Changement climatique et ressource en eau en région Occitanie

Passé, Présent, Futur

Client SPL ARPE MIDI-PYRENEES	✉ 14, rue de Tivoli, 3100 Toulouse @ bedel.c@arpe-mip.com ✆ +33 5 34 31 97 44	

Responsable commercial : Jean BONHOMME	@ jean.bonhomme@meteo.fr ✆ +33 4 67 20 91 37	
Responsable technique : Yves BIDET	@ yves.bidet@meteo.fr ✆ +33 4 42 95 90 75	

— page laissée intentionnellement vide -

Table des matières

1 Impact présent et passé du changement climatique....8
1.1 Données utilisées....8
1.1.1 Description d'une Longue Série Homogénéisée (LSH)....8
1.1.2 Description d'une Série Quotidienne de Référence (SQR)....8
1.1.3 Séries disponibles sur la région Occitanie....9
1.1.4 la chaîne SIM....9
1.1.5 la chaîne SAFRAN/CROCUS....11
1.2 Indicateurs de précipitations....11
1.2.1 P_R1 : Cumul moyen de précipitations....13
1.2.2 P_R2 : Nombre de jours de précipitations....16
1.2.3 P_R3 : Nombre de jours de fortes précipitations....17
1.2.4 P_R4 : Pourcentage du territoire en sécheresse météorologique....18
1.3 Indicateurs de températures....21
1.3.1 P_T1 & P_T2 : Températures minimales et maximales....22
1.3.2 P_T3 : Nombre de jours chauds....25
1.4 Indicateurs d'humidité des sols....26
1.4.1 P_HU1 : Humidité des sols (SWI)....26
1.4.2 P_HU2 : Pourcentage du territoire en sécheresse agricole (SSWI)....27
1.5 Indicateur neige P_NEIGE....31
1.6 SYNTHESE : EVOLUTION OBSERVEE DE LA RESSOURCE EN EAU SUR LA REGION OCCITANIE....35
2 Impact futur du changement climatique....36
2.1 Données utilisées....36
2.2 Indicateurs de précipitations....38
2.2.1 F_R1 : Cumul moyen de précipitations....40
anomalies du cumul annuel moyen de précipitation....40
anomalies du cumul moyen de précipitation de septembre à mars....41
anomalies du cumul moyen de précipitation de juin à octobre....42
2.2.2 F_R2 : Nombre de jours de précipitations....43
anomalies du nombre de jours par an avec précipitations supérieures à 1 mm. .43
2.2.3 F_R3 : Nombre de jours de fortes précipitations....44
2.2.4 F_R4 : Sécheresses météorologiques (SPI)....45
SPI sur l'année....45
SPI en hiver....48
SPI au printemps....49
SPI en été....50
SPI en automne....51
2.3 Indicateurs de températures....52
2.3.1 F_T1 : Températures minimales....54
anomalies de la température minimale moyenne....54
anomalies de la température minimale moyenne pendant la période de recharge (septembre à mars)....55
anomalies de la température minimale moyenne pendant la période d'étiage (juin à octobre)....56
2.3.2 F_T2 : Températures maximales....57

anomalies de la température maximale moyenne.....57
anomalies de la température maximale moyenne pendant la période de recharge (septembre à mars).....58
anomalies de la température maximale moyenne pendant la période d'étiage (juin à octobre).....59
2.3.3 F_T3 : Nombre de jours chauds.....60
anomalies du nombre annuel de jours chauds.....60
anomalies du nombre annuel de jours chauds pendant la période de recharge (septembre à mars).....61
anomalies du nombre annuel de jours chauds pendant la période d'étiage (juin à octobre).....62
2.4 Indicateurs d'humidité des sols.....63
2.4.1 P_HU1 : Humidité des sols (SWI).....63
2.4.2 P_HU2 : Evolution de la sécheresse agricole (SSWI).....63
SSWI sur l'année.....63
SSWI en hiver.....67
SSWI au printemps.....68
SSWI en été.....69
SSWI en automne.....70
2.5 Indicateur neige P_NEIGE.....71
2.6 SYNTHESE : PROJECTIONS SUR L'EVOLUTION DE LA RESSOURCE EN EAU SUR LA REGION OCCITANIE.....76

Évolutions successives

Référence	Date	Version	Évolution
Changement climatique en région Occitanie	27/10/16	V1	Création

Intervenants

	Nom	Service
Rédacteur(s)	Didier GRIMAL Jean-Michel SOUBEYROUX Olivier ROULLE	DIRSO/EC DCSC DIRSE/EC
Relecteur(s)	Yves BIDET	DIRSE/EC
Approbateur(s)	Jean-Michel SOUBEYROUX	DCSC

Glossaire

Abréviation	Signification
SWE	Snow Water Equivalent ou équivalent en eau de la neige. C'est la quantité d'eau qui serait obtenue en faisant fondre une quantité de neige donnée. Elle s'exprime généralement en kg/m² et elle est calculée en multipliant l'épaisseur de la neige (en m) par sa densité (kg/m³). Elle peut aussi s'exprimer en m si on la calcule en multipliant l'épaisseur de la couche par la densité de la neige et en divisant le résultat par la densité de l'eau liquide (kg/m³).
BTU	Chair of Environmental Meteorology, Brandenburg Universiity of Technology, Cottbus, Allemagne
DWD	Deutscher Wetterdienst, Offenbach, Allemagne
ETHZ	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Suisse
UCD	Meteorology and Climate Centre, School of Mathematical Sciences, University College Dublin, Irlande
WEGC	Wegener Center for Climate and Global Change, University of Graz, Autriche

RCM	Regional Climate Model, modèle de climat d'échelle régionale
GCM	Global Climate Model, modèle de climat d'échelle globale (couvrant toute la Terre)
SIM	SAFRAN-ISBA-MODCOU, chaîne de modélisation hydrométéorologique permettant entre autres le calcul des indices SPI et SSWI
SPI	Standardized Precipitation Index. Indice développé par Mc Kee et al en 1993 et basé sur la distribution des précipitations. Cet indice peut être calculé sur différentes périodes : 1, 3, 6 et 12 mois. Un SPI supérieur à 0 met en évidence un excédent de précipitation, un SPI inférieur à 0, une période de déficit. L'indice étant normalisé, sa valeur peut être directement liée à une durée de retour. Ainsi, une valeur de l'indice inférieure à -1,28 correspond à un déficit de durée de retour supérieure à 10 ans.
SWI	Soil Wetness Index, indice d'humidité des sol permettant d'évaluer les sécheresses agricoles. Il est défini comme suit : $$SWI = \frac{W - W_{wilt}}{W_{fc} - W_{wilt}}$$ où W est le contenu intégré en eau du sol, W_{wilt} le contenu en eau au point de flétrissement et W_{fc} le contenu en eau du sol à la capacité au champ.
SSWI	Standardized Soil Wetness Index. Cet indice est calculé à partir du contenu en eau du sol, il caractérise les sécheresses agricoles. Cet indice peut être calculé sur différentes périodes : 1, 3, 6 et 12 mois. Un SSWI supérieur à 0 met en évidence un excédent d'humidité dans le sol, un SSWI inférieur à 0, une période de déficit. L'indice étant normalisé, sa valeur peut être directement liée à une durée de retour. Ainsi, une valeur de l'indice inférieure à -1,28 correspond à un déficit de durée de retour supérieure à 10 ans.
Crocus	modèle numérique unidimensionnel fondé sur la thermodynamique simulant le bilan d'énergie et de matière du manteau neigeux.

1 Impact présent et passé du changement climatique

1.1 Données utilisées

Pour les indicateurs ayant trait aux précipitations et aux températures nous utilisons préférentiellement des séries homogénéisées (LSH) (Gibelin et al, 2014) et des Séries Quotidiennes de Référence (SQR) (Moisselin et al, 2006) et notamment les séries présentées dans l'application climat HD.

Pour les indicateurs d'impact (sécheresse et neige), les données utilisées proviennent de la réanalyse des modèles SIM et Safran/Crocus conformément au projet ClimSec (Soubeyroux et al, 2012) et aux travaux du CEN (Durand et al, 2009).

1.1.1 Description d'une Longue Série Homogénéisée (LSH)

Plusieurs causes peuvent affecter l'homogénéité des séries de mesure :

- changement d'emplacement du site de mesure ;
- changement de capteur ;
- modification de l'environnement du capteur ;
- changement du mode de calcul.

Ces changements peuvent entraîner des ruptures du même ordre de grandeur que le signal climatique que l'on cherche à caractériser : prendre les séries telles quelles sans contrôle ou correction peut conduire à des conclusions erronées.

Il existe au pas de temps mensuel des méthodes d'homogénéisation permettant de corriger les ruptures et les séries ainsi homogénéisées apparaissent comme les données les plus aptes pour caractériser les évolutions climatiques.

L'homogénéisation s'appuie sur des similitudes de comportement entre séries voisines à l'échelle mensuelle.

1.1.2 Description d'une Série Quotidienne de Référence (SQR)

On ne peut pas appliquer directement les coefficients correcteurs de l'homogénéisation de la série mensuelle aux données quotidiennes.

On utilise cependant le travail de diagnostic pour la constitution des longues séries de données homogénéisées (agrégation de postes, contrôle, homogénéisation), pour retenir les séries de données quotidiennes ne présentant pas de rupture au pas de temps mensuel.

Pour répondre au besoin de l'ARPE nous travaillerons sur la période 1961-2012 qui offre

le plus grand nombre de séries exploitables.

1.1.3 Séries disponibles sur la région Occitanie

Sur la période 1961-2012 nous disposons de 138 séries homogénéisées de précipitations pour l'indicateur P_R1, et de respectivement 25 séries homogénéisées de températures minimales et 26 séries homogénéisées de températures maximales pour le calcul des indicateurs P_T1 et P_T2.

> *Remarque : pour un point de mesure il n'y a pas toujours une série de température minimale associée à une série de température maximale car pour ce paramètre les ruptures peuvent être d'origines différentes (un bâtiment proche peut avoir de l'influence sur les températures maximales et pas sur les températures minimales par exemple) et l'homogénéisation n'est pas toujours concluante pour l'un ou pour l'autre de ces paramètres.*

Concernant les SQR, nous avons pris les séries qui n'avaient aucune rupture en homogénéisation sur la période 1961-2012. Nous disposons ainsi de 50 séries pour le calcul des indicateurs P_R2 et P_R3 et de 11 séries pour le calcul de l'indicateur P_T3.

1.1.4 la chaîne SIM

La chaîne de modélisation hydro-météorologique SAFRAN-ISBA-MODCOU (SIM) est développée depuis plusieurs années au Centre de Recherches de Météo-France, en partenariat avec l'UMR-Sisyphe et l'Ecole des Mines de Paris. Depuis 2003, elle est activée en temps réel et de façon opérationnelle à Météo-France. Cet outil permet de réaliser un suivi quotidien temps réel des différentes composantes du cycle de l'eau continental (des précipitations à l'eau du sol et au manteau neigeux, jusqu'aux débits des rivières et au niveau des nappes), ainsi que d'en obtenir une climatologie sur une longue période (1958-2009).

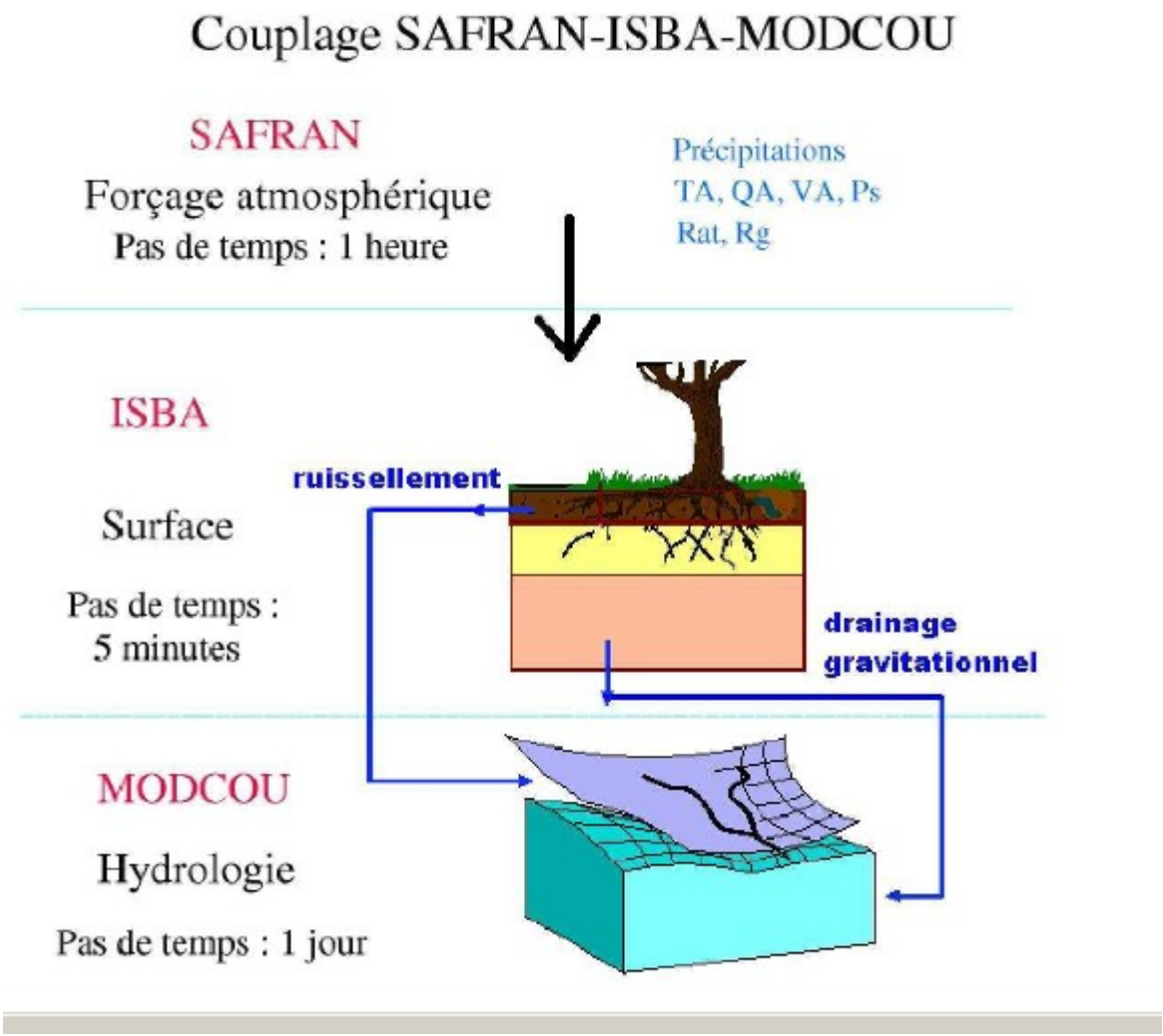


Illustration 1: Schéma simplifié de la chaîne de modélisation SAFRAN-ISBA-MODCOU

Les données de cette chaîne sont calculées sur une grille couvrant la France métropolitaine de résolution 8 km x 8 km.

Parmi les indices calculés par cette chaîne, se trouvent l'indice SPI (Standardized Precipitation Index) qui ne fait intervenir que le premier modèle (SAFRAN) et le SSWI (Standardized Soil Wetness Index) qui nécessite également le modèle ISBA.

Dans ce rapport, plusieurs graphiques de SPI ou de SSWI indiquent les années en abscisse et un pourcentage en ordonnée. Ce pourcentage doit être interprété comme la proportion de points de grilles de la région Occitanie pour lesquels cet indice SPI ou SSWI vaut -1,28 ou moins, cette valeur de -1,28 correspondant à une durée de retour de 10 ans.

Cette grille SIM de 8 km x 8 km parfois appelée aussi grille SAFRAN est également utilisée pour représenter les données du futur, que ce soit les données EURO-CORDEX ou les données des divers modèles pour les indices SPI et SSWI.

1.1.5 la chaîne SAFRAN/CROCUS

La chaîne SAFRAN/CROCUS (Durand et al. 1999) développée initialement par le Centre d'Étude de la Neige (CEN) pour la prévision des risques d'avalanche, simule en temps réel les manteaux neigeux moyens décrits par leur stratigraphie verticale tous les 300 mètres d'altitude (de 900 à 3600 m), pour 6 orientations (N, E, SE, S, SO, O) et 3 pentes (0, 20°, 40°) pour 23 massifs Alpins, 15 massifs Pyrénéens et 2 massifs Corses. Cette application est opérationnelle depuis l'hiver 1995-1996 dans les Pyrénées et une réanalyse a été réalisée depuis 1981.

Dans le cadre de cette étude, le paramètre SWE (équivalent en eau du manteau neigeux) sera utilisé selon une agrégation spatiale par département.

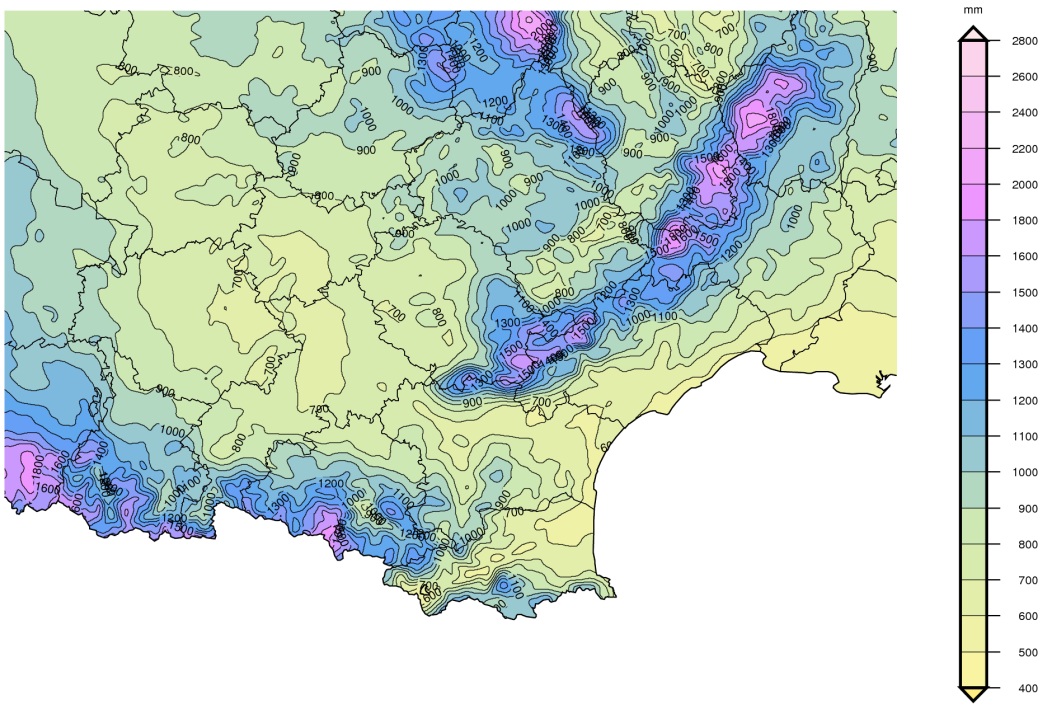
1.2 Indicateurs de précipitations

Préambule :

1. Nous avons choisi une représentation des résultats sous la forme d'une carte « pastillée ». C'est ce mode de représentation qui est communément utilisé pour illustrer les tendances du signal climatique et il a plus de sens que la spatialisation.
2. les tendances de précipitations de l'indicateur P_R1 sont exprimées en mm par décennie. Pour faciliter l'interprétation de ces résultats on pourra se reporter à l'illustration 1 qui représente la normale 1981-2010 du cumul annuel de précipitations sur la région Occitanie. Ceci permettra de relativiser l'importance de ces tendances par rapport aux cumuls recueillis en moyenne en différents points de la région.
3. La significativité des tendances a été testée par un test de Mann-Kendall. Compte tenu de la variabilité importante du paramètre précipitation nous considérons que :
   - le niveau de confiance est élevé pour une significativité supérieure à 90 %
   - le niveau de confiance est modéré pour une significativité comprise entre 80 % et 90 %
   - le niveau de confiance est faible pour une significativité inférieure à 80 %.

Moyenne annuelle de référence 1981-2010 des précipitations

Zone climatique : 3555/8129/16683/20155



Edité le : 28/09/2016 - Données du : 22/05/2012 à 12:32 UTC

Illustration 2: Moyenne annuelle de référence 1981-2010 des précipitations

1.2.1 P_R1 : Cumul moyen de précipitations

Année

En région Occitanie, les précipitations annuelles présentent une grande variabilité d'une année sur l'autre :

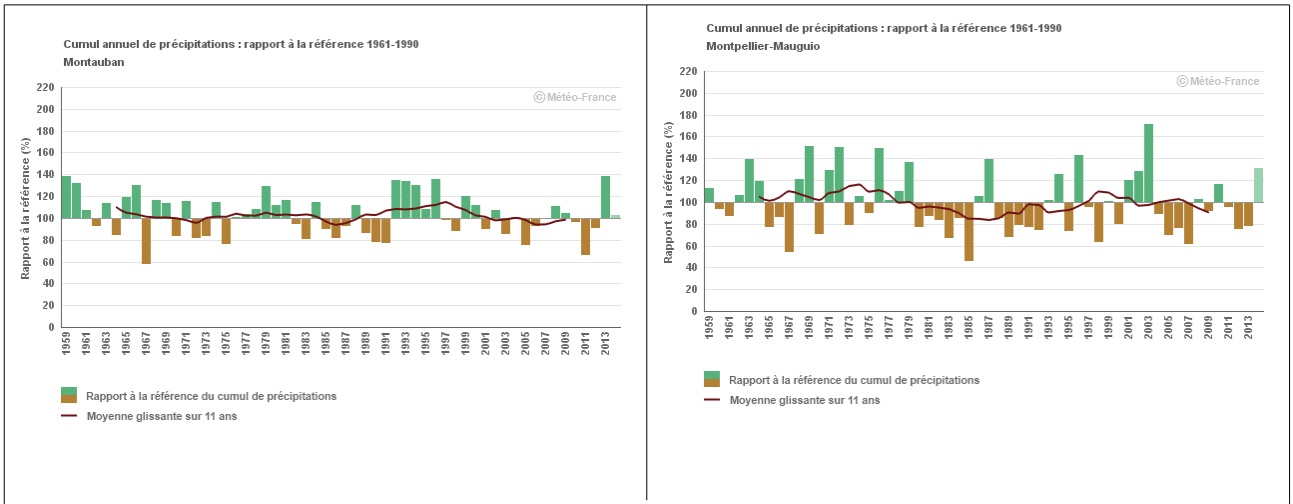


Illustration 3: Exemples de rapports à la normale de cumuls annuels de précipitations sur la région Occitanie. Séries homogénéisées sur la période 1961-2012

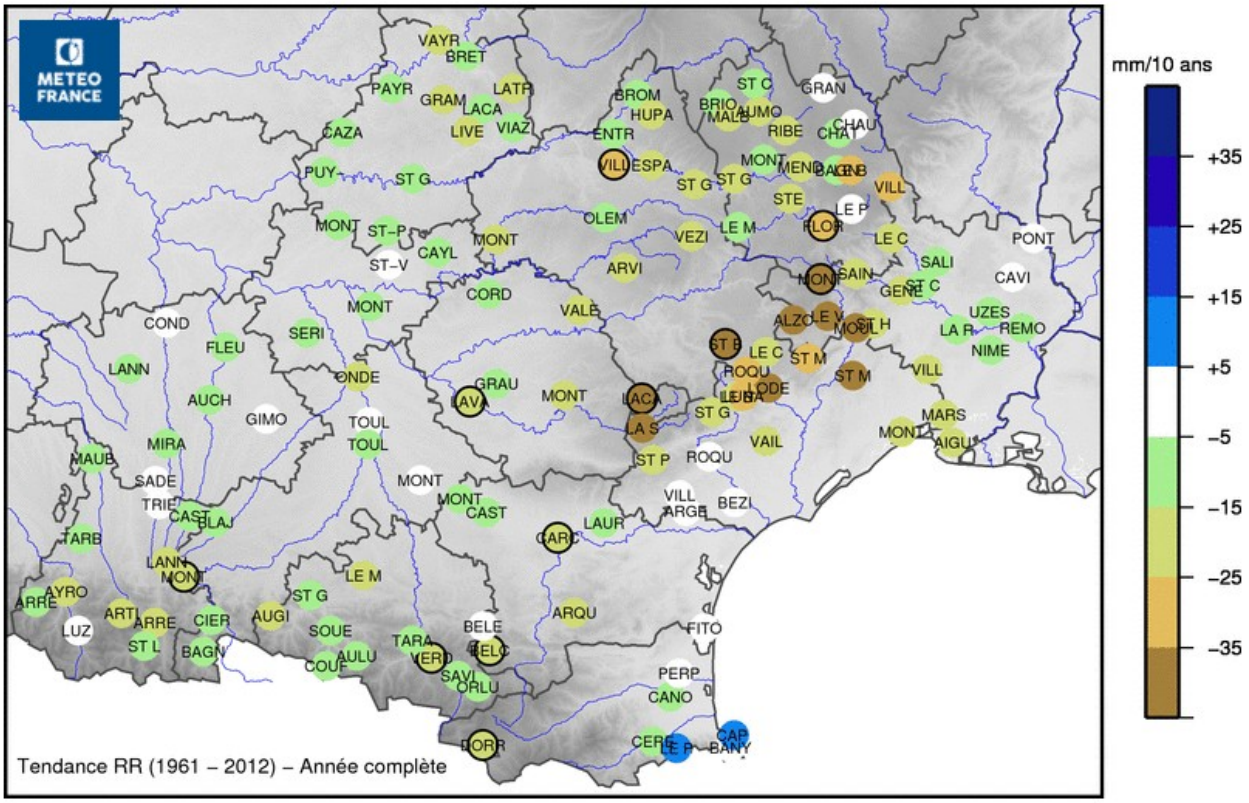


Illustration 4: Tendances des cumuls de précipitations annuelles sur la période 1961-2012. En mm tous les 10 ans

En moyenne sur la région on observe une diminution des cumuls annuels sur la période 1961-2012. Cependant, cette évolution est également sensible à la période considérée et la significativité des tendances nous montre qu'on ne peut leur accorder qu'un faible niveau de confiance.

Toutefois, pour 11 d'entre elles, situées à proximité de relief, le niveau de confiance de la tendance est élevé (cercles noirs épais sur l'illustration 2).

Les plus fortes tendances à la baisse se situent sur l'arc Cévenol avec un maximum de -70 mm/10 ans pour la station du Mont-Aigoual. Mais, en pourcentage, ces valeurs ne représentent en fait que des tendances en 10 ans de l'ordre de 3 %

Saison d'étiage (juin à octobre)

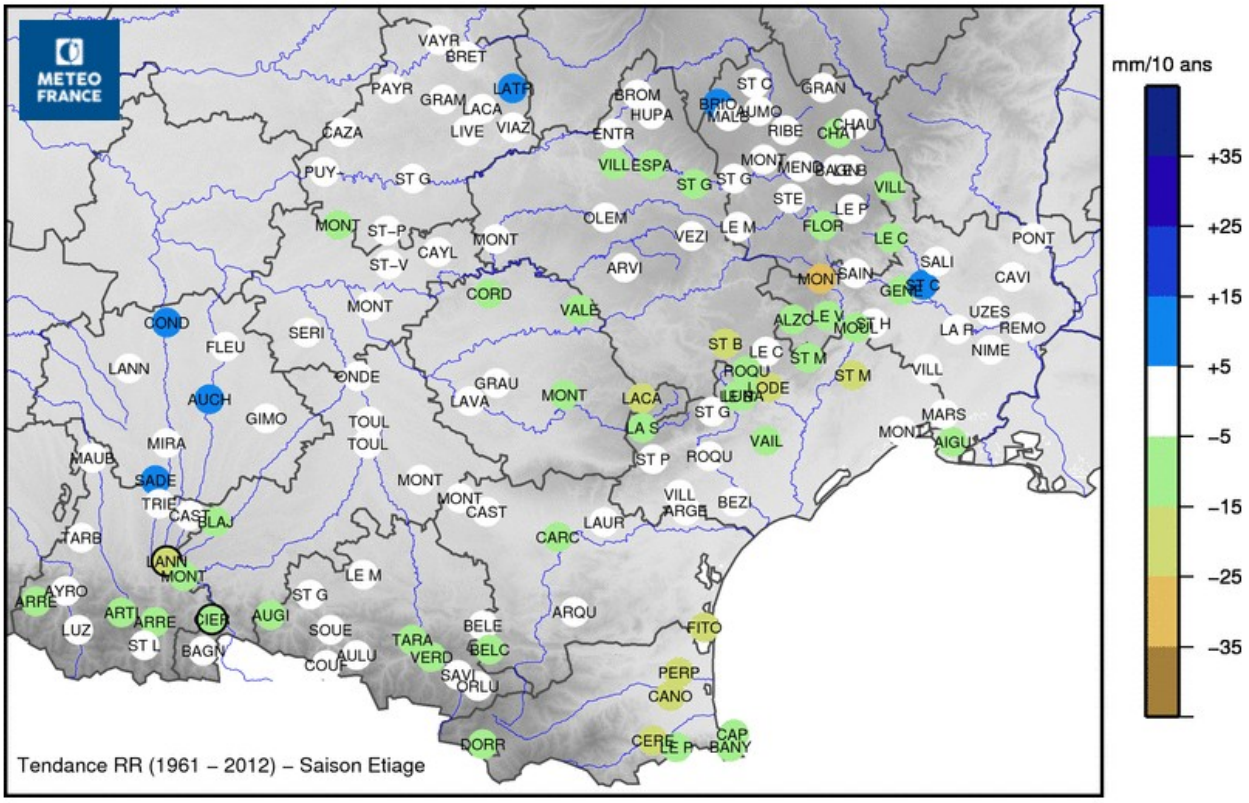


Illustration 5: Tendances des cumuls de précipitations de la saison d'étiage (juin-octobre) sur la période 1961-2012. En mm tous les 10 ans.

