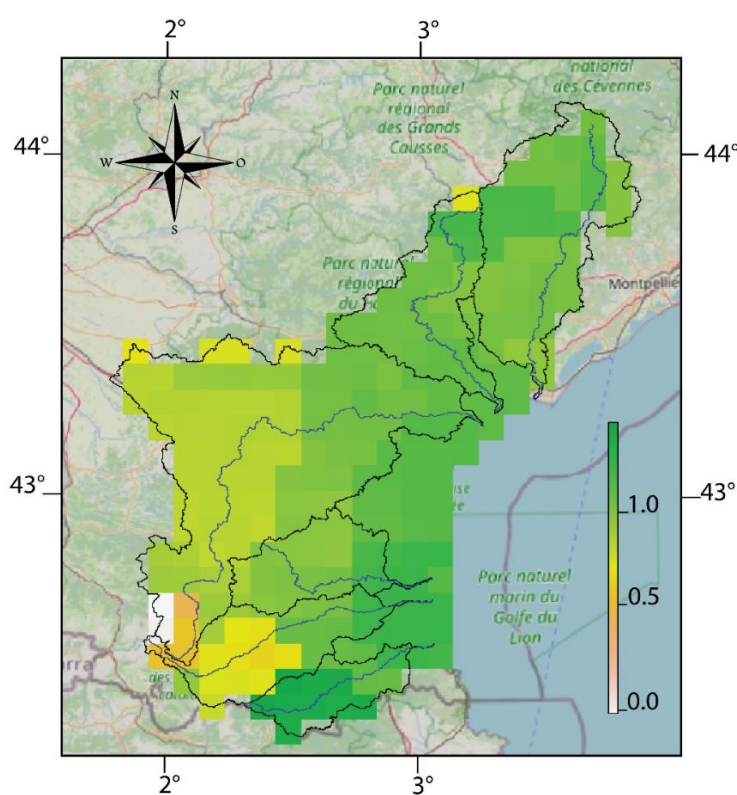


Figure III.5 : Valeur du RDI-03 pour le mois de décembre 2018 calculé sur la base des données spatialisées Safran

#### 1.5. Définition du nouveau zonage climatique et hydrologique

Les résultats du partitionnement présentés en section 2 donnent lieu à une nouvelle définition des zones climatiques et hydrologiques considérées au sein de la zone d'étude. Les zones héritent de la même résolution spatiale que Safran-Isba, de 8 km, indépendante des limites géomorphologiques des bassins versants. Cependant, les séries hydrologiques de chaque fleuve n'étant pas spatialisées, elles nous obligent à continuer d'utiliser les limites des bassins versants comme échelle spatiale. En fonction des limites de chaque zone, on attribue alors chaque bassin

versant à une zone. La climatologie pour une zone est calculée comme étant la température/précipitations moyennes des bassins versants désignés comme appartenant à cette zone. L'hydrologie pour une zone est calculée comme étant la somme des débits de chaque fleuve dont le bassin versant est désigné comme appartenant à cette zone. Cela donne lieu à une incertitude qui est liée au fait que les zones ne suivent pas forcément les limites exactes des bassins versants. Ce sera le cas pour la partie aval des bassins de l'Aude, l'Agly et la Têt (voir section 3.1). Nous précisons en section 2 l'appartenance des bassins versants aux zones définies.

## **1.6. Analyses en ondelettes et ondelettes-croisées entre la circulation atmosphérique et les paramètres hydro-climatiques**

La transformée en ondelette est un type de transformée mathématique qui représente un signal selon des versions translatées et dilatées d'une onde finie (représentant une variable dans notre cas). Comparée à une transformée de Fourier qui transforme une série temporelle de son domaine temporel à son domaine fréquentiel et dans sa globalité, la transformée en ondelette intègre les caractéristiques temporelles et fréquentielles d'une série temporelle et s'intéresse à ses spécificités « locales ». En d'autres termes, elle décompose un signal en une série d'ondelettes localisées à la fois dans l'espace et dans le temps. Ce type de méthode fournit une approche efficace pour l'analyse de variables non-stationnaires comme les séries temporelles hydrologiques et atmosphériques (Conte et al., 2021; Sang, 2013; Massei et al., 2011; Kang and Lin, 2007; Massei et al., 2007). La transformée en ondelette était utilisée pour la première fois en sismologie par Morlet (1983) ; elle est calculés en appariant une série temporelle  $s_t$  avec une fonction d'ondelette d'analyse  $\psi_{a,b}$ , elle-même dérivée d'une fonction mère  $\psi$ , par dilatation de  $a$  et translation de  $b$ . L'élément  $a$  est un facteur d'échelle qui détermine une fréquence de sorte que la variation de  $a$  donne lieu à un spectre.  $b$  est la translation dans le temps de sorte que la variable  $b$  représente la "fenêtre de glissement" de l'ondelette sur la série  $s_t$ . Lorsque deux transformées en ondelettes sont analysées ensembles, une transformée en ondelettes-croisées (XWT) est construite. Celle-ci expose la force de la puissance commune entre les deux spectres en ondelettes ainsi que la phase relative appelée cohérence des deux spectres en ondelettes dans l'espace temps-fréquence. La cohérence des XWT est l'élément dans ce type d'analyse qui nous intéresse ; ses valeurs se rangent de 0 à 1 et elle mesure à la fois la corrélation et le degré de phasage entre deux séries temporelles en fonction de leur espace temps-fréquence. Elle peut donc être considéré comme un coefficient de corrélation entre les deux séries temporelles.

## 1.7. Projections des conditions climatiques à 2100

### 1.7.1. Choix des modèles climatiques régionaux

Nous avons sélectionné un total de 6 RCMs pour notre étude et utilisé les données issues des scénarios climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5. Les données sont disponibles au pas de temps journalier, sur l'ensemble de la France et à une résolution de 8 km sur le site Drias (DRIAS, 2021), hébergé par le Ministère de la Transition Ecologique. Les détails sur les RCMs utilisés ainsi que le type de variables qu'ils rendent accessible sont présentés dans la Table III.3. Tous les RCMs sont construits avec une période historique simulée qui est généralement 1950-2005, sauf pour le RCA4 qui est 1970-2005. Ces modèles sont issus des simulations Euro-CORDEX de 2014 (Jacob et al., 2014). Le programme Euro-CORDEX a été initié en 2009 et représente la branche européenne du projet mondial nommé CORDEX qui a pour but de coordonner les productions de projections climatiques par des équipes de recherches internationales et pour toutes les régions continentales du globe. CORDEX est soutenu par le Programme Mondial de Recherche sur le Climat ; en outre l'un de ces objectifs clé et de fournir une interface facile d'accès et pour tous les utilisateurs de projections climatiques visant à utiliser les simulations futures pour des études d'impact ou d'adaptation aux changements climatiques (Giorgi et al., 2009).

Table III.3: (a) Informations sur les RCMs utilisés et les GCMs qui les forcent. (b) Type de variable et unité rendus disponible au pas de temps journalier : tableau repris sur le site DRIAS

(a)

RCMs	Resolution	Institute	GCMs	Institute	Horizontal resolution	Forcing models (Atmosphere, Ocean, Sea ice, Land)
WRF381P	0.11°x0.11° (12 km)	IPSL (France)	IPSL-CM5A-MR	IPSL (France)	1.25°x1.25° (~138 km)	LMDZ4, ORCA2, LIM2, ORCHIDEE
CCLM4-8-17	0.11°x0.11° (12 km)	CLMcom	MPI-ESM-LR	Max Planck (Germany)	1.87°x1.87° (~208 km)	ECHAM6, MPIOM, JSBACH
ALADIN63	0.11°x0.11°	CNRM (France)				ARPEGE-climat, NEMO, GELATO, SURFEX
RACMO22E	0.11°x0.11° (12 km)	KNMI (Netherlands)	CNRM-CM5	CNRM and CERFACS (France)	1.4°x1.4° (~150 km)	(+TRIP river routing and coupler OASIS 3)
RCA4	0.11°x0.11° (12 km)	SMHI (Sweden)	EC-EARTH	ICHEC (Ireland)	1.12°x1.12° (~125 km)	IFS, NEMO, LIM2, Htessel
REMO2009	0.11°x0.11° (12 km)	CSC (Germany)	MPI-ESM-LR	Max Planck (Germany)	1.87°x1.87° (~208 km)	ECHAM6, MPIOM, JSBACH



(b)

Variable code	Variable name	Unit
huss	Specific humidity near the surface	kg/kg
prsn	Snow precipitations	mm/day
prtot	Total precipitations	kg/m2/sec
rids	Incident infrared radiation	W/m2
rsds	Incident visible radiation on the surface	W/m2
sfcWind	Horizontal wind speed near the surface	m/sec
tas	Temperature near the surface	K
tasmax	Maximum temperature near the surface	K
tasmin	Minimum temperature near the surface	K

### 2.7.1. Méthodes de correction des données et validation de la période historique

Les simulations Euro-CORDEX ont été projetées sur une grille de résolution spatiale 8 km (la même grille utilisée par Safran) ; elles sont étendues à échelle de la France et ont été corrigées de leurs biais par la méthode ADAMONT (Verfaillie et al., 2017) à partir de l'analyse des observations de Safran.

Afin de valider l'utilisation des données des RCMs, nous avons réalisé une comparaison statistique de celles-ci avec les données Safran sur la période historique commune aux deux jeux de données qui est 1959-2005 (Figure III.6). En termes de moyennes annuelles, les RCMs reproduisent très bien les valeurs observées du fait du type de correction appliquée. En revanche, des différences assez marquées sont détectées dans la reproduction des tendances linéaires. Les températures sont généralement sous-estimées par les RCMs et ceci est d'autant plus prononcé pour les bassins de l'Hérault et de l'Orb où les tendances Safran indiquent respectivement +1.6 et +1.4°C contre +0.6 (RACMO22E et WRF381P) à +0.9/+0.8°C (ALADIN63 pour l'Hérault/l'Orb respectivement). RACMO22E et WRF381P donnent la plus faible augmentation avec seulement +0,6°C dans chaque bassin sauf pour la Têt où l'augmentation est de +0,7°C et +0,5°C avec le RCM RCA4. CCLM4-8-17 donne une meilleure approximation des tendances pour la plupart des bassins sauf pour le Tech et l'Agly où il donne +1,2/1,1°C respectivement alors que les valeurs réelles donnent +1,1/0,7°C. Les tendances de précipitations sont pour tous les RCMs en diminution dans tous les bassins, sauf pour le RCA4 qui donne des valeurs en augmentation. Les données Safran montrent des tendances générales à la baisse mais non significatives sauf pour les bassins de l'Aude et de l'Agly où elles restent stationnaires. ALADIN63 surestime largement les tendances pour les bassins du Tech, de la Têt et de l'Agly, donnant respectivement -33/-27/-23 mm, alors que Safran observe -4/-10/1 mm pour chacun d'eux.

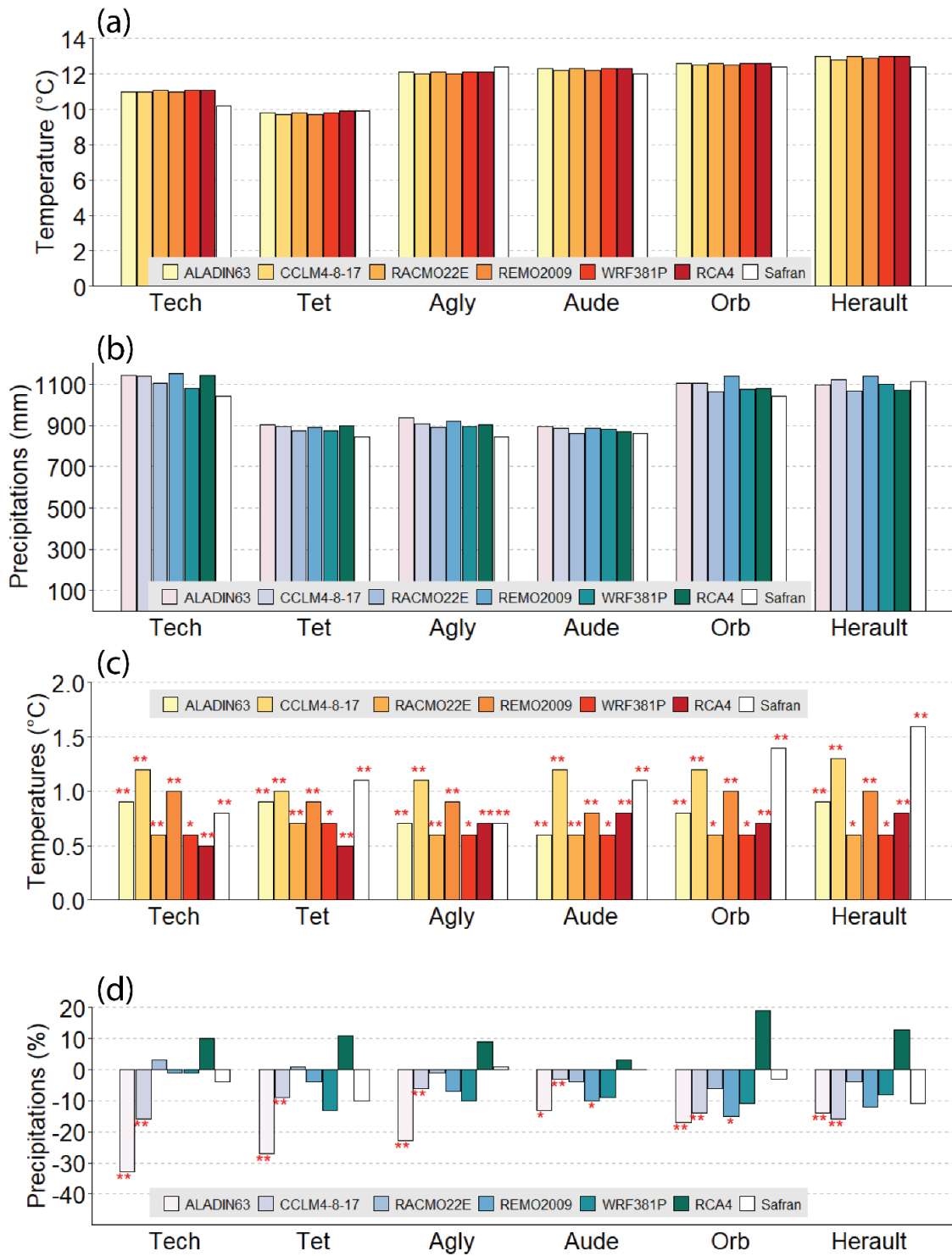


Figure III.6 : Comparaison des précipitations et températures entre Safran et les RCMs sur la période 1959-2005 (a) et (b) Moyennes annuelles (c) et (d) tendances linéaires obtenues avec un test de Mann-Kendall

## 2. Résultats

### 2.1. Partitionnement en K-moyennes

Le partitionnement en K-moyennes a été réalisé à partir de la fonction `raster.kmeans()` utilisée sous R. En donnant à l'algorithme de partitionnement en K-moyennes un nombre de centroids  $k=2$ , la zone d'étude est divisée en une région occidentale (ou Ouest) qui incorpore la moitié amont des bassins de l'Aude, de l'Agly et de la Têt, et une région orientale (ou Est) qui borde le Golfe du Lion et comprend les bassins de l'Hérault, de l'Orb et du Tech (Figure III.7 et Figure III.8). La même méthode de partitionnement en K-moyennes a été appliquée aux variables climatiques de températures et précipitations, qui ont toutes deux montré une tendance à diviser les zones montagneuses des zones de plaines. Ceci traduit le fait que les zones plus élevées en altitude abritent plus de précipitations et des températures moyennes plus basses que les plaines qui bordent la Méditerranée. En augmentant le nombre de centroids à  $k=3$ , l'algorithme regroupe le bassin de l'Hérault et de l'Orb, l'Aude et l'Agly, et la Têt et le Tech (Figure III.8). Ceci s'explique par le fait que :

- (i) L'Hérault et l'Orb sont particulièrement orientés vers la Méditerranée et les massifs des Cévennes servent de barrière physique aux masses d'air en provenance de la mer. Dans le chapitre précédent, ces deux bassins montraient d'ailleurs un réchauffement plus important que les autres et la saisonnalité des précipitations y est plus marquée (Lespinas, 2008).
- (ii) L'Aude et la partie amont de l'Agly ont une ouverture vers l'Atlantique, aussi expliqué par l'orientation de leurs vallées respectives
- (iii) Enfin, la majeure partie des bassins de la Têt et du Tech sont occupées par les milieux de montagne des Pyrénées.

L'objectif par la suite étant de s'intéresser aux relations entre climatologie des bassins et circulation atmosphérique générale au-dessus de l'Atlantique et de la Méditerranée, nous choisissons de travailler à partir de la zonation en 2 zones. La raison est que celle-ci permet une distinction en fonction de processus climatiques généraux en faisant abstraction des effets locaux qu'engendrent certaines caractéristiques géomorphologiques propres à chaque bassin (Pyrénées principalement mais aussi sens de l'orientation des bassins vers la Méditerranée). Les deux nouvelles zones considérées (occidentale et orientale) sont aussi géographiquement

plus étendues et cela est plus pertinent pour proposer des relations avec les grands indices de la circulation atmosphérique.

Par la suite, les caractéristiques climatiques et hydrologiques pour les deux clusters sont établies en fonction des limites des bassins versants appartenant à chaque cluster. Ainsi, la climatologie du cluster occidental est faite des températures et précipitations moyennes des bassins versants de l'Aude, l'Agly et la Têt, et l'hydrologie de ce même cluster est la somme des débits des trois mêmes fleuves. La climatologie du cluster oriental est faite des températures et précipitations moyennes des bassins versants de l'Hérault, l'Orb et le Tech, et l'hydrologie de ce même cluster est la somme des débits des trois mêmes fleuves.

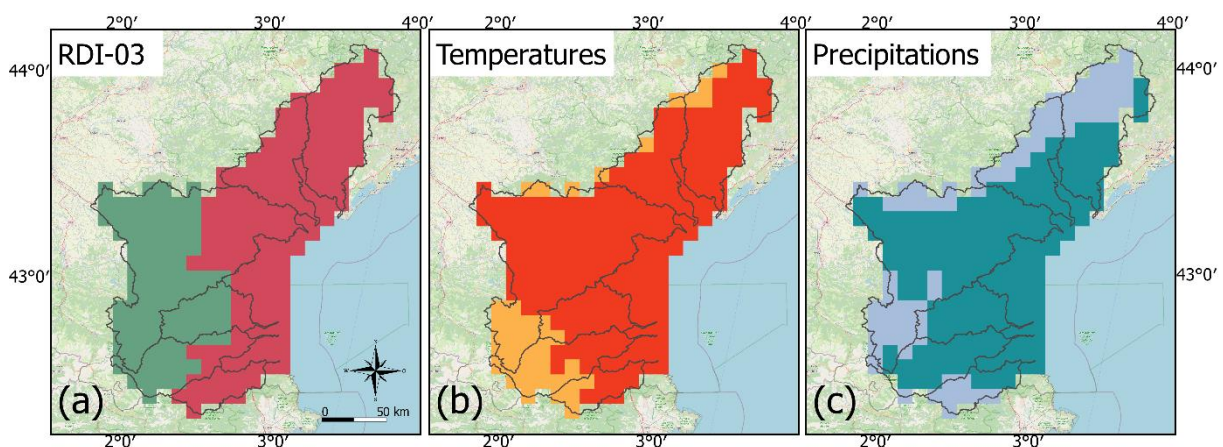


Figure III.7 : Résultat du partitionnement en K-moyennes pour 2 centroids sur les variables mensuelles et sur la période 1959-2018 de (a) RDI-03 (b) températures et (c) précipitations

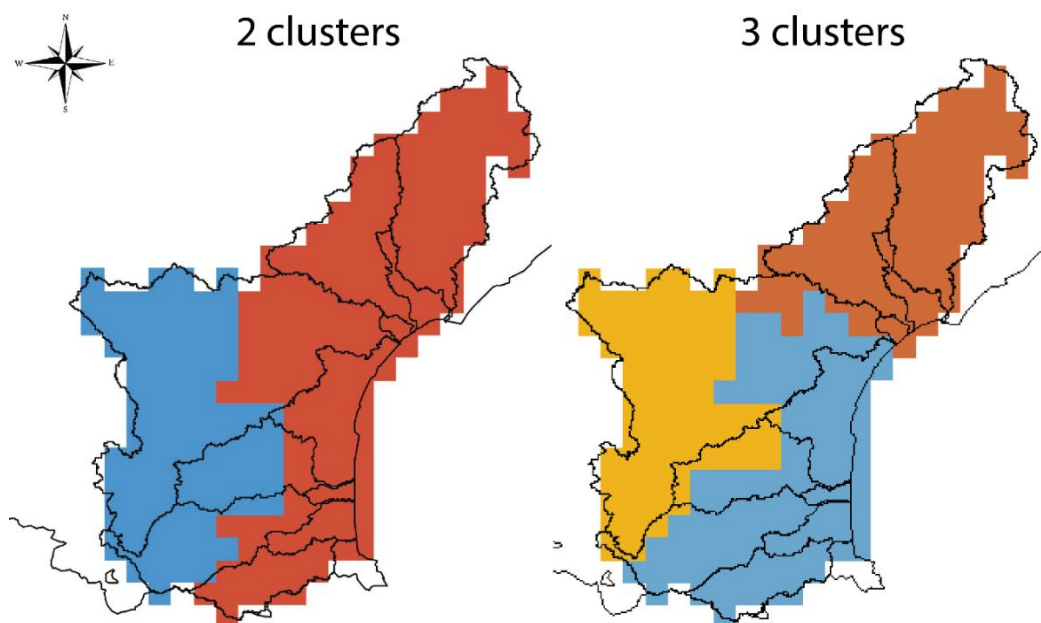


Figure III.8: Résultat du partitionnement en K-moyennes pour la variables de RDI-03 sur la période 1959-2018. Résultat pour 2 zones (gauche) et pour 3 zones (droite)

## 2.2. Transformées en ondelettes et ondelettes-croisées

Les transformées en ondelettes univariées donnent un aperçu des périodicités significatives des séries temporelles individuelles. La Figure III.9 montre les spectres des coefficients d'ondelette résultants pour chaque indice de téléconnexion, et les variables hydro-climatiques pour chaque zone. Les maxima locaux des spectres des coefficients sont donnés en Table III.4 et Table III.5. L'homogénéité des spectres est un argument supplémentaire pour s'assurer que les séries temporelles soient propres et ne cachent aucun point de rupture. Pour les deux clusters, le RDI-03 montre un cycle annuel avec une puissance moyenne de 15.21 et 16.87 pour la zone orientale et occidentale respectivement. Les débits dans la zone occidentale indiquent des périodicités plus longues que dans la zone orientale. Bien que les deux montrent un cycle annuel typique, des périodicités de 4,3 et 14 ans sont montrées pour les débits de la zone occidentale alors que celles de 3,0, 8,4, et 9,3 ans pour les débits de la zone orientale. La puissance moyenne des périodicités est légèrement plus élevée pour les débits occidentaux, atteignant 1,06 pour un cycle de 4 ans contre 0,68 pour un cycle de 3 ans pour les débits orientaux. Les indices atlantiques de la NAO et de la Scand montrent un cycle semestriel ainsi qu'un cycle décennal allant de 11 à 16 ans et de 8 à 10 ans respectivement et avec un maximum local de 13,6 et 8,7 ans, respectivement. En revanche, les indices méditerranéens de MO et WeMO montrent un fort cycle annuel, et seule la WeMO indique également un cycle à long terme de 10 à 20 ans, le maximum local étant de 18 ans.

Les résultats des analyses en ondelettes croisées entre les indices de téléconnexion et RDI-03 et les séries hydrologiques pour chaque cluster sont présentés dans la Figure III.10. La période des maxima locaux et la cohérence moyenne sont indiquées dans la Table III.5. Les séries hydrologiques du cluster occidental montrent généralement des cycles plus longs de cohérence d'ondelettes croisées avec les indices de téléconnexion que dans le cluster oriental. Ceci est encore plus prononcé avec les indices de l'Atlantique ; les séries hydrologiques du cluster occidental montrent par exemple des cycles de 6, 10,6 et 73,5 mois avec la NAO contre un seul cycle de 6 ans pour les séries hydrologiques du cluster oriental avec la NAO. Il en va de même pour l'indice Scand, où des cycles de 6,5, 13, 21, 4 et 108 mois sont détectés pour les séries hydrologiques du cluster occidental, alors que seuls des cycles de 8,6, 13 et 21 mois apparaissent pour les séries hydrologiques orientales. Les indices de téléconnexion méditerranéens de MO et WeMO et leur cohérence avec l'écoulement de l'eau sont plus complexes. La MO a en général des cycles plus longs avec l'écoulement de l'eau de l'Ouest

qu'avec l'écoulement de l'eau de l'Est, avec des cycles d'une demi-année, d'une année et de presque 6,5 ans pour la première, et d'une demi-année et de 1, 1,5 et 3 ans pour la seconde. WeMO montre généralement un cycle semestriel ainsi qu'un cycle annuel avec le débit d'eau des deux zones.

Les différences de puissance de cohérence entre les zones de RDI03 avec TP's ne sont visibles qu'avec NAO et Scand. Pour NAO, un long cycle de presque 11 ans (128 mois) est détecté avec Western RDI03, alors que la cohérence significative à plus long terme avec Eastern RDI03 est de 6 ans (71 mois). Cependant, le modèle scandinave tend à montrer une vue opposée où le cycle à long terme avec RDI03 occidental est de 2,5 ans (32 mois), contre 8 ans (100 mois) pour RDI03 oriental. Le MO et le WeMO montrent des cycles d'une demi-année, d'un an et d'un an et demi avec le RDI03 occidental et oriental, et le WeMO seul montre un cycle plus long de presque 11 ans (128 mois) avec les deux RDI03.

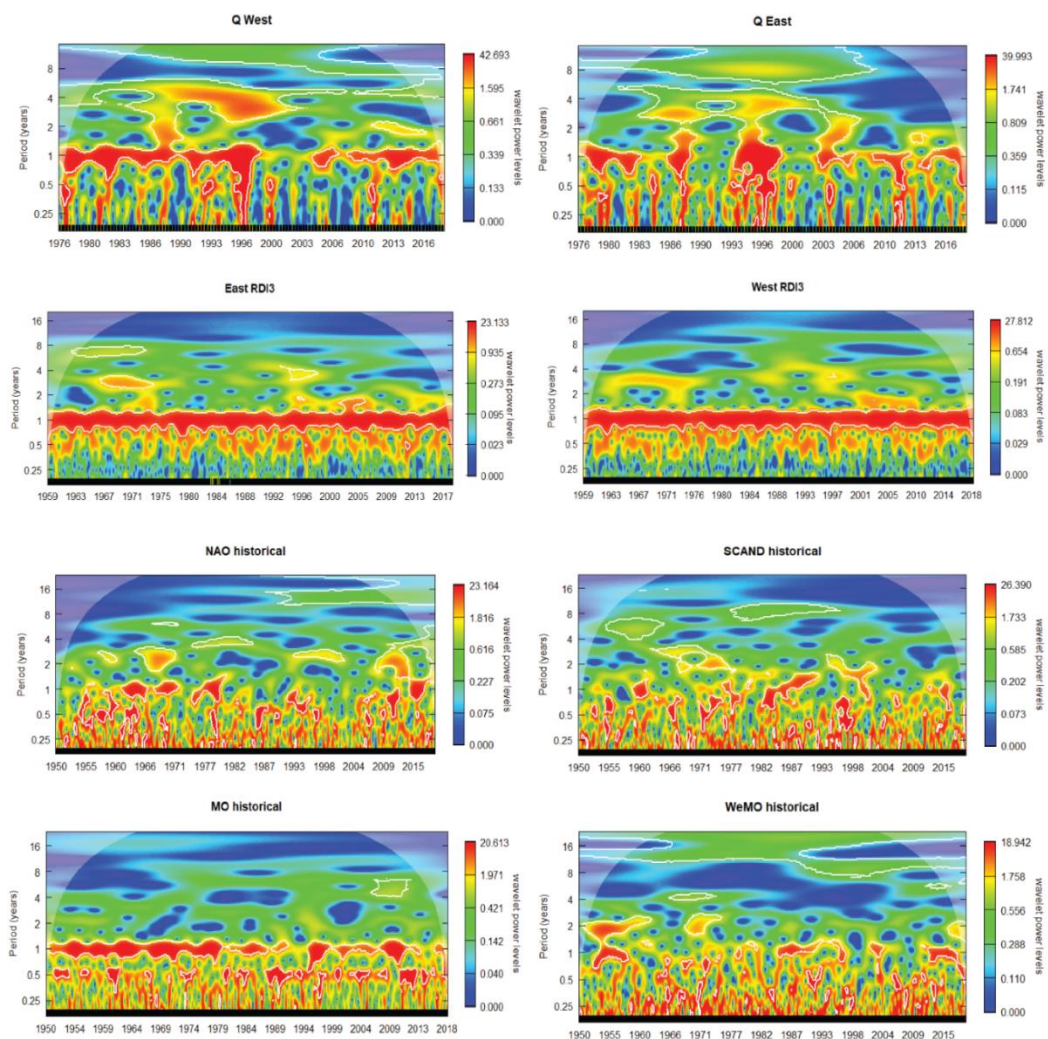


Figure III.9 Spectres des coefficients d'ondelettes continues des indices climatiques considérés ; sur la période 1959-2018 pour les indices de téléconnexion ainsi que pour RDI03, et sur la période 1976-2018 pour les débits

Table III.4: Maximum local des valeurs moyennes de coefficient d'ondelette des variables RDI-03, debits, NAO, Scand, MO et WeMO et significatifs à  $p < 0.05$

Variable	Period (years)	Average power	Pv
East-RDI03	0.7-1.2 (1.0)	15.21	<0.01
East-Q	0.7-3.0 (1.0)	5	<0.01
	3.0-6.0 (3.0)	0.68	0.03
	6.0-9.0 (8.4)	0.6	<0.01
	9.0-15.0 (9.3)	0.51	0.02
West-RDI03	0.7-1.2 (1.0)	16.87	<0.01
West-Q	0.7-3 (1.0)	6.17	<0.01
	3.0-6.0 (4.3)	1.06	<0.01
	12.0-14.0 (14.0)	0.36	0.01
NAO	0.5-2.0 (0.5)	2.52	0.01
	2.0-3.0 (2.4)	0.83	0.01
	11.0-16.0 (13.6)	0.21	0.01
SCAND	0.5-1.7 (0.7)	2.09	0.02
	0.8-10.0 (8.7)	0.27	<0.01
MO	0.4-1.2 (1)	5.87	<0.01
WeMO	0.9-1.3 (1)	1.64	0.01
	10.0-20.0 (18)	0.39	0.02

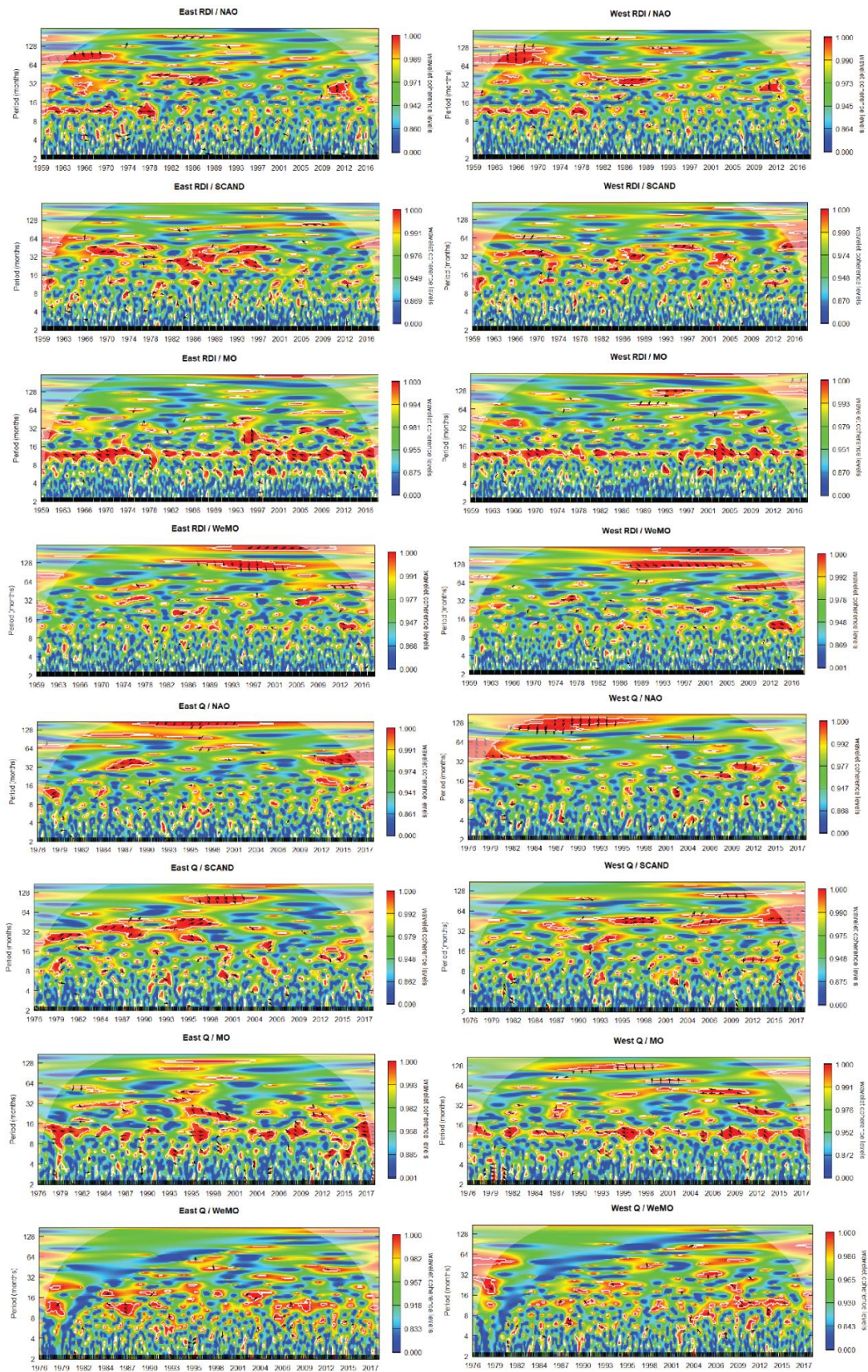


Figure III.10 : Cohérence des ondelettes croisées de RDI-03 et débits pour chaque zone et NAO, Scand, MO, et WeMO. Les lignes blanches indiquent le niveau de signification de 5%. Les flèches noires parallèles indiquent la cohérence ; les flèches pointant exactement vers la droite indiquent que les deux séries sont en phase à la période respective, les flèches pointant



Table III.5: Maximum locaux des Significant ( $p < 0.05$ ) local maxima of average cross wavelet coherence of RDI03 and Q, NAO, SCAND, MO, and WeMO

Zone	Variable	Period (months)	Average power	Pv
East	NAO-Q	6	0.92	0.04
	SCAND-Q	6.0-9.0 (8.6)	0.95	0.02
		11.5-13.5 (13)	0.96	<0.01
		20.0-21.2 (21)	0.97	0.01
	MO-Q	2.5-6.5 (6)	0.95	<0.01
		10.5-14.0 (12)	0.99	<0.01
		19	0.96	0.02
		35.5	0.97	0.03
	WeMO-Q	11.0-12.5(12)	0.96	<0.01
	NAO-RDI03	2	0.87	0.03
		5.5-6.5 (6)	0.93	<0.01
		10.0-14.0 (13)	0.96	0.01
		31	0.96	0.02
		66.0-68.5(68.5)	0.98	0.02
		71	0.98	0.03
	SCAND-RDI03	2.0-2.5(2)	0.89	<0.01
		5.5-6.5(6)	0.93	<0.01
		11.0-13.5(13)	0.97	<0.01
		20.0-22.0(21)	0.96	0.02
		31.0-34.0(32)	0.97	0.01
		49	0.97	0.04
		100	0.98	0.04
	MO-RDI03	2	0.89	0.01
		5.0-6.7(6)	0.96	<0.01
		9.5-14.5(12)	1	<0.01
		31.0-33.0(32)	0.98	<0.01
	WeMO-RDI03	2	0.88	<0.01
		5.0-6.5(6)	0.86	<0.01
9.5-14.5(12)		0.99	<0.01	
32		0.96	0.01	
128		0.98	0.03	
NAO-Q	5.8-6.3 (6.0)	0.92	0.03	
	10.0-11.0 (10.6)	0.94	0.03	
	73.0-76.2 (73.5)	0.98	0.04	
SCAND-Q	6.5	0.92	0.05	
	11.0-13.5 (13)	0.97	0.01	
	21	0.95	0.05	
	42.0-44.0 (44)	0.98	0.02	
	104.0-108.0 (108)	0.99	0.04	
MO-Q	5.5-6.3 (6)	0.94	<0.01	
	10.0-14.0 (12)	1	<0.01	
	76	0.98	0.05	
WeMO-Q	6	0.91	0.04	
	11.0-13.0 (12)	0.96	<0.01	
	18	0.95	0.02	
NAO-RDI03	6	0.91	0.03	
	10.0-14.0(13)	0.96	0.01	
	21.0-23.0(22)	0.96	0.02	
	35.5-38.0(38)	0.97	0.03	
	128	0.98	0.05	

SCAND-RDI03	2.0-2.5(2)	0.89	<0.01
	6.0-6.5(6.0)	0.93	<0.01
	11.0-13.5(13)	0.97	<0.01
	31.0-32.0(32)	0.97	0.03
MO-RDI03	2.0-2.5(2)	0.88	0.02
	4.0-6.5(6)	0.96	<0.01
	9.5-14.5(12)	1	<0.01
	32.0-33.0(32)	0.96	0.04
WeMO-RDI03	2.0-2.5(2)	0.88	<0.01
	5.0-6.5(6)	0.96	<0.01
	9.5-14.5(12)	1	<0.01
	32	0.96	0.04
	128	0.98	0.03

## 2.3. Evolution des indices de téléconnexion

### 1.3.2. Historique

Les résultats des comparaisons entre les indices de téléconnexion observés et modélisés sont présentés en Figure III.11 sous forme de boîtes-à-moustaches. De manière générale, les premier et troisième quartiles (Q1, Q3) sont plus espacés dans les modélisations que pour les valeurs observées ; ce qui suggère une plus grande variabilité des indices avec les valeurs modélisées. Néanmoins, les tests de TuckeyHSD montrent que tous les modèles reproduisent conformément les séries observées, sauf pour l'indice WeMO. En effet, pour la WeMO, les séries modélisées sont statistiquement similaires entre elles, mais elles sont différentes de la série observée. Cela peut s'expliquer par le fait que la WeMO est un indice de la circulation atmosphérique qui se produit à une échelle spatiale plus restreinte que les autres indices. Les pôles positif-négatif de la NAO, Scand et MO sont séparés respectivement d'environ 4000, 3800 et 3800 km contre seulement 1800 km pour les pôles de la WeMO. En conséquence, les GCMs, dont la résolution spatiale va de 125 à plus de 200 km, auraient besoin de plus de détails concernant la climatologie et le fonctionnement méditerranéen en général pour arriver à bien produire l'indice WeMO.

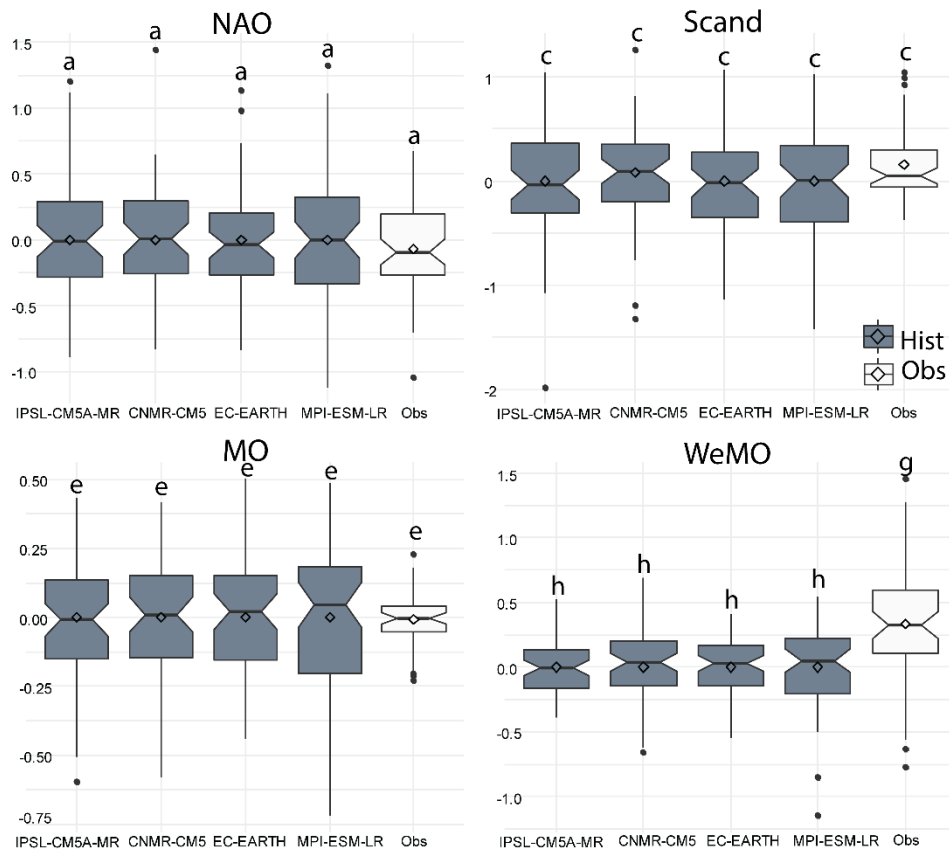


Figure III.11 : Boîte-à-moustaches des séries annuelles des indices de téléconnexion sur la période historique 1950-2005. Les boîtes grises (Hist) représentent les séries pour chaque GCM et les boîtes blanches (Obs) représentent la série observée. Les lettres donnent le résultat du test de TukeyHSD ; les moyennes sont significativement les mêmes pour des mêmes lettres, et inversement

### 2.3.2. Evolutions futures

La méthodologie décrite dans la section III.1.2 a été utilisée pour calculer les valeurs des indices de téléconnexion au cours de la période projetée 2006-2100 sous un scénario climatique RCP 8.5. La période de standardisation utilisée est 1950-2005, ce qui correspond à la période historique simulée par les GCMs. Les séries annuelles pour la totalité de la période historique et projetée de chaque GCMs ainsi que les séries observées sont montrées en Figure III.12. A première vue, on observe une possible augmentation des valeurs de la NAO, surtout sur sa période historique 1950-2005. Au contraire, les valeurs de la Scand et de la WeMO tendent vers des valeurs relativement plus faibles sur l'ensemble de la période 1950-2100.

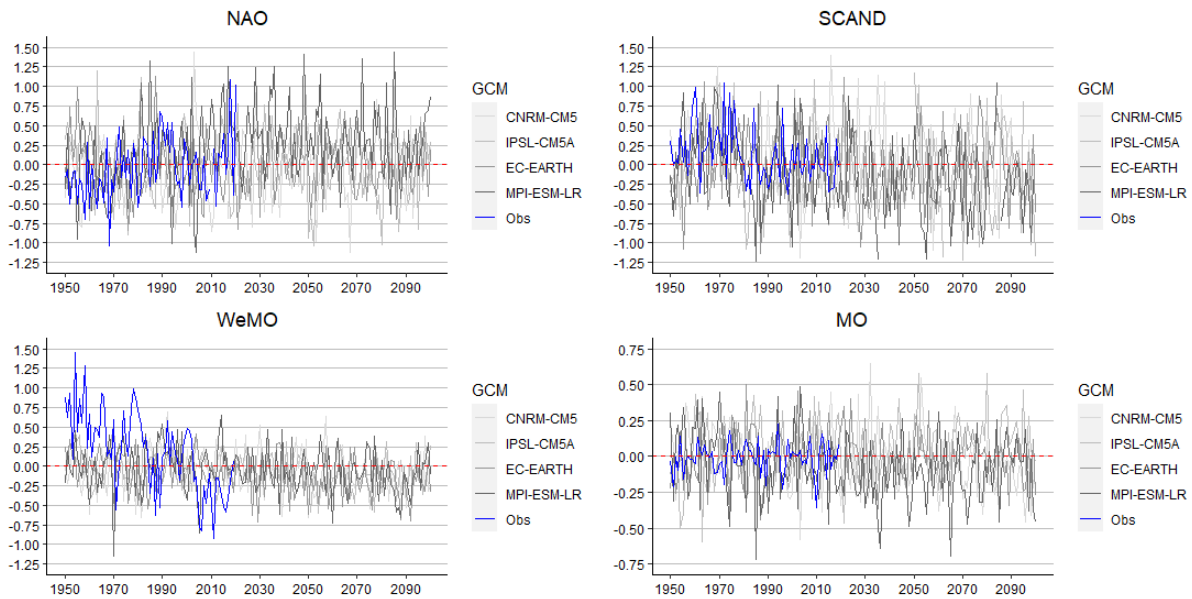


Figure III.12 : Evolution annuelle des indices de téléconnexion pour la période 1950-2100 sous un scénario RCP 8.5. Les séries grisées correspondent aux séries modélisées par les GCMs tandis que la série bleutée pour chaque indice correspond à la série réelle observée.

## 2.4. Corrélations entre la circulation atmosphérique et les paramètres hydro-climatiques

Les corrélations entre les indices de téléconnexion et les variables hydro-climatiques (RDI-03, débits, températures et précipitations) sont présentées dans la Figure III.13. L'allure des corrélations est similaire d'un paramètre à l'autre. Les valeurs de RDI-03 supérieures à zéro indiquent un climat plus humide avec des précipitations supérieures à la normale et des températures inférieures à la normale ; ce qui induit également des débits plus soutenus. La zone orientale présente généralement des valeurs de corrélation élevées et une meilleure significativité avec les indices de téléconnexion que pour la zone occidentale. Et c'est particulièrement le cas pour les paramètres liés aux précipitations, à savoir les précipitations elles-mêmes, le RDI-03 et les débits. Par exemple, les corrélations avec la MO en hiver atteignent respectivement -0.56, -0.51 et -0.45 pour les trois paramètres, alors que seules de faibles anti-corrélations non-significatives sont détectées pour la zone occidentale. En général, la zone orientale a une meilleure corrélation avec les indices méditerranéens que la zone occidentale. Les débits sont anti-corrélés avec les indices méditerranéens pendant la majeure partie de la saison froide (soit l'automne, l'hiver et le printemps), alors qu'ils sont positivement corrélés pendant la saison estivale. La Scand présente des corrélations positives élevées avec les précipitations, le RDI-03 et les débits et, au contraire, elle présente des anti-corrélations élevées avec les températures. En outre, les valeurs des corrélations sont particulièrement

élevées pour les saisons de printemps et d'été. Il est intéressant de noter que la Scand présente une corrélation légèrement meilleure avec la zone orientale pour les débits au printemps, été et automne. Les valeurs de celles-ci sont de 0.44 (0.20), 0.36 (0.31), 0.42 (0.24), respectivement pour la zone orientale (occidentale). La NAO indique de meilleures corrélations avec les températures qu'avec les autres paramètres. Elle montre également une corrélation positive significative avec les débits de la zone occidentale ; avec 0.31 et contre 0.19 pour la zone orientale.

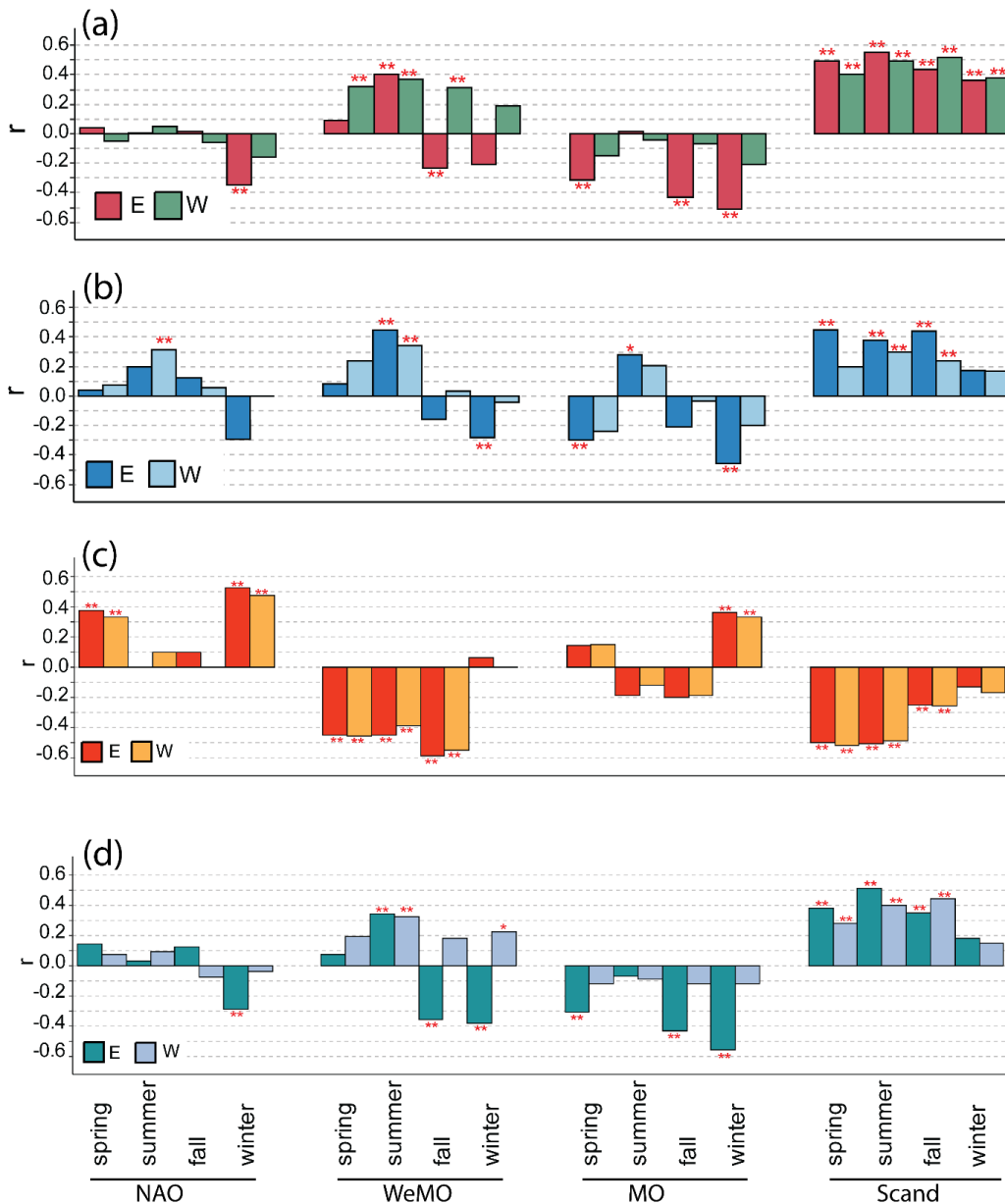


Figure III.13: Corrélations historiques entre les modèles de téléconnexion et (a) RDI-03 (b) Débit d'eau (c) Températures (d) Précipitations. Pour (a), (c), et (d) la période considérée est 1959-2018, alors que pour (b) la période considérée est 1976-2018. Les débits pour chaque zone sont la somme des débits d'eau de chaque rivière dont le bassin versant appartient à l'une ou l'autre des zones. Ainsi, le débit de la zone occidentale correspond à la somme des débits de l'Aude, de l'Agly et de la Têt et le débit de la zone orientale correspond à la somme des débits de l'Hérault, de l'Orb et du Tech

## 2.5. Projections des évolutions hydroclimatiques sous un scénario RCP 8.5

Comme dans la Figure III.6, nous contrôlons la capacité des RCMs à reproduire les conditions climatiques historiques en comparant les moyennes saisonnières et les tendances linéaires avec le produit Safran pour les clusters occidental et oriental. La Figure III.14 présente les résultats de cette comparaison ainsi que les valeurs correspondantes pour la période projetée 2006-2100. Cependant, à la différence de la Figure III.6, la moyenne des 6 RCMs uniquement est représentée et non les valeurs de chaque RCM individuellement.

Les moyennes saisonnières sont très bien reproduites sur la période historique : ceci est dû à l'application de la méthode de correction ADAMONT, basée sur les données d'observations Safran. En outre, les deux jeux de données s'accordent sur la climatologie saisonnière de chaque cluster. La zone orientale indique une température légèrement plus élevée toute l'année et des précipitations plus importantes pendant la saison d'automne. Cependant, on note à nouveau une certaine difficulté à reproduire les tendances linéaires. Les RCMs sous-estiment les tendances de températures au printemps, en hiver et, pour la zone orientale, en été. La plus grande différence est trouvée pour le printemps avec une sous-estimation d'environ  $0.5^{\circ}\text{C}$ . Les tendances des températures d'automne sont aussi surestimées, avec  $+0,5^{\circ}\text{C}$  de plus qu'avec les données Safran. Pour les précipitations, les RCMs indiquent une diminution notable en hiver de  $-35$  ( $-23\%$ ) pour la zone orientale (occidentale) et de  $-22\%$  en été pour la zone occidentale uniquement. Bien qu'il y ait une légère tendance générale à la baisse, en particulier pour les données de RCMs, seules les précipitations pour la zone occidentale en été et hiver montrent une réduction significative à  $p < 0.05$  pour l'été et  $p < 0.1$  pour l'hiver et de  $-22\%$  chacune.

Pour la période projetée, nous constatons une nette augmentation des températures de  $+3,6^{\circ}\text{C}$  pour le printemps à  $+5,1^{\circ}\text{C}$  pour l'été (Figure III.14). Les deux zones se réchauffent au même rythme pour chaque saison. Une forte diminution des précipitations est attendue en été d'environ  $-38\%$ . Pour la zone occidentale, les précipitations diminuent d'environ  $-14\%$  au printemps et augmentent d'environ  $+13\%$  en hiver.

