

Projet AP3C

Adaptation des Pratiques Culturelles au Changement Climatique

***Climat, Changement Climatique et
méthodologie climatique du projet AP3C***
Documentation « experts » du Colloque - Mardi 4 juillet 2017



La Région
Auvergne-Rhône-Alpes



RÉGION
Nouvelle-Aquitaine



Avec la contribution financière
du compte d'affectation spéciale
«développement agricole et rural»

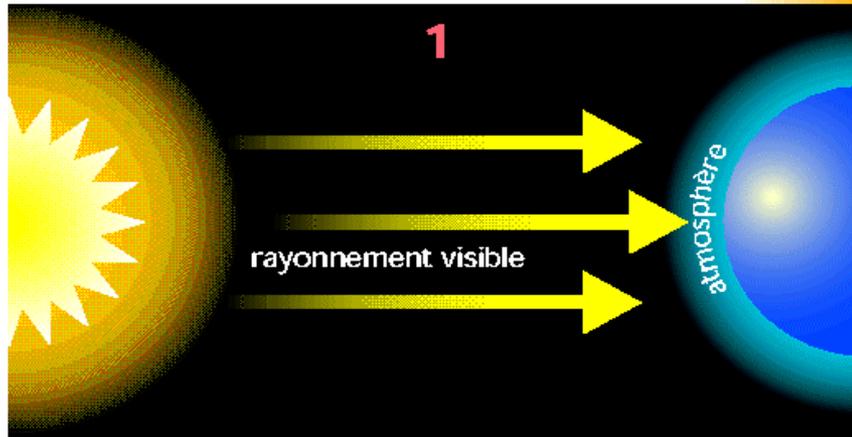
- 3 questions présentées à la suite :
 - Qu'est-ce que le Changement Climatique ?
 - Qu'est-ce que le climat ?
 - Quelle est la méthodologie climatique du projet AP3C ?

3

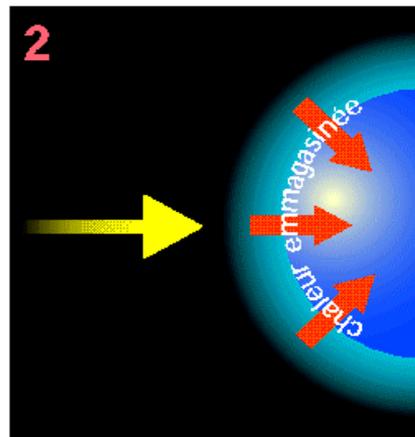
Qu'est-ce que le Changement Climatique ?

□ Principe de l'effet de serre

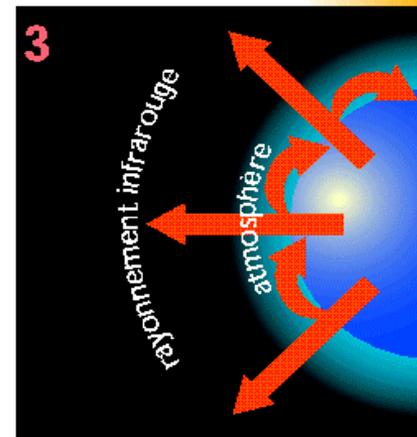
1
Le rayonnement solaire est la seule source d'énergie pour la planète Terre



2
L'énergie solaire reçue est emmagasinée par la surface terrestre



3
L'énergie emmagasinée est restituée sous forme de rayonnement infrarouge



□ Principaux gaz à effet de serre (GES) :

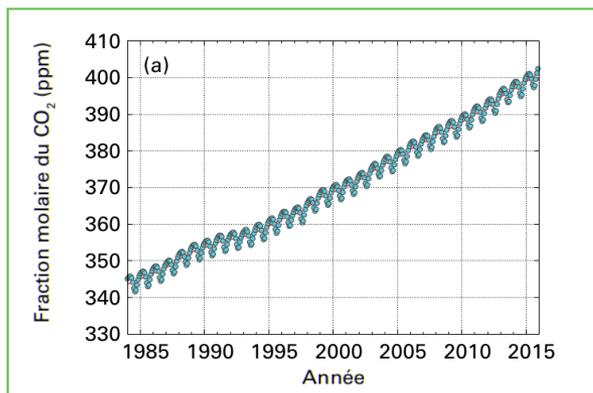
- H₂O (vapeur d'eau)
- CO₂ (dioxyde de carbone) (+ 44%)
- CH₄ (méthane) (+156%)
- N₂O (protoxyde d'azote) (+21%)

Source OMM, bulletin sur les gaz à effet de serre, observations 2015 par rapport à l'époque pré-industrielle

Qu'est-ce que le Changement Climatique ?



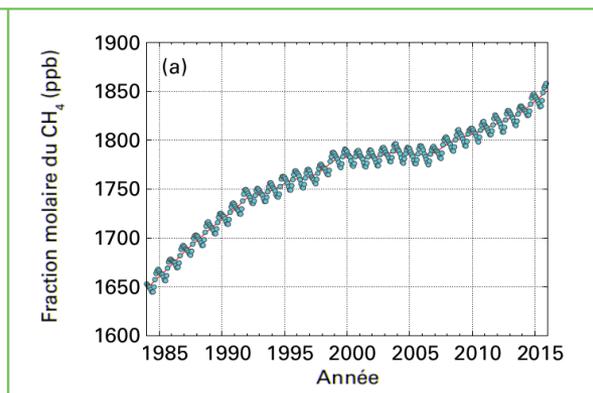
□ Evolutions des GES depuis 30 ans :



Moyenne mondiale, teneur en CO₂

Durée d'action principale :
quelques **siècles**

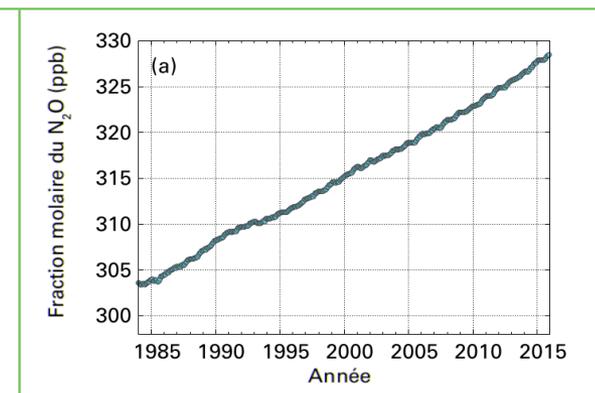
Potentiel de réchauffement :
1 par convention



