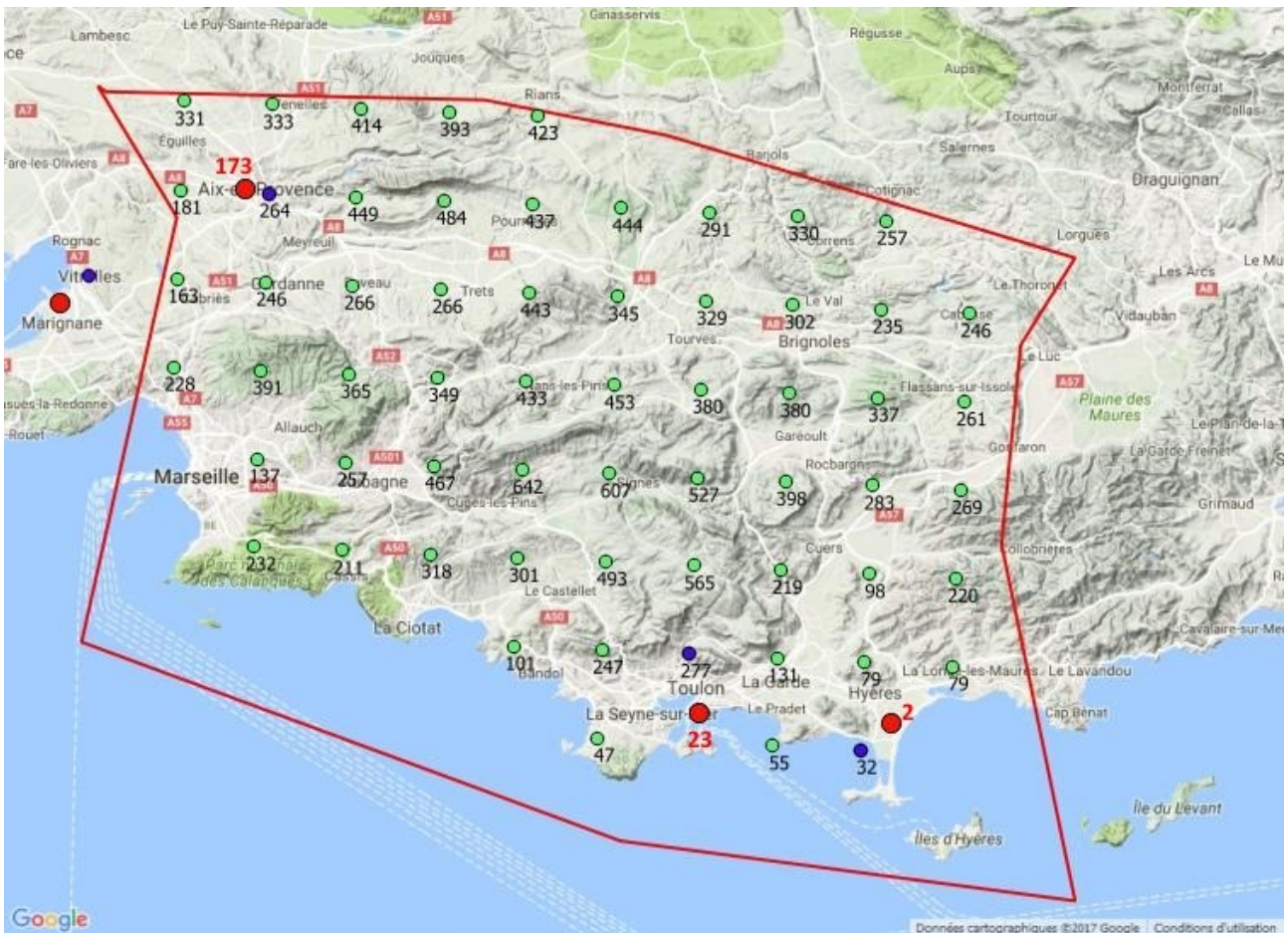




L'évolution du climat au XXI^e siècle sur la zone « Provence littorale »

Les points de grille DRIAS (cf annexe 1) pris pour illustrer l'évolution sur cette zone sont ceux les plus proches d'Aix-en-Provence (Bouches-du-Rhône), de Toulon et de Hyères (Var) (→ points bleus sur la carte ci-dessous) ; leur altitude est respectivement de 264, 277 et 32 mètres. Si on compare aux 173, 23 et 2 mètres pour les altitudes des stations représentatives correspondantes (→ points rouges sur la carte), on voit que les points DRIAS sont plus élevés que les stations de mesure, en particulier pour Aix-en-Provence et Toulon.



Nota Bene : Dans l'étude du climat passé de cette zone « Provence littorale », il n'avait pas été possible de calculer des tendances pour les températures et les précipitations sur les 3 stations météorologiques pour des raisons d'homogénéité des séries de mesures. Les tendances pour les températures avaient été calculées pour Hyères et Aix-en-Provence alors que les tendances pour les précipitations l'avaient été pour Aix-en-Provence et Toulon. Pour être cohérent, nous avons gardé cette spécificité dans le calcul des tendances du climat futur : ainsi, Toulon n'apparaîtra pas dans les

tableaux liés au paramètre « Température » alors que dans les tableaux liés au paramètre « précipitations », c'est Hyères qui n'apparaîtra pas.