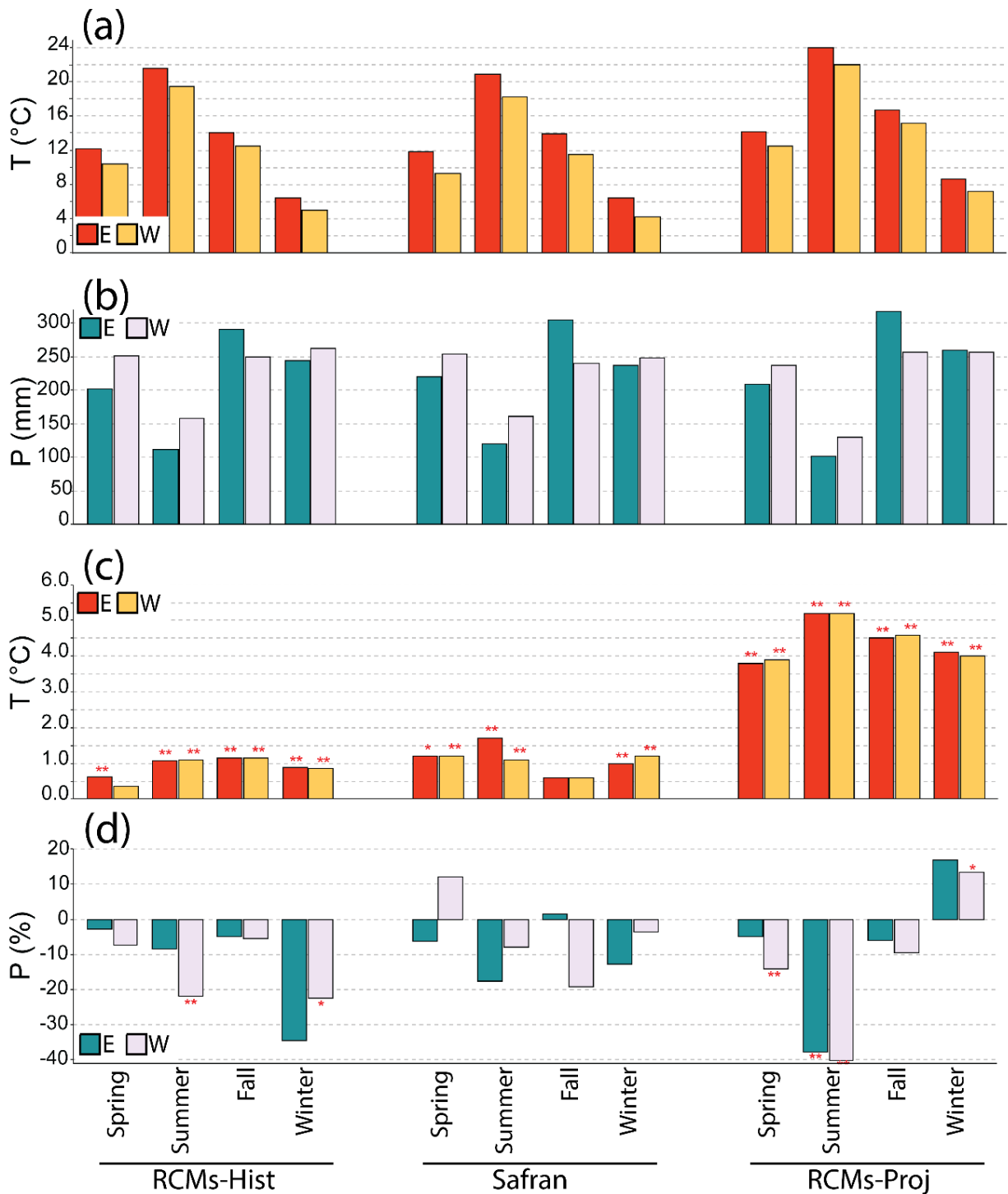


Figure III.14: Comparaison entre les précipitations et les températures Safran et RCMs sur la période historique 1959-2005 et pour la période projetée 2006-2100. RCMs-Hist représente la période historique de RCMs tandis que RCMs-Proj représente la période projetée 2006. (a) et (b) températures et précipitations moyennes respectivement (c) et (d) tendances linéaires obtenues avec un test de Mann-Kendall pour les températures et précipitations respectivement. Les étoiles rouges \* marquent le degré de significativité avec \*\* pour  $p_v < 0.05$ , \* pour  $p_v < 0.01$  et absence d'étoile pour des tests non significatifs

La Figure III.15 montre les évolutions annuelles pour chaque bassin versant sur la période 2006-2100 et pour deux scénarios climatiques. Nous pouvons constater que l'augmentation des températures est bien moins importante sous un scénario rcp 4.5, de +1,8°C en moyenne, contre +4,5°C dans le cas d'un scénario rcp 8.5. Le modèle ALADIN63 est le seul à indiquer une augmentation des précipitations et celles-ci sont même significatives dans les bassins du Tech, de la Têt, l'Agly, et l'Orb ; cette augmentation est de +10 % (Aude) à +23 % (Orb et Tech). Les autres modèles indiquent une réduction, peu significative, qui le devient dans le cas d'un scénario rcp 8.5. Les réductions d'un scénario vont du simple au double, avec en moyenne une réduction de -6 % pour un scénario rcp 4.5 contre -14 % pour un scénario rcp 8.5, et en ne tenant compte que des valeurs indiquées négatives. En conséquences, les débits annuels montrent une réduction plus importante dans le cas d'un scénario rcp 8.5, de -74 % en moyenne, et davantage significatives. Pour un scénario rcp 4.5, ces réductions sont en moyenne de -32 %, soit deux fois moins importantes au moins que dans un scénario rcp 8.5.

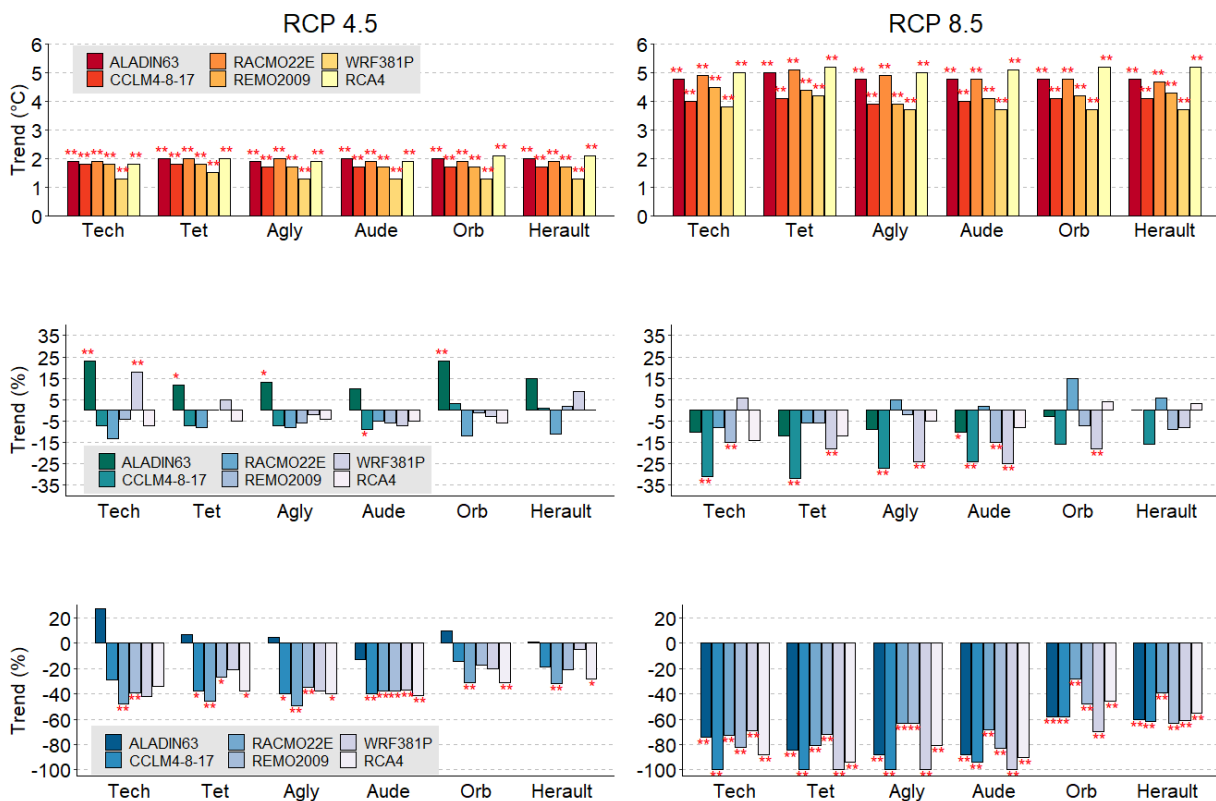


Figure III.15: Evolution des températures (haut), précipitations (milieu) et débits (bas) basées sur un test de Mann-Kendall et selon chaque RCM pour chaque bassin versant et suivant le scénario climatiques rcp 4.5 (gauche) et rcp 8.5 (droite). Les étoiles rouges \* marquent le degré de significativité avec \*\* pour  $p < 0.05$ , \* pour  $p < 0.01$  et absence d'étoile pour des tests non significatifs



### **3. Discussion**

#### **3.1. Fonctionnement hydro-climatique de la zone d'étude**

En réponse aux caractéristiques hydroclimatiques de chaque bassin, l'analyse des K-moyennes sépare la zone d'étude en une zone orientale et une zone occidentale. Le bassin de l'Aude abrite en effet une large vallée orientée Est-Ouest qui permet une connexion avec les masses d'air en provenance de l'océan Atlantique. Ces masses d'air entrent alors dans la zone et remontent jusqu'à la partie la plus en amont du bassin de l'Aude, dans les Pyrénées. Elles pénètrent également l'amont du bassin de la Têt qui est situé dans la vallée pyrénéenne voisine. La moitié amont de l'Agly est également associée au cluster occidental. De la même façon, l'Agly a une vallée orientée Est-Ouest qui est donc elle aussi placée sous l'influence des masses d'air atlantiques.

L'Hérault, l'Orb et le Tech sont englobés dans la zone orientale. En effet ces bassins versants (et notamment l'Orb et l'Hérault) présentent des caractéristiques climatiques et hydrologiques plus proches des spécificités méditerranéennes (Lespinas, 2008). Entre autres, les bassins de l'Orb et l'Hérault sont orientés Nord-Sud et les reliefs des Cévennes et des Grands-Causse qui les bordent au Nord bloquent les masses d'air venant de la Méditerranée. Ce qui donne notamment une saisonnalité des précipitations davantage marquée dans ces bassins et typique du climat méditerranéen tel qu'il est défini dans la classification de Köppen, (1936).

#### **3.2. Tendances linéaire pour la fin du 21<sup>ème</sup> siècle et relations avec la circulation atmosphérique**

Les indices de téléconnexion atmosphérique comme la NAO, la Scand, la MO et la WeMO contrôlent les températures et précipitations saisonnières dans le nord-ouest de la Méditerranée (Toreti et al., 2010; Mathbout et al., 2020; Ulbrich et al., 2012). Ils sont donc susceptibles de jouer un rôle important dans les projections futures (Beranová and Kyselý, 2016). Au travers des sections précédentes, le RDI apparaît comme un bon indicateur des conditions climatiques de notre zone d'étude ; il est alors intéressant d'étudier sa relation avec les indices de la circulation atmosphérique.

L'ensemble des GCMs indique pour le scénario rcp 8.5 une tendance significative vers des valeurs plus faibles de la Scand d'environ -0.186 entre 2006 et 2100 (Table III.6). Pour la WeMO la réduction est de -0.149. La Scand est fortement corrélée avec les précipitations, le RDI-03 et les débits des deux zones pour les saisons de printemps, d'été et d'automne (Figure

III.13), ce qui suggère que ces paramètres pourraient également être réduits d'ici la fin du siècle. Étant donné que les corrélations entre la Scand et les précipitations sont hautement significatives pendant les saisons de printemps, d'été et d'automne pour les deux zones, un simple calcul de l'impact potentiel de la réduction de Scand suggère une réduction des précipitations d'environ -5, -10, et -8% pour chaque saison respectivement. En effet dans sa phase positive, la Scand est associée à un flux de sud-est sur la Méditerranée qui conduit à des températures de surface plus faibles et à des précipitations supérieures à la normale sur la côte méditerranéenne française et la Méditerranée en général (Lionello et al., 2006; Krichak et al., 2014; Bueh and Nakamura, 2007; Kalimeris and Kolios, 2019). Il est donc probable que la réduction de Scand contribue à une évolution des précipitations. En outre, les tendances annuelles linéaires pour la fin du siècle indiquent une réduction significative des précipitations uniquement dans les bassins versants appartenant majoritairement à la zone occidentale pour les deux scénarios rcp 4.5 et rcp 8.5 (Figure III.16). Dans le cas d'un scénario rcp 8.5, où les tendances sont statistiquement significatives, elles indiquent une réduction des précipitations de -10 % (Tech, Agly) à -14 % (Têt, Aude) alors qu'aucune tendance significative n'est montrée pour les bassins de l'Hérault et de l'Orb (Figure III.16, Figure III.17). Les deux bassins appartiennent entièrement à la zone orientale. Un autre changement mis en évidence dans la Table III.6 est l'évolution de la WeMO vers des valeurs plus faibles. Les phases négatives de la WeMO correspondent à la présence d'un anticyclone situé sur l'Europe centrale et orientale et à un centre de basse pression dans le sud-ouest de l'Espagne (Martin-Vide and Lopez-Bustins, 2006). L'occurrence des précipitations est particulièrement importante de l'automne au printemps dans la zone d'étude. À cette période de l'année, le continent se refroidit plus rapidement que la mer Méditerranée, ce qui provoque une condensation plus rapide et qui, portée par les vents d'Est, tombent sous forme de fortes précipitations au contact des côtes et des reliefs montagneux. La phase de la WeMO détermine la direction des vents. C'est pendant sa phase négative que l'air s'écoule généralement vers le nord-ouest et donc que ces événements sont plus prononcés (Martin-Vide et al., 2008). Malheureusement, nous avons montré précédemment (section 2.4 de ce chapitre) que les GCMs n'ont pas réussi à reproduire avec précision la variabilité de la WeMO. Néanmoins, la force des corrélations entre la WeMO et les précipitations, le RDI-03, et les débits pour la zone orientale pendant l'automne et l'hiver suggère que la WeMO pourrait avoir un impact réel sur l'évolution des conditions hydro-climatiques de cette partie de la zone d'étude. Ainsi, la réduction de la WeMO pendant les saisons de printemps, d'automne et d'hiver conduirait à une augmentation des précipitations, du RDI-03 et à des débits plus soutenus, ce qui est en accord avec les tendances linéaires présentées

dans la Figure III.16. Celle-ci présente des précipitations moins impactées pour deux des bassins appartenant à la zone orientale, soit les bassins de l'Hérault et de l'Orb, ainsi que des débits des fleuves côtiers moins impactés pour les trois bassins de la zone orientale, soit les bassins de l'Hérault, de l'Orb et du Tech, (Table III.7). Il y a également une cohérence dans l'évolution des températures puisque les corrélations indiquées dans la Figure III.13 sont généralement homogènes dans les deux zones et qu'une réduction synchrone de la Scand et la WeMO soutiendrait une augmentation de celles-ci.

L'importance des indices de la WeMO et de la MO sur les précipitations de la Méditerranée Occidentale a été rapportée pour la première fois par Gonzalez-Hidalgo et al., (2009); ceux-ci soulignent que les phases négatives des deux indices jouent en faveur de précipitations plus soutenues et que leur influence est plus importante que celle de la NAO (qui est également anti-corrélée avec les précipitations hivernales dans la région). Pendant sa phase positive, la MO est interprétée par un anticyclone sur la Méditerranée occidentale et une dépression sur la Méditerranée orientale. Elle est en outre fortement liée aux modèles atlantiques tels que la NAO et l'Oscillation Arctique pendant la saison hivernale (Dünkeloh and Jacobeit, 2003). Nos résultats confirment ces conclusions (Figure III.13), montrant une forte anti-corrélation de la MO avec le RDI-03 et les débits en hiver, et la force de la corrélation est plus élevée que celles avec la NAO.

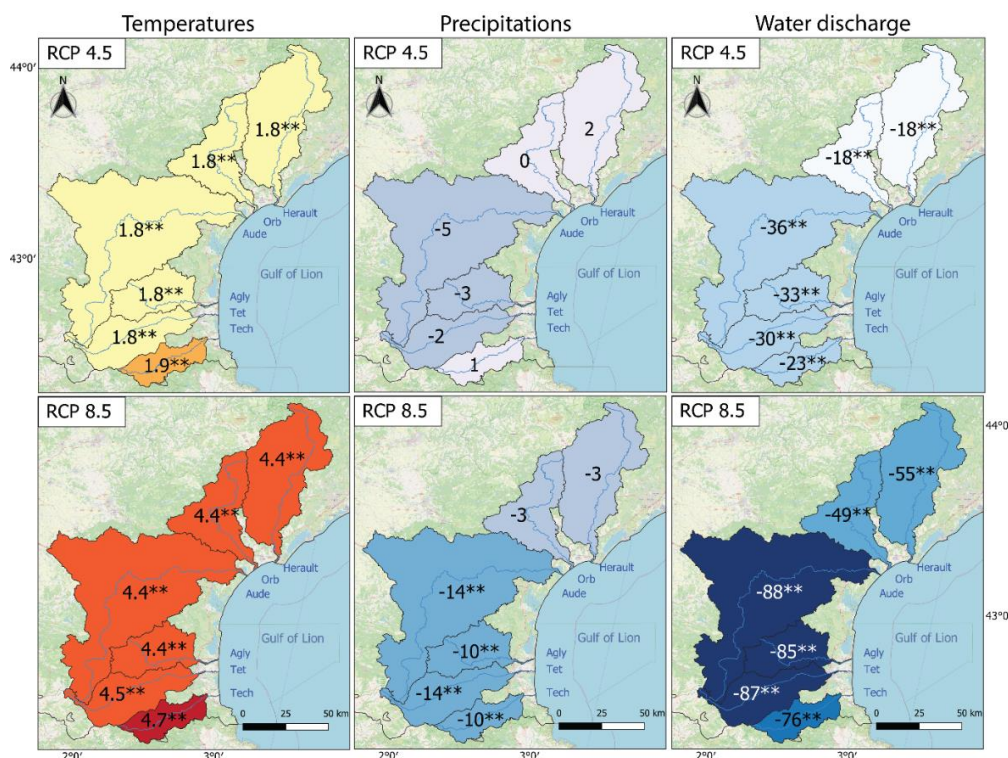


Figure III.16: Tendances linéaires des variables hydro-climatiques annuelles projetées dans le cadre des scénarios RCP 4.5 (haut) et RCP 8.5 (bas) et pour la période 2006-2100 (températures ; à gauche,

précipitations ; au milieu, et débits; à droite). Les étoiles \* marquent le degré de significativité avec \*\* pour  $p < 0.05$ , \* pour  $p < 0.01$  et absence d'étoile pour des tests non significatifs

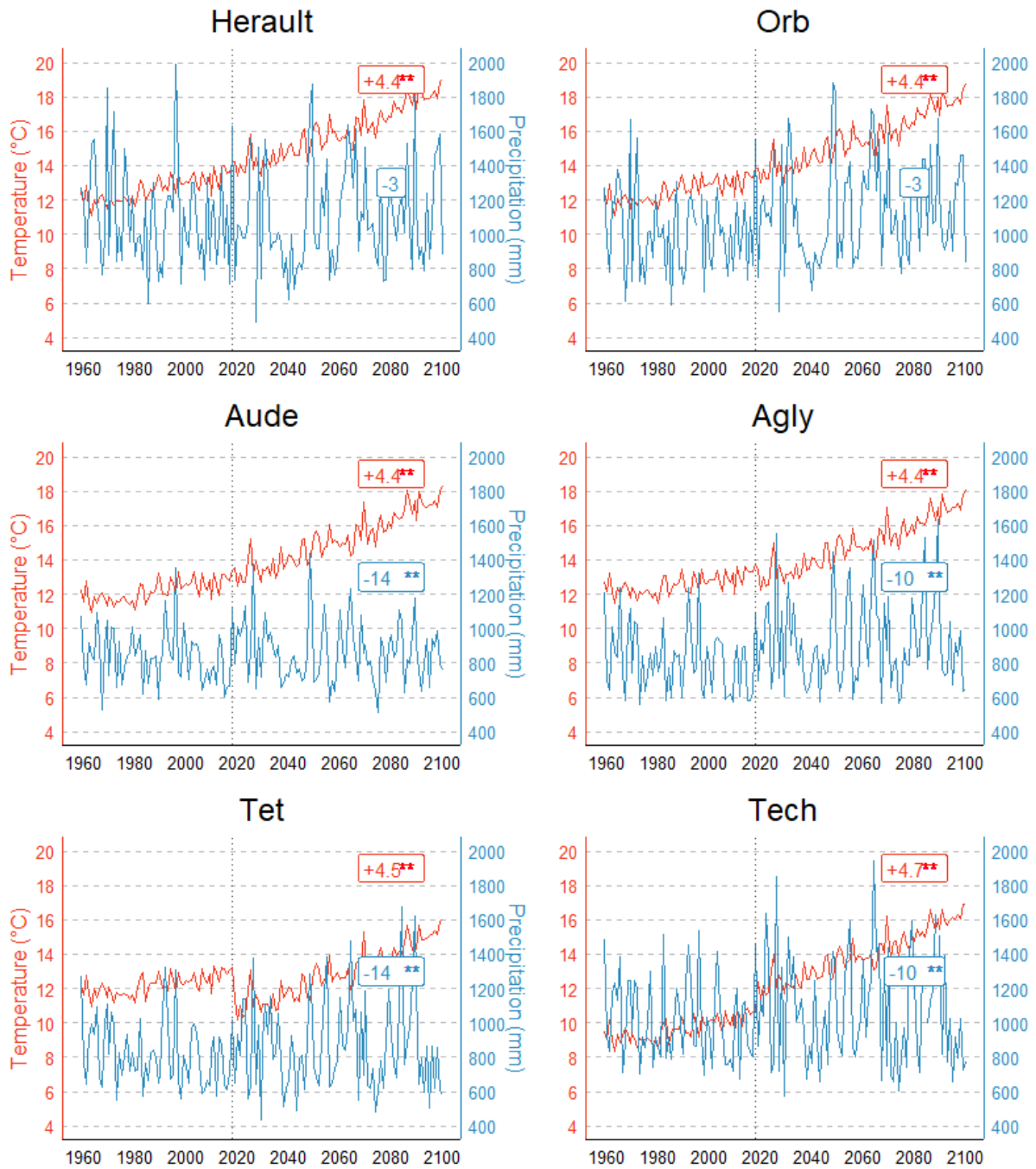


Figure III.17: Evolution des températures et précipitations moyennes annuelles sur la période 1959-2100 sur la base des données historiques observées (1959-2018) et de la moyenne des 6 RCMs pour la période projetée (2019-2100) sous un scénario rcp 8.5.. La ligne verticale en pointillés gris délimite la période historique de la période projetée. Les résultats des tests de Mann-Kendall sont indiqués dans les encadrés bleu et rouge pour les précipitations et températures respectivement. Ils sont obtenus sur la période 2006-2100

Table III.6 : Tendances linéaires de la moyenne de l'ensemble des GCMs des indices de téléconnexion pour la période 2006-2100 sous un scénario RCP 8.5

TP	Trend	p-value
NAO	0.006	0.92
Scand	-0.186	0.05
MO	-0.026	0.5
WeMO	-0.149	<0.01

Table III.7: Débits spécifiques obtenus et incertitudes pour chaque fleuve côtiers sur la période 2007-2020, 2040-2060 et 2080-2100 pour un scénario rcp 8.5

Basin	2007-2020	2040-2060	2080-2100
Herault	450 ± 85	359 ± 110	227 ± 72
Orb	596 ± 139	505 ± 135	338 ± 186
Aude	256 ± 60	178 ± 56	88 ± 37
Agly	250 ± 81	182 ± 68	72 ± 64
Tet	288 ± 70	203 ± 64	76 ± 76
Tech	456 ± 100	336 ± 105	157 ± 129

### 3.3. Evolution hydrologiques pour les zones occidentale et orientale

Les valeurs des tendances linéaires des débits des fleuves côtiers pour la fin du siècle peuvent être affectées par la capacité des RCMs à reproduire fidèlement les séries annuelles (Lespinas et al., 2014). Néanmoins, une comparaison des séries hydrologiques modélisées à partir des données de Safran et des données des RCMs sur la période historique 1959-2005 montre qu'en général, les RCMs reproduisent plutôt bien les caractéristiques statistiques des séries temporelles (Figure III.18). Seules les séries du Tech ont tendance à surestimer les valeurs maximales, minimales et médianes sur la période historique. Ceci n'est pas surprenant puisque les données des RCMs ont été corrigées selon le jeu de données fourni par Safran dans lequel nous avons détecté une légère surestimation des précipitations et une sous-estimation des températures annuelles dans ce bassin versant (Labrousse et al., 2020). Cependant, cette surestimation concerne l'ensemble de la série et n'affecte donc pas les tendances linéaires des projections futures. Tous les RCMs s'accordent à prévoir que les bassins versants de la zone orientale devraient être moins affectés que ceux de la zone occidentale par la réduction des débits annuels (Table III.7) car il n'y a pas de réduction des précipitations dans ces mêmes bassins. En général, la zone occidentale est plus touché d'environ 25 % (selon CCLM4-8-17, RACMO22E et RCA4). REMO2009 enregistre la plus petite différence entre les deux zones (9

%) avec une réduction dans la zone occidentale (orientale) de -73 % (-64 %). Et WRF381P montre la plus grande différence (30 %) avec -100 % (-70 %) dans la zone occidentale (orientale). La moyenne d'ensemble résultante des RCMs projette une baisse évidente du débit annuel qui est aggravée dans les bassins versants occidentaux (Figure III.16, Figure III.19). Cependant, il est important de garder en tête les incertitudes associées à la fois aux RCMs et aussi au modèle statistique hydrologique lui-même. Les projections à la période 2080-2100 sont notamment soumises à des incertitudes importantes (Table III.7). Néanmoins, ces résultats suggèrent que les fleuves de la zone occidentale pourraient bien devenir intermittents d'ici la fin du siècle. Cette remarque est d'ailleurs en cohérence avec plusieurs études qui utilisent les simulations CMIP5 et détectent une réduction des débits des cours d'eau en France (Boé et al., 2009) et des étiages plus sévères et persistants pour le sud de l'Europe (Forzieri et al., 2014).

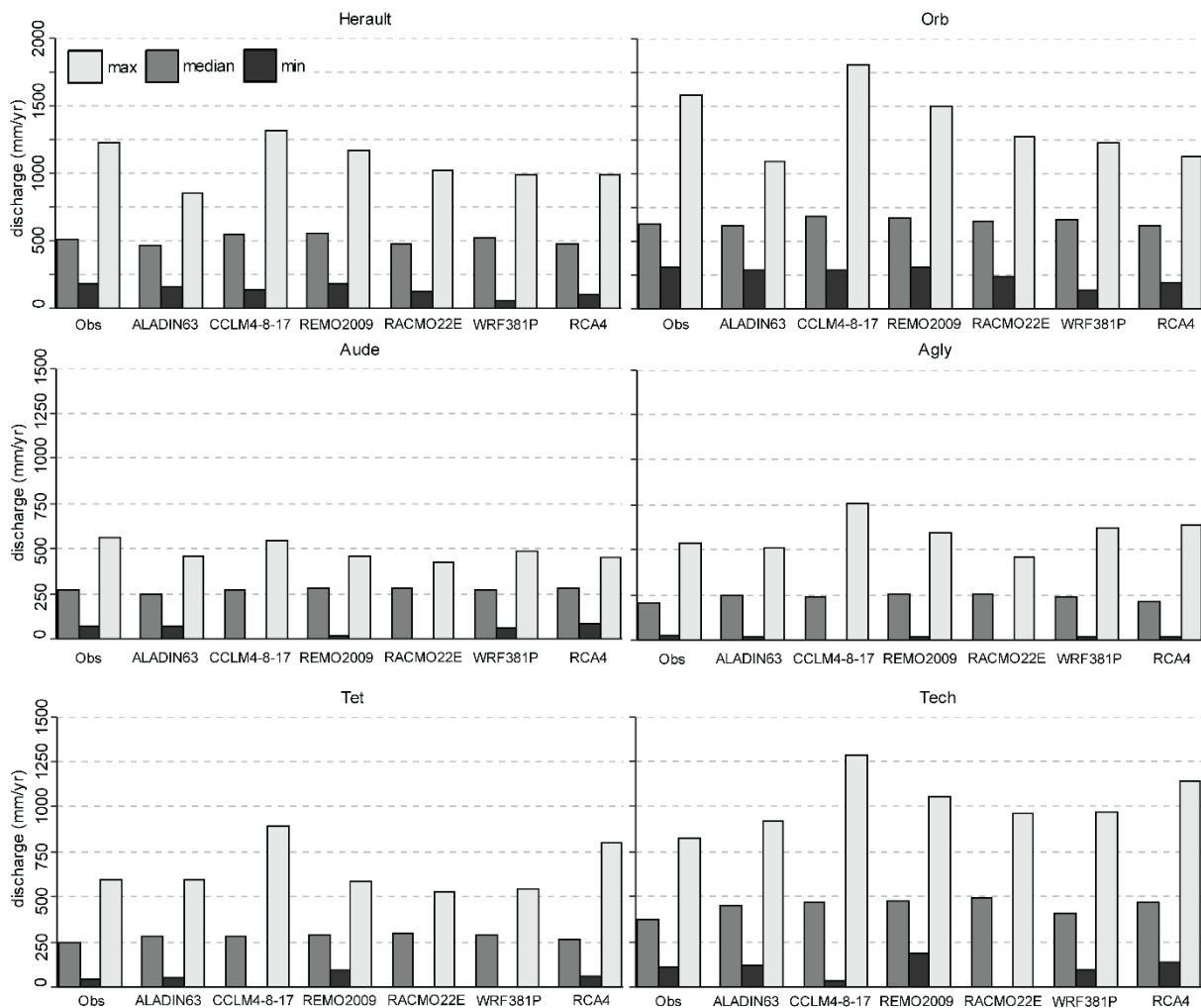


Figure III.18: Comparaison des caractéristiques statistiques médiane (median), minimum (min) et maximum (max) pour les séries hydrologiques observées (obs) et modélisées à partir des RCMs sur la période 1959-2005

Table III.8 : Tendances linéaires des séries hydrologiques annuelles à 2100 et différences observées entre les zones orientale et occidentale pour chaque RCM

RCM	Western	Eastern	Difference (%)
ALADIN63	-87	-64	23
CCLM4-8-17	-98	-73	25
RACMO22E	-71	-46	25
REMO2009	-73	-64	9
WRF381P	-100	-70	30
RCA4	-88	-63	25

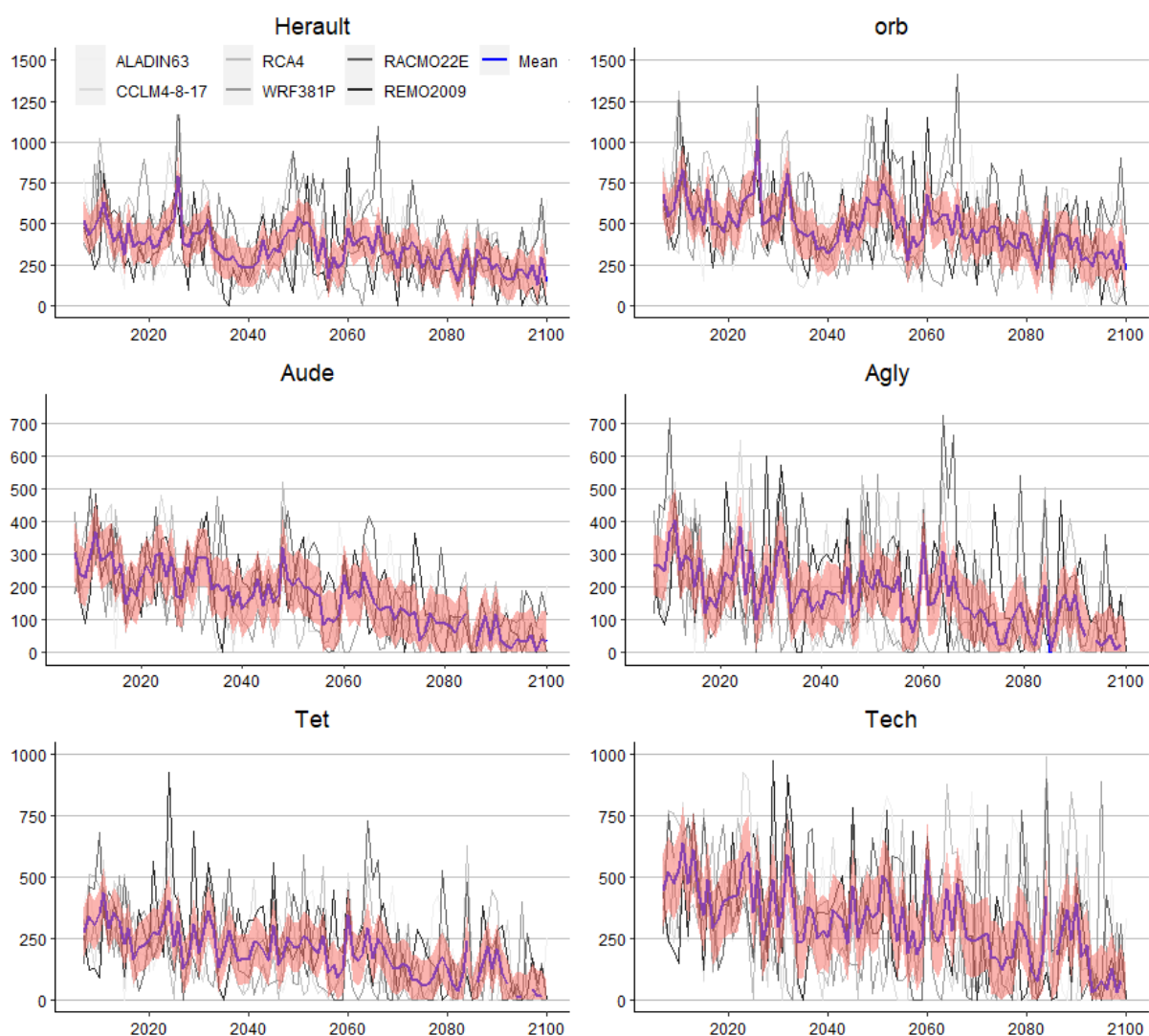


Figure III.19: Débits annuels modélisés sur la période 2006-2100 pour chaque fleuve côtier. Les courbes grisées correspondent aux évolutions annuelles obtenues pour chaque RCM, la courbe bleue est la moyenne de l'ensemble et l'ombrage rosé représente l'incertitude

## 4. Conclusions

L'objectif général de ce chapitre est d'utiliser un ensemble de modèles climatiques issus des simulations CMIP5 pour réaliser des projections sur les évolutions hydrologiques et climatiques attendues pour le 21<sup>ème</sup> siècle. Au vu d'un fonctionnement hydroclimatique non uniforme entre les bassins versants d'étude, nous étudions également les liens avec la circulation atmosphérique générale. Dans un premier temps, nous avons confronté les simulations historiques aux données observées pour leur validation, puis nous avons travaillé sur les données projetées sous un scénario RCP 8.5. Les principales conclusions de ce chapitre sont indiquées ci-après :

- Une analyse de clustering en K-moyennes menée sur la variable RDI-03 a montré deux zones de comportements hydro-climatiques différentes, coupant ainsi la zone d'étude entre une zone orientale et une zone occidentale. La zone orientale regroupe la totalité des bassins de l'Hérault, l'Orb et le Tech, et englobe également les parties aval des bassins de la Têt, l'Agly et l'Aude. La zone occidentale comprend l'amont des bassins de l'Aude, l'Agly et la Têt. Cela montre un fonctionnement généralement méditerranéen de la zone d'étude mais avec une composante atlantique non négligeable pour trois des bassins versants étudiés.
- Les corrélations saisonnières de RDI-03, des précipitations, températures, et des débits avec les indices de téléconnexion sont très similaires, confirmant un lien fort entre les séries hydrologiques et les conditions climatiques.
- L'indice Scand s'avère être positivement et fortement corrélé avec le RDI-03 des 2 zones occidentale et orientale de la zone d'étude tout au long de l'année. Il est en outre fortement corrélé (anticorrélé) avec les précipitations (températures) pour les saisons de printemps, été et automne. Les prédictions d'une possible diminution de l'indice Scand d'ici la fin du siècle conduisent à prévoir une baisse des valeurs de RDI-03, accompagné d'une réduction des précipitations au printemps, été et automne ainsi qu'une hausse des températures sur les mêmes saisons, suggérant ainsi des conditions plus sèches pour toute la zone.
- La zone orientale est fortement influencée par les indices atmosphériques méditerranéens WeMO et MO. Ceux-ci apparaissent même prédominants par rapport à la NAO. Une attention particulière est accordée à WeMO qui n'a pas pu être reproduit avec précision par les GCMs ; ceci pourrait être dû à une mauvaise représentation des flux d'eau et de chaleur lié au fonctionnement méditerranéen. Pourtant, les tendances



linéaires montrent une réduction possible de ses valeurs d'ici la fin du siècle, ce qui entraînerait une augmentation des précipitations pour les saisons d'automne et d'hiver. Ces deux saisons étant importantes dans le cumul annuel des précipitations, l'augmentation des précipitations sur les bassins associés à la zone orientale (Hérault, Orb et Tech), lié au fonctionnement de la WeMO, pourrait contrebalancer la réduction des débits des fleuves côtiers liée à l'augmentation des températures. Cela met en outre en avant l'importance de la saisonnalité dans les évolutions long-terme des variables hydro-climatiques.

- Une augmentation de 4.5°C des températures annuelles est alors attendue, en parallèle d'une diminution des précipitations de -3 % (pour l'Hérault et l'Orb et étant non significatives) à -14 % (pour l'Aude et la Têt et avec une signification inférieure à 0.05). Le débit annuel des six fleuves côtiers pourrait diminuer de -49 % (Orb) à -88 % (Aude) au cours du 21ème siècle (période 2006-2100). Néanmoins, ces résultats font l'objet d'une forte incertitude et doivent être pris avec précaution. En outre, une analyse simple des incertitudes montre que les prédictions à moyen-terme (2050) sont beaucoup plus fiables que celles à long-terme (2100).
- Enfin, toutes ces conclusions précédentes s'accordent à dire que la zone orientale devrait être moins impactée, en termes d'évolution des ressources en eau, par les changements climatiques que la zone occidentale.

## **- CHAPITRE IV -**

# **Evolution des extrêmes climatiques au cours de la période historique et pour les projections climatiques**

### **1. Introduction**

Le dernier rapport de l'IPCC montrait une augmentation du nombre et de l'intensité des événements extrêmes de températures dans le monde depuis les années 1950s ainsi que de nombreuses régions également affectées par une augmentation du nombre d'extrêmes de précipitations (Masson-Delmotte et al., 2021). En Méditerranée cependant, les changements observés dans l'évolution des précipitations extrêmes ne suivent pas partout la même tendance et leur lien avec une potentielle cause anthropique reste discutée. Généralement, une tendance à la baisse du nombre d'extrêmes de précipitations est montrée pour la rive sud du bassin méditerranéen et, au contraire, une tendance à la hausse pour la rive nord (Tramblay and Somot, 2018; Lionello and Scarascia, 2018). Pour le Sud de France, les événements de précipitations extrêmes ont lieu sur un temps court de quelques heures à une journée seulement et voient des cumuls journaliers qui peuvent être supérieurs à 100 mm. La saison d'occurrence de ces événements s'étale généralement des mois d'octobre à mars, avec davantage d'événements ayant lieu en octobre, novembre et décembre. Au cours des dernières décennies, l'intensité des événements extrêmes de précipitations semble avoir augmenté, en particulier dans les régions situées dans la vallée du Rhône et sur certains reliefs comme les Cévennes (Ribes et al., 2019; Blanchet et al., 2018). Mais en ce qui concerne la région située dans notre zone d'étude (Languedoc et Roussillon) l'incertitude persiste. La significativité des tendances est parfois faible et le sens des tendances questionné. Pourtant, les précipitations extrêmes peuvent avoir un fort impact humain et économique, notamment à cause des crues qui font suite à ces événements (Llasat et al., 2013). En plus des forts cumuls journaliers de précipitations lors de ces événements, la présence de nombreux massifs montagneux dans la région fait converger les ruissellements vers les cours d'eau majeurs, provoquant des crues dites « éclaires ». La mer Méditerranée sert de réservoir de chaleur et d'humidité qui alimente ces événements extrêmes. En automne, l'air chaud et humide en provenance de la Méditerranée rencontre les reliefs des chaînes de montagne sur le continent, l'air se refroidit en gagnant de l'altitude et l'humidité condense, provoquant les forts cumuls de précipitations.

En ce qui concerne les événements extrêmes de températures, de nombreuses études ont déjà identifié des évolutions à la hausse du nombre de ces indices et leur intensité en Méditerranée sur la période historique (e.g. Lionello and Scarascia, 2020; Kuglitsch et al., 2010; Kostopoulou and Jones, 2005) ainsi que pour les projections selon divers scénarios climatiques (Molina et al., 2020). La responsabilité des activités humaines dans l'évolution de ces extrêmes de températures est montrée comme de plus en plus certaine (Masson-Delmotte et al., 2021; Stott et al., 2004). Divers indices sont utilisés pour définir des événements extrêmes de températures. Parmi eux, les vagues de chaleur sont définies comme des périodes aux températures excessives prolongées (Perkins and Alexander, 2013). Ces vagues de chaleur causent des dégâts importants sur la santé humaine (McMichael and Lindgren, 2011; Campbell et al., 2018; Dong et al., 2020), matériels (McEvoy et al., 2012) ainsi que sur les écosystèmes (Steel et al., 2019; Sales et al., 2018). Elles représentent aussi une menace majeure pour l'agriculture. Les températures élevées, sur un temps long ou même court, affectent les stades de développement des plantes et à travers divers processus. Parmi eux les plus étudiés sont les rendements, c'est-à-dire la quantité de grains/fruits/légumes produite par pied de plante (ou par hectare de culture), la taille des grains/fruits/légumes, ainsi que leur qualité (Lobell et al., 2013, 2012; White et al., 2006).

En somme, avec la continuation des changements climatiques attendus dans les prochaines décennies, ainsi que l'augmentation particulièrement marquée de la population et notamment dans les zones côtières (Yilmaz and Yilmaz, 2011), le bassin méditerranéen risque d'être particulièrement vulnérable aux événements hydro-climatiques extrêmes.

Ce chapitre a pour objectif de faire le point sur les évolutions historiques et projetées selon un unique scénario climatique (rcp 8.5) des extrêmes hydro-climatiques à échelle des 6 bassins versants côtiers de la région Occitanie-Est. L'analyse des séries historiques est un élément d'importance en ce sens qu'elle permet de fixer les valeurs clés dans la détection de ces événements ainsi que d'identifier des premières tendances qui pourraient s'être révélées au cours des dernières décennies et notamment depuis les années 1980s, années où les changements climatiques sont significativement amorcés. Une échelle spatiale plus fine à résolution de 8 km (empruntant la résolution du produit Safran) est également utilisée dans le but de détecter des évolutions divergentes entre milieux de hautes et basses altitudes et entre zone occidentale (au climat plus tempéré) et orientale (au climat plus méditerranéen) qui ont été identifiées dans le chapitre précédent. Les projections à 2100 à partir de l'utilisation des 6 RCMs précédemment présentés permet de tester la concordance des modèles dans l'évolution

future de ces évènements et les résultats obtenus seront confrontés aux observations qui ont pu être faites dans la littérature pour des zones d'études englobant la nôtre ou proches. Ceci est particulièrement intéressant pour les évènements extrêmes de précipitations car, comme précisé précédemment, des divergences entre les modèles et des différences d'une région à l'autre dans la partie nord-occidentale de la Méditerranée ont déjà été soulignées.

## 1. Données et Méthodes

### 1.1. Evènements climatiques extrêmes

L'équipe d'experts sur la détection et les indices du changement climatique (ETCCDI) a développé le projet Climdex, lequel recommande une série de 27 indices d'extrêmes climatiques, tous dérivés de données journalières de températures et précipitations. Le projet met en outre à disposition un package 'climact2' (Alexander and Herold, 2016) utilisable sur R qui permet de recalculer ces indices climatiques. Nous en avons sélectionné 10 et adapté la formulation des calculs selon nos séries d'observation. Les indices sont présentés dans les deux paragraphes suivants selon leur relation avec les paramètres de température ou de précipitations.

Les modèles climatiques régionaux présentés dans le chapitre précédent ont également été utilisés afin d'explorer les évolutions de certains de ces indices climatiques extrêmes d'ici la fin du siècle et sous un scénario rcp 8.5.

#### 1.1.1. Températures

(1)  $T_{95}$  est le nombre de jours où la température journalière moyenne dépasse le 95<sup>ème</sup> centile ( $T > 95^{\text{ème}}$  centile); soit le nombre de jours extrêmement chauds. Si  $T_{ij}$  est la température moyenne au jour  $i$  dans la période  $j$  et  $T_{n95}$  est le 95<sup>ème</sup> centile du jour calendaire centré sur une fenêtre de 5 jours pour la période 1959-1973,  $T_{95}$  est alors le nombre de jours de la période  $j$  où  $T_{ij} > T_{n95}$ . Soit le nombre de jours qui dépassent le 95<sup>ème</sup> centile des moyennes de températures journalières sur la base de la période 1959-1973.

(2)  $T_{75}$  est le nombre de jours où la température journalière moyenne dépasse le 75<sup>ème</sup> centile ( $T > 75^{\text{ème}}$  centile) ; soit le nombre de jours chauds. Il est calculé de la même façon que  $T_{95}$

(3)  $T_{25}$  est le nombre de jours où la température journalière moyenne reste en-dessous du 25<sup>ème</sup> centile ( $T < 25^{\text{ème}}$  centile) ; soit le nombre de jours froids. Il est calculé de façon similaire à  $T_{95}$  avec  $T_{25}$  qui est alors le nombre de jours de la période  $j$  où  $T_{ij} < T_{n25}$

(4) WSDI est l'indice d'occurrence des vagues de chaleur ; il désigne le nombre d'occurrence annuel des événements où les températures moyennes journalières excèdent le 90<sup>ème</sup> centile sur au moins 6 jours consécutifs. Si  $T_{ij}$  est la température moyenne au jour  $i$  dans la période  $j$  et  $T_{in90}$  est le 90<sup>ème</sup> centile du jour calendaire centré sur une fenêtre de 5 jours pour la période 1959-1973. WSDI est la somme du nombre d'occurrence annuel lorsque  $T_{ij} > T_{in90}$  pendant au moins 6 jours consécutifs. Cet indice est adapté de l'indice proposé par climdex et aussi nommé WSDI où celui-ci désigne non pas le nombre d'occurrence des vagues de chaleurs longues d'au moins 6 jours mais leur longueur elle-même, c'est-à-dire le nombre de jours de ces vagues de chaleurs lorsqu'elles sont longues d'au moins 6 jours.

(5) CSDI, similaire à WSDI est l'indice d'occurrence des vagues de froids ; il désigne le nombre d'occurrence annuel des événements où les températures moyennes journalières restent en-deçà du 10<sup>ème</sup> centile sur au moins 6 jours consécutifs. Si  $T_{ij}$  est la température moyenne au jour  $i$  dans la période  $j$  et  $T_{in10}$  est le 10<sup>ème</sup> centile du jour calendaire centré sur une fenêtre de 5 jours pour la période 1959-1973. CSDI est la somme du nombre d'occurrence annuel lorsque  $T_{ij} < T_{in10}$  pendant au moins 6 jours consécutifs.

### 2.1.1. Précipitations

(6)  $R_{10mm}$  désigne le nombre de jours annuel où les précipitations journalières  $P$  dépassent les 10 mm.

(7)  $R_{95}$  désigne le nombre de jours annuel où les précipitations journalières  $P$  dépassent le 95<sup>ème</sup> centile. Le 95<sup>ème</sup> centile est calculé sur la base de la période 1959-1973 et ne tenant compte que des jours humides où  $P \geq 1$  mm.

(8)  $R_{n95}$  désigne la quantité de précipitations tombée au cours des jours où les précipitations journalières  $P$  excèdent le 95<sup>ème</sup> centile

(9) CDD désigne la longueur maximum d'une période de jours consécutifs secs ; soit où  $P < 1$  mm. Si  $P_{ij}$  est le cumul de précipitation au jour  $i$  et de la période  $j$ . CDD est alors le nombre maximum de jours consécutifs dans chacun desquels  $P_{ij} < 1$  mm.

(10) CWD désigne la longueur maximum d'une période de jours consécutifs humides ; soit où  $P \geq 1$  mm. Si  $P_{ij}$  est le cumul de précipitation au jour  $i$  et de la période  $j$ . CWD est alors le nombre maximum de jours consécutifs dans chacun desquels  $P_{ij} \geq 1$  mm.

Dans la Table IV.1 qui suit, nous présentons les 25<sup>ème</sup>, 75<sup>ème</sup> et 95<sup>ème</sup> centiles pour les températures journalières moyennes et les 95<sup>ème</sup> et 99<sup>ème</sup> centiles pour les précipitations journalières pour chaque bassin. Ceux-ci sont calculés sur la période 1959-1973, période qui est considérée comme non affectée par les changements climatiques.

Table IV.1 : 25<sup>ème</sup>, 75<sup>ème</sup> et 95<sup>ème</sup> centiles pour les températures journalières moyennes (*Tmean*) et 95<sup>ème</sup> et 99<sup>ème</sup> centiles pour les précipitations journalières (*P*) pour les six bassins versants sur la période 1959-1973

Basin	Tmean (°C)			P (mm)	
	25 <sup>th</sup>	75 <sup>th</sup>	95 <sup>th</sup>	95 <sup>th</sup>	99 <sup>th</sup>
Herault	7.0	17.2	21.8	41.9	76.9
Orb	7.1	17.1	22.0	35.7	68.8
Aude	6.9	16.9	21.8	20.2	39.8
Agly	7.4	17.4	22.2	25.7	58.7
Tet	4.8	14.8	19.5	28.0	59.3
Tech	6.3	16.2	20.8	35.3	78.2

## 1.2. Evènements hydrologiques extrêmes

### 1.2.1. Débits minimum

Les débits minimums et leur évolution sur la période observée sont analysés selon deux variables qui sont le Débit Mensuel Minimal Annuel (QMNA) et le Débit seuil Minimale Non dépassé pendant n jours consécutifs (QCN).

Le QMNA est une valeur de débit d'étiage atteint par un cours d'eau une année donnée. Souvent, c'est le QMNA5 qui est donnée, c'est-à-dire le plus petit débit atteint par un cours d'eau sur une période de retour de 5 ans. Les données de QMNA sont collectées sur la banque HYDRO et pour la période 1959-2018 sur les stations hydrologiques de Agde, Béziers, Moussan, Estagel, Perpignan et Argelès (Table IV.2). Les QMNA sont calculés par la banque HYDRO à partir d'une loi log-normale, ou de Galton. Les tendances sont calculées avec un test de Mann-Kendall après vérification que les séries ne soient pas auto-corrélées.

Le QCN utilisé dans cette thèse est le QCN-3 (pour 3 jours consécutifs). Les données de QCN-3 sont également collectées sur le site de la banque HYDRO pour la période d'observation disponible de chaque fleuve et suivant une loi de Galton.

Table IV.2 : Caractéristiques des QMNA pour chaque fleuve considérant la plus longue période d'observation

Station Name	Code	River	Period	Nbr years	Nbr missing	% Filled	Mean QMNA (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Median QMNA (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Min QMNA (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Max QMNA (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )
Agde	Y237 2010	Heraul t	1959 - 2018	60	8	86,7	5,0	4,7	1,0	16,8
Beziers	Y258 4010	Orb	1966- 2018	53	1	98,1	5,6	4,6	2,0	17,8
Moussan	Y161 2010	Aude	1965- 2018	54	16	70,4	7,1	6,9	1,3	15,4
Estagel	Y066 4040	Agly	1967- 2018	52	9	82,7	0,1	0,0	0,0	1,2
Perpignan	Y047 4030	Tet	1971- 2018	48	2	95,8	1,8	1,6	0,3	6,7
Argeles	Y028 4060	Tech	1977- 2018	41	0	100	1,3	1,0	0,1	8,5

### 2.2.1. Débits de crues

#### Méthode de Gumbel

L'analyse fréquentielle des crues est une méthode statistique qui consiste à étudier les événements passés et leurs valeurs extrêmes afin de mieux connaître les probabilités d'apparition de ces événements dans le futur. Cela repose alors sur le choix d'une loi d'ajustement statistique ; parmi elles, la loi d'ajustement de Gumbel (1958) reste encore aujourd'hui largement utilisée dans l'étude des maximums annuels (Wickramaarachchi, 2021; Sadaoui, 2016; Dumas et al., 2015). C'est cette loi de distribution que l'on utilise ici pour calculer les débits seuils associés à différentes périodes de retour choisies. Une période de retour (ou intervalle de récurrence) T est définie comme l'intervalle de temps T qui s'écoule avant l'apparition d'une crue d'un débit fixé. La loi de Gumbel s'écrit de la manière suivante :

$$F(x) = e^{\left(-e^{\left(-\frac{x-0.5}{r}\right)}\right)}$$

avec  $\delta = \frac{x-0.5}{r}$  une fréquence empirique où x est le rang dans la série de données classé par ordre croissant et r est la taille de l'échantillon. Et  $u = -\ln(-\ln(\delta))$  la variable réduite de Gumbel.

La variable réduite  $u$  permet d'obtenir une relation linéaire avec les débits maximums annuels  $Q_{\max_{an}}$  triés par ordre croissant sur la série d'analyse (Figure IV.1). La relation s'écrit donc :

$$Q_{\max_{an}} = a * u + b$$

Pour une période de retour  $T_i$ , la période de non-dépassement associée s'écrit :

$$P_i = 1 - \frac{1}{T_i}$$

Le débit seuil associé à la période de retour  $T_i$  s'écrit alors :

$$Q_i = a * (-\ln(-\ln(P_i))) + b$$

Nous présentons les débits seuils obtenus pour chaque période de retour pour l'Aude à Moussan dans la Table IV.3.

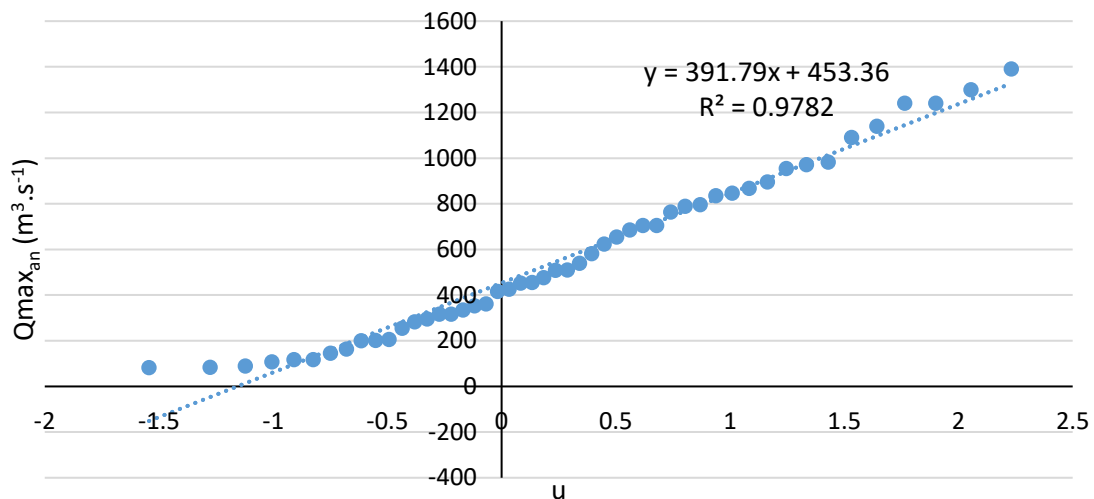


Figure IV.1: Relation entre la variable réduite de Gumbel  $u$  et les débits maximums annuels pour la série de l'Aude à Moussan

Table IV.3: Débits seuils de crues pour différentes périodes de retour sur l'Aude à Moussan. Les périodes de retour sont indiquées en nombre d'années

Période de retour ( $T_i$ )	100	50	20	10	5	2	1.2
Non-dépassement ( $P_i$ )	0.99	0.98	0.95	0.9	0.8	0.5	0.17
Variable réduite ( $u$ )	4.6	3.9	3.0	2.3	1.5	0.4	-0.6
Débit seuil de crue ( $Q_i$ )	2256	1982	1617	1335	1041	597	225

### Variable de drainage total Safran-Isba



La variable de drainage totale, calculée à partir des modélisations d'écoulement superficiel et d'infiltration par Isba, et se présentant comme la somme de ces deux variables, avait été présentée au Chapitre II pour sa capacité à reproduire fidèlement les débits écoulés annuellement. Elle permet dans ce chapitre d'identifier les jours d'écoulement maximum et les dépassements des quantiles extrêmes. La variable est donc faite de données journalières selon la grille de 8 km de résolution spatiale et sur la période 1959-2018.

Une moyenne de ce drainage total est réalisée par bassin versant. L'identification des événements extrêmes ici se présente comme les jours dépassant le 95<sup>ème</sup> centile des données de drainage total. Les résultats seront confrontés à ceux obtenus à partir de la méthode de Gumbel, présentée au paragraphe précédent.

## 2. Résultats

### 2.1. Evolution historique des événements extrêmes

#### 1.1.2. Températures

Pour toute période confondue, les mois de juillet et août sont ceux qui dénombrent le plus de jours excédant les 75<sup>ème</sup> et 95<sup>ème</sup> centiles, suivis de juin puis septembre (Figure IV.2). A l'inverse les mois qui dénombrent le plus de jours où les températures restent en deçà du 25<sup>ème</sup> centile sont janvier, suivi de décembre et février à égalité. Les périodes les plus récentes 1979-1998 et 1999-2018, montrent bien plus de jours excédants les 75<sup>ème</sup> et 95<sup>ème</sup> centiles de températures que lors de la première période 1959-1978. Par exemple, l'Hérault dénombreait 250 jours excédant le 75<sup>ème</sup> centile au cours des mois de juillet sur la période 1959-1978 contre 370 sur la période 1979-1998 et 440 sur la période 1999-2018. Le nombre d'évènement dépassant ces centiles semble alors avoir augmenté brusquement aux alentours des années 1980s pour ensuite ralentir au début du 21<sup>ème</sup> siècle. D'après les tests de Mann-Kendall appliqués sur l'ensemble de la période 1959-2018 (Figure IV.3), le nombre de jours excédant les 75<sup>ème</sup> et 95<sup>ème</sup> centiles sont en augmentation, de +16 pour le 75<sup>ème</sup> centile (Agly) à +41 pour le 95<sup>ème</sup> centile (Hérault). Au contraire le nombre de jours tombant en-deçà du 25<sup>ème</sup> centile est systématiquement en réduction, allant de -20 (Agly) à -30 jours (Tech). L'Hérault et l'Orb sont les bassins qui montrent les changements les plus marqués avec un gain/perte de jours de près de 30, suivis du Tech puis de la Têt, puis de l'Aude et de l'Agly ou les gains/pertes de jours avoisines les 20. De même le nombre d'évènement de vagues de chaleur est en hausse pour tous les bassins et hautement significatif (Figure IV.4) ; l'Hérault et le Tech sont les bassins qui

montrent la tendance la plus marquée avec +7 et +6 évènements par an sur la période 1959-2018. Les vagues de froid au contraire sont en diminution, avec des résultats aux tests statistiques hautement significatifs, et l’Hérault et l’Orb sont les bassins qui montrent la réduction la plus marquée avec -6 et -5 évènements respectivement contre -4 pour les autres bassins sur la période 1959-2018.