Sur la saison d'étiage les précipitations présentent toujours une grande variabilité d'une année sur l'autre.

Sur la période 1961-2012 on ne constate pas d'évolution des précipitations. Les tendances sont dans l'ensemble faibles et, excepté deux cas, aucune n'atteint un niveau de confiance élevé.

Saison de recharge (septembre à mars)

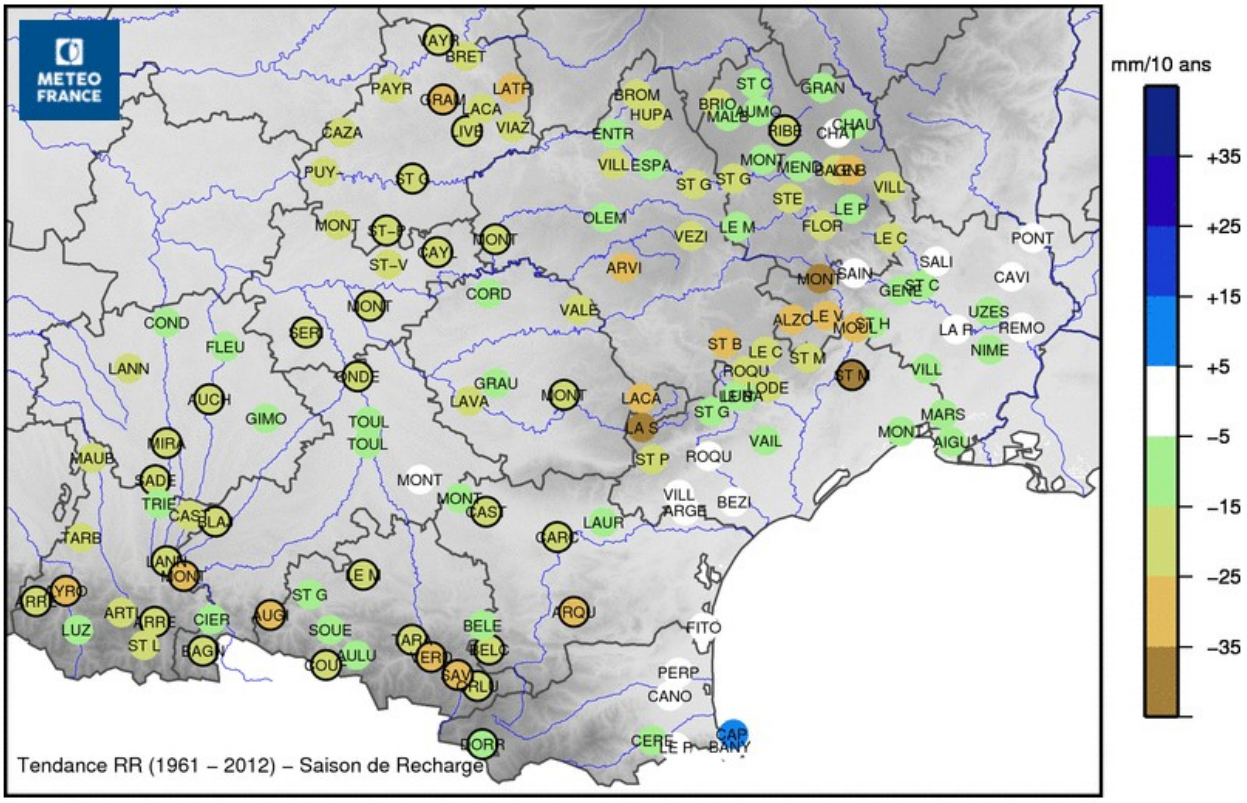


Illustration 6: Tendances des cumuls de précipitations de la saison de recharge (septembre-mars) sur la période 1961-2012. En mm tous les 10 ans.

Sur la saison de recharge, les précipitations présentent toujours une grande variabilité d'une année sur l'autre.

Toutefois, en moyenne, sur la période 1961-2012, on observe une diminution des cumuls de précipitations pour cette saison.

Si le niveau de confiance des tendances de précipitations est faible sur l'arc méditerranéen et l'Est de la région il est plus élevé sur la partie correspondant à l'ancienne région Midi-Pyrénées avec une significativité qui atteint et dépasse souvent 90 % (cercles noirs épais sur l'illustration 4).

1.2.2 P_R2 : Nombre de jours de précipitations

Année

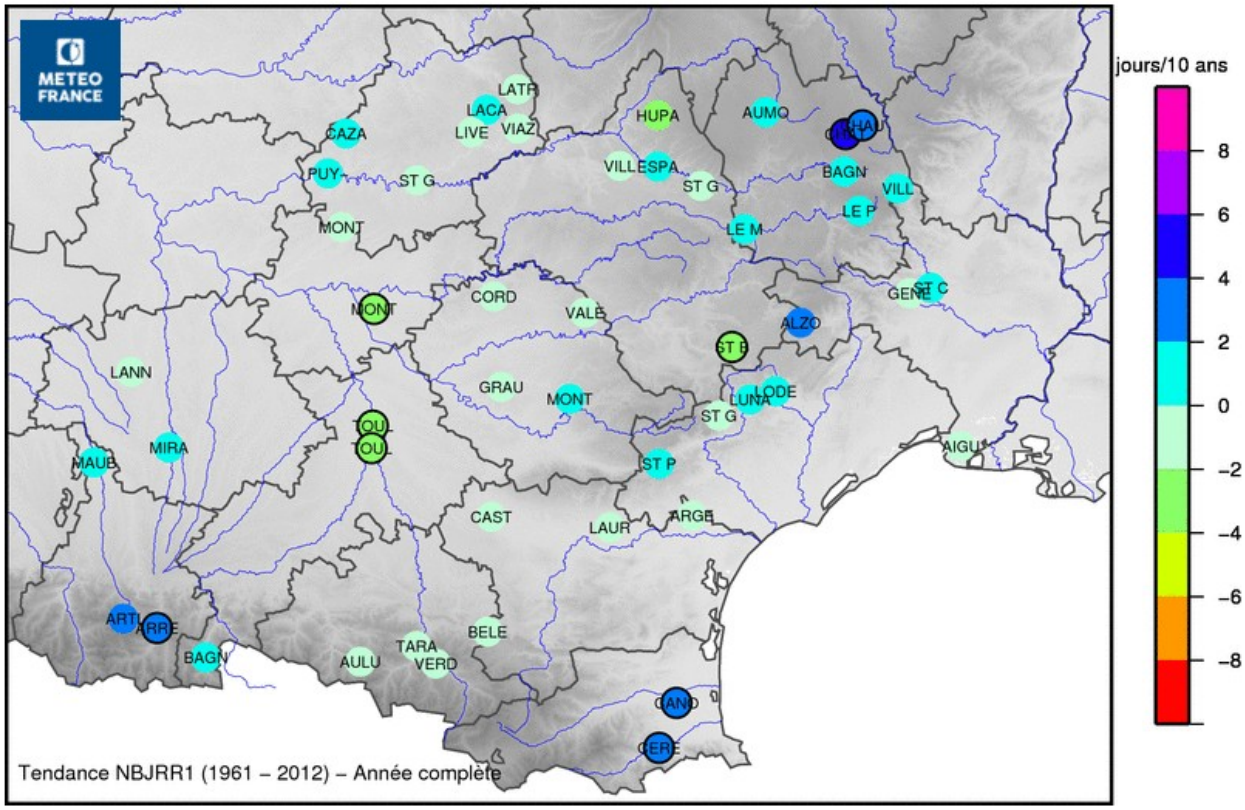


Illustration 7: Tendances du nombre de jours annuels de précipitation (RR > 1 mm) calculé sur la période 1961-2012. En nombre de jours tous les 10 ans.

Sur la région Occitanie le nombre de jour de précipitation (RR supérieure à 1 mm) ne présente par d'évolution marquée sur la période 1961-2012. Les tendances sont tantôt positives, tantôt négatives et ne sont généralement pas significatives.

1.2.3 P_R3 : Nombre de jours de fortes précipitations

Année

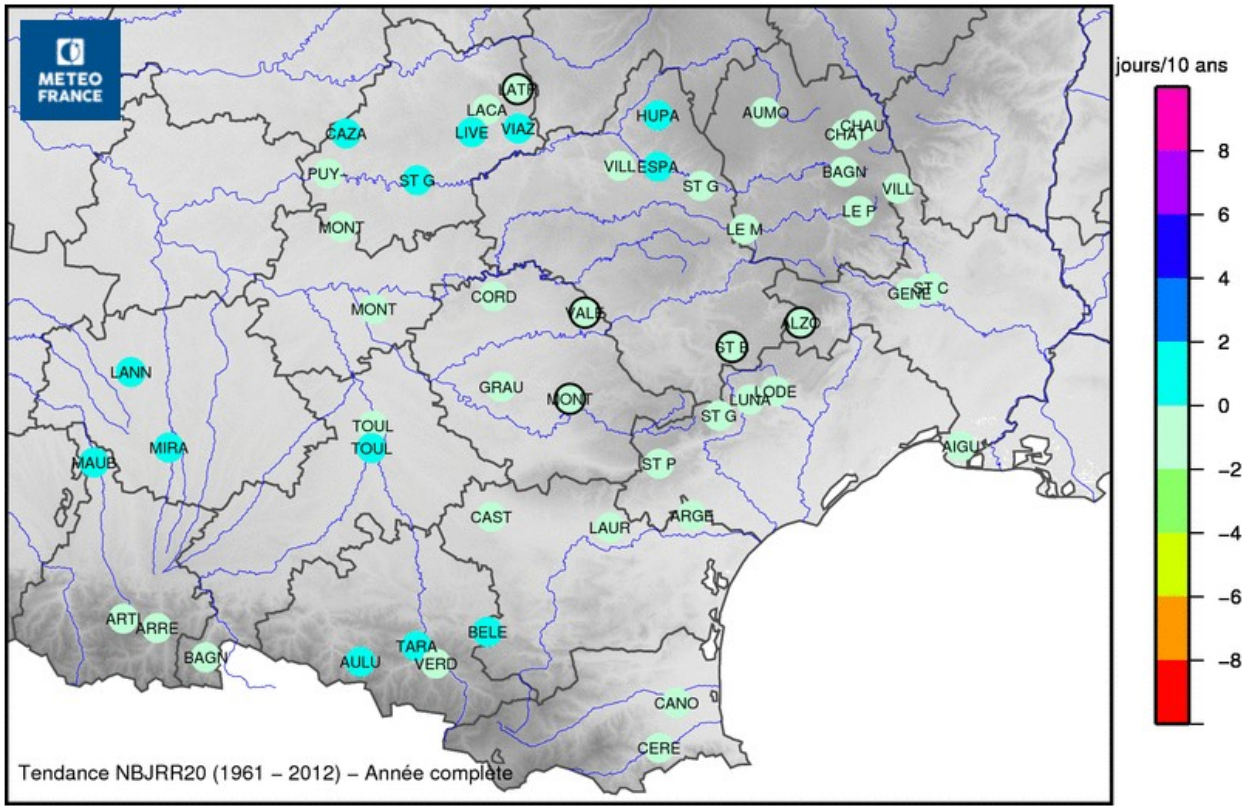


Illustration 8: Tendances du nombre de jours annuels de précipitation (RR > 20 mm) calculé sur la période 1961-2012. En nombre de jours tous les 10 ans.

Sur la région Occitanie le nombre de jour de fortes précipitations (RR supérieures à 20 mm) ne présente pas d'évolution marquée sur la période 1961-2012. Les tendances sont faibles, tantôt positives, tantôt négatives et ne sont généralement pas significatives. Toutefois, le résultat obtenu ici ne permet pas de conclure à l'absence d'effet du changement climatique sur les précipitations extrêmes notamment sur les Cévennes : des travaux en cours considérant les maximums annuels ont montré des tendances à la hausse (Vautard et al, 2015).

1.2.4 P_R4 : Pourcentage du territoire en sécheresse météorologique

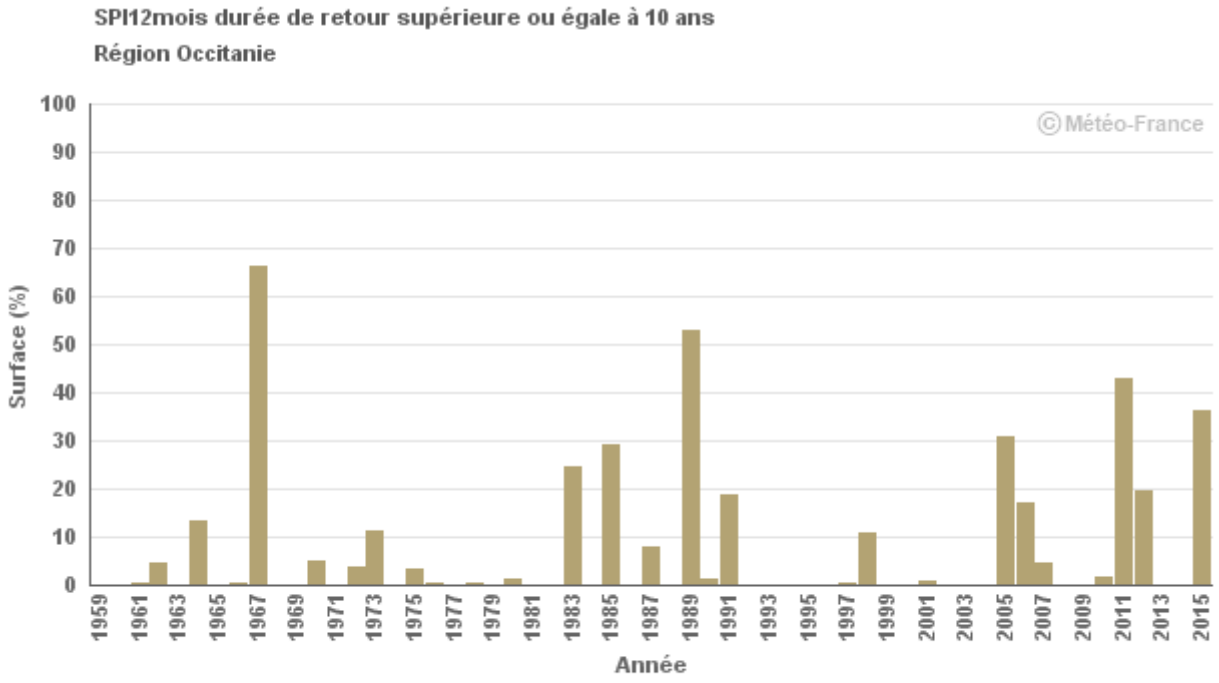


Illustration 9: Pourcentage annuel de la surface touchée par une sécheresse météorologique en région Occitanie (période 1959 – 2015)

Les sécheresses météorologiques, caractérisant le déficit de précipitation, présentent une variabilité interannuelle forte avec des années de plus forte sécheresse observées par ordre d'intensité décroissante en 1967, 1989 et 2011. Aucune tendance climatique n'apparaît dans la fréquence de ces événements au cours des 55 dernières années.

Le constat est quasi identique au pas de temps saisonnier même si les années de sécheresse maximale peuvent être différentes :

— Hiver : À noter que les hivers les plus secs se sont produits souvent sous forme de deux hivers consécutifs : 1992 et 1993, 1975 et 1976, 2011 et 2012.

— Printemps : Les années les plus sèches se sont produites en 1973, en 1997, 1967 et 2011

— Été : Les 3 étés les plus secs ont été :1962, 1986 et 2003

— Automne : Les 3 automnes les plus secs se sont produits en 1978,1985 et 2007

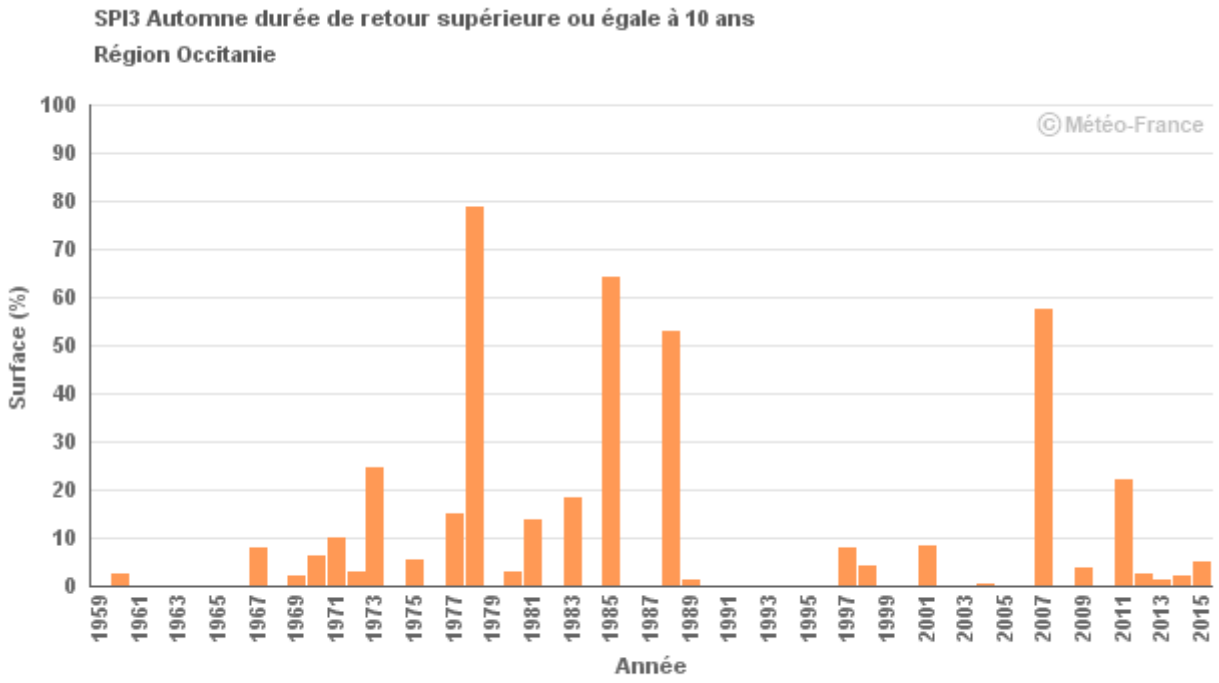


Illustration 10: Pourcentage automnal de la surface touchée par une sécheresse météorologique en région Occitanie (1959 – 2015)

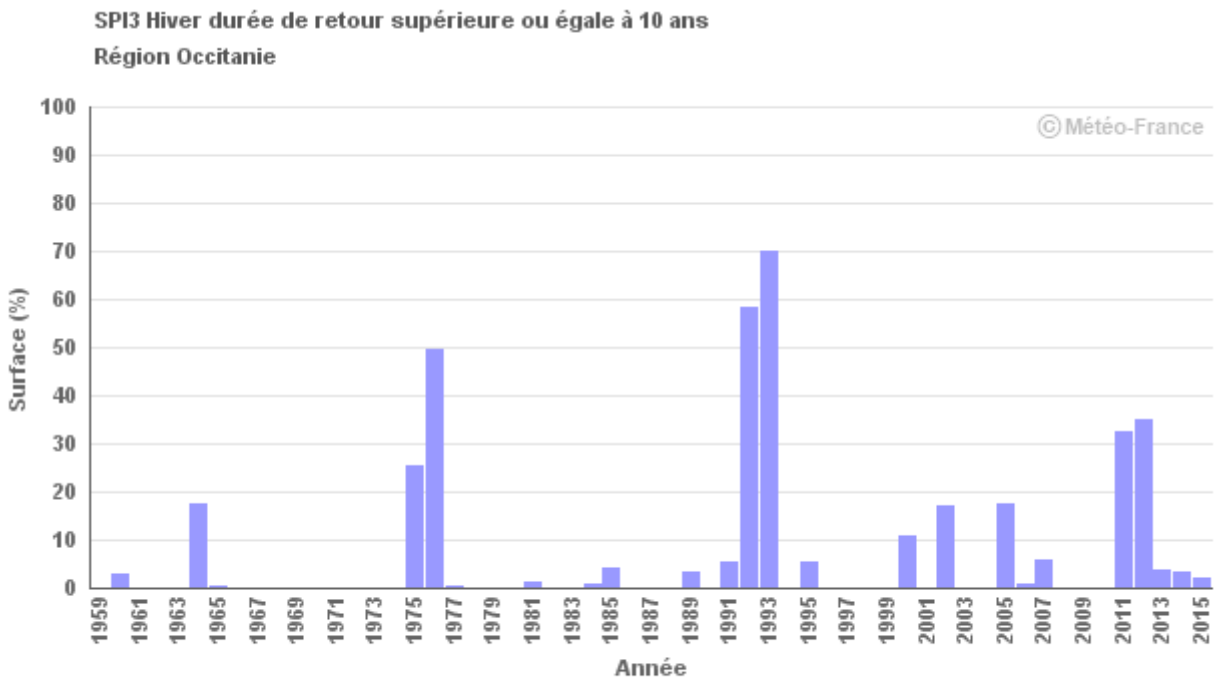


Illustration 11: Pourcentage hivernal de la surface touchée par une sécheresse météorologique en région Occitanie (1959 – 2015)

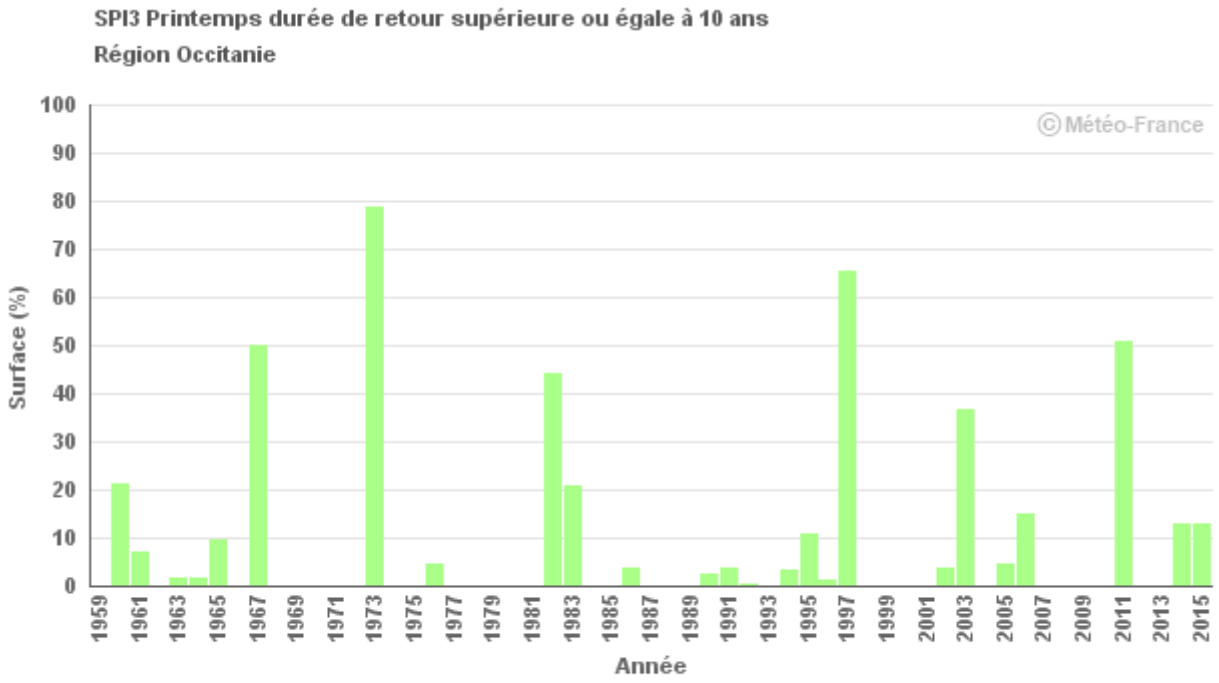


Illustration 12: Pourcentage printanier de la surface touchée par une sécheresse météorologique en région Occitanie (période 1959 – 2015)

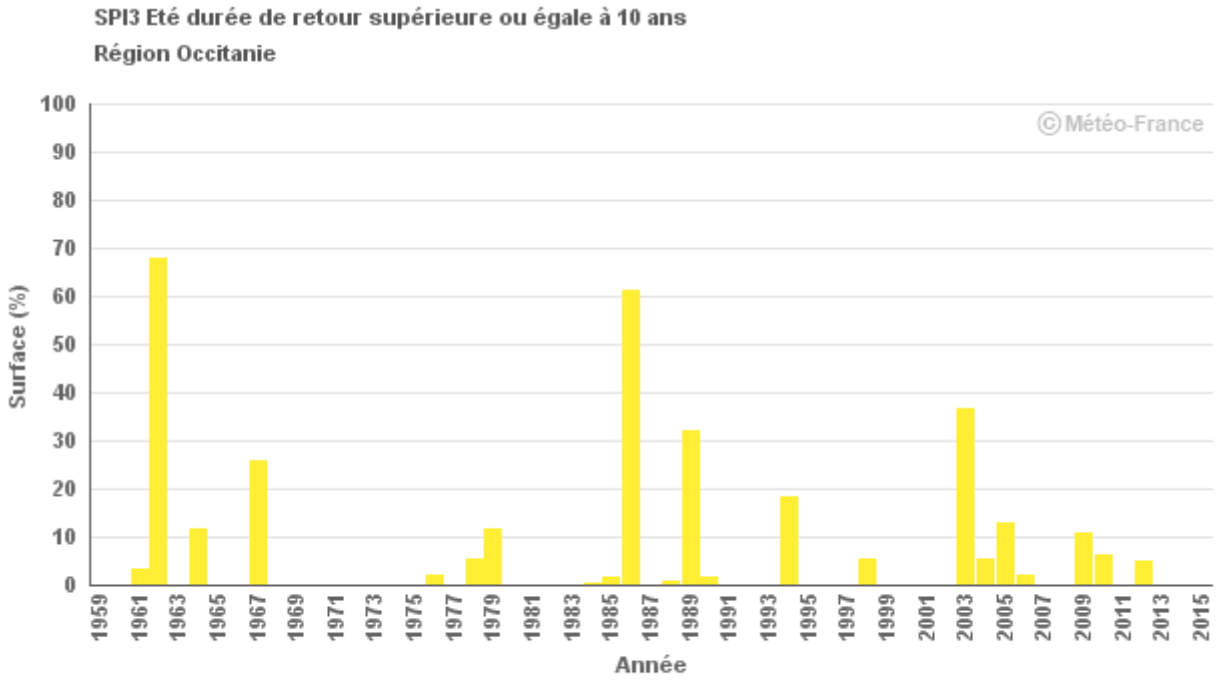


Illustration 13: Pourcentage estival de la surface touchée par une sécheresse météorologique en région Occitanie (période 1959 – 2015)

1.3 Indicateurs de températures

Préambule :

1. Nous avons choisi une représentation des résultats sous la forme d'une carte « pastillée ». C'est ce mode de représentation qui est communément utilisé pour illustrer les tendances du signal climatique et il a plus de sens que la spatialisation ;
2. Les résultats des tendances des moyennes de températures minimales et de températures maximales sont pointés sur une même carte.
   Pour les températures minimales il s'agit du 1/2 cercle gauche et pour les températures maximales du 1/2 cercle droit. Parfois, pour un point de mesure donné, la tendance n'est pas déterminée pour l'un ou l'autre de ces paramètres. Cela est dû au fait que l'homogénéisation de la série n'a pas été concluante pour le paramètre manquant.

3. La significativité des tendances a été testée par un test de Mann-Kendall. Le signal sur le réchauffement est beaucoup plus visible. Nous considérons que :

   - le niveau de confiance est élevé pour une significativité supérieure au seuil 95 %
   - le niveau de confiance est modéré pour une significativité comprise entre le seuil 85 % et le seuil 95 %
   - le niveau de confiance est faible pour une significativité inférieure au seuil 85 %.