Moyenne mondiale, teneur en CH₄

Durée d'action principale :
quelques **décennies**

Potentiel de réchauffement :
facteur **30**



Moyenne mondiale, teneur en N₂O

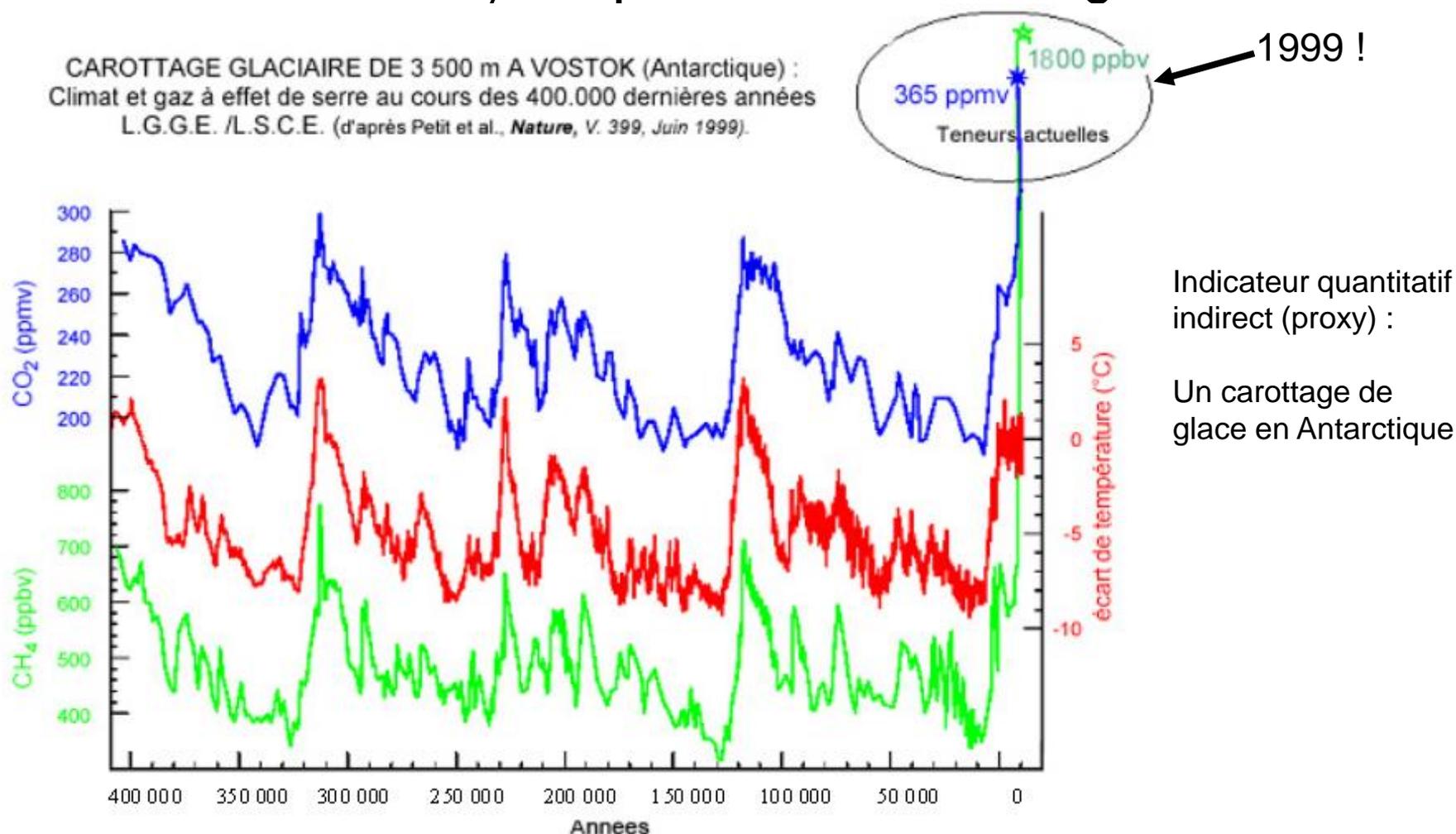
Durée d'action principale :
quelques **siècles**