Comme sur l'ensemble du territoire métropolitain, le changement climatique se traduit principalement par une poursuite de la hausse des températures. L'impact est variable selon le scénario d'émission de gaz à effet de serre considéré. Les deux scénarios principaux (scénario « médian » RCP 4.5 et scénario « laisser faire » RCP 8.5) ne présentent pas de différences trop importantes avant le milieu du 21^e siècle, mais leurs trajectoires se différencient nettement ensuite.

- **Températures**

Sur la période 2020 – 2100, on prévoit une augmentation des températures moyennes annuelles d'environ 0,2 °C par décennie selon le scénario médian et de plus de 0,4 °C par décennie pour le scénario le plus défavorable, soit un doublement de la hausse des températures en fonction du scénario. On note que la différence entre les deux scénarios est faible jusque vers le milieu du 21^e siècle, mais augmente rapidement ensuite.

La fourchette d'incertitude reste assez importante, autour de 1 °C en plus ou en moins par rapport à la valeur médiane en fin de siècle.

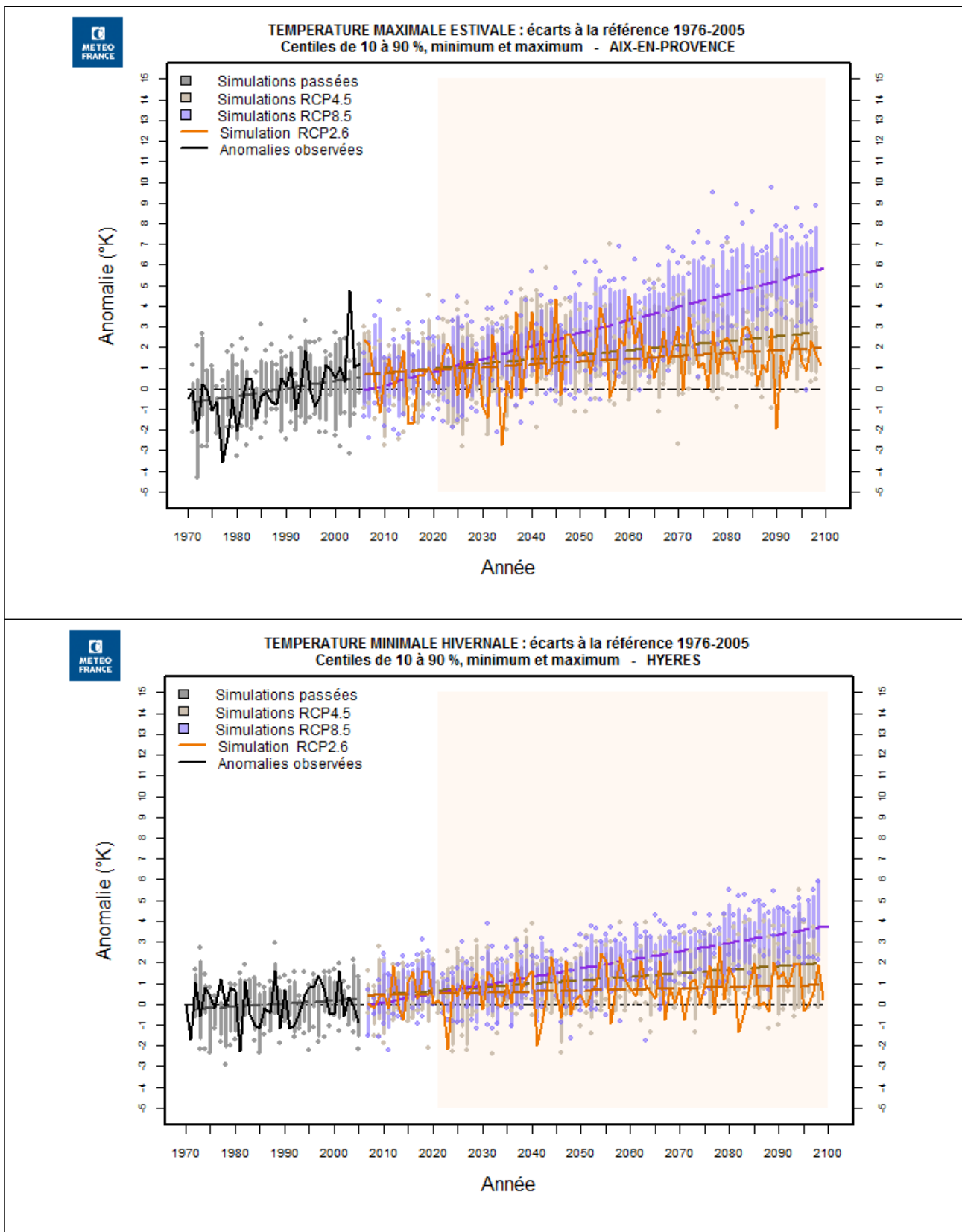
Si on décline l'analyse à échelle saisonnière, on constate que l'augmentation serait plus importante pour les températures maximales de l'été, ainsi que pour les minimales de l'hiver. Dans ce cas, la hausse moyenne atteindrait les 0,5° par décennie dans l'intérieur. Pour les postes se trouvant en bordure du littoral, la variation est un peu amortie par l'influence de la mer méditerranée toute proche. Ces anomalies plus grandes sont logiquement accompagnées d'une incertitude plus importante des projections climatiques, qui dépasse ici les 1,5° en plus ou en moins.