1.3.1 P_T1 & P_T2 : Températures minimales et maximales

Année

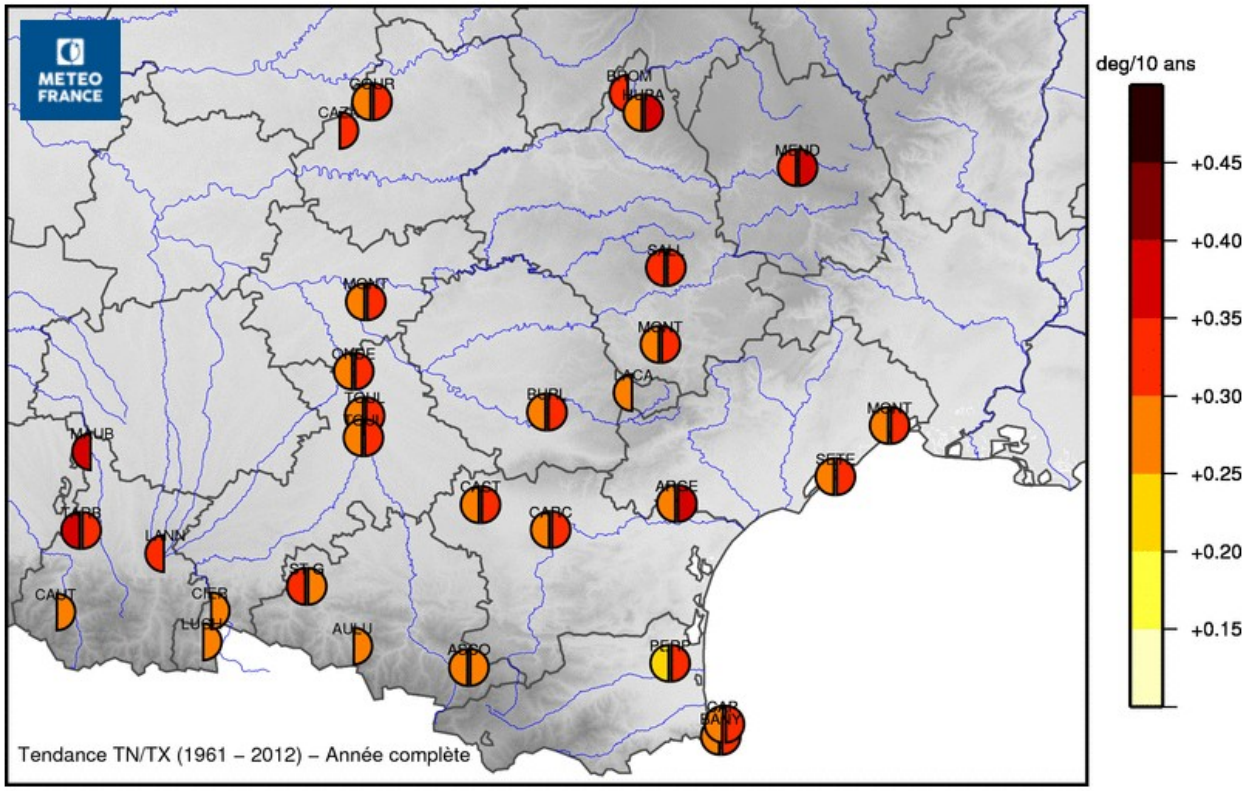


Illustration 14: Tendances des moyennes annuelles des températures minimales (1/2 cercles gauche) et températures maximales (1/2 cercle droit) calculé sur la période 1961-2012. En °C tous les 10 ans.

L'évolution des températures annuelles en Occitanie montre un net réchauffement sur la période 1961-2012. Dans l'ensemble les températures maximales se réchauffent un peu plus vite que les températures minimales. Les ordres de grandeur de l'évolution se situent entre +0,25 °C et +0,35 °C par décennie. Il faut remarquer que l'on accorde une forte confiance à ces tendances car toutes sont significatives au seuil de 95 %.

Saison d'étiage (juin à octobre)

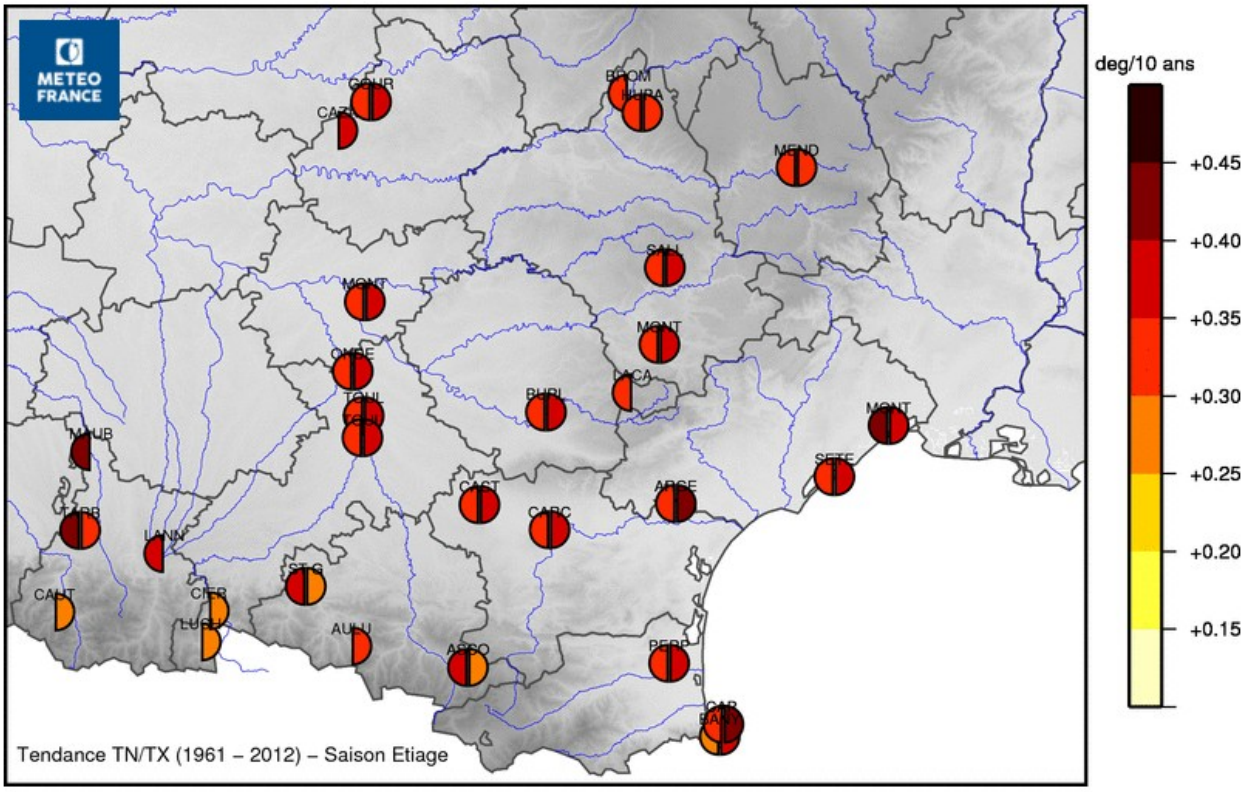


Illustration 15: Tendances des moyennes de températures minimales (1/2 cercles gauche) et températures maximales (1/2 cercle droit) pour la saison d'étiage (juin-octobre) calculé sur la période 1961-2012. En °C tous les 10 ans.

L'évolution des températures sur la saison d'étiage en Occitanie montre un net réchauffement sur la période 1961-2012. Les ordres de grandeur de l'évolution se situent entre +0,35 °C et +0,45 °C par décennie.

C'est sur cette saison que l'évolution est la plus forte. On retrouve là un des résultats déjà repérés sur les saisons classiques et qui montre que l'été (juin-août) est la saison qui se réchauffe le plus sur de nombreuses régions françaises.

Comme pour la partie annuelle le niveau de confiance de ces tendances est très élevé.

Saison de recharge (septembre à mars)

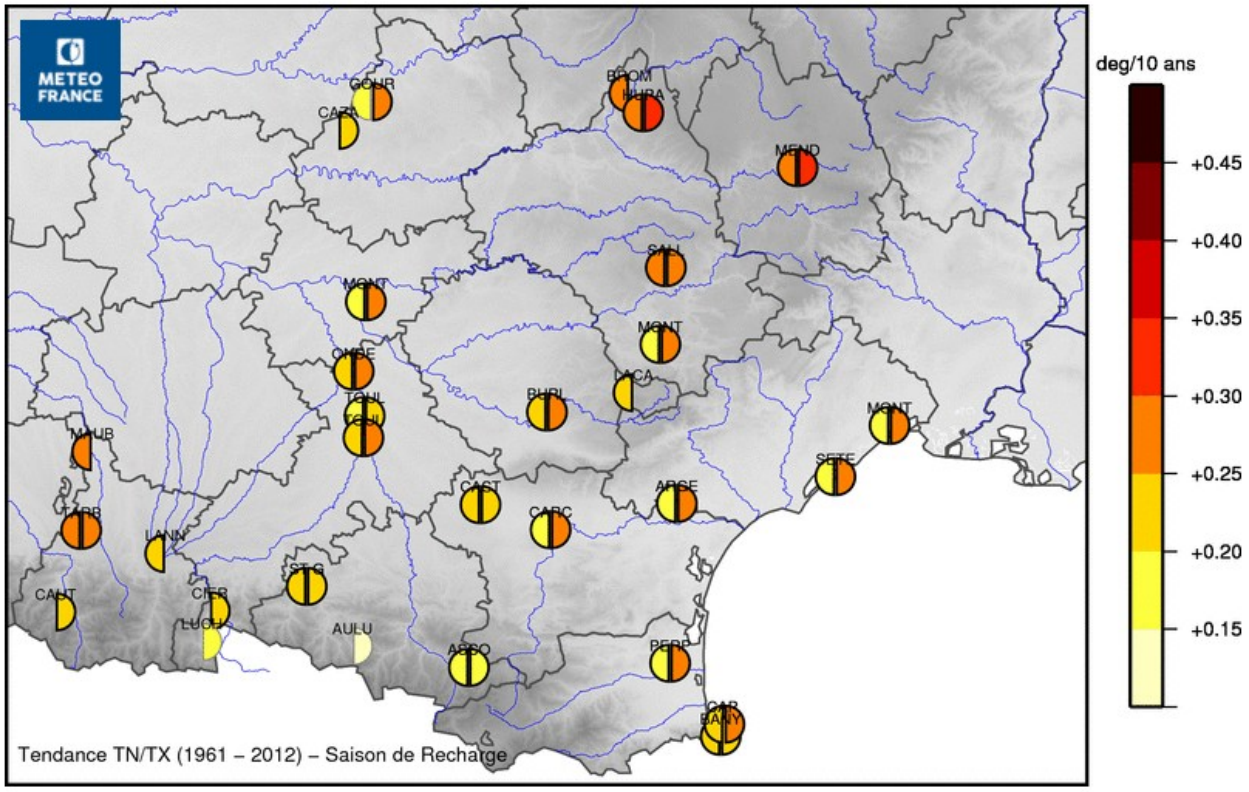


Illustration 16: Tendances des moyennes de températures minimales (1/2 cercles gauche) et températures maximales (1/2 cercle droit) pour la saison de recharge (septembre-mars) calculé sur la période 1961-2012. En °C tous les 10 ans.

L'évolution des températures sur la saison de recharge en Occitanie montre un réchauffement sur la période 1961-2012, mais de moins grande ampleur que celui de la saison d'étiage. Les ordres de grandeur de l'évolution se situent entre +0,15 °C et +0,30 °C par décennie.

On retrouve là un des résultats déjà repérés sur les saisons classiques et qui montre que l'automne et surtout l'hiver se sont réchauffé plus faiblement que le reste de l'année.

Comme pour la partie annuelle le niveau de confiance de ces tendances est très élevé.

1.3.2 P_T3 : Nombre de jours chauds

Année

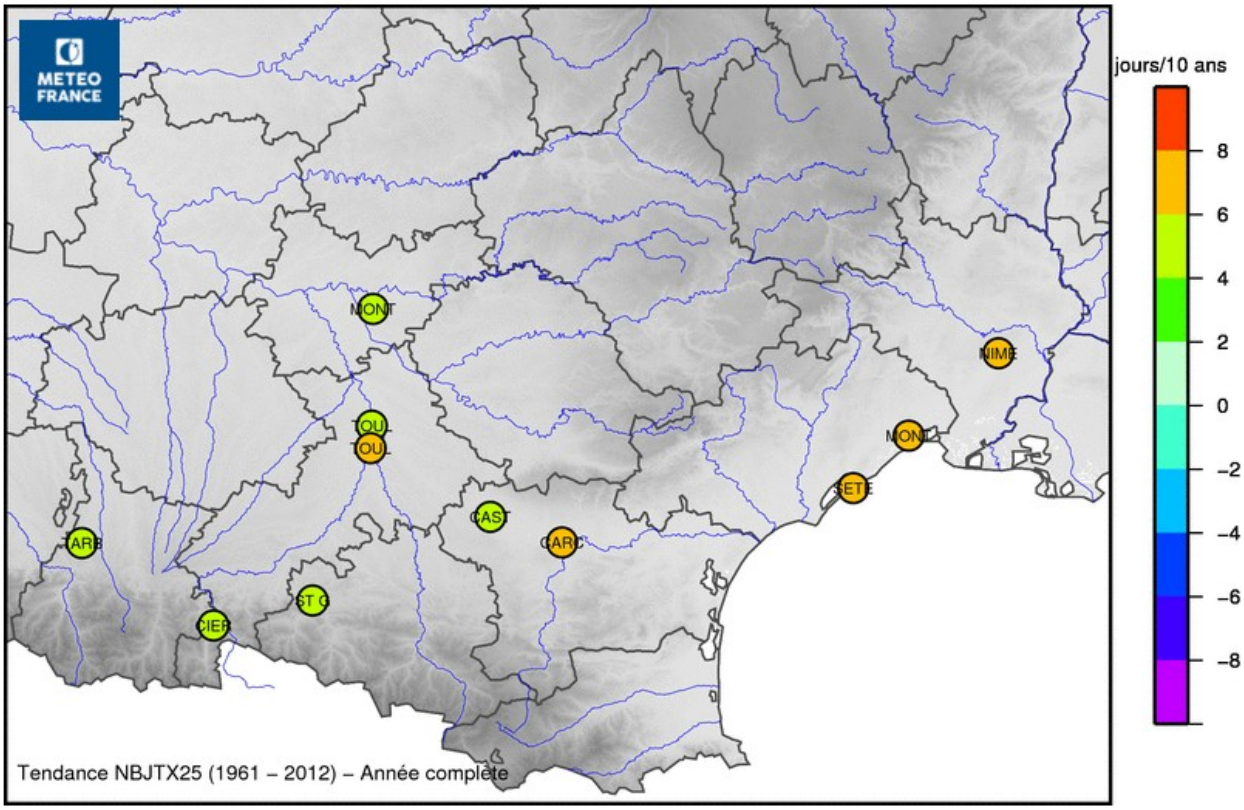


Illustration 17: Tendances du nombre annuel de jours chauds calculé sur la période 1961-2012. En nombre de jour tous les 10 ans.

Le nombre de jours chauds (TX ≥ 25 °C), influencé par la hausse des températures estivales, est en nette augmentation sur la période 1961-2012. Les tendances vont de +5 à +7 jours tous les 10 ans avec un niveau de confiance élevé. L'essentiel de l'augmentation se situe en toute logique durant la saison d'étiage (juin-octobre). Les tendances sont moins significatives sur la période de recharge

1.4 Indicateurs d'humidité des sols

1.4.1 P_HU1 : Humidité des sols (SWI)

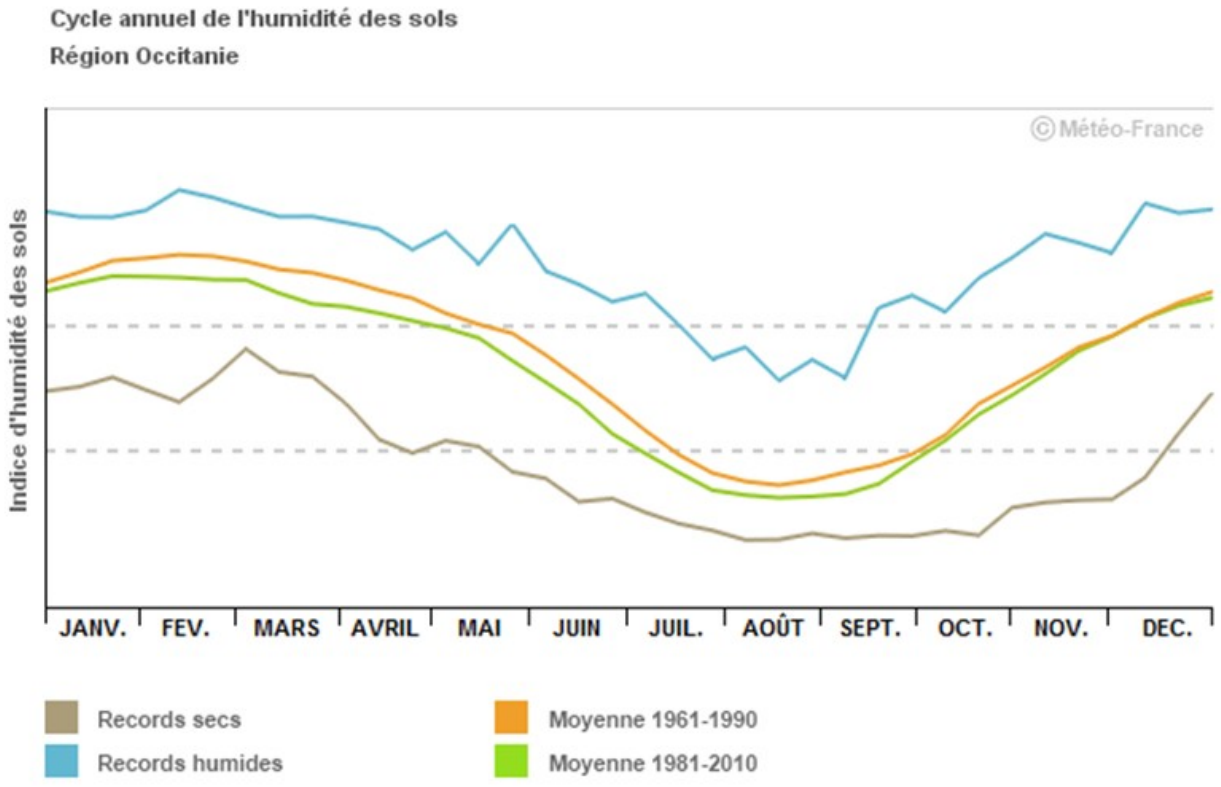


Illustration 18: Evolution du SWI annuel sur la région Occitanie (périodes 1961 – 1990 et 1981 – 2010)

Au pas de temps annuel, la diminution de l'humidité moyenne du sol entre la période 1961-1990 et la période 1981-2010 est sensible en toute saison, à l'exception de l'automne.

Cette évolution conduit à une avancée de la période estivale de sol sec d'environ une dizaine de jours en juillet et une diminution du potentiel de recharge des nappes en hiver.

1.4.2 P_HU2 : Pourcentage du territoire en sécheresse agricole (SSWI)

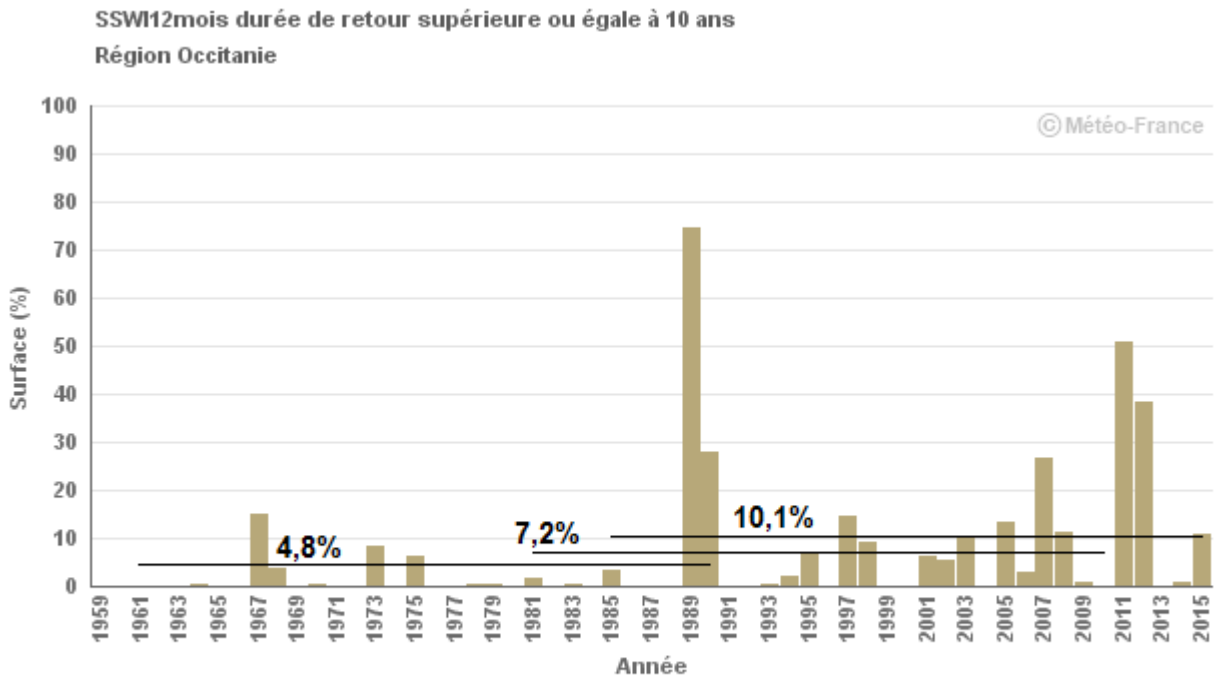


Illustration 19: Pourcentage annuel de la surface touchée par une sécheresse agricole en région Occitanie (période 1959 – 2015)

Les sécheresses agricoles ou édaphiques, caractérisant le déficit d'humidité moyenne du sol, présentent une tendance marquée à l'augmentation au cours des 55 dernières années où pour le pas de temps annuel, la moyenne trentenaire est passée de 4,8 % (période 61-90) à 7,2 % (période 1981-2010), voire 10,1 % sur la période (1985-2015).

Les années de plus forte sécheresse ont toutes été observées après 1989. Les années 2011 et 2012 se situent respectivement au 2e et 3e rang.

Le constat est quasi identique au pas de temps saisonnier (à l'exception notable de l'automne) même si les années de sécheresse maximale peuvent être différentes :

— Hiver : À noter que les hivers les plus secs se sont produits en 1989, 1990 et 2002

— Printemps : Les années les plus sèches se sont produites en 1997, 2011 et 2012

— Été : Les 3 étés les plus secs ont été :2003, 2005 et 2006

— Automne : Les 4 automnes les plus secs se sont produits en 1985, 1978, 2007 et 2011

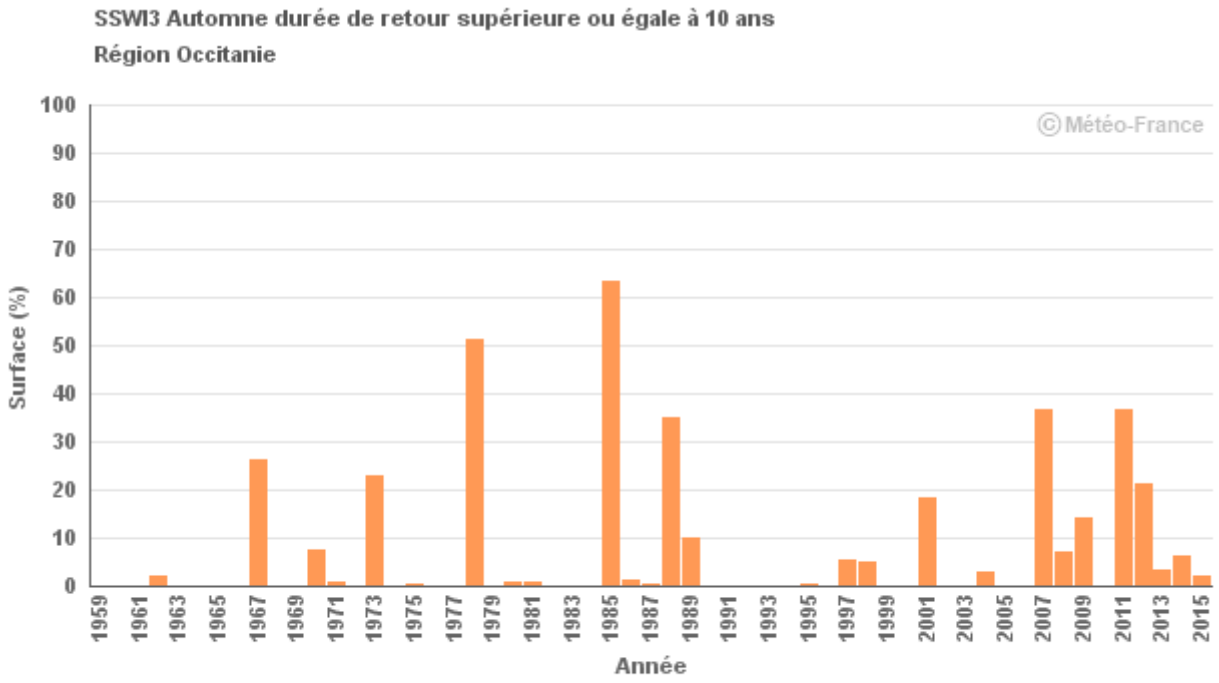


Illustration 20: Pourcentage automnal de la surface touchée par une sécheresse agricole en région Occitanie (période 1959 – 2015)

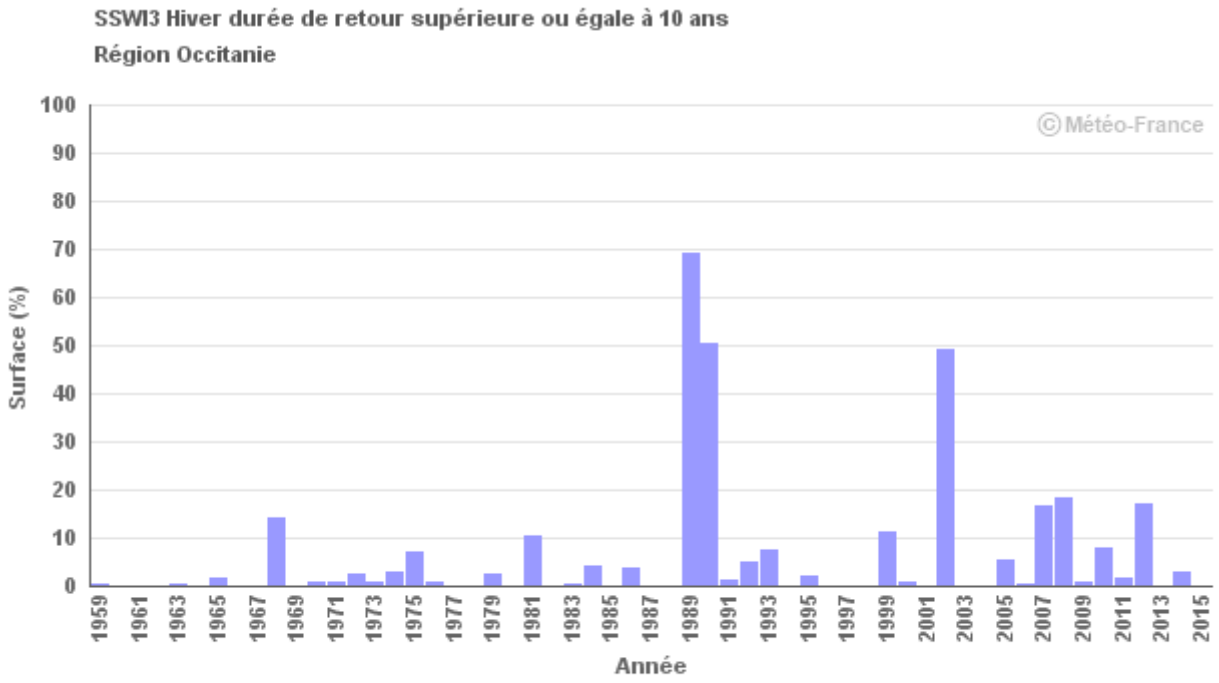


Illustration 21: Pourcentage hivernal de la surface touchée par une sécheresse agricole en région Occitanie (période 1959 – 2015)

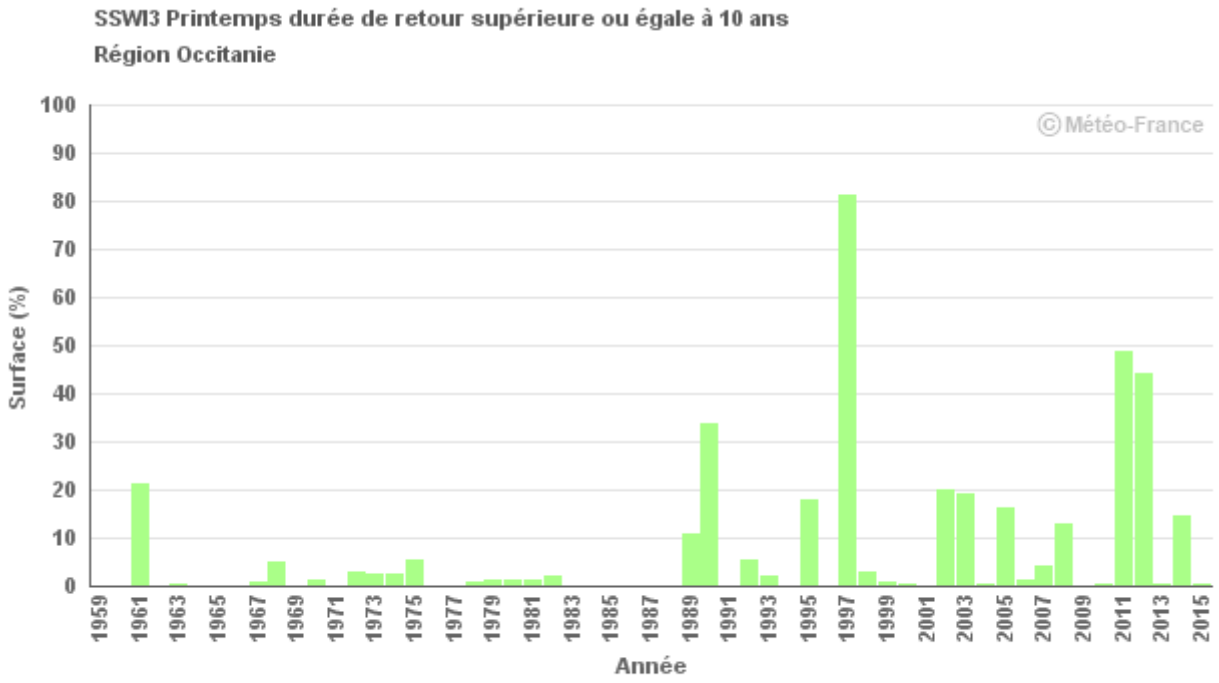


Illustration 22: Pourcentage printanier de la surface touchée par une sécheresse agricole en région Occitanie (période 1959 – 2015)