Potentiel de réchauffement :
facteur **270**

Graphiques source OMM, Bulletin sur les gaz à effet de serre N°12, Octobre 2016

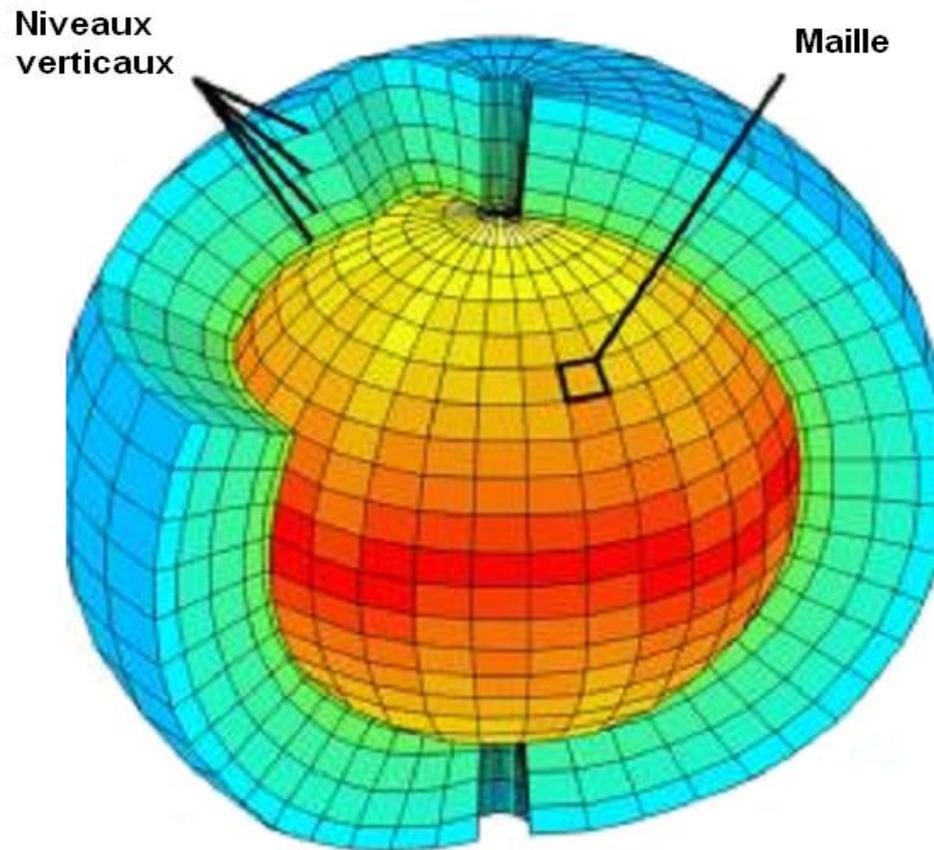
□ Evolutions GES/température sur le long terme

CAROTTAGE GLACIAIRE DE 3 500 m A VOSTOK (Antarctique) :
Climat et gaz à effet de serre au cours des 400.000 dernières années
L.G.G.E. /L.S.C.E. (d'après Petit et al., *Nature*, V. 399, Juin 1999).

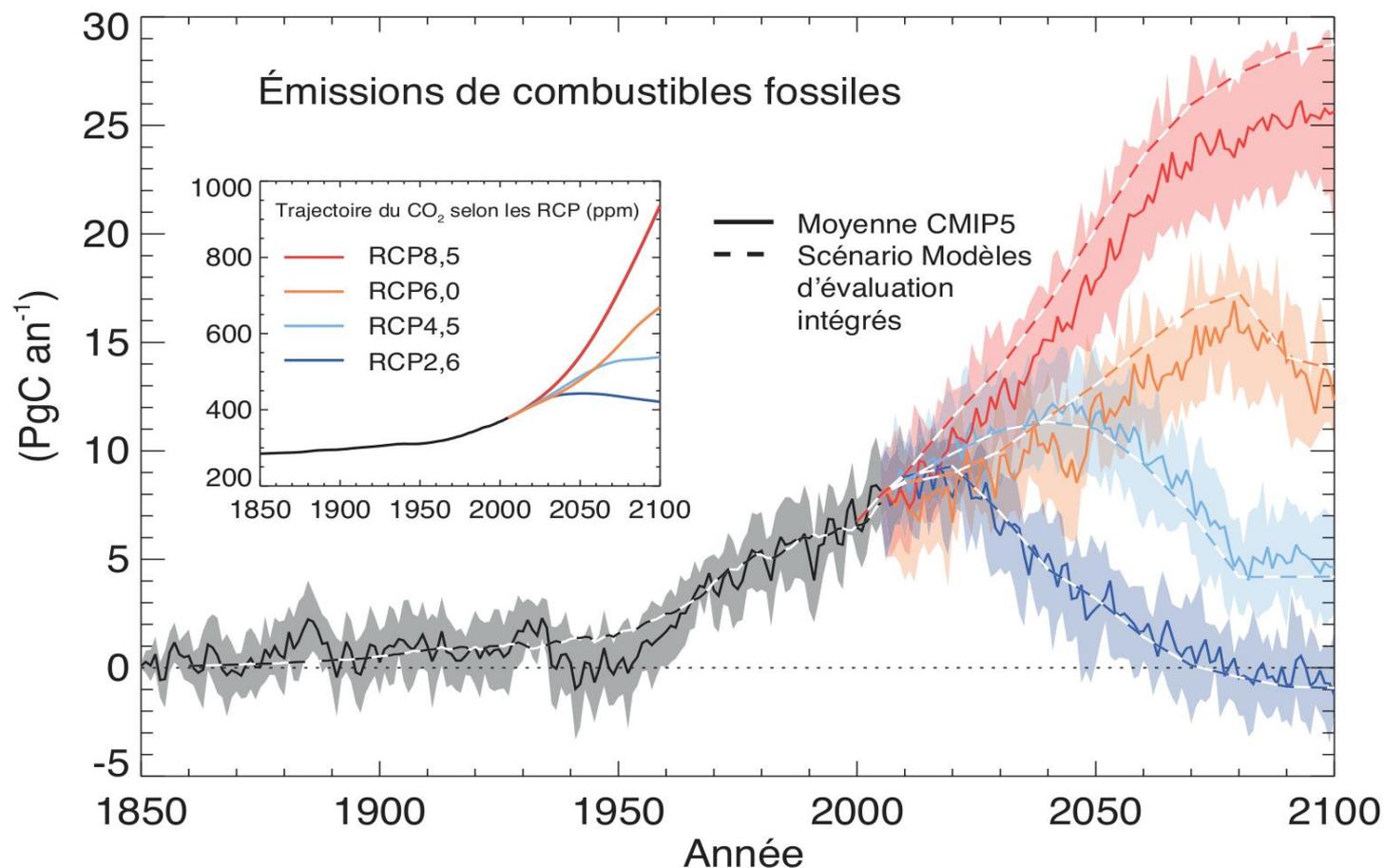


- Les rétroactions (renforcements) ont débuté:
 - La vapeur d'eau croît en fonction de la température T (+10% pour +1,5°C)
 - Les écosystèmes perturbés, directement ou via le Changement Climatique, stockent moins bien voire relarguent le CO₂
 - Le stockage de CH₄ en pergélisol ou clathrates est sensible à l'élévation de température.