En définitive, selon le paramètre étudié et pour la fin du siècle du 21^e siècle, les augmentations de températures, par rapport à la normale de fin du 20^e siècle, atteindraient :

- pour le scénario « laisser faire » d'émission de gaz à effet de serre (RCP 8,5), de 4 à 5 °C en moyenne, la fourchette haute pouvant atteindre les 6 à 7 °C.
- pour le scénario « médian » d'émission de gaz à effet de serre (RCP 4.5), de 2 °C en moyenne avec une fourchette haute entre 3 et 4 °C.

Les graphiques de la page suivante visualisent l'évolution des projections climatiques pour la température maximale estivale à Aix-en-Provence et de la température minimale hivernale à Hyères. La signification précise des éléments de ces graphiques est donnée en annexe 1.

Ces graphiques illustrent bien à la fois l'évolution globale et la variation interannuelle qui reste très marquée.



On constate dans ces deux graphiques que seule une réduction importante des émissions de gaz à effet de serre (représentée par le scénario RCP2.6) permettrait une stabilisation des températures (autour de +1 °C pour les minimales d’hiver à Hyères et +2 °C pour les maximales d’été à Aix).

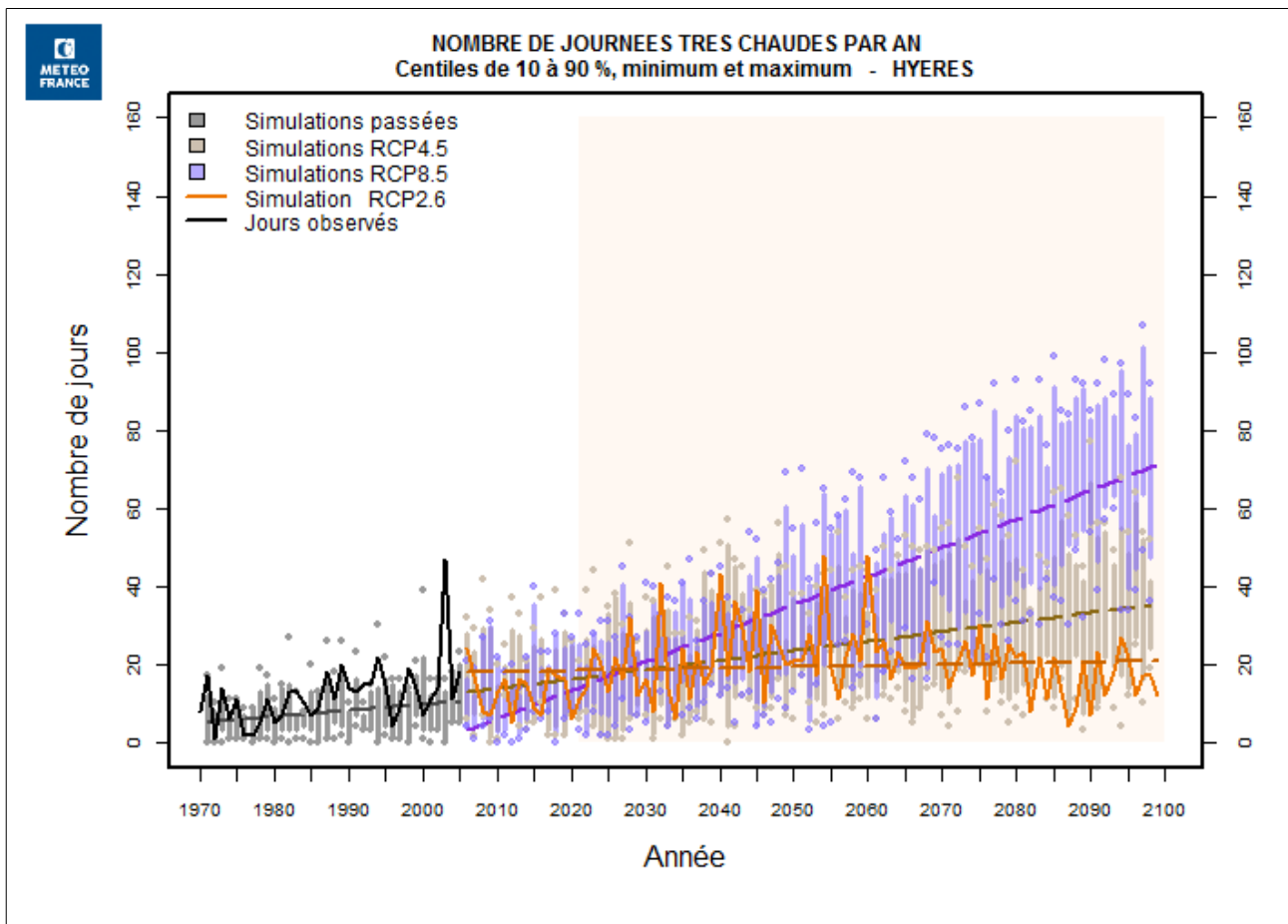
Le tableau ci-dessous récapitule les différentes valeurs projetées pour les anomalies des températures moyennes annuelles, des températures minimales hivernales et des températures maximales estivales, selon les scénarios d'émission et l'échéance (voir explication détaillée des tableaux en annexe 2).