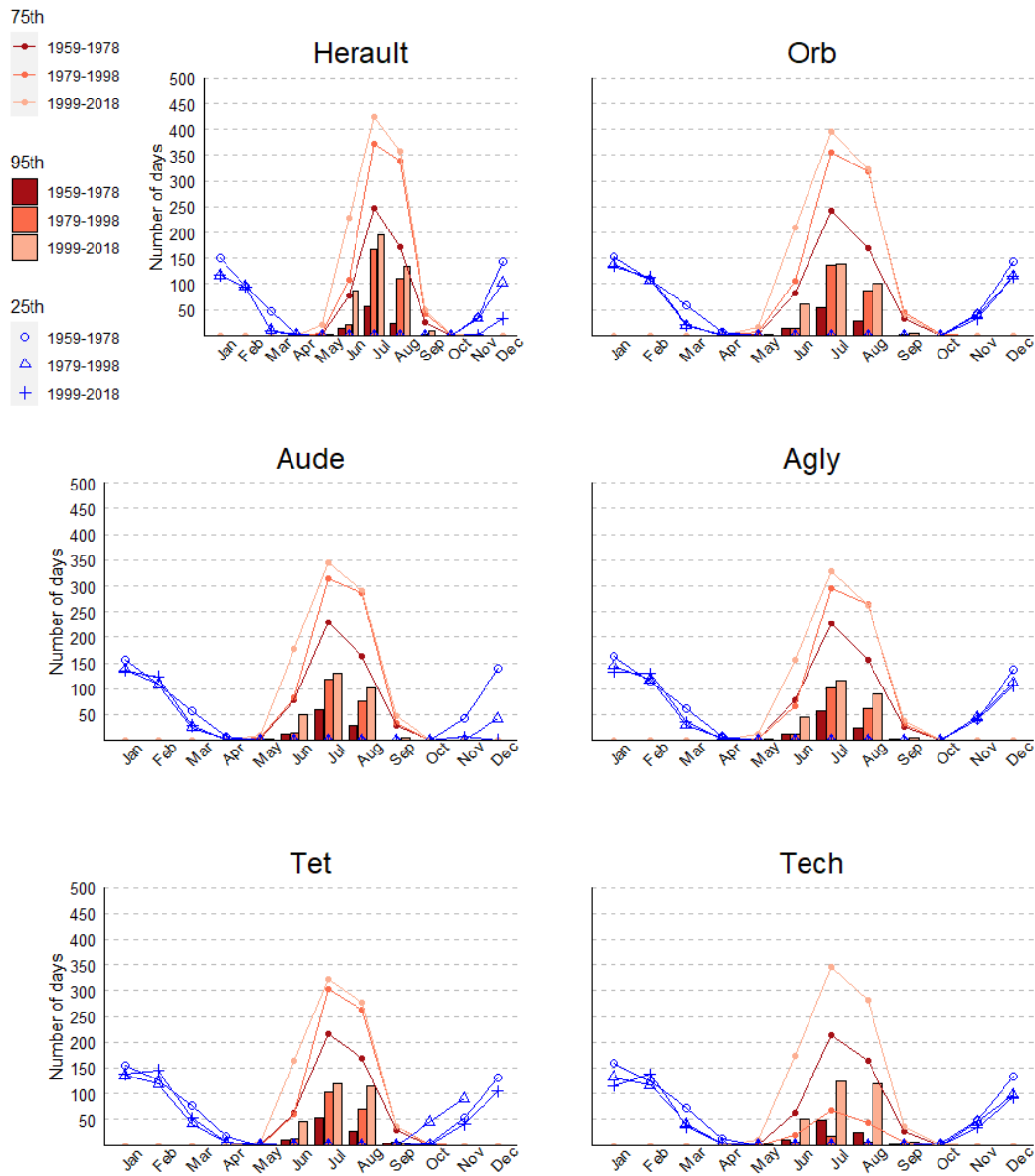


Figure IV.2: Nombre de jours par mois au total (somme des jours) qui excèdent les 95<sup>ème</sup> et 75<sup>ème</sup> centiles ou restent en-deçà du 25<sup>ème</sup> centile de températures pour tous les bassins et par mois sur les périodes 1959-1978, 1979-1998 et 1999-2018. Les centiles sont calculés sur la période journalière de référence considérée comme non affectée par les changements climatiques 1959-1973. Les 75<sup>ème</sup> et 95<sup>ème</sup> centiles sont calculés pour les mois de juin, juillet et août, le 25<sup>ème</sup> centile est calculé pour les mois de décembre, janvier et février

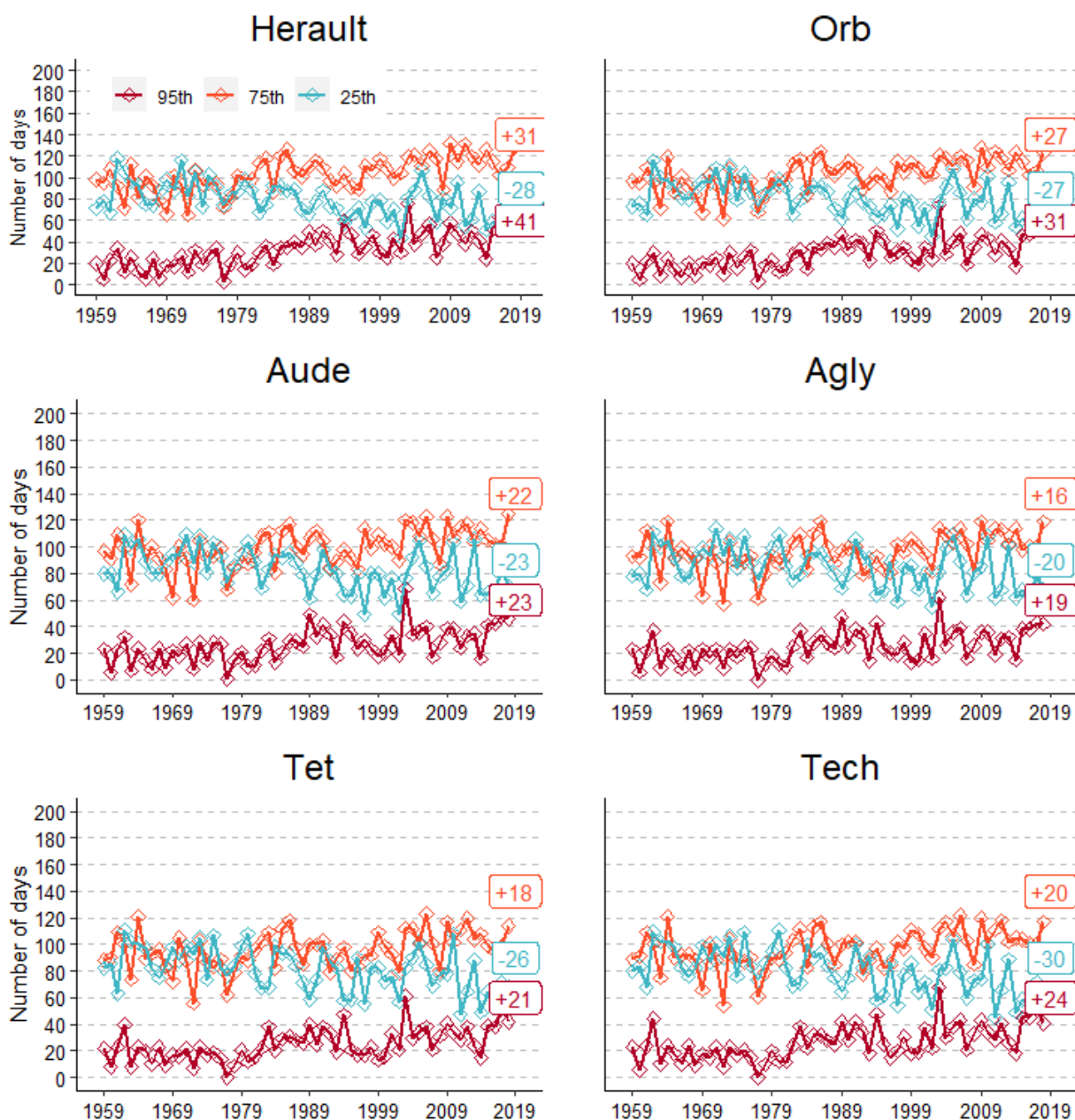


Figure IV.3: Evolution annuelle du nombre de jours excédant les 95<sup>ème</sup> et 75<sup>ème</sup> centiles de température et restant en dessous du 25<sup>ème</sup> centile. Les centiles sont calculés sur la période journalière de référence considérée comme non affectée par les changements climatiques 1959-1973. Les chiffres affichés pour chaque courbe sont la tendance totale sur l'ensemble de la période 1959-2018 calculés avec un test de Mann-Kendall et étant significatifs à  $p < 0.01$



Figure IV.4: Evolution annuelle du nombre de vagues de chaleur WSDI (vagues de froid CSDI) ; c'ad le nombre d'occurrence annuelle où au moins 6 jours consécutifs enregistrent une température au-dessus du 90<sup>ème</sup> centile (en-dessous du 10<sup>ème</sup> centile). Les 90<sup>ème</sup> et 10<sup>ème</sup> centiles sont calculés sur une fenêtre glissante de 5 jours sur la période journalière de référence considérée comme non affectée par les changements climatiques 1959-1973

### 2.1.2. Précipitations

L'évolution des événements extrêmes de précipitations montrent globalement des tendances à la baisse du nombre de ces événements ainsi que des cumuls enregistrés lors de ces événements. Néanmoins, ces résultats sont faiblement significatifs. Seuls les bassins de l'Hérault et l'Orb présentent des tendances légèrement à la hausse dans certains cas. La Figure IV.5 par exemple montre que les événements de précipitations dépassant le 99<sup>ème</sup> centile sont en augmentation pour l'Orb sur les mois de janvier, février et novembre sur les deux périodes les plus récentes 1979-1998 et 1999-2018 par rapport à 1959-1978. Pour l'Hérault on note un nombre d'événements particulièrement important lors de la seconde période 1979-1998, mais qui diminue de nouveau sur la période 1999-2018. Pour les autres bassins, le nombre de ces événements est globalement à la baisse. L'Aude par exemple montre un nombre d'événements dépassant le 99<sup>ème</sup> centile passant de 8 événements sur la période 1959-1978 au cours du mois d'octobre à 4 puis 2 sur les périodes les plus récentes 1979-1998 et 1999-2018 respectivement. Le mois de décembre en revanche semble montrer davantage d'événements extrêmes pour la Têt et le Tech. De même les cumuls enregistrés lors des jours dépassant le 95<sup>ème</sup> centile est davantage en réduction dans les bassins de l'Aude, l'Agly, la Têt et le Tech allant de -16% (Aude) à -29 % (Têt) sur la période 1959-2018. Pour l'Hérault cette réduction n'est que de -6% et pour l'Orb la tendance est à la légère hausse de +1,7 %. Enfin, l'évolution du nombre de jours dépassant le seuil des 10 mm de précipitations est en baisse dans tous les bassins versants mais seulement significatifs pour les bassins de l'Aude, l'Agly et la Têt, soit ceux situés dans la zone occidentale présentée dans le chapitre précédent (Figure IV.7).

Concernant le nombres de jours consécutifs secs/humides (CDD/CWD), l'Hérault est le seul bassin à présenter une augmentation des CDD, de +2 jours. La Têt, le Tech et l'Agly montrent en revanche une légère réduction des CDD de -3 (Têt et Tech) à -7 (Agly). Les CWD montrent une légère diminution significative pour l'Agly, l'Aude et le Tech à hauteur de -1 (Agly) à -3 (Tech) (Figure IV.8).

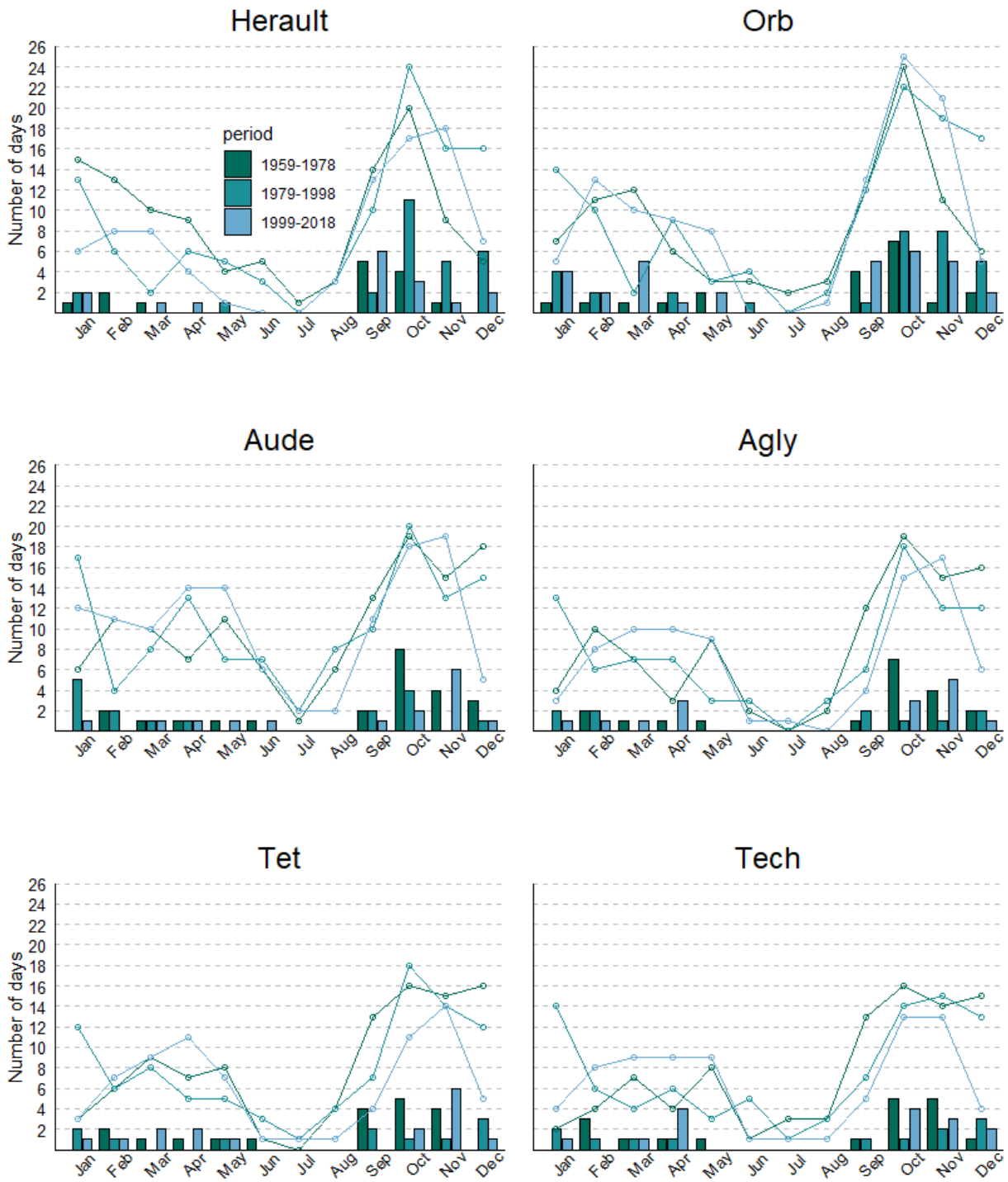


Figure IV.5 : Nombre de jours par mois au total (somme des jours) enregistrant des précipitations extrêmes pour chaque bassin versant sur les périodes 1959-1978, 1979-1998 et 1999-2018. Les lignes et points avec des losanges indiquent le nombre de jours total sur chaque période et pour chaque mois où le 95<sup>ème</sup> centiles est excédé. Les barres représentent les jours où le 99<sup>ème</sup> centile est excédé. Les centiles 95 et 99 sont calculés sur la période journalière de référence considérée comme non affectée par les changements climatiques 1959-1973 et pour des précipitations  $P$  qui dépassent ou égalent 1 mm ( $P \geq 1$  mm)

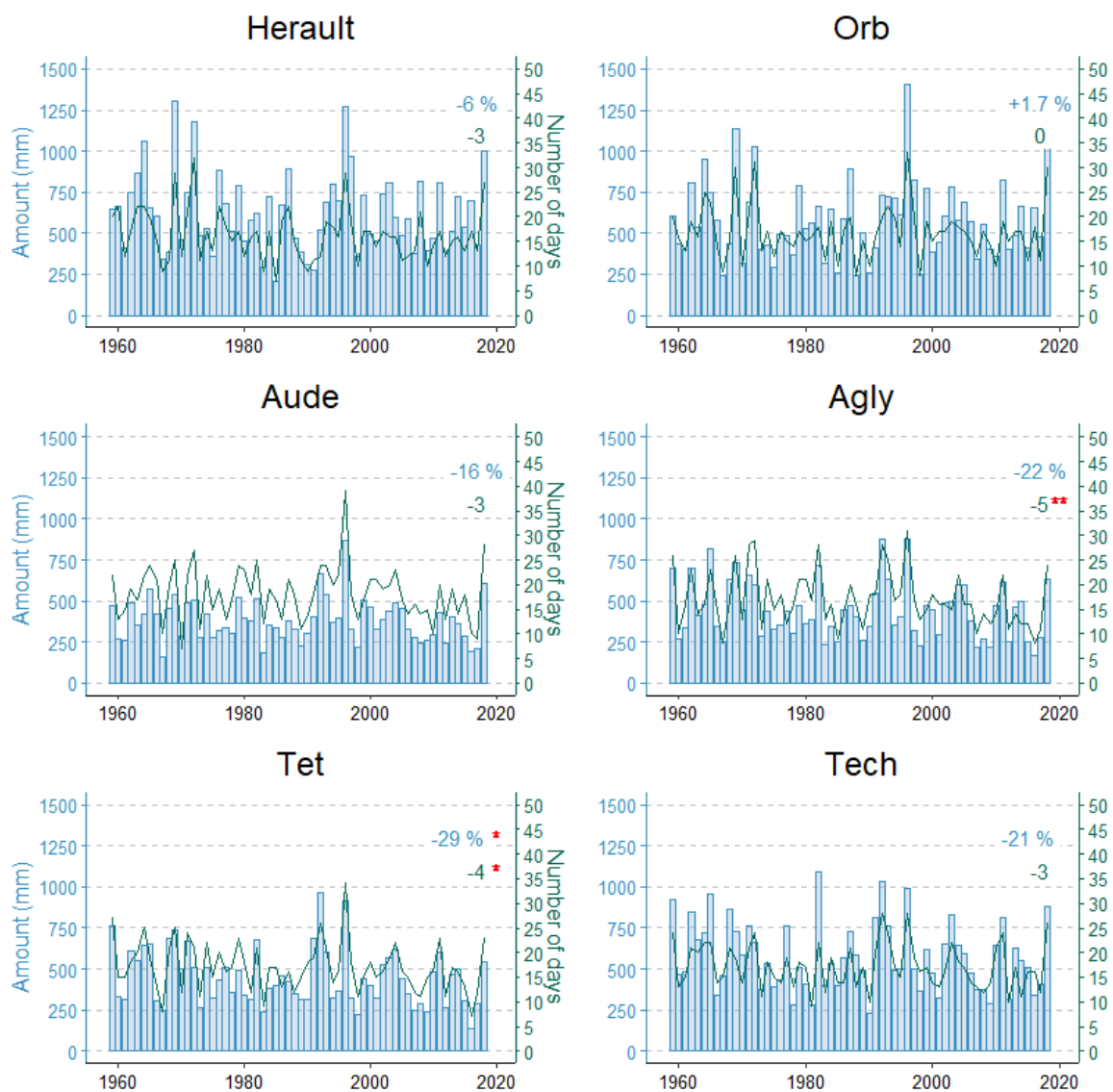


Figure IV.6: Evolution de la quantité de précipitations tombées les jours excédant le 95<sup>ème</sup> centile (bleu) et évolution du nombre de jours excédant le 95<sup>ème</sup> centile (vert) au cours d'une année sur la période 1959-2018. Le centile est calculé sur la période journalière considérée comme non affectée par les changements climatiques 1959-1973 (15 ans) et où les précipitations  $P$  dépassent ou égalent 1 mm ( $P \geq 1$  mm). Les valeurs indiquent les résultats des tests de Mann-Kendall. Les valeurs accompagnées de 1 (2) étoile(s) rouge(s) sont les résultats pour lesquels la  $p$ -value est de  $p < 0.1$  ( $p < 0.05$ )

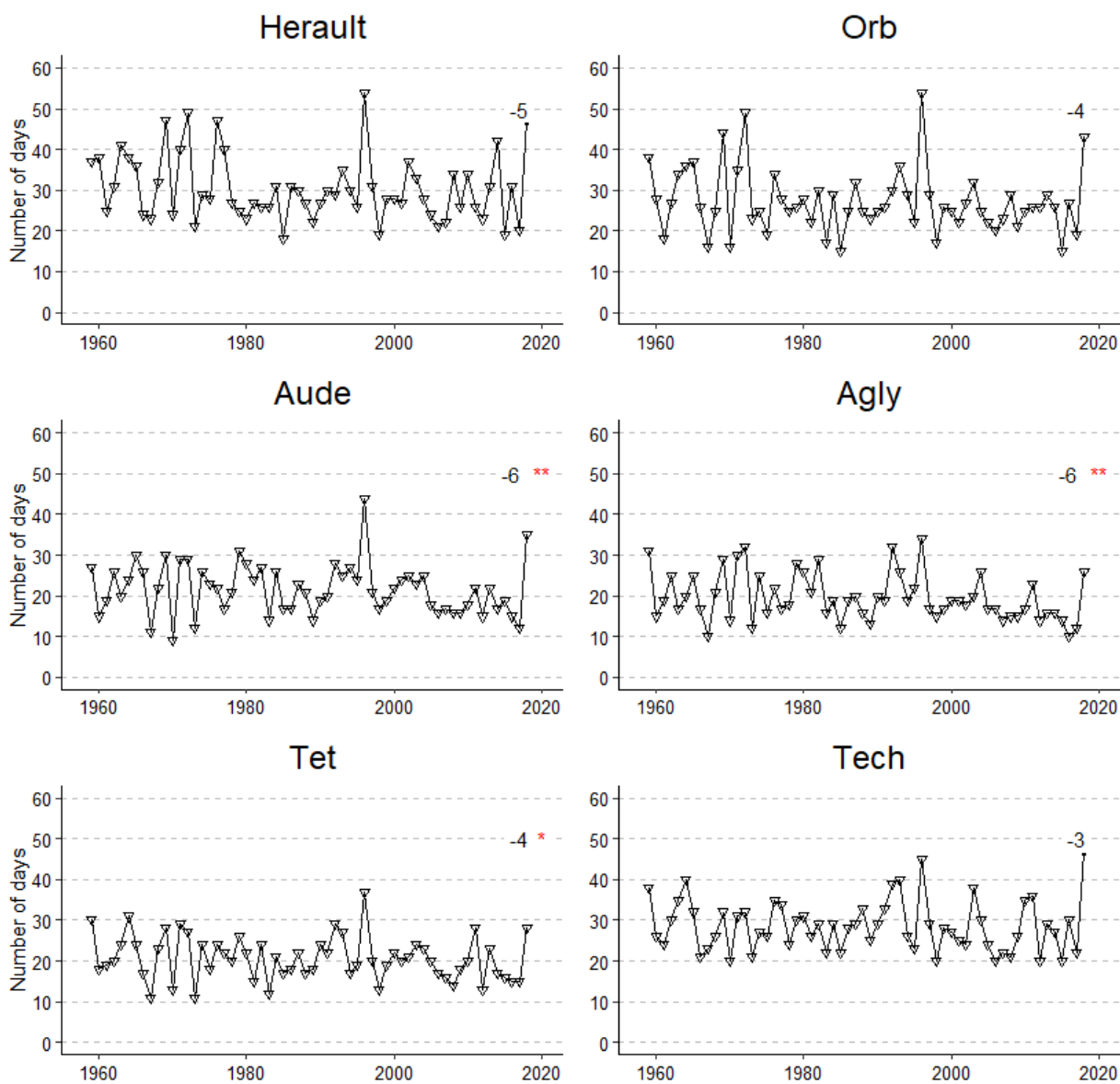


Figure IV.7: Evolution du nombre de jours annuel où les précipitations dépassent 10 mm



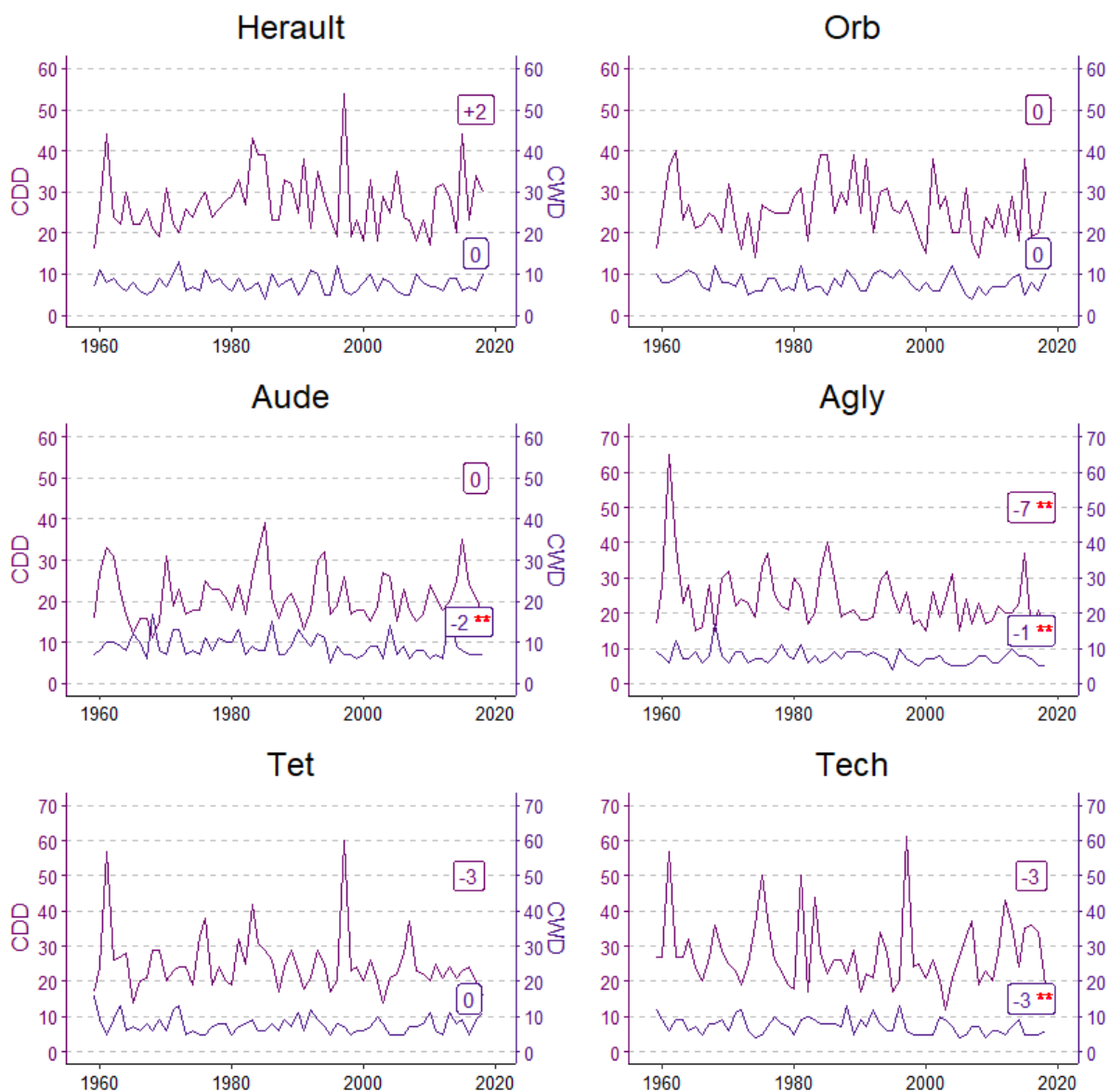


Figure IV.8: Evolution du nombre de jours consécutifs maximum secs CDD (ou les précipitations sont en-dessous de 1 mm) et du nombre de jours consécutifs maximum humides CWD (ou les précipitations sont au-dessus de 1 mm). Les chiffres indiquent pour chaque courbe sont les résultats des tests de Mann-Kendall, ceux accompagnés de 2 étoiles sont ceux pour lesquels la significativité est de  $p < 0.05$ . Les résultats non-accompagnés d'une étoile ne sont pas significatifs

### 3.1.2. Débits minimum

Les débits minimum montrent une tendance également à la baisse sur la période historique (Figure IV.9) et ceci est confirmée par l'écoulement total modélisé par Safran-Isba (Table IV.4). Néanmoins quelques différences peuvent être notées entre les observations et les modélisations : dans les observations, l'Aude semble être le bassin le plus touché, suivi des bassins de l'Hérault et l'Orb. La donnée modélisée montre pour tous les bassins une réduction de la moyenne des écoulements totaux minimum annuels, et notamment dans les bassins de l'Hérault, l'Orb, l'Aude et l'Agly où la tendance est hautement significative et affiche de 35 (Orb) à 43 % (Agly) de réduction. Elle affiche également une augmentation du nombre de jours annuel en-deçà du 25<sup>ème</sup> centile, davantage marquée pour l'Hérault où celle-ci est hautement significative et atteint +48 jours. En contraste, l'Aude est le bassin qui affiche la plus petite augmentation avec +12 jours et la plus basse significativité (0.45).

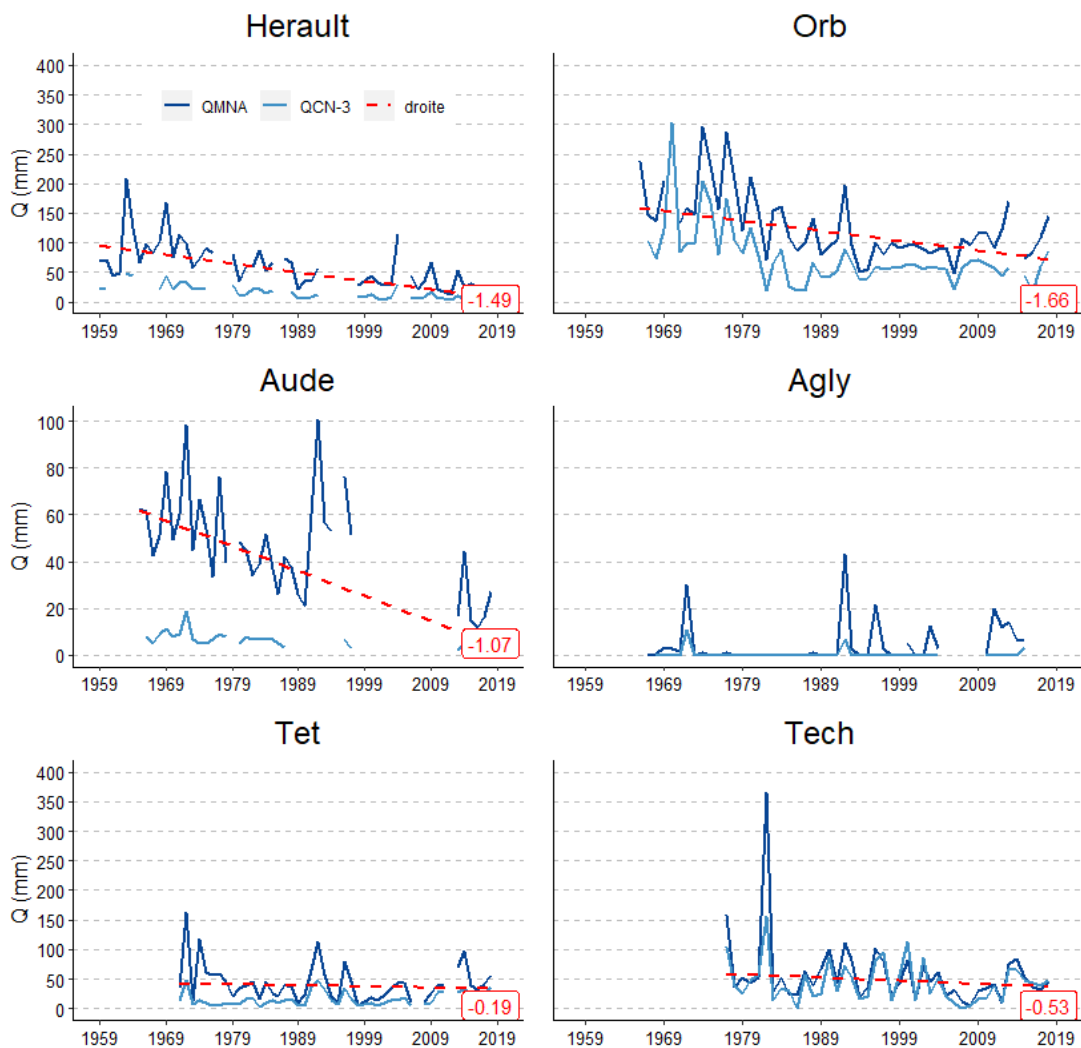


Figure IV.9: Evolution annuelle des débits minimum QMNA et QCN-3 pour chaque fleuve et tendances linéaires de Mann-Kendall pour QMNA

Table IV.4: Evolution des débits minimum annuels sur la période 1959-2018. Tendances réalisées avec un test de Mann-Kendall

Basin	25 <sup>th</sup> centile (mm/day)	Number of days		Mean annual	
		trend (total period)	pv	trend (%)	pv
<b>Herauld</b>	0.1	48	<0.01	-36	0.03
<b>Orb</b>	0.08	24	0.21	-35	0.04
<b>Aude</b>	0.07	12	0.45	-36	0.03
<b>Agly</b>	0.025	28	0.12	-43	<0.01
<b>Tet</b>	0.07	33	0.12	-23	0.27
<b>Tech</b>	0.13	37	0.14	-10	0.66

#### 4.1.2. Evènements de crues

Les débits seuils pour différentes périodes de retour (notées TX) pour chaque fleuve sont indiqués dans la Table IV.5. La Têt est le fleuve qui indique les plus petits débits, avec un seuil à T2 de  $166 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  et l'Hérault est le fleuve qui montre les plus grands débits avec un seuil à T2 de  $644 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Le comptage du nombre de jours où les débits dépassent le seuil d'une période de retour T2 est présenté pour chaque fleuve dans la Figure IV.10 pour 2 à 3 périodes d'une vingtaines d'années chacune. Ces comptages se sont fait sur la base des séries des stations de jaugeage situées le plus près de l'embouchure des fleuves afin de pouvoir les comparer entre eux. Les séries de l'Hérault, l'Orb, l'Aude et l'Agly étaient ainsi assez longues pour pouvoir découper l'analyse en 3 périodes étant les années 1960 à 1980, suivi de 1980 à 2000 puis de 2000 à 2018. Pour la Têt et le Tech seules les 2 dernières périodes ont pu être analysées. De façon générale, on constate d'une part une réduction du nombre de jours enregistrant des débits excédant le seuil T2. Par exemple, l'Hérault compte 33 jours dépassant ce seuil au cours de la période 1959-1978, il en compte encore 28 sur la période 1979-1998 puis plus que 17 sur la période 1999-2018. La Têt et le Tech en compte respectivement 21 et 27 au cours de la période 1981-1999 contre 19 et 17 sur la période 2000-2018. L'Agly et l'Orb eux montrent un ressaut au cours des années 1980-1990 avec avant cette période 15 et 18 jours respectivement au-dessus du seuil T2, suivi de 22 et 27 sur la période 1981-1999 puis 8 et 19 sur la période finale 2000-2018. Ce ressaut des années 1980s et 1990s est observé sur l'Hérault avec une période de retour T10 ; en effet, une seule crue de cet ordre-là est observée sur les périodes respectives 1959-1978 et 1999-2018 contre 3 sur la période 1979-1998. Cela coïncide avec l'observation faite précédemment sur le nombre d'évènement de précipitations extrême dépassant le 99<sup>ème</sup> centile

où le nombre de ceux-ci était plus important sur la période 1978-1999 pour les mois d'octobre, novembre et décembre. Une seconde observation faite à partir de ces résultats et un décalage dans la temporalité de ces crues T2 ; ceci est d'autant vrai pour l'Agly, la Têt et le Tech. En effet, la période d'occurrence des crues T2 sur ces fleuves et sur la période 1981-1999 étaient les mois de décembre et janvier, de loin majoritaires face aux autres mois de l'année. Au cours de la période 2000-2018, ces occurrences se sont étalées des mois d'octobre à mai, après une prévalence des mois de décembre, puis mars, avril, mai.

Le drainage total calculé par Isba montre une tendance générale à la baisse des écoulements mensuels maximaux ainsi que du nombre de jours dépassant le 95<sup>ème</sup> centile pour les bassins allant de l'Aude au Tech. Les bassins de l'Hérault et de l'Orb ne montrent aucune tendance. Généralement, le dépassement du seuil au 95<sup>ème</sup> centile du drainage total modélisé correspond aux jours de dépassement des débits de la période de retour T2 observée par les stations de jaugeage (Figure IV.11, Table IV.6). Néanmoins, certains évènements observés ne sont pas détectés par Safran-Isba ; c'est le cas par exemple la crue des 15 et 16 octobre 2018 sur l'Aude qui avait fait causé beaucoup de dégâts matériels et humains et qui enregistrée par les stations de jaugeage mais pas détectée par les données modélisées. Par ailleurs, la modélisation du drainage total à tendance à surestimer le nombre d'évènements extrêmes, d'autant plus pour l'Aude et l'Agly. C'est finalement pour les bassins désignés comme méditerranéens et faisant ainsi partie de la zone orientale dans le chapitre précédent (Hérault, Orb et Tech) que le nombre de crues détectées ainsi que leur date d'occurrence coïncident le plus ; le drainage total surestime le nombre de crues à hauteur de 21 (Tech) à 30 % (Orb) et les dates entre modélisations et observations correspondent à hauteur de 70 et 72 % pour l'Hérault et l'Orb respectivement.

*Table IV.5: Débits seuils (en  $m^3.s^{-1}$ ) pour des période de retour T2, T5, T10, T20, T50 et T100 pour chaque fleuve, calculés à partir des périodes observées respectives*

<b>Return period T</b>	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>5</b>	<b>2</b>
<b>Herault</b>	1672	1502	1276	1101	919	644
<b>Orb</b>	1491	1314	1079	897	708	422
<b>Aude</b>	2256	1982	1617	1335	1041	597
<b>Agly</b>	864	751	601	484	363	180
<b>Tet</b>	622	547	446	369	288	166
<b>Tech</b>	716	630	515	427	334	195

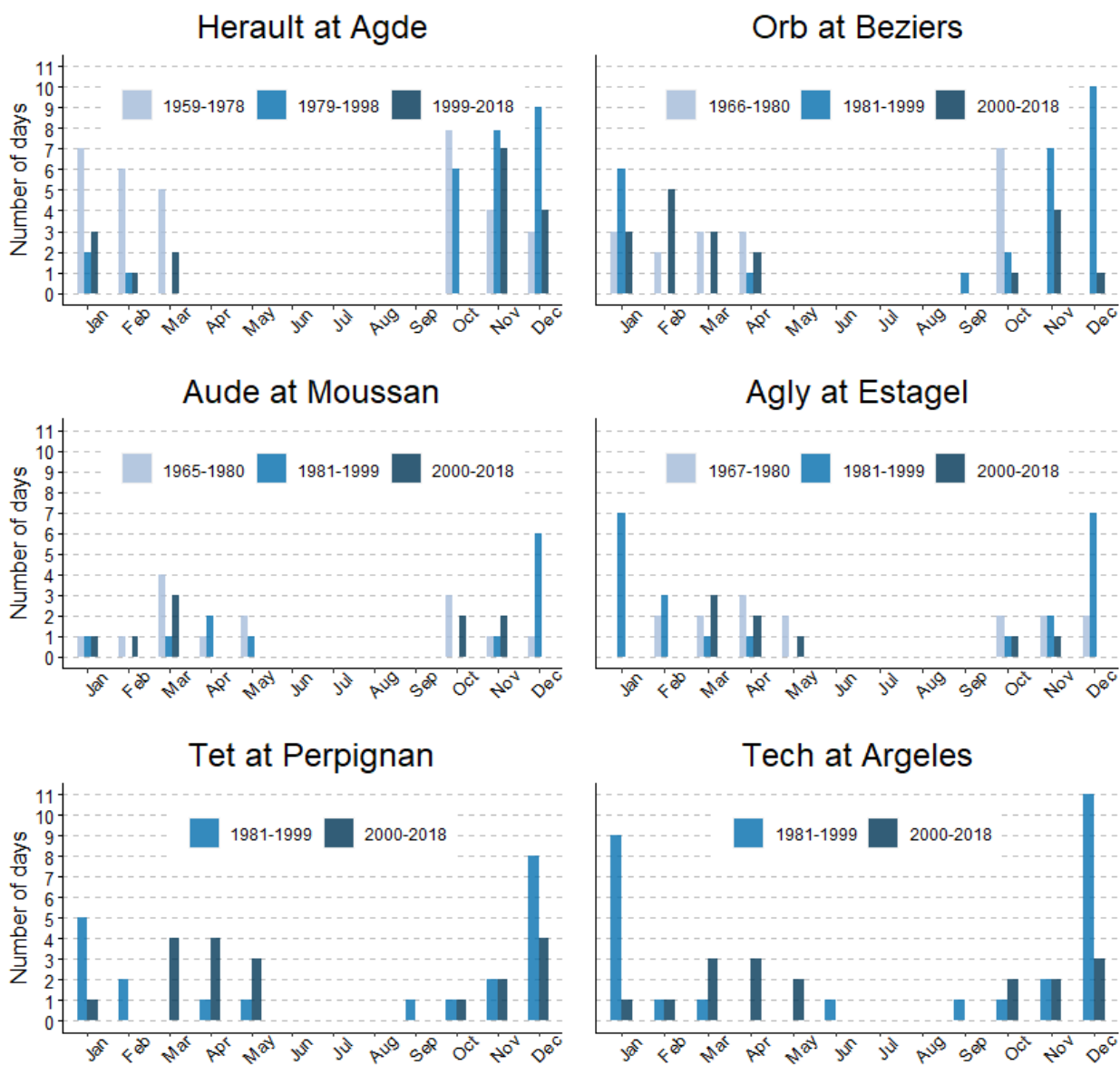


Figure IV.10. Nombre de jours en crues pour une période de retour T2 par mois et pour différentes périodes considérées

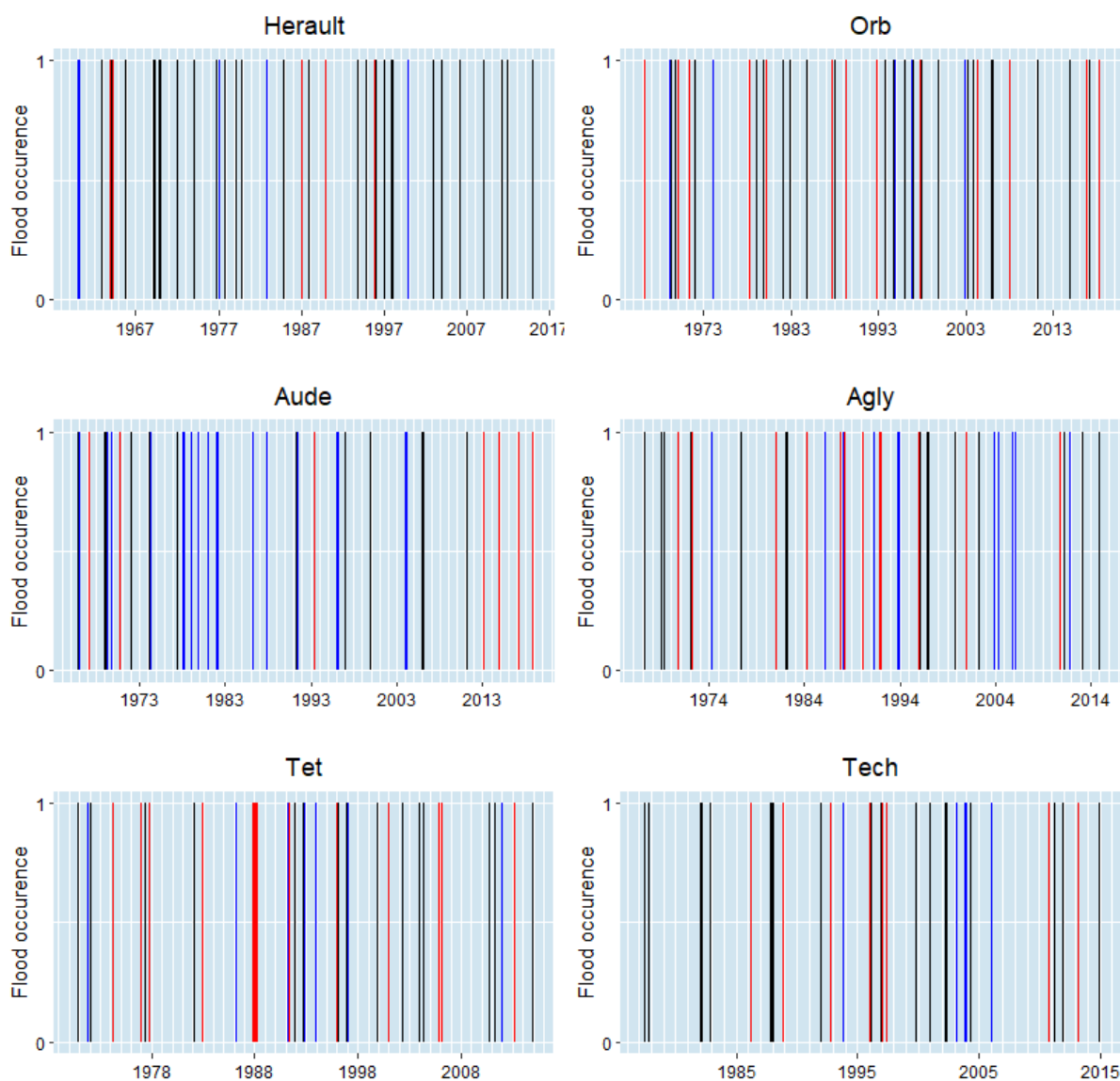


Figure IV.11: Comparaison des jours détectés comme jours de crues entre les séries temporelles journalières de données observés par les stations de jaugeage (rouge), modélisées par les écoulements de drainage total par le modèle Isba (bleu). En noir sont les évènements détectés le même jour entre les deux méthodes. Note : le seuil utilisé pour les séries observées est une période de retour T2, pour les séries modélisées le seuil est le 95<sup>ème</sup> centile des maximums mensuels de chaque série

Table IV.6: Nombre d'évènements de crues enregistrés pour chaque bassin selon les données observées et modélisées sur la période de service des stations de jaugeage. *Obs flood* : le nombre de jours en crue de période T2 enregistré par les observations. *Mod flood* : le nombre de jours dépassant le 95<sup>ème</sup> centile des variables de drainage et infiltration. *In commun* : le pourcentage d'évènements détectés par *Mod flood* parmi la totalité des évènements détectés par observation

Basin	T2 (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	95 <sup>th</sup> max drainage (mm)	Obs flood	Mod flood	In commun (%)
Herault	644	13.5	79	96	70
Orb	422	14.5	64	83	72
Aude	597	4	35	160	63
Agly	195	5.7	46	114	57
Tet	166	4.6	50	88	54
Tech	195	10.7	48	58	56

## 2.2. Evolutions pour la période projetée des évènements extrêmes

### 1.2.2. Températures

Les RCMs montrent tous une augmentation du nombre de jours dépassant le seuil du 95<sup>ème</sup> centile de température sur la période 2006-2100 et sous un scénario rcp 8.5 (Figure IV.12). Cette augmentation est homogène sur l'ensemble de la zone d'étude, d'amont en aval et d'un bassin versant à l'autre. La magnitude de cette évolution est cependant différente d'un modèle à l'autre. Le modèle RCA 4 suivi du RACMO 22<sup>E</sup> sont les modèles qui montrent l'augmentation la plus forte avec de 8 à 10 jours de plus par décennie dépassant le 95<sup>ème</sup> centile de températures. Au contraire le modèle WRF 381 P est de loin celui qui montre l'augmentation la plus faible avec moins de 5 jours de plus dépassant ce centile et par décennie.

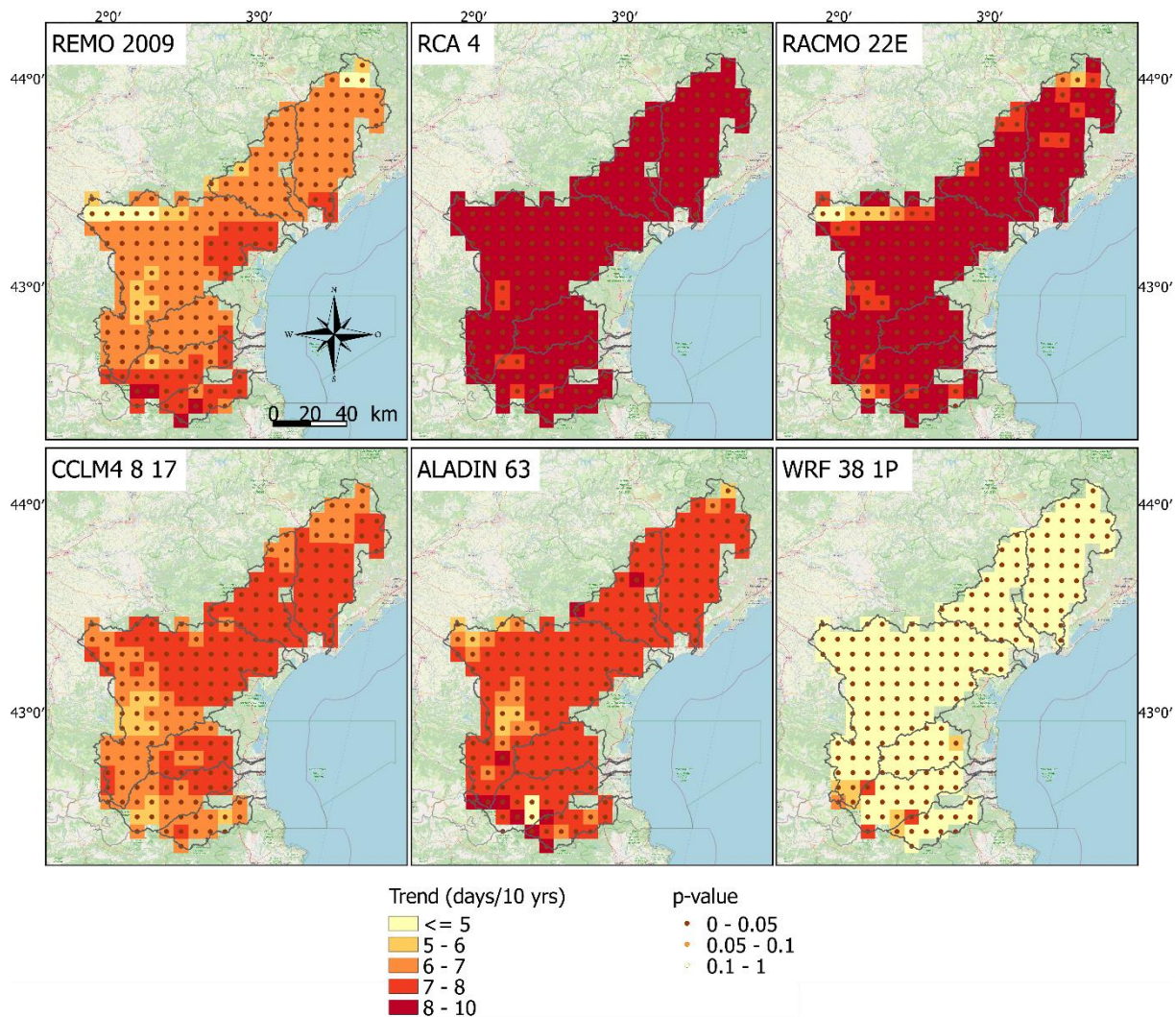


Figure IV.12: Tendance linéaire effectuée avec un test de Mann-Kendall pour l'évolution du nombre de jours dépassant le 95<sup>ème</sup> centile de température sur la période 2006-2100 sous un scénario rcp 8.5 et pour 6 RCMs. Le 95<sup>ème</sup> centile est calculé par pixel et sur la période de référence considérée comme non affectée par les changements climatiques 1959-1973 pour les mois de juin, juillet et août

### 2.2.2. Précipitations

Les RCMs montrent des résultats contrastés dans l'évolution des évènements dépassant le 95<sup>ème</sup> centile de précipitations. Globalement, peu de changements sont détectés dans le nombre de jours enregistrant ces évènements : quelques RCMs (REMO 2009, CCLM4-8-17 et WRF 38 1P) néanmoins montrent des réductions significatives dans certaines régions de l'amont du bassin versant de l'Aude (Figure IV.13). Pour l'évolution des cumuls tombés lors de ces évènements au contraire les modèles REMO 2009, CCLM4-8-17 et RACMO 22E indiquent que certaines régions de l'aval des bassins versants de l'Aude, l'Orb et l'Hérault montrent des augmentations de l'ordre de 1 à 5 mm supplémentaire par décennie. Cela rejoindrait les observations faites sur les différences de réponses aux changements climatiques entre une zone occidentale (amont de l'Aude et tendance à la baisse du nombre de jours d'évènements



extrêmes) et une zone orientale (aval de l'Aude, bassins de l'Orb et de l'Hérault et tendance à la hausse des cumuls lors des événements extrêmes).

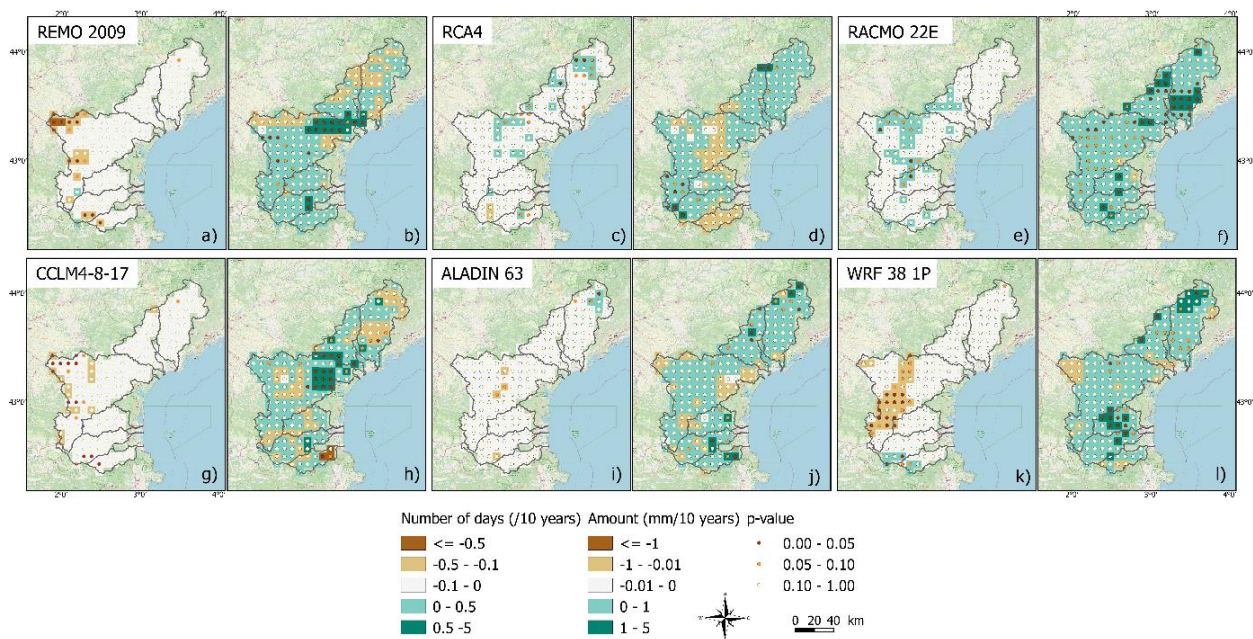


Figure IV.13: Tendances linéaires sur une résolution de 8 km des précipitations extrêmes (95<sup>ème</sup> centile) sur la période 2006-2100 et pour un scénario RCP 8.5 pour a,c,e,g,i,k) Changement du nombre de jours par décennies enregistrant des évènements extrêmes et b,d,f,h,j,l) Changement de la quantité moyenne de précipitations tombées lors des évènements extrêmes par décennie. Le 95<sup>ème</sup> centile est calculé sur la période de référence considérée comme non affectée par les changements climatiques 1959-1973 et pour des précipitations supérieures à 1 mm ( $P > 1\text{mm}$ )

### 3. Discussion

Les évènements extrêmes de températures montrent des évolutions hautement significatives et homogènes dans toute la région sur la période historique. Et les RCMs s'accordent sur la continuité de cette évolution au cours des décennies à venir. Jusqu'à présent néanmoins, on notait une distinction entre bassins versants situés dans la zone orientale et notamment Orb et Hérault et ceux situés dans la zone occidentale. Les bassins de la zone orientale jusqu'alors étaient sujets à une augmentation plus importante des températures moyennes annuelles et l'augmentation du nombre et intensité des évènements extrêmes de températures (Figure IV.14). En revanche ces différences semblent s'effacer pour les projections futures. Cette augmentation des évènements extrêmes de températures posent, en outre des problèmes de santé publique, des inquiétudes liées aux bouleversements potentiels à venir pour le secteur agricole qui dépend fortement de ce paramètre. Ces bouleversements sont d'ordre divers, certains directs comme les répercussions sur les cycles végétatifs des plantations, la capacité de

celles-ci à subir des évènements dépassant un certain seuil de température ainsi que leur durée dans le temps. D'autres bouleversements arrivent de façon indirecte comme par exemple le développement ou la résistance de certains nuisibles, et les incidences sur le contenu en eau des sols, l'évapotranspiration et la modification en générale du cycle de l'eau.