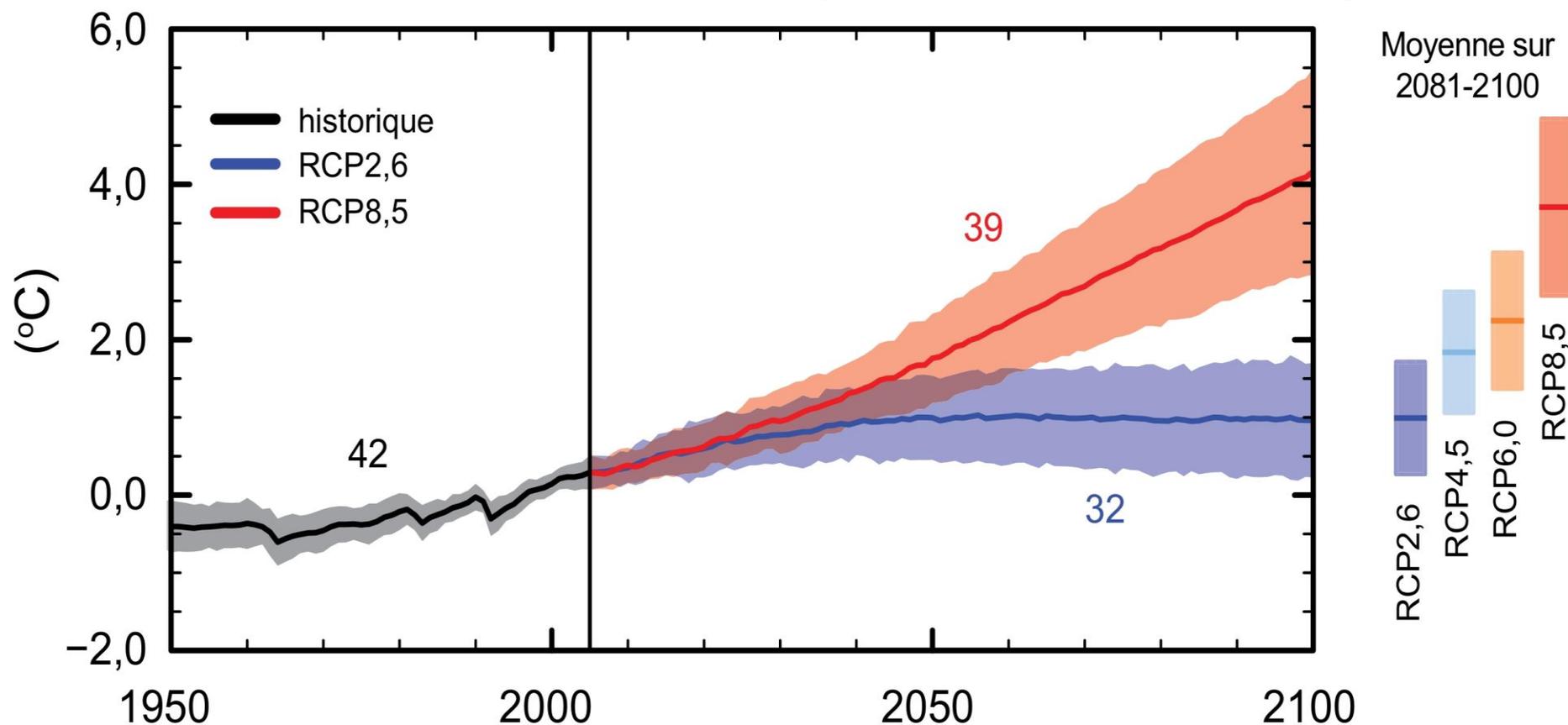
□ Modélisation physique : schéma géométrique de principe



□ Modélisation physique : scénarios d'émission de GES



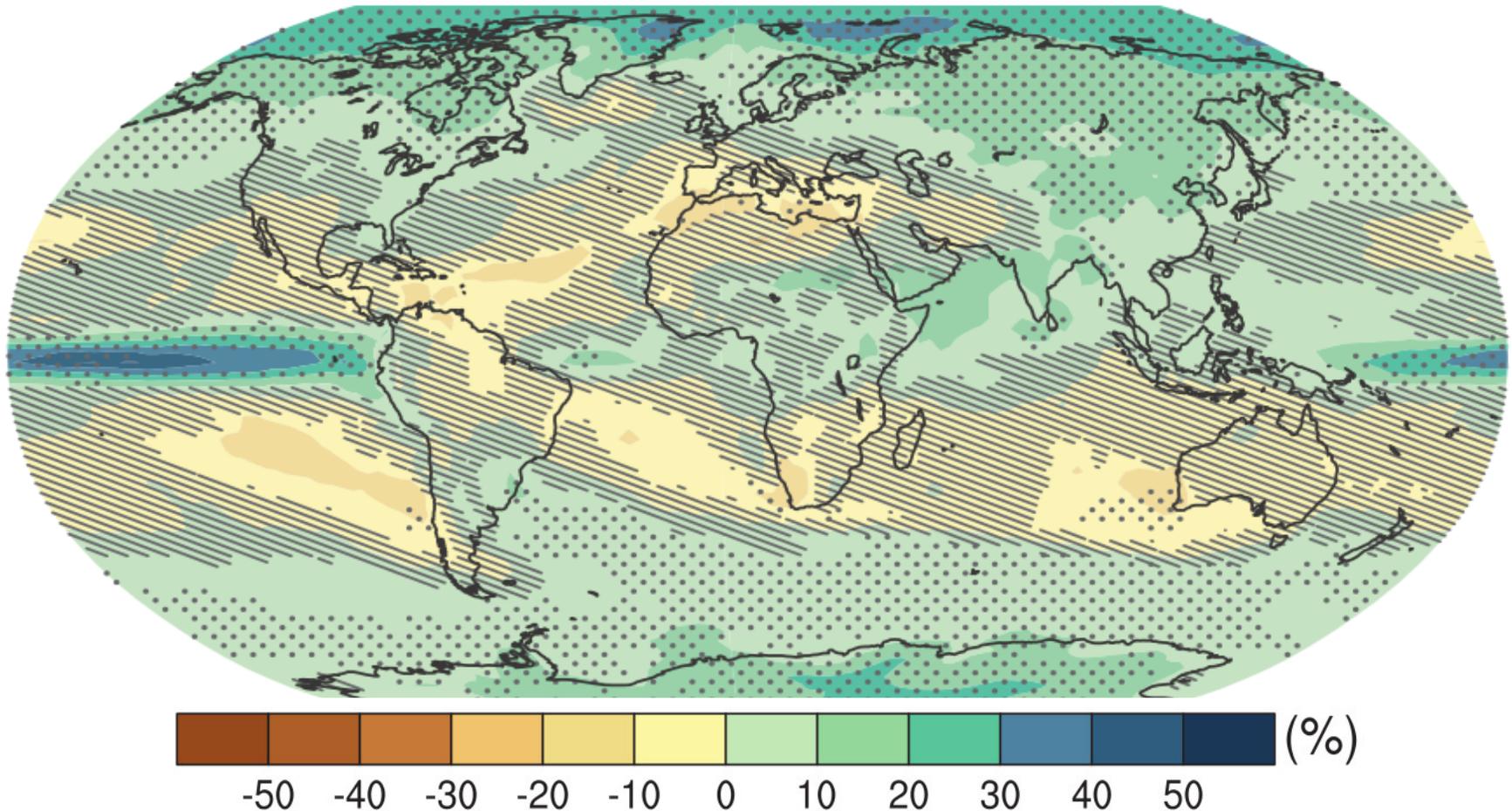
Évolution de la température moyenne à la surface du globe