Anomalies de températures (en degrés) par rapport à la période de référence 1976-2005					
Paramètre / Période	Poste	RCP 4.5 autour de 2050	RCP 8.5 autour de 2050	RCP 4.5 autour de 2085	RCP 8.5 autour de 2085
T. moyenne / Année	Aix-en-Provence	0,4 / 1,4 / 2,2	0,8 / 1,8 / 2,9	1,0 / 1,8 / 2,8	2,7 / 3,8 / 5,0
	Hyères	0,4 / 1,3 / 2,0	0,9 / 1,7 / 2,7	0,9 / 1,7 / 2,7	2,3 / 3,5 / 4,6
T. Minimale / Hiver	Aix-en-Provence	-0,4 / 1,2 / 2,7	0,9 / 2,2 / 4,1	0,1 / 1,8 / 3,2	3,1 / 4,8 / 6,4
	Hyères	-0,1 / 1,2 / 2,4	0,9 / 2,1 / 3,7	0,3 / 1,8 / 3,4	2,8 / 4,3 / 5,9
T. maximale / Été	Aix-en-Provence	0,1 / 2,0 / 3,6	0,6 / 2,3 / 4,5	0,7 / 2,1 / 4,2	3,1 / 5,2 / 7,0
	Hyères	0,3 / 1,6 / 2,9	0,7 / 2,1 / 3,6	0,8 / 2,1 / 3,5	2,6 / 4,3 / 5,7

Dans le scénario « laisser faire », l'anomalie de température peut atteindre sur cette zone 3,5 à 5 degrés, et même 7 degrés pour les températures maximales à Aix-en-Provence pour les modèles les plus pessimistes certaines années.

- **Phénomènes liés aux températures :**

En cohérence avec l'augmentation prévue pour les températures, le nombre de journées très chaudes, avec des températures maximales supérieures à 30 °C, serait en hausse au cours du 21^e siècle ; à titre d'exemple, en fin de siècle, il doublerait quasiment à Hyères, en passant de 22 à 40 jours pour le scénario « médian », mais ferait plus que tripler en atteignant 75 jours en moyenne pour le scénario « laisser faire ».



Le tableau suivant résume l'évolution entre aujourd'hui et la fin du siècle de deux autres marqueurs associés aux températures minimales : le nombre de nuits tropicales (où la température reste supérieure à 20 °C) et le nombre de jours de gel (où la température descend en dessous de 0 °C).

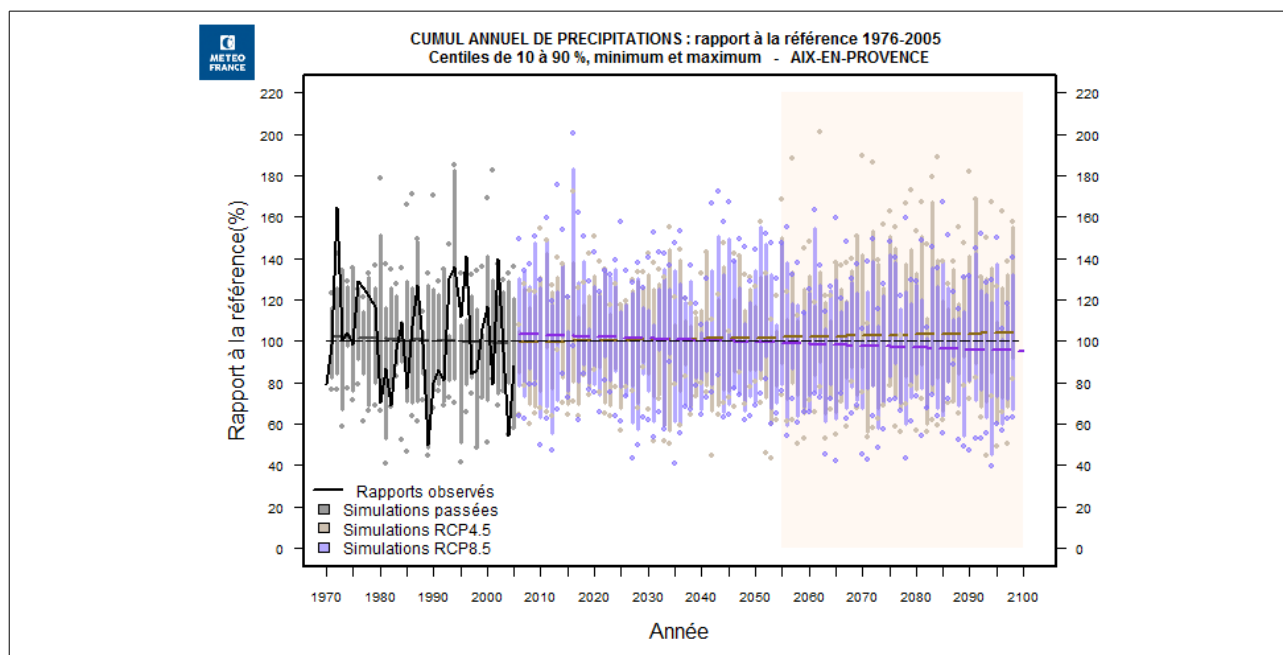
Nombre annuel	Poste	Aujourd'hui	RCP 4.5 autour de 2085	RCP 8.5 autour de 2085
Nuits tropicales (minimales >20 °C)	Aix-en-Provence	9	30	76
	Hyères	18	63	104
Jours de gel (minimales <0 °C)	Aix-en-Provence	40	21	10
	Hyères	7	2	0