Les évènements de précipitations extrêmes et les crues qu'ils entraînent ont des impacts socio-économiques importants et l'évolution de leur fréquence ainsi que leur magnitude au cours des décennies à venir fait l'objet d'un intérêt croissant, d'autant plus en Méditerranée où ces évènements représentent le principal aléa naturel (Llasat et al., 2013). Pourtant de nombreuses incertitudes perdurent sur l'évolution du nombre et intensité de ces évènements. Le dernier rapport de l'IPCC souligne un faible accord entre les modèles dans le sens des changements pour l'évolution des évènements de précipitations extrêmes en Méditerranée (Masson-Delmotte et al., 2021).

Dans notre zone d'étude, peu de changements dans les extrêmes de précipitations sont constatés. Pourtant, la quantité de précipitations tombées pendant les évènements extrêmes représentent une part importante des cumuls annuels (Table IV.7) ; sur la période 2004-2018, ces évènements extrêmes représentaient de 24 à 33 % le cumul moyen annuel du bassin de la Têt et de l'Orb respectivement. Si les cumuls moyens annuels montrent une tendance à la baisse (de l'ordre de -10 à -16 % pour l'Orb et la Têt respectivement), les cumuls tombés lors des évènements extrêmes subissent une baisse généralement plus importante allant jusqu'à -36 % dans le bassin de la Têt. La Têt et le Tech sont les deux bassins où l'évolution de la proportion occupée par les pluies extrêmes sur le cumul annuel est la plus importante et va à la baisse. De façon générale, le nombre d'évènements ainsi que la quantité de précipitations tombées lors de ces évènements a tendance à être en baisse et cela est légèrement plus marqué dans les bassins du centre et du sud, soit ceux qui sont inclus dans la zone occidentale (à l'exception du Tech qui fait partie de la zone orientale). La Figure IV.15 résume les tendances linéaires observées pour le nombre de jours dépassant le seuil du 95<sup>ème</sup> centile ainsi que les cumuls enregistrés lors de ces jours sur la période 1959-2018. Elle souligne d'une part que les tendances sont faiblement significatives sur l'ensemble de la zone d'étude, et que, le sens des évolutions du nombre de jours ainsi que des cumuls va à la réduction pour les bassins de l'Aude, l'Agly, la Têt et le Tech alors que le sens des cumuls de précipitations extrêmes va à l'augmentation pour les bassins de l'Hérault et l'Orb. Ceci est relativement en accord avec d'autres travaux menés entre autres sur notre zone d'étude dans lesquels les auteurs rapportent des tendances à la hausse des évènements extrêmes de précipitations dans les flancs sud-est du massif Central ainsi que

dans la vallée du Rhône et ses versants sud-est (Côte d'azur et Alpes) (Blanchet et al., 2018; Trambly and Somot, 2018; Ribes et al., 2019; Pujol et al., 2007). Les mêmes auteurs identifient un pattern hétérogène au-dessus de notre zone avec des tendances à la légère hausse de ces événements en plaine et plutôt en baisse dans les reliefs montagneux (Haut-Languedoc, Pyrénées). D'une certaine manière, les résultats sont aussi en accord avec le Chapitre III. La Têt et l'Aude appartiennent à la zone occidentale et sont donc placés davantage sous l'influence des masses d'air atlantiques. Celles-ci ont moins de variabilité en termes d'extrêmes.

Pour les projections d'ici la fin du siècle, le scénario climatique extrême rcp 8.5 a montré que les changements observés lors de la période historique se poursuivraient, montrant des évolutions lentes. Les observations principales sont une légère diminution du nombre de jours aux précipitations extrêmes dans la partie amont des bassins de l'Aude, la Têt et le Tech de -2 à -4 jours par an environ et une tendance à l'augmentation des cumuls enregistrés lors de ces événements de 1 à 4 mm, et davantage pour l'Hérault et l'Orb. Dans la littérature, on peut noter que notre zone d'étude se trouve sur un entre-deux : avec des bassins versants situés en Méditerranée Nord allant de la Côte-d'Azur à l'Est de la Croatie qui affichent des tendances à la hausse des événements extrêmes de précipitations pour les décennies à venir et selon plusieurs scénarios climatiques, alors que la partie Sud de la Méditerranée montre des tendances beaucoup moins certaines et parfois à la baisse (e.g. Trambly and Somot, 2018).

Les évolutions du nombre de jours en crue sont généralement en baisse d'après les deux méthodes utilisées qui sont celles de Gumbel et l'identification des événements qui dépassent le seuil du 95<sup>ème</sup> centile obtenu à partir de la variable de drainage total. On observe en outre que les bassins de l'Aude, l'Agly, la Têt et le Tech montrent une réduction plus franche que les bassins de l'Orb et l'Hérault. Ceci serait en accord avec les observations faites sur l'évolution des événements de précipitations extrêmes, qui montrent aussi des réductions plus marquées dans les bassins versants du Sud. En accord avec nos résultats, Trambly et al., (2019) montraient une tendance à la baisse du nombre de jours aux débits dépassant les 95 et 99<sup>ème</sup> centile sur le pourtour du Golfe du Lion. Les auteurs associaient ces réductions à une baisse de l'humidité de la surface des sols sur la période 1958-2018. En outre, plusieurs auteurs travaillant sur de grandes échelles géographiques ont pu remarquer que des changements dans les précipitations et/ou leur intensité n'impliquent pas forcément d'augmentation de l'occurrence des crues (Woldemeskel and Sharma, 2016; Ivancic and Shaw, 2015). Ceci est dû à la complexité du système qui relie les précipitations aux écoulements dans les cours d'eau même : en plus du contenu en humidité des sols, pour un cumul de précipitations en un point donné,

l'écoulement et infiltration résultants peuvent considérablement varier dans l'espace et le temps en fonction entre autres de la pente, le couvert végétal ou par extension l'occupation du sol. Il est vrai que l'idée d'une augmentation du nombre de crues est largement véhiculée et on s'attendrait à ce que les résultats pointent vers ce type d'observation. Mais depuis récemment, certains auteurs commencent à montrer que la perception de l'augmentation du nombre de crues par le public serait davantage dû à un problème de vulnérabilité croissante, entre autres due à des facteurs humains tels de la hausse de l'urbanisation, l'augmentation de la population dans des zones particulièrement exposées à ces vulnérabilités et également le manque de manœuvre, à échelle individuelle et collective, dans la mise en place de mesures préventives en cas de risques de crues (Champonnois and Erdlenbruch, 2021; Trambly et al., 2019).

Une autre composante d'importance pour la quantité d'écoulement superficiels et l'occurrence des crues et le soutien des débits minimum est le contenu en humidité des sols. Le contrôle exercé par les conditions initiales d'humidité des sols sur la génération des écoulements superficiels s'est avéré particulièrement importante dans les bassins versants escarpés et aux sols profonds, où la topographie joue un rôle significatif sur les processus hydrologiques (Penna et al., 2011; Scipal et al., 2005). Et c'est le cas dans notre zone d'étude. Non seulement le climat de type méditerranéen apporte des événements de précipitations extrêmes en automne mais en plus les forts reliefs apportés par les massifs des Pyrénées, Hauts plateaux du Languedoc et Cévennes rendent la région particulièrement propice à des écoulements superficiels importants. Le contenu en eau des sols montre une diminution généralisée à l'ensemble de la zone d'étude sur la période historique et à un taux allant de -0.01 à -0.02 % par an (Figure IV.16). Les milieux de montagne ont naturellement un contenu en eau plus important que les milieux de plaine mais les données Safran semblent montrer une réduction homogène des deux types de milieux. La réduction du contenu en eau des sols peut ainsi avoir un impact non seulement sur les débits minimums, en les faisant diminuer à leur tour, mais également sur le nombre de crues. Dans le cas d'occurrence de précipitations extrêmes sur des sols secs, ceux-ci auront tendance à intercepter l'eau reçue par l'évènement de précipitations, et donc ralentir l'effet du ruissellement superficiel et par extension la possible occurrence d'une crue (Bennett et al., 2018; Woldemeskel and Sharma, 2016). La diminution constatée sur les débits minimums aussi résulter de la baisse du niveau d'eau en souterrain (Lespinas, 2008) et des prélèvements importants en été (Collet et al., 2014).

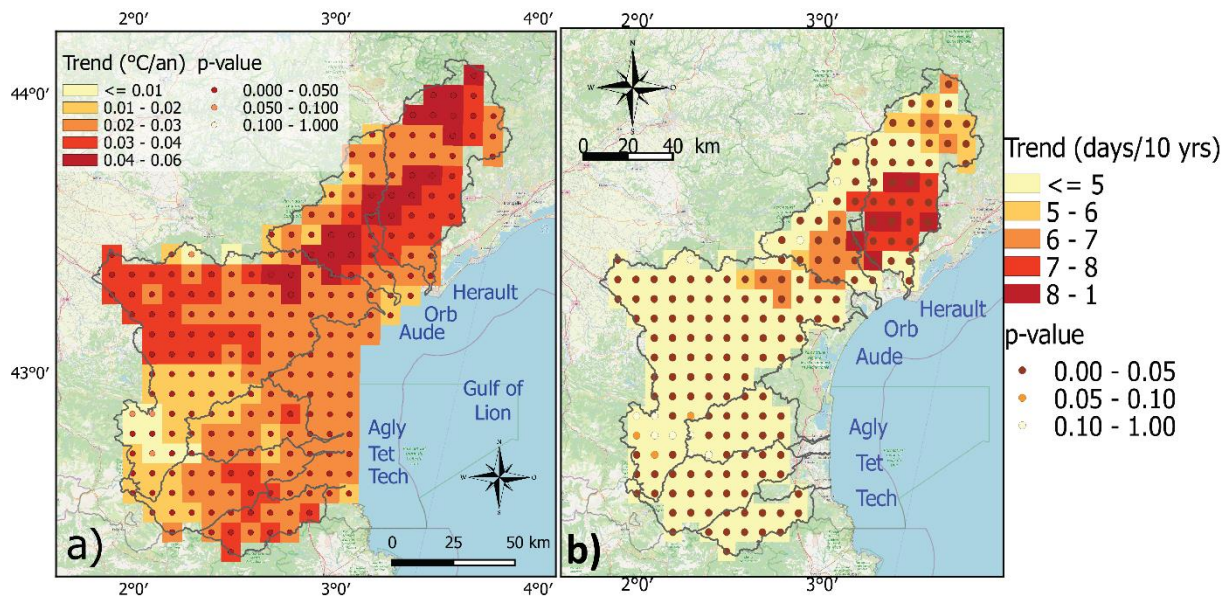


Figure IV.14: Tendances linéaires des températures a) températures moyennes annuelles sur la période 1959-2018 b) nombre de jours par an excédant le 95<sup>ème</sup> centile sur la période 1959-2018. Le 95<sup>ème</sup> centile a été calculé sur la période de référence considérée comme non affectée par les changements climatiques 1959-1973 et sur les mois de juin, juillet et août

Table IV.7: Evolution de la contribution des précipitations extrêmes sur le cumul annuel moyen des précipitations. Comparaison entre 1959-1973 et 2004-2018

Basin	95 <sup>th</sup> percentile for P≥1mm for 1959-1973 (mm/day)	Average precipitation for 1959-1973 (mm/year)	Total precipitation with P>95 <sup>th</sup> in 1959-1973 (mm/year)	% of P>95 <sup>th</sup> in mean annual P for 1959-1973	Average precipitation for 2004-2018 (mm/year)	Total precipitation with P>95 <sup>th</sup> in 2004-2018 (mm/ye ar)	% of P>95 <sup>th</sup> in mean annual P for 2004-2018	Change in P>95 <sup>th</sup> (%)
<b>Herault</b>	43.1	1207	323	27	1046	274	26	-15
<b>Orb</b>	36.1	1105	329	30	995	325	33	-1.2
<b>Aude</b>	20.4	867	223	26	778	193	25	-13.4
<b>Agly</b>	28.3	886	285	32	744	234	31	-18
<b>Tet</b>	30	898	288	32	753	183	24	-36
<b>Tech</b>	37.7	1090	355	33	947	278	29	-22

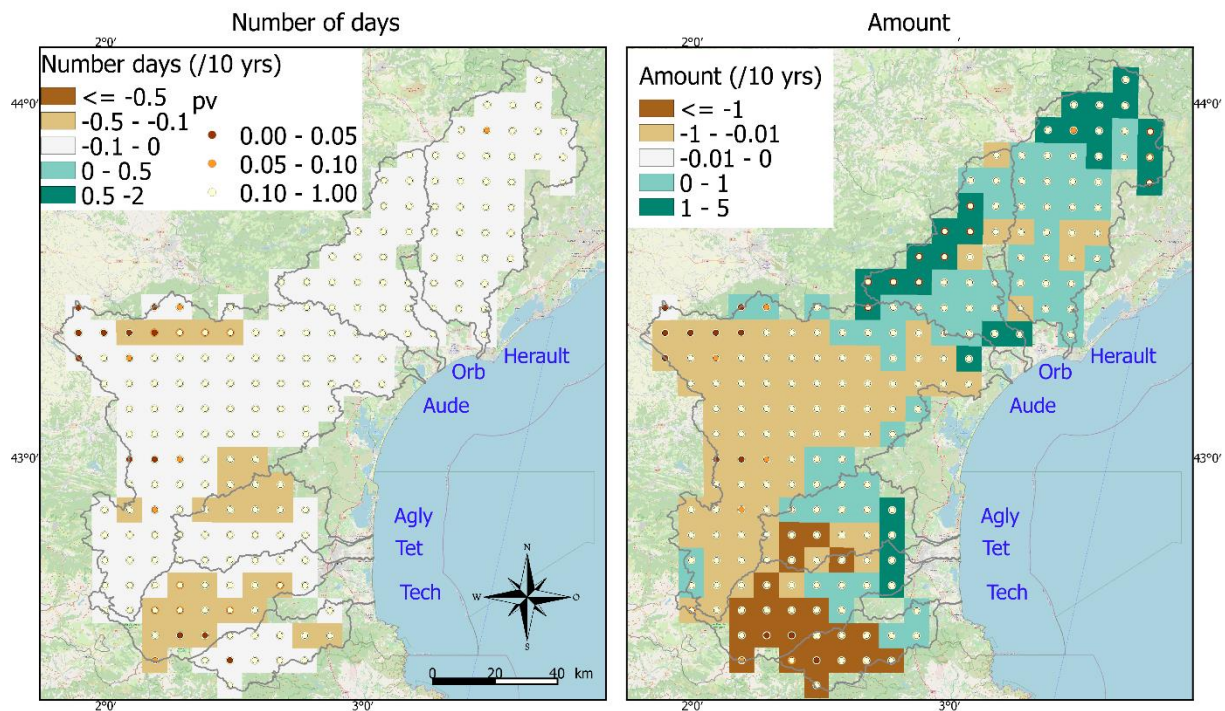


Figure IV.15: Tendances historiques sur la période 1959-2018 avec un test de Mann-Kendall pour les extrêmes de précipitations dépassant le 95<sup>ème</sup> centile : Changement du nombre de jours par décennie sur la période complète (gauche) et changement de la quantité moyenne précipitée (en mm) lors des événements extrêmes par décennies (droite). Le 95<sup>ème</sup> centile est calculé sur la période de référence considérée comme non affectée par les changements climatiques 1959-1973 et pour des précipitations supérieures à 1 mm ( $P > 1\text{mm}$ )

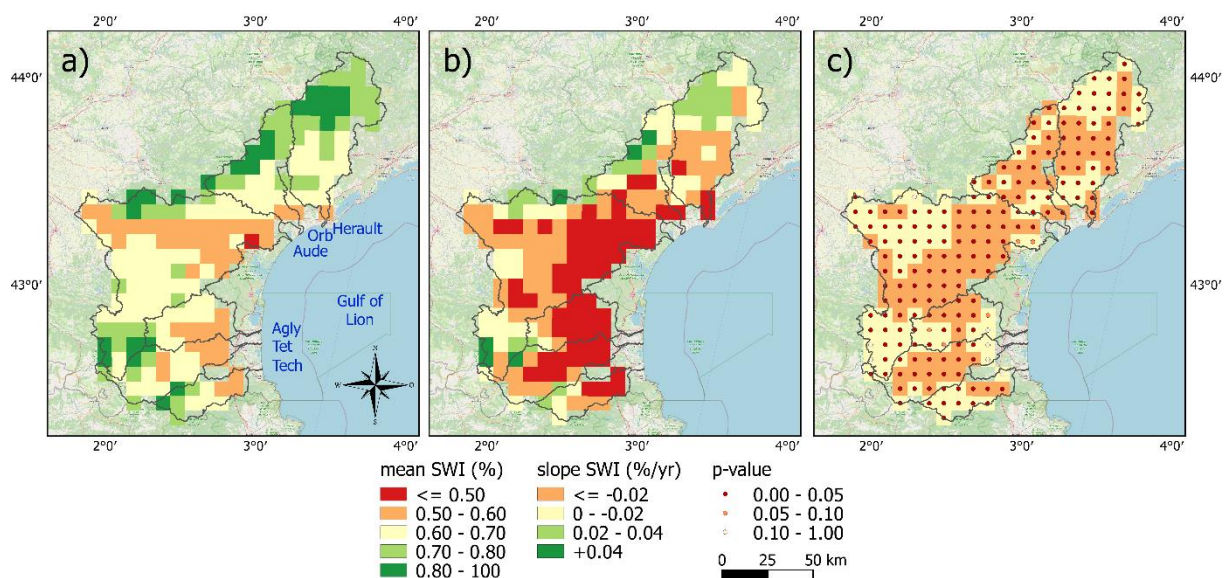


Figure IV.16: Evolution de l'indice d'humidité des sols (SWI) a) moyenne annuelle sur la période 1959-1973 (en %) b) moyenne annuelle sur la période 2004-2018 c) Tendence linéaire de Mann-Kendall et p-valeur sur la période 1959-2018

#### 4. Conclusions

L'objectif de ce chapitre était de faire l'état des changements dans les extrêmes hydro-climatiques, à la fois sur la période historique, ainsi que pour deux scénarios climatiques, au pas de temps annuel et d'ici la fin du siècle. Les extrêmes sont considérés de différentes manières comprenant principalement le nombre de jours à l'année qui dépasse certains quantiles ou certains seuils et la magnitude moyenne des événements dépassant ces seuils à l'année. En plus du pas de temps journalier qu'imposait ce type d'analyse, nous avons travaillé à deux échelles spatiales : l'une prenant les moyennes sur l'ensemble des bassins versants d'étude afin de poursuivre l'analyse amorcée dans les chapitres précédents et qui visent à identifier des réponses aux changements hydro-climatiques diverses d'un bassin à l'autre, l'autre visait à distinguer les milieux d'altitude des milieux de plaine.

L'augmentation des températures et du nombre d'extrêmes associées sont indéniables. Le nombre de jours dépassant les 75<sup>ème</sup> et 95<sup>ème</sup> quantiles sont en augmentation sur la période historique, tout comme le nombre de vagues de chaleurs annuelles et, à l'inverse, le nombre de vague de froid et les températures tombant en-dessous du 25<sup>ème</sup> quantile sont en diminution. Tous ces résultats sont hautement significatifs et, pour les décennies à venir, les RCMs s'accordent sur la continuité de ces augmentations d'ici la fin du siècle, prévoyant une augmentation de la température de 4,5°C dans le cas d'un scénario rep 8.5. Les conditions de températures jouent un rôle prépondérant dans le cycle de l'eau et sont certainement la cause de la réduction constatée de la teneur en eau des sols. Ceci entraîne également la réduction observée des débits minimums estimée entre -10 (Tech) à -43 % (Agly), valeurs proches de celles qui sont retrouvées pour l'évolution des débits moyens annuels (cf. Chapitre II). Le nombre d'évènements de crues dépend en grande partie des événements extrêmes de précipitations, ainsi que de la teneur initiale en eau des sols. Or on observe un assèchement uniforme dans tous les bassins versants des sols. Ce qui peut expliquer en partie la tendance observée à la baisse du nombre d'évènements de crues. Par ailleurs ce chapitre ainsi que les précédents montraient des tendances à la baisse des précipitations et de leurs extrêmes, davantage marquées pour les bassins placés sous influence des masses d'air atlantiques. Cela peut donc expliquer pourquoi les événements de crues sont davantage en baisse dans les bassins de l'Aude, l'Agly, la Têt et le Tech que dans ceux de l'Hérault et l'Orb.





# - CHAPITRE V -

## **Changements climatiques et incidences sur la production agricole : devenir et viabilité des vignobles du Languedoc-Roussillon comme cas d'étude**

### **1. Introduction**

Les changements climatiques sont susceptibles de bouleverser les pratiques agricoles. La sécurité alimentaire mondiale qui s'en trouve menacée est l'un des défis les plus importants du 21<sup>ème</sup> siècle. Au vu de l'accroissement de la population mondiale et de la dégradation des milieux naturels, fournir une alimentation suffisante et saine tout en préservant l'environnement est un sujet qui intéresse de plus en plus la communauté scientifique. Pour la région méditerranéenne, la production de raisins de cuve (*Vitis vinifera*) constitue un bon cas d'étude pour mesurer les impacts des changements climatiques sur l'agriculture parce que la viticulture est sensible aux facteurs climatiques et se concentre en grande partie dans les climats méditerranéens (Hannah et al., 2013). Avec l'augmentation de la température, comme c'est le cas dans notre zone d'étude, il est probable que la phénologie, les processus physiologiques, les contenus en eau des terrains et la maturation des grappes soient perturbés et impactent à leur tour la production viticole. En plus d'une possible dégradation de la qualité et/ou quantité de la production, la zone de viabilité des vignes peut évoluer géographiquement (Hannah et al., 2013; Pieri et al., 2012; Ashenfelter and Storchmann, 2006), nécessitant ainsi une adaptation des zones agricoles à des terrains qui sont en dehors des zones actuelles.

Les vignobles des bassins du Languedoc et Roussillon sont situés sur les 4 départements du Gard, Hérault, Aude et PO. En 2018, au sein du secteur agricole et pour les départements des PO, Aude et Hérault, ils représentaient environ 53 % des terres cultivées (Labrousse et al., 2020). En 2014 le Languedoc-Roussillon est la première région viticole de France, que ce soit en termes de surface totale occupée par les vignobles ou en termes de nombre et taille des exploitations agricoles. Ceux-ci occupaient alors 30,4 % des surfaces viticoles totales en France, devant la Provence-Alpes-Côte d'Azur et l'Aquitaine (Alonso Ugaglia et al., 2019). Le vignoble possède 28 Appellations viticoles d'Origine Contrôlée (AOC) et Protégée (AOP)

dénommée « Languedoc » dont la production totalisait 1 583 070 hL en 2011 (languedoc-aoc, 2021). Environ 52% de rosés, 40% de rouges et 8% de blancs sont produits par l'AOC Languedoc et ses dénominations et une totalité de 47% de la production est vendue en France contre 53% exportées. Le vignoble possède également 25 Indications Géographiques Protégées (IGP). Les principaux cépages utilisés dans les rouges et rosés sont le Syrah, Grenache, Mourvèdre, Carignan, Cinsault, Murrastel, Piquepoul noir et Cournoise noir. Pour les blancs, les cépages sont des Grenache, Clairette, Bourboulenc, Piquepoul, Roussanne, Marsanne, Rolle, Carignan, Terret, Vermentino et Viognier.

Ce chapitre s'intéresse à l'évolution de l'activité viticole au sein et à proximité de la zone qui a fait l'objet d'étude au cours de cette thèse ; l'objectif est de confronter cette évolution avec l'évolution climatique et identifier les liens existant entre paramètres climatiques et indicateurs de l'activité viticole. Les six bassins versants étant précédemment utilisés comme échelle spatiale d'étude, renferment sur leur partie aval une grande partie des vignes constituant le vignoble Languedoc-Roussillon. Au sein et à proximité des bassins versants de l'Agly, la Têt et le Tech, les vignobles sont ceux du Roussillon. Plus au Nord, au sein et à proximité des bassins versants de l'Aude, l'Orb et l'Hérault, les vignobles sont ceux du Languedoc. Les limites de la zone d'étude sont alors modifiées : celles-ci ne sont plus contraintes par les limites des bassins versants hydrologiques mais par les unités administratives pour lesquelles les données sur les pratiques agricoles sont disponibles. Ces unités sont les départements et nous avons ainsi distingué les vignobles des PO, de l'Aude et de l'Hérault. Les données climatiques utilisées sont les données Safran de températures et précipitations. Un intérêt particulier est donné à l'évolution de la climatologie lors de la période de croissance, période cruciale dans le développement des raisins et allant des mois de avril à septembre de chaque année. Les indicateurs rendant compte de l'activité viticole sont des données de rendements, disponibles à échelle des départements administratifs sur le site de la Draaf de l'Occitanie ainsi que des données de début de date des vendanges pour le vignoble du Languedoc rendues disponibles dans la publication de Daux et al. (2012).

## **1. Comment les changements climatiques affectent-ils la viticulture ?**

Le climat agit sur la vigne à travers la quantité de précipitations et l'évapotranspiration de la culture. Concernant l'apport en eau artificiel aux vignobles, deux grandes pratiques se distinguent : l'une utilise l'irrigation, c'est le cas de vignobles de Californie, Chili, l'autre non et c'est le cas dans la majeure partie des vignobles du Sud de France ou de nombreuses régions

du pourtour méditerranéen. Au vu des changements climatiques qui sont attendus, des bouleversements tant dans la phénologie des vignes que dans les pratiques viticoles en vue d'acquiescer une certaine résilience commencent déjà à se faire ressentir (Trought et al., 2015).

### 1.1. Cycle végétatif de la vigne

Le cycle végétatif des vignes peut être résumé en 5 étapes étalées sur l'année et allant du printemps à l'automne. Une période de dormance fait suite à ces 5 étapes, au cours de l'hiver et jusqu'au printemps suivant. Certains cépages sont plus précoces que d'autres dans leur cycle végétatif et la sélection d'un cépage dans une zone géographique donnée dépend ainsi des caractéristiques climatiques qui vont contrôler la temporalité du cycle végétatif de la vigne.

Au printemps, sur les mois de mars et avril a lieu le débourrement des bourgeons : ceux-ci éclatent et la bourre ligneuse (ou duvet) qui les entouraient et protégeaient du froid durant l'hiver se retrouvent visibles à l'air libre.

En juin et sur une période courte d'une dizaine de jours a lieu la floraison. C'est une étape délicate du cycle végétatif de la vigne car en cas de temps froid et humide il peut y avoir un phénomène de « coulure » ; les fleurs nouvellement sorties ne parviennent pas à se débarrasser de leur corolles, sorte de capuchon floral qui d'ordinaire tombe pour laisser à nu les organes mâles et femelles, et finissent par tomber sans avoir été fécondées. La précocité de certains cépages les rend plus vulnérables au phénomène de coulure.

La nouaison est l'étape de la formation des raisins. Elle s'étend sur 45 à 60 jours après la floraison suivant le cépage et les conditions pédoclimatiques. A ce moment, les raisins se comportent comme des organes photosynthétiques. Les sucres produits sont mobilisés dans la respiration cellulaire. Les raisins ont donc une teneur en sucres très faibles (de 10 à 20 g.L<sup>-1</sup> maximum), mais elles se chargent en revanche en acides organiques (environ 20 g.L<sup>-1</sup>).

La véraison est la période pendant laquelle les raisins passent d'une couleur vert tendre à tout une gamme de jaunes et violets-rouges. C'est une période de courte durée (1 à 2 semaines) qui correspond à un ralentissement de la croissance des raisins. Ceux-ci diminuent progressivement leur activité photosynthétique. Le changement de couleur des raisins est lié à l'accumulation des sucres qui passe de 10/20 g.L<sup>-1</sup> à plus de 100 g.L<sup>-1</sup>. Le taux d'acides organiques décroît. En août pour la plupart des cépages, les raisins atteignent leur maximum en acidité. Celle-ci va ensuite décroître à mesure que les sucres s'accumulent.

La maturation est l'étape qui s'étend de la véraison à la date des vendanges. Elle est choisie en fonction de la teneur en sucres et acides organiques désirée. La maturation physiologique se distingue alors de la maturation technologique. La première correspond à l'état où les raisins atteignent leur diamètre maximum et leur plus grande teneur en sucres, la seconde est l'état considéré comme « idéal » pour le produit consommable attendu. Une phase de surmaturation arrive s'il n'y a pas eu cueillette ; durant celle-ci, les raisins perdent leur eau, se flétrissent et le rapport sucre/masse est alors plus élevé.

La dormance est la période pendant laquelle la vigne perd ses feuilles. Depuis la véraison, elle a accumulé de l'amidon, ce qui donnera au prochain cycle une possible meilleure qualité et un meilleur rendement. En novembre, une taille de propreté s'impose.

## **1.2. Températures**

L'augmentation des températures est un élément phare dans la perturbation de l'activité viticole. Elle provoque une avancée dans l'année des cycles végétatifs et reproducteurs de la vigne (Leeuwen and Destrac-Irvine, 2017). Sous l'effet d'un réchauffement qui pourrait atteindre +4°C de moyenne annuelle sous un scénario RCP 8.5 (voir chapitre III), il est possible que certaines régions avoisinent ou dépassent des seuils limites d'accumulation des températures lors de la période de croissance et que certains cépages ne s'y trouvent plus adaptés. L'occurrence d'évènements extrêmes des températures joue aussi un rôle important dans la maturation des raisins et la qualité des produits finaux comme les vins. Pour certaines régions en France, il est possible que les températures au cours de la saison de croissance des vignobles montrent une plus grande variabilité, avec entre autre des vagues de chaleur de plus en plus nombreuses et sévères (Bador et al., 2017) et un risque de gelées tardives de printemps (Sgubin et al., 2018). Ces évolutions d'extrêmes de températures n'étant pas spatialement homogènes, il y aurait, en plus de la variabilité intra-annuelle croissante des conditions de températures, une variabilité spatiale également accrue. En outre, le réchauffement général abouti à une migration, bien souvent vers le Nord mais pas seulement, des vignobles (Sánchez et al., 2019; Hannah et al., 2013; Pieri et al., 2012; Ashenfelter and Storchmann, 2006).

## **1.3. Ressources en eau : précipitations et sols**

Pour produire des vins de haute qualité, il est nécessaire de contraindre un vignoble à un léger stress hydrique (Seguin, 1986). En limitant l'apport d'eau à la vigne, la croissance des pousses,

la taille des raisins et le rendement sont réduits, mais en contrepartie, la teneur en anthocyanes et en tannins augmente (van Leeuwen and Seguin, 1994). La pratique la plus répandue dans le monde en viticulture et de ne pas utiliser l'eau d'irrigation, bien que son opposé soit aussi très répandu. Autour de la Méditerranée, cette pratique date de l'Antiquité et est toujours actuellement associée à la production de produits de qualité (Leeuwen and Destrac-Irvine, 2017). En Europe et en France notamment, avec la réduction attendue des précipitations sur le pourtour méditerranéen, la législation jusqu'à présent forte sur l'interdiction d'irriguer les parcelles en viticulture, et ceci dû en partie aux labels rattachés aux Appellations, commence à s'assouplir depuis les années 2000s (Graveline and Grémont, 2021; Irrigazette, 2021). Par ailleurs, certains auteurs trouvent une relation entre réduction des précipitations et précocité des étapes du cycle végétatif allant de la floraison aux vendanges (Ramos, 2017).

En plus de l'eau apportée par les précipitations, la fraction d'eau alimentant le drainage et l'écoulement superficiel, ainsi que celle qui sera retenue un temps dans les sols est prépondérante. Dans la mesure où elles affectent les propriétés hydrauliques du sol, la texture et la structure du sol influencent la capacité de rétention d'eau et donc la disponibilité de l'eau pour un vignoble (Poni et al., 2018). La composition physico-chimique, comprenant la proportion de grains grossiers ou au contraire d'argiles et les propriétés chimiques vont jouer un rôle sur l'infiltration et le drainage ainsi que sur la profondeur des racines. Pour les mêmes raisons de propriétés hydrauliques, la position d'un vignoble par rapport à une pente (en amont ou en aval) a aussi son importance : Basile et al., (2020) montrent que la qualité d'un produit fini est meilleure venant des pieds de vigne situés en amont de pente plutôt qu'en aval. L'érosion qui est d'autant stimulée par les plantations de vignoble, qui ne requièrent pas de couverture végétale, est aussi un problème d'importance pour les régions méditerranéennes à forte production viticole (Godone and Stanchi, 2011). Les événements extrêmes de précipitations et les crues éclaires arrachent les particules composants les sols et des pics de taux d'érosion sont alors atteints lors de ces événements (Prosdocimi et al., 2016). L'érosion est d'autant plus importante que les sols méditerranéens contiennent peu de nutriments et matière organique (Cerdà, 1996), éléments qui d'ordinaire apportent davantage de stabilité à la structure des sols (Oades, 1984).

#### **1.4. Rayonnement solaire et Ultraviolet-B**

L'énergie solaire est la principale source d'énergie pour la pousse de la vigne. La viticulture commerciale ne se trouve qu'entre 35° et 50° de latitude, régions qui permettent l'apport

nécessaire en rayonnement solaire aux vignes. La photosynthèse d'un vignoble (mais aussi d'autres cultures) dépend non seulement de la capacité photosynthétique même des feuilles, mais aussi de la position des feuilles par rapport au rayonnement incidents, l'intensité du rayonnement direct et diffus, de l'ombrage mutuel entre le feuillage et les pieds de vigne, de la couverture du sol et du contenu en dioxyde de carbone de l'atmosphère (DeWit, 1959). Les Ultraviolet-B (UV-B) sont les radiations solaires de longueur d'onde comprise entre 280 et 315 nm : ils sont la fraction d'UV capable d'interagir de façon significative avec l'activité photosynthétique, l'ADN, les protéines, membranes et hormones des espèces végétales et animales (Bornman et al., 2019). La quantité d'UV-B qui atteint la surface de la Terre dépend entre autres de l'épaisseur de la couche d'ozone. L'ozone possède une bande d'absorption dans un domaine de longueur d'onde comprises entre 200 et 300 nm, ce qui permet de filtrer totalement les UV-C (de longueur d'onde supérieure à 300 nm), en grande partie les UV-B et laissent cependant passer les UV-A (Delmas et al., 2005). Une diminution de la quantité d'ozone stratosphérique fait donc augmenter la quantité d'UV-B atteignant le sol : or, avec l'augmentation de la concentration de composés chimiques en lien avec les activités anthropiques dans l'atmosphère, il est attendu que la couche d'ozone se dégrade au cours du siècle. La question des interactions entre UV-B, changements climatiques et biodiversité et notamment cultures agricoles est alors de plus en plus étudiée (Wargent and Jordan, 2013; Bornman et al., 2019). Cependant, si jusqu'aux toutes dernières décennies, l'augmentation des UV-B a été désignée comme facteur de stress nocif pour les espèces végétales, elle est à présent rediscutée. Pour la viticulture, les UVs sont un facteur clé dans le développement des métabolites responsables des arômes, couleurs, astringences entre autres des raisins (Del-Castillo-Alonso et al., 2021). L'un des plus grands intérêts des UVs est la protection qu'ils confèrent face aux organismes nuisibles et maladies (Jug and Rusjan, 2012).

### **1.5. Bouleversement des écosystèmes : maladies**

Un autre élément accompagnant les changements climatiques est pouvant perturber le devenir des vignobles est les maladies liées aux ravageurs et maladies. Le réchauffement global ainsi que les changements dans l'humidité de l'air peuvent faire remonter vers le Nord certaines espèces d'insectes qui peuvent provoquer des maladies pour les vignes (Reineke and Thiéry, 2016). C'est le cas par exemple de l'insecte communément appelé « mouche pisseuse » (*Homalodisca coagulata*) qui a apporté la maladie de Pierce en transportant une bactérie appelée *Xylella fastidiosa* (Redak et al., 2004). De même, Pugliese et al., (2011) montraient que

l'augmentation des températures et de la concentration en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère facilitaient la propagation du mildiou dans des vignobles italiens, peu importe le type de cépage et la quantité de précipitations annuelles.

## **2. Matériels et méthodes**

### **2.1. Données sur l'occupation des sols**

Les données Corine Land Cover ont une résolution spatiale d'environ 100 m et comportent une catégorie qui représente les surfaces en production viticole. Les données de l'année 2018 sont utilisées pour définir une zone géographique où les vignobles du Languedoc-Roussillon occupent au moins 30 % de l'occupation des sols totale au sein des grilles pour lesquelles nous disposons les données climatiques (Figure V.1).

### **2.2. Données climatiques**

Nous travaillons à partir des données spatialisées Safran, c'est-à-dire les données disponibles pour une grille de 8 km de résolution spatiale. Pour certaines analyses, nous avons extrait les paramètres de températures et précipitations moyennés sur l'ensemble de la zone en vignoble (Table.V.2). La saison de croissance qui s'étend des mois de avril à septembre (ou de avril à octobre selon les sources) est la saison où les stades végétatifs majeurs de la vigne ont lieu. Nos analyses se focalisent donc sur la climatologie de cette période précise pour chaque année.

### **2.3. Données sur l'activité viticole**

La Draaf de l'Occitanie héberge des données de surfaces en production et de rendements pour le raisin de cuve de 2000 à 2020 et pour chaque département constituant les bassins Languedoc et Roussillon (Draaf, Vignes et vins).

Des données de date de début des vendanges sont rendues disponibles par l'étude de Daux et al., (2012). Les auteurs ont inclus 27 séries temporelles régionales de dates des vendanges, compilées à partir de registres locaux de vignobles et de caves de France, Suisse, Espagne, Luxembourg et Allemagne et remontant jusqu'en 1354. Pour notre région, les auteurs ont créé une série composite, faite de 36 séries de données au total, réparties sur une zone géographique allant du bassin de l'Aude à Marseille. La donnée présente donc le défaut de ne pas représenter



les vignobles du Roussillon et englobent probablement une part des vignobles appartenant aux Appellations Côtes-du-Rhône.

## 2.4. Rendements

Le processus typique d'estimation du rendement consiste à déterminer le rendement pour un petit pourcentage du vignoble et à extrapoler la mesure à l'ensemble de celui-ci. Le rendement viticole désigne ainsi la quantité de vin produite en hectolitre par hectare de vignoble (HL/ha). Il peut aussi se définir en termes de poids de la vendange par unité de surface et s'exprime ainsi :

$$\text{Rendement (kg. ha}^{-1}\text{)} = \frac{\text{sch} * \text{grp} * \text{pds}}{\text{sfc}}$$

Avec sch le nombre de souches, grp le nombre de grappe par souche, pds le poids moyen d'une grappe et sfc la surface de la parcelle.

L'anticipation du rendement est essentielle pour tout viticulteur, car elle lui permet de décider quand et comment apporter des ajustements à son vignoble pour optimiser la croissance, le moment de la récolte, son stockage ainsi que la vente sur le marché. Les méthodes actuelles de calcul du rendement sont parfois jugées laborieuses et pas représentatives de la variabilité spatiale. A la place, des techniques d'imagerie consistant à prendre des images des grappes de raisins présentent à différents stades de maturation et à partir d'instruments fixés sur des véhicules circulant le long des rangées de vignes sont développées et permettraient de prédire de façon automatique et non-destructive le rendement des vignobles (Nuske et al., 2014).

Des données de rendements des vignobles sont disponibles à échelle des départements sur le site de la Draaf de l'Occitanie pour la période 2001-2018.

## 2.5. Indices bioclimatiques

On utilise un ensemble d'indices bioclimatiques pour évaluer l'évolution climatique des zones hébergeant les vignobles languedociens et roussillonnais et comprendre l'impact potentiel de l'évolution climatique sur les vignobles au cours de la période historique. Ces indices ont été construits selon la temporalité des cycles végétatifs majeurs des vignes et leurs relations avec le contexte climatique. Nous en avons sélectionné 4, en plus de l'analyse de la date de début

des vendanges, qui à elle seule, consiste déjà en un indice d'analyse pertinent. Ces indices sont présentés en Table V.1 et leur mode de calcul sont présentés ci-après.

L'indice de Degré-jours de croissance de Winkler (1974) permet de suivre l'évolution des cumuls de températures journalières à partir de la base 10°C sur la période allant du 1<sup>er</sup> avril au 31 octobre. L'équation s'écrit :

$$WI = \sum_{1^{er} \text{ avr}}^{31 \text{ oct}} T_{avg} - 10$$

Avec  $T_{avg}$  la température moyenne journalière en °C et prise sur la base 10°C

L'indice Héliotherme de Huglin (1978) représente une somme des températures accumulées lors des stades phénologiques de nouaison, véraison et maturité. Il est calculé pour la période allant du 1<sup>er</sup> avril au 30 septembre dans l'hémisphère Nord sur la base de températures journalières de au moins 10°C et tient compte d'un coefficient  $k$  représentant la longueur du jour, soit en fonction de la latitude. L'équation s'écrit :

$$HI = \sum_{1^{er} \text{ avr}}^{30 \text{ sep}} \frac{(T_{avg} - 10) + (T_{max} - 10)}{2} * k$$

Avec  $T_{avg}$  la température moyenne journalière,  $T_{max}$  la température maximale journalière en °C,  $T_{avg}$  et  $T_{max}$  sont pris sur la base 10°C. Et  $k$  le coefficient de correction de durée du jour, dans notre cas  $k= 1,03$

L'indice de fraîcheur des nuits rends compte des températures minimales moyennes du mois de septembre, mois qui généralement précède les vendanges. Il a été développé par Tonietto (1999) et s'écrit :

$$CI = \sum_{1^{er} \text{ sep}}^{30 \text{ sep}} \frac{T_{min}}{30}$$

Avec  $T_{min}$  les températures minimales journalières en °C

L'indice des température moyennes lors de la saison de croissance a été développé par Jones (2006). Il rend compte de la température moyenne sur la période allant du 1<sup>er</sup> avril au 31 octobre et s'écrit :

$$GST = \frac{1}{N} * \sum_{1^{er} \text{avr}}^{31 \text{ oct}} T_{avg}$$

Avec  $N$  le nombre de jours dans la période et  $T_{avg}$  les températures moyennes journalières en °C

Table V.1 Indices bioclimatiques, période de calcul et catégories en fonction de leurs valeurs

Index	Period	Class	Range
Growing-degree days -Winkler et al. (1974)-	April-October	1	<1371
		2	1371 - 1649
		3	1650 - 1926
		4	1927 - 2205
		5	>2205
Heliothermal -Huglin (1978)-	April-September	very cool	<1500
		cool	1500 - 1800
		temperate	1800 - 2100
		temperate warm	2100 - 2400
		warm	2400 - 2700
Cool night -Tonietto et al. (1999)	September	very cool	< 12°C
		cool	12 - 14 °C
		temperate	14 - 18 °C
		warm	> 18°C
Average growing season temperature -Jones (2006)-	April-October	too cool	< 13°C
		cool	13 - 15°C
		intermediate	15 - 17°C
		warm	17 - 19°C
		hot	19 - 21°C
		very hot	21 - 24°C
		too hot	>24°C

### 3. Résultats

#### 3.1. Répartition des vignobles du Languedoc-Roussillon à proximité des bassins versants côtiers

La Figure V.1 présente la sélection de la zone comprenant au moins 35 % de vignobles dans la totalité de l'occupation des sols. La zone comprend majoritairement les parties avales des six bassins versants côtiers ainsi que la plaine du Lauragais et Minervois du bassin de l'Aude. Les vignobles s'étalent aussi, dans une moindre mesure, le long du cours d'eau de l'Agly. Un espace

comprenant relativement peu de vignes et situé entre les bassins de l'Agly et de l'Aude permet de distinguer ici les vignobles du Languedoc (au Nord) de ceux du Roussillon (au Sud). Les vignobles compris dans le département de l'Hérault (en rouge sur la Figure 1b) sont uniquement des vignobles languedociens. Ceux compris dans le département des PO (bleu) sont uniquement roussillonnais et le département de l'Aude comporte une partie de vignobles languedociens et une partie plus petite, de vignobles roussillonnais. Au total, cette zone s'étale un espace de 808 900 ha dont 299 035 sont occupés par les vignobles. Au sein de la zone, la climatologie moyenne sur la période 1959-2018 indique de 631 à 748 mm de précipitations annuelles pour les départements des PO et de l'Hérault respectivement dont 243 et 288 mm précipitent lors de la saison de croissance allant de avril à septembre (Table.V.2). La température annuelle et pour la saison de croissance est plus fraîche dans l'Aude (13,6°C annuel et 18,1 °C pendant la période de croissance), et elle est la plus chaude dans les PO (14,7 °C à l'annuel et 19,2°C pour la saison de croissance). Généralement, les précipitations montrent des tendances annuelles à la baisse sur la période 1959-2018, de -0,7 % (PO) à -5,6 % (Hérault) mais celles-ci ne sont pas significatives. Sur la période de croissance elles sont en augmentation (non-significatives) dans l'Hérault et l'Aude de +4,7 % + 5,1 % respectivement et sont en diminution dans les PO de -6,5 %. L'Hérault est le département qui se réchauffe le plus sur la période annuelle et sur la période de croissance avec +2,4 °C lors de cette dernière et sur la période 1959-2018 contre +1,8 et +1,5 °C pour l'Aude et les PO respectivement. Malgré leur déclin, les vignobles sont la culture en large majorité au sein du secteur agricole, représentant 74 % en 1990 des surfaces totales agricoles dans la zone considérée et 69 % en 2018. A échelle des six bassins versants côtiers, les vignobles occupent 53 % des terres agricoles totales en 2018 (Labrousse et al., 2020). Les arrachages qui ont eu lieu au cours des dernières décennies ont profité soit à d'autres types de cultures, qui ont gagné 3 % entre 1990 et 2018 dans l'occupation totale de la zone tout type d'occupation confondu, soit à l'urbanisation qui a aussi gagné 3 %.

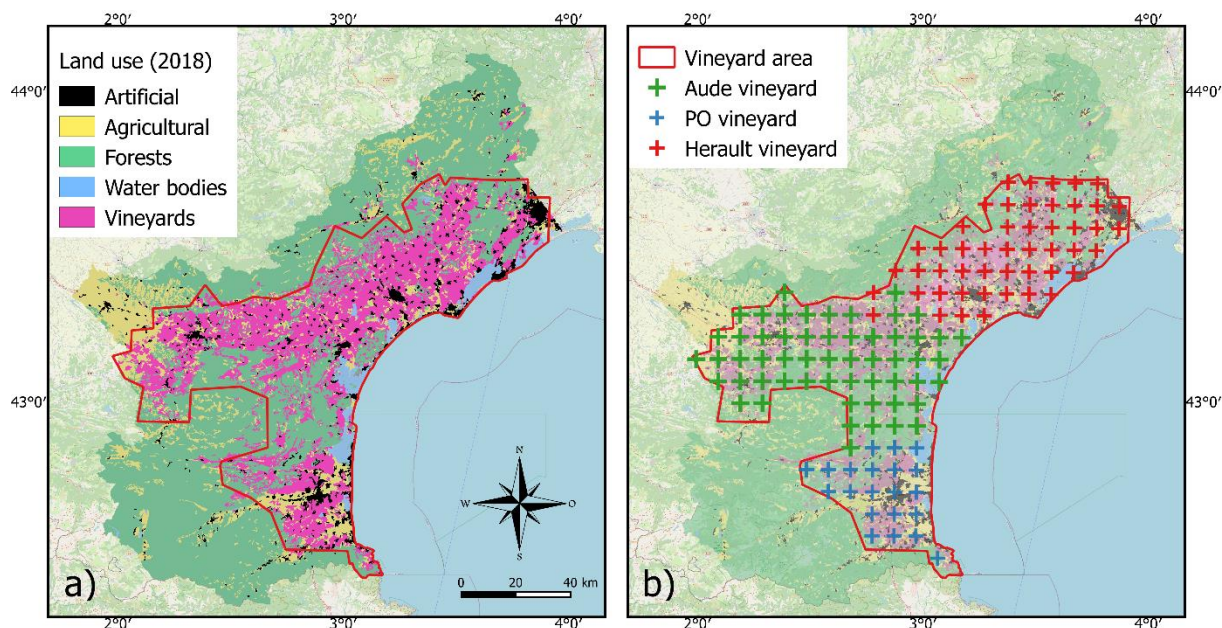


Figure V.1: Zone constituée d'au moins 35 % de terres en vignobles en 2018 et retenue pour l'étude des caractéristiques climatiques et bioclimatiques pouvant avoir un impact sur l'évolution de l'activité viticole

Table.V.2: Caractéristiques de la zone en vignoble du Languedoc-Roussillon (a) Climatologie moyenne, élévation et surface. P, T et GS représentent les précipitations, les températures et la saison de croissance (considérée du mois d'avril à septembre inclus) respectivement. (b) Tendances linéaires des précipitations et températures au pas de temps annuel (Annual) et pour la période de croissance (GS) sur la période 1959-2018 (c) Pourcentages des types d'occupation des sols et proportion représentée par les vignobles dans la surface totale et la surface agricole pour les années 1990 et 2018 d'après les données Corine Land Cover. \*\* représentent les proportions dans la surface totale, et \* représente les proportions dans les surfaces agricoles uniquement

(a)

Period	Annual P (mm)	Annual T (°C)	GS P (mm)	GS T (°C)	Elevation (m)	Area (km <sup>2</sup> )
Herault	748	14.1	288	18.8	135	3 136
Aude	687	13.6	280	18.1	188	3 584
PO	631	14.7	243	19.2	141	1 344

(b)

Vignoble	Annual P (%)	Annual T (°C)	GS P (%)	GS T (°C)
Herault	-5.6	2.1	4.7	2.4
Aude	-3.2	1.7	5.1	1.8
PO	-0.7	1.5	-6.5	1.5

(c)

Year	Vineyards*	Vineyards**	Artificial areas**	Other farming activities**	Natural areas**
1990	74	42	6	14	37
2018	69	37	9	17	37

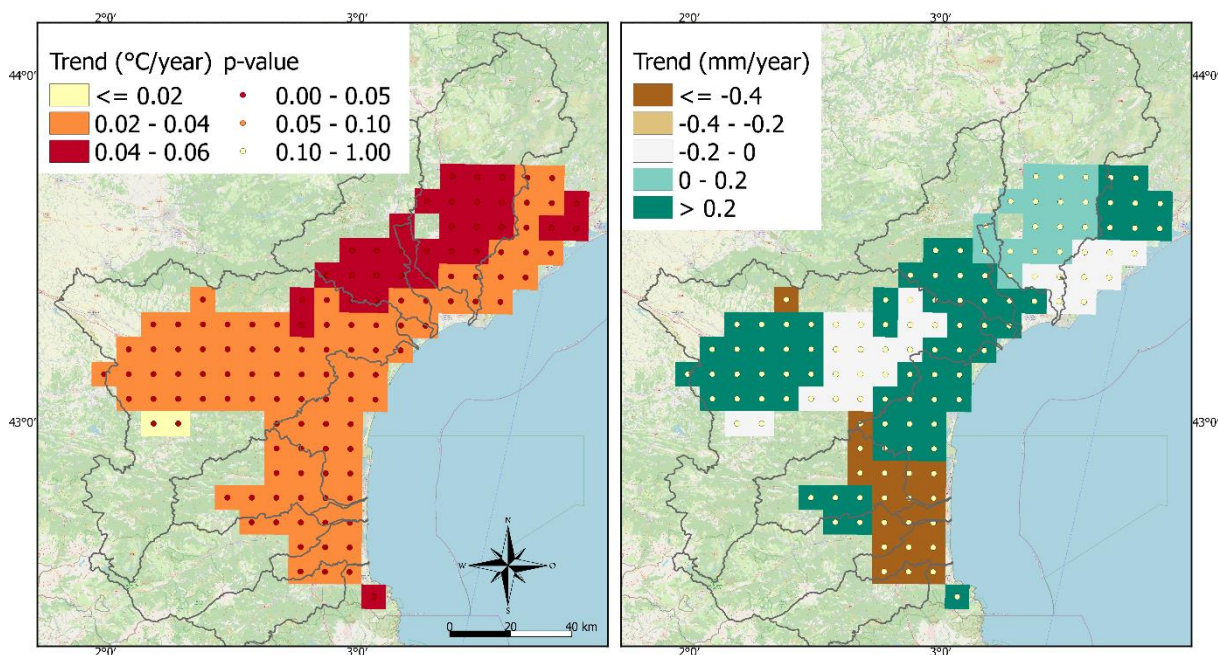


Figure V.2: Tendances linéaires des températures (gauche) et précipitations (droite) lors de la saison de croissance sur la période 1959-2018

### 3.2. Evolution des surfaces selon les cépages

Le vignoble du Languedoc-Roussillon produit principalement du raisin de cuve, dont les deux tiers sont des vins rouges. Parmi les cépages traditionnels du vignoble du Languedoc-Roussillon on compte le Carignan noir, l'Aramon, l'Alicante, le Terret blanc, le Piquepoul blanc et le Mauzac blanc. Mais seul le Carignan noir ressort comme un cépage aujourd'hui majeur pour la région en ce sens qu'il occupe 24 095 ha en 2018 (FranceAgriMer, 2019). Ce cépage a subi une baisse spectaculaire (Figure V.3) qui s'est amorcée dans les années 1960s. En 1979, il occupait une surface de 174 850 ha (Draaf, Vinges et vins) et représentait ainsi 58 % du vignoble régional. En 2018 il en occupait plus que 8 %. Depuis, ce sont des cépages éligibles en AOP qui sont choisis pour la replantation. Le Syrah noir devient le premier cépage de la région en 2018 avec une surface totale occupée de 39 206 ha, suivi de près par le Grenache noir (38 269 ha), puis le Merlot noir (27 596 ha), puis le Carignan (24 095 ha). L'étude de Jones et al., (2005) présente par ailleurs les tranches de températures moyennes pendant la période de croissance (avril-septembre) pour lesquelles ces 4 cépages sont viables respectivement (Figure V.3). Les tranches de températures moyennes de saison de croissance les plus basses (hautes) tolérées par les cépages majeurs vont de 16,0 °C (18,8 °C) pour le Merlot à 17,2 °C (20,2 °C) pour le Carignan. En moyenne, la tranche des températures moyennes de la saison de croissance oscille

entre 16,5 et 19,6 °C, à partir de laquelle on peut alors estimer une température optimale pour tous les cépages de l'ordre de 18 °C.