Qu'est-ce que le Changement Climatique ?



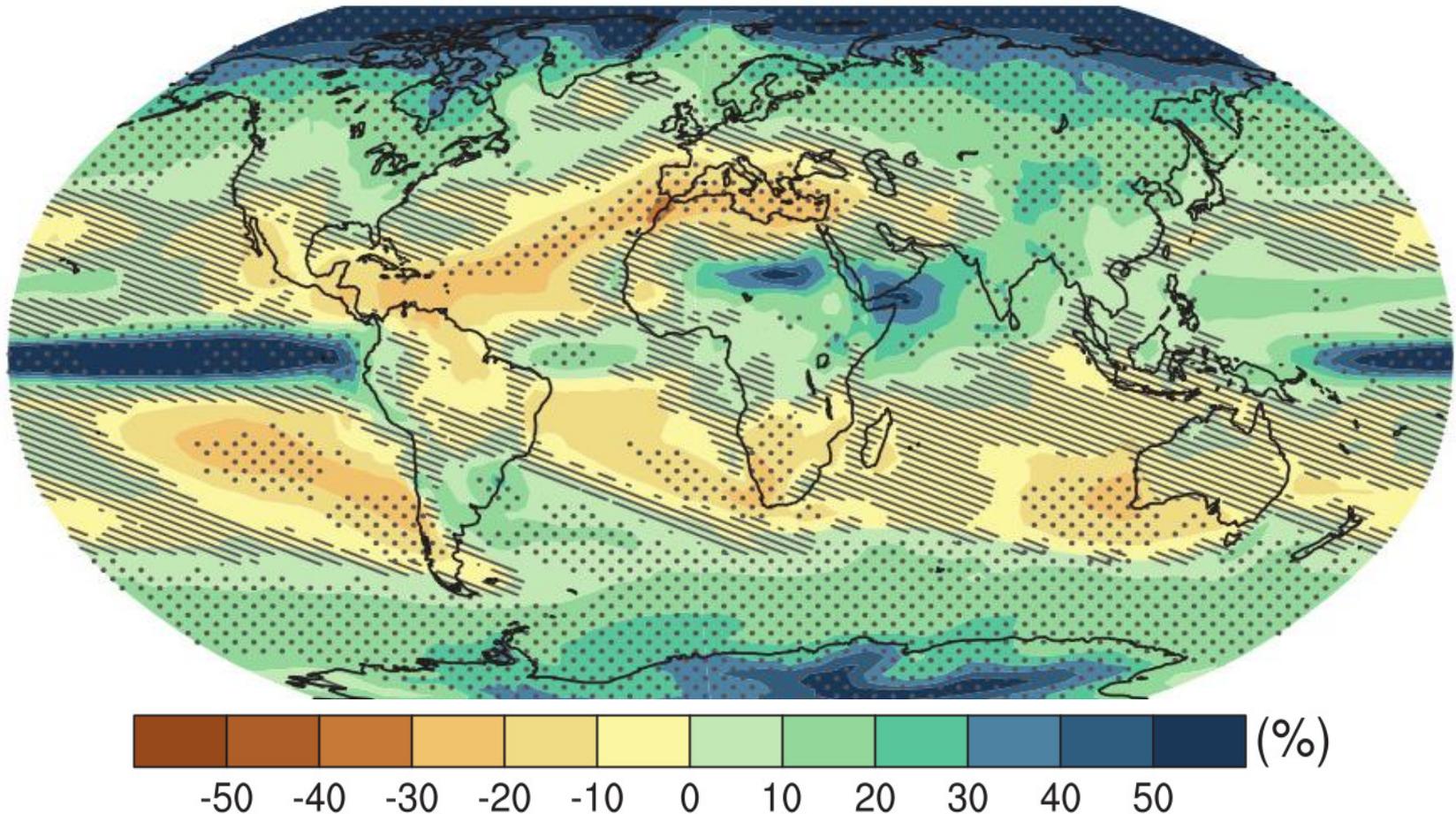
- Précipitations annuelles, scénario faible (RCP4.5) vers 2090 /base 1990



Source rapport GIEC 2013 (AR5)

Qu'est-ce que le Changement Climatique ?