On constate une augmentation importante des nuits tropicales et une baisse sensible du nombre de jours de gel, avec une disparition des gelées en bord de mer quel que soit le scénario.

- **Précipitations**

Dans les projections climatiques pour le 21^e siècle, les précipitations annuelles continuent de se caractériser par une forte variabilité d'une année sur l'autre, ce qui a tendance à masquer les tendances.

Le graphique ci-dessous illustre bien à la fois cette faible tendance et la variabilité interannuelle.



Le tableau ci-dessous présente le rapport entre les cumuls de précipitations et la normale de référence 1976 – 2005 (médiane et bornes de l'intervalle contenant 80 % des résultats des modèles), pour les deux stations considérées de la zone et pour deux périodes : l'année et l'automne (qui est la saison la plus pluvieuse).

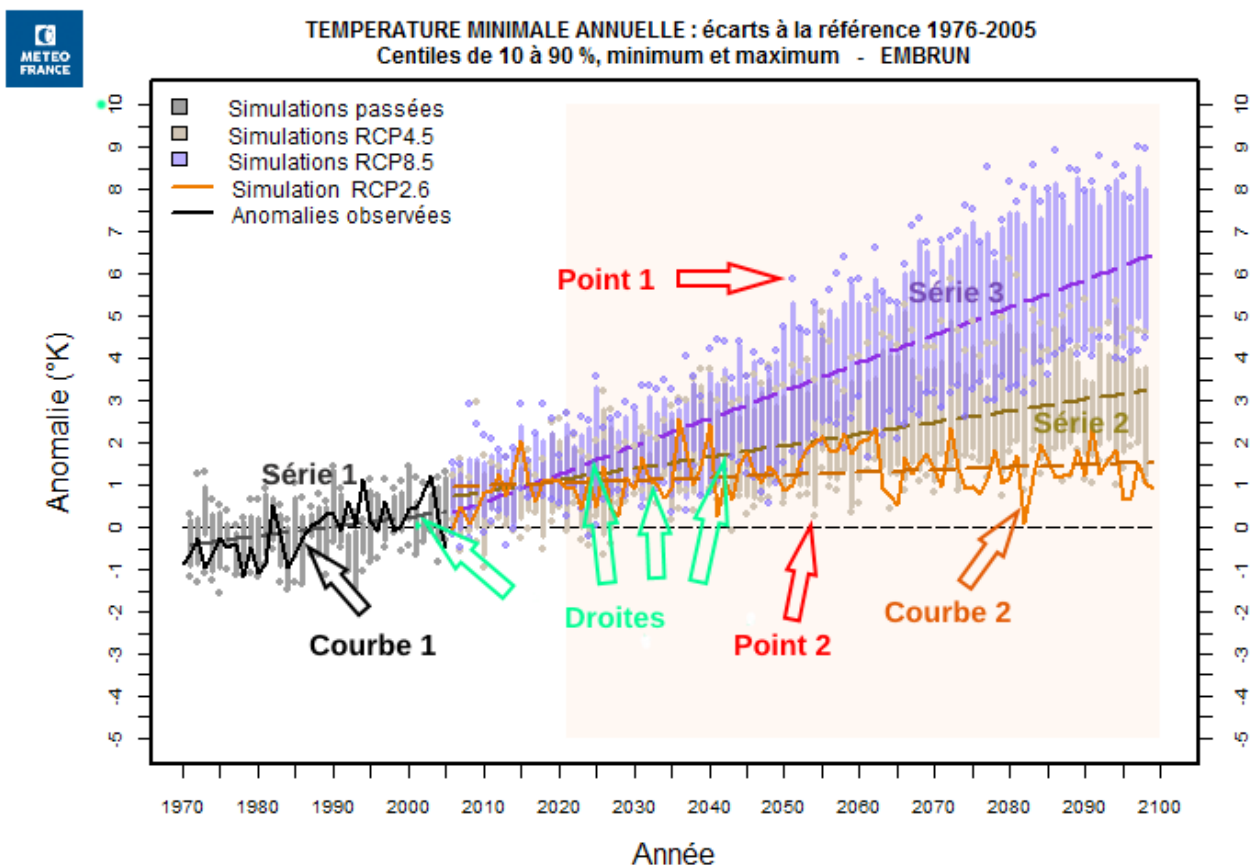
Rapport à la référence en %					
Période	Poste	RCP 4.5 autour de 2050	RCP 8.5 autour de 2050	RCP 4.5 autour de 2085	RCP 8.5 autour de 2085
Année	Aix-en-Provence	71 / 98 / 128	69 / 96 / 136	70 / 102 / 145	63 / 98 / 129
	Toulon	67 / 94 / 134	64 / 94 / 134	68 / 102 / 144	55 / 93 / 126
Automne	Aix-en-Provence	46 / 89 / 150	40 / 90 / 167	47 / 90 / 156	33 / 86 / 157
	Toulon	48 / 88 / 159	37 / 86 / 168	46 / 94 / 176	28 / 80 / 154