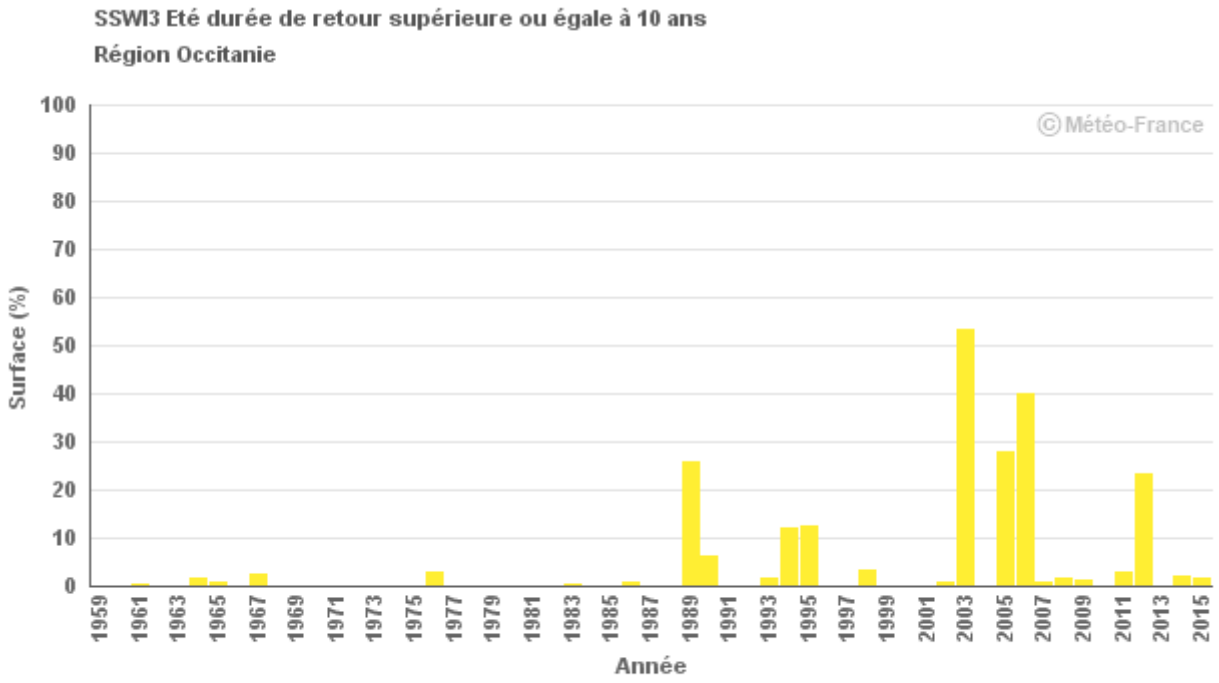


Illustration 23: Pourcentage estival de la surface touchée par une sécheresse agricole en région Occitanie (période 1959 – 2015)

1.5 Indicateur neige P_NEIGE

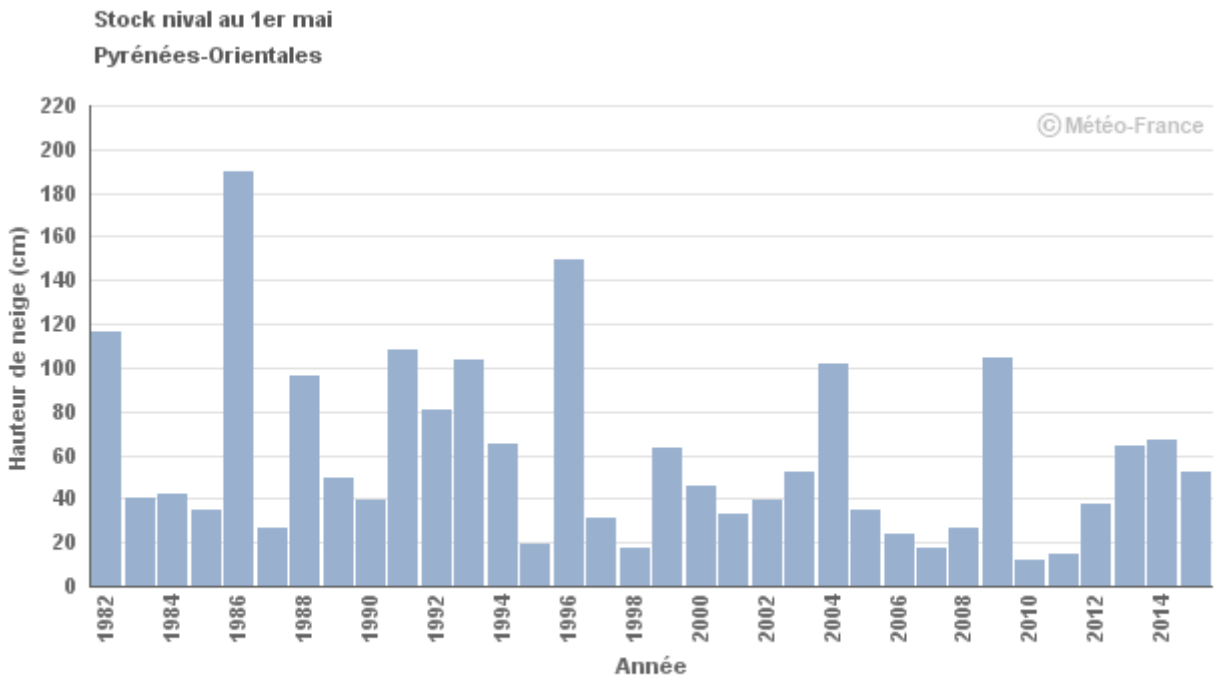


Illustration 24: Neige Stock nival au 1er mai sur les Pyrénées Orientales

Le stock nival au 1er mai sur les Pyrénées Orientales présente une forte variabilité inter-annuelle sur la période 1982-2015 et une diminution du stock nival entre le début et la fin de la période. Ainsi la moyenne décennale est passée d'environ 74 mm d'équivalent d'eau pour la décennie 82-91 à 42 mm pour la période 2002-2011. Les 3 années présentant le meilleur stock se sont produites avant 2000 (1986, 1996 et 1982). On note cependant que les 3 dernières années 2013, 2014 et 2015 n'ont pas présenté de déficit marqué.

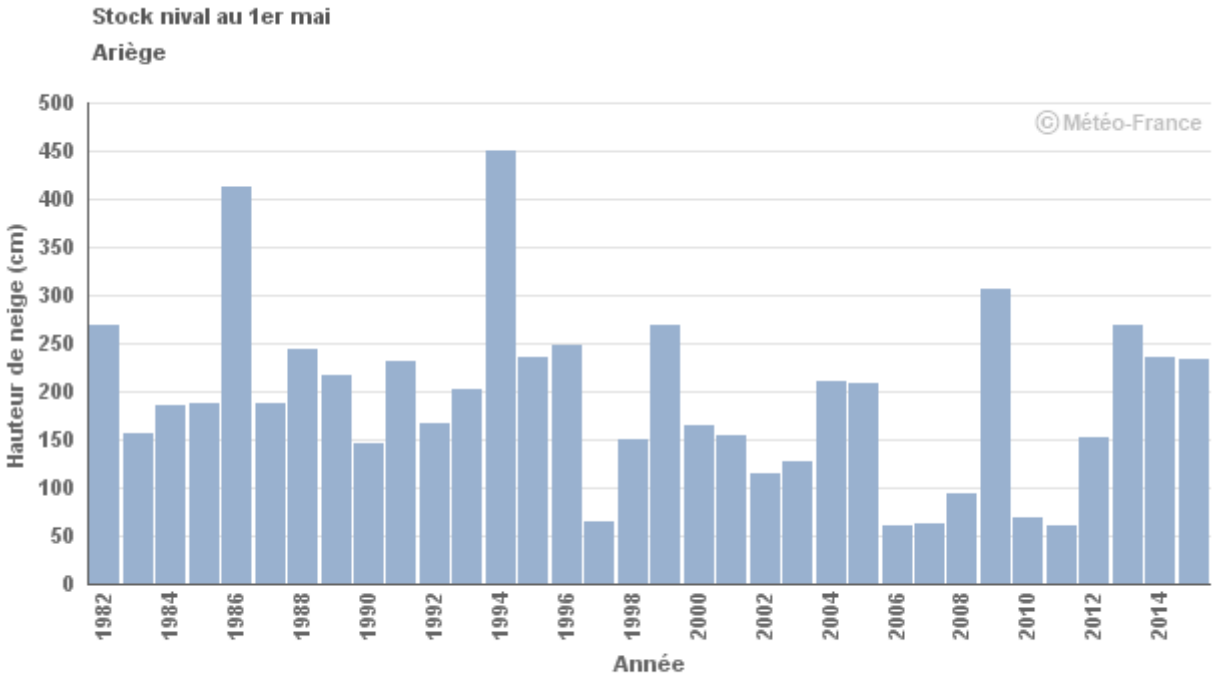


Illustration 25: Neige Stock nival au 1er mai Ariège

Le stock nival au 1er mai sur l'Ariège présente une forte variabilité inter-annuelle sur la période 1982-2015 et une diminution du stock nival entre le début et la fin de la période. Ainsi la moyenne décennale est passée d'environ 223 mm d'équivalent d'eau pour la décennie 82-91 à 131 mm pour la période 2002-2011. Les 2 années présentant le meilleur stock se sont produites en 1986, 1994 tandis que l'année 2009 arrive au 3e rang. On note cependant que les 3 dernières années 2013, 2014 et 2015 ont présenté des valeurs supérieures à la moyenne (période 1982-2015).

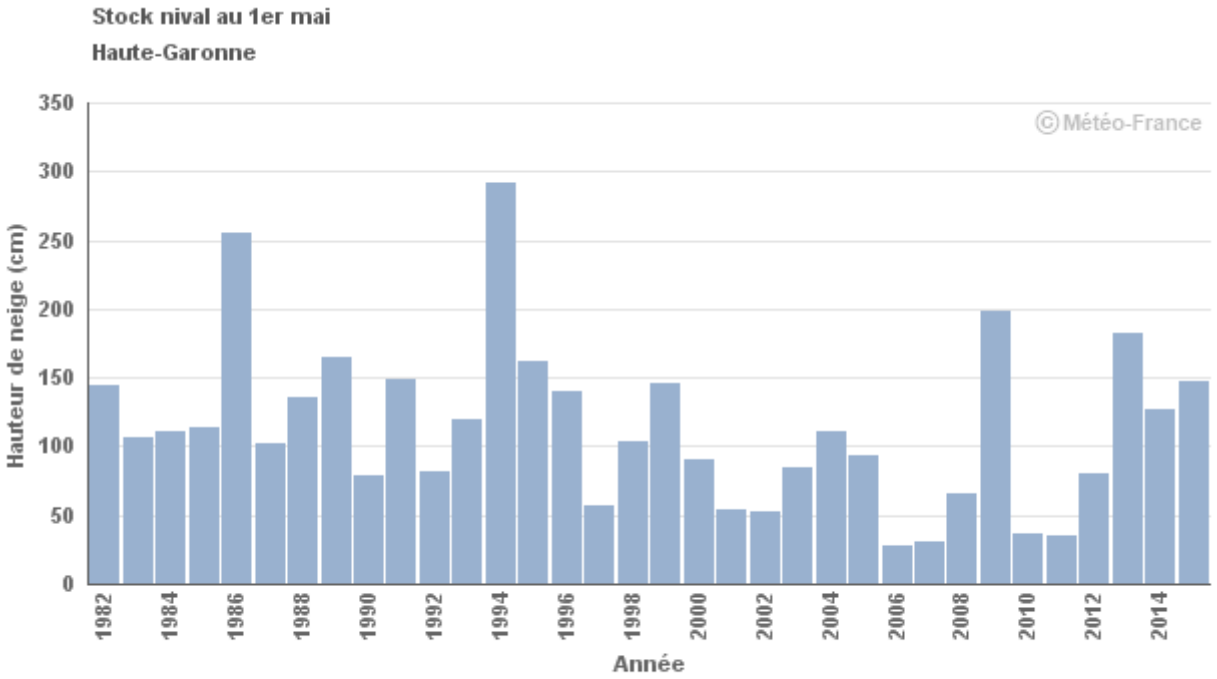


Illustration 26: Neige Stock nival au 1er mai – Haute-Garonne

Le stock nival au 1er mai sur la Haute-Garonne présente une forte variabilité inter-annuelle sur la période 1982-2015 et une diminution du stock nival entre le début et la fin de la période. Ainsi la moyenne décennale est passée d'environ 136 mm d'équivalent d'eau pour la décennie 82-91 à 73 mm pour la période 2002-2011. Les 2 années présentant le meilleur stock se sont produites en 1994 et 1986 tandis que l'année 2009 arrive au 3e rang. On note cependant que les 3 dernières années 2013, 2014 et 2015 ont présenté des valeurs supérieures à la moyenne (période 1982-2015).

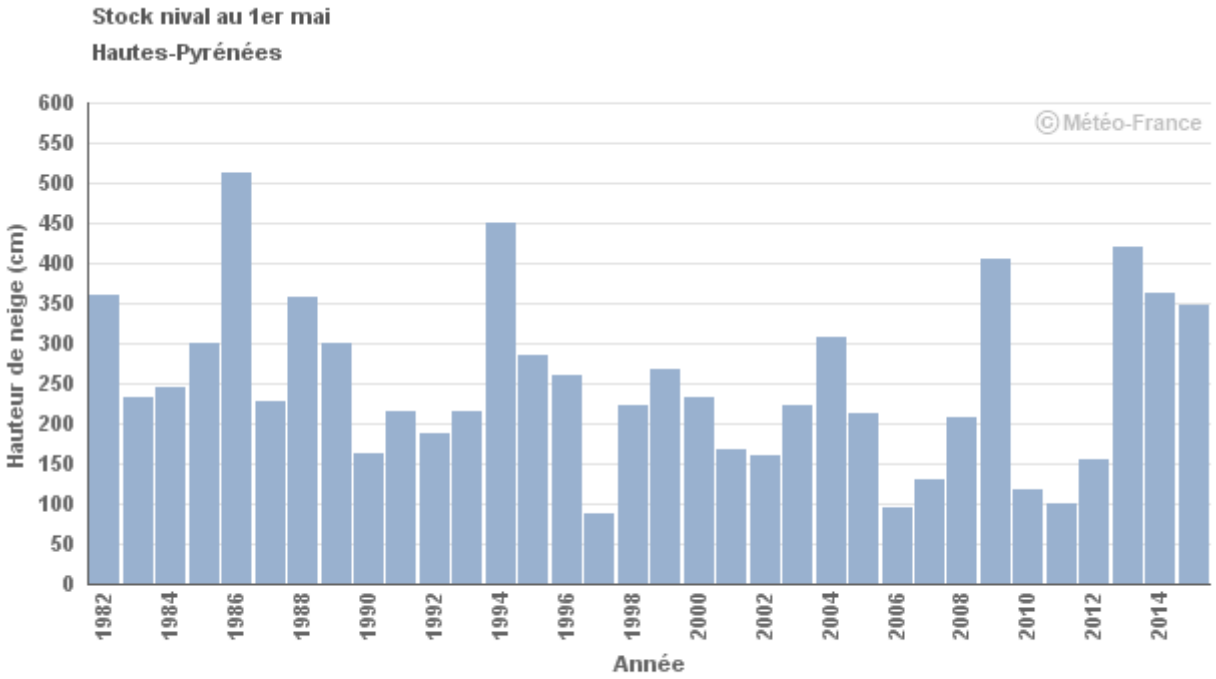


Illustration 27: Neige Stock nival au 1er mai – Hautes Pyrénées

Le stock nival au 1er mai sur les Hautes Pyrénées présente une forte variabilité inter-annuelle sur la période 1982-2015 et une diminution du stock nival entre le début et la fin de la période. Ainsi la moyenne décennale est passée d'environ 291 mm d'équivalent d'eau pour la décennie 82-91 à 196 mm pour la période 2002-2011. Les 2 années présentant le meilleur stock se sont produites en 1986 et 1994 tandis que l'année 2009 arrive au 3e rang. On note cependant que les 3 dernières années 2013, 2014 et 2015 ont présenté des valeurs supérieures à la moyenne (période 1982-2015).

1.6 SYNTHESE : EVOLUTION OBSERVEE DE LA RESSOURCE EN EAU SUR LA REGION OCCITANIE

L'évolution de la ressource en eau sur la période 1960 à nos jours se caractérise par une diminution globale sur l'ensemble de l'année principalement due :

— à l'augmentation de l'évaporation due à la hausse des températures : voir notamment l'humidité du sol moyenne

— à la diminution du stock nival en montagne due à la fonte plus rapide du manteau neigeux au printemps

La variabilité des précipitations dont le lien avec le changement climatique n'est pas clairement établi n'a pas compensé la hausse de l'évaporation, voire a pu l'aggraver expliquant ainsi l'expansion des zones touchées par la sécheresse sur la région.

2 Impact futur du changement climatique

2.1 Données utilisées

Les données utilisées sont principalement les données DRIAS (http://www.drias-climat.fr/), à l'exception du manteau neigeux ayant bénéficié de simulations récentes réalisées dans le cadre du projet GICC/ADAMONT (http://www.gip-ecofor.org/gicc/? q=node/577).

Pour les paramètres SSWI et SPI, les données sont celles de l'ancien scénario SRES A1B pour l'horizon moyen 2047-2064 et les 3 modèles suivants :

- Arpège Climat V4.6, dénommé simplement Arpège ou « modèle français » dans la suite de cette étude
- CGCM3.1 du Centre Canadien de la Modélisation de l'Analyse Climatique ou Coupled Global Climate Model 3 et dénommé simplement « modèle canadien » dans la suite de cette étude.
- ECHAM5 du MaxPlanck Institute dénommé simplement « modèle allemand » dans la suite de cette étude.

Pour les autres paramètres les données sont les quartiles Q25, Q50 et Q75 de l'ensemble des modèles EURO-CORDEX pour l'horizon moyen (2041-2070) et le scénario RCP 4.5. Plus précisément, les valeurs annuelles ont été déstockées pour les paramètres suivants :

- température minimale et anomalie par rapport à la référence 1976-2005
- température maximale et anomalie par rapport à la référence 1976-2005
- nombre de jours chauds (T > 25) et anomalie par rapport à la référence 1976-2005
- cumul de précipitations annuel et anomalie par rapport à la référence 1976-2005
- nombre de jours annuels moyens avec des pluies quotidiennes supérieures à 1 mm et anomalie par rapport à la référence 1976-2005
- nombre de jours annuels moyens avec des pluies quotidiennes supérieures à 20 mm et anomalie par rapport à la référence 1976-2005

Les valeurs de quartiles pour les périodes de recharge (septembre à mars) et d'étiage (juin à octobre) ont été calculées **en première approximation** à partir des données mensuelles. Cela concerne les paramètres suivants :

- la température maximale et l'anomalie dont on fait la moyenne sur les quartiles des mois correspondants
- la température minimale et l'anomalie dont on fait la moyenne sur les quartiles des mois correspondants

- le nombre de jours chauds et l'anomalie dont on fait le **cumul** pour les quartiles des mois correspondants
- le cumul de précipitations et son anomalie dont on fait le **cumul** pour les quartiles des mois correspondants

Les indices SPI 3 mois et SSWI 3 mois ont été également déstockés pour chacune des saisons météorologiques : hiver (décembre, janvier, février), printemps (mars, avril, mai), été (juin, juillet, août) et automne (septembre, octobre, novembre), et toujours pour l'ancien scénario SRES A1B pour l'horizon moyen 2047-2064 et les 3 modèles « Arpège Climat V4.6 », « Coupled Global Climate Model 3 » et « ECHAM5 » (Allemagne).

En définitive, le nombre de cartes produites vaudra :

- pour le paramètre SSWI, 3 modèles pour l'année entière et les 4 saisons soit 15 cartes
- pour le paramètre SPI, 3 modèles pour l'année entière et les 4 saisons soit 15 cartes
- pour les cartes annuelles, Q25, Q50 et Q75 pour 12 paramètres, soit 36 cartes
- pour les cartes par périodes d'étiage et de recharge, Q25, Q50 et Q75 pour 8 paramètres et 2 périodes soit 48 cartes.

Le nombre total de cartes atteint donc 114.

Remarque : nous avons choisi les légendes pour chacune des cartes selon les règles suivantes :

- tous les quartiles d'un même paramètre ont la même légende
- quel que soit le paramètre, les cartes annuelles et les cartes saisonnières (étiage ou recharge) sont représentées avec la même légende
- les anomalies de température minimale et les anomalies de température maximale sont associées à la même légende
- la légende du nombre d'années avec des indices SSWI et SPI atteignant ou dépassant les valeurs décennales suit une classification unique en nombre d'années : 0, 1-2, 3-4, 5-6, 7-8, 9 et plus, avec des plages de couleur précises (vert, blanc, jaune, orange, rouge, fuchsia).

Ces règles permettent de comparer plus facilement les cartes entre elles mais en contrepartie certaines cartes peuvent être visualisées avec une dynamique de couleurs plus réduite.

Tous ces indices sont disponibles sur la grille SIM (ou SAFRAN) de 8 km x 8 km.

2.2 Indicateurs de précipitations

Les indicateurs de précipitation annuels sont au nombre de 6 :

le cumul annuel de précipitation : pour chaque modèle de l'ensemble EURO-CORDEX nous calculons pour chaque point de grille et pour chaque année de l'horizon moyen le cumul de pluie annuel sur ce point, puis nous faisons la moyenne des 30 années Pour chaque point, nous avons donc à notre disposition 10 ou 11 valeurs, 1 par modèle. C'est à partir de ces 10 ou 11 valeurs que sont calculés les quartiles Q25, Q50 et Q75.

l'anomalie du cumul annuel de précipitation : Pour chaque modèle, nous avons calculé le cumul moyen de précipitation pour l'horizon H2 dans le paragraphe ci-dessus. Nous calculons aussi le cumul annuel moyen sur les 30 années de référence. L'anomalie est définie comme la différence entre les deux valeurs.

le nombre annuel de jours de précipitations supérieures à 1 mm : chaque série chronologique quotidienne de RR pour chaque modèle de l'ensemble EURO-CORDEX permet de calculer pour chaque point de grille et pour chaque année de l'horizon moyen le nombre de jours où le cumul quotidien dépasse 1 mm. Nous faisons la moyenne de ce nombre de jours. Pour chaque point, nous avons donc à notre disposition un nombre de jour annuel de pluie moyen pour 10 ou 11 modèles de projection. C'est à partir de ces 10 ou 11 valeurs que sont calculés les quartiles Q25, Q50 et Q75.

l'anomalie du nombre annuel de jours de précipitations supérieures à 1 mm : le nombre de jours a déjà été calculé dans le paragraphe précédent. Nous calculons de la même façon le nombre de jours moyen annuel pour la période de référence et l'anomalie est définie comme étant le nombre de jours pour l'horizon moyen moins le nombre de jour pour la période de référence.

le nombre annuel de jours de précipitations supérieures à 20 mm : identique au calcul du nombre de jours de pluie de plus de 1 mm mais pour une valeur de 20 mm.

l'anomalie du nombre annuel de jours de précipitations supérieures à 20 mm : identique au calcul de l'anomalie du nombre de jours de pluie de plus de 1 mm mais pour une valeur de 20 mm.

Les indicateurs saisonniers sont les suivants :

le cumul de précipitation pendant la saison de recharge : dans ce cas, les cumuls sont effectués sur quelques mois mais la démarche reste identique.

l'anomalie du cumul de précipitation pendant la saison de recharge : dans ce cas, les cumuls sont effectués sur quelques mois et les cumuls de référence sont calculés sur les mêmes mois.

le cumul de précipitation pendant la saison d'étiage : dans ce cas, les cumuls sont effectués sur quelques mois mais la démarche reste identique.

l'anomalie du cumul de précipitation pendant la saison d'étiage : dans ce cas, les cumuls sont effectués sur quelques mois et les cumuls de référence sont calculés sur les mêmes mois.

le nombre de jours de précipitations supérieures à 1 mm pendant la période de recharge : les jours sont comptabilisés de septembre à mars.

le nombre de jours de précipitations supérieures à 1 mm pendant la période d'étiage : les jours sont comptabilisés de juin à octobre.

l'anomalie du nombre de jours de précipitations supérieures à 1 mm pendant la période de recharge : les jours sont comptabilisés de septembre à mars.

l'anomalie du nombre de jours de précipitations supérieures à 1 mm pendant la période d'étiage : les jours sont comptabilisés de juin à octobre.

le nombre de jours de précipitations supérieures à 20 mm pendant la période de recharge : les jours sont comptabilisés de septembre à mars.

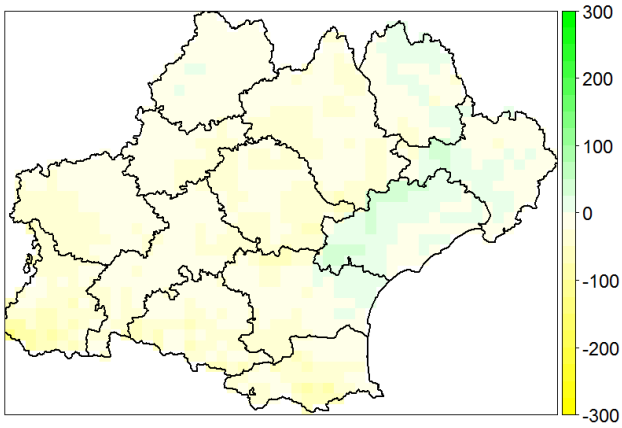
le nombre de jours de précipitations supérieures à 20 mm pendant la période d'étiage : les jours sont comptabilisés de juin à octobre.

l'anomalie du nombre de jours de précipitations supérieures à 20 mm pendant la période de recharge : les jours sont comptabilisés de septembre à mars.

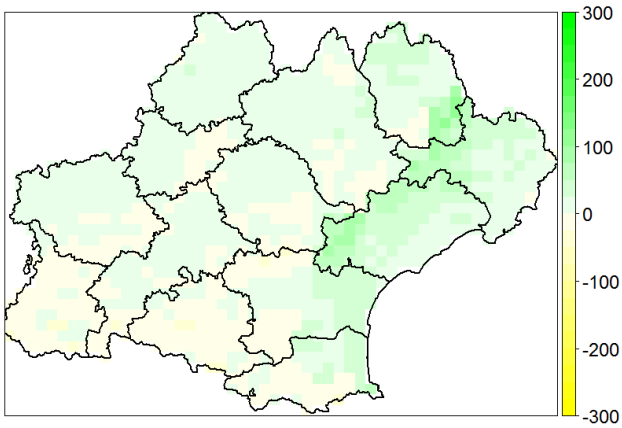
l'anomalie du nombre de jours de précipitations supérieures à 20 mm pendant la période d'étiage : les jours sont comptabilisés de juin à octobre.

2.2.1 F_R1 : Cumul moyen de précipitations

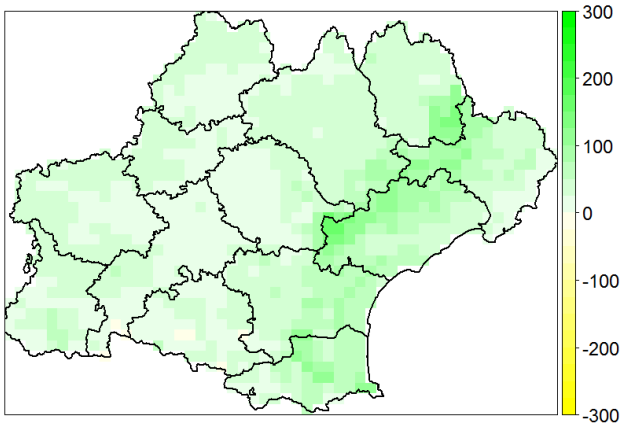
- ***anomalies du cumul annuel moyen de précipitation***



Q25 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070



Q50 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070



Q75 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070

Les figures ci-contre représentent les anomalies des cumuls annuels à l'horizon 2041-2070 par rapport à la période de référence 1976-2005.