- Précipitations annuelles, scénario fort (RCP8.5) vers 2090 /base 1990

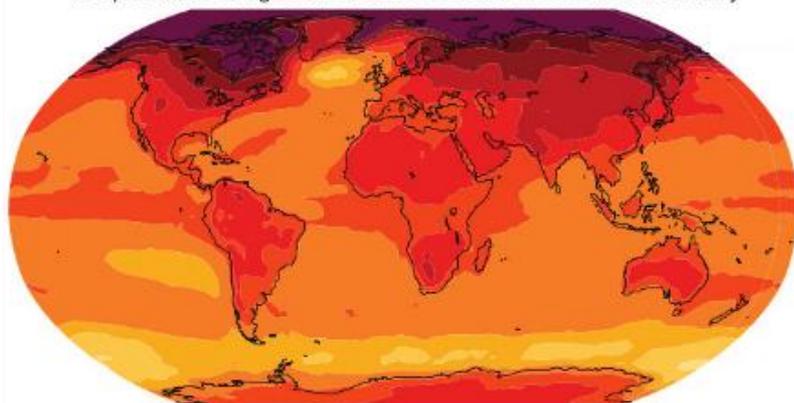


Source rapport GIEC 2013 (AR5)

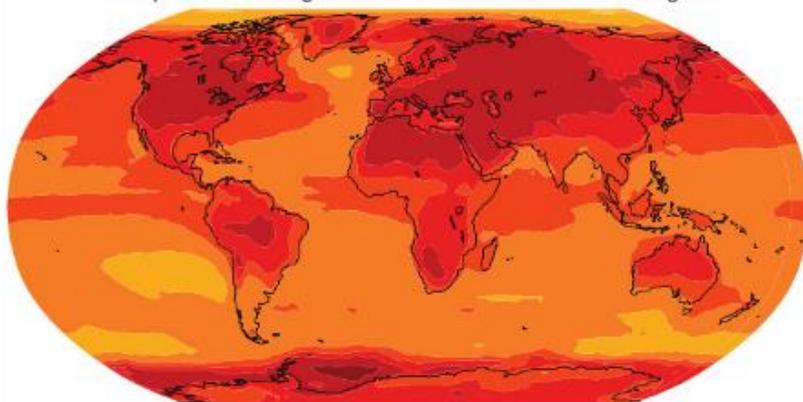
Qu'est-ce que le Changement Climatique ?

□ Températures et précipitations saisonnières

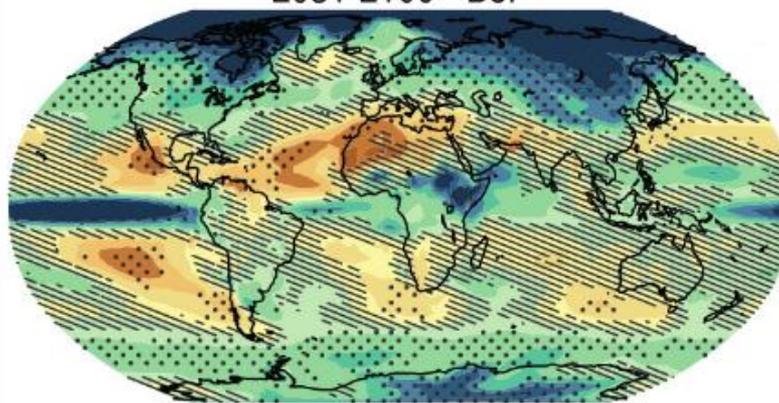
Temperature change RCP8.5 in 2081-2100: December-February



Temperature change RCP8.5 in 2081-2100: June-August

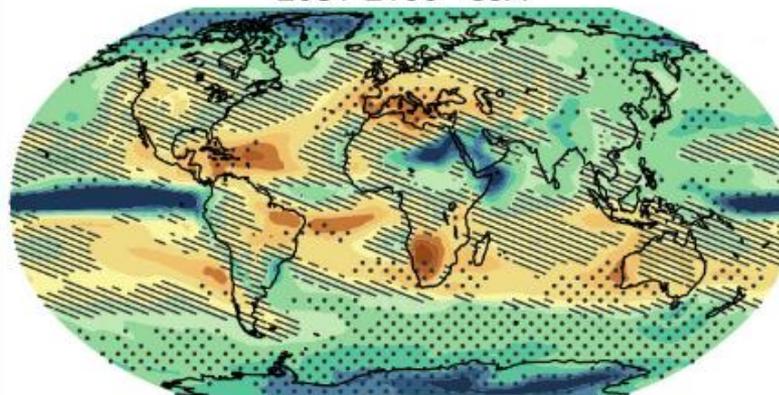


2081-2100 - DJF

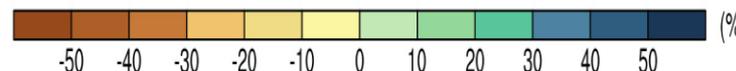
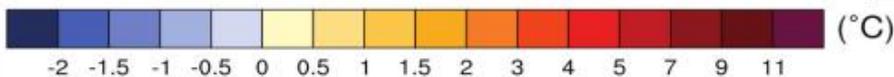