Les précipitations seraient un peu plus faibles en fin de siècle sauf en cumul annuel avec le scénario RCP 4.5 où les précipitations seraient du même ordre que maintenant. Cette petite tendance à la baisse est un peu plus marquée pour les pluies automnales.

Le signal demeure toutefois fragile, car l'amplitude des résultats est très étendue, allant de 0,3 à 1,5 fois la normale. Cette dispersion des résultats peut être expliquée en partie par les divergences entre les modèles de projection climatique, mais aussi par la forte variabilité interannuelle des cumuls de précipitation.

Annexe 1 : Description des diagrammes de tendance climatique

Tous les graphiques de tendance se présentent de la même façon, à l'exemple du graphique ci-dessous.



Pour chacun des paramètres étudiés, le terme « référence » renvoie à la moyenne sur la période 1976-2005

Courbe 1 'en trait plein noir' :

Écart ou rapport à la référence du paramètre observé.

Courbe 2 'en trait plein bistre' :

Écart ou rapport à la référence du paramètre simulé par le modèle Aladin-Climat (Météo-France) pour le scénario RCP 2.6 (scénario avec politique climatique) sur la période 2006-2100. C'est le seul scénario pour lequel il n'y a pas de panache, car un seul modèle a étudié ce scénario.

Série 1 'panache gris' :

Écart ou rapport à la référence du paramètre simulé par un ensemble de modèles (Euro-Cordex) sur la période 1970 – 2005.

Le panache correspond à l'intervalle de plus grande probabilité (entre les centiles 10 % et 90 %) et contient donc 80 % des résultats des modèles.

Série 2 'panache beige' :

Écart ou rapport à la référence du paramètre simulé par un ensemble de modèles (Euro-Cordex) pour le scénario RCP 4.5 sur la période 2006-2100.

Le panache correspond à l'intervalle de plus grande probabilité (entre les centiles 10 % et 90 %) et contient donc 80 % des résultats des modèles.

Série 3 'panache mauve' :

Écart ou rapport à la référence du paramètre simulé par un ensemble de modèles (Euro-Cordex) pour le scénario RCP 8.5 sur la période 2006-2100.

Le panache correspond à l'intervalle de plus grande probabilité (entre les centiles 10 % et 90 %) et contient donc 80 % des résultats des modèles.

Point 1 :

Valeur maximale d'écart ou de rapport à la référence du paramètre étudié atteinte par un modèle parmi l'ensemble des modèles du scénario considéré.

Point 2 :

Valeur minimale d'écart ou de rapport à la référence du paramètre étudié atteinte par un modèle parmi l'ensemble des modèles du scénario considéré.

Droites 'en pointillés' :