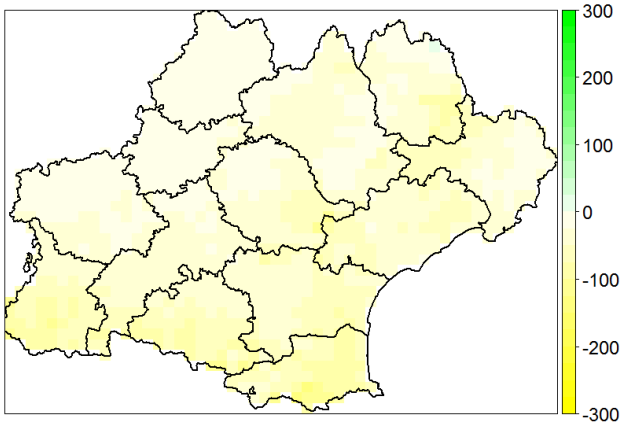
Les illustrations montrent un accroissement de ce cumul sur le Languedoc, notamment sur les Cévennes puisque plus de 75 % des modèles privilégient ce scénario.

Ailleurs, si l'augmentation des cumuls de pluie est simulée par les 25 % des modèles les plus humides, on peut dire qu'il n'y a pas de tendance bien marquée, puisqu'il a pratiquement autant de cas où le modèle voit un assèchement que de cas où il voit une humidification.

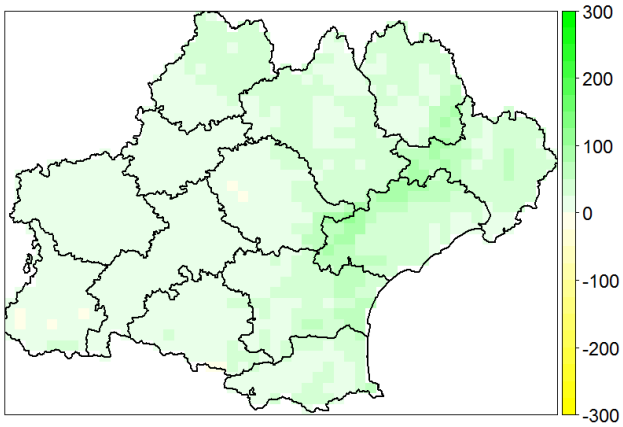
Illustration 28: de haut en bas, quartiles 25 %, 50 % et 75 %. Écart de cumuls annuels par rapport à la référence 1976-2005

- ***anomalies du cumul moyen de précipitation de septembre à mars***

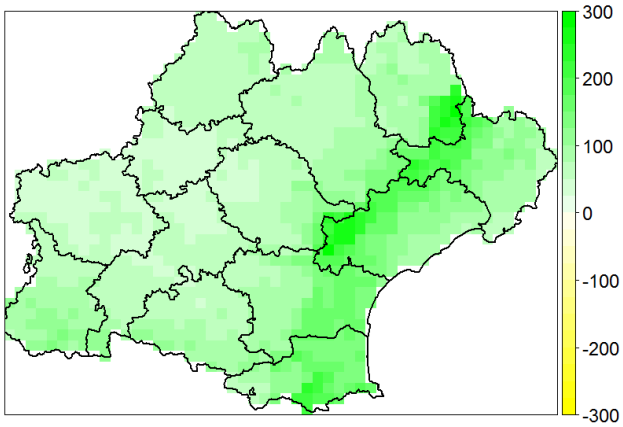
Pendant la période de recharge, les modèles ne sont pas tous d'accord entre eux, mais la tendance médiane est plutôt à l'augmentation des précipitations puisque plus d'un modèle sur 2 la prévoient.



Q25 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070



Q50 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070

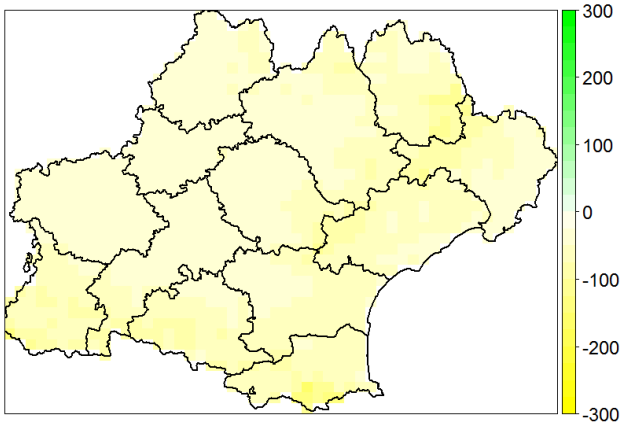


Q75 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070

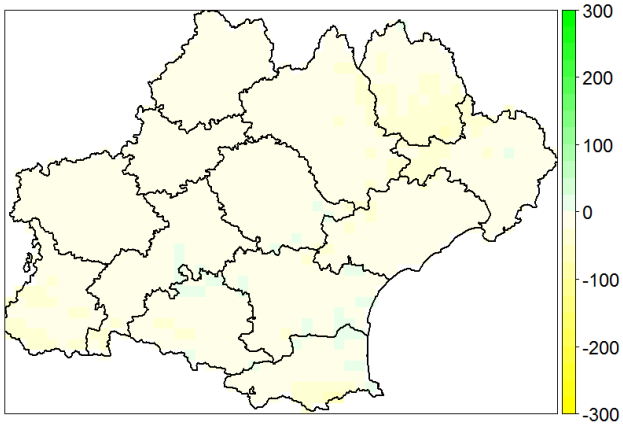
Illustration 29: de haut en bas, quartiles 25 %, 50 % et 75 %. Écart de cumuls par rapport à la référence 1976-2005 pour la période de recharge (septembre à mars)

- ***anomalies du cumul moyen de précipitation de juin à octobre***

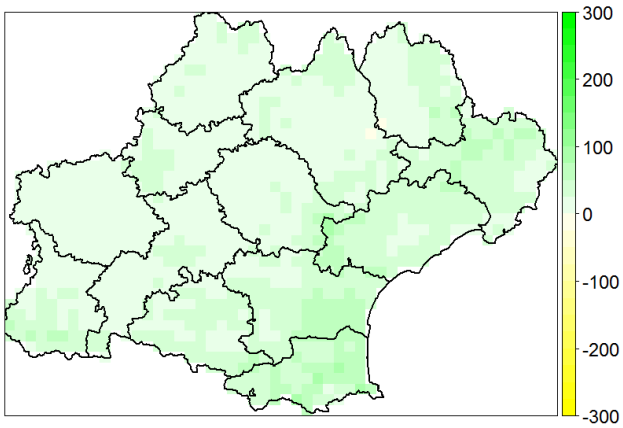
Pendant la période d'étiage, la tendance médiane est à la stabilité du cumul de précipitation. Cette valeur médiane cache une disparité assez forte entre les modèles les plus secs et les modèles les plus humides.



Q25 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070



Q50 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070

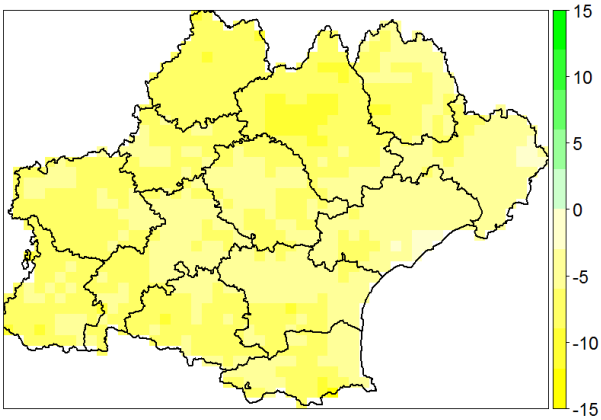


Q75 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070

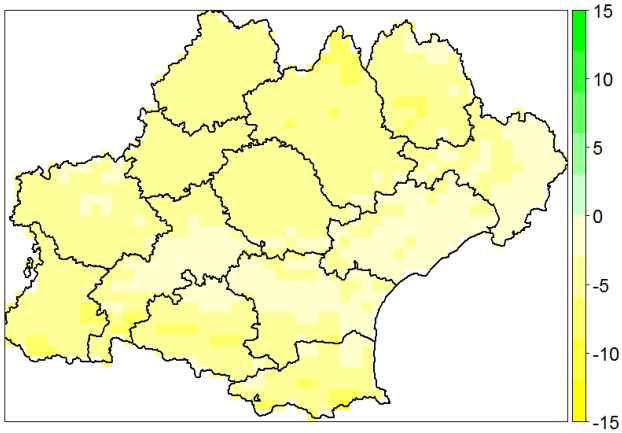
Illustration 30: de haut en bas, quartiles 25 %, 50 % et 75 %. Écart de cumuls par rapport à la référence 1976-2005 pour la période d'étiage (juin à octobre)

2.2.2 F_R2 : Nombre de jours de précipitations

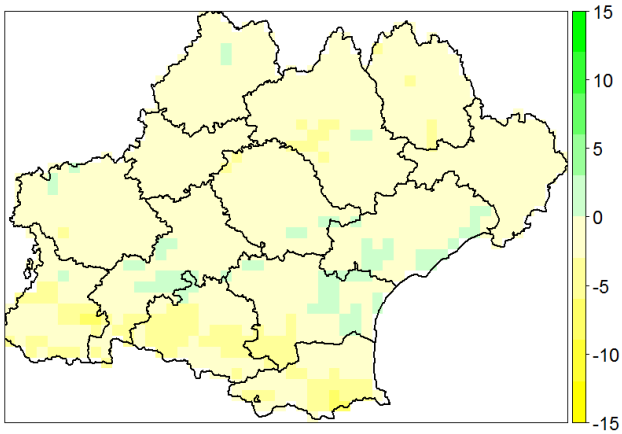
- ***anomalies du nombre de jours par an avec précipitations supérieures à 1 mm***



Q25 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070



Q50 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070



Q75 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070

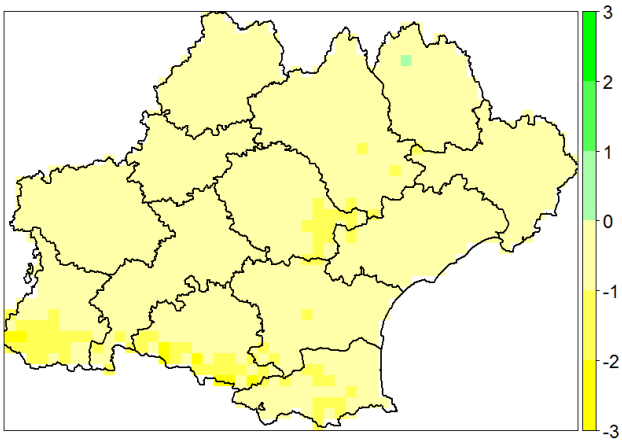
Illustration 31: de haut en bas, quartiles 25 %, 50 % et 75 %. Écart du nombre de jours par rapport à la référence 1976-2005

Le nombre de jour de pluie à l'horizon 2041-2070 est en retrait par rapport à la période dé référence 1976-2005. C'est en tout cas ce que nous enseigne la figure centrale qui représente la médiane des valeurs.

La diminution du nombre de jours est toutefois un peu moins marquée dans la plaine du Languedoc Roussillon et la vallée de la Garonne où certains modèles voient même une augmentation de ce nombre.

La concomitance d'une diminution du nombre de jours de pluie et d'une augmentation du cumul pourrait s'expliquer par une intensification des précipitations.

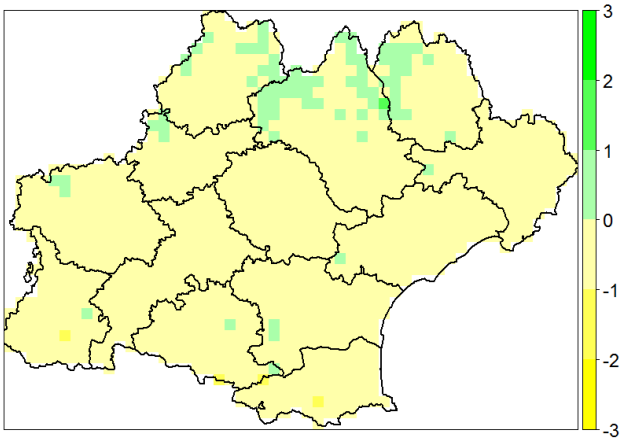
2.2.3 F_R3 : Nombre de jours de fortes précipitations



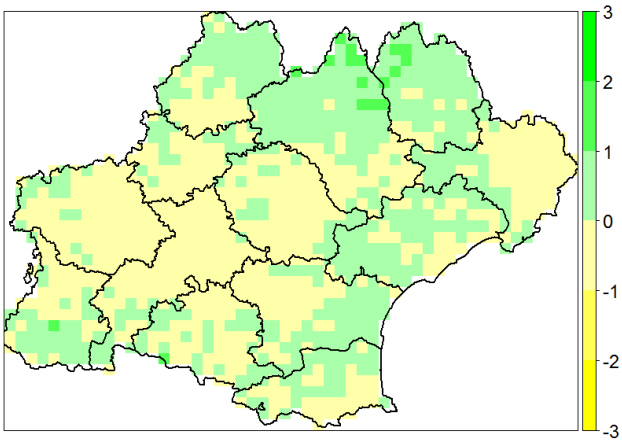
Q25 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070

Les anomalies de fortes précipitations sont forcément relativement faibles puisque le nombre de jours de précipitations est lui aussi relativement faible.
Les cartes ci-contre doivent donc être interprétées avec prudence.

À première vue, le nombre de jours de fortes pluies pourrait augmenter sur le massif central et diminuer sur le Gard hors Cévennes et en Midi-Pyrénées en zones de plaine.



Q50 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070

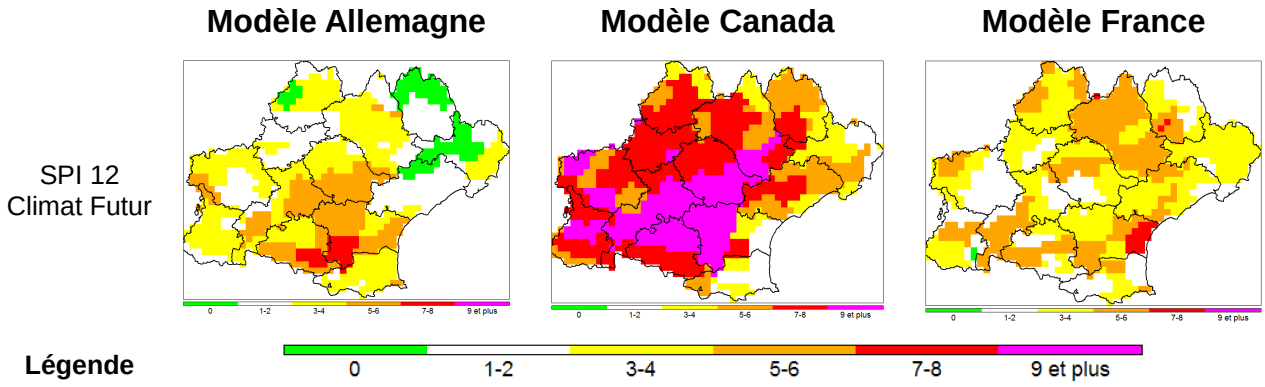


Q75 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070

Illustration 32: de haut en bas, quartiles 25 %, 50 % et 75 %. Écart du nombre de jours par rapport à la référence 1976-2005

2.2.4 F_R4 : Sécheresses météorologiques (SPI)

- *SPI sur l'année*



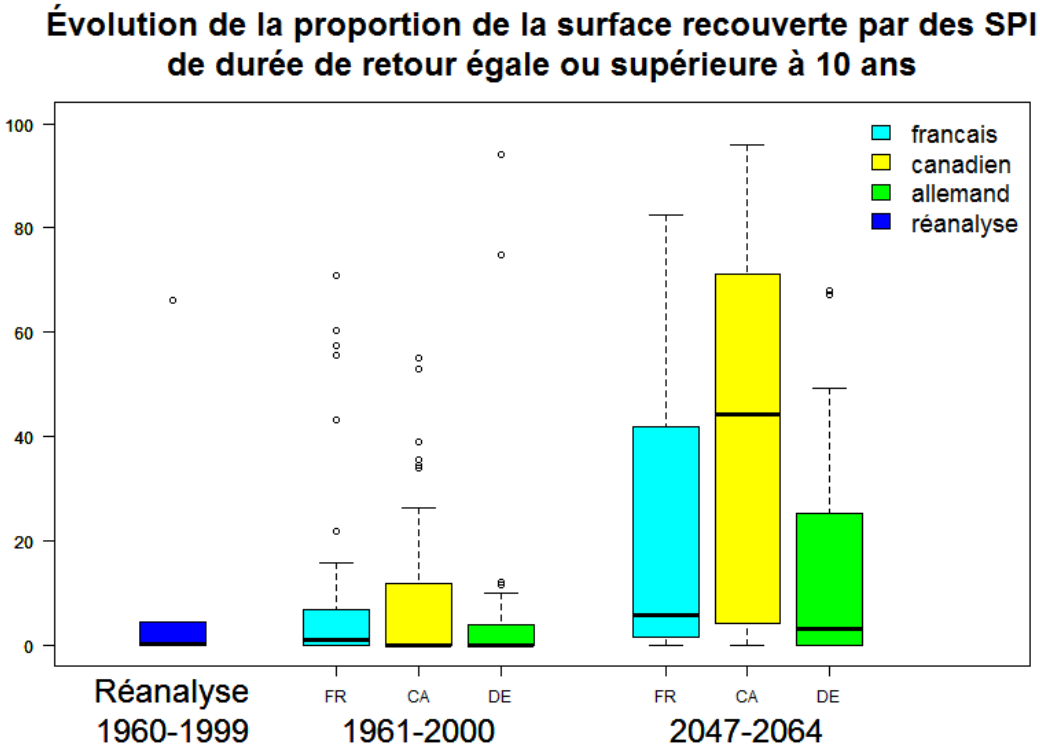


Illustration 33: SPI 12 mois : cartes du nombre d'années avec des valeurs atteignant ou dépassant la valeur décennale. Evolution de la surface couverte par ces valeurs décennales.

Il est rappelé que les projections climatiques SRES utilisées ici sont issues des travaux du précédent exercice GIEC et sont donc différentes des projections RCP précédemment commentées.

Les cartes contiennent le nombre d'années sur la période 2047-2064 (18 ans) avec un SPI 12 mois de durée de retour égale ou supérieure à 10 ans. Dans le climat actuel, la fréquence d'une année sur dix devrait se traduire par un nombre de cas de l'ordre de 1 à 2. En dessous, on peut considérer qu'on n'aura moins de sécheresses qu'actuellement. Au-delà, à partir de 3 années (couleur jaune), on peut estimer que les sécheresses modérées à extrêmes seront plus fréquentes.

À la lecture des cartes et du graphique d'évolution ci-dessus, on constate qu'à l'horizon « milieu de siècle » avec un scénario A1B, la fréquence et l'extension des sécheresses météorologiques de durée de retour décennale augmentent sensiblement sur la région Occitanie avec une année sur 2 une sécheresse telle que rencontrée aujourd'hui une année sur 4 mais surtout l'apparition une année sur 4 d'événements très intenses du même niveau que 2011 ou 1989.

Du point de vue spatial, ces événements semblent pouvoir concerner l'ensemble de la région.

On note aussi une incertitude importante entre les 3 modèles présentés tant en termes d'intensité globale (modèle Canadien beaucoup plus sévère que le modèle Allemand ou Français), que de structures spatiales des évolutions attendues.

Le graphique d'évolution de type boîte à moustaches a été obtenu en calculant pour chaque modèle et chaque année, le pourcentage de la région Occitanie où le SPI 12 mois était inférieur à -1,28 qui est la valeur du SPI pour la durée de retour de 10 ans. Donc, les valeurs inférieures à ce seuil sont des valeurs qui se produisent moins d'une année sur dix en moyenne.

La première moustache visualise les surfaces des années de réanalyse SIM 1960-1999. Les trois suivantes représentent les valeurs de l'échantillon obtenues à partir des données de la période de référence pour chacun des 3 modèles (1961-2000 ou 1960-1999) et les trois dernières sont obtenues à partir des données de la période 2047-2064.

Les rectangles des moustaches représentent l'inter-quartile Q25-Q75. Les trois modèles montrent une augmentation probable de ces surfaces, le modèle canadien étant le plus pessimiste et le modèle allemand un peu en retrait.

Nous avons également calculé l'évolution des moyennes de ces surfaces, modèle par modèle, entre la période de référence et la période 2047-2064. Les résultats sont consignés dans le tableau ci-après :

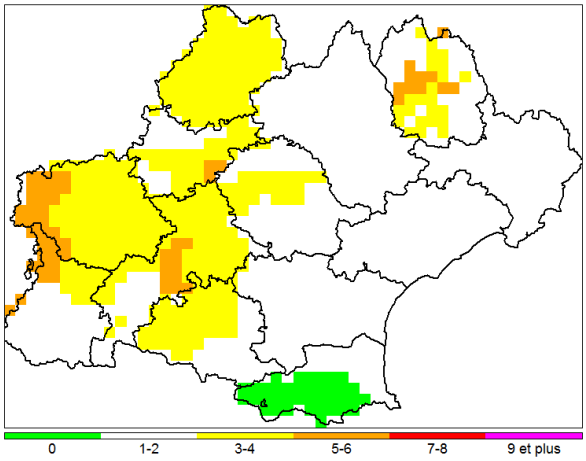
Réanalyse SIM 1960-1999 **6,4 %**	modèle		
	allemand	canadien	français
SPI période de référence	6%	9%	10%
SPI 2047-2064	17%	38%	21%
anomalie	10%	29%	11%

Illustration 34: Tableau de surface moyenne avec un SPI de durée de retour de 10 ans ou plus, en fonction du modèle et pour la période de référence et 2047-2064

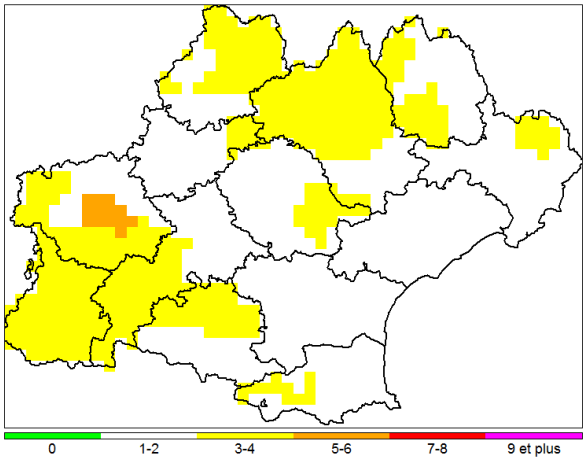
Le tableau confirme une augmentation de la surface moyenne pour un SPI de durée de retour 10 ans, quel que soit le modèle.

Dans le reste de cette section, les cartes de nombre d'années anormalement sèches sont détaillées et commentées saison par saison.

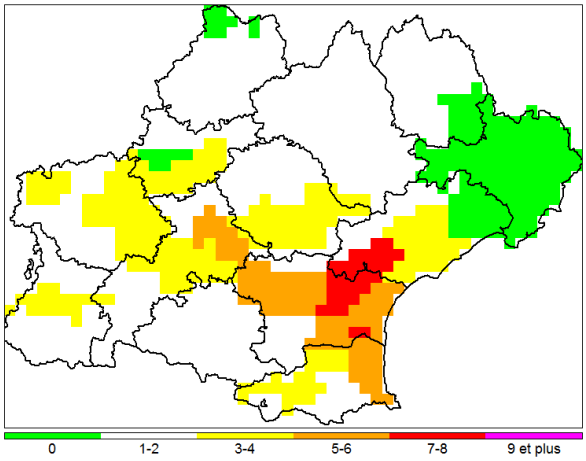
- ***SPI en hiver***



modèle français – SRES A1B – horizon 2047-2064



modèle canadien – SRES A1B – horizon 2047-2064



modèle allemand – SRES A1B – horizon 2047-2064

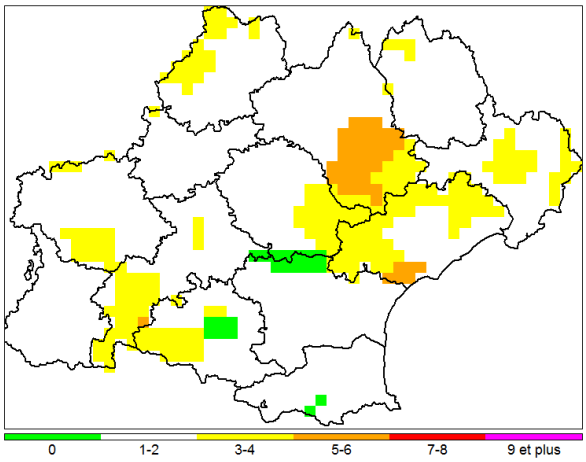
Les indices de sécheresse saisonniers sont intégrés sur 3 mois. L'interprétation du nombre d'années où cet indice atteint ou dépasse la durée de retour de 10 ans est la même que pour les indices intégrés sur 12 mois.

En hiver, et ce quel que soit le modèle, le nombre d'années où l'indice est inférieur ou égale à l'indice de la valeur de retour de dix ans est proche du nombre attendu, en moyenne.

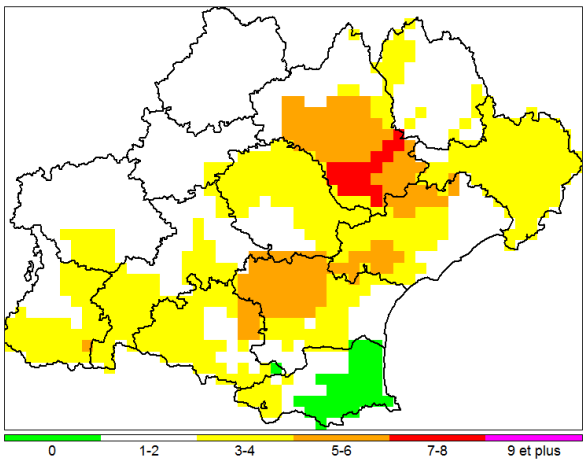
Quand on regarde dans le détail, les modèles ne sont pas d'accord sur la répartition de ce nombre d'années avec des indices de sécheresse météorologique de valeur décennale. En hiver, c'est le modèle allemand qui indique le nombre d'années anormalement sèches le plus élevé sur l'Aude.

Illustration 35: SPI en hiver : de haut en bas, modèles Français, Canadien et Allemand

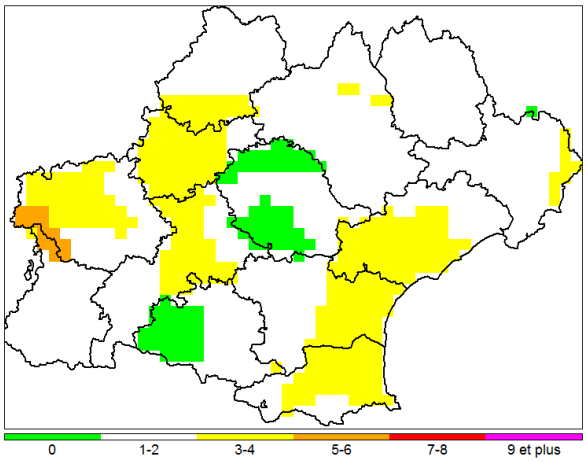
- ***SPI au printemps***



modèle français – SRES A1B – horizon 2047-2064



modèle canadien – SRES A1B – horizon 2047-2064

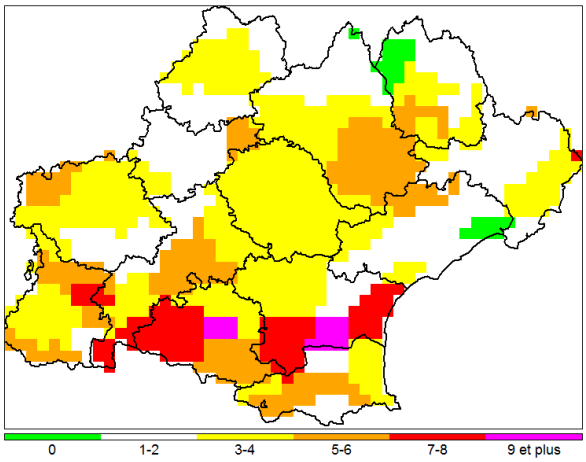


modèle allemand – SRES A1B – horizon 2047-2064

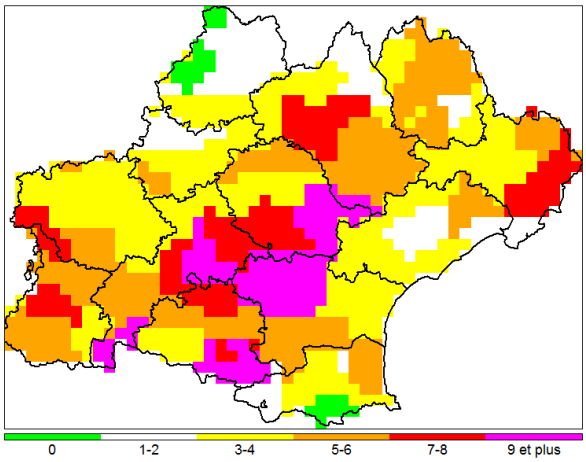
Au printemps, les modèles sont divergents mais, comme en hiver, les années avec des indices SPI 3 mois décennaux ne sont pas très nombreuses.
Cette fois-ci c'est le modèle canadien qui indique le maximum d'années anormalement sèches avec un noyau dans l'Aveyron.