Hiver

2081-2100 - JJA

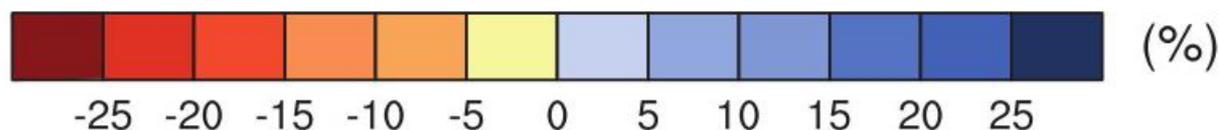
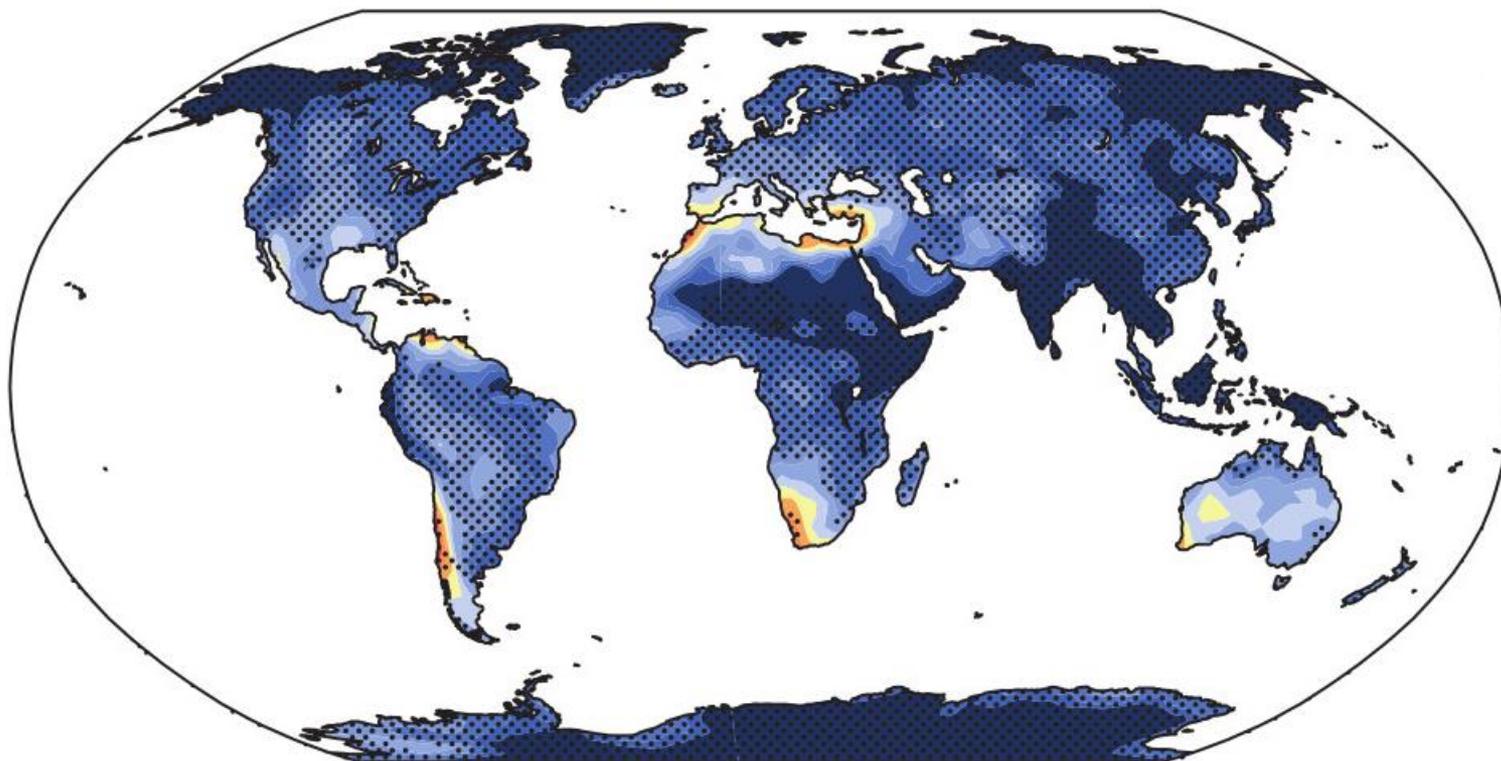


Eté



Source rapport GIEC 2013 (AR5), scénario fort RCP8.5

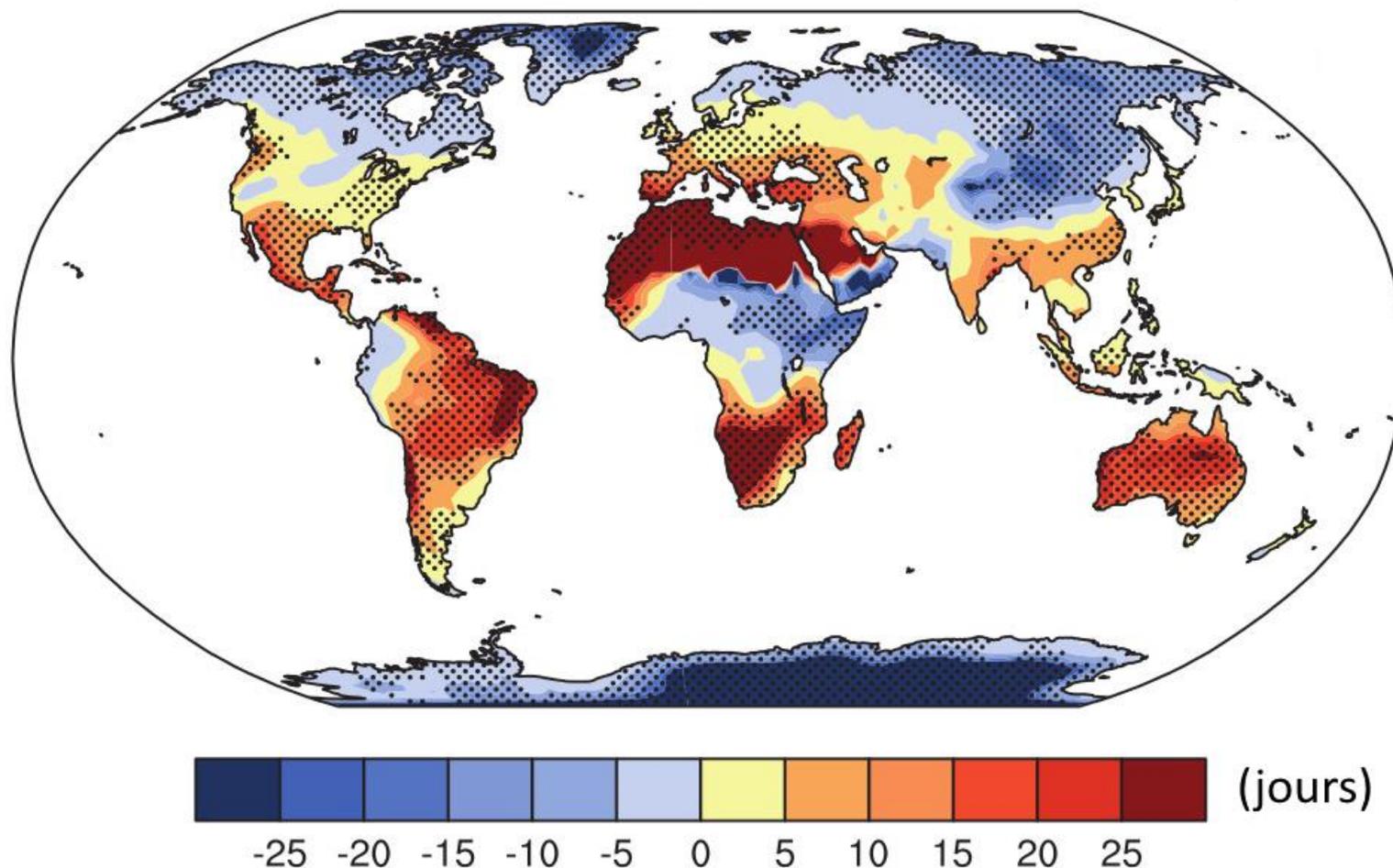
□ Précipitations intenses (5 jours les + pluvieux), évolution relative 2090/1990