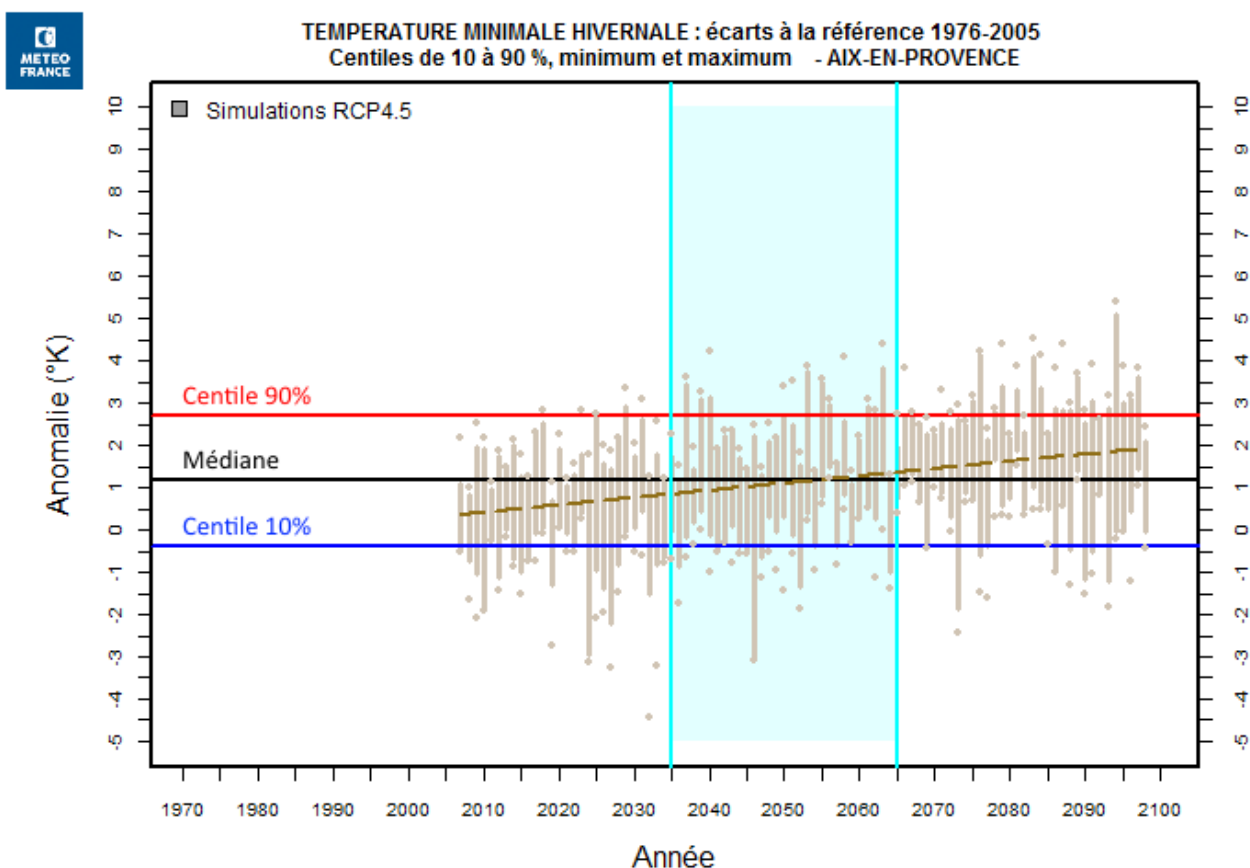
Régressions linéaires du paramètre étudié pour chaque scénario. Elles donnent la tendance moyenne du paramètre sur le 21^e siècle.

Annexe 2 : Description du contenu des tableaux de résultats

Les tableaux d'anomalies ou d'écarts sont construits à partir des statistiques calculées sur l'ensemble multimodèle Euro-Cordex au point de grille DRIAS le plus proche de la station concernée.

La période « autour de 2050 » correspond à la prise en compte des valeurs de tous les modèles sur la période de 30 ans centrée sur l'année 2050, soit 2035 – 2065. De même, la période « autour de 2085 » fait référence aux valeurs des années 2070 – 2100.

Exemple d'analyse pour les anomalies de températures minimales hivernales pour le point le plus proche de la station d'Aix-en-Provence et le scénario « médian » RCP 4.5 :



Dans le graphe qui précède, sur la période 2035-2065 (fond bleu) sont représentées les valeurs des anomalies de températures minimales pour chacune des 31 années et pour l'ensemble de 8 modèles disponibles pour la projection RCP 4.5.

Pour 8 modèles, sachant que la période est de 31 ans, on dispose de 248 valeurs.

Le centile 10 % est défini comme la valeur aT10 telle que 10 % des 248 anomalies de températures (25 valeurs) sont plus petites que aT10.

De même, le centile 90 % est défini comme la valeur aT90 d'anomalie de températures minimales telle que 10 % des anomalies sont supérieures à cette valeur aT90

80 % des anomalies (198 valeurs) sont donc comprises entre aT10 et aT90.

On définit également la médiane aT50 de ces 248 anomalies comme la valeur telle que la moitié de ces anomalies (124 valeurs) soient supérieures à aT50 et les autres valeurs soient inférieures à aT50.

		RCP 4.5 : scénario "médian"		RCP 8.5 : scénario "laisser faire"	
		↓		↓	
Paramètre / Période	Poste	RCP 4.5 autour de 2050	RCP 8.5 autour de 2050	RCP 4.5 autour de 2085	RCP 8.5 autour de 2085
T. moyenne / Année	Aix en Provence	0,4 / 1,4 / 2,2	0,8 / 1,8 / 2,9	1,0 / 1,8 / 2,8	2,7 / 3,8 / 5,0
	Hyères	0,4 / 1,3 / 2,0	0,9 / 1,7 / 2,7	0,9 / 1,7 / 2,7	2,3 / 3,5 / 4,6
T. Minimale / Hiver	Aix en Provence	-0,4 / 1,2 / 2,7	0,9 / 2,2 / 4,1	0,1 / 1,8 / 3,2	3,1 / 4,8 / 6,4
	Hyères	-0,1 / 1,2 / 2,4	0,9 / 2,1 / 3,7	0,3 / 1,8 / 3,4	2,8 / 4,3 / 5,9
T. maximale / Été	Aix en Provence	0,1 / 2,0 / 3,6	0,6 / 2,3 / 4,5	0,7 / 2,1 / 4,2	3,1 / 5,2 / 7,0
	Hyères	0,3 / 1,6 / 2,9	0,7 / 2,1 / 3,6	0,8 / 2,1 / 3,5	2,6 / 4,3 / 5,7