Illustration 36: SPI au printemps : de haut en bas, modèles Français, Canadien et Allemand

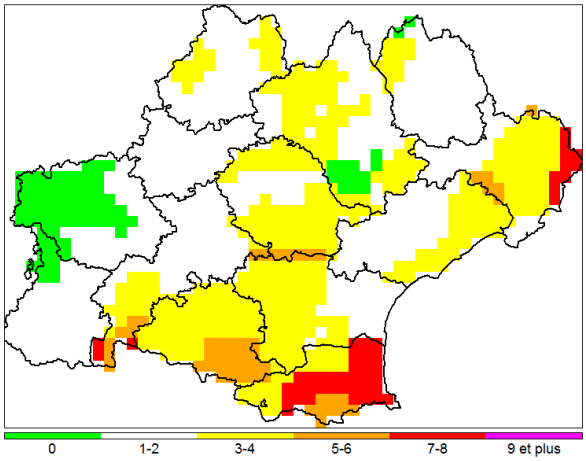
- ***SPI en été***



modèle français – SRES A1B – horizon 2047-2064



modèle canadien – SRES A1B – horizon 2047-2064



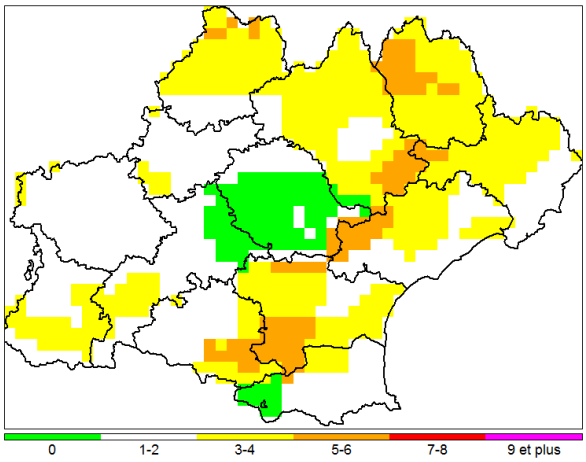
modèle allemand – SRES A1B – horizon 2047-2064

En été, on note une variabilité assez importante sur le domaine avec encore une fois un modèle canadien plus pessimiste et un modèle allemand plus humide.

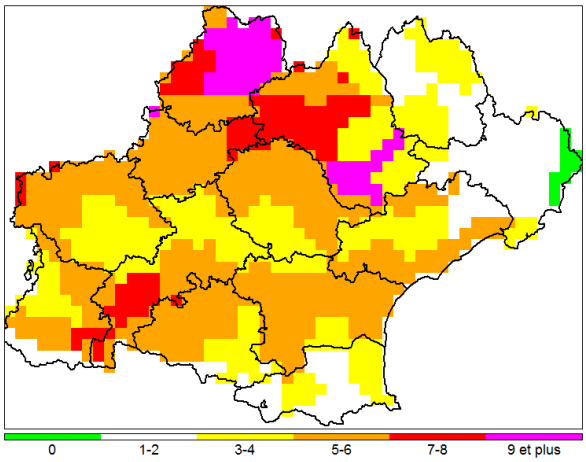
Mais dans l'ensemble les trois modèles voient un axe plus sec s'étendant des Pyrénées aux Cévennes.

Illustration 37: SPI en été : de haut en bas, modèles Français, Canadien et Allemand

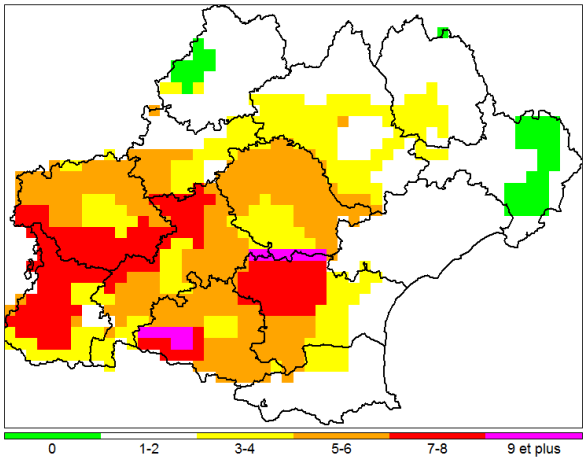
- ***SPI en automne***



modèle français – SRES A1B – horizon 2047-2064



modèle canadien – SRES A1B – horizon 2047-2064



modèle allemand – SRES A1B – horizon 2047-2064

En automne c'est le modèle français qui est le moins pessimiste avec finalement pas mal de zones où le nombre de jours est proche du nombre de jours attendus pour un phénomène d'une durée de retour de 10 ans.
Pour les modèles canadien et allemands, le nombre d'années avec sécheresse est plus important sur une grosse partie du sud-ouest de la région, donc plutôt sur Midi-Pyrénées.

Illustration 38: SPI en automne : de haut en bas, modèles Français, Canadien et Allemand

2.3 Indicateurs de températures

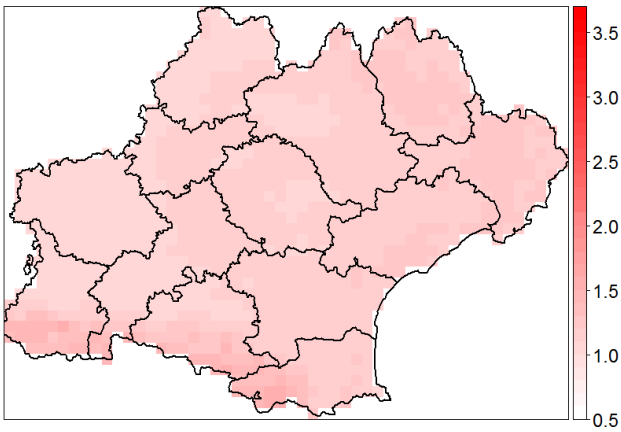
Les indicateurs visualisés dans cette partie sont :

- **la température maximale annuelle** : celle-ci est calculée à partir des températures maximales quotidiennes. Pour chaque modèle et chaque point, on calcule la température maximale moyenne annuelle pour chaque année de l'horizon moyen et on en fait la moyenne en divisant par 30 (années). On obtient ainsi 10 ou 11 valeurs, 1 par modèle, et on en déduit les quartiles q25, q50 et q75.
- **l'anomalie de température maximale annuelle** : la température maximale annuelle moyenne à l'horizon H2 a été calculée dans le paragraphe précédent. On fait exactement de même pour la période de référence et on la soustrait à la valeur pour l'horizon H2 et c'est ainsi qu'est définie l'anomalie. On obtient là encore 10 ou 11 valeurs et on calcule les quartiles.
- **Pour la température minimale**, le calcul est strictement identique en partant des températures minimales quotidiennes cette fois.
- **Pour les périodes de recharge et d'étiage**, nous faisons la moyenne des quartiles pour les mois correspondants en première approximation. Le calcul des températures extrêmes mensuelles moyennes et des anomalies consiste à faire la moyenne de la moyenne mensuelle de tous les mois de janvier, tous les mois de février, etc. Pour calculer les anomalies, on calcule aussi la moyenne de la moyenne mensuelle de tous les mois de janvier, tous les mois de février, etc. de la période de référence pour la retrancher au calcul similaire pour l'horizon H2.
- **le nombre de jours chauds annuels** : ce nombre est calculé à partir des données quotidiennes pour chaque année de l'horizon moyen. Nous comptons le nombre de jours où la température maximale dépasse 25 degrés. Nous faisons ensuite la moyenne sur les 30 ans. Nous obtenons ainsi 10 ou 11 valeurs (1 par modèle) de nombre de jours annuels moyens, nous en déduisons les valeurs des quartiles q25, q50 et q75.
- **l'anomalie du nombre de jours chauds annuels** : nous avons calculé le nombre de jours chaud annuels moyens dans le paragraphe précédent. Nous réitérons l'opération sur la période de référence. Nous obtenons une valeur que nous retranchons à celle calculé pour l'horizon H2 et qui constitue l'anomalie. Nous avons 10 ou 11 valeurs à notre disposition, nous en déduisons les quartiles q25, q50 et q75.
- **nombre de jours chauds et anomalies pour les périodes d'étiage et de recharge** : ici, nous partons des données de quartiles mensuels, que nous ajoutons

en première approximation sur les mois définissant chacune des périodes. Le calcul du nombre moyen mensuel de jours chauds est réalisé pour tous les mois de janvier de l'horizon moyen, de février, mars, etc. Pour calculer les anomalies, le même travail est effectué sur la période de référence.

2.3.1 F_T1 : Températures minimales

- *anomalies de la température minimale moyenne*



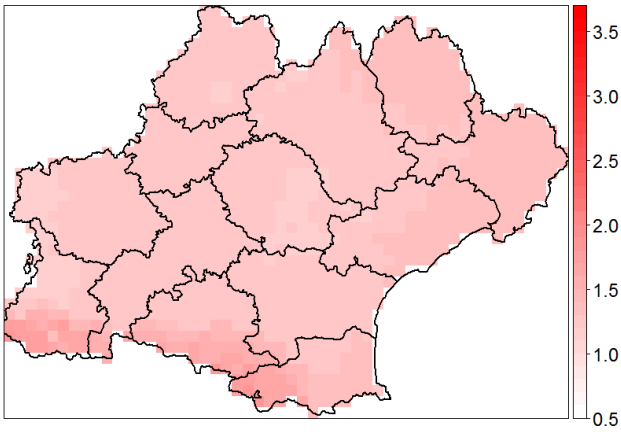
Q25 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070

Pour les températures minimales, le signal est clair et sans ambiguïté : l'accroissement de température est systématique.

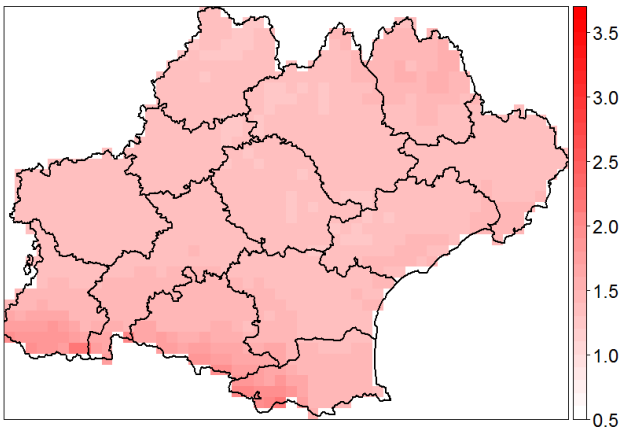
Il y a finalement assez peu de différence entre les trois quartiles

À ces échéances de l'horizon moyen, la hausse s'échelonne de +1 à +2,2 °C, tous quartiles confondus.

Les hausses les plus importantes semblent se concentrer sur la chaîne des Pyrénées.



Q50 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070

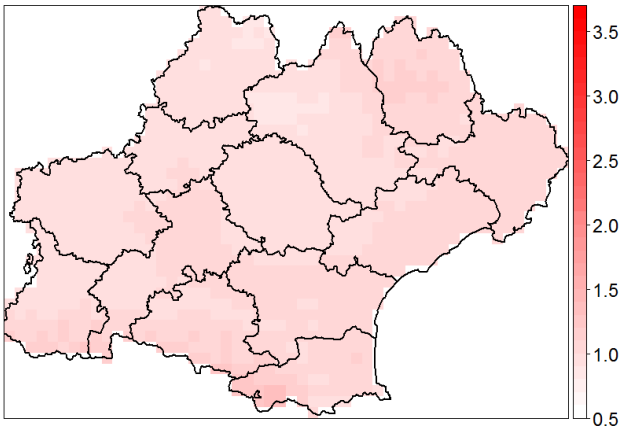


Q75 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070

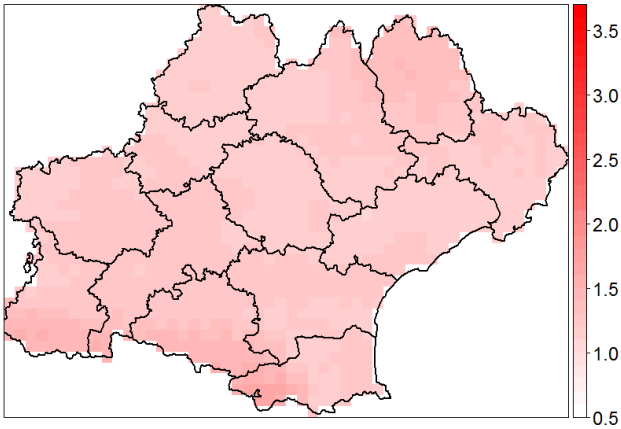
Illustration 39: de haut en bas, quartiles 25 %, 50 % et 75 %. Écart de la température minimale par rapport à la référence 1976-2005

- ***anomalies de la température minimale moyenne pendant la période de recharge (septembre à mars)***

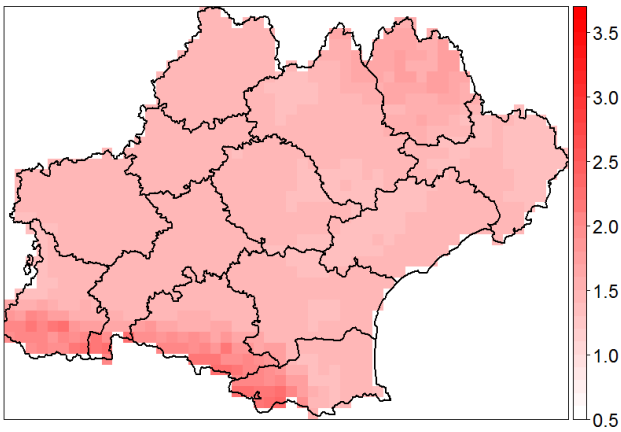
L'interprétation des 3 cartes est similaire à celle qui concerne les températures annuelles.



Q25 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070



Q50 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070

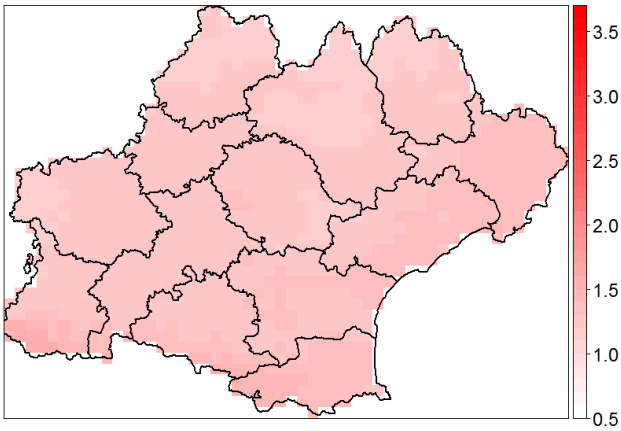


Q75 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070

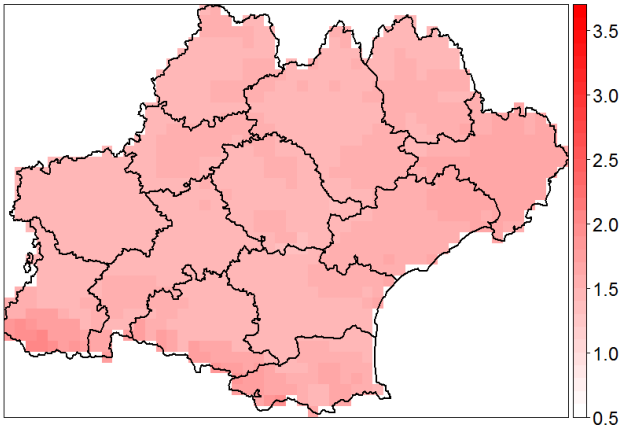
Illustration 40: de haut en bas, quartiles 25 %, 50 % et 75 %. Écart de la température minimale par rapport à la référence 1976-2005 pour la période de recharge (septembre à mars)

- ***anomalies de la température minimale moyenne pendant la période d'étiage (juin à octobre)***

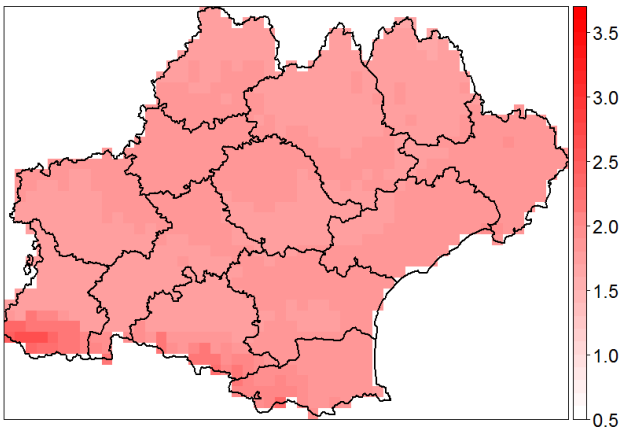
L'interprétation des 3 cartes est similaire à celle qui concerne les températures annuelles.



Q25 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070



Q50 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070

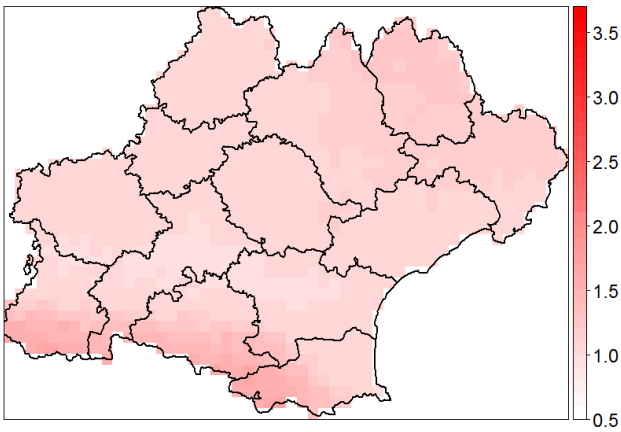


Q75 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070

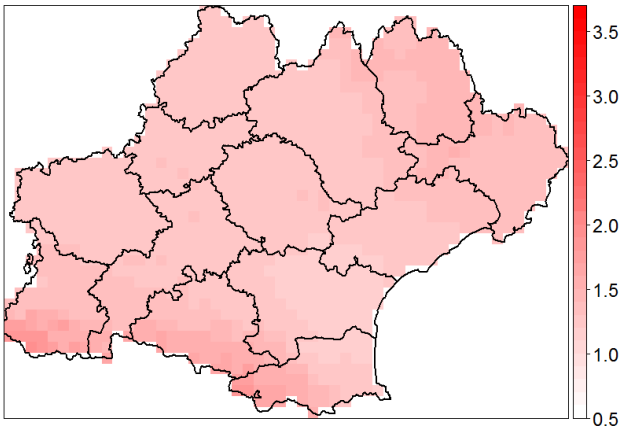
Illustration 41: de haut en bas, quartiles 25 %, 50 % et 75 %. Écart de la température minimale par rapport à la référence 1976-2005 pour la période d'étiage (juin à octobre)

2.3.2 F_T2 : Températures maximales

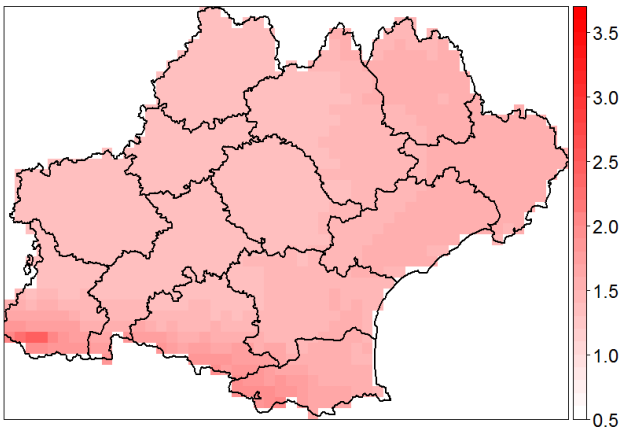
- *anomalies de la température maximale moyenne*



Q25 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070



Q50 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070



Q75 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070

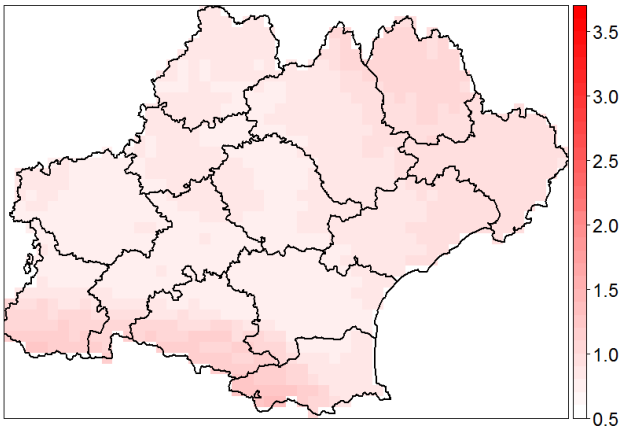
Comme dans le cas des températures minimales ci-dessus, la hausse des températures maximales est claire et sans ambiguïté.

Les hausses s'échelonnent entre pratiquement +1° et +2,5 °C, avec là encore un réchauffement plus sensible sur la chaîne pyrénéenne.

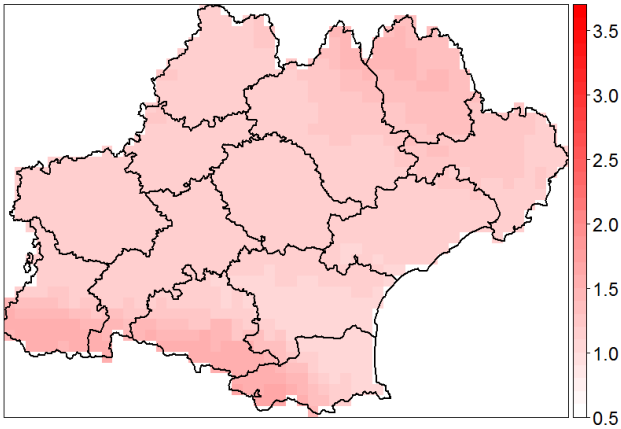
Illustration 42: de haut en bas, quartiles 25 %, 50 % et 75 %. Écart de la température maximale par rapport à la référence 1976-2005

- ***anomalies de la température maximale moyenne pendant la période de recharge (septembre à mars)***

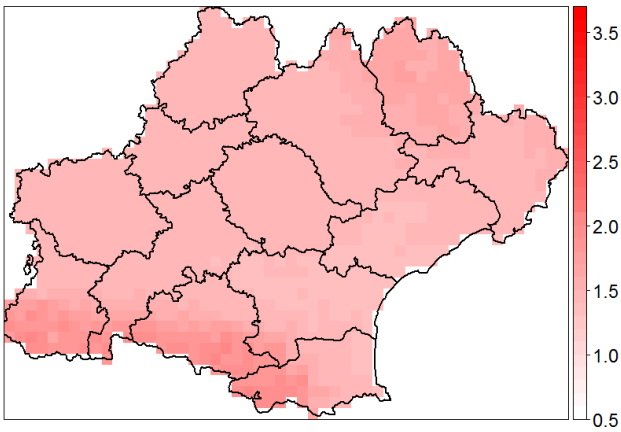
Le comportement est similaire à celui pour les températures maximales annuelles.



Q25 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070



Q50 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070

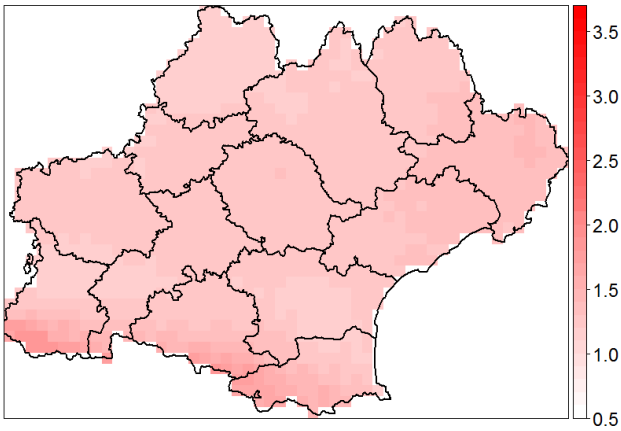


Q75 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070

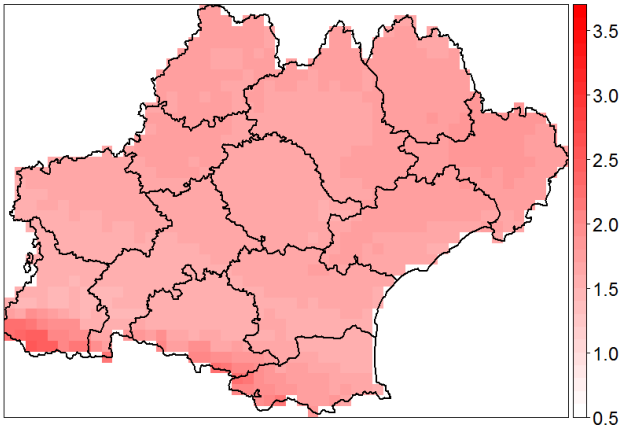
Illustration 43: de haut en bas, quartiles 25 %, 50 % et 75 %. Écart de la température maximale par rapport à la référence 1976-2005 pendant la période de recharge (septembre à mars)

- ***anomalies de la température maximale moyenne pendant la période d'étiage (juin à octobre)***

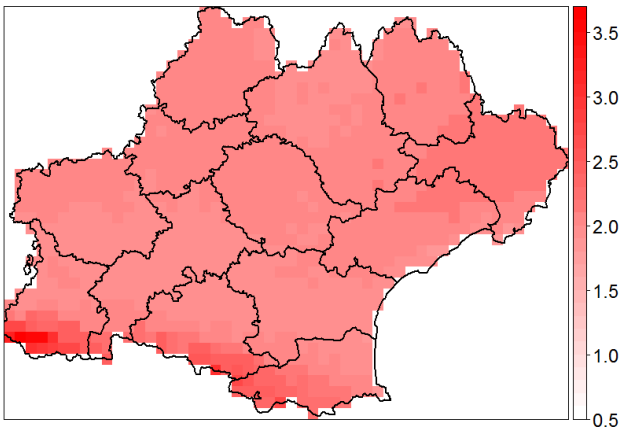
Le comportement est similaire à celui pour les températures maximales annuelles.
Avec une aggravation car ici, l'anomalie peut atteindre 3,7 degrés sur les Pyrénées dans la carte du quantile Q75.



Q25 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070



Q50 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070

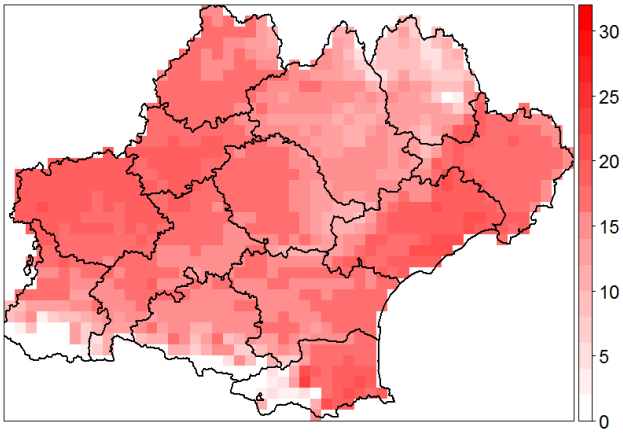


Q75 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070

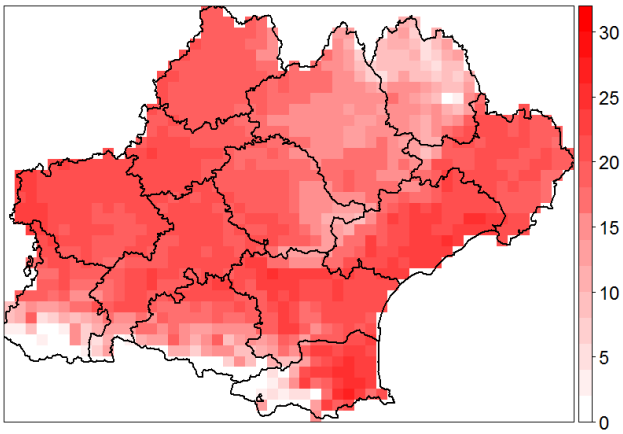
Illustration 44: de haut en bas, quartiles 25 %, 50 % et 75 %. Écart de la température maximale par rapport à la référence 1976-2005 pendant la période d'étiage (juin à octobre)

2.3.3 F_T3 : Nombre de jours chauds

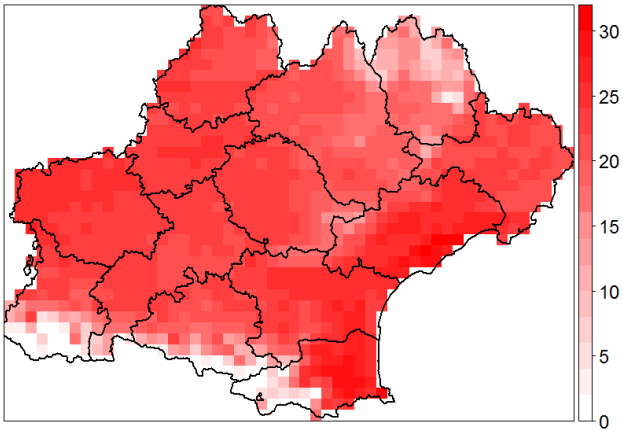
- *anomalies du nombre annuel de jours chauds*



Q25 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070



Q50 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070



Q75 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070

Les résultats ci-contre confortent les résultats obtenus pour les températures maximales.