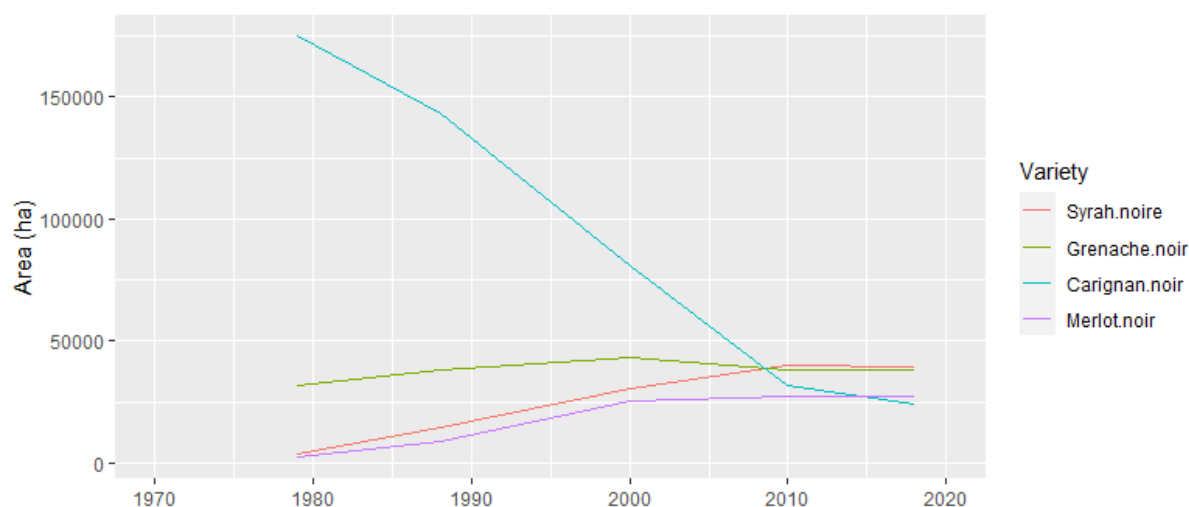


Figure V.3: Evolution de la surface en hectare (ha) occupée par les 4 cépages majeurs de la région viticole Languedoc-Roussillon. Source : Agreste, 2010 et FranceAgriMer, 2019

Table V.3: Températures (T) moyennes de la période de croissance (GS) tolérées pour les 4 cépages majeurs du vignoble du Languedoc. D'après Jones et al., (2005)

Variety	Low T GS (°C)	High T GS (°C)
Merlot	16.0	18.8
Syrah	16.2	19.2
Grenache	16.6	20.1
Carignan	17.2	20.2
<b>Average</b>	<b>16.5</b>	<b>19.6</b>

### 3.3. Evolution de la date de début des vendanges

La période s'étalant de la moitié du 17<sup>ème</sup> siècle au début du 19<sup>ème</sup> montre des dates de début des vendanges bien plus tardives que celles notées en première moitié du 20<sup>ème</sup> siècle (Figure V.4) : celles-ci ayant lieu environ lors de la première quinzaine d'octobre de 1740 à 1800, contre la première quinzaine de septembre lors de la première moitié du 20<sup>ème</sup> siècle. Au cours de ce dernier siècle, les dates de vendanges ont beaucoup évolué, montrant une tendance de plus en plus tardive au cours de la première moitié du siècle, puis redevenant brutalement comprises entre le 10 et 25 septembre à compter du milieu des années 1980s environ. On note également des oscillations inter-annuelles parfois très importantes, de 1 mois environ, et particulièrement marquées du 15<sup>ème</sup> au début du 19<sup>ème</sup> siècle avec, par exemple, un début des récoltes au 13

octobre en 1732 contre un début le 14 septembre en 1734. Ces oscillations s'amenuisent au cours du 20<sup>ème</sup> siècle à 1 semaine environ avec par exemple de 2005 à 2006 un début des vendanges ayant lieu au 20 et 12 septembre respectivement.

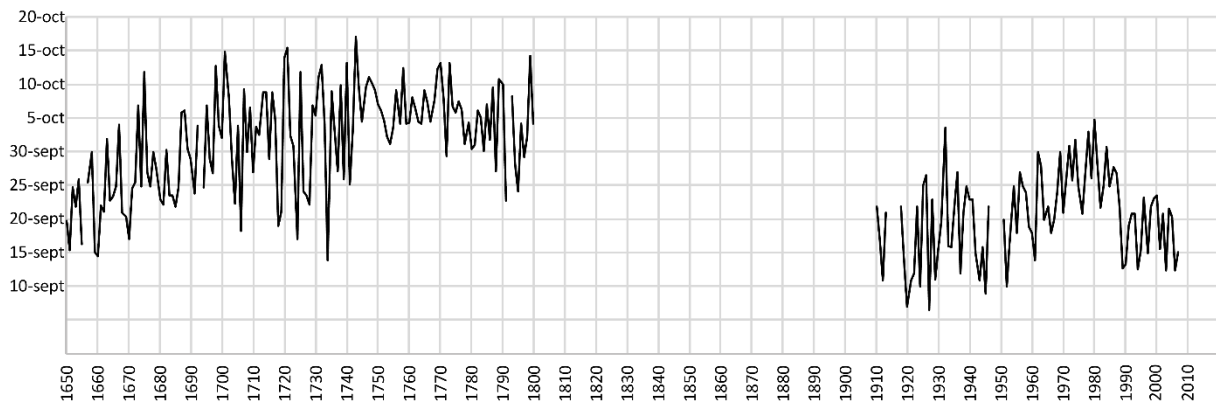


Figure V.4: Date de début des vendanges pour le vignoble du Languedoc-Roussillon. Données récoltées auprès de la publication de Daux et al., (2012)

### 3.4. Evolution des rendements

L'évolution des rendements montrent une différence notable entre les vignobles localisés dans les PO (qui sont donc les vignobles du Roussillon) et ceux localisés dans les départements de l'Aude et de l'Hérault (les vignobles du Languedoc). Les rendements des vignobles roussillonnais sont en effet bien inférieurs aux languedociens avec des valeurs moyennes sur l'ensemble de la période 2001-2018 de 34.3 et 59.4 hl/ha respectivement. Les séries montrent une évolution à la baisse de ces rendements (Figure V.5), davantage prononcée pour les vignobles se trouvant dans les départements de l'Aude et des PO. Cette baisse montre ainsi -16 et -17% d'évolution pour l'Aude et les PO respectivement et les tests de Mann-Kendall indiquent que la significativité est très élevée ( $p < 0.05$ ). Pour l'Hérault, la baisse indique -11% avec une faible significativité.



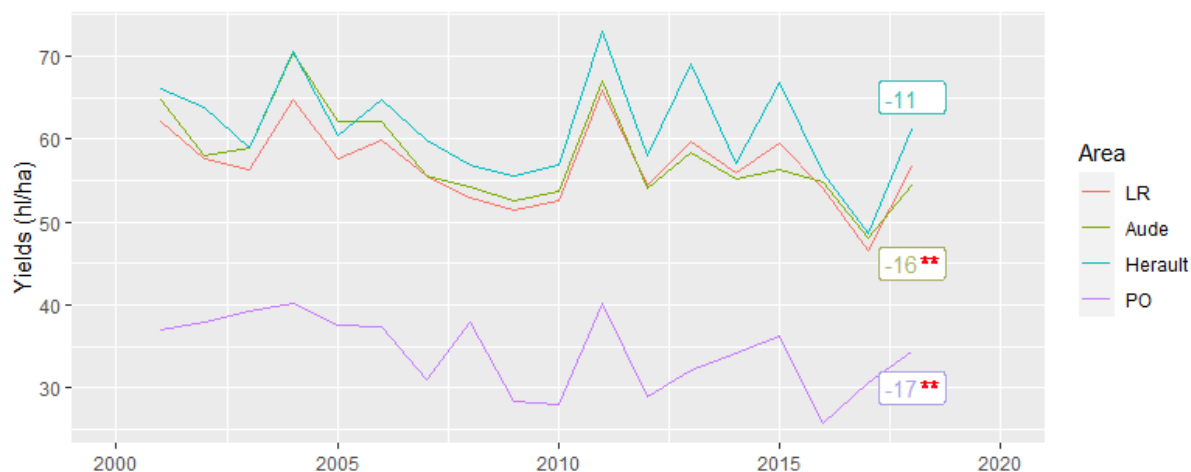


Figure V.5: Evolution des rendements en hl/ha des vignobles par départements et région ex-Languedoc-Roussillon entre 2001 et 2018. Source : Draaf Occitanie

### 3.5. Relations entre la climatologie et la date de début des vendanges

Les résultats des corrélations entre les paramètres de températures et précipitations moyennes de la zone en vignoble pour la période de croissance (avril-septembre) et la date de début des vendanges sont indiqués en Figure V.7. Les températures sont négativement corrélées avec la date de début des vendanges et montrent une significativité très élevée ( $p < 0.01$ ) et un coefficient de détermination  $r^2 = 0.53$ . Les précipitations sont positivement mais faiblement corrélées ( $p = 0.14$ ) avec la date de début des vendanges.

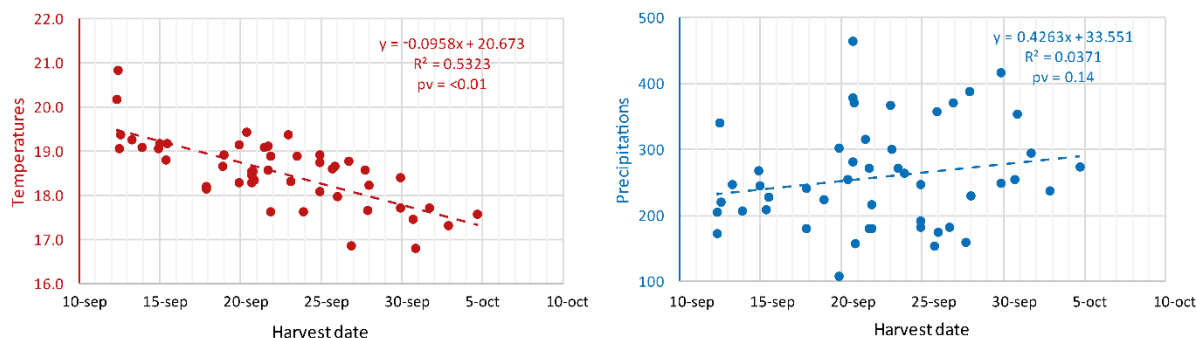


Figure V.6: Corrélation de Pearson et  $r^2$  sur la période 1959-2007 entre la date de début des vendanges des vignobles du languedoc et les températures (gauche) et précipitations (droite) de l'ensemble de la zone en vignoble et pour la saison de croissance avril-septembre

### 3.6. Indices bioclimatiques et relation avec la date de début des vendanges et les rendements

Les 4 indices bioclimatiques précédemment présentés montrent tous, à l'exception des températures minimales du mois de septembre de Tonietto (1999), des progressions vers des

catégories supérieures sur la période 1959-2018 (Figure V.8). Les zones situées directement sur la côte montrent des valeurs d'indice, et donc de catégories, généralement plus élevées que dans les zones situées davantage dans l'arrière-pays. La différence des valeurs d'indice entre ces deux zones est d'ailleurs plus importante en début de période (1959-1962) qu'en fin (2015-2018). La plaine du Roussillon atteint la catégorie maximale pour l'indice de Winkler sur la période 2015-2018 en accumulant plus de 2205°C de températures moyennes au-dessus de 10° sur la période de croissance. L'indice de Huglin affiche également une augmentation importante du cumul des températures moyennes et maximales lors de la saison de croissance ; la zone située sur l'aval des bassins de l'Hérault et de l'Orb notamment atteint deux catégories supérieures, passant de la catégorie « frais » à « tempéré-chaud » selon la classification indiquée en Table V.1. D'autres localisations spécifiques dans la vallée de l'Aude ou sur la côte Vermeille montrent des progressions similaires. Seul l'indice de Tonietto, montrant la valeur moyenne des températures minimales des mois de septembre change peu ; Les valeurs de cet indice restent entre 14 et 18°C (catégorie « tempérées ») et atteignent localement dans les reliefs des bassins de l'Aude, de l'Orb et de l'Hérault 12-14°C (catégorie « frais »).

Les corrélations linéaires de Pearson entre la date de début des vendanges et les indices bioclimatiques sont élevées et hautement significatives ( $p < 0.05$ ) notamment pour les indices de Huglin, Winkler et Jones où les  $r^2$  sont de  $r^2 = 0,57$ ,  $0,54$  et  $0,54$  respectivement (Figure V.8). L'indice de températures minimales au mois de septembre (Tonietto) montre un  $r^2$  bien moins élevé de  $r^2 = 0,0039$ . Ceci s'explique par le fait que la date des vendanges a souvent lieu au cours du moins de septembre sur la période 1959-2007 et il n'est donc pas très pertinent de la comparer à un indice qui prend la totalité du moins de septembre dans son calcul. En revanche, les corrélations de Pearson entre les indices bioclimatiques, climatiques et les rendements par département administratifs sont très faibles et non-significatives (Figure V.9) où les  $r^2$  restent très proche de 0.

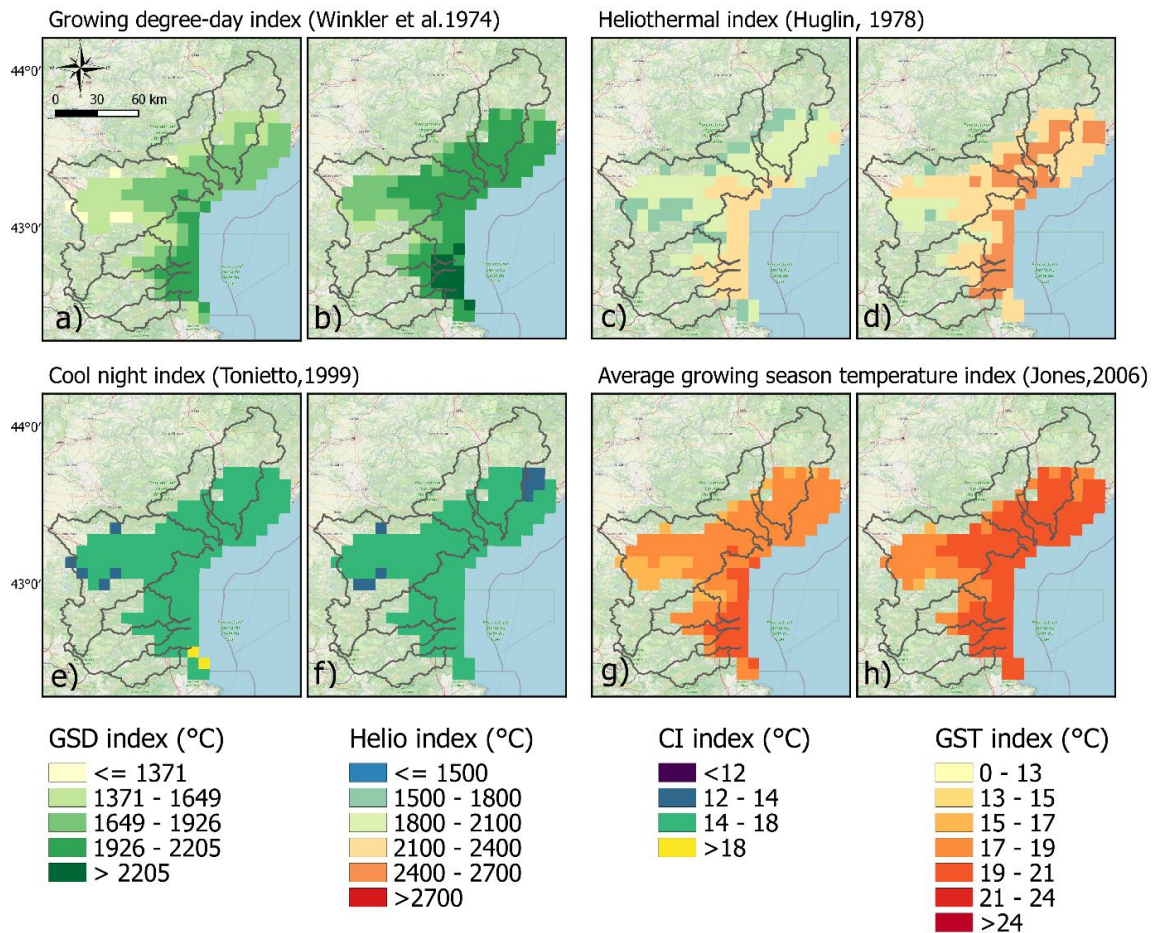


Figure V.7: Evolution des indices bioclimatiques annuels moyens dans la zone en vignoble pour les périodes a),c),e),g) 1959-1962 et b),d),f),h) 2015-2018

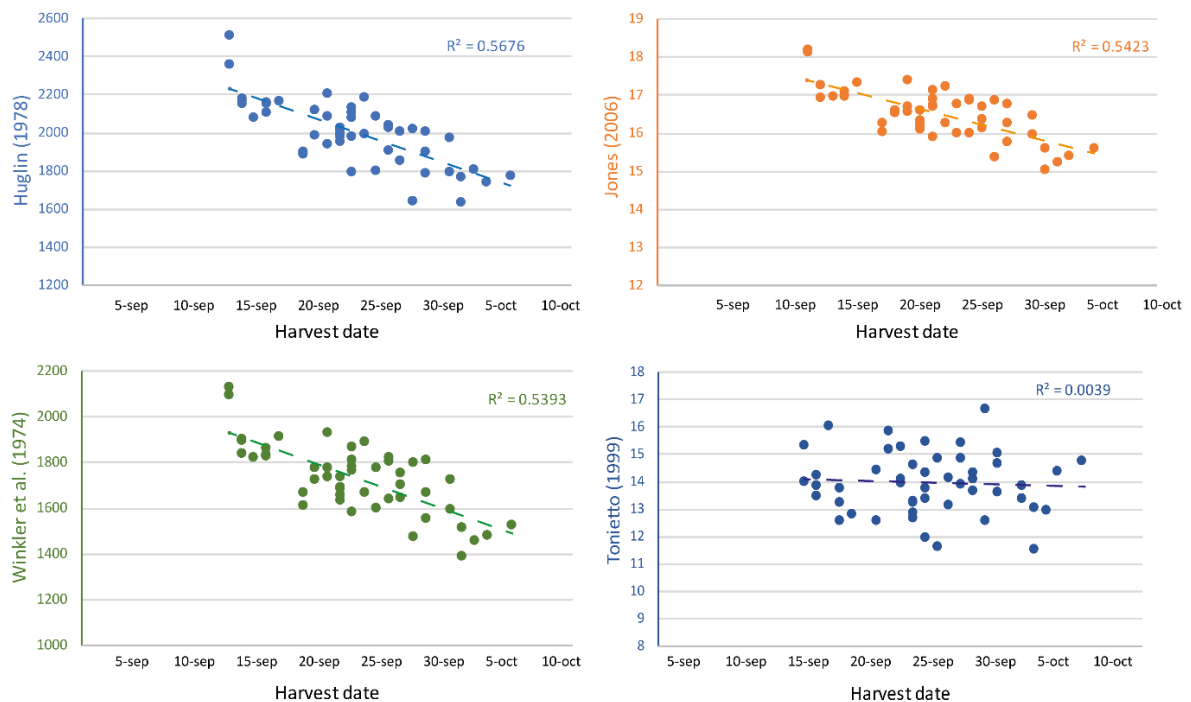


Figure V.8: Corrélation linéaire de Pearson entre la date de début des vendanges du Languedoc (Daux et al. 2012) et les indices bioclimatiques calculés pour la zone en vignoble du Languedoc-Roussillon de notre zone d'étude

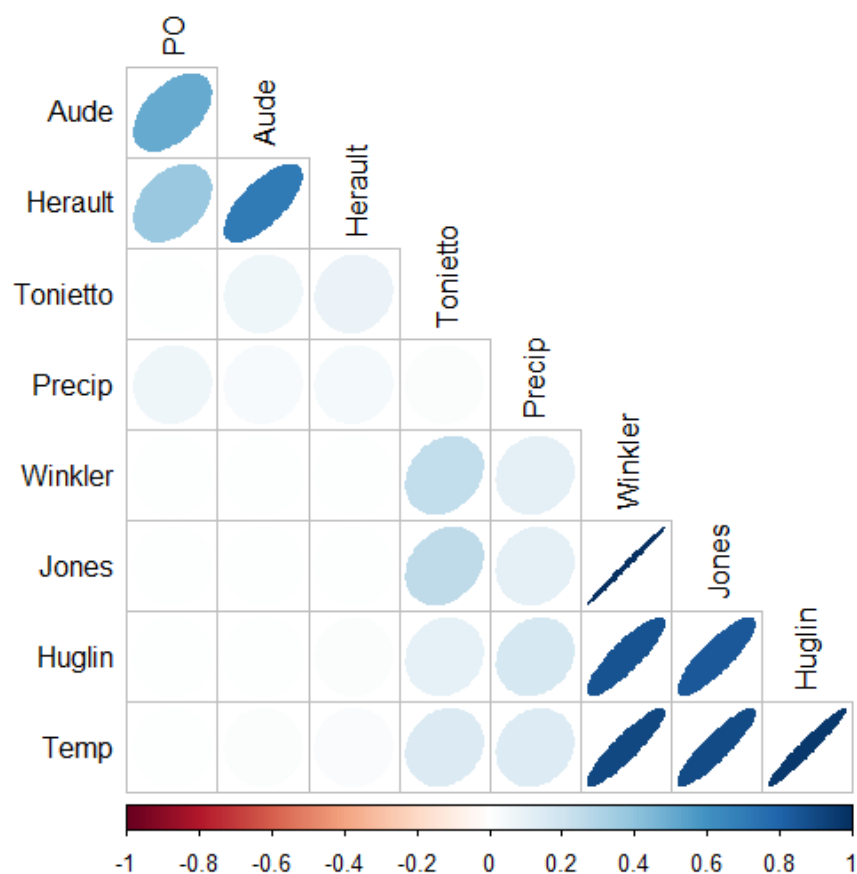


Figure V.9: Coefficient de corrélation de Pearson ( $r^2$ ) pour la période 2001-2018 entre les rendements viticoles des départements des PO, Aude et Hérault et les paramètres climatiques (Temp=températures, Precip=précipitations) pour la saison de croissance avril-septembre et avec les indices bioclimatiques de Winkler et al.(1974), Huglin (1978), Tonietto (1999) et Jones (2006)

#### 4. Discussion

Pour évaluer l'impact du changement climatique sur la viticulture au cours des dernières 6 décennies (1959-2018), nous avons utilisé deux indicateurs phénologiques qui sont la date de début des vendanges et les rendements, ainsi que quatre indices bioclimatiques qui rendent compte des conditions de températures lors des phases majeures de croissance des vignobles.

Les rendements sont obtenus sur la période 2001-2018 et sont disponibles à échelle des départements administratifs pour les PO, l'Aude et l'Hérault. Les relations entre rendements et conditions climatiques se sont avérées très faiblement corrélées. Néanmoins, leur évolution sur les 20 dernières années a montré une tendance à la baisse qui s'est avérée significative dans le cas des PO et de l'Aude et à hauteur de 17 et 16 % respectivement. En parallèle à cela, on observe un climat lors de la saison de croissance (de avril à septembre) qui évolue vers des températures plus chaudes et dont l'augmentation est particulièrement marquée dans le département de l'Hérault (+2,4 °C contre 1,5 °C dans les PO) ainsi que des précipitations qui

ont tendance à diminuer, davantage dans les PO (-5,6 % lors de la saison de croissance contre + 4,7 dans l'Hérault) bien que celles-ci ne soient pas significatives.

Les dates de début des vendanges constituent une série temporelle longue de plusieurs siècles, reconstruites à partir de séries composites disponibles pour des vignobles uniquement languedociens et donc peu représentatives des vignobles roussillonnais. Bien que la série présente le défaut de ne pas aller au-delà de l'année 2007, elle montre une anti-corrélation forte et hautement significative ( $p < 0.05$ ) avec les températures moyennes lors de la saison de croissance (Figure V.6). En revanche, la relation avec les précipitations de la saison de croissance est beaucoup plus faible. Cette relation très marquée avec les températures nous a mené à privilégier l'utilisation d'indicateurs bioclimatiques construits sur la base des températures de la saison de croissance. Nous en avons donc sélectionné quatre et proposons de définir et de suivre l'évolution de zones aux caractéristiques climatiques optimales pour la culture des vignobles.

Parmi ces indicateurs, trois se sont montrés particulièrement intéressants : le premier est l'indice de Jones (2006), qui permet de connaître les conditions de températures moyennes lors de la période de croissance allant des mois de avril à septembre. L'étude de Jones et al., (2005), reprise dans Hannah et al., (2013), permet de connaître les valeurs d'indice optimales pour la culture des 4 cépages majeurs de la zone d'étude (qui sont le Merlot, le Syrah, le Grenache et le Carignan). D'après les tranches de températures moyennes basses et hautes tolérées par ceux-ci, on a pu définir une valeur de l'indice de Jones optimale à 18 °C. De même, l'indice de Huglin (1978) présente l'avantage par rapport aux autres indices de prendre en compte la contribution des températures maximales. Ces dernières sont un élément important à considérer dans la mesure où, ensembles avec les températures moyennes, elles sont plus fortement liées aux variations de stades phénologiques des vignes que les températures minimales (Ruml et al., 2016). Les valeurs optimales de l'indice de Huglin dans notre région se situeraient entre les températures cumulées de 2100 et 2700 °C lors de la saison de croissance. Un troisième indice d'intérêt est celui de Winkler (1974) ; il propose de calculer les températures moyennes accumulées sur une période de croissance allant du mois de avril à octobre. Il est relativement moins intéressant que les deux indices précédents car la date des vendanges dans notre zone d'étude a lieu en général avant le mois d'octobre. Néanmoins, il donne des résultats proches de ce qui est obtenu avec l'indice de Huglin et permet ainsi d'identifier une tranche de températures optimales pour la culture de la vigne au-dessus de 2000 °C moyens accumulés. Finalement, ces

valeurs optimales de chaque indice convergent sur une date des vendanges optimale théorique comprise entre le 5 et 15 septembre (Figure V.6).

Suivant la répartition des valeurs optimales des indices présentées en Figure V.7 pour deux périodes qui sont 1959-1962 et 2015-2018, on peut constater que les zones aux caractéristiques climatiques optimales se sont décalées de la bordure méditerranéenne vers l'arrière-pays pour chaque département et bassin versant. L'indice de Huglin, qui montrait des valeurs optimales pour la plaine du Roussillon ainsi que la bordure méditerranéenne jusqu'à l'embouchure de l'Hérault sur la période 1959-1962, indique que celles-ci se sont décalées dans l'arrière-pays de chaque bassin versant et notamment dans celui de l'Aude sur la période 2015-2018. Le Roussillon et la bordure méditerranéenne montrent des conditions qui avoisinent les limites supérieures lors des années les plus récentes et, au contraire, les bassins de l'Hérault et l'Orb qui se trouvaient en-deçà des limites inférieures en début de période montrent à présent des conditions optimales voire qui avoisinent dans certains endroits les limites supérieures. L'indice de Jones montrait des valeurs déjà proches des limites supérieures pour la plaine du Roussillon et l'aval de l'Agly et de l'Aude en début de période (1959-1962), puis ces conditions « limites » se sont étendues à l'aval des bassins de l'Orb et de l'Hérault en fin de période (2015-2018), ne laissant plus que la vallée du Minervois-Lauragais dans le bassin de l'Aude comme zone aux caractéristiques optimales. On observe ainsi globalement une migration vers l'intérieur des terres et sur les zones de reliefs moyens des conditions climatiques optimales pour la viabilité des cépages. Le bassin de l'Aude devient particulièrement avantageux sur ce plan par rapport aux autres bassins. En accord avec cette observation, Sánchez et al., (2019) calculaient les aires appropriées pour la viabilité des cépages en AOP de la Sierra de Salamanca (Espagne) et concluaient qu'à l'horizon 2050 les zones de plus hautes altitudes seraient climatiquement favorables aux plantations de vigne, montrant une augmentation des températures et une réduction des précipitations lors de la saison de croissance.

Cette approche reste cependant théorique et parmi les pistes d'amélioration, davantage de recherches sur l'influence des précipitations ainsi que de la variabilité climatique sur l'évolution des stades phénologiques des vignobles seraient requises. Aussi, certains indicateurs comme la date des vendanges, ne sont souvent pas exclusivement dépendants de conditions climatiques mais également d'un contexte socio-économique. Dans la mesure où les situations économiques et sociales évoluent de décennies en décennies, ou à plus large échelle d'un siècle à l'autre, les pratiques viticoles changent avec elles en fonction d'une multitude de paramètres (conflits, situation politique, situation sanitaire, etc). C'est d'ailleurs ce que l'on peut observer en Figure

V.4 où les dates des vendanges des vignobles languedociens ont fortement évolués entre le début du mois de septembre et la fin du mois d'octobre au cours des siècles. Dans son étude, Daux (2010) rappelle que le lien reliant climat et dates historiques des vendanges est incertain et souligne que le travail consistant à lier l'évolution de ces deux paramètres est très compliqué. Van Leeuwen et Darriet, (2016), soulignent néanmoins que la date d'arrivée à maturation d'un vignoble pour l'hémisphère Nord serait idéalement comprise entre le 10 septembre et le 10 octobre. Dans notre région, qui est soumise à des conditions climatiques moyennes particulièrement chaudes et sèches, il ne serait pas surprenant que cette date « générique » se rapproche du début du mois de septembre. La date de début des vendanges est par ailleurs très dépendante du type de cépage ainsi que la localisation de celui-ci ; pour une même latitude, les cépages situés en relief sont vendangés plus tardivement.

Parmi les solutions d'adaptation des vignobles aux nouvelles conditions climatiques, faire « migrer » la zone de production viticole et/ou sélectionner des cépages plus adaptés sont des pistes à étudier. Le Carignan est le cépage qui montrait les valeurs de tolérances en températures moyennes les plus hautes d'après l'indice de Jones. Ce dernier est pourtant un cépage qui a subi des arrachages massifs à partir des années 1970s dans la région (Figure V.3) ; les arrachages ont laissé place aux plantations de cépages climatiquement moins adaptés. La raison derrière ces faits est que le vignoble est passé progressivement d'une production quantitative à une production qualitative en variant les cépages et jouant sur les caractéristiques de chacun. En ce qui concerne la recherche de nouveaux cépages étrangers ou hybrides, Jones et al., (2005) mentionnent par exemple le Zinfandel (cépage originaire de Croatie et très utilisé aux Etats-Unis) et le Nebbiolo (cépage de la région du Piémont en Italie) dont les rangs de températures moyennes de saison de croissance s'étalent jusqu'à 1 degré au-dessus de la limite supérieure de tolérance du Carignan. Aussi, en dehors de ces stratégies d'adaptation recherchées, il est important de souligner que l'aptitude d'une zone à la viticulture ne s'arrête pas aux seules conditions climatiques mais elle repose aussi en grande partie sur les caractéristiques pédologiques (van Leeuwen et al., 2013). Ces auteurs insistent fortement sur ce point essentiel qui leur paraît souvent sous-estimé dans les études de viabilité de la viticulture sous des climats plus chauds secs et ils suggèrent que, malgré les nouvelles difficultés rencontrées liées aux conditions climatiques changeantes, la vigne reste malgré tout fortement dépendante des conditions pédologiques et serait moins vulnérable qu'on ne le pense. Néanmoins, afin de pallier ces nouvelles contraintes, de nombreuses innovations techniques et changements des pratiques viticoles en général font jour. A commencer par la pratique de l'irrigation, qui a été

proscrite pendant des siècles dans le vignoble du Languedoc-Roussillon puis s'est insérée progressivement depuis les années 2000s jusqu'à ce que le vignoble devienne rapidement le premier de France en termes de surfaces viticoles irriguées (Ojeda and Saurin, 2014). Témoin de ces transformations, la législation évolue et adopte en 2006 le décret 2006-1526 du cadre général des apports d'eau qui fixe la période pendant laquelle les vignerons ont le droit d'irriguer leurs vignobles. En 2020, l'Inrae affirme que 15 % des vignobles sont irrigués dans les bassins Languedoc-Roussillon et bassins viticoles de la région PACA et que 2000 ha s'ajoutent chaque année à ce chiffre. Des techniques nouvelles émergent de ces pratiques récentes comme la ré-utilisation des eaux sortant des stations d'épuration (appelées reut) (L'Indépendant, 2021). Mais l'irrigation comporte cependant de nombreux aspects négatifs qu'il est important d'évaluer avant d'y recourir, le premier étant la pression supplémentaire imposée à la ressource en eau. Pour les vignobles du Roussillon dans les PO, la chambre d'agriculture perçoit le recours à l'irrigation comme un moyen d'augmenter et de stabiliser les rendements viticoles (Chambre d'Agriculture des Pyrénées-Orientales, 2020).

## 5. Conclusions

Ce chapitre visait à s'intéresser aux impacts possibles des changements climatiques récents sur l'activité viticole, secteur économique phare pour la zone d'étude. Il s'intéresse à la fois à l'évolution sur les décennies récentes de variables indicatrices de l'état de la production viticole (rendements), de la phénologie des vignobles (date de début des vendanges), des pratiques associées (choix des cépages), ainsi qu'à l'évolution des paramètres climatiques (températures et précipitations) lors de la période de croissance avril-septembre. En outre, des indicateurs bioclimatiques, construits sur la base des températures sont calculés et utilisés pour comprendre les liens entre évolution climatique et viticole. Finalement, les conclusions de ce chapitre peuvent être tirées comme suit :

- Les paramètres de précipitations ne montrent que de légères tendances à la baisse (3,2 % en moyenne annuellement sur la période 1959-2018) et qui sont faiblement significatives. Les températures sont en augmentation sur la période de croissance ; elles ont gagné 1,9 °C en moyenne sur la période 1959-2018.
- Les données de rendements rendues disponibles par la Draaf de l'Occitanie indiquent une évolution à la baisse des rendements pour l'Hérault, l'Aude et les PO, avec une réduction particulièrement importante et significative de -17 % dans les PO sur la



période 2001-2018. Aucune corrélation statistique significative n'a été détectée entre les rendements et la climatologie de la zone d'étude.

- Les vignobles du Languedoc et du Roussillon subissent les effets du réchauffement climatique. La date de début des vendanges est fortement anti-corrélée avec les températures moyennes de la saison de croissance, elles-mêmes en augmentation de 1,9 °C sur la période 1959-2018 ainsi qu'avec les indices bioclimatiques de Winkler et al. (1974), Huglin (1978) et Jones (2006).
- Au vu de l'évolution des indices bioclimatiques vers des catégories supérieures, certaines limites de tolérance en températures des cépages alors utilisés dans la région (principalement Carignan, Syrah, Grenache et Merlot) sont atteintes. En termes de climatologie, les zones susceptibles d'être cultivées de ces cépages se décalent vers l'intérieur des terres et en altitude, en accord avec certaines études également menées en Europe et dans le monde. Le cépage Carignan, arraché en masses depuis les années 1970s puis stabilisé que depuis les années 2010s est le cépage le mieux adapté aux conditions climatiques car il présente une limite de tolérance des températures supérieures par rapport aux autres cépages. Il est cependant lui-même proche de sa limite de tolérance dans la partie la plus proche de la bordure méditerranéenne du vignoble Languedoc-Roussillon.

Cette étude met en avant l'intérêt de l'utilisation des indices bioclimatiques pour rechercher ou redéfinir des zones aux caractéristiques climatiques « optimales » pour l'utilisation de certains cépages. Dans notre zone, nous avons retenu la valeur optimale de l'indice de Jones à 18 °C, et une tranche de températures accumulées optimales d'après l'indice de Huglin comprise entre 2100 et 2700 °C. En outre, les indices bioclimatiques permettent d'identifier les cépages adaptés ou inadaptés aux conditions climatiques d'une zone. Simple d'utilisation, ils peuvent facilement être utilisés dans des études de prospection pour les décennies à venir. Certains cépages plus adaptés à des températures élevées ne sont pas encore utilisés dans le vignoble du Languedoc-Roussillon, pourtant, ils pourraient être une solution pour maintenir l'activité viticole dans cette région.

# Conclusions Générales

## Rappel des objectifs

Cette thèse s'intéresse aux évolutions des changements climatiques et hydrologiques qui affectent les six bassins versants côtiers de la région Occitanie-Est à la fois sur la période historique des 6 dernières décennies et aussi sous projections climatiques à 2100. Les liens entre climat et ressource en eau sont étudiés ainsi que l'évolution de la variabilité climatique et de leurs extrêmes. En lien avec ces changements, l'évolution d'un ensemble d'indices bioclimatiques pertinents pour la viticulture a été analysé afin de déterminer la pérennité de ces cultures au niveau local. Au vu de la continuité des changements climatiques, du réchauffement qui devrait se renforcer en Méditerranée au cours du 21<sup>ème</sup> siècle, de l'évolution croissante du nombre et de l'intensité des extrêmes de températures et de l'incertitude quant à l'évolution des précipitations, de nombreuses facettes du quotidien de nos sociétés peuvent être modifiées. La part de la recherche scientifique qui se concentre sur l'étude du devenir possible du climat et de ses extrêmes ainsi que sur les possibilités d'adaptation à ces changements est plus que jamais indispensable.

## Synthèse des résultats

Sur les décennies englobées par les années 1959-2018, la ressource en eau, représentée par le débit des 6 fleuves côtiers, a subi une importante diminution annuelle de 30 à 45 %. Une telle réduction interroge sur les facteurs (climatiques ou anthropiques) qui ont conduit à ces évolutions ainsi que sur le devenir de la ressource en eau pour les décennies à venir. Au cours du Chapitre II, les analyses statistiques des paramètres climatiques et anthropiques nous ont permis d'observer que, malgré des caractéristiques climatiques et anthropiques différentes pour chaque bassin versant, ceux-ci affichent des valeurs de réduction des débits de leurs fleuves côtiers similaires. Chaque série hydrologique a pu être reconstituée à partir de l'utilisation d'un modèle statistique ne nécessitant que deux paramètres climatiques, températures et précipitations mensuelles. Les séries ainsi modélisées ont indiqué une bonne capacité de reproduction (de 78 à 88 %) des débits annuels observés. Par ailleurs, les analyses de l'évolution des activités anthropiques en lien avec la ressource en eau, et notamment l'irrigation, montrent une évolution à la baisse de celles-ci. Ces éléments soutiennent l'hypothèse selon laquelle le climat a été un facteur principal dans la réduction de la ressource en eau observée au cours des

60 dernières années. Quant à l'évolution climatique même, celle-ci montre une réduction faible et peu significative des précipitations. En revanche un réchauffement hautement significatif est détecté, de 1,6 °C en moyenne sur l'ensemble des bassins versants. Une analyse de sensibilité permet de montrer qu'un réchauffement de cette ampleur pourrait être responsable d'une réduction d'environ 25 % des ressources en eau.

Mais projeter les tendances historiques observées pour les décennies à venir doit être fait avec précaution. Les tendances sont influencées par la variabilité naturelle et climatique, et sans connaître exactement le poids de chacune, il est difficile de définir avec certitude quelles seraient les projections futures attendues. Explorer les évolutions au cours des décennies à venir est le travail qui est proposé dans le Chapitre III de cette thèse. L'analyse à partir des données issues des simulations CMIP5 montrent une augmentation des températures annuelles homogènes dans tous les bassins versants de 4,5°C en moyenne dans le cas d'un scénario RCP 8.5, scénario climatique extrême, et une réduction de -14 % des précipitations pour ce même scénario. Par conséquent, et toujours pour des conditions extrêmes, les débits des fleuves côtiers pourraient diminuer de -49 à -88 %. Ce chapitre montre en outre que la zone d'étude peut être scindée en 2 zones aux fonctionnements hydro-climatiques différents. Ceci est dû au fait que chaque zone possède un lien distinct avec les indices principaux de la circulation atmosphérique et pertinents pour notre zone d'étude. Ces zones sont une zone occidentale, qui englobe la majeure partie des bassins versants de l'Aude, l'Agly et la Têt et une zone orientale qui englobe les bassins de l'Hérault, l'Orb et le Tech. Ces observations sont aussi en accord avec le chapitre précédent en ce sens qu'il y était observé un réchauffement plus important dans les bassins de la zone orientale et une réduction des précipitations uniquement détectée (bien que faiblement significative) dans les bassins versants de la zone occidentale (à l'exception du Tech). La climatologie caractéristique de chaque bassin versant y montrait aussi une plus grande saisonnalité des précipitations pour les bassins versants de l'Hérault et l'Orb (et dans une moindre mesure le Tech) que pour les bassins versants de l'Aude, l'Agly et la Têt. La zone orientale est alors davantage liée aux indices méditerranéens de la circulation atmosphérique (MO et WeMO) ; alors que la zone occidentale est davantage liée aux indices atlantiques (NAO et Scand). Les évolutions à l'horizon 2100 montrent une réduction des indices Scand et WeMO. Alors que l'indice Scand est positivement corrélé avec les précipitations de printemps et d'été des 2 zones, la WeMO est anti-corrélée avec les précipitations d'automne et d'hiver de la zone orientale. Par conséquent, dans le cas d'un scénario climatique extrême (rcp 8.5), les évolutions de précipitations montrent des réductions plus importantes dans la zone occidentale (-13 % en

moyenne) que dans la zone orientale (-6 %) où l'effet de la réduction de la WeMO pourrait modérer les réductions des précipitations.

La question phare qui est soulevée dans le Chapitre IV est celle de l'évolution des événements extrêmes des précipitations, températures et hydrologiques pour la région. Les extrêmes de précipitations sont importants pour soutenir les débits annuels des fleuves côtiers méditerranéens, mais lorsque ceux-ci sont trop violents et/ou trop nombreux, ils sont une menace pour les activités anthropiques. Malgré des précipitations stationnaires voire en légère baisse dans les bassins versants situés au Sud, il est attendu, et particulièrement en Méditerranée, que le nombre d'extrêmes des précipitations et leur intensité augmentent. Dans ce travail et pour cette région il est trouvé plutôt le contraire. Les précipitations extrêmes, que ce soit leur nombre ou leur intensité, ont tendance à diminuer sur la période historique et le nombre de jours en crue également. La réduction du nombre de crues, notamment détectée dans les fleuves appartenant à la zone occidentale, serait due au fait que cette même zone est celle qui voit ses précipitations annuelles diminuer (cf Chapitre II) et par conséquent les sols dans ces bassins versants seraient plus secs, ce qui rend plus difficile le déclenchement des crues. Les projections sous un scénario de réchauffement extrême montrent une tendance à la légère hausse des cumuls de précipitations lors des événements extrêmes mais avec une significativité faible. Les extrêmes de températures sont en hausse sur la période historique et les modèles climatiques sont en accords dans la prévision d'un plus grand nombre d'événements extrêmes pour les décennies à venir. On note, comme dans beaucoup d'autres travaux scientifiques, que si les températures sont plus facilement reproduites par les modèles, les précipitations constituent un élément phare dans l'étude des changements climatiques qui souffre encore de nombreuses incertitudes. Pourtant c'est un élément essentiel dans l'évolution de la ressource en eau et de sa disponibilité.

Autant de modifications des conditions climatiques ont bien entendu un impact non négligeable sur les activités anthropiques. Parmi les activités qui peuvent être lourdement impactées, l'agriculture se situe au premier rang. Pour notre zone d'étude, c'est la viticulture qui est la plus susceptible d'être touchée. Le Chapitre V montre que la région comprise dans la zone d'étude qui héberge les vignobles du Languedoc-Roussillon est marquée par une augmentation importante des températures de 1,9°C au cours des 60 dernières années et pendant la période de croissance des vignes ainsi qu'une faible réduction des précipitations (peu significative). En parallèle, les rendements des vignobles ont tendance à diminuer et ceci est particulièrement marqué pour le département des Pyrénées-Orientales. Un ensemble d'indices bioclimatiques

basé sur le paramètre de température permettent d'explorer les limites géographiques de pérennité de la vigne pour notre région. En sélectionnant des valeurs définies comme « optimales » des indices les plus pertinents, il est remarqué que la zone aux conditions climatiques optimales pour le vignoble se décale vers l'intérieur des terres et sur les zones situées plus en relief. L'accumulation des températures au cours de la période de croissance avoisine peu à peu voire dépasse les limites optimales à proximité du littoral méditerranéen. Les valeurs de tolérance aux températures diffèrent d'un cépage à un autre. Et ce même chapitre montre que les indices bioclimatiques sont un outil intéressant et simple d'utilisation qui mérite d'être utilisé dans le cadre de recherches sur les stratégies d'adaptation aux changements climatiques possibles pour le secteur viticole.

### **Perspectives**

Cette thèse constitue une contribution à la recherche sur les changements climatiques et hydrologiques qui affectent le Sud de France et impactent son secteur agricole phare, la viticulture. Beaucoup de questions ont été avancées dans ce travail dont certaines méritent d'être explorées plus en profondeur. Le modèle statistique présenté au Chapitre II montrait qu'une part d'environ 15 % était manquante dans la reconstitution « idéale » des séries hydrologiques observées. Pour combler ce manque, plus d'attention sur la contribution des activités anthropiques sur la variabilité des séries hydrologiques serait nécessaire. C'est une étude difficile à mettre en place en ce sens que les activités anthropiques et leurs interactions avec la ressource en eau sont complexes et les données associées à ce type de variables souffrent d'un manque de résolution spatio-temporelle, et/ou d'une grande variabilité des techniques qui ont été appliquées pour acquérir les données. Affiner la résolution spatiale (au moins à échelle des départements) est une piste nécessaire pour mieux comprendre les interactions humain-eau au sein d'un bassin versant et les perspectives d'évolution de la ressource en eau associées à ses interactions sur le long terme.

Un autre sujet d'intérêt, qui est en ce moment en train d'être traité (mais à plus grande échelle spatiale) est celui de l'influence des indices de la circulation atmosphérique sur les sécheresses. Les indices de sécheresse comme le RDI et le SPEI ont prouvé leur pertinence au cours des Chapitres II et III pour l'étude de l'évolution climatique et hydrologique. Un travail qui devait avoir eu lieu plus tôt au cours de la thèse (mais qui a été repoussé jusqu'à la toute fin de cette thèse du fait de la crise Covid-19) consistait à étudier la prédictibilité des sécheresses à partir des caractéristiques des indices de la circulation atmosphérique avec un délai de plusieurs mois

(1 à 6 mois). Ce travail est donc actuellement en cours de développement au sein de l'unité Disaster Risk Management au centre de la Commission Européenne (site de Ispra). L'intérêt de ce type d'étude et de pouvoir apporter *in fine* une expertise sur l'état des conditions hydro-climatiques prévues dans les mois à venir sur l'ensemble de l'Europe et en avertir les décideurs. Le secteur agricole est celui qui est le plus visé par ce type d'étude. Si telles ou telles conditions extrêmes sont attendues, le secteur pourra intervenir et modifier ses pratiques pour faire face au mieux aux conditions attendues et limiter ainsi les pertes.

En lien avec le secteur agricole et recentré sur le Sud de France, l'étude sur l'impact des changements climatiques sur la pérennité de la viticulture est une piste qui mériterait d'être développée plus dans le détail encore. Dans le cas de ce travail, la date des vendanges par exemple n'était pertinente que pour les vignobles du Languedoc. En collaboration avec les agriculteurs ainsi qu'avec la chambre d'agriculture, il serait possible d'avoir davantage d'informations sur les vignobles roussillonnais, ce qui permettrait d'améliorer l'étude. L'analyse des indicateurs bioclimatiques montraient de premiers éléments intéressants. Utiliser les données issues des simulations climatiques pour les décennies à venir pourraient par exemple donner plus d'éléments sur la pérennité de la viticulture dans la région.

## Références

Afzal, M. and Ragab, R.: Assessment of the potential impacts of climate change on the hydrology at catchment scale: modelling approach including prediction of future drought events using drought indices, *Appl Water Sci*, 10, 215, <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01293-1>, 2020.

Alexander, L. and Herold, N.: A document prepared on behalf of The Commission for Climatology (CCI) Expert Team on Sector-Specific Climate Indices (ET-SCI), 46, n.d.

Alonso Ugaglia, A., Cardebat, J.-M., and Jiao, L.: The French Wine Industry, in: *The Palgrave Handbook of Wine Industry Economics*, edited by: Alonso Ugaglia, A., Cardebat, J.-M., and Corsi, A., Springer International Publishing, Cham, 17–46, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-98633-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-98633-3_2), 2019.

Ambroise, B., Perrin, J. L., and Reutenauer, D.: Multicriterion Validation of a Semidistributed Conceptual Model of the Water Cycle in the Fecht Catchment (Vosges Massif, France), 31, 1467–1481, <https://doi.org/10.1029/94WR03293>, 1995.

FAOSTAT (base de données): [www.fao.org/faostat/fr/#data](http://www.fao.org/faostat/fr/#data), last access: 21 July 2021.

Réutiliser les eaux usées pour irriguer la vigne: <https://www.inrae.fr/actualites/reutiliser-eaux-usees-irriguer-vigne>, last access: 13 July 2021.

Cartographie du vignoble de l'AOC Languedoc | AOC Languedoc | Vins | Site Officiel: <http://www.languedoc-aoc.com/fr/decouvrez/laoc-languedoc/cartographie-du-vignoble-de-laoc-languedoc>, last access: 28 June 2021.

Chapter 2 - FAO Penman-Monteith equation: <http://www.fao.org/3/X0490E/x0490e06.htm>, last access: 30 July 2020.

Chiffres et analyses|Agreste, la statistique agricole: <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/irrigation/5b74baf2-991c-41ae-a920-02217b25d182/search/>, last access: 15 November 2020.

Copernicus: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/projections-cmip5-monthly-single-levels?tab=form>, last access: 21 February 2021.

DRIAS: <http://www.drias-climat.fr/commande>, last access: 19 March 2021.

Insee - Statistiques locales - Indicateurs : cartes, données et graphiques: [https://statistiques-locales.insee.fr/#c=indicator&i=pop\\_legales.popmun\\_&s=2017&view=map2](https://statistiques-locales.insee.fr/#c=indicator&i=pop_legales.popmun_&s=2017&view=map2), last access: 30 September 2020.

International Organisation of Vine and Wine (OIV): [www.oiv.int/fr](http://www.oiv.int/fr), last access: 22 July 2021.

Irrigation de la vigne en Europe: le point sur la législation | Irrigazette: <https://irrigazette.com/fr/articles/irrigation-de-la-vigne-en-europe-le-point-sur-la-legislation>, last access: 2 July 2021.

MOI data: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/moi/>, last access: 21 February 2021.

NOAA:

[https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily\\_ao\\_index/teleconnections.shtml](https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/teleconnections.shtml), last access: 21 February 2021.

NOAA Physical Sciences Laboratory: [https://psl.noaa.gov/data/20thC\\_Rean/timeseries/monthly/NAO/index.html](https://psl.noaa.gov/data/20thC_Rean/timeseries/monthly/NAO/index.html), last access: 21 February 2021.

Ashenfelter, O. and Storchmann, K.: Using a Hedonic Model of Solar Radiation to Assess the Economic Effect of Climate Change: The Case of Mosel Valley Vineyards, <https://doi.org/10.3386/w12380>, 2006.

Aunay, B., Le Strat, P., Duvail, C., Dörfli, N., and Ladouche, B.: Méthode d'analyse géologique sur la karstification des Corbières orientales et influence des événements néogènes (Tortonno-messiniens), in: IAHS-AISH publication, Hydrology of Mediterranean and semiarid regions (Montpellier, 1-4 April 2003), 124–129, 2003.

Ausseil, A.-G. E., Law, R. M., Parker, A. K., Teixeira, E. I., and Sood, A.: Projected Wine Grape Cultivar Shifts Due to Climate Change in New Zealand, *Front Plant Sci*, 12, 618039, <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.618039>, 2021.

Badler, V. R.: The Archaeological Evidence for Winemaking, Distribution, and Consumption at Proto-Historic Godin Tepe, Iran, in: *The Origins and Ancient History of Wine*, Routledge, 1996.

Bador, M., Terray, L., Boé, J., Somot, S., Alias, A., Gibelin, A.-L., and Dubuisson, B.: Future summer mega-heatwave and record-breaking temperatures in a warmer France climate, *Environ. Res. Lett.*, 12, 074025, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa751c>, 2017.

Barnston, A. G. and Livezey, R. E.: Classification, Seasonality and Persistence of Low-Frequency Atmospheric Circulation Patterns, 115, 1083–1126, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2), 1987.

Basile, A., Albrizio, R., Autovino, D., Bonfante, A., De Mascellis, R., Terribile, F., and Giorio, P.: A modelling approach to discriminate contributions of soil hydrological properties and slope gradient to water stress in Mediterranean vineyards, *Agricultural Water Management*, 241, 106338, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106338>, 2020.

Bennett, B., Leonard, M., Deng, Y., and Westra, S.: An empirical investigation into the effect of antecedent precipitation on flood volume, *Journal of Hydrology*, 567, 435–445, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.025>, 2018.

Beranová, R. and Kyselý, J.: Links between circulation indices and precipitation in the Mediterranean in an ensemble of regional climate models, 2016.



Bernstein, L., Bosch, P., Canziani, O., Chen, Z., Christ, R., and Riahi, K.: *Climate Change 2007: Synthesis Report*, IPCC, Geneva, 104 pp., 2007.

Bindi, M. and Olesen, J. E.: The responses of agriculture in Europe to climate change, *Reg Environ Change*, 11, 151–158, <https://doi.org/10.1007/s10113-010-0173-x>, 2011.

Blanchet, J., Molinié, G., and Touati, J.: Spatial analysis of trend in extreme daily rainfall in southern France, *Clim Dyn*, 51, 799–812, <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3122-7>, 2018.

Blöschl, G., Hall, J., Viglione, A., Perdigão, R. A. P., Parajka, J., Merz, B., Lun, D., Arheimer, B., Aronica, G. T., Bilibashi, A., Boháč, M., Bonacci, O., Borga, M., Čanjevac, I., Castellarin, A., Chirico, G. B., Claps, P., Frolova, N., Ganora, D., Gorbachova, L., Gül, A., Hannaford, J., Harrigan, S., Kireeva, M., Kiss, A., Kjeldsen, T. R., Kohnová, S., Koskela, J. J., Ledvinka, O., Macdonald, N., Mavrova-Guirguinova, M., Mediero, L., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Murphy, C., Osuch, M., Ovcharuk, V., Radevski, I., Salinas, J. L., Sauquet, E., Šraj, M., Szolgay, J., Volpi, E., Wilson, D., Zaimi, K., and Živković, N.: Changing climate both increases and decreases European river floods, 573, 108–111, <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6>, 2019.

Boé, J., Terray, L., Martin, E., and Habets, F.: Projected changes in components of the hydrological cycle in French river basins during the 21st century, 45, <https://doi.org/10.1029/2008WR007437>, 2009.

Boone, A., Calvet, J.-C., and Noilhan, J.: Inclusion of a Third Soil Layer in a Land Surface Scheme Using the Force–Restore Method, *J. Appl. Meteor.*, 38, 1611–1630, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1999\)038<1611:IOATSL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1999)038<1611:IOATSL>2.0.CO;2), 1999.

Bornman, J. F., Barnes, P. W., Robson, T. M., Robinson, S. A., Jansen, M. A. K., Ballaré, C. L., and Flint, S. D.: Linkages between stratospheric ozone, UV radiation and climate change and their implications for terrestrial ecosystems, *Photochem Photobiol Sci*, 18, 681–716, <https://doi.org/10.1039/c8pp90061b>, 2019.

Boukerma, B.: *Modélisation des écoulements superficiels et souterrains dans le sud-ouest de la France : Approche du bilan hydrique*, These de doctorat, Paris, ENMP, 1987.

Bradford, R. B.: Drought Events in Europe, in: *Drought and Drought Mitigation in Europe*, edited by: Vogt, J. V. and Somma, F., Springer Netherlands, Dordrecht, 7–20, [https://doi.org/10.1007/978-94-015-9472-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-94-015-9472-1_2), 2000.

Breusch, T. S. and Pagan, A. R.: A Simple Test for Heteroscedasticity and Random Coefficient Variation, 47, 1287–1294, <https://doi.org/10.2307/1911963>, 1979.

BRL ingénierie: *Etude de détermination des volumes prélevables du bassin de la Têt. Phases 1 et 2: Caractérisation des sous bassins et aquifères - Bilan des prélèvements existants et analyse de l'évolution*, 2011.

Bueh, C. and Nakamura, H.: Scandinavian pattern and its climatic impact, 133, 2117–2131, <https://doi.org/10.1002/qj.173>, 2007.

Cam, L. M. L. and Neyman, J.: *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability: Weather modification*, University of California Press, 690 pp., 1967.

Campbell, S., Remenyi, T. A., White, C. J., and Johnston, F. H.: Heatwave and health impact research: A global review, *Health & Place*, 53, 210–218, <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2018.08.017>, 2018.

Cerdà, A.: Soil aggregate stability in three Mediterranean environments, *Soil Technology*, 9, 133–140, [https://doi.org/10.1016/S0933-3630\(96\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S0933-3630(96)00008-6), 1996.

Chambre d'Agriculture des Pyrénées-Orientales: La viticulture départementale, [https://po.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user\\_upload/Occitanie/073\\_Inst-Pyrenees-Orientales/FICHIERS/PRODUCTIONS\\_TECHNIQUES/VITICULTURE/Fiche\\_presentation.pdf](https://po.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Occitanie/073_Inst-Pyrenees-Orientales/FICHIERS/PRODUCTIONS_TECHNIQUES/VITICULTURE/Fiche_presentation.pdf), 2020.

Champonnois, V. and Erdlenbruch, K.: Willingness of households to reduce flood risk in southern France, 14, e12696, <https://doi.org/10.1111/jfr3.12696>, 2021.