↙ Centile 10%
 ↘ Centile 90%
 ↑
Médiane

Dans l'exemple choisi,

- aT10 vaut -0,4 donc sur les 248 valeurs, 25 sont inférieures à -0,4 et 223 sont supérieures
- aT90 vaut 2,7 donc sur les 248 valeurs, 25 sont supérieures à 2,7 et 223 sont inférieures
- aT50 vaut 1,2, donc 124 valeurs sont supérieures à 1,2 et 124 sont inférieures

Ce qui se traduit par :

Autour des années 2050, 10 % des anomalies de températures minimales hivernales sont inférieures à -0,4 °C, 50 % sont inférieures à 1,2 °C, 50 % sont supérieures à 1,2 °C, 10 % sont supérieures à 2,7°C.

L'intervalle [-0,4 ; 2,7] contient donc 80 % des valeurs d'anomalies de températures minimales pour ce poste en hiver, avec ce scénario et sur cette période.

Cette méthode peut être appliquée pour n'importe quel paramètre, pour un scénario RCP et une période donnés.

Il est important de noter que le fait de calculer des centiles à partir d'un échantillon constitué de tous les modèles pour 30 années implique que nous prenons en compte non seulement l'incertitude liée au modèle **mais également l'incertitude liée à la variation naturelle interannuelle du climat.**

Annexe 3 : Description des données DRIAS

La modélisation climatique

Les simulations climatiques sont réalisées à partir de modèles de circulation générale, qui prennent en compte différents scénarios de référence de l'évolution du forçage radiatif appelés RCP (Representative Concentration Pathway). Par rapport aux modèles de prévision, une spécificité essentielle des modèles climatiques est de ne pas être du tout rappelé vers des observations. Le système climatique évolue totalement librement ; il reçoit de l'énergie sous forme de rayonnement solaire et en perd sous forme de rayonnement infrarouge émis vers l'espace. Le climat simulé (température, précipitations, etc.) est le résultat de cet ajustement entre énergie reçue et énergie perdue. La conservation de l'énergie, et de façon plus générale les échanges d'énergie, sont donc fondamentaux pour un modèle climatique, et leur modélisation est la première préoccupation des climatologues.

Ces modèles permettent d'élaborer des projections climatiques représentatives de différents scénarios possibles d'évolution du climat.

Les scénarios d'émission RCP

3 scénarios d'émission RCP sont considérés :

- RCP 8.5, correspondant à un scénario sans politique climatique (ou scénario « laisser-faire »)
- RCP 4.5, correspondant à un scénario avec politiques climatiques visant à stabiliser les concentrations en CO₂ (ou scénario « médian »).
- RCP 2.6, correspondant à un scénario avec politiques climatiques visant à faire baisser les concentrations en CO₂ (ou scénario « volontariste »)

Les projections climatiques utilisées

1. L'ensemble multi-modèle Euro-Cordex

Le principal livrable du projet Euro-Cordex est la mise à disposition sur l'Europe d'un ensemble de simulations climatiques basé sur différents modèles utilisant des descentes d'échelle statistiques et dynamiques, forcés par les modèles globaux utilisés dans le dernier rapport du GIEC.

Ce jeu de données a ensuite été retraité pour le territoire français en appliquant une méthode de correction statistique utilisant la ré-analyse Safran (cette ré-analyse 1959-2013 constitue la référence pour le climat observé). L'ensemble multi-modèle résultant est constitué de 8 à 10 modèles pour les projections climatiques utilisant les RCP4.5 et RCP8.5, et de 10 à 11 modèles pour les simulations du climat passé. Tous les résultats du modèle sont projetés sur la même grille,

d'environ 8 kilomètres de côté. En chaque point de la grille (points « DRIAS »), nous disposons ainsi de l'ensemble des résultats des modèles de l'ensemble Euro-Cordex.

2. Les produits statistiques élaborés : les centiles

L'approche multi-modèle permet de représenter la dispersion des modèles, c'est-à-dire l'ensemble des valeurs que peut prendre un paramètre donné, et ainsi prendre en compte l'incertitude liée à la modélisation. Le centile est chacune des 99 valeurs qui divisent les données triées en 100 parts égales, de sorte que chaque partie représente 1/100 de l'échantillon de population. Par exemple, la médiane, qui correspond au centile 50 %, est la valeur seuil pour laquelle 50 % des valeurs de la distribution sont plus élevées.

Dans notre cas, ce sont les centiles 10 %, 50 % et 90 % qui ont été retenus. L'intervalle entre ces 2 centiles représente en effet 80 % de la population et correspond donc aux valeurs les plus probables.

3. Le modèle Aladin-Climat

Pour le scénario d'évolution RCP 2.6 (scénario avec politiques climatiques visant à faire baisser les concentrations en CO₂), seul le modèle Aladin-Climat (Météo-France) était disponible et il n'a donc pas été possible de procéder à une approche multi-modèle avec calcul des centiles, comme cela a été fait pour les scénarios RCP 4.5 et 8.5.