Le nombre de jours dans une année où les températures maximales dépassent 25 degrés sont en augmentation sensible en plaine et sur le littoral.

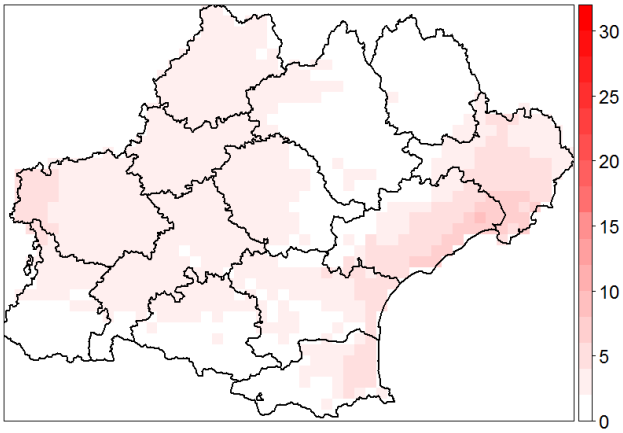
En montagne cette augmentation est largement plus faible et même quasi nulle sur la chaîne pyrénéenne, car le nombre de jours chaud est très faible et restera très faible sur les points de grille correspondants où l'altitude est élevée.

Ce nombre de jours par an varie de 0 à +31 jours sur le domaine et selon les quartiles.

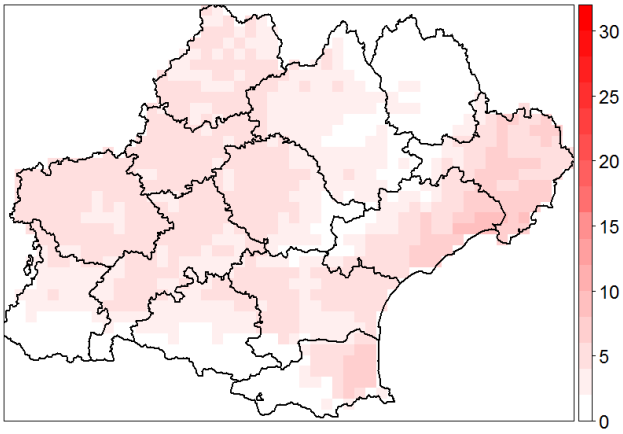
Illustration 45: de haut en bas, quartiles 25 %, 50 % et 75 %. Écart du nombre de jours où la température dépasse 25 °C par rapport à la référence 1976-2005

- ***anomalies du nombre annuel de jours chauds pendant la période de recharge (septembre à mars)***

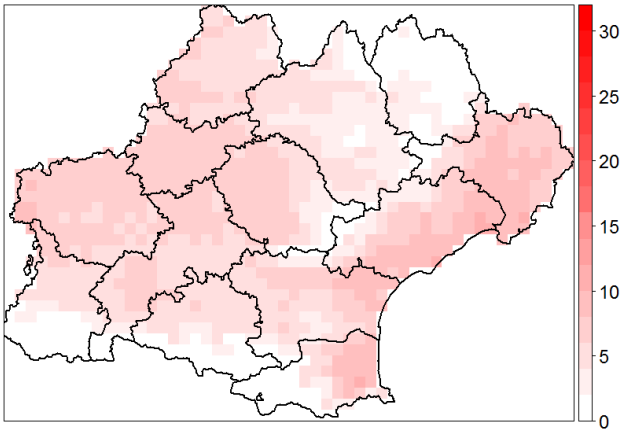
Même pendant cette période qui correspond plus ou moins à l'automne et à l'hiver, nous avons systématiquement un accroissement du nombre de ces jours chauds, probablement principalement en septembre.



Q25 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070



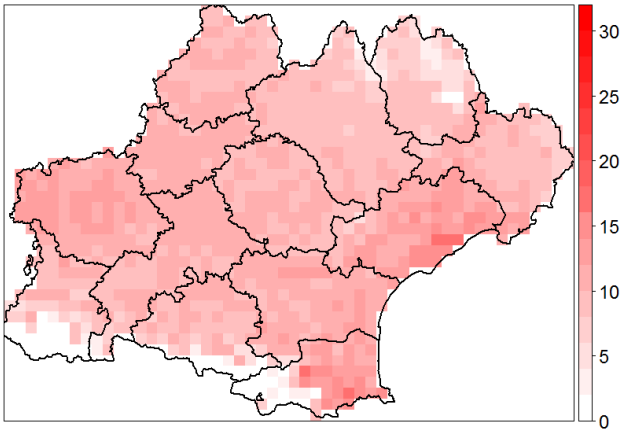
Q50 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070



Q75 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070

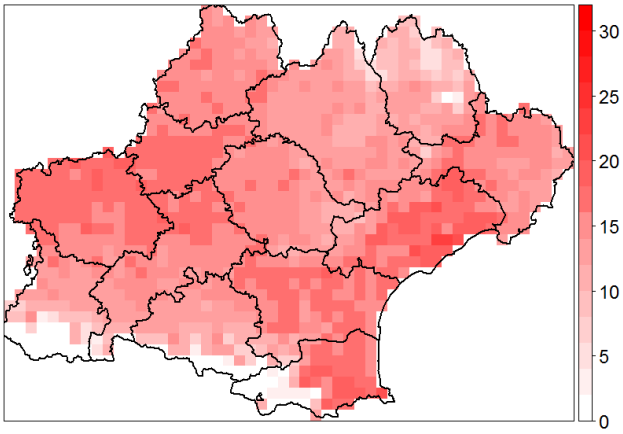
Illustration 46: de haut en bas, quartiles 25 %, 50 % et 75 %. Écart du nombre de jours où la température dépasse 25 °C par rapport à la référence 1976-2005 pendant la période de recharge (septembre à mars)

- ***anomalies du nombre annuel de jours chauds pendant la période d'étiage (juin à octobre)***

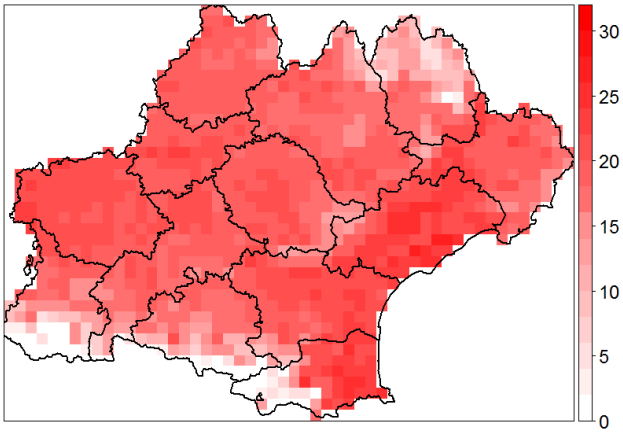


Q25 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070

Pendant la période d'étiage, l'accroissement du nombre de jours est plus sensible que pendant la période de recharge.
Ce nombre n'atteint pas le nombre de jours toutes saisons confondues puisque le décompte de jours sur une période est forcément inférieur à ce décompte sur une période élargie qui l'inclut (l'année).



Q50 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070



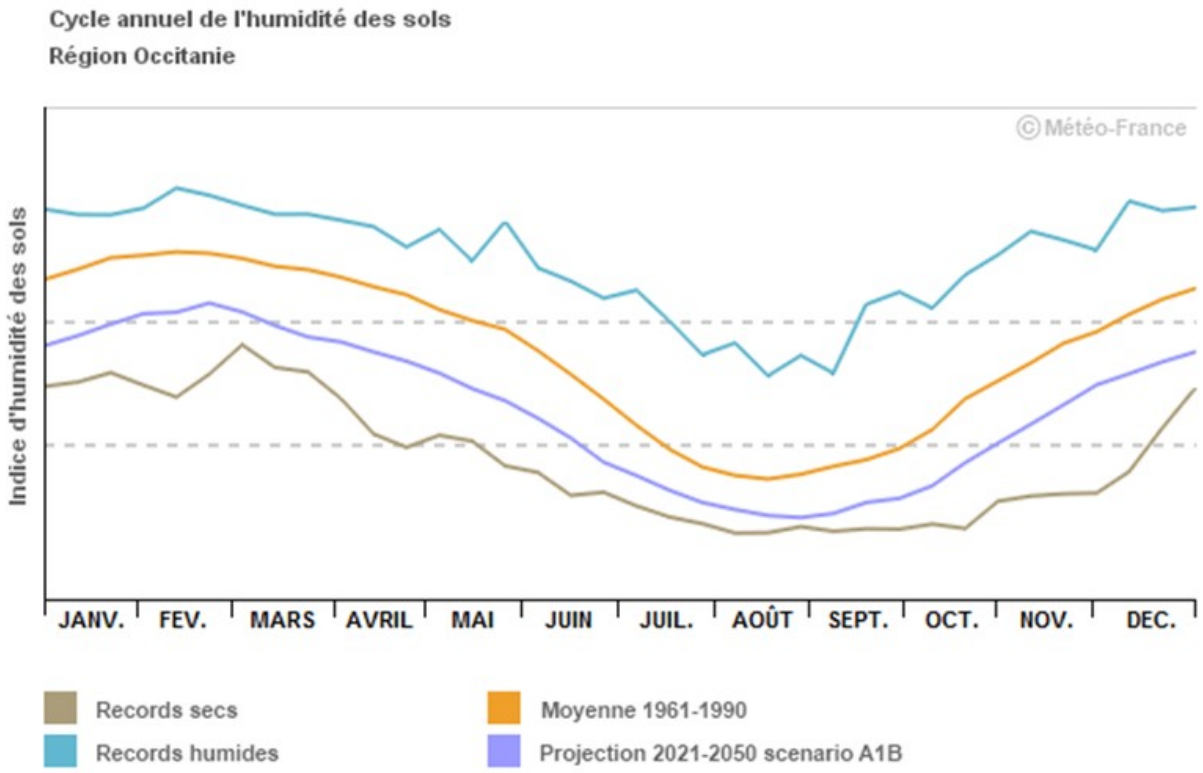
Q75 – RCP 4.5 – horizon 2041-2070

Illustration 47: de haut en bas, quartiles 25 %, 50 % et 75 %. Écart du nombre de jours où la température dépasse 25 °C par rapport à la référence 1976-2005 pendant la période d'étiage (juin à octobre)

2.4 Indicateurs d'humidité des sols

Il est rappelé que les projections climatiques SRES utilisées ici sont issues des travaux du précédent exercice GIEC et sont donc différentes des projections RCP précédemment commentées.

2.4.1 P_HU1 : Humidité des sols (SWI)

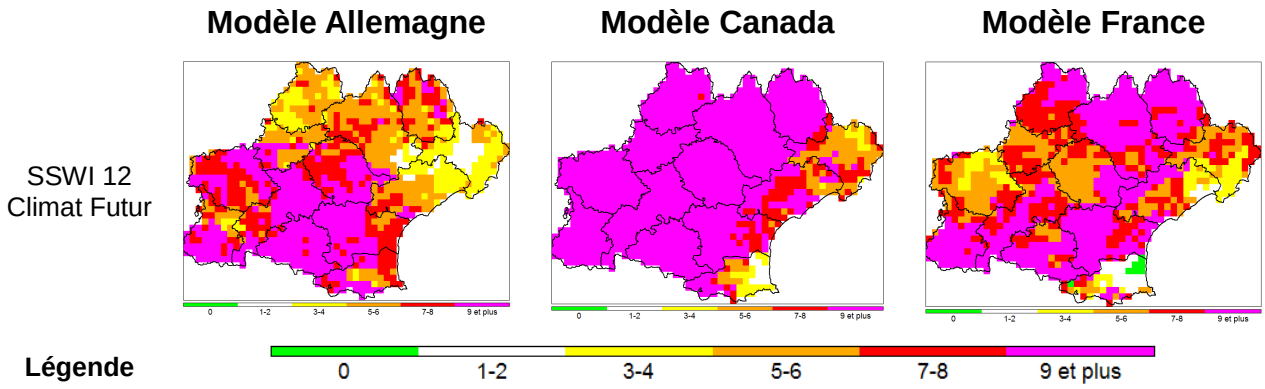


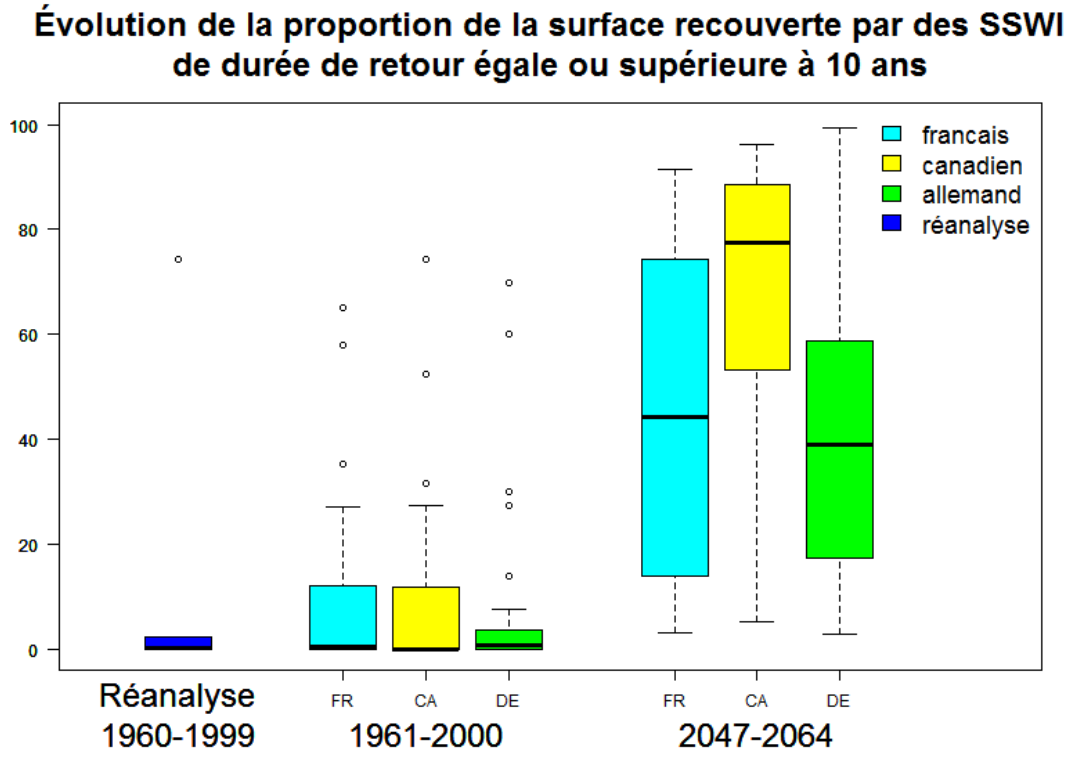
À l'horizon 2021-2050, avec un scénario médian d'évolution des concentrations en GES, la diminution de l'humidité moyenne du sol se renforce par rapport à aujourd'hui et concerne toutes les saisons.

La période de sol sec s'étend de plus de un mois vers le mois de juin et le mois d'octobre. La période favorable à la recharge des sols se réduit sensiblement aussi sur février et mars.

2.4.2 P_HU2 : Evolution de la sécheresse agricole (SSWI)

- ***SSWI sur l'année***





Les cartes contiennent le nombre d'années sur la période 2047-2064 (18 ans) avec un SSWI 12 mois de durée de retour égale ou supérieure à 10 ans. Dans le climat actuel, la fréquence d'une année sur dix devrait se traduire par un nombre de cas de l'ordre de 1 à 2. En dessous, on peut considérer qu'on n'aura moins de sécheresses qu'actuellement. Au-delà, à partir de 3 années (couleur jaune), on peut estimer que les sécheresses modérées à extrêmes seront plus fréquentes.

À l'horizon « milieu de siècle » avec un scénario A1B, la fréquence et l'extension des sécheresses des sols de durée de retour décennale augmentent fortement sur la région Occitanie avec une année sur 2 une sécheresse proche des années record actuelles telles que 2011 ou 2012.

Du point de vue spatial, ces événements semblent pouvoir concerner l'ensemble de la région avec des intensités fortes notamment sur la partie « Midi Pyrénées » connaissant aujourd'hui des conditions moins sèches que le Languedoc-Roussillon.

On note aussi une incertitude importante entre les modèles présentés en termes d'intensité globale de l'évolution attendue (modèle Canadien beaucoup plus sévère que les modèles Allemand et Français) mais pas en termes de tendance générale : l'aggravation des sécheresses des sols est forte pour les 3 modèles.

Le graphique d'évolution de type boîte à moustaches a été obtenu en calculant pour chaque modèle et chaque année, le pourcentage de la région Occitanie où le SSWI 12 mois était inférieur à -1,28 qui est la valeur du SSWI pour la durée de retour de 10 ans. Donc, les valeurs inférieures à ce seuil sont des valeurs qui se produisent moins d'une année sur dix en moyenne.

La première moustache visualise les surfaces des années de réanalyse SIM 1960-1999. Les trois suivantes représentent les valeurs de l'échantillon obtenues à partir des données de la période de référence pour chacun des 3 modèles (1961-2000 ou 1960-1999) et les trois dernières sont obtenues à partir des données de la période 2047-2064.

Les rectangles représentent l'inter-quartile Q25-Q75. Les trois modèles montrent une augmentation très probable de ces surfaces, le modèle canadien étant le plus pessimiste et le modèle allemand un peu en retrait. Il faut noter la forte variabilité inter annuelle de cette surface pour les modèles français et allemand.

Nous avons également calculé l'évolution des moyennes de ces surfaces, modèle par modèle, entre la période de référence et la période 2047-2064. Les résultats sont consignés dans le tableau ci-après :

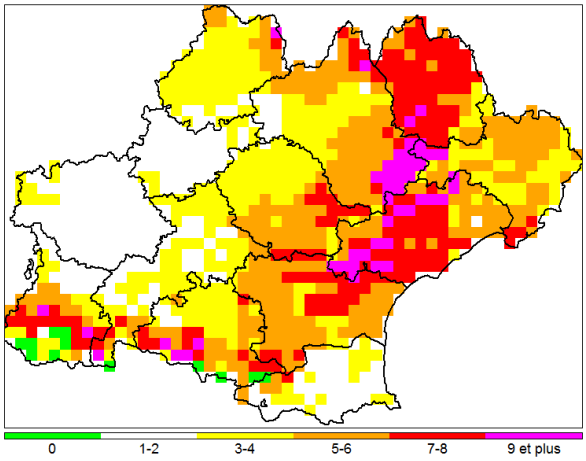
Réanalyse SIM 1960-1999 **4,4 %**	modèle		
	allemand	canadien	français
SSWI période de référence	7%	9%	9%
SSWI 2047-2064	42%	67%	46%
anomalie	35%	59%	37%

Illustration 48: Tableau de surface moyenne avec un SSWI de durée de retour de 10 ans ou plus, en fonction du modèle et pour la période de référence et 2047-2064

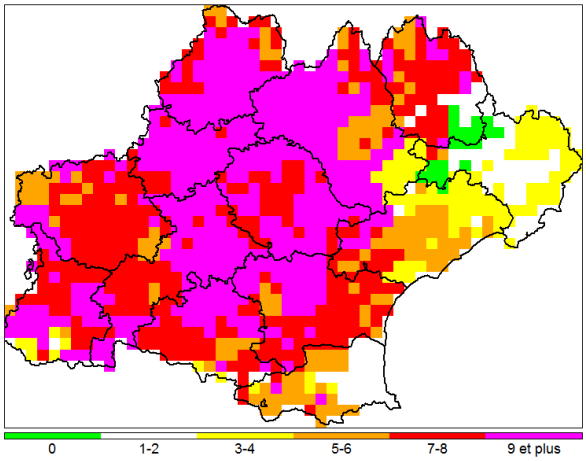
Le tableau confirme une nette augmentation de la surface moyenne pour un SSWI de durée de retour 10 ans, quel que soit le modèle. Le modèle canadien est le plus sec en moyenne, avec plus des 2/3 de la surface en très sec ou extrêmement sec, en moyenne sur cette période 2047-2064.

Dans le reste de cette section, les cartes de nombre d'années anormalement sèches sont détaillées et commentées saison par saison.

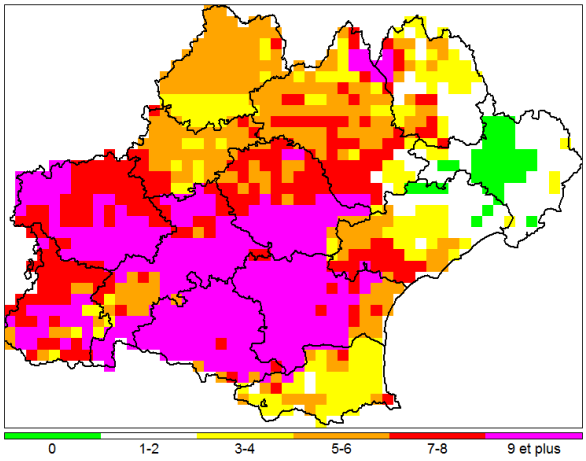
- ***SSWI en hiver***



modèle français – SRES A1B – horizon 2047-2064



modèle canadien – SRES A1B – horizon 2047-2064



modèle allemand – SRES A1B – horizon 2047-2064

Les indices de sécheresse saisonniers sont intégrés sur 3 mois. L'interprétation du nombre d'années où cet indice atteint ou dépasse la durée de retour de 10 ans est la même que pour les indices intégrés sur 12 mois.

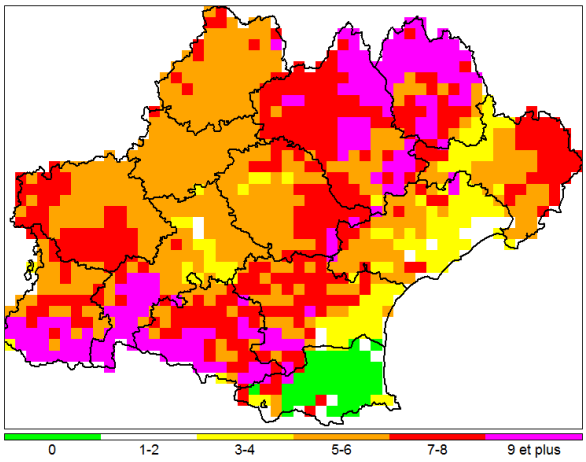
En hiver le modèle français est un peu en retrait par rapport aux autres modèles mais aussi par rapport au SSWI 12 mois.

Les modèles allemand et canadien voient sur le Gard un nombre d'années proche du nombre d'années attendues, voire plus faible.

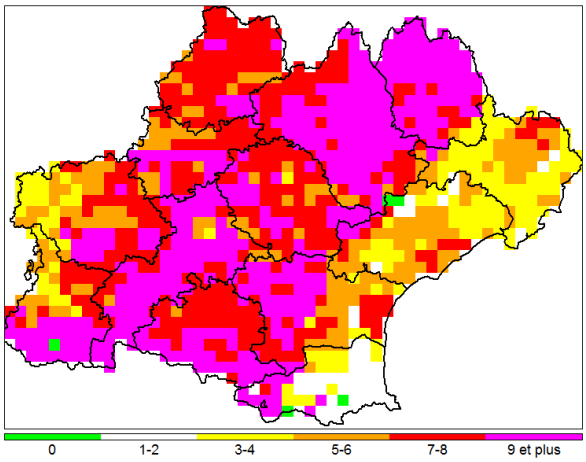
Avec les modèles allemand et canadien, les départements de l'Ariège, l'Aude le Tarn et la Haute-Garonne semblent les plus impactés par le changement climatique avec 9 années ou plus où le SSWI atteint ou dépasse sa valeur de durée de retour de 10 ans.

Illustration 49: SSWI en hiver : de haut en bas, modèle Français, Canadien et Allemand

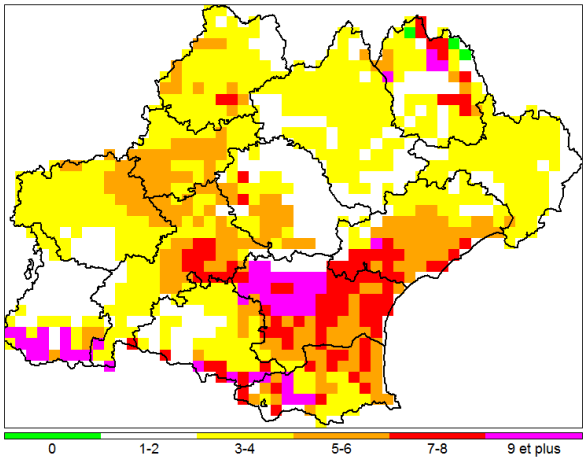
- ***SSWI au printemps***



modèle français – SRES A1B – horizon 2047-2064



modèle canadien – SRES A1B – horizon 2047-2064



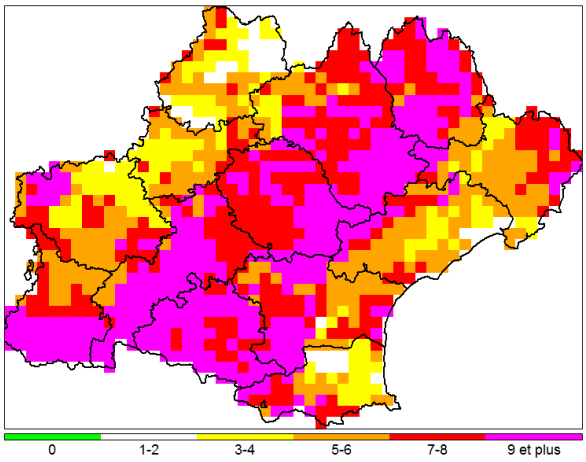
modèle allemand – SRES A1B – horizon 2047-2064

Le modèle allemand change complètement de comportement au printemps avec un nombre d'années plutôt en net recul en région Midi-Pyrénées.

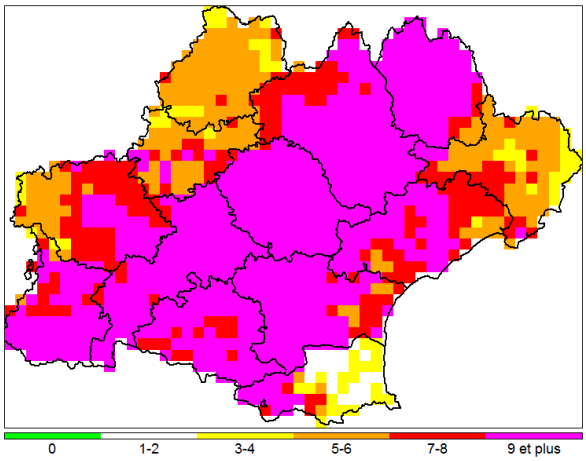
Les autres modèles sont plutôt d'accord pour prévoir une fréquence des sécheresses un peu plus conforme à la norme actuelle sur la partie littorale de la région Roussillon-Languedoc (notamment sur les Pyrénées Orientales) et plus élevée ailleurs.
Le fait que la fréquence soit relativement proche de la fréquence attendue en climat méditerranéen peut s'expliquer par le fait que les régions au climat méditerranéen sont déjà sèches à l'heure actuelle. L'assèchement est donc plus probable là où actuellement il y a davantage d'eau disponible.

Illustration 50: SSWI au printemps : de haut en bas, modèle Français, Canadien et Allemand

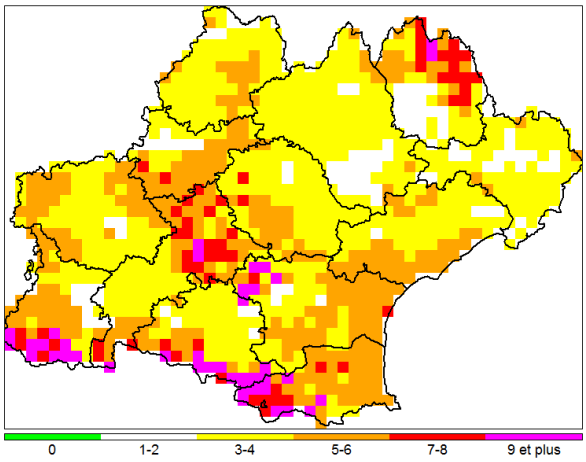
- ***SSWI en été***



modèle français – SRES A1B – horizon 2047-2064



modèle canadien – SRES A1B – horizon 2047-2064



modèle allemand – SRES A1B – horizon 2047-2064

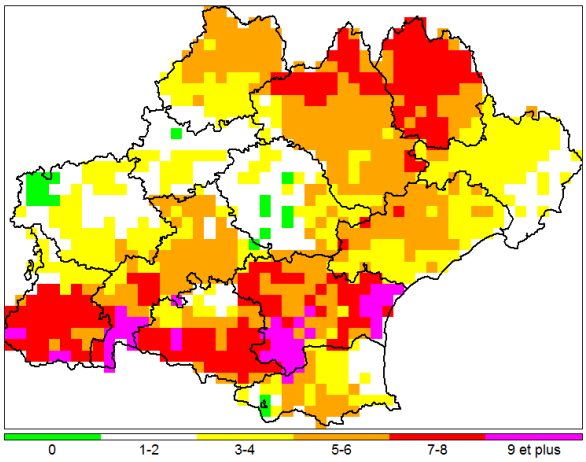
Les modèles français et canadien sont assez en accord et voient un nombre d'années très supérieur au nombre attendu (1 ou 2) sur une zone allant des Pyrénées au Massif Central.