Christensen, J. H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R. K., Kwon, W. T., Laprise, R., Magana Rueda, V., Mearns, L., Menendez, C. G., Raisanen, J., Rinke, A., Sarr, A., and Whetton, P.: Regional Climate Projections. Chapter 11, 2007.

Chuine, I., Yiou, P., Viovy, N., Seguin, B., Daux, V., and Ladurie, E. L. R.: Grape ripening as a past climate indicator, 432, 289–290, <https://doi.org/10.1038/432289a>, 2004.

Collet, L., Ruelland, D., Borrell-Estupina, V., and Servat, E.: Assessing the long-term impact of climatic variability and human activities on the water resources of a meso-scale Mediterranean catchment, 59, 1457–1469, <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.842073>, 2014.

Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichet, T., Friedlingstein, P., Gao, X., Gutowski, W. J., Johns, T., Krinner, G., Shongwe, M., Tebaldi, C., Weaver, A. J., Wehner, M. F., Allen, M. R., Andrews, T., Beyerle, U., Bitz, C. M., Bony, S., and Booth, B. B. B.: Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility, 1029–1136, 2013.

Compo, G. P., Whitaker, J. S., Sardeshmukh, P. D., Matsui, N., Allan, R. J., Yin, X., Gleason, B. E., Vose, R. S., Rutledge, G., Bessemoulin, P., Brönnimann, S., Brunet, M., Crouthamel, R. I., Grant, A. N., Groisman, P. Y., Jones, P. D., Kruk, M. C., Kruger, A. C., Marshall, G. J., Mauerer, M., Mok, H. Y., Nordli, Ø., Ross, T. F., Trigo, R. M., Wang, X. L., Woodruff, S. D., and Worley, S. J.: The Twentieth Century Reanalysis Project, 137, 1–28, <https://doi.org/10.1002/qj.776>, 2011.

Conte, M., Giuffrida, A., and Tedesco, S.: The mediterranean oscillation: impact on precipitation and hydrology in Italy, 121–137, 1989.

Conte, M., Contini, D., and Held, A.: Multiresolution decomposition and wavelet analysis of urban aerosol fluxes in Italy and Austria, *Atmospheric Research*, 248, 105267, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105267>, 2021.

Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., Garrabou, J., Gattuso, J.-P., Iglesias, A., Lange, M. A., Lionello, P., Llasat, M. C., Paz, S., Peñuelas, J., Snoussi, M., Toret, A., Tsimplis, M. N., and Xoplaki, E.: Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean, *Nature Clim Change*, 8, 972–980, <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0299-2>, 2018.

Cudennec, C., Leduc, C., and Koutsoyiannis, D.: Dryland hydrology in Mediterranean regions—a review, 52, 1077–1087, <https://doi.org/10.1623/hysj.52.6.1077>, 2007.

Le bilan radiatif de la Terre: <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/bilan-radiatif-terre3.xml>, last access: 21 September 2021.

Daux, V.: La reconstruction climatique à partir des dates de vendanges, n° 36, 26–33, 2010.

Daux, V., García De Cortázar-Atauri, I., Yiou, P., Chuine, I., Garnier, E., Le Roy Ladurie, E., Mestre, O., and Tardaguila, J.: An open-access database of grape harvest dates for climate research : data description and quality assessment, 8, 1403–1418, <https://doi.org/10.5194/cp-8-1403-2012>, 2012.

De Vita, P., Allocca, V., Manna, F., and Fabbrocino, S.: Coupled decadal variability of the North Atlantic Oscillation, regional rainfall and karst spring discharges in the Campania region (southern Italy), 16, 1389–1399, <https://doi.org/10.5194/hess-16-1389-2012>, 2012.

Decharme, B. and Douville, H.: Introduction of a sub-grid hydrology in the ISBA land surface model, *Clim Dyn*, 26, 65–78, <https://doi.org/10.1007/s00382-005-0059-7>, 2006.

Del-Castillo-Alonso, M.-Á., Monforte, L., Tomás-Las-Heras, R., Ranieri, A., Castagna, A., Martínez-Abaigar, J., and Núñez-Olivera, E.: Secondary metabolites and related genes in *Vitis vinifera* L. cv. Tempranillo grapes as influenced by ultraviolet radiation and berry development, n/a, <https://doi.org/10.1111/ppl.13483>, 2021.

Delmas, R., Mégie, G., and Peuch, V. H.: *Physique et Chimie de l’atmosphère*, 2005.

DeWit, C. T.: Potential photosynthesis of crop surfaces., 7, 141–149, <https://doi.org/10.18174/njas.v7i2.17686>, 1959.

Dong, J., Peng, J., He, X., Corcoran, J., Qiu, S., and Wang, X.: Heatwave-induced human health risk assessment in megacities based on heat stress-social vulnerability-human exposure framework, *Landscape and Urban Planning*, 203, 103907, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103907>, 2020.

Vignes et vins: <https://draaf.occitanie.agriculture.gouv.fr/Vignes-et-vins>, last access: 3 July 2021.

Duchêne, E. and Schneider, C.: Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace, 25, 93, <https://doi.org/10.1051/agro:2004057>, 2005.

Dumas, C., Ludwig, W., Aubert, D., Eyrolle, F., Raimbault, P., Gueneugues, A., and Sotin, C.: Riverine transfer of anthropogenic and natural trace metals to the Gulf of Lions (NW Mediterranean Sea), *Applied Geochemistry*, 58, 14–25, <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.02.017>, 2015.

Düneloh, A. and Jacobeit, J.: Circulation dynamics of Mediterranean precipitation variability 1948–98, 23, 1843–1866, <https://doi.org/10.1002/joc.973>, 2003.

Durand, Y., Brun, E., Merindol, L., Guyomarc’h, G., Lesaffre, B., and Martin, E.: A meteorological estimation of relevant parameters for snow models, 18, 65–71, <https://doi.org/10.3189/S0260305500011277>, 1993.

Durbin, J. and Watson, G. S.: Testing for Serial Correlation in Least Squares Regression: I, 37, 409–428, <https://doi.org/10.2307/2332391>, 1950.

Edwards, D. C. and McKee, T. B.: Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales, 1997.

Etchevers, P., Golaz, C., and Habets, F.: Simulation of the water budget and the river flows of the Rhone basin from 1981 to 1994, *Journal of Hydrology*, 244, 60–85, [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00332-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00332-8), 2001.

Fenta, A. A., Yasuda, H., Shimizu, K., Haregeweyn, N., Kawai, T., Sultan, D., Ebabu, K., and Belay, A. S.: Spatial distribution and temporal trends of rainfall and erosivity in the Eastern Africa region, 2017.

Fisher, R. A.: The logic of inductive inference, 39–54, 1935.

Folton, N. and Lavabre, J.: Estimations des débits de référence d'étiage. Application aux régions Limousin, Rhône-Alpes, Languedoc-Roussillon, Provence-Alpes-Côte-d'Azur, Corse, Auvergne et département de l'Aveyron, 2004.

Forchhammer, M. C., Post, E., and Stenseth, N. C.: North Atlantic Oscillation timing of long- and short-distance migration, 71, 1002–1014, <https://doi.org/10.1046/j.1365-2656.2002.00664.x>, 2002.

Forzieri, G., Feyen, L., Rojas, R., Flörke, M., Wimmer, F., and Bianchi, A.: Ensemble projections of future streamflow droughts in Europe, 18, 85–108, <https://doi.org/10.5194/hess-18-85-2014>, 2014.

Fournier, F.: Climat et érosion, 201, 1960.

FranceAgriMer: Les chiffre-clés de la filière Viti-vinicole 2009-2019, [https://www.franceagrimer.fr/content/download/65545/document/CC-VIN-2020-chiffres-cles\\_vin\\_2009-2019.pdf](https://www.franceagrimer.fr/content/download/65545/document/CC-VIN-2020-chiffres-cles_vin_2009-2019.pdf), 2019.

Fuks, D., Bar-Oz, G., Tepper, Y., Erickson-Gini, T., Langgut, D., Weissbrod, L., and Weiss, E.: The rise and fall of viticulture in the Late Antique Negev Highlands reconstructed from archaeobotanical and ceramic data, *PNAS*, 117, 19780–19791, <https://doi.org/10.1073/pnas.1922200117>, 2020.

Galet, P.: General viticulture, Oenoplurimédia, Chaintré, France, 2000.

García-Ruiz, J. M., López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Lasanta-Martínez, T., and Beguería, S.: Mediterranean water resources in a global change scenario, *Earth-Science Reviews*, 105, 121–139, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.006>, 2011.

Gastineau, G.: Les changements de la circulation atmosphérique tropicale et conséquences lors du changement climatique, phdthesis, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2008.

Giorgi, F.: Climate change hot-spots, 33, <https://doi.org/10.1029/2006GL025734>, 2006.

Giorgi, F. and Lionello, P.: Climate change projections for the Mediterranean region, *Global and Planetary Change*, 63, 90–104, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.09.005>, 2008.

Giorgi, F., Jones, C., and Asrar, G. R.: Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework., 58, 175–183, 2009.

Girard, G.: Modèle global ORSTOM. Première application du modèle journalier à discretisation spatiale sur le bassin versant de la crique Grégoire en guyane., ORSTOM, Paris, 1974.

Godone, D. and Stanchi, S.: Soil Erosion Issues in Agriculture, BoD – Books on Demand, 350 pp., 2011.

Goldfeld, S. M. and Quandt, R. E.: Some Tests for Homoscedasticity, 60, 539–547, <https://doi.org/10.1080/01621459.1965.10480811>, 1965.

Gonzalez-Hidalgo, J. C., Lopez-Bustins, J.-A., Štěpánek, P., Martin-Vide, J., and Luis, M. de: Monthly precipitation trends on the Mediterranean fringe of the Iberian Peninsula during the second-half of the twentieth century (1951–2000), 29, 1415–1429, <https://doi.org/10.1002/joc.1780>, 2009.

Graveline, N. and Grémont, M.: The role of perceptions, goals and characteristics of wine growers on irrigation adoption in the context of climate change, *Agricultural Water Management*, 250, 106837, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106837>, 2021.

Grun-Rehomme, M. and Vasyechko, O.: METHODES DE LISSAGE D'UNE SERIE TEMPORELLE : LE PROBLEME DES EXTREMITES, 56, 163–174, 2013.

Gudmundsson, L., Tallaksen, L. M., Stahl, K., Clark, D. B., Dumont, E., Hagemann, S., Bertrand, N., Gerten, D., Heinke, J., Hanasaki, N., Voss, F., and Koirala, S.: Comparing Large-Scale Hydrological Model Simulations to Observed Runoff Percentiles in Europe, *J. Hydrometeor.*, 13, 604–620, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-083.1>, 2012.

Gumbel, E. J.: *Statistics of Extremes*, Columbia University Press, 1958.

Habets, F., Noilhan, J., Golaz, C., Goutorbe, J. P., Lacarrère, P., Leblois, E., Ledoux, E., Martin, E., Ottlé, C., and Vidal-Madjar, D.: The ISBA surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobilhy area: Part I: Model and database, *Journal of Hydrology*, 217, 75–96, [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00019-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00019-0), 1999.

Habets, F., Boone, A., Champeaux, J. L., Etchevers, P., Franchistéguy, L., Leblois, E., Ledoux, E., Moigne, P. L., Martin, E., Morel, S., Noilhan, J., Seguí, P. Q., Rousset-Regimbeau, F., and Viennot, P.: The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France, 113, <https://doi.org/10.1029/2007JD008548>, 2008.

Hanel, M., Rakovec, O., Markonis, Y., Máca, P., Samaniego, L., Kyselý, J., and Kumar, R.: Revisiting the recent European droughts from a long-term perspective, 8, 9499, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27464-4>, 2018.

Hannah, L., Roehrdanz, P. R., Ikegami, M., Shepard, A. V., Shaw, M. R., Tabor, G., Zhi, L., Marquet, P. A., and Hijmans, R. J.: Climate change, wine, and conservation, *PNAS*, 110, 6907–6912, <https://doi.org/10.1073/pnas.1210127110>, 2013.

Helsel, D. R. and Hirsch, R. M.: *Statistical Methods in Water Resources*, Elsevier, 540 pp., 1992.

Hirsch, R. M. and Slack, J. R.: A Nonparametric Trend Test for Seasonal Data With Serial Dependence, 20, 727–732, <https://doi.org/10.1029/WR020i006p00727>, 1984.

Hirsch, R. M., Slack, J. R., and Smith, R. A.: Techniques of trend analysis for monthly water quality data, 18, 107–121, <https://doi.org/10.1029/WR018i001p00107>, 1982.

H.James, T. G.: The Earliest History of Wine and Its Importance in Ancient Egypt, in: *The Origins and Ancient History of Wine*, Routledge, 1996.

Hsu, H.-H. and Lin, S.-H.: Global Teleconnections in the 250-mb Streamfunction Field during the Northern Hemisphere Winter, 120, 1169–1190, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1992\)120<1169:GTITMS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1992)120<1169:GTITMS>2.0.CO;2), 1992.

Huglin, M.: *Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole*, 1978.

Iglesias, A., Garrote, L., Flores, F., and Moneo, M.: Challenges to Manage the Risk of Water Scarcity and Climate Change in the Mediterranean, *Water Resour Manage*, 21, 775–788, <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9111-6>, 2007.

IPCC: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)] Synthesis Report, Geneva, Switzerland, 2014.

Ivancic, T. J. and Shaw, S. B.: Examining why trends in very heavy precipitation should not be mistaken for trends in very high river discharge, *Climatic Change*, 133, 681–693, <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1476-1>, 2015.

Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., Meijgaard, E. van, Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J.-F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B., and Yiou, P.: EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research, *Reg Environ Change*, 14, 563–578, <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>, 2014.

Jin, X. and Han, J.: K-Means Clustering, in: *Encyclopedia of Machine Learning*, edited by: Sammut, C. and Webb, G. I., Springer US, Boston, MA, 563–564, [https://doi.org/10.1007/978-0-387-30164-8\\_425](https://doi.org/10.1007/978-0-387-30164-8_425), 2010.

Jones, G. V.: Climate change: observations, projections, and general implications for viticulture and wine production, 12, 2006.

Jones, G. V., White, M. A., Cooper, O. R., and Storchmann, K.: Climate Change and Global Wine Quality, *Climatic Change*, 73, 319–343, <https://doi.org/10.1007/s10584-005-4704-2>, 2005.

Jourdier, B.: *Ressource éolienne en France métropolitaine : méthodes d'évaluation du potentiel, variabilité et tendances*, phdthesis, Ecole Doctorale Polytechnique, 2015.

Juez, C., Peña-Angulo, D., Khorchani, M., Regüés, D., and Nadal-Romero, E.: 20-Years of hindsight into hydrological dynamics of a mountain forest catchment in the Central Spanish Pyrenees, *Science of The Total Environment*, 142610, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142610>, 2020.

Jug, T. and Rusjan, D.: Advantages and disadvantages of UV-B radiations on grapevine (*vitis* sp.), 575–585, <https://doi.org/10.9755/ejfa.v24i6.14676>, 2012.

Kalimeris, A. and Kolios, S.: TRMM-based rainfall variability over the Central Mediterranean and its relationships with atmospheric and oceanic climatic modes, *Atmospheric Research*, 230, 104649, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104649>, 2019.

Kang, S. and Lin, H.: Wavelet analysis of hydrological and water quality signals in an agricultural watershed, *Journal of Hydrology*, 338, 1–14, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.01.047>, 2007.

Kendall, M. G.: Rank correlation methods, Griffin, Oxford, England, 1975.

Khorchani, M., Nadal-Romero, E., Tague, C., Lasanta, T., Zabalza, J., Lana-Renault, N., Domínguez-Castro, F., and Choate, J.: Effects of active and passive land use management after cropland abandonment on water and vegetation dynamics in the Central Spanish Pyrenees, *Science of The Total Environment*, 717, 137160, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137160>, 2020.

Köppen, W.: Das geographischa System der Klimate, in: *Handbuchder Klimatologie*, Borntraeger, 1–44, 1936.

Kostopoulou, E. and Jones, P. D.: Assessment of climate extremes in the Eastern Mediterranean, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 89, 69–85, <https://doi.org/10.1007/s00703-005-0122-2>, 2005.

Krichak, S. O., Breitgand, J. S., Gualdi, S., and Feldstein, S. B.: Teleconnection–extreme precipitation relationships over the Mediterranean region, *Theor Appl Climatol*, 117, 679–692, <https://doi.org/10.1007/s00704-013-1036-4>, 2014.

Kuglitsch, F. G., Toreti, A., Xoplaki, E., Della-Marta, P. M., Zerefos, C. S., Türkeş, M., and Luterbacher, J.: Heat wave changes in the eastern Mediterranean since 1960, 37, <https://doi.org/10.1029/2009GL041841>, 2010.

Labrousse, C., Ludwig, W., Pinel, S., Sadaoui, M., and Lacquement, G.: Unravelling Climate and Anthropogenic Forcings on the Evolution of Surface Water Resources in Southern France, 12, 3581, <https://doi.org/10.3390/w12123581>, 2020.

Langbein, W. G.: Hydroclimate in *The Encyclopedia of Atmospheric Sciences and Astrogeology*, New York: Reinhold, 447–451, 1967.

Le Moigne, P.: Description de l'analyse des champs de surface sur la France par le système SAFRAN (Description of the analysis of near-surface atmospheric fields over France with Safran system, in French), NRCM/GAME Météo-France/CNRS, Toulouse, France, 2002.

Ledoux, E., Girard, G., de Marsily, G., Villeneuve, J. P., and Deschenes, J.: Spatially Distributed Modeling: Conceptual Approach, Coupling Surface Water And Groundwater, in: *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling: Theory and Practice*, edited by: Morel-Seytoux, H. J., Springer Netherlands, Dordrecht, 435–454, [https://doi.org/10.1007/978-94-009-2352-2\\_16](https://doi.org/10.1007/978-94-009-2352-2_16), 1989.

Leeuwen, C. V. and Seguin, G.: The concept of terroir in viticulture, 17, 1–10, <https://doi.org/10.1080/09571260600633135>, 2006.

Leeuwen, C. van and Darriet, P.: The Impact of Climate Change on Viticulture and Wine Quality\*, 11, 150–167, <https://doi.org/10.1017/jwe.2015.21>, 2016.

Leeuwen, C. van and Destrac-Irvine, A.: Modified grape composition under climate change conditions requires adaptations in the vineyard, 51, 147–154, <https://doi.org/10.20870/oenone.2017.51.2.1647>, 2017.

van Leeuwen, C. and Seguin, G.: Incidences de l'alimentation en eau de la vigne, appréciée par l'état hydrique du feuillage, sur le développement de l'appareil végétatif et la maturation du raisin (*Vitis vinifera* variété Cabernet franc, Saint-Emilion, 1990)., *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 28, 81–110, 1994.

van Leeuwen, C., Schultz, H. R., Garcia de Cortazar-Atauri, I., Duchêne, E., Ollat, N., Pieri, P., Bois, B., Goutouly, J.-P., Quénot, H., Touzard, J.-M., Malheiro, A. C., Bavaresco, L., and Delrot, S.: Why climate change will not dramatically decrease viticultural suitability in main wine-producing areas by 2050, *PNAS*, 110, E3051–E3052, 2013.

Lepinas, F.: Impacts du changement climatique sur l'hydrologie des fleuves côtiers en region Languedoc-Roussillon, These de doctorat, Perpignan, 2008.

Lepinas, F., Ludwig, W., and Heussner, S.: Impact of recent climate change on the hydrology of coastal Mediterranean rivers in Southern France, *Climatic Change*, 99, 425–456, <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9668-1>, 2010a.

Lepinas, F., Ludwig, W., and Heussner, S.: Impact of recent climate change on the hydrology of coastal Mediterranean rivers in Southern France, *Climatic Change*, 99, 425–456, <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9668-1>, 2010b.

Lepinas, F., Ludwig, W., and Heussner, S.: Hydrological and climatic uncertainties associated with modeling the impact of climate change on water resources of small Mediterranean coastal rivers, *Journal of Hydrology*, 511, 403–422, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.033>, 2014a.

Lepinas, F., Ludwig, W., and Heussner, S.: Hydrological and climatic uncertainties associated with modeling the impact of climate change on water resources of small Mediterranean coastal rivers, *Journal of Hydrology*, 511, 403–422, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.033>, 2014b.

L'Aude expérimente l'eau usée pour irriguer la vigne: <https://www.lindependant.fr/2021/04/06/leau-usee-nouvelle-source-pour-irriguer-la-vigne-9471853.php>, last access: 13 July 2021.



Lionello, P.: *The Climate of the Mediterranean Region: From the Past to the Future*, Elsevier, 593 pp., 2012.

Lionello, P. and Sanna, A.: Mediterranean wave climate variability and its links with NAO and Indian Monsoon, *Climate Dynamics*, 25, 611–623, <https://doi.org/10.1007/s00382-005-0025-4>, 2005.

Lionello, P. and Scarascia, L.: The relation between climate change in the Mediterranean region and global warming, *Reg Environ Change*, 18, 1481–1493, <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1290-1>, 2018.

Lionello, P. and Scarascia, L.: The relation of climate extremes with global warming in the Mediterranean region and its north versus south contrast, *Reg Environ Change*, 20, 31, <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01610-z>, 2020.

Lionello, P., Malanotte-Rizzoli, P., and Boscolo, R.: *Mediterranean Climate Variability*, Elsevier, 438 pp., 2006.

Livada, I. and Asimakopoulos, D. N.: Individual seasonality index of rainfall regimes in Greece, 28, 155–161, <https://doi.org/10.3354/cr028155>, 2005.

Livezey, R. E. and Mo, K. C.: Tropical-Extratropical Teleconnections during the Northern Hemisphere Winter. Part II: Relationships between Monthly Mean Northern Hemisphere Circulation Patterns and Proxies for Tropical Convection, 115, 3115–3132, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115<3115:TETDTN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<3115:TETDTN>2.0.CO;2), 1987.

Llamas, M. R.: Some Lessons Learnt during the Drought of 1991–1995 in Spain, in: *Drought and Drought Mitigation in Europe*, edited by: Vogt, J. V. and Somma, F., Springer Netherlands, Dordrecht, 253–264, [https://doi.org/10.1007/978-94-015-9472-1\\_20](https://doi.org/10.1007/978-94-015-9472-1_20), 2000.

Llasat, M. C., Llasat-Botija, M., Petrucci, O., Pasqua, A. A., Rosselló, J., Vinet, F., and Boissier, L.: Towards a database on societal impact of Mediterranean floods within the framework of the HYMEX project, 13, 1337–1350, <https://doi.org/10.5194/nhess-13-1337-2013>, 2013.

Lloyd, S.: Least squares quantization in PCM, 28, 129–137, <https://doi.org/10.1109/TIT.1982.1056489>, 1982.

Lobell, D. B., Sibley, A., and Ivan Ortiz-Monasterio, J.: Extreme heat effects on wheat senescence in India, 2, 186–189, <https://doi.org/10.1038/nclimate1356>, 2012.

Lobell, D. B., Hammer, G. L., McLean, G., Messina, C., Roberts, M. J., and Schlenker, W.: The critical role of extreme heat for maize production in the United States, *Nature Clim Change*, 3, 497–501, <https://doi.org/10.1038/nclimate1832>, 2013.

Lopez-Bustins, J.-A., Martin-Vide, J., and Sanchez-Lorenzo, A.: Iberia winter rainfall trends based upon changes in teleconnection and circulation patterns, *Global and Planetary Change*, 63, 171–176, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.09.002>, 2008.

López-Moreno, J. I. and Vicente-Serrano, S. M.: Atmospheric circulation influence on the interannual variability of snow pack in the Spanish Pyrenees during the second half of the 20th century, *Hydrology Research*, 38, 33–44, <https://doi.org/10.2166/nh.2007.030>, 2007.

López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Morán-Tejeda, E., Lorenzo-Lacruz, J., Kenawy, A., and Beniston, M.: Effects of the North Atlantic Oscillation (NAO) on combined temperature and precipitation winter modes in the Mediterranean mountains: Observed relationships and projections for the 21st century, *Global and Planetary Change*, 77, 62–76, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.03.003>, 2011a.

López-Moreno, J. I., Morán-Tejeda, E., Vicente Serrano, S. M., Lorenzo-Lacruz, J., and García-Ruiz, J. M.: Impact of climate evolution and land use changes on water yield in the Ebro basin, <https://doi.org/10.5194/hess-15-311-2011>, 2011b.

Lorenz, E. N.: Seasonal and irregular variations of the northern hemisphere sea-level pressure profile, 8, 52–59, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1951\)008<0052:SAIVOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1951)008<0052:SAIVOT>2.0.CO;2), 1951.

Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Morán-Tejeda, E., and Zabalza, J.: Recent trends in Iberian streamflows (1945–2005), *Journal of Hydrology*, 414–415, 463–475, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.023>, 2012.

Ludwig, W., Serrat, P., Cesmat, L., and Garcia-Esteves, J.: Evaluating the impact of the recent temperature increase on the hydrology of the Têt River (Southern France), *Journal of Hydrology*, 289, 204–221, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.11.022>, 2004.

Ludwig, W., Dumont, E., Meybeck, M., and Heussner, S.: River discharges of water and nutrients to the Mediterranean and Black Sea: Major drivers for ecosystem changes during past and future decades?, *Progress in Oceanography*, 80, 199–217, <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.02.001>, 2009.

Ludwig, W., Bouwman, A. F., Dumont, E., and Lespinas, F.: Water and nutrient fluxes from major Mediterranean and Black Sea rivers: Past and future trends and their implications for the basin-scale budgets, 24, <https://doi.org/10.1029/2009GB003594>, 2010.

Manabe, S. and Bryan, K.: Climate Calculations with a Combined Ocean-Atmosphere Model, 26, 786–789, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1969\)026<0786:CCWACO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1969)026<0786:CCWACO>2.0.CO;2), 1969.

Manabe, S. and Wetherald, R. T.: Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity., *Journal of Atmospheric Sciences*, 24, 241–259, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1967\)024<0241:TEOTAW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1967)024<0241:TEOTAW>2.0.CO;2), 1967.

Mann, H. B.: Nonparametric Tests Against Trend, 13, 245–259, <https://doi.org/10.2307/1907187>, 1945.

Martínez-Fernández, J., Sánchez, N., and Herrero-Jiménez, C. M.: Recent trends in rivers with near-natural flow regime: The case of the river headwaters in Spain, *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 37, 685–700, <https://doi.org/10.1177/0309133313496834>, 2013.

Martin-Vide, J. and Lopez-Bustins, J.-A.: The Western Mediterranean Oscillation and rainfall in the Iberian Peninsula, 26, 1455–1475, <https://doi.org/10.1002/joc.1388>, 2006a.

Martin-Vide, J. and Lopez-Bustins, J.-A.: The Western Mediterranean Oscillation and rainfall in the Iberian Peninsula, 26, 1455–1475, <https://doi.org/10.1002/joc.1388>, 2006b.

- Martin-Vide, J., Sanchez-Lorenzo, A., Lopez-Bustins, J. A., Cordobilla, M. J., Garcia-Manuel, A., and Raso, J. M.: Torrential rainfall in northeast of the Iberian Peninsula: synoptic patterns and WeMO influence, in: *Advances in Science and Research, 7th EMS Annual Meeting and 8th European Conference on Applications of Meteorology 2007* -, 99–105, <https://doi.org/10.5194/asr-2-99-2008>, 2008.
- Massei, N., Durand, A., Deloffre, J., Dupont, J. P., Valdes, D., and Laignel, B.: Investigating possible links between the North Atlantic Oscillation and rainfall variability in northwestern France over the past 35 years, 112, <https://doi.org/10.1029/2005JD007000>, 2007.
- Massei, N., Laignel, B., Rosero, E., Motelay-massei, A., Deloffre, J., Yang, Z.-L., and Rossi, A.: A wavelet approach to the short-term to pluri-decennial variability of streamflow in the Mississippi river basin from 1934 to 1998, 31, 31–43, <https://doi.org/10.1002/joc.1995>, 2011.
- Masseroni, D., Camici, S., Cislighi, A., Vacchiano, G., Massari, C., and Brocca, L.: 65-year changes of annual streamflow volumes across Europe with a focus on the Mediterranean basin, 1–16, <https://doi.org/10.5194/hess-2020-21>, 2020.
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S., L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M., I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J., B.R., Maycock, T., K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., and Zhou, B.: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers.*, 2021.
- Mathbout, S., Lopez-Bustins, J. A., Royé, D., Martin-Vide, J., and Benhamrouche, A.: Spatiotemporal variability of daily precipitation concentration and its relationship to teleconnection patterns over the Mediterranean during 1975–2015, 40, 1435–1455, <https://doi.org/10.1002/joc.6278>, 2020.
- McEvoy, D., Ahmed, I., and Mullett, J.: The impact of the 2009 heat wave on Melbourne’s critical infrastructure, 17, 783–796, <https://doi.org/10.1080/13549839.2012.678320>, 2012.
- McGovern, P. E., Glusker, D. L., Exner, L. J., and Voigt, M. M.: Neolithic resinated wine, 381, 480–481, <https://doi.org/10.1038/381480a0>, 1996.
- McGovern, P. E., Fleming, S. J., and Katz, S. H.: *The Origins and Ancient History of Wine: Food and Nutrition in History and Antropology*, Routledge, 433 pp., 2003.
- Mckee, T., Doesken, N., and Kleist, J.: *THE RELATIONSHIP OF DROUGHT FREQUENCY AND DURATION TO TIME SCALES*, 1993.
- McMichael, A. J. and Lindgren, E.: Climate change: present and future risks to health, and necessary responses, 270, 401–413, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2796.2011.02415.x>, 2011.
- Merheb, M., Moussa, R., Abdallah, C., Colin, F., Perrin, C., and Baghdadi, N.: Hydrological response characteristics of Mediterranean catchments at different time scales: a meta-analysis, 61, 2520–2539, <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1140174>, 2016.
- Molina, M. O., Sánchez, E., and Gutiérrez, C.: Future heat waves over the Mediterranean from an Euro-CORDEX regional climate model ensemble, *Sci Rep*, 10, 8801, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65663-0>, 2020.

Moore, G. W. K., Renfrew, I. A., and Pickart, R. S.: Multidecadal Mobility of the North Atlantic Oscillation, 26, 2453–2466, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00023.1>, 2013.

Morán-Tejeda, E., López-Moreno, J. I., Ceballos-Barbancho, A., and Vicente-Serrano, S. M.: River regimes and recent hydrological changes in the Duero basin (Spain), *Journal of Hydrology*, 404, 241–258, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.04.034>, 2011.

Morlet, J.: Sampling Theory and Wave Propagation, in: *Issues in Acoustic Signal — Image Processing and Recognition*, Berlin, Heidelberg, 233–261, [https://doi.org/10.1007/978-3-642-82002-1\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-642-82002-1_12), 1983.

Neves, M. C., Jerez, S., and Trigo, R. M.: The response of piezometric levels in Portugal to NAO, EA, and SCAND climate patterns, *Journal of Hydrology*, 568, 1105–1117, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.054>, 2019.

Noilhan, J. and Mahfouf, J.-F.: The ISBA land surface parameterisation scheme, *Global and Planetary Change*, 13, 145–159, [https://doi.org/10.1016/0921-8181\(95\)00043-7](https://doi.org/10.1016/0921-8181(95)00043-7), 1996.

Noilhan, J. and Planton, S.: A Simple Parameterization of Land Surface Processes for Meteorological Models, *Mon. Wea. Rev.*, 117, 536–549, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<0536:ASPOLS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<0536:ASPOLS>2.0.CO;2), 1989.

Nuske, S., Gupta, K., Narasimhan, S., and Singh, S.: Modeling and Calibrating Visual Yield Estimates in Vineyards, in: *Field and Service Robotics: Results of the 8th International Conference*, edited by: Yoshida, K. and Tadokoro, S., Springer, Berlin, Heidelberg, 343–356, [https://doi.org/10.1007/978-3-642-40686-7\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-642-40686-7_23), 2014.

Oades, J. M.: Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management, *Plant Soil*, 76, 319–337, <https://doi.org/10.1007/BF02205590>, 1984.

DRAAF Occitanie:  
<http://draaf.occitanie.agriculture.gouv.fr/spip.php?page=sommaire&lang=fr>, last access: 15 November 2020.

Ojeda, H. and Saurin, N.: L'irrigation de précision de la vigne : méthodes, outils et stratégies pour maximiser la qualité et les rendements de la vendange en économisant de l'eau, 38, 97–108, 2014.

Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., and Loumagne, C.: Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model?: Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling, *Journal of Hydrology*, 303, 290–306, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>, 2005.

Palutikof, J.: Analysis of Mediterranean Climate Data: Measured and Modelled, in: *Mediterranean Climate*, edited by: Bolle, H.-J., Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 125–132, [https://doi.org/10.1007/978-3-642-55657-9\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-642-55657-9_6), 2003.

Papadopoulos, V. P., Josey, S. A., Bartzokas, A., Somot, S., Ruiz, S., and Drakopoulou, P.: Large-Scale Atmospheric Circulation Favoring Deep- and Intermediate-Water Formation in the Mediterranean Sea, 25, 6079–6091, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00657.1>, 2012.

Pearson, E. S.: The Test of Significance for the Correlation Coefficient, 26, 128–134, <https://doi.org/10.1080/01621459.1931.10503208>, 1931.

Penna, D., Tromp-van Meerveld, H. J., Gobbi, A., Borga, M., and Dalla Fontana, G.: The influence of soil moisture on threshold runoff generation processes in an alpine headwater catchment, 15, 689–702, <https://doi.org/10.5194/hess-15-689-2011>, 2011.

Perkins, S. E. and Alexander, L. V.: On the Measurement of Heat Waves, 26, 4500–4517, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00383.1>, 2013.

Petelet-Giraud, E., Luck, J.-M., Ben Othman, D., and Negrel, P.: Dynamic scheme of water circulation in karstic aquifers as constrained by Sr and Pb isotopes. Application to the Hérault watershed, Southern France, 2003.

Pieri, P., Lebon, E., and Brisson, N.: Climate change impact on French vineyards as predicted by models, *Acta Hortic.*, 29–37, <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.931.2>, 2012.

Piervitali, E., Colacino, M., and Conte, M.: Rainfall over the Central-Western Mediterranean basin in the period 1951–1995. Part I: precipitation trends, 21 C, 331–344, 1998.

Pike, J. G.: The estimation of annual run-off from meteorological data in a tropical climate, *Journal of Hydrology*, 2, 116–123, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(64\)90022-8](https://doi.org/10.1016/0022-1694(64)90022-8), 1964.

Poni, S., Gatti, M., Palliotti, A., Dai, Z., Duchêne, E., Truong, T.-T., Ferrara, G., Matarrese, A. M. S., Gallotta, A., Bellincontro, A., Mencarelli, F., and Tombesi, S.: Grapevine quality: A multiple choice issue, *Scientia Horticulturae*, 234, 445–462, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.12.035>, 2018.

Prosdocimi, M., Cerdà, A., and Tarolli, P.: Soil water erosion on Mediterranean vineyards: A review, *CATENA*, 141, 1–21, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.02.010>, 2016.

Pryor, S. C. and Schoof, J. T.: Changes in the seasonality of precipitation over the contiguous USA, *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 113, D21108, <https://doi.org/10.1029/2008JD010251>, 2008.

Pugliese, M., Monchiero, M., Gullino, M. L., and Garibaldi, A.: Effect of meteorological and climatic factors on grape downy mildew., 11–14, 2011.

Pujol, N., Neppel, L., and Sabatier, R.: Regional tests for trend detection in maximum precipitation series in the French Mediterranean region, 52, 956–973, <https://doi.org/10.1623/hysj.52.5.956>, 2007.

Quintana-Seguí, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L., and Morel, S.: Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France, *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47, 92–107, <https://doi.org/10.1175/2007JAMC1636.1>, 2008.

Ramos, M. C.: Projection of phenology response to climate change in rainfed vineyards in north-east Spain, *Agricultural and Forest Meteorology*, 247, 104–115, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.07.022>, 2017.

Redak, R. A., Purcell, A. H., Lopes, J. R. S., Blua, M. J., Mizell III, R. F., and Andersen, P. C.: The biology of xylem fluid-feeding insect vectors of *Xylella fastidiosa* and their relation to disease epidemiology, *Annu. Rev. Entomol.*, 49, 243–270, <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.49.061802.123403>, 2004.

Reineke, A. and Thiéry, D.: Grapevine insect pests and their natural enemies in the age of global warming, *J Pest Sci*, 89, 313–328, <https://doi.org/10.1007/s10340-016-0761-8>, 2016.

Reynolds, A. G.: The Grapevine, Viticulture, and Winemaking: A Brief Introduction, in: *Grapevine Viruses: Molecular Biology, Diagnostics and Management*, edited by: Meng, B., Martelli, G. P., Golino, D. A., and Fuchs, M., Springer International Publishing, Cham, 3–29, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-57706-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-57706-7_1), 2017.

Prélèvements en eau | L'eau dans le bassin Rhône-Méditerranée: <https://rhone-mediterranee.eaufrance.fr/gestion-de-leau/gestion-quantitative-de-la-ressource-en-eau/prelevements-en-eau#donnees-sur-les-prelevements-en-eau>, last access: 15 November 2020.

Ribes, A., Thao, S., Vautard, R., Dubuisson, B., Somot, S., Colin, J., Planton, S., and Soubeyroux, J.-M.: Observed increase in extreme daily rainfall in the French Mediterranean, *Clim Dyn*, 52, 1095–1114, <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4179-2>, 2019.

Richard-Schott, F.: Le Recensement Général de l'Agriculture de 1955, une référence pour les géographes ?, 84, 271, <https://doi.org/10.4000/geocarrefour.7567>, 2009.

Romano, E., Petrangeli, A. B., and Preziosi, E.: Spatial and Time Analysis of Rainfall in the Tiber River Basin (Central Italy) in relation to Discharge Measurements (1920-2010), *Procedia Environmental Sciences*, 7, 258–263, <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.07.045>, 2011.

Rosby, C., Gustaf: Relations between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semipermanent centers of action, *J.Mar.Res.*, 3, 38–55, 1939.

Ruf, T.: Droits d'eau et institutions communautaires dans les Pyrénées-Orientales, Vol. 16, 11–44, 2001.

Ruml, M., Korać, N., Vujadinović, M., Vuković, A., and Ivanišević, D.: Response of grapevine phenology to recent temperature change and variability in the wine-producing area of Sremski Karlovci, Serbia, 154, 186–206, <https://doi.org/10.1017/S0021859615000453>, 2016.

Sadaoui, M.: Variabilité et évolution des apports de matières en suspension dans la zone côtière : approche multi-échelle dans le bassin de la Méditerranée, These de doctorat, Perpignan, 2016.

Sadaoui, M., Ludwig, W., Bourrin, F., and Romero, E.: The impact of reservoir construction on riverine sediment and carbon fluxes to the Mediterranean Sea, *Progress in Oceanography*, 163, 94–111, <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2017.08.003>, 2018.

Salameh, T.: Modélisation multi-échelles de la circulation atmosphérique sur le bassin méditerranéen, phdthesis, Ecole Polytechnique X, 2008.

Sales, K., Vasudeva, R., Dickinson, M. E., Godwin, J. L., Lumley, A. J., Michalczyk, Ł., Hebberecht, L., Thomas, P., Franco, A., and Gage, M. J. G.: Experimental heatwaves compromise sperm function and cause transgenerational damage in a model insect, *Nat Commun*, 9, 4771, <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07273-z>, 2018.

Salvayre, H.: Les karsts des Pyrénées-Orientales (Caractères hydrogéologiques et spéléologiques généraux), 13, 1–10, <https://doi.org/10.3406/karst.1989.2199>, 1989.

Sánchez, Y., Martínez-Graña, A. M., Santos-Francés, F., and Yenes, M.: Index for the calculation of future wine areas according to climate change application to the protected designation of origin “Sierra de Salamanca” (Spain), *Ecological Indicators*, 107, 105646, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105646>, 2019a.

Sánchez, Y., Martínez-Graña, A. M., Santos-Francés, F., and Yenes, M.: Index for the calculation of future wine areas according to climate change application to the protected designation of origin “Sierra de Salamanca” (Spain), *Ecological Indicators*, 107, 105646, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105646>, 2019b.

Sang, Y.-F.: A review on the applications of wavelet transform in hydrology time series analysis, *Atmospheric Research*, 122, 8–15, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.11.003>, 2013.

Schulz, S., Darehshouri, S., Hassanzadeh, E., Tajrishy, M., and Schüth, C.: Climate change or irrigated agriculture – what drives the water level decline of Lake Urmia, 10, 236, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57150-y>, 2020.

Scipal, K., Scheffler, C., and Wagner, W.: Soil moisture-runoff relation at the catchment scale as observed with coarse resolution microwave remote sensing, 9, 173–183, <https://doi.org/10.5194/hess-9-173-2005>, 2005.

Seguin, G.: ‘Terroirs’ and pedology of wine growing, *Experientia*, 42, 861–873, <https://doi.org/10.1007/BF01941763>, 1986.

Sgubin, G., Swingedouw, D., Dayon, G., García de Cortázar-Atauri, I., Ollat, N., Pagé, C., and van Leeuwen, C.: The risk of tardive frost damage in French vineyards in a changing climate, *Agricultural and Forest Meteorology*, 250–251, 226–242, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.253>, 2018.

Shapiro, S. S. and Wilk, M. B.: An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples), 52, 591–611, <https://doi.org/10.2307/2333709>, 1965.

Soubeyroux, J.-M., Martin, E., Franchisteguy, L., Habets, F., Noilhan, J., Baillon, M., Regimbeau, F., Vidal, J.-P., Moigne, P. L., and Morel, S.: Safran-Isba-Modcou (SIM) : Un outil pour le suivi hydrométéorologique opérationnel et les études, PP. 40-45, 2008.

Spearman, C.: The Proof and Measurement of Association between Two Things, *Am. J. Psychol.*, 15, 72–101, 1904.

Spinoni, J., Naumann, G., Vogt, J. V., and Barbosa, P.: The biggest drought events in Europe from 1950 to 2012, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3, 509–524, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.01.001>, 2015.

Steel, E. J., Fontaine, J. B., Ruthrof, K. X., Burgess, T. I., and Hardy, G. E. S. J.: Changes in structure of over- and midstory tree species in a Mediterranean-type forest after an extreme drought-associated heatwave, 2019.

Stott, P. A., Stone, D. A., and Allen, M. R.: Human contribution to the European heatwave of 2003, 432, 610–614, <https://doi.org/10.1038/nature03089>, 2004.

Sumner, G., Homar, V., and Ramis, C.: Precipitation seasonality in eastern and southern coastal Spain, 21, 219–247, <https://doi.org/10.1002/joc.600>, 2001.

Susskind, J., Schmidt, G. A., Lee, J. N., and Iredell, L.: Recent global warming as confirmed by AIRS, *Environ. Res. Lett.*, 14, 044030, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafd4e>, 2019.

Thirel, G.: Amélioration des prévisions d'ensemble des débits sur la France de SAFRAN-ISBA-MODCOU, Toulouse Paul Sabatier, 2009.

Thirel, G., Andréassian, V., and Perrin, C.: On the need to test hydrological models under changing conditions, 60, 1165–1173, <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1050027>, 2015.

Thompson, J. R., Gavin, H., Refsgaard, A., Refstrup Sørensen, H., and Gowing, D. J.: Modelling the hydrological impacts of climate change on UK lowland wet grassland, *Wetlands Ecol Manage*, 17, 503–523, <https://doi.org/10.1007/s11273-008-9127-1>, 2009.

Tonietto, J.: Les Macroclimats viticoles mondiaux et l'influence du mésoclimat sur la typicité de la Syrah et du Muscat de Hambourg dans le sud de la France : Méthodologie de caractérisation, These de doctorat, Montpellier, ENSA, 1999.

Toreti, A., Desiato, F., Fioravanti, G., and Perconti, W.: Seasonal temperatures over Italy and their relationship with low-frequency atmospheric circulation patterns, *Climatic Change*, 99, 211–227, <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9640-0>, 2010.

Tramblay, Y. and Somot, S.: Future evolution of extreme precipitation in the Mediterranean, *Climatic Change*, 151, 289–302, <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2300-5>, 2018.

Tramblay, Y., Mimeau, L., Neppel, L., Vinet, F., and Sauquet, E.: Detection and attribution of flood trends in Mediterranean basins, 23, 4419–4431, <https://doi.org/10.5194/hess-23-4419-2019>, 2019.

Trigo, R., Xoplaki, E., Zorita, E., Luterbacher, J., Krichak, S. O., Alpert, P., Jacobeit, J., Sáenz, J., Fernández, J., González-Rouco, F., Garcia-Herrera, R., Rodo, X., Brunetti, M., Nanni, T., Maugeri, M., Türkeş, M., Gimeno, L., Ribera, P., Brunet, M., Trigo, I. F., Crepon, M., and Mariotti, A.: Chapter 3 Relations between variability in the Mediterranean region and mid-latitude variability, in: *Developments in Earth and Environmental Sciences*, vol. 4, edited by: Lionello, P., Malanotte-Rizzoli, P., and Boscolo, R., Elsevier, 179–226, [https://doi.org/10.1016/S1571-9197\(06\)80006-6](https://doi.org/10.1016/S1571-9197(06)80006-6), 2006.

Trigo, R. M., Osborn, T. J., and Corte-Real, J. M.: The North Atlantic Oscillation influence on Europe: climate impacts and associated physical mechanisms, 20, 9–17, <https://doi.org/10.3354/cr020009>, 2002.



Trought, M. C. T., Parker, A. K., and van Leeuwen, C.: Can a change in vineyard practice mitigate warming due to climate change?, *Acta Hortic.*, 397–402, <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1082.55>, 2015.

Tsakiris, G.: *Meteorological Drought Assessment*, 2004.

Tukey, J. W.: *Comparing Individual Means in the Analysis of Variance*, 5, 99–114, <https://doi.org/10.2307/3001913>, 1949.

Ulbrich, U., Lionello, P., Belusic, D., Jacobeit, J., Knippertz, P., Kuglitsch, F. G., Leckebusch, G. C., Luterbacher, J., Maugeri, M., Maheras, P., Nissen, K. M., Pavan, V., Pinto, J. G., Saaroni, H., Seubert, S., Toreti, A., Xoplaki, E., and Ziv, B.: Climate of the Mediterranean: synoptic patterns, temperature, precipitation, winds and their extremes, 301–346, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416042-2.00005-7>, 2012.

NWS JetStream - Global Circulations: <https://www.weather.gov/jetstream/circ>, last access: 25 August 2021.

Utts, J. M.: The rainbow test for lack of fit in regression, 11, 2801–2815, <https://doi.org/10.1080/03610928208828423>, 1982.

Valdes-Abellan, J., Pardo, M. A., and Tenza-Abril, A. J.: Observed precipitation trend changes in the western Mediterranean region, 37, 1285–1296, <https://doi.org/10.1002/joc.4984>, 2017.

Van Leeuwen, C. and Darriet, P.: *Le changement climatique en viticulture : les leviers d'adaptation au vignoble*, 2016.

Venkataraman, K., Nelson, M., and Frandsen, C.: Comparison of Two Temperature-Based Methods of Estimating Potential Evapotranspiration (PET) in Texas, 699–708, <https://doi.org/10.1061/9780784479872.072>, 2016.

Verfaillie, D., Déqué, M., Morin, S., and Lafaysse, M.: The method ADAMONT v1.0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models, 10, 4257–4283, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4257-2017>, 2017.

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., López-Moreno, J. I., Kenawy, A. M. E., and Angulo-Martínez, M.: Daily atmospheric circulation events and extreme precipitation risk in northeast Spain: Role of the North Atlantic Oscillation, the Western Mediterranean Oscillation, and the Mediterranean Oscillation, 114, <https://doi.org/10.1029/2008JD011492>, 2009.

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., and López-Moreno, J. I.: A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, *J. Climate*, 23, 1696–1718, <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>, 2010.

Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Lorenzo-Lacruz, J., Kenawy, A. E., Azorin-Molina, C., Morán-Tejeda, E., Pasho, E., Zabalza, J., Beguería, S., and Angulo-Martínez, M.: The NAO Impact on Droughts in the Mediterranean Region, in: *Hydrological, Socioeconomic and Ecological Impacts of the North Atlantic Oscillation in the Mediterranean Region*, edited by: Vicente-Serrano, S. M. and Trigo, R. M., Springer Netherlands, Dordrecht, 23–40, [https://doi.org/10.1007/978-94-007-1372-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1372-7_3), 2011.

Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., and Soubeyroux, J.-M.: Uncertainties in the Safran 50-year atmospheric reanalysis over France, 11th International Meeting on Statistical Climatology, 39, 2010.

Violette, S., Ledoux, E., Goblet, P., and Carbonnel, J. P.: Hydrologic and thermal modeling of an active volcano: the Piton de la Fournaise, Reunion, 1997.

Walker, G.: Correlations in seasonal variations of weather, Mem.Ind.Meteorol.Dept., IX, 275–332, 1924.

Wallace, J. M. and Gutzler, D. S.: Teleconnections in the Geopotential Height Field during the Northern Hemisphere Winter, 109, 784–812, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2), 1981.

Walsh, R. P. D. and Lawler, D. M.: Rainfall Seasonality: Description, Spatial Patterns and Change Through Time, 36, 201–208, <https://doi.org/10.1002/j.1477-8696.1981.tb05400.x>, 1981.

Wargent, J. J. and Jordan, B. R.: From ozone depletion to agriculture: understanding the role of UV radiation in sustainable crop production, 197, 1058–1076, <https://doi.org/10.1111/nph.12132>, 2013.

White, M. A., Diffenbaugh, N. S., Jones, G. V., Pal, J. S., and Giorgi, F.: Extreme heat reduces and shifts United States premium wine production in the 21st century, PNAS, 103, 11217–11222, <https://doi.org/10.1073/pnas.0603230103>, 2006.

Wickramaarachchi, T. N.: Flood Discharge Estimation in Baddegama Using Pearson Type III and Gumbel Distributions, in: Water Security in Asia: Opportunities and Challenges in the Context of Climate Change, edited by: Babel, M., Haarstrick, A., Ribbe, L., Shinde, V. R., and Dichtl, N., Springer International Publishing, Cham, 329–337, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-54612-4\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-319-54612-4_24), 2021.

Winkler, A. J.: General Viticulture, University of California Press, 664 pp., 1974.

Woldemeskel, F. and Sharma, A.: Should flood regimes change in a warming climate? The role of antecedent moisture conditions, 43, 7556–7563, <https://doi.org/10.1002/2016GL069448>, 2016.

Wolkovich, E. and Morales, -Castilla Ignacio: Climate change: Why varietal diversity is critical to winegrowing's warmer future, 34, 48–51, <https://doi.org/10.3316/informit.388801283090188>, 2019.

Wood, E. F., Lettenmaier, D. P., and Zartarian, V. G.: A land-surface hydrology parameterization with subgrid variability for general circulation models, 97, 2717–2728, <https://doi.org/10.1029/91JD01786>, 1992.

Xoplaki, E.: Climate variability over the Mediterranean, University of Bern, Switzerland, 2002.

Yang, Z. and Villarini, G.: Evaluation of the capability of global climate models in reproducing the temporal clustering in heavy precipitation over Europe, 41, 131–145, <https://doi.org/10.1002/joc.6612>, 2021.

Yasuda, H., Panda, S. N., Abd Elbasit, M. A. M., Kawai, T., Elgamri, T., Fenta, A. A., and Nawata, H.: Teleconnection of rainfall time series in the central Nile Basin with sea surface temperature, *Paddy Water Environ*, 16, 805–821, <https://doi.org/10.1007/s10333-018-0671-x>, 2018.

Yılmaz, B. and Yılmaz, B.: EuroMed-2030: long term challenges for the Mediterranean area: report of an expert group, European Commission, Brussels, 139 pp., 2011.

# Liste des Figures

Figure 1: Schéma simplifié du fonctionnement des émissions, absorptions et réflexions/diffusions des principaux flux énergétiques ayant une incidence sur le bilan radiatif de la Terre.....	17
Figure 2: Changement de la température de surface globale par rapport à la période 1850-1900 a) moyenne décennale reconstruite sur la période 1-2000 (courbe et aire grisée) et observée sur la période 1850-2020 (courbe noire) b) moyenne annuelle simulée : en marron pour la part anthropique et naturelle, en vert pour la part naturelle uniquement. La moyenne annuelle observée est indiquée par la courbe noire. D'après (Masson-Delmotte et al., 2021).....	18
Figure 3: Changement des précipitations annuelles moyennes (%) selon un réchauffement de 4°C à échelle globale par rapport à la période de référence 1859-1900. Les simulations sont obtenues à partir de la moyenne des modèles des simulations CMIP6. Source : IPCC 2021..	21
Figure I.1 : Principaux fleuves côtiers de la région Occitanie-Est, leurs affluents et les massifs montagneux qu'ils drainent.....	30
Figure I.2: (a) Présentation des 615 zones homogènes de Safran (adapté de Thirel (2009))et (b) Grille de résolution 8 km résultante .....	33
Figure I.3: Comparaison des températures annuelles par bassin sur la période 1965-2005entre Lespinas (2008) et Safran (a) Moyennes annuelles et (b) Tendances linéaires obtenues avec un test de Mann-Kendall .....	37
Figure I.4: Comparaison des cumuls annuels de précipitations par bassin sur la période 1965-2005entre Lespinas (2008) et Safran.....	38
Figure I.5: Position des stations hydrologiques disponibles sur l'ensemble de la région et celles sélectionnées pour la réalisation de cette thèse .....	41
Figure I.6: Population en nombre d'habitants pour l'année 2020 et par communes. Données de l'Insee (2020).....	43
Figure I.7: Carte d'occupation des sols d'après Corine Land Cover pour l'année 2018.....	45
Figure I.8: (a) Pente en degrés sur l'ensemble de la zone d'étude et (b) pourcentage occupé par différentes classes de degrés de pente et par bassin .....	46

Figure I.9: Valeurs de NDVI pour le mois de Juillet 2015 .....	47
Figure II.1: Sélection des mailles Safran par bassin versant pour l'extraction des paramètres climatiques .....	58
Figure II.2: Climatologie mensuelle moyenne de chaque bassin versant sur la période 1959-2018.....	66
Figure II.3: Débits spécifiques mensuels moyens pour chaque bassin versant sur la période 1959-2018. Les lignes aux pointillés rouges correspondent aux débits modélisés avec les valeurs de drainage et ruissellement par Safran Qs, les lignes aux pointillés bleus correspondent aux débits observés par les stations de jaugeage Qobs. Remarque : les valeurs affichées pour chaque mois ne tiennent pas compte des données manquantes .....	67
Figure II.4: (a) Evolution annuelle des moyennes de températures pour chaque bassin, (b) Evolution des cumuls annuels de précipitations pour chaque bassin et (c) Evolution annuelle des moyennes de températures et cumuls de précipitations pour l'ensemble de la zone d'étude (moyennes des 6 bassins versants). .....	69
Figure II.5: Tendances linéaires annuelles sur la période 1959-2018 pour les paramètres hydro-climatiques de (a) Températures (b) Evapotranspiration potentielle. Remarque :les valeurs entre parenthèses sont celles obtenues avec les données Safran, sans parenthèses ce sont celles obtenues avec la modélisation de Folton et Lavabre (2004) (c) précipitations et (d) débits spécifiques. Remarque : les valeurs entre parenthèses sont celles obtenues avec les données Safran (somme du drainage et ruissellement), sans parenthèse, celles obtenues avec le modèle statistique multiparamètre présenté dans cette étude .....	70
Figure II.6: Evolution annuelle des débits observés (Qobs, ligne noire), des débits modélisés selon Safran (Qs, ligne rouge) et des débits modélisés selon notre modèle (Qmod, ligne bleue) .....	71
Figure II.7: Comparaison des tendances linéaires obtenues entre les débits observés (Qobs), les débits modélisés par Safran (Qs) et les débits modélisés à partir des variables climatiques en considérant différents modèles statistiques (Fn(P), Fn(P.T), Fn(Qpike), et Fn(Qmod)). Les périodes analysées sont variables et correspondent aux périodes couvertes par Qobs pour chaque fleuve, soit 59 ans maximum (Hérault) et 43 minimum (Tech).....	72
Figure II.8: Evolution des indices de sécheresses RDI-12, SPEI-12 et SPI-12 pour chaque bassin sur la période 1959-2018.....	73

Figure II.9: Prélèvements sur l'année 2018 pour (a) les eaux superficielles et (b) les eaux superficielles et souterraines .....	74
Figure II.10: (a) Evolution des grandes classes d'occupation des sols (Agriculture, Urbain, Forêts, Espaces herbacés) d'après CORINE Land Cover entre 1990 et 2018 (b) Evolution des classes d'occupation du sol au sein de l'agriculture entre 1990 et 2018 d'après CORINE Land Cover .....	75
Figure II.11: Changement de l'occupation des sols entre 1990 et 2018 d'après CORINE Land Cover. Les zones en blanc sont celles qui n'ont pas changé de type d'occupation entre 1990 et 2018. Les zones colorées indiquent quel type d'occupation était présent en 1990 et en quel autre type elles sont devenues en 2018 .....	76
Figure II.12: Evolution de la SAU entre 1970 et 2018 dans les départements de l'Hérault et l'Aude (notés en bleus, ils contiennent les bassins versants de l'Hérault, l'Orb et l'Aude), et des Pyrénées-Orientales (notés en orange, il contient les bassins versants de l'Agly, la Têt et le Tech) . Données issues de la DRAAF Occitanie (2020).....	77
Figure II.13: Evolution annuelle des valeurs de NDVI sur la période 1982-2015 par bassin versant .....	78
Figure II.14: Matrice des corrélations avec un test de Pearson pour les paramètres et indices hydro-climatiques de chaque bassin versant sur la période 1959-2018.....	79
Figure II.15: Matrice des corrélations avec un test de Pearson entre les paramètres et indices climatiques pour le bassin versant de l'Hérault sur la période 1959-2018.....	80
Figure II.16: Performance des modèles de régression pour la reproduction des séries hydrologiques annuelles de chaque fleuve (Qobs) (a) précipitations, (b) précipitations et températures, (c) Qpike, (d) Qpike et RDI.....	82
Figure II.17: Validation du modèle de régression pour le bassin de l'Hérault (a) Distribution en nuage de points des résidus (b) test d'autocorrélation des résidus (b) test de normalité des résidus.....	84
Figure II.18: Test de sensibilité des série hydrologiques de chaque fleuve au changement de température et précipitations calculé pour la période 1959-2018 .....	88
Figure III.1 : Présentation des scénarios RCP du GIEC en 2014 (a) Equivalent en émissions annuelles d'ici 2100 selon les scénarios (b) Evolution de la température (haut) et des précipitations (bas) annuelles mondiales d'ici 2100 et par rapport à la période 1986-2005 ....	94

Figure III.2 : Cellules de convection de l'air dans les hémisphères Nord et Sud et principaux mouvements des masses d'air atmosphériques à échelle globale. Source : (National Weather Service - Global Circulations).....	95
Figure III.3 : Représentation schématique des modes atlantiques de la circulation atmosphérique ONA (gauche) et Scand (droite). D'après (Neves et al., 2019).....	97
Figure III.4 Représentation schématique des modes méditerranéens de la circulation atmosphérique MO (gauche) et WeMO (droite) .....	97
Figure III.5 : Valeur du RDI-03 pour le mois de décembre 2018 calculé sur la base des données spatialisées Safran .....	101
Figure III.6 : Comparaison des précipitations et températures entre Safran et les RCMs sur la période 1959-2005 (a) et (b) Moyennes annuelles (c) et (d) tendances linéaires obtenues avec un test de Mann-Kendall .....	105
Figure III.7 : Résultat du partitionnement en K-moyennes pour 2 centroides sur les variables mensuelles et sur la période 1959-2018 de (a) RDI-03 (b) températures et (c) précipitations .....	107
Figure III.8: Résultat du partitionnement en K-moyennes pour la variables de RDI-03 sur la période 1959-2018. Résultat pour 2 zones (gauche) et pour 3 zones (droite).....	107
Figure III.9 Spectres des coefficient d'ondelettes continues des indices climatiques considérés ; sur la période 1959-2018 pour les indices de téléconnexion ainsi que pour RDI03, et sur la période 1976-2018 pour les débits .....	109
Figure III.10 : Cohérence des ondelettes croisées de RDI-03 et débits pour chaque zone et NAO, Scand, MO, et WeMO. Les lignes blanches indiquent le niveau de signification de 5%. Les flèches noires parallèles indiquent la cohérence ; les flèches pointant exactement vers la droite indiquent que les deux séries sont en phase à la période respective, les flèches pointant .....	111
Figure III.11 : Boîte-à-moustaches des séries annuelles des indices de téléconnexion sur la période historique 1950-2005. Les boîtes grises (Hist) représentent les séries pour chaque GCM et les boîtes blanches (Obs) représentent la série observée. Les lettres donnent le résultat du test de TuckeyHSD ; les moyennes sont significativement les mêmes pour des mêmes lettres, et inversement .....	114

Figure III.12 : Evolution annuelle des indices de téléconnexion pour la période 1950-2100 sous un scénario RCP 8.5. Les séries grisées correspondent aux séries modélisées par les GCMs tandis que la série bleutée pour chaque indice correspond à la série réelle observée. .... 115

Figure III.13: Corrélations historiques entre les modèles de téléconnexion et (a) RDI-03 (b) Débit d'eau (c) Températures (d) Précipitations. Pour (a), (c), et(d) la période considérée est 1959-2018, alors que pour (b) la période considérée est 1976-2018. Les débits pour chaque zone sont la somme des débits d'eau de chaque rivière dont le bassin versant appartient à l'une ou l'autre des zones. Ainsi, le débit de la zone occidentale correspond à la somme des débits de l'Aude, de l'Agly et de la Têt et le débit de la zone orientale correspond à la somme des débits de l'Hérault, de l'Orb et du Tech..... 116

Figure III.14: Comparaison entre les précipitations et les températures Safran et RCMs sur la période historique 1959-2005 et pour la période projetée 2006-2100. RCMs-Hist représente la période historique de RCMs tandis que RCMs-Proj représente la période projetée 2006. (a) et (b) températures et précipitations moyennes respectivement (c) et (d) tendances linéaires obtenues avec un test de Mann-Kendall pour les températures et précipitations respectivement. Les étoiles rouges \* marquent le degré de significativité avec \*\* pour  $p_v < 0.05$ , \* pour  $p_v < 0.01$  et absence d'étoile pour des tests non significatifs..... 118

Figure III.15: Evolution des températures (haut), précipitations (milieu) et débits (bas) basées sur un test de Mann-Kendall et selon chaque RCM pour chaque bassin versant et suivant le scénario climatiques rcp 4.5 (gauche) et rcp 8.5 (droite). Les étoiles rouges \* marquent le degré de significativité avec \*\* pour  $p_v < 0.05$ , \* pour  $p_v < 0.01$  et absence d'étoile pour des tests non significatifs ..... 119

Figure III.16: Tendances linéaires des variables hydro-climatiques annuelles projetées dans le cadre des scénarios RCP 4.5 (haut) et RCP 8.5 (bas) et pour la période 2006-2100 (températures ; à gauche, précipitations ; au milieu, et débits; à droite). Les étoiles \* marquent le degré de significativité avec \*\* pour  $p_v < 0.05$ , \* pour  $p_v < 0.01$  et absence d'étoile pour des tests non significatifs ..... 122

Figure III.17: Evolution des températures et précipitations moyennes annuelles sur la période 1959-2100 sur la base des données historiques observées (1959-2018) et de la moyenne des 6 RCMs pour la période projetée (2019-2100) sous un scénario rcp 8.5.. La ligne verticale en pointillés gris délimite la période historique de la période projetée. Les résultats des tests de



Mann-Kendall sont indiqués dans les encadrés bleu et rouge pour les précipitations et températures respectivement. Ils sont obtenus sur la période 2006-2100.....	123
Figure III.18: Comparaison des caractéristiques statistiques médiane (median), minimum (min) et maximum (max) pour les séries hydrologiques observées (obs) et modélisées à partir des RCMs sur la période 1959-2005 .....	125
Figure III.19: Débits annuels modélisés sur la période 2006-2100 pour chaque fleuve côtier. Les courbes grisées correspondent aux évolutions annuelles obtenues pour chaque RCM, la courbe bleue est la moyenne de l'ensemble et l'ombrage rosé représente l'incertitude .....	126
Figure IV.1: Relation entre la variable réduite de Gumbel u et les débits maximums annuels pour la série de l'Aude à Moussan.....	135
Figure IV.2: Nombre de jours par mois au total (somme des jours) qui excèdent les 95 <sup>ème</sup> et 75 <sup>ème</sup> centiles ou restent en-deçà du 25 <sup>ème</sup> centile de températures pour tous les bassins et par mois sur les périodes 1959-1978, 1979-1998 et 1999-2018. Les centiles sont calculés sur la période journalière de référence considérée comme non affectée par les changements climatiques 1959-1973. Les 75 <sup>ème</sup> et 95 <sup>ème</sup> centiles sont calculés pour les mois de juin, juillet et août, le 25 <sup>ème</sup> centile est calculé pour les mois de décembre, janvier et février.....	137
Figure IV.3: Evolution annuelle du nombre de jours excédant les 95 <sup>ème</sup> et 75 <sup>ème</sup> centiles de température et restant en dessous du 25 <sup>ème</sup> centile. Les centiles sont calculés sur la période journalière de référence considérée comme non affectée par les changements climatiques 1959-1973. Les chiffres affichés pour chaque courbe sont la tendance totale sur l'ensemble de la période 1959-2018 calculés avec un test de Mann-Kendall et étant significatifs à $p < 0.01$ ...	138
Figure IV.4: Evolution annuelle du nombre de vagues de chaleur WSDI (vagues de froid CSDI) ; c'est-à-dire le nombre d'occurrence annuelle où au moins 6 jours consécutifs enregistrent une température au-dessus du 90 <sup>ème</sup> centile (en-dessous du 10 <sup>ème</sup> centile). Les 90 <sup>ème</sup> et 10 <sup>ème</sup> centiles sont calculés sur une fenêtre glissante de 5 jours sur la période journalière de référence considérée comme non affectée par les changements climatiques 1959-1973 .....	139
Figure IV.5 : Nombre de jours par mois au total (somme des jours) enregistrant des précipitations extrêmes pour chaque bassin versant sur les périodes 1959-1978, 1979-1998 et 1999-2018. Les lignes et points avec des losanges indiquent le nombre de jours total sur chaque période et pour chaque mois où le 95 <sup>ème</sup> centile est excédé. Les barres représentent les jours où le 99 <sup>ème</sup> centile est excédé. Les centiles 95 et 99 sont calculés sur la période journalière de	

référence considérée comme non affectée par les changements climatiques 1959-1973 et pour des précipitations P qui dépassent ou égalent 1 mm ( $P \geq 1$ mm).....	141
Figure IV.6: Evolution de la quantité de précipitations tombées les jours excédant le 95 <sup>ème</sup> centile (bleu) et évolution du nombre de jours excédant le 95 <sup>ème</sup> centile (vert) au cours d'une année sur la période 1959-2018. Le centile est calculé sur la période journalière considérée comme non affectée par les changements climatiques 1959-1973 (15 ans) et où les précipitations P dépassent ou égalent 1 mm ( $P \geq 1$ mm). Les valeurs indiquent les résultats des tests de Mann-Kendall. Les valeurs accompagnées de 1 (2) étoile(s) rouge(s) sont les résultats pour lesquels la p-value est de $p < 0.1$ ( $p < 0.05$ ) .....	142
Figure IV.7: Evolution du nombre de jours annuel où les précipitations dépassent 10 mm..	143
Figure IV.8: Evolution du nombre de jours consécutifs maximum secs CDD (ou les précipitations sont en-dessous de 1 mm) et du nombre de jours consécutifs maximum humides CWD (ou les précipitations sont au-dessus de 1 mm). Les chiffres indiquent pour chaque courbe sont les résultats des tests de Mann-Kendall, ceux accompagnés de 2 étoiles sont ceux pour lesquels la significativité est de $p < 0.05$ . Les résultats non-accompagnés d'une étoile ne sont pas significatifs.....	144
Figure IV.9: Evolution annuelles des débits minimum QMNA et QCN-3 pour chaque fleuve et tendances linéaires de Mann-Kendall pour QMNA.....	145
Figure IV.10. Nombre de jours en crues pour une période de retour T2 par mois et pour différentes périodes considérées.....	148
Figure IV.11: Comparaison des jours détectés comme jours de crues entre les séries temporelles journalières de données observés par les stations de jaugeage (rouge), modélisées par les écoulements de drainage total par le modèle Isba (bleu). En noir sont les évènements détectés le même jour entre les deux méthodes. Note : le seuil utilisé pour les séries observées est une période de retour T2, pour les séries modélisées le seuil est le 95 <sup>ème</sup> centile des maximums mensuels de chaque série .....	149
Figure IV.12: Tendence linéaire effectuée avec un test de Mann-Kendall pour l'évolution du nombre de jours dépassant le 95 <sup>ème</sup> centile de température sur la période 2006-2100 sous un scénario rcp 8.5 et pour 6 RCMs. Le 95 <sup>ème</sup> centile est calculé par pixel et sur la période de référence considérée comme non affectée par les changements climatiques 1959-1973 pour les mois de juin, juillet et août .....	151

Figure IV.13: Tendances linéaires sur une résolution de 8 km des précipitations extrêmes (95 <sup>ème</sup> centile) sur la période 2006-2100 et pour un scénario RCP 8.5 pour a,c,e,g,i,k) Changement du nombre de jours par décennies enregistrant des évènements extrêmes et b,d,f,h,j,l) Changement de la quantité moyenne de précipitations tombées lors des évènements extrêmes par décennie. Le 95 <sup>ème</sup> centile est calculé sur la période de référence considérée comme non affectée par les changements climatiques 1959-1973 et pour des précipitations supérieures à 1 mm (P> 1mm) .....	152
Figure IV.14: Tendances linéaires des températures a) températures moyennes annuelles sur la période 1959-2018 b) nombre de jours par an excédant le 95 <sup>ème</sup> centile sur la période 1959-2018. Le 95 <sup>ème</sup> centile a été calculé sur la période de référence considérée comme non affectée par les changements climatiques 1959-1973 et sur les mois de juin, juillet et août.....	156
Figure IV.15: Tendances historiques sur la période 1959-2018 avec un test de Mann-Kendall pour les extrêmes de précipitations dépassant le 95 <sup>ème</sup> centile : Changement du nombre de jours par décennie sur la période complète (gauche) et changement de la quantité moyenne précipitée (en mm) lors des évènements extrêmes par décennies (droite). Le 95 <sup>ème</sup> centile est calculé sur la période de référence considérée comme non affectée par les changements climatiques 1959-1973 et pour des précipitations supérieures à 1 mm (P> 1mm) .....	158
Figure IV.16: Evolution de l'indice d'humidité des sols (SWI) a) moyenne annuelle sur la période 1959-1973 (en %) b) moyenne annuelle sur la période 2004-2018 c) Tendance linéaire de Mann-Kendall et p-value sur la période 1959-2018.....	158
Figure V.1: Zone constituée d'au moins 35 % de terres en vignobles en 2018 et retenue pour l'étude des caractéristiques climatiques et bioclimatiques pouvant avoir un impact sur l'évolution de l'activité viticole .....	172
Figure V.2: Tendances linéaires des températures (gauche) et précipitations (droite) lors de la saison de croissance sur la période 1959-2018 .....	173
Figure V.3: Evolution de la surface en hectare (ha) occupée par les 4 cépages majeurs de la région viticole Languedoc-Roussillon. Source : Agreste, 2010 et FranceAgriMer, 2019 .....	174
Figure V.4: Date de début des vendanges pour le vignoble du Languedoc-Roussillon. Données récoltées auprès de la publication de Daux et al., (2012).....	175
Figure V.5: Evolution des rendements en hl/ha des vignobles par départements et région ex-Languedoc-Roussillon entre 2001 et 2018. Source : Draaf Occitanie .....	176

Figure V.6: Corrélation de Pearson et $r^2$ sur la période 1959-2007 entre la date de début des vendanges des vignobles du languedoc et les températures (gauche) et précipitations (droite) de l'ensemble de la zone en vignoble et pour la saison de croissance avril-septembre.....	176
Figure V.7: Evolution des indices bioclimatiques annuels moyens dans la zone en vignoble pour les périodes a),c),e),g) 1959-1962 et b),d),f),h) 2015-2018 .....	178
Figure V.8: Corrélation linéaire de Pearson entre la date de début des vendanges du Languedoc(Daux et al.2012) et les indices bioclimatiques calculés pour la zone en vignoble du Languedoc-Roussillon de notre zone d'étude .....	178
Figure V.9: Coefficient de corrélation de Pearson ( $r^2$ ) pour la période 2001-2018 entre les rendements viticoles des départements des PO, Aude et Hérault et les paramètres climatiques (Temp=températures, Precip=précipitations) pour la saison de croissance avril-septembre et avec les indices bioclimatiques de Winkler et al.(1974), Huglin (1978), Tonietto (1999) et Jones (2006) .....	179

# Liste des Tables

Table I.1: Données collectées par le schéma de surface Safran-Isba et rendues disponibles sur le site de Météo-France .....	31
Table I.2: Comparaison sur la période 1965-2005 entre Lespinas (2008) et Safran des (a) températures annuelles moyennes et (b) cumuls de précipitations annuelles moyens.....	38
Table I.3: Caractéristiques des stations hydrologiques utilisées dans ce travail de thèse. Elevation, taux de couverture de la période 1959-2018, taux de correction des données manquantes ou aberrantes. r : comblement par régression linéaire ; i : comblement par interpolation linéaire .....	42
Table I.4: Pourcentage occupé par chaque type d'usage des sols par bassin en 2018 selon Corine Land Cover.....	46
Table II.1 :Classification de l'Indice de Saisonnalité, d'après Walsh et Lawler (1981).....	54
Table II.2: : Classification des valeurs de SPI d'après McKee (1993), valable pour les valeurs obtenues de SPEI et RDI.....	56
Table II.3: Valeurs mensuelles des coefficients $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ présentés dans l'équation de reproduction de l'évapotranspiration potentielle.....	57
Table II.4: Caractéristiques hydro-climatiques des six bassins versants étudiés sur la période couverte par les stations de jaugeage disponibles pour chacun d'eux. *moyenne calculée sur les années 2012 et 2018. Données sur l'élévation moyenne d'après (Lespinas et al., 2014).....	65
Table II.5: Part de l'eau totale écoulee par bassin versant prélevée pour les activités agricoles et l'eau potable sur la période 2012-2018.....	74
Table II.6: Détails des coefficients de chaque indice et des $r^2$ pour la reconstitution des séries hydrologiques de chaque fleuve sur sa période d'observation .....	82
Table III.1 : Localisation des pôles choisis pour le calcul de chaque indice. HP et LP signifient respectivement Hautes Pressions et Basses Pressions.....	98
Table III.2:Hydro-climatologie et tendances linéaires annuelles pour chaque bassin versant sur la période 1959-2018. $P_{tot}$ désigne le cumul total des précipitations (solides et liquides), $P_s$ désigne les précipitations solides uniquement, $Q$ désigne les débits spécifiques calculés à partir du modèle hydrologique développé dans le chapitre II. *les caractères en gras	

(soulignés) indiquent une significativité à $p < 0.05$ ( $p < 0.1$ ). Les caractères standards sont non significatifs .....	100
Table III.3: (a) Informations sur les RCMs utilisés et les GCMs qui les forcent. (b) Type de variable et unité rendus disponible au pas de temps journalier : tableau repris sur le site DRIAS .....	103
Table III.4: Maximum local des valeurs moyennes de coefficient d'ondelette des variables RDI-03, débits, NAO, Scand, MO et WeMO et significatifs à $p < 0.05$ .....	110
Table III.5: Maximum locaux des Significant ( $p < 0.05$ ) local maxima of average cross wavelet coherence of RDI03 and Q, NAO, SCAND, MO, and WeMO .....	112
Table III.6 : Tendances linéaires de la moyenne de l'ensemble des GCMs des indices de téléconnexion pour la période 2006-2100 sous un scénario RCP 8.5 .....	124
Table III.7: Débits spécifiques obtenus et incertitudes pour chaque fleuve côtiers sur la période 2007-2020, 2040-2060 et 2080-2100 pour un scénario rcp 8.5 .....	124
Table III.8 : Tendances linéaires des séries hydrologiques annuelles à 2100 et différences observées entre les zones orientale et occidentale pour chaque RCM .....	126
Table IV.1 : 25 <sup>ème</sup> , 75 <sup>ème</sup> et 95 <sup>ème</sup> centiles pour les températures journalières moyennes (Tmean) et 95 <sup>ème</sup> et 99 <sup>ème</sup> centiles pour les précipitations journalières (P) pour les six bassins versants sur la période 1959-1973 .....	133
Table IV.2 : Caractéristiques des QMNA pour chaque fleuve considérant la plus longue période d'observation .....	134
Table IV.3: Débits seuils de crues pour différentes périodes de retour sur l'Aude à Moussan. Les périodes de retour sont indiquées en nombre d'années .....	135
Table IV.4: Evolution des débits minimum annuels sur la période 1959-2018. Tendances réalisée avec un test de Mann-Kendall .....	146
Table IV.5: Débits seuils (en $m^3.s^{-1}$ ) pour des période de retour T2, T5, T10, T20, T50 et T100 pour chaque fleuve, calculés à partir des périodes observées respectives .....	147
Table IV.6: Nombre d'évènements de crues enregistrés pour chaque bassin selon les données observées et modélisées sur la période de service des stations de jaugeage. Obs flood : le nombre de jours en crue de période T2 enregistré par les observations. Mod flood : le nombre de jours dépassant le 95 <sup>ème</sup> centile des variables de drainage et infiltration. In commun : le	

pourcentage d'évènements détectés par Mod flood parmi la totalité des évènements détectés par observation .....	150
Table IV.7: Evolution de la contribution des précipitations extrêmes sur le cumul annuel moyen des précipitations. Comparaison entre 1959-1973 et 2004-2018.....	157
Table V.1 Indices bioclimatiques, période de calcul et catégories en fonction de leurs valeurs .....	170
Table.V.2: Caractéristiques de la zone en vignoble du Languedoc-Roussillon (a) Climatologie moyenne, élévation et surface. P, T et GS représentent les précipitations, les températures et la saison de croissance (considérée du mois d'avril à septembre inclus) respectivement. (b) Tendances linéaires des précipitations et températures au pas de temps annuel (Annual) et pour la période de croissance (GS) sur la période 1959-2018 (c) Pourcentages des types d'occupation des sols et proportion représentée par les vignobles dans la surface totale et la surface agricole pour les années 1990 et 2018 d'après les données Corine Land Cover. ** représentent les proportions dans la surface totale, et * représente les proportions dans les surfaces agricoles uniquement.....	172
Table V.3: Températures (T) moyennes de la période de croissance (GS) tolérées pour les 4 cépages majeurs du vignoble du Languedoc. D'après Jones et al., (2005).....	174

# ANNEXES



## Annexes du Chapitre II

Publication 1: Publication dans le Journal Water. Décembre 2020. DOI : [10.3390/w12123581](https://doi.org/10.3390/w12123581)



Article

## Unravelling Climate and Anthropogenic Forcing on the Evolution of Surface Water Resources in Southern France

Camille Labrousse <sup>1,\*</sup>, Wolfgang Ludwig <sup>1</sup>, Sébastien Pinel <sup>1</sup> , Mahrez Sadaoui <sup>1</sup>   
and Guillaume Lacquement <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centre de Formation et de Recherche sur les Environnements Méditerranéens, Université de Perpignan Via Domitia, CNRS, UMR 5110, 52 Avenue Paul Alduy, F-66860 Perpignan CEDEX, France; ludwig@univ-perp.fr (W.L.); sebastien.pinel@univ-perp.fr (S.P.); mahrez.sadaoui@univ-perp.fr (M.S.)

<sup>2</sup> Acteurs, Ressources, Territoires dans le Développement, Université de Perpignan Via Domitia, UMR 5281, 52 Avenue Paul Alduy, F-66860 Perpignan CEDEX, France; lacquement@univ-perp.fr

\* Correspondence: camille.labrousse@univ-perp.fr

Received: 20 November 2020; Accepted: 16 December 2020; Published: 20 December 2020



**Abstract:** In the Mediterranean, climate change and human pressures are expected to significantly impact the availability of surface water resources. In order to quantify these impacts during the last 60 years (1959–2018), we examined the hydro-climatic and land use change evolution in six coastal river basins of the Gulf of Lion in southern France. By combining observed water discharge, gridded climate, mapped land use and agricultural censuses data, we propose a statistical regression model which successfully reproduces the variability of annual water discharge in all basins. Our results clearly demonstrate that, despite important anthropogenic water withdrawals for irrigation, climate change is the major driver for the detected reduction of water discharge. The model can explain 78–88% of the variability of annual water discharge in the study catchments. It requires only two climatic indices that are solely computed from monthly temperature (T) and precipitation (P) data, thus allowing the estimation of the respective contributions of both parameters in



the detected changes. According to our results, the study region experienced on average a warming trend of 1.6 °C during the last 60 years which alone was responsible for a reduction of almost 25% of surfacewater resources.

**Keywords:** surface water resources; climate change; anthropogenic pressure; statistical modeling

---

## Introduction

The Mediterranean region is warming faster than the world average and should experience drier conditions than today in the near future [1–5]. This region has already been submitted to large climate shifts in the past [6] and is now widely recognized as one of the most prominent hotspot regions in future projections [2]. Water acts here as a limiting factor for economic development and local societies have to reconcile decreasing water resources with increasing water needs for a growing population and for sustainable agricultural and touristic development [7]. It is hence crucial to identify ongoing hydro-climatic trends, their processes, drivers, and their impact in order to shape adaptation strategies for water resource management.

Many studies have analyzed hydro-climate trends in the Mediterranean Region over recent decades (see the reviews from [8,9]). Especially in Spain and France, a series of studies have reported seasonal and annual decreasing trends for water discharge of coastal rivers which are likely to be linked to recent climatic evolution [10–14]. However, streamflow trends can be attributed to several factors other than climate including land-use change, water use and water management [8]. It therefore remains complex to find out what proportion of the reduction is human-induced and what proportion is climate-induced.

Our study addresses these problems. We focus on the annual evolution of water discharge of six coastal rivers in Southern Mediterranean France during the last 60 years which were analysed together with the corresponding evolution of climate and land use patterns. Our goal is to statistically detect the dominant controls on water resources which can then be used for quantitative assessments of past and future evolution in the context of global change. We used for our purpose the climate parameters and associated model transformations that can be extracted in a gridded form from the Meteo-France Safran-Isba-Modcou database, which allow a continuous and spatially explicit reconstruction of climate evolution since 1959.

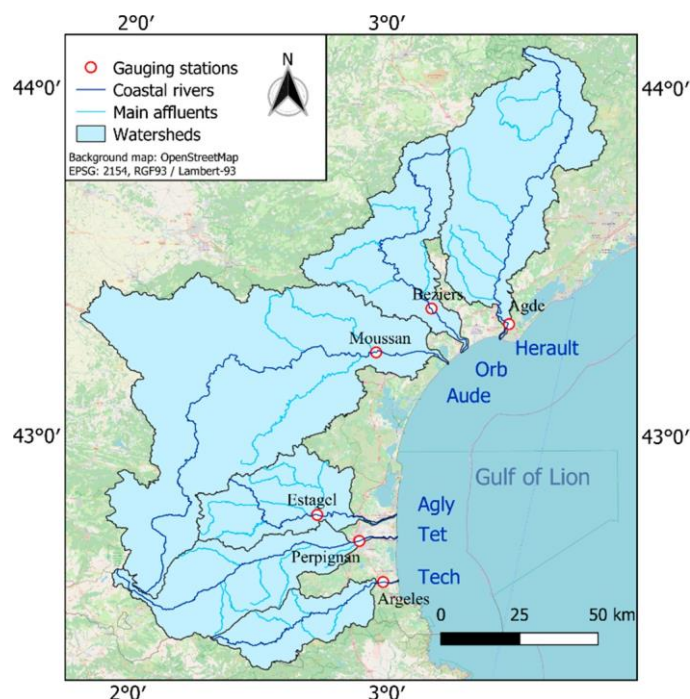
Previous studies have already detected a significant decline of water discharge in the rivers of our study region [12,15], making this region particularly suitable for testing the validity of empirical relationships under non-stationary conditions. There is increasing awareness that the ability of hydrological models to predict water discharge under future climate conditions not only depends on their performance in reproducing realistic seasonal or long term averages, but also on their capabilities in faithfully reproducing the observed trends in time series which depict non-stationary conditions [16]. Despite the fact that anthropogenic water use can strongly influence water discharge in the studied river basins, we clearly demonstrate that climate was the dominant driver for the evolution of surface water resources during the last 60 years. For all six river basins, highly significant empirical relationships between observed annual water discharge and two single climate indices could be established. They explain by far the largest part of the long-term variability of water resources in the study region. The performance of our models was tested both through the strength of correlation between the simulated and observed water discharge and through their ability to predict the detected trends. Temperature and precipitation are the only input parameters for the climate indices we used, and we also discuss the potential impact of each parameter on the evolution of water resources since the early 1960s.

## **Materials and Methods**

### ***Study Area***

The study area consists of six coastal watersheds of the Gulf of Lion drainage basin which is located in the Northwestern Mediterranean Sea (Figure 1). They are, from North to South, the Herault, Orb, Aude, Agly, Tet and Tech river drainage basins, covering areas ranging from 729 to 4838 km<sup>2</sup> (Table 1). Administratively, they belong to the French Herault (Herault and Orb catchments), Aude (Aude catchment) and Pyrenees-Orientales (PO) departments (Agly, Tet and Tech catchments) and form about 43% of the former Languedoc-Roussillon (LR) Region. In terms of climate, all watersheds are dominated by Mediterranean climate conditions, except the upper parts of the southern basins which drain the Pyrenees Mountains and which are characterized by a nival climate type [12]. Water discharges in the studied rivers depict clear decreasing trends in relation to recent climate change [12,15], which has continued and even been exacerbated during the most recent years (see Section 3. Results, Trends, Hydro-climatic parameters). This allows the study of their hydro-climatic functioning under non-stationary conditions. Moreover, anthropogenic water use is important in some of the watersheds (see

Section 3. Results, Trends, Water and land use), making these rivers interesting case studies for the deconvolution of anthropogenic and climate forcing on surface water resources. Pressures might still increase in the future since the French National Institute of Statistics and Economic Studies (INSEE) [17] reported that the study region has gained 1 inhabitant per km<sup>2</sup> between 1982 and 2011, compared to about 0.5 inhabitant per km<sup>2</sup> for the whole country, and anthropogenic pressures are expected to increase



**Figure 1.** Location of the six study catchments with corresponding gauging stations.

Table 1. Average hydro-climatic characteristics of each watershed. PET = potential evapotranspiration; Q<sub>obs</sub> = observed water discharge data. \* average water withdrawal between the years 2012 and 2018.

Basin	Number of Years	Area Basin (km <sup>2</sup> )	Mean Elevation (m)	Annual Temperature (°C)	Annual Rainfall (mm)	Snowfall (%)	PET (mm)	Q <sub>obs</sub> (mm)	Q <sub>s</sub> (mm)	Q <sub>pike</sub> (mm)	Agriculture (mm) *	Drinking Water (mm) *
Herault	59	2550	367	12.6	1103	2.4	1023	518	537	381	23	0
Orb	53	1330	444	12.6	1013	2.4	1003	615	462	324	29	9
Aude	50	4838	462	12.2	838	7.2	978	263	296	215	29	2
Agly	52	903	508	12.6	802	5.5	1045	191	277	183	60	1
Tet	49	1300	1061	10.1	802	20.7	1017	228	293	187	186	11
Tech	43	729	778	11.7	998	9.4	1046	370	386	295	76	2

### Climate Data

The climatic data we used were extracted from the 8-km gridded dataset provided by the mesoscale atmospheric system Safran hosted at Météo-France (MF). Safran was initially designed to provide atmospheric forcing details in mountainous areas for avalanche hazard forecasting [18,19]. The system has been extended over the whole of France coupled with a

land surface model (Isba) and a hydrological model (Modcou) in order to simulate the transfers between the atmosphere, the surface, and the subsurface. A detailed description of Safran and its applications over France is presented by Quintana-Seguí [20]. Mean daily temperature (T), precipitation (P), and potential evapotranspiration (PET) were extracted from Safran for the 60-year period for each grid falling into the respective watersheds, and then averaged for the entire watershed (Supplementary Materials Figure S1). Watershed contour shapefiles from the French Carthage Métropole database were used for this [21]. We also condensed these data to monthly and annual averages.

In Safran, T, *p* and PET data are processed from automatized spatial extrapolation of all available station data of MF and therefore represent a realistic estimate for the spatial and temporal evolution of these parameters in France. However, since not all stations cover exactly the same periods, the extrapolation procedure can include variable time slices which might impact the resulting trend analysis [22]. We therefore tested the consistency of the Safran data by comparing them to the values obtained by Lespinas [12] for the period of 1965–2004. These latter data were obtained by manual

extrapolation of a fixed number of stations in this area. The results (Supplementary Materials Figure S2) demonstrate that both methods result in identical temperature trends (except for the Agly catchment for which the Safran trends are significantly lower). The average T values can however be somewhat different, in particular in the small Tech and Tet catchments with strong elevation gradients. This is because Lespinas [12] produced their spatial interpolations at a much finer spatial grid point scale.

We further produced, with the Safran climate data, a series of climate indices which were used for correlation statistics. Two of these express the seasonality of precipitation (the Fournier Index (F-Index) [23], Seasonality Index (SI) [24]) and three are drought indices (the Standardized Precipitation Index (SPI) [25], Standardized Evapotranspiration-Precipitation Index (SPEI) [26], Reconnaissance Drought Index (RDI) [27]). Among the latter, SPEI and RDI were revealed to be particularly powerful for the prediction of annual runoff. SPEI was calculated with the corresponding R-routines supplied by Vicente-Serrano et al. [26] whereas RDI was calculated using three expressions. The first uses a monthly time step and is computed over a complete hydrological or full year. It follows the equation:

$$\alpha_0^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^{12} P_{ij}}{\sum_{j=1}^{12} PET_{ij}}, i = 1 \dots n \quad j = 1 \dots 12$$

where,  $P_{ij}$  and  $PET_{ij}$  are precipitation and potential evapotranspiration of the *j*th month and

of the  $i$ th year and  $n$  is the number of years in the data. The second expression is the normalized RDI expressed as:

$$RDI_n^{(i)} = \frac{\alpha_0^{(i)}}{\bar{\alpha}_0} - 1$$

where,  $\bar{\alpha}_0$  is the arithmetic mean of  $\alpha_0$  values, calculated for the  $n$  years of data. Finally, the third expression is the standardization of RDI, following the equation:

$$RDI_{st(k)}^{(i)} = \frac{y_k^{(i)} - \bar{y}_k}{\sigma_{y_k}}$$

where  $y_k^{(i)}$  is the natural logarithm of  $\alpha_0^{(i)}$ ,  $\bar{y}_k$  the arithmetic mean of  $y_k$  and  $\sigma_{y_k}$  the standard derivation of  $y_k$ . Finally, a positive/negative  $RDI_{st(k)}^{(i)}$  renders dry/wet conditions

In Safran, PET is determined according to the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) Penman-Monteith equation [28] which requires, beside temperature, data on wind speed, air humidity, radiation and albedo. The availability of all these parameters is often limited and many approaches often refer to estimates of PET which is derived from temperature data alone [29,30]. In our study, we therefore also tested whether T-derived PET estimates (PETt) can be used for the prediction of annual runoff. We retained for this the approach of Folton and Lavabre [31] which has been demonstrated to successfully produce PET estimates in the South of France and which was therefore used for the modelling of water discharge in the studied river basins [15].

### Hydrological Data

Observed water discharge data ( $Q_{obs}$ ) were taken as daily values from the HYDRO database hosted by the French Ministry of the Ecology, Sustainable development and Energy [32]. For each river, we selected the most downstream gauging station (Figure 1). Certain short time periods could be missing. We filled these gaps by interpolating them with records from previous and next days of the same station (see Supplementary Materials Table S1). Nevertheless, length of series differs from one river to another. The Herault is the river with the longest time series of 59 years (1959–2018 except 1986), whereas the Tech River presents the shortest time series with 43 years (1976 to 2018).

The Safran-Isba-Modcou database also provides data which are derived from modelling alone. Among the hydrological parameters, basin runoff can be estimated as the sum of surface runoff and

soil drainage [33,34] and we also included this parameter (Qs) in our study for comparison with modelling (Table 1). It should however be noticed that Qs has been calibrated with observed discharge values from station data in the study region and Qs is therefore not completely independent from Qobs [34]. We finally also included a simple climatic index which can be used as an estimator of water runoff. This parameter (Qpike) is calculated on the basis of annual P and PET data alone and has been successfully applied to predict average water runoff in Mediterranean rivers [35,36]. The parameter is given following the equation:

$$Q_{pike} = \left( 1 - \frac{1}{\left( 1 + \left( \frac{P}{PET} \right)^2 \right)^{0.5}} \right) \times P$$

where P is the annual rainfall and PET the annual potential evapotranspiration.

### Land Use Data and Anthropogenic Water Extractions

Data on the evolution of anthropogenic land use and water extractions are more difficult to assemble than climate and water discharge data. They are normally collected at coarse temporal timescales, do not go as far back in time as climate data and often need the combination of different sources, including reports and web-sites from non-scientific publications and organisations. A very general evolution of land use can be obtained from the CORINE Land Cover data base [37] which allows quantification of the major agricultural land use types for the years 1990, 2006, 2012, and 2018 at a spatial grid point resolution of about 100 m. Average land use characteristics in the study catchments are summarized in Table 2.

**Table 2.** (a) Percentage (1990–2018 average) of major land use categories for each watershed. Note that “Other” refers to the open spaces, wetlands and water bodies, which correspond to the CORINE subclasses 3.3, 4.1, 4.2, 5.1, and 5.2 (b) Percentage of agricultural land use types for each watershed.

Basin	Artificial Area	Forest	Agricultural Lands	Herbaceous Vegetation	Other
Tech	3.25	60	18.5	15.8	2.5
Tet	3.05	37	20	33.7	6.3
Agly	1.7	34.35	27	35.4	1.6
Aude	2.75	32.5	48.5	15.4	0.9
Orb	4	48.8	30.5	14.85	1.85
Herault	2.8	30.8	31.5	33.4	1.5

(a)

Basin	Arable Land	Vineyards	Fruit and Olive Trees	Pastures	Heterogeneous Areas
Tech	1.1	37.3	8.3	6.5	46.9
Tet	0.4	31.8	24.5	6.1	37.3
Agly	0	71.2	0.1	3.9	24.8

Aude	16.2	53.4	0.2	6.2	23.5
Orb	1.2	58.9	0.4	4.4	35.1
Herault	2.5	64.8	0.3	6.3	26.2

(b)

Recent data on quantitative surface water withdrawals were retrieved from the French online database Banque Nationale des Prélèvements quantitatifs en Eau (BNPE) [38]. They are available per administrative area, and we used the basin outline shapefiles to filter only the areas that fall within the basin limits. The data exist at annual time scales from 2012 to 2018, and average values are summarized in Table 1 for comparison with surface water runoff in the basins. For longer time scales, one can only refer to agricultural census data which are based on queries and centralized at the French Agricultural

Ministry. Reconstruction of the evolution of irrigated areas in the former LR area between 1970 and 2010 can be obtained from the statistical service of the French Ministry of Agricultural Ministry (AGRESTE) for the years 1970, 1979, 1988, 2000 and 2010 [39]. Data on agricultural land use changes were also obtained at the department scale from AGRESTE for the years 1988, 2000 and 2010.

We further also considered remote sensing data which allow more continuous reconstruction of the evolution of land surface patterns and which are therefore more suitable for statistical analyses together with climate data. We considered in particular the so-called Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) which is an index ranging between 0 and 1 of the absorptive and reflective characteristics of vegetation in the red and near-infrared of the electromagnetic spectrum. It is hence an indicator of the productivity, density, and/or health of the vegetation cover. The data we used exist at a resolution of 8 km and were extracted from the National Centre for Atmospheric Research [40] for the years 1982 to 2015.

## Statistics and Data Treatment

We used the freely available R software for the extraction and arrangement of data as well as for the computation of statistical tests. For trend analysis in hydro-climatic time series, we performed a Mann-Kendall test [41,42] together with the calculation of the Sen slope [43] to detect and to quantify linear trends (see Supplementary Materials Table S2). We chose this test for its robustness with regard to outliers and skewed data. The Mann-Kendall test is an efficient tool in hydro-climatic studies [44] and still widely used for trend detection (e.g., [45,46]). Single and multiple regression analysis were performed on the basis of the squared

Pearson correlation coefficient [47] which allows quantification of the strength of linear relationships. In multiple regression analyses, only parameter combinations were allowed which significantly increased correlation in all of the study catchments. The accuracy of each hydrological model was tested both by calculating the strength of the relationship between the simulated variable and the observed water discharge, and by comparing the linear trends obtained over the observed period of each river. Combination of climatic, land use change and water management parameters in the multiple correlation analyses suffered from the different spatial and temporal resolutions in which these parameters exist. The land use change and water management parameters often only exist at regional scales (irrigation) and/or represent average long term trends over decades (land use changes). We therefore also created subsets of data over shorter time periods for which all parameters exist and linearly interpolated decadal trends to finer annual time steps in order to test the potential impact of these latter parameters on the evolution of water discharge in the study rivers.

## **Results**

### *Average Basin Characteristics*

#### **Hydro-Climatic Parameters**

Table 1 summarizes the average hydro-climatic characteristics of the studied river catchments. Observed water discharge ( $Q_{obs}$ ) varies between 191 mm (Agly) and 615 mm (Orb) and represents respectively 24% and 61% of mean annual precipitation ( $P$ ) in these basins. Such large variability is only partly related to the prevailing climate conditions. For example, the relatively high  $Q_{obs}$  value for the Orb catchment is related to water importation from a neighboring catchment [15] whereas the relative low values for the Tet and Agly catchment can be explained by water withdrawal by irrigation channels (Tet River) and/or water losses through karstic geological formations (Agly River). In the case of the Tet, the water loss represents approximately one third of the natural water discharge close to the river mouth [48].

Modelled water discharge ( $Q_s$ ) extracted from the Safran-Isba database fits within a range of +50% and -20% of the observed water discharge values. It overestimates the observed values, except for the Orb catchment. However, as the model is purely driven by climatic parameters, other factors such as anthropogenic water extractions (see above) cannot be taken into account,



and discrepancies between the modelled and the observed average values should not necessarily be interpreted as failure of the model performance.

Average annual precipitation totals in the catchments vary between 802 mm (Tet and Agly) and 1103 mm (Herauld). They are generally more elevated in the northern compared to the southern catchments, but slightly increase again in the Tech catchment towards the Spanish border. Average temperatures are naturally lowest in the catchments with the greatest average elevation, which are the Tet and Tech catchments. The climate values we found generally fit well with the ones produced by Lespinas [12,15], but small differences can appear especially in the smaller southern catchments because of the relative coarse grid point resolution of the Safran data of differences in the consideration of snowfall and of differences in the spatial interpolation techniques at the border with Spain.

### **Water and Land Use**

Table 1 also allows an overview of the potential impact of anthropogenic water use on the water discharge of the investigated rivers. Superficial water extraction for drinking water are almost negligible and clearly less important than water extraction for irrigation. The latter, however, can represent a considerable fraction of average water discharge. It is more important for the southern catchments compared to the northern ones. Water withdrawal for irrigation is particularly elevated for the Tet River (>80% of  $Q_{obs}$ ), underlining its outstanding role in terms of water use. Because of the steep elevation gradient and an important share of snowfall in total precipitation (Table 1), supporting water discharge during the snowmelt period in spring, a dense network of irrigation channels has been developed here since the Middle Ages [49]. It still supports gravitational irrigation techniques, which are highly water consuming. However, most of the extracted water naturally returns to the river and bulk water extractions should not be considered as net water losses in the annual river discharge. Average vegetation and land use characteristics in the studied catchments are summarized in Table 2a. Natural vegetation dominates in all catchments and is particularly abundant in the Tech and Tet catchments. Forests dominate in the Tech and Orb catchments, whereas scrubs and herbaceous vegetation also significantly contribute to natural vegetation in the Tet, Agly and Herauld catchments. The Aude River has the catchment with the greatest share of cultivated areas. Agricultural land use in all catchments (Table 2b) is generally controlled by vineyards, except in the Tet catchment where fruit tree cultures occupy about the same area. This is directly related

to the outstanding irrigation activity in this catchment (see above). Other land use types are mixtures of agriculture and natural vegetation

and pasture. Arable land (corn and legumes) is only important in the Aude catchment.

### **Parameter Relationships and Models**

Relationships between individual parameters can be illustrated in the form of correlation matrices. We present this in Figure 2 only for the Hérault catchment as an example, but for the other catchments the results are similar (see Supplementary Materials Figure S3). Only relationships between mean annual hydro-climatic parameters were included in Figure 2, since the evolution of land use patterns cannot be reconstructed in the same temporal resolution historically (see below). Correlation with observed annual water discharge ( $Q_{obs}$ ) is highest with the Safran-based modelled water discharge ( $Q_s$ ), with  $r^2 = 0.85$  for  $n = 59$  data points. The Safran-Isba model is hence a powerful tool to predict the long-term evolution of water discharge in this catchment.  $Q_{pike}$  also depicts close correlation with  $Q_{obs}$  ( $r^2 = 0.79$ ), followed by  $P$ ,  $RDI$ ,  $SPEI$  and  $SPI$  ( $r^2 = 0.70, 0.61, 0.57, \text{ and } 0.51$ , respectively). Negative correlation is observed for  $PET$  ( $r^2 = 0.29$ ),  $PET_t$  ( $r^2 = 0.21$ ) and  $T$  ( $r^2 = 0.19$ ). All parameters expressing drought indices are highly intercorrelated ( $RDI$ ,  $SPEI$ ,  $SPI$ ), as this is also the case for  $PET$  and  $PET_t$ . Indices which were selected to characterize seasonality of  $p$  ( $WI$ ,  $SI$  and Fournier) only depict weak correlations with  $Q_{obs}$ .

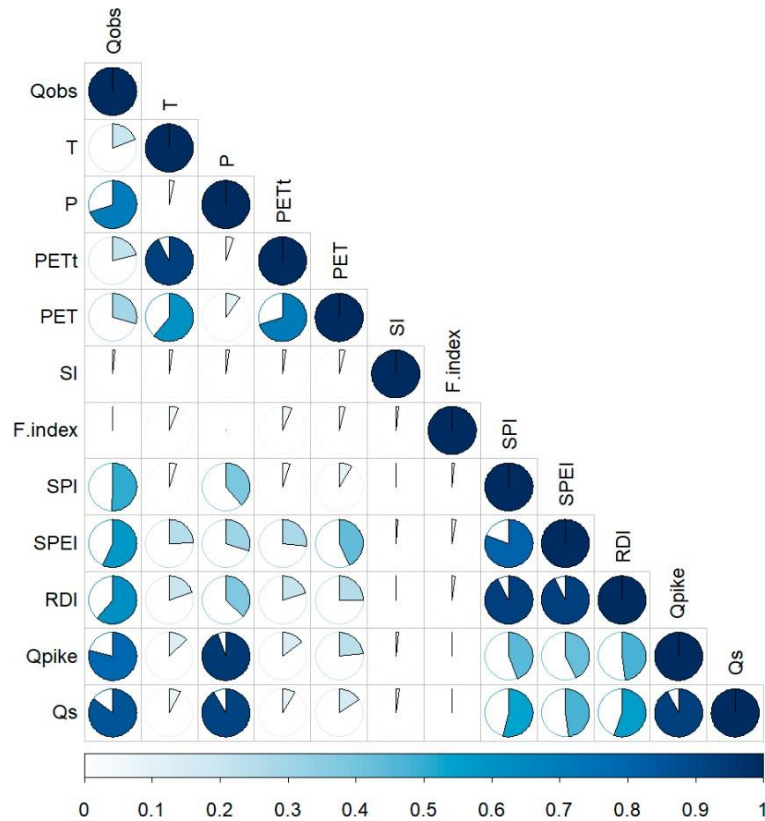


Figure 2. Pearson squared correlation matrix of basic climatic parameters in the Herault watershed.

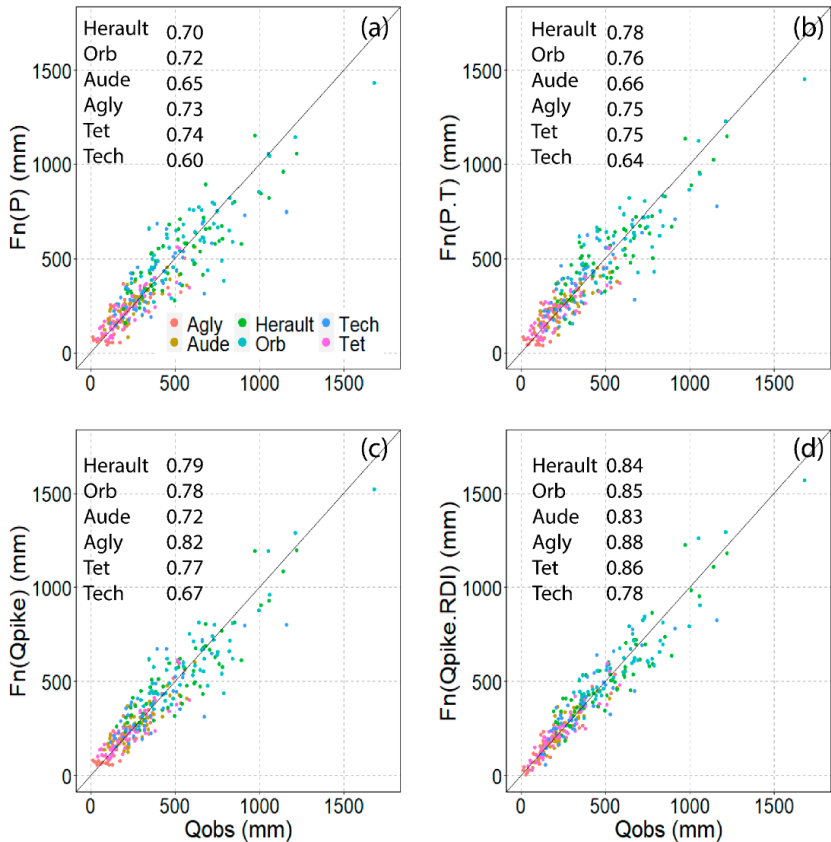
### Multiple Parameter Relationships

Combination of the above-discussed parameters significantly improve the prediction performance of empirical models for Qobs. Multi-regression statistics reveal that in particular the combination of Qpike and RDI yields the most powerful regression models in all study catchments (in the following Qmod). Figure 3 shows that  $r^2$  continuously increase when using P, p combined with T, Qpike and Qpike combined with RDI as input parameters in the regressions. In the case of the p—T models, T is however only significant ( $p < 0.1$ ) in the Herault, Orb, Agly and Tech catchments. In the case of the Qpike—RDI models, both input parameters are highly significant ( $p < 0.01$ ) and the resulting  $r^2$  values (Table 3a) are comparable to the  $r^2$  values which are obtained when correlating Qobs with Qs ( $r^2 = 0.77, 0.88, 0.89, 0.87, 0.87, 0.85$  for the Tech, Tet, Agly, Aude, Orb and Herault catchments, respectively). Adding RDI to Qpike always provokes a significant increase of  $r^2$  compared to Qpike alone and the model hence explains between 78% (Tech) and 88% (Agly) of the variability of observed annual water discharge during the documented study years ( $n = 43-59$ ).

All the tests we performed in order to combine our climate data and indices with data on land use changes and water management practices in time sub-series for which all parameters could

be combined did not result in significant improvement of the prediction performance of our empirical models.

Table 3a also depicts the corresponding regression coefficients for  $Q_{pike}$  and RDI for the studied river basins, as well as the associated intercept values (which are all also significant at the  $p < 0.01$  level). Between catchments, the variability of the  $Q_{pike}$  coefficients is lowest (about  $\pm 20\%$  around the average) and slightly more elevated for the RDI coefficients (about  $\pm 33\%$  around the average). For the corresponding intercept values, variability is greatest (about  $\pm 100\%$  around the average). The intercept is greatest for the Orb which imports water from outside the catchment, and lowest for the Agly catchment which loses water to the karst groundwaters (see above). Interestingly, Table 3b also demonstrates that replacement of PET by PETt in our regressions does not significantly impact the predictive performance of the models. In four of the six catchments,  $r^2$  even increases slightly. This means that between 78% and 88% of the variability of observed annual water discharge in the study catchments can be explained by two single climatic parameters, which are monthly T and monthly P.



**Figure 3.** Performance of regression models for observed annual water discharge ( $Q_{obs}$ ) and precipitation, (b) precipitation and temperature, (c)  $Q_{pike}$  and (d)  $Q_{pike}$  and Reconnaissance Drought Index (RDI) for the six study catchments.

**Table 3.** Correlation and regression coefficients for the multiple regression models of  $Q_{obs}$  as a function of  $Q_{pike}$  and of RDI for the six study catchments: (a) potential evapotranspiration taken from Safran (PET) and (b) potential evapotranspiration derived from temperature (PETt).

(a)

Basin	$Q_{pike}$	RDI	Intercept	$r^2$	n
Herault	0.7183	96.9	244	0.85	59
Orb	0.8531	95.5	346	0.84	53
Aude	0.6041	55.1	135	0.81	50
Agly	0.7829	50.4	51	0.88	52
Tet	0.6930	66.1	104	0.85	49
Tech	0.6847	104.0	179	0.76	43

(b)

Basin	$Q_{pike}$	RDI	Intercept	$r^2$	n
Herault	0.7173	95.6	243	0.84	59
Orb	0.8184	109.9	356	0.85	53
Aude	0.5613	63.6	143	0.83	50
Agly	0.7723	54.0	53	0.88	52
Tet	0.6644	72.1	111	0.86	49
Tech	0.6354	121.4	198	0.78	43

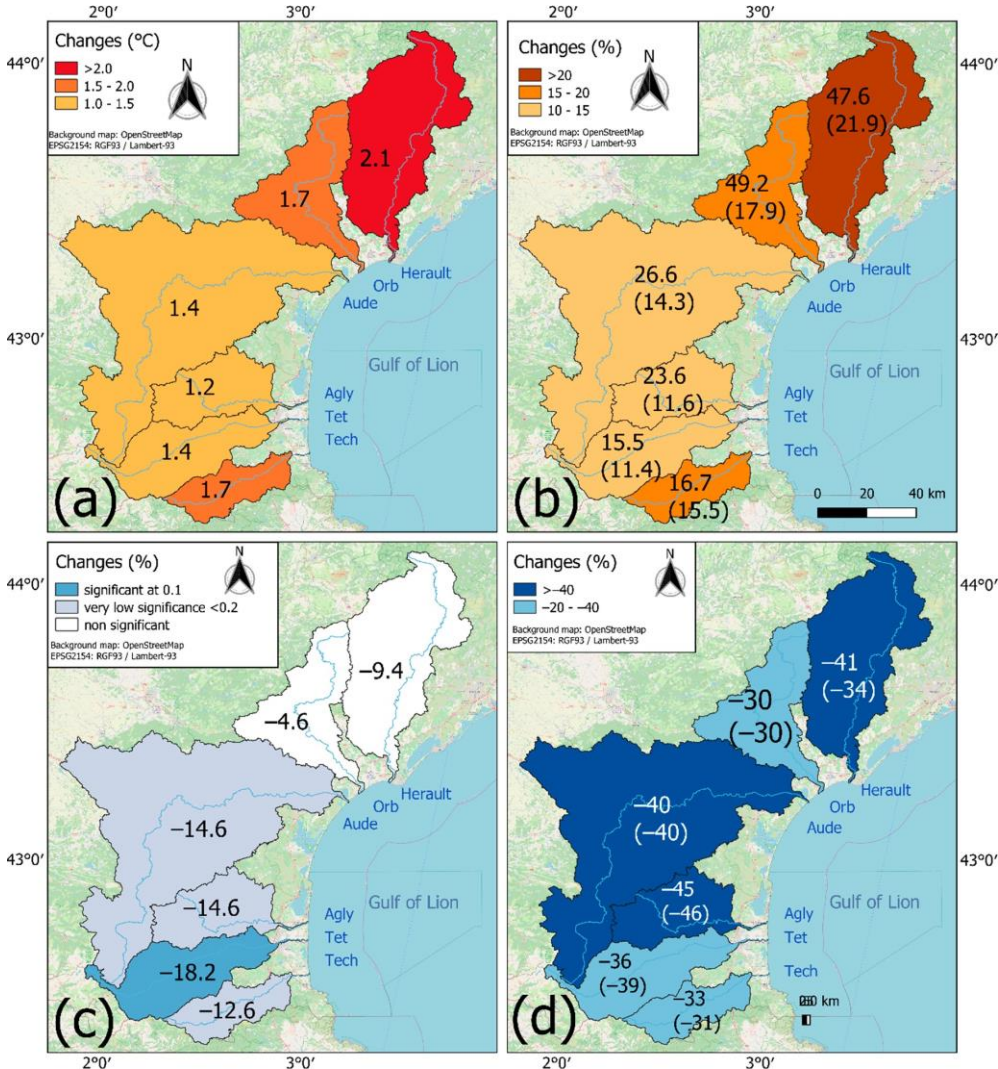
(b)

## Trends

### Hydro-Climatic Parameters

All hydro-climatic parameters were submitted to trend analysis in order to catch their long-term evolution. Mean annual temperature increased on average between 1.2 °C (Agly) and 2.1 °C (Herault) during the study period (Figure 4a), which corresponds to a warming trend of 0.23–0.35 °C/decade. This is less than reported by Lespinas [12], who found an average warming of about 0.38 °C/decade for the entire study region. Discrepancies are related to the longer time period we considered, as well as to a slight flattening of the warming trend during recent years (Supplementary Materials Figure S1). This illustrates the strong dependency of trend analyses on the time slices which are selected to run these analyses. The detected trends were nevertheless highly significant in all catchments ( $p < 0.01$ ), confirming that global warming affected the study region. Trends for the evolution of PETt (Figure 4b) closely match the evolution

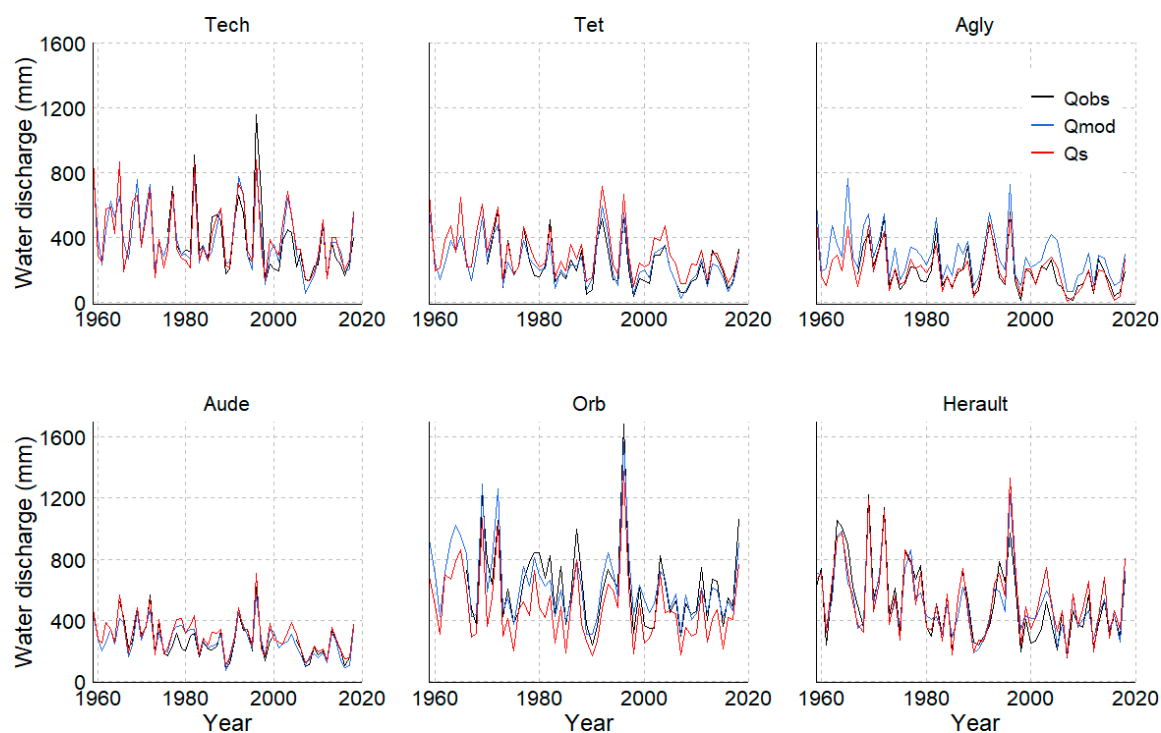
of T, illustrating the strong relationships between both parameters. PET, however, depicts a stronger increase in the Orb and Herault catchments compared to the other catchments further south.