Le modèle canadien est un peu plus pessimiste que le modèle français.

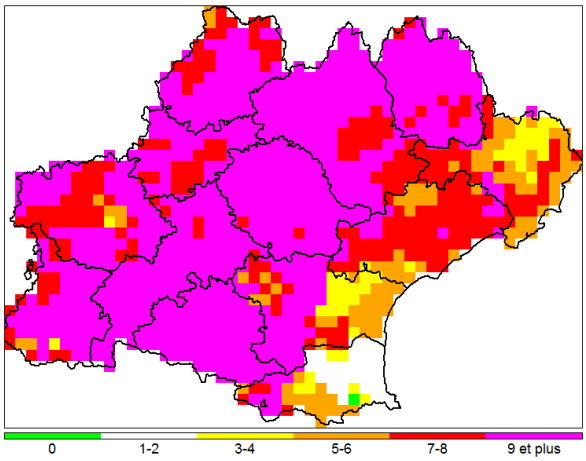
Le modèle allemand est en retrait par rapport aux deux autres modèles même s'il voit lui aussi plutôt un nombre d'années plus important que celui attendu.

Illustration 51: SSWI en été : de haut en bas, modèle Français, Canadien et Allemand

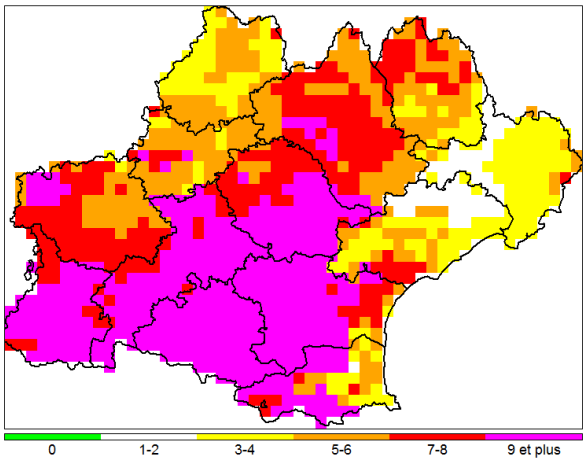
- ***SSWI en automne***



modèle français – SRES A1B – horizon 2046-2065



modèle canadien – SRES A1B – horizon 2046-2065



modèle allemand – SRES A1B – horizon 2046-2065

En automne, c'est le modèle français qui est un peu en retrait par rapport aux deux autres. Ces derniers voient en effet un grand nombre d'automnes avec un SSWI 3 mois anormalement bas : plus d'une année sur deux sur les départements de l'Ariège, la Haute-Garonne, le Tarn, les Hautes Pyrénées et une partie de l'Aude, alors qu'actuellement ce type d'événement ne revient qu'une année sur 10 en moyenne.

Le modèle français diverge sensiblement : par exemple sur le Tarn il ne prévoit pas d'assèchement en automne, et c'est l'inverse sur le littoral de l'Aude que les autres modèles ont tendance à épargner (relativement).

Illustration 52: SSWI en automne : de haut en bas, modèle Français, Canadien et Allemand

2.5 Indicateur neige P_NEIGE

Pour cet indicateur, les simulations en projection ont été réalisées avec 4 modèles de climat régionaux forcés chacun par 1 modèle de climat global (parmi 3 modèles de climat globaux différents) :

- **CLMcom-CCLM4-8-17/MPI-M-MPI-ESM-LR** : modèle de climat régional ***CCLM4-8-17*** de la communauté de modélisation CLM (contribution des groupes BTU, DWD, ETHZ, UCD et WEGC), forcé par le modèle de climat global ***MPI-ESM-LR*** de l'institut MPI-CSC (Climate Service Center (CSC), Hambourg, Allemagne)

- **MPI-CSC-REMO2009/MPI-M-MPI-ESM-LR** : modèle de climat régional ***REMO2009*** du MPI-CSC forcé par le modèle de climat global ***MPI-ESM-LR*** du même institut

- **IPSL-INERIS-WRF331F/IPSL-IPSL-CM5A-MR** : modèle de climat régional ***WRF331F*** de l'IPSL (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Institut Pierre Simon Laplace, CEA/CNRS/UVSQ, France) et de l'INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, Verneuil en Halatte, France/ Institut Pierre Simon Laplace, CNRS, France), forcé par le modèle de climat global ***IPSL-CM5A-MR*** de l'IPSL

- **SMHI-RCA4/ICHEC-EC-EARTH** : modèle de climat régional ***RCA4*** du SMHI (Rossby Centre, Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrkoping Suède), forcé par le modèle de climat global ***EC-EARTH*** développé par le consortium EC EARTH (22 instituts européens)

Ces 4 simulations en projection ont été réalisées à partir de simulations EURO-CORDEX à 0,11° de résolution (EUR-11), en scénario RCP 4.5, dé-biaisées grâce à la méthode ADAMONT. Celles-ci ont ensuite alimenté le modèle de neige SURFEX/ISBA-Crocus afin d'obtenir des projections du SWE, qui ont finalement servi à calculer cet indicateur.

Les graphes ci-après indiquent, pour chaque département incluant une partie montagneuse, l'évolution à l'horizon moyen 2020-2060 de l'indice « équivalent neige-pluie » (**S**now **W**ater **E**quivalent) pour le scénario moyen RCP4.5.

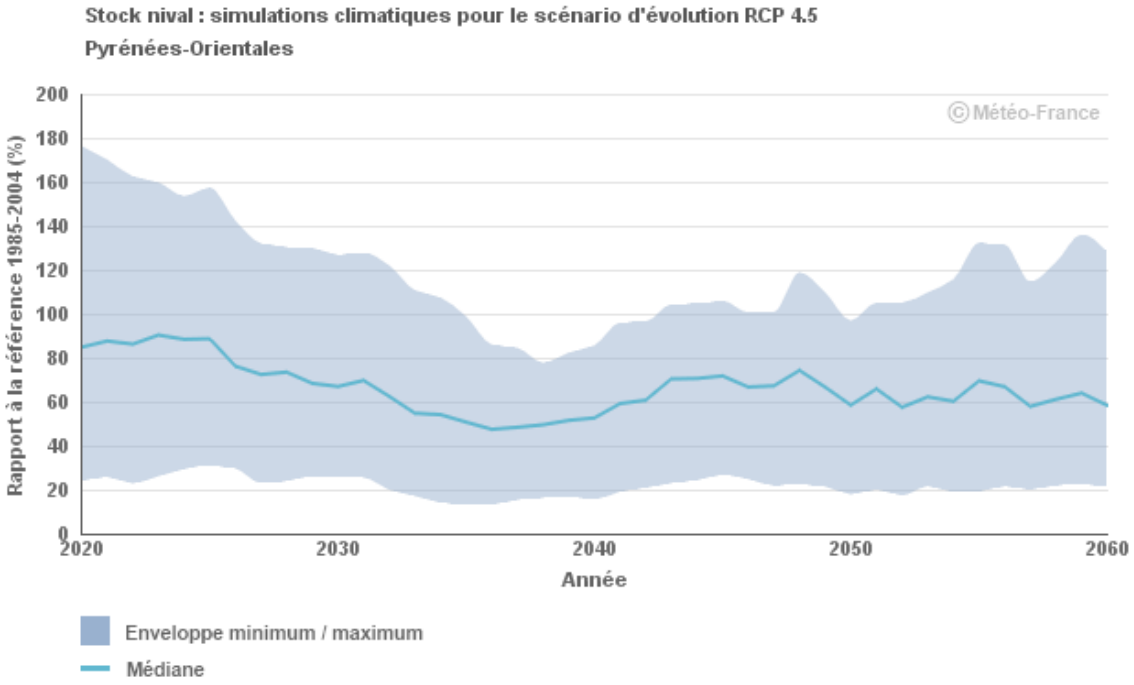


Illustration 53: Evolution de l'indice SWE pour les Pyrénées Orientales – Horizon 2020-2060 et RCP4.5

En climat futur avec un scénario médian de type RCP4.5, le stock nival médian dans les Pyrénées Orientales est prévu de diminuer régulièrement de 2020 à 2040 puis se stabiliser au-delà avec des valeurs moyennes de l'ordre de 60 % par rapport aux valeurs actuelles tandis que les minimales moyennes seront de l'ordre de 20 % et les maximales entre 80 % et 130 %

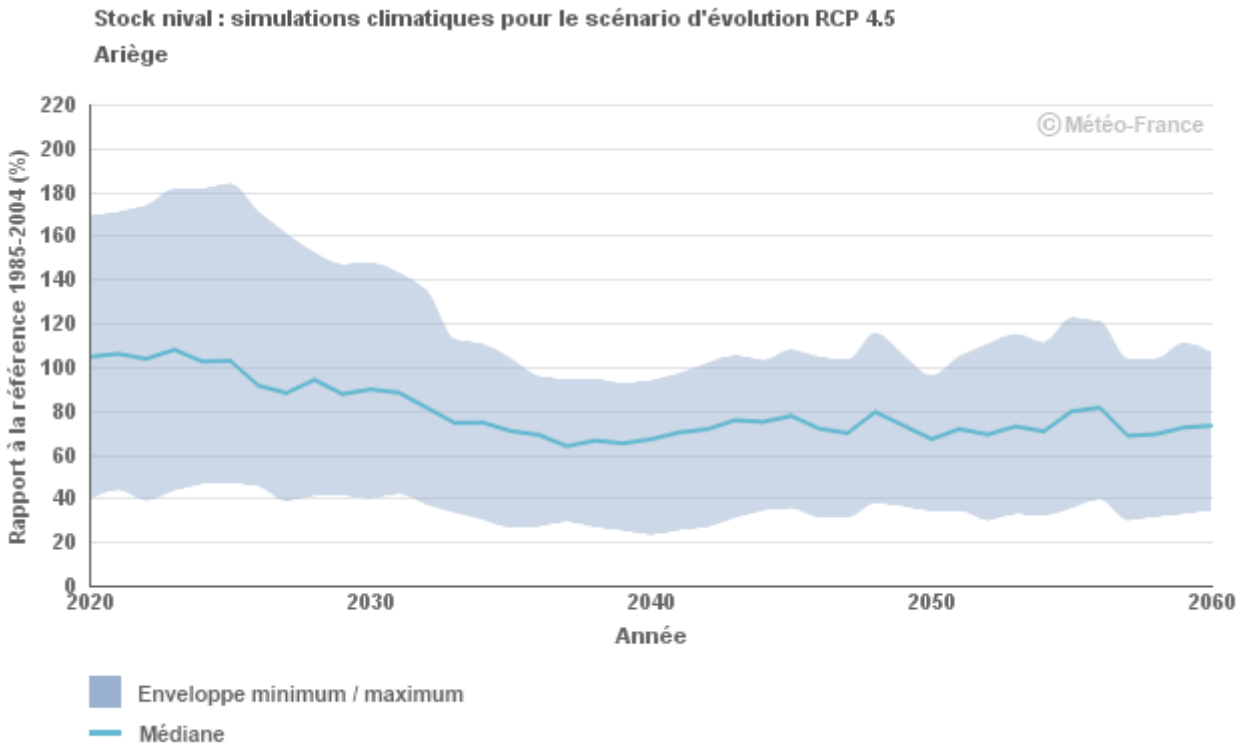


Illustration 54: Evolution de l'indice SWE pour l'Ariège – Horizon 2020-2060 et RCP4.5

En climat futur avec un scénario médian de type RCP4.5, le stock nival médian en Ariège est prévu de diminuer régulièrement de 2020 à 2040 puis se stabiliser au-delà avec des valeurs moyennes de l'ordre de 70 % par rapport aux valeurs actuelles tandis que les minimales moyennes seront de l'ordre de 30 % et les maximales entre 90 % et 120 %.

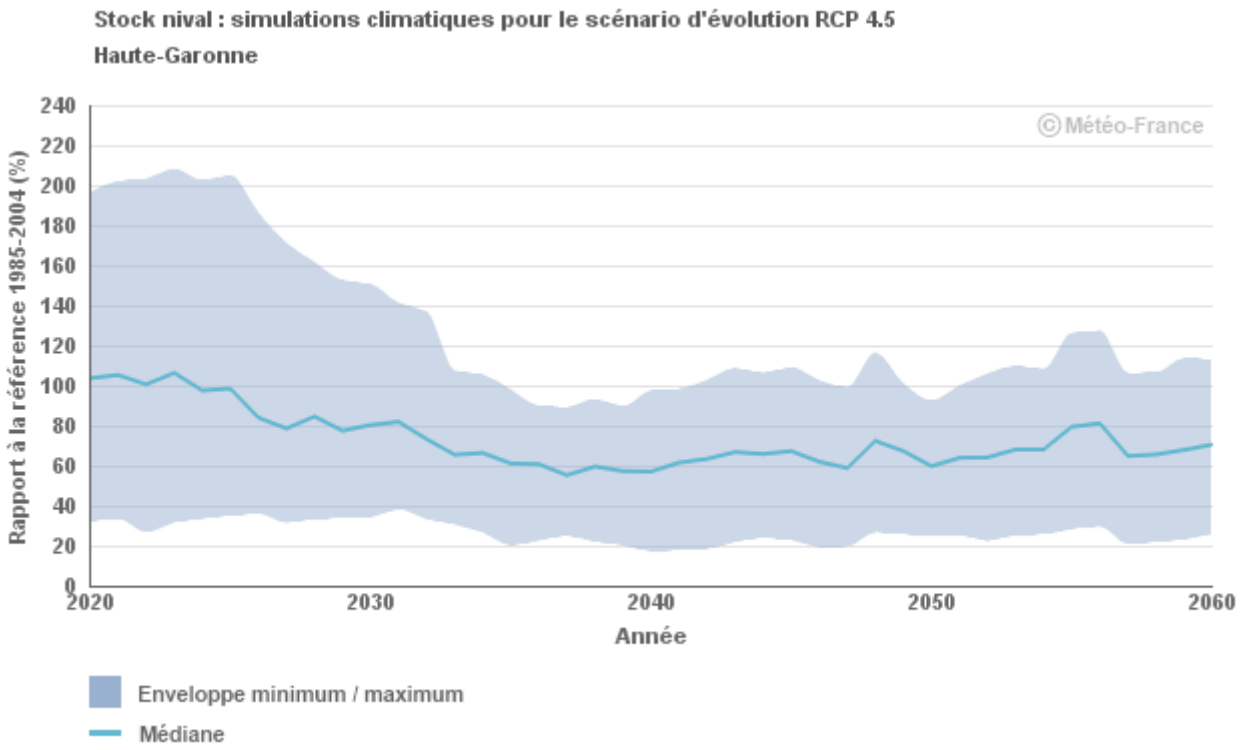


Illustration 55: Evolution de l'indice SWE pour la Haute-Garonne – Horizon 2020-2060 et RCP4.5

En climat futur avec un scénario médian de type RCP4.5, le stock nival médian en Haute-Garonne est prévu de diminuer régulièrement de 2020 à 2040 puis se stabiliser au-delà avec des valeurs moyennes de l'ordre de 70 % par rapport aux valeurs actuelles tandis que les minimales moyennes seront de l'ordre de 30 % et les maximales entre 90 % et 120 %.

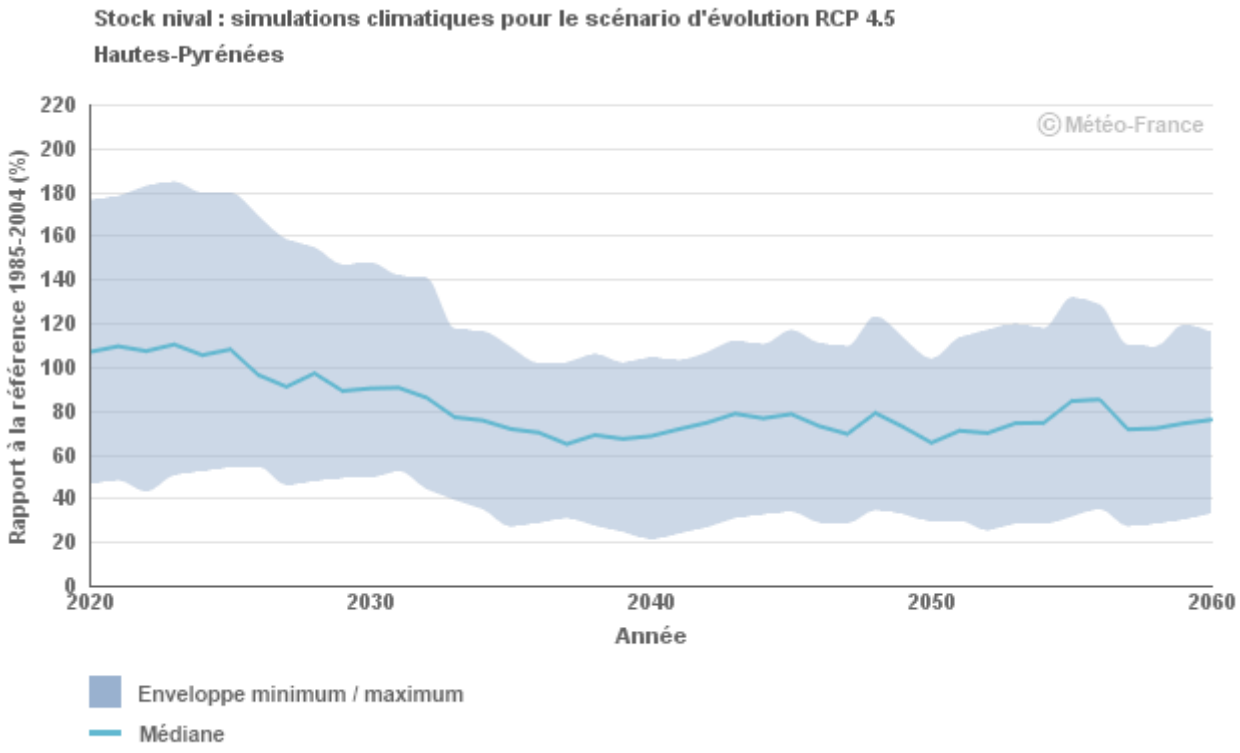


Illustration 56: Evolution de l'indice SWE pour les Hautes-Pyrénées – Horizon 2020-2060 et RCP4.5

En climat futur avec un scénario médian de type RCP4.5, le stock nival médian dans les Hautes Pyrénées est prévu de diminuer régulièrement de 2020 à 2040 puis se stabiliser au-delà avec des valeurs moyennes de l'ordre de 75 % par rapport aux valeurs actuelles tandis que les minimales moyennes seront de l'ordre de 30 % et les maximales entre 100 % et 120 %

2.6 SYNTHESE : PROJECTIONS SUR L'EVOLUTION DE LA RESSOURCE EN EAU SUR LA REGION OCCITANIE

Des projections climatiques sur les paramètres de la ressource en eau ont été analysées selon un scénario médian de type RCP4.5 ou SRES et un horizon temporel milieu de siècle.

Il en ressort principalement :

— la poursuite de l'augmentation des températures et son corollaire en termes d'évaporation

— la poursuite de la diminution du stock nival en montagne due à la fonte plus rapide du manteau neigeux au printemps et une stabilisation vers les années 2040 à un niveau de l'ordre de 60 à 75 % du niveau actuel

— un maintien global du taux de précipitation

— une augmentation des fréquences d'années anormalement sèches, que ce soit du point de vue de la sécheresse météorologique ou de celui de la sécheresse agricole où cette augmentation est encore plus importante.

— une augmentation de la surface moyenne annuelle de la région Occitanie anormalement sèche, très nette lorsqu'il s'agit de la sécheresse des sols.

FIN DE DOCUMENT

Index des illustrations

Illustration 1: Schéma simplifié de la chaîne de modélisation SAFRAN-ISBA-MODCOU. .10
Illustration 2: Moyenne annuelle de référence 1981-2010 des précipitations.....12
Illustration 3: Exemples de rapports à la normale de cumuls annuels de précipitations sur la région Occitanie.....13
Illustration 4: Tendances des cumuls de précipitations annuelles sur la période 1961-2012. En mm tous les 10 ans.....13
Illustration 5: Tendances des cumuls de précipitations de la saison d'étiage (juin-octobre) sur la période 1961-2012. En mm tous les 10 ans.....14
Illustration 6: Tendances des cumuls de précipitations de la saison de recharge (septembre-mars) sur la période 1961-2012. En mm tous les 10 ans.....15
Illustration 7: Tendances du nombre de jours annuels de précipitation (RR > 1 mm) calculé sur la période 1961-2012. En nombre de jours tous les 10 ans.....16
Illustration 8: Tendances du nombre de jours annuels de précipitation (RR > 20 mm) calculé sur la période 1961-2012. En nombre de jours tous les 10 ans.....17
Illustration 9: Pourcentage annuel de la surface touchée par une sécheresse météorologique en région Occitanie (période 1959 – 2015).....18
Illustration 10: Pourcentage automnal de la surface touchée par une sécheresse météorologique en région Occitanie (1959 – 2015).....19
Illustration 11: Pourcentage hivernal de la surface touchée par une sécheresse météorologique en région Occitanie (1959 – 2015).....19
Illustration 12: Pourcentage printanier de la surface touchée par une sécheresse météorologique en région Occitanie (période 1959 – 2015).....20
Illustration 13: Pourcentage estival de la surface touchée par une sécheresse météorologique en région Occitanie (période 1959 – 2015).....20
Illustration 14: Tendances des moyennes annuelles des températures minimales (1/2 cercles gauche) et températures maximales (1/2 cercle droit) calculé sur la période 1961-2012. En °C tous les 10 ans.....22
Illustration 15: Tendances des moyennes de températures minimales (1/2 cercles gauche) et températures maximales (1/2 cercle droit) pour la saison d'étiage (juin-octobre) calculé sur la période 1961-2012. En °C tous les 10 ans.....23
Illustration 16: Tendances des moyennes de températures minimales (1/2 cercles gauche) et températures maximales (1/2 cercle droit) pour la saison de recharge (septembre-mars) calculé sur la période 1961-2012. En °C tous les 10 ans.....24
Illustration 17: Tendances du nombre annuel de jours chauds calculé sur la période 1961-

2012. En nombre de jour tous les 10 ans.....25
Illustration 18: Evolution du SWI annuel sur la région Occitanie (périodes 1961 – 1990 et 1981 – 2010).....26
Illustration 19: Pourcentage annuel de la surface touchée par une sécheresse agricole en région Occitanie (période 1959 – 2015).....27
Illustration 20: Pourcentage automnal de la surface touchée par une sécheresse agricole en région Occitanie (période 1959 – 2015).....29
Illustration 21: Pourcentage hivernal de la surface touchée par une sécheresse agricole en région Occitanie (période 1959 – 2015).....29
Illustration 22: Pourcentage printanier de la surface touchée par une sécheresse agricole en région Occitanie (période 1959 – 2015).....30
Illustration 23: Pourcentage estival de la surface touchée par une sécheresse agricole en région Occitanie (période 1959 – 2015).....30
Illustration 24: Neige Stock nival au 1er mai sur les Pyrénées Orientales.....31
Illustration 25: Neige Stock nival au 1er mai Ariège.....32
Illustration 26: Neige Stock nival au 1er mai – Haute-Garonne.....33
Illustration 27: Neige Stock nival au 1er mai – Hautes Pyrénées.....34
Illustration 28: de haut en bas, quartiles 25 %, 50 % et 75 %. Écart de cumuls annuels par rapport à la référence 1976-2005.....40
Illustration 29: de haut en bas, quartiles 25 %, 50 % et 75 %. Écart de cumuls par rapport à la référence 1976-2005 pour la période de recharge (septembre à mars).....41
Illustration 30: de haut en bas, quartiles 25 %, 50 % et 75 %. Écart de cumuls par rapport à la référence 1976-2005 pour la période d'étiage (juin à octobre).....42
Illustration 31: de haut en bas, quartiles 25 %, 50 % et 75 %. Écart du nombre de jours par rapport à la référence 1976-2005.....43
Illustration 32: de haut en bas, quartiles 25 %, 50 % et 75 %. Écart du nombre de jours par rapport à la référence 1976-2005.....44
Illustration 33: SPI 12 mois : cartes du nombre d'années avec des valeurs atteignant ou dépassant la valeur décennale. Evolution de la surface couverte par ces valeurs décennales.....45
Illustration 34: Tableau de surface moyenne avec un SPI de durée de retour de 10 ans ou plus, en fonction du modèle et pour la période de référence et 2047-2064.....47
Illustration 35: SPI en hiver : de haut en bas, modèles Français, Canadien et Allemand...48
Illustration 36: SPI au printemps : de haut en bas, modèles Français, Canadien et Allemand.....49
Illustration 37: SPI en été : de haut en bas, modèles Français, Canadien et Allemand…..50
Illustration 38: SPI en automne : de haut en bas, modèles Français, Canadien et Allemand 51
Illustration 39: de haut en bas, quartiles 25 %, 50 % et 75 %. Écart de la température minimale par rapport à la référence 1976-2005.....54
Illustration 40: de haut en bas, quartiles 25 %, 50 % et 75 %. Écart de la température minimale par rapport à la référence 1976-2005 pour la période de recharge (septembre à mars).....55
Illustration 41: de haut en bas, quartiles 25 %, 50 % et 75 %. Écart de la température minimale par rapport à la référence 1976-2005 pour la période d'étiage (juin à octobre). .56
Illustration 42: de haut en bas, quartiles 25 %, 50 % et 75 %. Écart de la température maximale par rapport à la référence 1976-2005.....57
Illustration 43: de haut en bas, quartiles 25 %, 50 % et 75 %. Écart de la température maximale par rapport à la référence 1976-2005 pendant la période de recharge

(septembre à mars).....58
Illustration 44: de haut en bas, quartiles 25 %, 50 % et 75 %. Écart de la température maximale par rapport à la référence 1976-2005 pendant la période d'étiage (juin à octobre).....59
Illustration 45: de haut en bas, quartiles 25 %, 50 % et 75 %. Écart du nombre de jours où la température dépasse 25 °C par rapport à la référence 1976-2005.....60
Illustration 46: de haut en bas, quartiles 25 %, 50 % et 75 %. Écart du nombre de jours où la température dépasse 25 °C par rapport à la référence 1976-2005 pendant la période de recharge (septembre à mars).....61
Illustration 47: de haut en bas, quartiles 25 %, 50 % et 75 %. Écart du nombre de jours où la température dépasse 25 °C par rapport à la référence 1976-2005 pendant la période d'étiage (juin à octobre).....62
Illustration 48: Tableau de surface moyenne avec un SSWI de durée de retour de 10 ans ou plus, en fonction du modèle et pour la période de référence et 2047-2064.....65
Illustration 49: SSWI en hiver : de haut en bas, modèle Français, Canadien et Allemand. 67
Illustration 50: SSWI au printemps : de haut en bas, modèle Français, Canadien et Allemand.....68
Illustration 51: SSWI en été : de haut en bas, modèle Français, Canadien et Allemand….69
Illustration 52: SSWI en automne : de haut en bas, modèle Français, Canadien et Allemand.....70
Illustration 53: Evolution de l'indice SWE pour les Pyrénées Orientales – Horizon 2020-2060 et RCP4.5.....72
Illustration 54: Evolution de l'indice SWE pour l'Ariège – Horizon 2020-2060 et RCP4.5. .73
Illustration 55: Evolution de l'indice SWE pour la Haute-Garonne – Horizon 2020-2060 et RCP4.5.....74
Illustration 56: Evolution de l'indice SWE pour les Hautes-Pyrénées – Horizon 2020-2060 et RCP4.5.....75

Bibliographie

Durand, Y., Giraud, G., Laternser, M., Etchevers, P., Mérindol, L., and Lesaffre, B. : Reanalysis of 44 yr of climate in the French Alps (1958–2002) : methodology, model validation, climatology, and trends for air temperature and precipitation, *J. Appl. Meteor. Climat.*, 48, 429–449, doi :10.1175/2008JAMC1808.1, 2009.

Gibelin A.-L., Dubuisson B., Deaux N., Jourdain S., Laval L., Piquemal J.-M., Mestre O., Dennetière D., Desmidt S., Tamburini A., 2014. Évolution de la température en France depuis les années 1950. *La Météorologie*, 87, 45-53.

Moisselin, J.-M., Dubuisson, B., (2006), Evolution des extrêmes de températures et de précipitation en France au XXe siècle. *La Météorologie*, vol. 54, p. 33-42.

Ouzeau G., Déqué M., Jouini M., Planton S, Vautard R., 2014. Le climat de la France au XXIe siècle. Rapport de la Direction générale de l'énergie et du climat, www.developpement-durable.gouv.fr, 64 p.

Soubeyroux, J.-M., Kitova, N., Blanchard, M., Vidal, J.-P ; Martin, E., Dandin, P. (2012), Sècheresse des sols en France et changement climatique, *La Météorologie*, 78, pp 21-30

Vautard R., Van Oldenborgh G.-J., Thao S., Dubuisson B., Lenderink G., Ribes A., Planton S., Soubeyroux J.-M. and Yiou P. (2015), Extreme Fall 2014 Precipitation in the Cévennes Mountains. *Explaining Extreme Events Of 2014 From A Climate Perspective, Special Supplement to the Bulletin of the American Meteorological Society Vol.96, No. 12, December 2015*