**Figure 4.** Linear trends during the period 1959–2018 of (a) annual temperatures T, (b) annual potential evapotranspiration PET (in brackets PETt), (c) annual precipitation totals P, (d) Water discharge based on Qmod (in brackets Qs).

The evolution of annual precipitation was highly variable (Supplementary Materials Figure S1) and trends can only be detected at weak significance levels (Figure 4c). All have negative signs. The strongest trend ( $p < 0.1$ ) appears for the Tet catchment, where  $p$  decreased by about 18%. In the Tech, Agly and Aude catchments also, slightly negative trends of about 13–15% are indicated ( $p < 0.2$ ). Such an evolution towards lower  $p$  values is in agreement with future climate predictions [50], although the study region is situated on the limit between predicted  $p$  increases further North and predicted  $p$  decreases further South.

Quantification of the associated discharge trends is more complicated since the time series for Qobs in the study catchments does not exactly cover the same periods, and trend analyses are impacted by differences in the years when the trends start and end. However, both the annual evolutions of Qmod and Qs closely match the evolution of Qobs (Figure 5), which suggests that trend analyses can be performed on the basis of these parameters. Comparison of trends which are restricted to the years for which Qobs exist reveal that both Qmod and Qs reasonably fit with Qobs (Figure 6). Extrapolating the trends to the entire study period (Figure 4d) on the basis of Qmod and Qs therefore suggest that water discharge might have significantly decreased by about 30% (Orb)–45% (Agly) on average. Figure 6 also demonstrates that precipitation alone, although this parameter explains the largest part of the variability of Qobs in the study catchments, is not suitable for the prediction of trends.

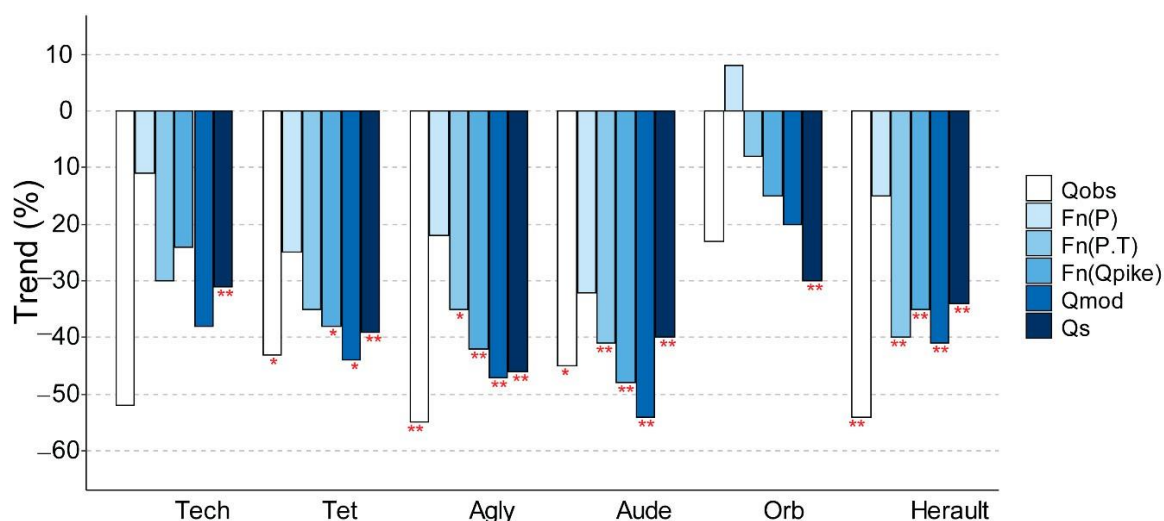


**Figure 5.** Annual evolution of observed water discharge (Qobs, black line), of modeled water discharge according to Safran (Qs, red line) and modeled water discharge according to our study (Qmod, blue line).

## Water and Land Use

The discontinuous information on land and water use we could assemble does not allow running trend analyses of these parameters. Exploitation of the periodical assessments of the major land use patterns done by CORINE nevertheless allows a general view of major changes during the last 30 years (Supplementary Materials Figure S4). According to CORINE, total agricultural

area in all catchments decreased between 1990 and 2018, but only by less than  $-2\%$  (from  $-0.8\%$  to  $-1.6\%$  in the Orb and Tech catchments, respectively). Forests significantly increased especially in the Tech ( $+3.4\%$ ), Orb ( $+2.0\%$ ) and Hérault ( $+4.8\%$ ) catchments in which scrub and herbaceous vegetation significantly decreased ( $-3.3\%$ ,  $-4.1\%$  and  $-5.2\%$ , respectively). Artificial areas also increased in all catchments (from  $+0.4\%$  to  $+1.2\%$  in the Agly and Orb catchments, respectively). Within agricultural land use types (all types =  $100\%$ ), the strongest decreases are documented for vineyards (from  $-2.7\%$  to  $-6.8\%$  in the Hérault and Orb catchments, respectively). Heterogeneous crops are the agricultural land use type which increased most (from  $+1.3\%$  to  $+12.2\%$  in the Hérault and Tech catchments, respectively).



**Figure 6.** Linear trends for modeled water discharge (all empirical models of Figure 3,  $Q_s$ ) in comparison of linear trends of observed water discharge ( $Q_{obs}$ ). The analyzed time periods are variable and correspond to the periods covered by  $Q_{obs}$  (max. number of 59 years for the Hérault River and min. number of 43 years for the Tet River).

The CORINE data therefore suggest that agricultural land use was only moderately impacted by recent change. This contrasts with information that can be obtained from queries. Based on agricultural census data in France (AGRESTE [39] and on the website of the decentralized service of the French Agricultural Ministry called *Direction régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt* (DRAAF) [51]), the utilized agricultural area (UAA) has reduced by  $-13.3\%$  between 1988 and 2018 in the entire studied area, with greatest reductions ( $-24.3\%$ ) in the Pyrenees-Orientales (PO) department, moderate reductions ( $-13.5\%$ ) in the Hérault department, and lowest reductions ( $-8.4\%$ ) in the Aude department. This is about 3–3.5 times more than data obtained from CORINE on the basis of the respective catchment data. This indicates that mapping of land use types as done by CORINE is not necessarily a precise indicator of agricultural land use changes. Abandoned land may not be recognized as such when



integrated in mixed land use types such as heterogeneous crops. Qualitatively the CORINE data are nevertheless in agreement with the census data in the sense that they confirm that permanent crops (mainly vineyards) are the agricultural land use type which decreased most in the study region. According to AGRESTE, this land use type decreased within UAA in the PO department by  $-46\%$  and in the Hérault and Aude departments by  $-33\%$  within UAA. Increasing land use types where, on the other hand, pastures ( $+36\%$  and  $+20\%$  in the PO and Aude departments) and arable land ( $+42\%$  in the Hérault department).

The agricultural census data also allow the evaluation of the evolution of irrigation over the study area. According to AGRESTE, UAA decreased continuously between 1970 and 2010 with  $-21\%$  in the LR region. Irrigated areas decreased in parallel but by  $-28\%$ . This decrease was hence stronger than the decrease in UAA in general. Between 2000 and 2010, the AGRESTE data also allow a breakdown of the evolution of irrigated areas at the department scale and reveal a  $-23\%$  decrease in the PO department. It is here where surface water extraction for irrigation is greatest on average (Table 1). In the Aude and Hérault departments, however, irrigated areas increased again (by  $+19\%$  and  $+18\%$ , respectively), and irrigated areas in the entire study region (PO, Aude and Hérault departments) remained almost stationary ( $+1.8\%$ ) between 2000 and 2010 ( $-5.3\%$  for the LR region). All these data nevertheless indicate a general trend of reduced agricultural water use in relation with the general decline of agricultural land use since 1970.

One might finally look at the evolution of NDVI in the study catchments (Supplementary Materials Figure S5). This index is often used to track the changes of forest cover [52,53], a land use type with relatively high NDVI values, and reforestation or deforestation trends in drainage basins can impact the hydrology of rivers [53–55]. Average annual NDVI values follow a weak trend towards increasing values. However, changes are minimal and mainly restricted to the beginning of the study period. This is consistent with the forest cover changes documented in CORINE (see above). Significant reforestation trends have been detected in the study region (see [12]), but they mainly occurred before 1990 and should have considerably flattened since then.

We further included the NDVI data in our multi-regression statistics in order to test whether this parameter could improve the accuracy of our models since the 1980s. However, no significant improvements could be detected.

## **Discussion**

### **Hydro-Climatic Trends**

During the last 60 years, the hydro-climatic conditions in the study region have clearly evolved towards warmer and dryer conditions. Based on trend analyses, it can be estimated that average annual temperature increased by about 1.6 °C in the entire study region (discharge-weighted average over all catchments), with maximum increases in the northern catchments (1.7 °C and 2.1 °C in the Orb and Herault catchments, respectively). The onset of this increase started in the early 1980s, in agreement with the onset of global warming in general [56]. Precipitation followed less marked trends, but generally decreased with weak to moderate significance in the middle and southern part of the study region (13–18%). The most striking trends were, however, encountered for surface water discharge, which throughout decreased by about 30–45% in the study catchments. Similar trends were also reported from other Mediterranean areas. For example, Piervitali et al. [57] already reported in 1998 a 20% decrease in precipitation during the period 1951–1995 in the Central-Western Mediterranean. More recently, Valdes-Abellan [58] indicated a decrease of 15% in the annual rainfall in the south-east of Spain over 30 years. The reduction of water discharge has also been documented across various Mediterranean sites and time scales. Romano et al. [59] reported a decrease in the Tiber discharge between 1952 and 2008, associated with a reduction of rainfall and an increase in temperature. In the Iberian peninsula, several studies identified reductions of river discharge for the periods 1950–1999, 1945–2005, and 1966–2005 [60–62]. The evolution we document therefore fits well in the general picture of the Mediterranean as one of the hot spot regions for the decrease of future water resources in relation to climate change.

However, in agreement with the conclusions of many of the studies cited above, two major questions arise from these findings. On the one hand, it is not clear whether the water discharge trends are purely climate driven or whether anthropogenic land use and water use changes may also have contributed. In our study region, the strong decline of surface water resources in combination with only weak negative precipitation trends may be surprising and point to additional drivers such as water extraction for agriculture. On the other hand, it is not clear whether the detected hydro-climatic trends are representative of long term evolution, or whether they are also impacted by other factors such as the cyclicity of atmospheric circulation patterns [63]. Results of trend analyses strongly depend on whether they start (end) with relatively humid (dry) conditions and projecting them beyond the documented time series should naturally be performed with caution.

### **Drivers of Water Discharge**

Both questions can be addressed with our data. Anthropogenic water extraction is indeed significant in the studied catchments, especially in the southern part of the study region, with an irrigation hot spot in the Tet catchment. Agricultural land use is however declining, and this decline is particularly important in the PO department where agricultural water use is greatest on average. Moreover, the decrease in irrigated areas is generally stronger than the decrease in agricultural areas in general, which supports the idea of an antagonistic impact of land use changes on surface water resources.

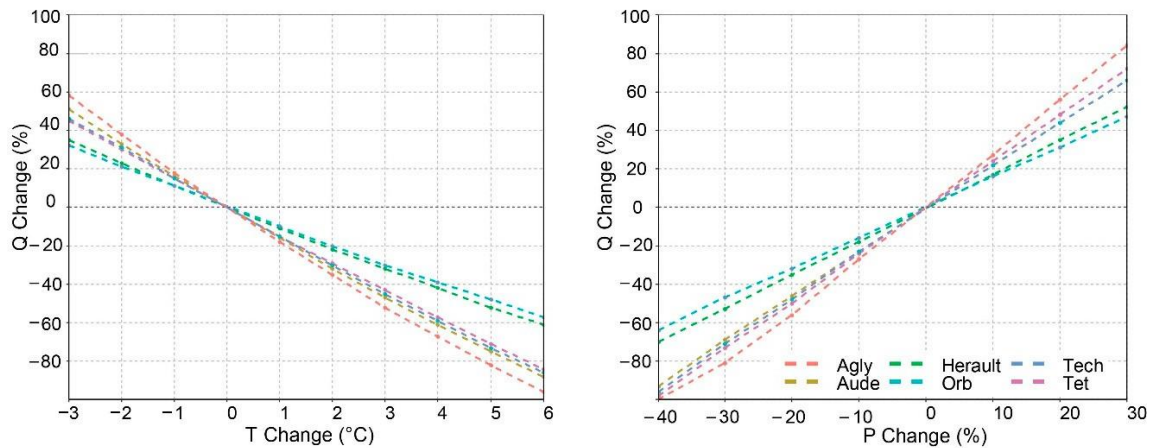
Another candidate for land use changes as driver for the detected water discharge trends is forest cover. Forests can intercept rainfall and hence decrease surface runoff through enhanced evapotranspiration [64]. Forest cover did indeed significantly increase in the study region [12], but this mainly happened during 1950–1970. The more recent evolution during the last 30 years is rather characterized by stationary evolutions, along with some slight increases in the Tech, Orb and Hérault catchments. This is also contrary to the idea of water discharge trends being driven by anthropogenic factors.

Finally, the strongest argument for a dominant climate control of the evolution of surface water resources is that, in all catchments, climate parameters alone can statistically explain between 78% and 88% of the observed variability of annual water discharge. These parameters are, on the one hand, the hydrological index  $Q_{pike}$  and, on the other hand, the drought index RDI. The former has been shown to represent a realistic estimator of specific average water discharge in Mediterranean rivers in general [35,65], whereas the latter takes into account the climatic conditions prior to the study year and therefore may represent the conditioning of the basin's internal water resources, such as groundwaters in the catchments. Among the different drought indexes we tested, which were also used in other studies for hydrological modelling purposes [66,67], RDI produced the best model performance, although the SPEI index performed almost as well as RDI. Combined in a simple multi-parameter regression model ( $Q_{mod}$ ), both indexes do not only well reproduce the average water discharges in all study catchments, but also the associated trends. Interestingly, correlation and trend analysis with  $Q_{obs}$  yield similar performances as  $Q_s$ , which is based on the modelling algorithms for water discharge integrated in Safran-Isba. Compared to  $Q_{obs}$ ,  $Q_s$  nevertheless tends to overestimate average discharge (except in the Orb catchments), as it ignores general water use in the catchments.

## **Model Applications**

The simple statistical model we propose can also be easily adjusted to other catchments to reconstruct long-term evolution of average water discharge during the recent past, or to produce projections for the near future in combination with climate scenarios based on models. It should therefore be considered as a valuable decision making tool for water management purposes. Sophisticated hydrological models generally require many parameters and are often subject to large uncertainties [68], reducing both their usability and reliability for decision makers. When relating PET exclusively to temperature, as is often done in hydrological modelling studies [30,69], our statistical models require only two single input parameters, i.e., monthly P and monthly T. The model therefore easily allows quantification of the role of each parameter in long-term trends in order to address the question of the representativeness of our discharge trends in the context of climate change. We consequently performed sensitivity tests by running our models with modified P and T time series during the study period. In these tests, T and P changes were uniformly applied to all months and therefore do not take into account possible changes of seasonality in the time series. RDI was calculated by normalization with the means and standard deviations of the non-modified time series, hence allowing RDI to evolve towards generally more humid or dryer conditions compared to the reference period.

These tests indicate that average water discharge in the study catchments is significantly reacting to temperature changes (Figure 7). According to our results, the temperature trends we detected during the study period (Figure 4a) could account for a  $-18\%$  (Orb) to  $-27\%$  (Tech) decrease of annual water discharge. This is in the same order as a generalized precipitation decrease by  $-10\%$  (which would provoke a  $-17\%$  (Orb) to  $-29\%$  (Agly) decrease in water discharge). When averaged over all study catchments, the detected temperature increases could account for a water discharge decrease of almost 25%. Figure 7 also illustrates that both the larger Orb and Hérault catchments in the North are obviously less reactive to P and T changes, whereas reactivity is greatest in the catchment of the Agly River. This river can have intermittent water flow in relation to water filtration to the karst groundwaters [70]. When averaged over all catchments, and weighted by the respective average discharge volumes, temperature alone could consequently be responsible for a decrease in surface water resources in the study region of  $-23\%$ .



**Figure 7.** Sensitivity of water discharge for each river to  $p$  and  $T$  changes.

The sensitivity tests we performed could also be used in order to project the evolution of surface water resources under future climate conditions. When combining a hydrological model (GR2M) with climatic simulations for the end of the 21st century from a series of Regional Climate Models, Lespinas et al. [15] concluded that in a worst case scenario (a 4.3–4.5 °C warming together with a 10–16% precipitation decrease), average water discharge in the Tet, Orb and Herault rivers could decrease by about 85%, 83% and 71%, respectively. According to our sensitivity tests, the corresponding values are 83%, 63% and 71%. In agreement with our findings, the authors also concluded that temperature increase should have an important impact on water discharge, a fact that might have been overlooked in the parametrizations of hydrological models and earlier climate change impact studies.

### Model Limitations

Empirical models depend on the quality of the input data used to fit the models. Based on the correlations between water discharge and climate indices, our results clearly suggest that climate is the major driver of the long term evolution of water discharge in the study region. Land use and water management patterns are characterized by abandonment of agricultural activities and, rather, show antagonistic trends in terms of anthropogenic water withdrawal. However, these latter data only exist in coarser spatial and shorter temporal resolutions compared to climate data, which reduces their usability in statistical analyses. Further collection of more detailed data as well as continuous acquisition of appropriate remote sensing data are therefore still necessary in order to investigate anthropogenic impacts on water resources.

Another major outcome of our analysis is the significant influence of temperature on the evolution of surface water resources in the study catchments. Statistical fits of the evolution of a few key parameters to the evolution of annual water discharge have the advantage that they easily allow testing of the relative importance of each of these parameters in the detected changes. This is difficult with sophisticated hydrological models for which the deconvolution of the respective impacts of each of the input parameters is often complicated. However, also here it has to be kept in mind that the sensitivity tests we performed are based on simplifications which ignore parameter interactions that can exist in reality. Connection of potential evaporation to temperature data alone may be considered as one of these simplifications. Another inconvenience of our sensitivity tests is that they do not take into account seasonal modifications in the evolution of climate, which are expected to occur in the future and which were already observed in the past. Moreover, projecting these changes to extreme values such as temperature increases of several degrees may also ignore profound modifications in terms of vegetation cover and/or other land use patterns which may accompany future climate change and which may also alter the general hydrological functioning of drainage basins.

## **Conclusions**

Analysis of trends in hydrological time series during recent decades indicates a strong decrease in water discharge of about 30–45% in the studied river catchments. In the context of climate change, which is expected to severely impact surface water resources in the Mediterranean area, such large numbers naturally raise the question of whether these trends are representative also for future evolution, and whether they are dominated by climate change and/or by anthropogenic activities in the drainage basins. Statistical analyses of hydrological, climate, land use and water management data allowed us to respond to both questions. Although the natural and anthropogenic drainage basin characteristics of the six coastal rivers we studied can be significantly different, all rivers have in common that their annual water discharge values can be predicted with high confidence by only two climate indices, exclusively calculated from monthly precipitation and temperature data. This is a strong argument that climate is clearly the dominant driver of water discharge trends in the study region. It is also corroborated by the fact that land use changes are dominated by a general evolution towards less irrigation and the abandonment of agricultural activities, which decrease anthropogenic water withdrawal.

However, simple projection of the detected water discharge trends to future climate conditions should naturally be done with caution. Trends are influenced by natural and man-induced

variability of climate and, without unravelling the influence of both, it is difficult to project the expected changes in future warming scenarios. Our simple statistical models also have an advantage over more sophisticated hydrological models, since they easily allow individual testing of the potential role of T and P in the detected changes. With respect to future changes of P, there still exists considerable uncertainty in future climate modelling scenarios. Our hindcasting analysis of P also revealed that the evolution of P is generally characterized by large variability, and trends which are only weakly significant. However, there is little doubt that the warming trend we detected in the study region is related to ongoing climate change, characterized by a marked onset in the temperature evolution since the early 1980s, in agreement with what has also occurred in many other places in the world. Probably for the first time, we have clearly demonstrated that this warming trend alone should have reduced the surface water resources in the study region by almost 25%.

It therefore becomes evident that the ongoing warming trends might rapidly conflict with sustainable water use in the study catchments. Although during the last 30 years agricultural water use decreased, it is likely that sustainable agricultural land use in the future is not possible without further access to surface water resources. This is particularly true for vineyards, the land use type which actually shows the strongest decline. This might only be stopped by irrigation. On the other hand, surface water extractions for drinking water could also increase in response to an increasing demand and the over-exploitation of groundwater reservoirs.

**Supplementary Materials:** The following are available online at <http://www.mdpi.com/2073-4441/12/12/3581/s1>, Table S1: Hydrological station data considered in this study. Table S2: Results of Sen's slope and Mann-Kendall test  $p$ -value for each hydro-climatic parameter whenever they are non-significant (normal format) or significant (underlined:  $p$ -value < 0.1, and bold:  $p$ -value < 0.05). Figure S1. Evolution of annual temperatures (a), potential evapotranspiration (b), and annual precipitations (c). Figure S2. Comparison between the Safran climate data considered in this study and the climate station data processed by Lespinas et al., 2009: (a) evolution of precipitation,

evolution of temperatures, (c) linear temperature trends for the period 1965–2004. Figure S3. Correlation matrixes of hydro-climatic parameters for the six study catchments. Figure S4. (a) Evolution of major land use types between 1990 and 2018; (b) evolution of agricultural land use types between 1990 and 2018. Figure S5. Evolution of average NDVI values in each basin from 1982 to 2015.

**Author Contributions:** Conceptualization, methodology, and writing, C.L., W.L., S.P., M.S., G.L.; analyses, C.L., W.L., S.P., M.S.; funding acquisition, W.L., G.L. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This study was supported by the doctoral school ED 305 at UPVD through the attribution of a PhD grant to CL. Funding was also provided by the Interreg V-A POCTEFA HAMELIN EFA335/19 project. The project has been 65% co-financed by the European Regional Development Fund (ERDF) through the Interreg V-A Spain France Andorra programme (POCTEFA 2014–2020). POCTEFA aims to reinforce the economic and social integration of the French–Spanish–Andorran border. Its support is focused on developing economic, social and environmental cross-border activities through joint strategies favouring sustainable territorial development.

**Acknowledgments:** We are especially grateful to *Météo-France* for supply of the Safran-Isba climate data in the framework of the *Publithèque* agreement between MF and UPVD.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## References

- Giorgi, F.; Lionello, P. Climate change projections for the Mediterranean region. *Glob. Planet. Chang.* **2008**, *63*, 90–104. [CrossRef]
- Giorgi, F. Climate change hot-spots. *Geophys. Res. Lett.* **2006**, *33*. [CrossRef]
- Lionello, P.; Malanotte-Rizzoli, P.; Boscolo, R. *Mediterranean Climate Variability*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2006.
- Lionello, P. *The Climate of the Mediterranean Region: From the Past to the Future*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2012.
- Lionello, P.; Scarascia, L. The relation between climate change in the Mediterranean region and global warming. *Reg. Environ. Chang.* **2018**, *18*, 1481–1493. [CrossRef]
- Luterbacher, J.; Xoplaki, E.; Casty, C.; Wanner, H.; Pauling, A.; Küttel, M.; Rutishauser, T.; Brönnimann, S.; Fischer, E.; Fleitmann, D.; et al. Chapter 1 Mediterranean climate variability over the last centuries: A review. *Dev. Earth Environ. Sci.* **2006**, *4*, 27–148. [CrossRef]
- Cudennec, C.; LeDuc, C.; Koutsoyiannis, D. Dryland hydrology in Mediterranean regions—A review. *Hydrol. Sci. J.* **2007**, *52*, 1077–1087. [CrossRef]
- García-Ruiz, J.M.; López-Moreno, J.I.; Vicente-Serrano, S.M.; Lasanta-Martínez, T.; Beguería, S. Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth Sci. Rev.* **2011**, *105*, 121–139. [CrossRef]
- Merheb, M.; Moussa, R.; Abdallah, C.; Colin, F.; Perrin, C.; Baghdadi, N. Hydrological response characteristics of Mediterranean catchments at different time scales: A meta-analysis. *Hydrol. Sci. J.* **2016**, *61*, 2520–2539. [CrossRef]
- Masseroni, D.; Camici, S.; Cislighi, A.; Vacchiano, G.; Massari, C.; Brocca, L. 65-year changes of annual streamflow volumes across Europe with a focus on the Mediterranean basin. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2020**, 1–16. [CrossRef]
- Ludwig, W.; Serrat, P.; Cesmat, L.; Garcia-Esteves, J. Evaluating the impact of the recent temperature increase on the hydrology of the Têt River (Southern France). *J. Hydrol.* **2004**, *289*, 204–221. [CrossRef]



- Lespinas, F.; Ludwig, W.; Heussner, S. Impact of recent climate change on the hydrology of coastal Mediterranean rivers in Southern France. *Clim. Chang.* **2010**, *99*, 425–456. [CrossRef]
- Morán-Tejeda, E.; López-Moreno, J.I.; Barbancho, A.C.; Vicente-Serrano, S.M. River regimes and recent hydrological changes in the Duero basin (Spain). *J. Hydrol.* **2011**, *404*, 241–258. [CrossRef]
- Blöschl, G.; Hall, J.; Viglione, A.; Perdigão, R.A.P.; Parajka, J.; Merz, B.; Lun, D.; Arheimer, B.; Aronica, G.T.; Bilibashi, A.; et al. Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nat. Cell Biol.* **2019**, *573*, 108–111. [CrossRef] [PubMed]
- Lespinas, F.; Ludwig, W.; Heussner, S. Hydrological and climatic uncertainties associated with modeling the impact of climate change on water resources of small Mediterranean coastal rivers. *J. Hydrol.* **2014**, *511*, 403–422. [CrossRef]
- Thirel, G.; Andréassian, V.; Perrin, C. On the need to test hydrological models under changing conditions. *Hydrol. Sci. J.* **2015**, *60*, 1165–1173. [CrossRef]
- Insee—Statistiques Locales—Indicateurs: Cartes, Données et Graphiques. Available online: [https://statistiques-locales.insee.fr/#c=indicator&i=pop\\_legales.popmun\\_&s=2017&view=map2](https://statistiques-locales.insee.fr/#c=indicator&i=pop_legales.popmun_&s=2017&view=map2) (accessed on 30 September 2020).
- Durand, Y.; Giraud, G.; Brun, E.; Mérindol, L.; Martin, E. A computer-based system simulating snowpack structures as a tool for regional avalanche forecasting. *J. Glaciol.* **1999**, *45*, 469–484. [CrossRef]
- Durand, Y.; Brun, E.; Merindol, L.; Guyomarc'h, G.; Lesaffre, B.; Martin, E. A meteorological estimation of relevant parameters for snow models. *Ann. Glaciol.* **1993**, *18*, 65–71. [CrossRef]
- Quintana-Seguí, P.; Le Moigne, P.; Durand, Y.; Martin, E.; Habets, F.; Baillon, M.; Canellas, C.; Franchistéguy, L.; Morel, S. Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France. *J. Appl. Meteorol. Clim.* **2008**, *47*, 92–107. [CrossRef]
- Cartridge Database. Vinyl Engine. Available online: [https://www.vinylengine.com/cartridge\\_database.php](https://www.vinylengine.com/cartridge_database.php) (accessed on 30 September 2020).
- Vidal, J.; Martin, E.; Franchistéguy, L.; Baillon, M.; Soubeyroux, J.M. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *Int. J. Clim.* **2010**, *30*, 1627–1644. [CrossRef]
- Fournier, F. *Climat et Érosion*; Presses Universitaires de France: Paris, France, 1960; p. 201.
- Walsh, R.P.D.; Lawler, D.M. Rainfall seasonality: Description, spatial patterns and change through time. *Weather* **1981**, *36*, 201–208. [CrossRef]
- McKee, T.B. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology, Anaheim, CA, USA, 17–22 January 1993.
- Vicente-Serrano, S.M.; Beguería, S.; López-Moreno, J.I. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *J. Clim.* **2010**, *23*, 1696–1718. [CrossRef]
- Tsakiris, G.; Pangalou, D.; Vangelis, H. Regional Drought Assessment Based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resour. Manag.* **2007**, *21*, 821–833. [CrossRef]
- Chapter 2—FAO Penman-Monteith Equation. Available online: <http://www.fao.org/3/X0490E/x0490e06.htm> (accessed on 30 July 2020).
- Venkataraman, K.; Nelson, M.; Frandsen, C. Comparison of Two Temperature-Based Methods of Estimating Potential Evapotranspiration (PET) in Texas. *World Environ. Water Resour. Congr. 2016* **2016**, 699–708. [CrossRef]
- Oudin, L.; Hervieu, F.; Michel, C.; Perrin, C.; Andréassian, V.; Anctil, F.; Loumagne, C. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model?: Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling. *J. Hydrol.* **2005**, *303*, 290–306. [CrossRef]
- Folton, N.; Lavabre, J. Approche par modélisation PLUIE-DEBIT pour la connaissance régionale de la ressource en eau: Application à la moitié du territoire français. *Houille Blanche* **2007**, *3*, 64–70. [CrossRef]
- Hydroweb. Available online: <http://www.hydro.eaufrance.fr/> (accessed on 30 September 2020).

- Quintana-Seguí, P.; Ribes, A.; Martin, E.; Habets, F.; Boé, J. Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of Mediterranean basins. *J. Hydrol.* **2010**, *383*, 111–124. [CrossRef]
- Quintana Seguí, P.; Martin, E.; Habets, F.; Noilhan, J. Improvement, calibration and validation of a distributed hydrological model over France. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2009**, *13*, 163–181. [CrossRef]
- Sadaoui, M.; Ludwig, W.; Bourrin, F.; Romero, E. The impact of reservoir construction on riverine sediment and carbon fluxes to the Mediterranean Sea. *Prog. Oceanogr.* **2018**, *163*, 94–111. [CrossRef]
- Ludwig, W.; Dumont, E.; Meybeck, M.; Heussner, S. River discharges of water and nutrients to the Mediterranean and Black Sea: Major drivers for ecosystem changes during past and future decades? *Prog. Oceanogr.* **2009**, *80*, 199–217. [CrossRef]
- Copernicus Land Monitoring Service. Corine Land Cover (CLC). Available online: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover> (accessed on 31 July 2020).
- Acces-Donnees|BNPE. Available online: <https://bnpe.eaufrance.fr/acces-donnees> (accessed on 21 October 2020).
- Chiffres et Analyses|Agreste, la Statistique Agricole. Available online: <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/irrigation/5b74baf2-991c-41ae-a920-02217b25d182/search/> (accessed on 9 July 2020).
- The Climate Data Guide. NDVI: Normalized Difference Vegetation Index-3rd Generation: NASA/GFSC GIMMS*; National Center for Atmospheric Research Staff, 2018; Available online: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/ndvi-normalized-difference-vegetation-index-3rd-generation-nasagfsc-gimms> (accessed on 20 December 2020).
- Mann, H.B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica* **1945**, *13*, 245–259. [CrossRef]
- Kendall, M.G. Rank correlation methods. *Econometrica* **1948**, *25*, 181–183. [CrossRef]
- Sen, P.K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *J. Am. Stat. Assoc.* **1968**, *63*, 1379–1389. [CrossRef]
- Kundzewicz, Z. *Detecting Trend and Other Changes in Hydrological Data*; World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland, 2000.
- Fathian, F.; Dehghan, Z.; Bazrkar, M.H.; Eslamian, S. Trends in hydrological and climatic variables affected by four variations of the Mann-Kendall approach in Urmia Lake basin, Iran. *Hydrol. Sci. J.* **2016**, *61*, 892–904. [CrossRef]
- Ali, R.; Kuriqi, A.; Abubaker, S.; Kisi, O. Long-Term Trends and Seasonality Detection of the Observed Flow in Yangtze River Using Mann-Kendall and Sen's Innovative Trend Method. *Water* **2019**, *11*, 1855. [CrossRef]
- Pearson, E.S. The Test of Significance for the Correlation Coefficient. *J. Am. Stat. Assoc.* **1931**, *26*, 128–134. [CrossRef]
- Garcia-Esteves, J.; Ludwig, W.; Kerhervé, P.; Probst, J.-L.; Lespinas, F. Predicting the impact of land use on the major element and nutrient fluxes in coastal Mediterranean rivers: The case of the Têt River (Southern France). *Appl. Geochem.* **2007**, *22*, 230–248. [CrossRef]
- Ruf, T. Droits d'eau et institutions communautaires dans les Pyrénées-Orientales. *Hist. Soc. Rural.* **2001**, *16*, 11–44. [CrossRef]
- AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014—IPCC. Available online: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/> (accessed on 12 October 2020).
- Occitanie, D. DONNÉES. Available online: <https://draaf.occitanie.agriculture.gouv.fr/DONNEES> (accessed on 15 October 2020).
- Spadoni, G.L.; Cavalli, A.; Congedo, L.; Munafò, M. Analysis of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) multi-temporal series for the production of forest cartography. *Remote Sens. Appl. Soc. Environ.* **2020**, *20*, 100419. [CrossRef]
- Townshend, J.R.G.; Justice, C. Analysis of the dynamics of African vegetation using the normalized difference vegetation index. *Int. J. Remote Sens.* **1986**, *7*, 1435–1445. [CrossRef]

- Khorchani, M.; Nadal-Romero, E.; Tague, C.; Lasanta, T.; Zabalza, J.; Lana-Renault, N.; Domínguez-Castro, F.; Choate, J. Effects of active and passive land use management after cropland abandonment on water and vegetation dynamics in the Central Spanish Pyrenees. *Sci. Total Environ.* **2020**, *717*, 137160. [CrossRef]
- Juez, C.; Peña-Angulo, D.; Khorchani, M.; Regués, D.; Nadal-Romero, E. 20-years of hindsight into hydrological dynamics of a mountain forest catchment in the Central Spanish Pyrenees. *Sci. Total Environ.* **2020**, 142610. [CrossRef]
- Susskind, J.; Schmidt, G.A.; Lee, J.N.; Iredell, L. Recent global warming as confirmed by AIRS. *Environ. Res. Lett.* **2019**, *14*, 044030. [CrossRef]
- Piervitali, E.; Colacino, M.; Conte, M. Rainfall over the Central-Western Mediterranean basin in the period 1951–1995. Part I: Precipitation trends. *Nuovo Cim.* **1998**, *21*, 331–344. Available online: <http://www.sif.it/riviste/ncc/econtents/1998/021/03/article/1> (accessed on 18 October 2020).
- Valdes-Abellan, J.; Pardo, M.; Tenza-Abril, A.J. Observed precipitation trend changes in the western Mediterranean region. *Int. J. Clim.* **2017**, *37*, 1285–1296. [CrossRef]
- Romano, E.; Petrangeli, A.B.; Preziosi, E. Spatial and Time Analysis of Rainfall in the Tiber River Basin (Central Italy) in relation to Discharge Measurements (1920–2010). *Procedia Environ. Sci.* **2011**, *7*, 258–263. [CrossRef]
- Lorenzo-Lacruz, J.; Serrano, S.M.V.; López-Moreno, J.I.; Morán-Tejeda, E.; Zabalza, J. Recent trends in Iberian streamflows (1945–2005). *J. Hydrol.* **2012**, 463–475. [CrossRef]
- López-Moreno, J.I.; Vicente-Serrano, S.M. Atmospheric circulation influence on the interannual variability of snow pack in the Spanish Pyrenees during the second half of the 20th century. *Hydrol. Res.* **2007**, *38*, 33–44. [CrossRef]
- Martínez-Fernández, J.; Sánchez, N.; Herrero-Jiménez, C.M. Recent trends in rivers with near-natural flowregime. *Prog. Phys. Geogr. Earth Environ.* **2013**, *37*, 685–700. [CrossRef]
- Lespinas, F. Impacts du Changement Climatique sur L’hydrologie des Fleuves Côtiers en Region Languedoc-Roussillon. Ph.D. Thesis, University of Perpignan, Perpignan, France, 2008. Available online: <https://www.theses.fr/2008PERP1261> (accessed on 2 November 2020).
- Creed, I.F.; Hwang, T.; Lutz, B.; Way, D. Climate warming causes intensification of the hydrological cycle, resulting in changes to the vernal and autumnal windows in a northern temperate forest. *Hydrol. Process.* **2015**, *29*, 3519–3534. [CrossRef]
- Ludwig, W.; Bouwman, A.F.; Dumont, E.; Lespinas, F. Water and nutrient fluxes from major Mediterranean and Black Sea rivers: Past and future trends and their implications for the basin-scale budgets. *Glob. Biogeochem. Cycles* **2010**, *24*. [CrossRef]
- Afzal, M.; Ragab, R. Assessment of the potential impacts of climate change on the hydrology at catchment scale: Modelling approach including prediction of future drought events using drought indices. *Appl. Water Sci.* **2020**, *10*, 1–19. [CrossRef]
- Schulz, S.; Darehshouri, S.; Hassanzadeh, E.; Tajrishy, M.; Schüth, C. Climate change or irrigated agriculture—What drives the water level decline of Lake Urmia. *Sci. Rep.* **2020**, *10*, 816–821. [CrossRef] [PubMed]
- Gudmundsson, L.; Tallaksen, L.M.; Stahl, K.; Clark, D.B.; Dumont, E.; Hagemann, S.; Bertrand, N.; Gerten, D.; Heinke, J.; Hanasaki, N.; et al. Comparing Large-Scale Hydrological Model Simulations to Observed Runoff Percentiles in Europe. *J. Hydrometeorol.* **2012**, *13*, 604–620. [CrossRef]
- Thompson, J.R.; Gavin, H.; Refsgaard, A.; Sørensen, H.R.; Gowing, D.J.G. Modelling the hydrological impacts of climate change on UK lowland wet grassland. *Wetl. Ecol. Manag.* **2009**, *17*, 503–523. [CrossRef]
- Petelet-Giraud, E.; Luck, J.-M.; Ben Othman, D.; Negrel, P. Dynamic scheme of water circulation in karstic aquifers as constrained by Sr and Pb isotopes. Application to the Hérault watershed, Southern France. *Hydrogeol. J.* **2003**, *11*, 560–573. [CrossRef]

**Publisher’s Note:** MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

© 2020 by the author(s). Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



## Annexes du Chapitre III

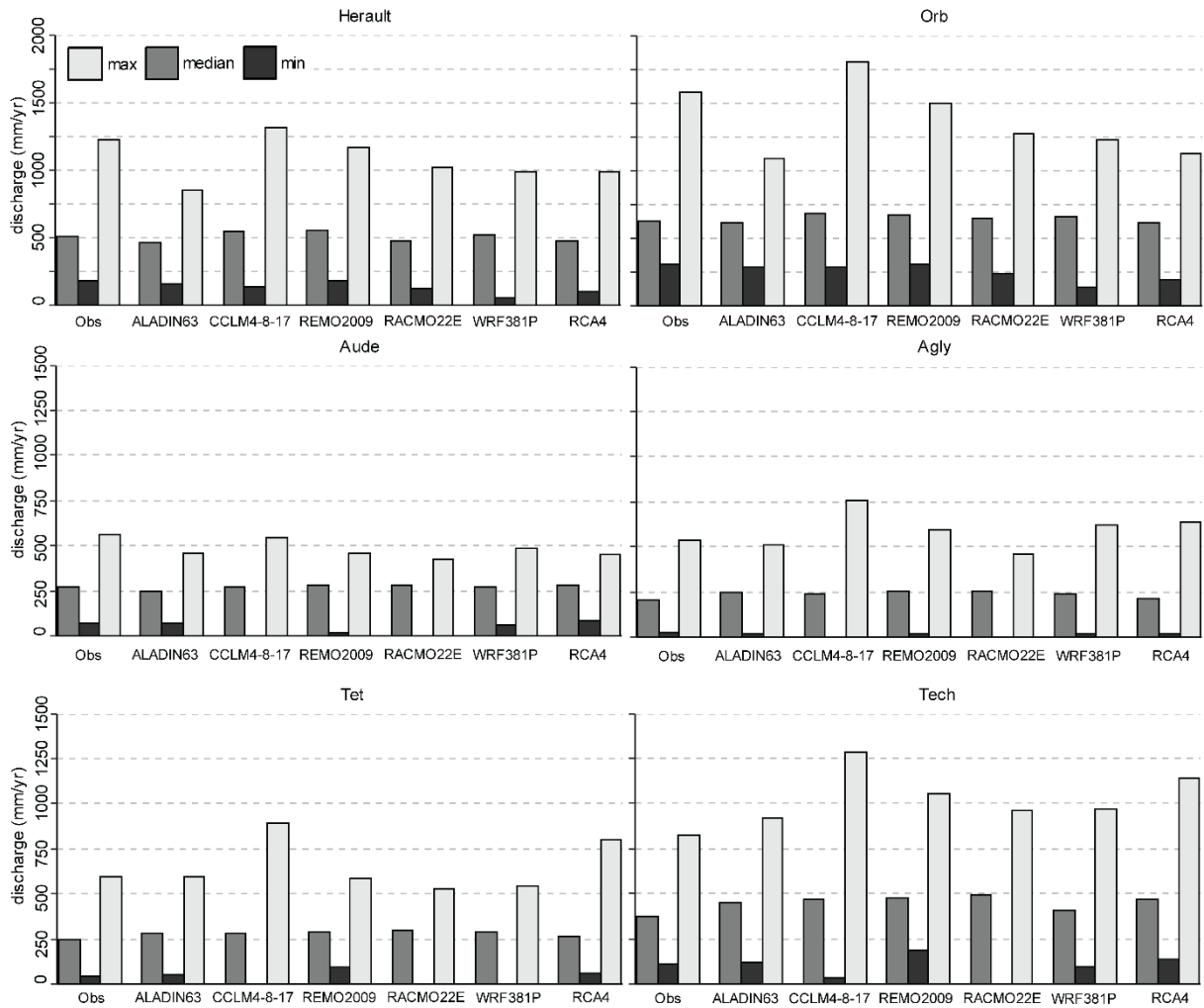


Figure S 1: Comparison of the statistical characteristics of the simulated water discharge series for the period 1959-2005 obtained from RCMs and from Safran's variables (Obs). Light, mid, and dark grey bars are the maximum (max), median, and minimum (min), respectively, obtained throughout the series

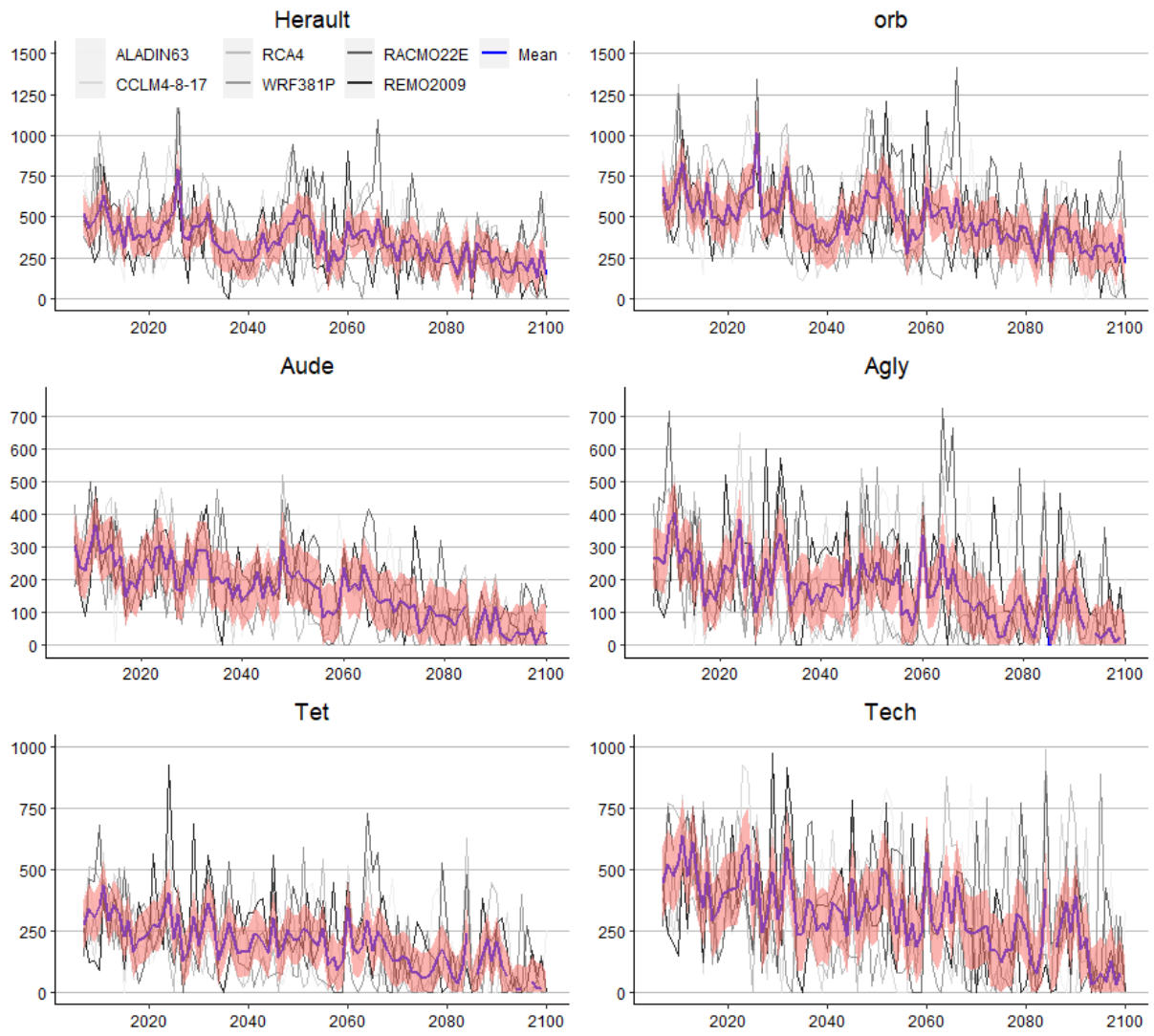


Figure S 2: Annual  $Q_{mod}$  on the period 2006-2100 for each RCMs. Blue line shows the ensemble mean series (Mean), and pink shade is the associated standard deviation error

## Annexes du Chapitre IV

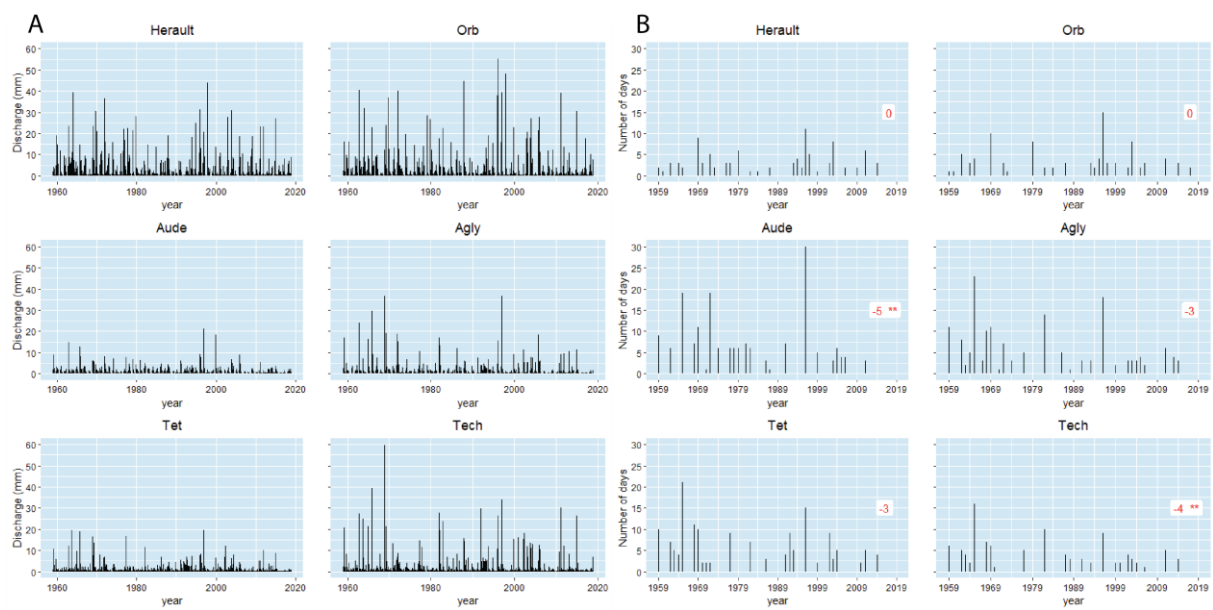


Figure S 3 Détection des crues par la variable modélisées de drainage total (ruissellement + infiltration par Isba) A) Série temporelle des maximums mensuels B) Tendence linéaire de Mann-Kendall du nombre de jours annuel dépassant le 95<sup>ème</sup> centile sur la période 1959-2018

## **Changements climatiques et hydrologiques en Méditerranée nord-occidentale: évolutions au cours des 60 dernières années, pour le 21ème siècle, et impacts sur l'activité viticole**

### **Résumé**

Cette thèse a pour objectif de mieux comprendre les changements climatiques et hydrologiques qui ont affecté la bordure méditerranéenne de la région Occitanie (France) sur les 60 dernières années et plus particulièrement à échelle des six bassins versants majeurs qui drainent la région et s'écoulent dans le Golfe du Lion. Dans un premier temps, elle se focalise sur les liens reliant climat et ressource en eau dans les six bassins versants côtiers qui sont du Nord au Sud, l'Hérault, l'Orb, l'Aude, l'Agly, la Têt et le Tech. Pour cela, un modèle statistique multi-paramètre a été utilisé et combine des données à la fois climatiques, hydrologiques et d'activités anthropiques. Les résultats majeurs qui en ressortent sont un contrôle du climat sur l'évolution de la quantité d'eau écoulée au sein des bassins versants qui est dominant par rapport à l'évolution des pressions anthropiques sur la ressource en eau. Un article associé à ce premier travail a pu être publié en 2020. Dans un deuxième temps, cette thèse s'intéresse aux évolutions possibles climatiques et hydrologiques pour la finalité 2100 et un sous un scénario climatique extrême. Dans cette partie, les relations entre climat et circulation atmosphérique générale sont explorées. Les résultats montrent que les bassins versants qui composent la zone d'étude montrent des relations distinctes avec les indices de la circulation atmosphérique, notamment atlantiques et méditerranéens. Cela a pour conséquence une évolution climatique et hydrologique différente d'ici la fin du siècle : les bassins versants situés sur la partie orientale de la zone d'étude sont davantage influencés par les indices méditerranéens alors que ceux situés sur la partie occidentale sont davantage influencés par les indices atlantiques. Un second article centré sur cette étude a été soumis au journal Hydrology and Earth System Science. Un autre volet de cette thèse analyse les possibles impacts des changements climatiques sur l'activité agricole majeure de la zone d'étude qui est la viticulture. Pour cela, un travail en amont d'étude de l'évolution des extrêmes climatiques sur la période historique est réalisé. Les résultats de ce travail montrent des augmentations du nombre et intensité des événements extrêmes de températures incontestables, en revanche peu de changements sont observés pour les extrêmes de précipitations. Un ensemble d'indices bioclimatiques dépendants du paramètre de température est alors utilisé pour explorer l'évolution de la viabilité des activités viticoles dans la région sur la période historique.

## **Climate and hydrological changes in the North-Western Mediterranean: evolutions over the last 60 years, for the 21st century and impacts on the vineyard activity**

### **Abstract**

The aim of this work is to better understand the climatic and hydrological changes that have affected the Mediterranean side of the Occitanie region (France) over the last 60 years. And more particularly at the scale of the six major watersheds that drain the region and flow into the Gulf of Lion. First, it focuses on the links between climate and water resources in the six coastal watersheds which are, from North to South, the Hérault, Orb, Aude, Agly, Têt and Tech watersheds. For this, a multi-parameter statistical model was used and combines climatic, hydrological and anthropogenic data. The results show that climate is the major driver for the detected decreasing trends of the water resources. An article associated with this first work was published in 2020 in the journal Water. In a second stage, this thesis investigates the evolution of climate and hydrological parameters for the end of the 21<sup>st</sup> century and under a worst-case scenario. The relationships between the climate and the overall atmospheric circulation are discussed. The results show that the watersheds show distinct relationships with the indices of the atmospheric circulation, particularly Atlantic and Mediterranean. This results in a different climatic and hydrological evolution by the end of the century: the watersheds located in the eastern part of the study area are more influenced by the Mediterranean indices while those located in the western part are more influenced by the Atlantic indices. A second paper based on this study was submitted to the journal Hydrology and Earth System Science. Another part of this thesis analyzes the possible impacts of climate change on the major agricultural activity of the study area, which is the vineyard activity. For this purpose, a first study of the evolution of climatic extremes over the historical period was carried out. The results of this work show increases in the number and intensity of extreme temperature events, but little change in extreme rainfall. A set of bioclimatic indices dependent on the temperature parameter is then used to explore the potential viability of the vineyard activities in the region over the historical period.

### **Mots clés**

Changement Climatique, Ressource en eau, Viticulture, Extrême climatiques  
Climate Change, Water resources, Vineyard activities, Extreme events