Source rapport GIEC 2013 (AR5), scénario fort RCP8.5

Qu'est-ce que le Changement Climatique ?

- Nb de jours secs consécutifs, évolution relative 2090/1990



Source rapport GIEC 2013 (AR5), scénario fort RCP8.5

- Résultats (de la modélisation physique) sur d'autres paramètres dans notre zone du monde :
 - Vent moyen : stable mais quid des rafales orageuses ?
 - Neige : forte diminution du manteau neigeux moyen mais quid des fortes intensités ?
 - Nombre de jours de gel : en baisse sensible
 - Nébulosité (nuages, rayonnement global) : incertain !
 - Variabilité de l'ensemble des paramètres : en hausse spatialement et temporellement

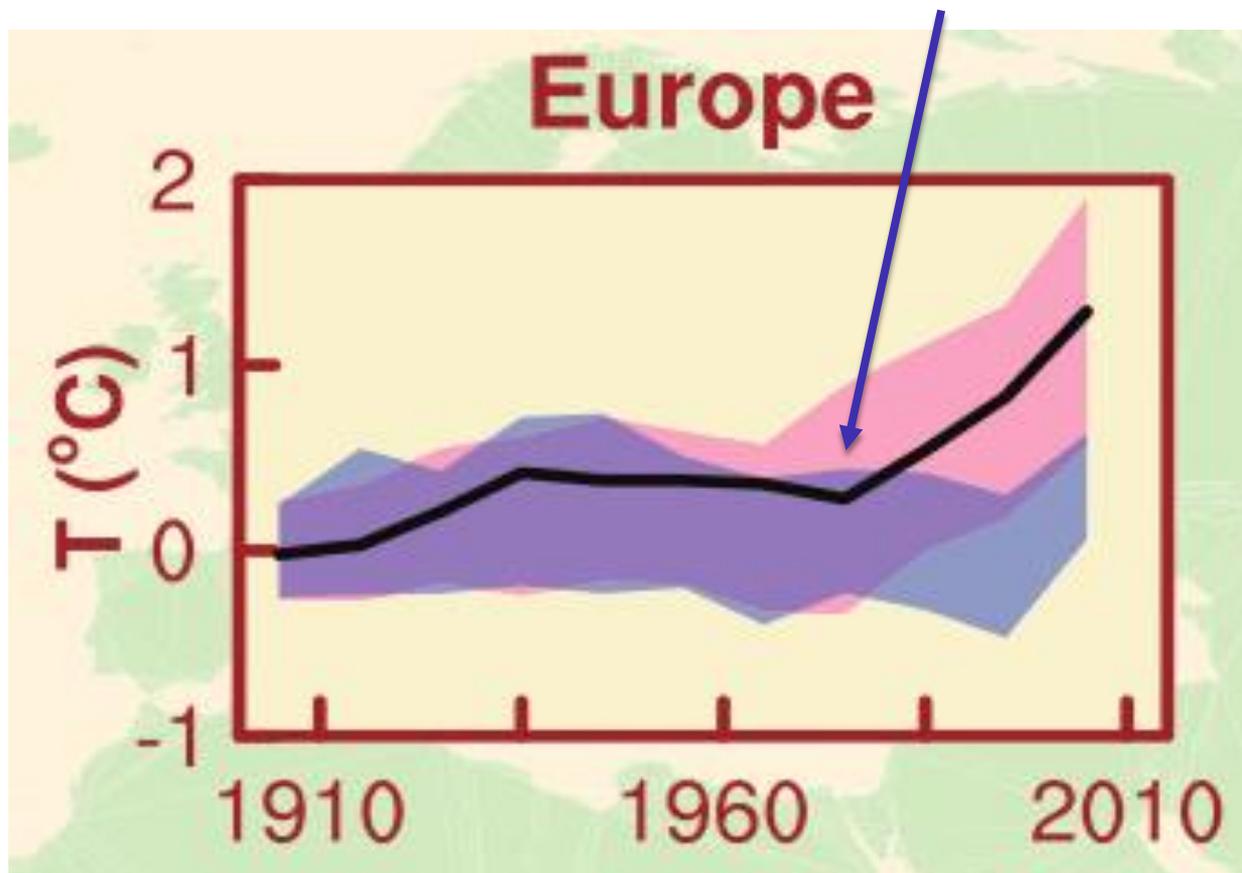
- Les limites d'usage de la modélisation physique :
 - Oscillations océaniques pluri-décennales
 - Incertitudes sur le cycle du carbone
 - Cycle de l'azote quasi-absent
 - Micro-physique des nuages
 - Maille de définition supra-départementale (~100km)
 - Inadaptée à proximité des ruptures (modification de l'influence relative des divers phénomènes physiques)
 - ...

Qu'est-ce que le Changement Climatique ?



- Or, rupture il y a... et elle est particulièrement nette en Europe

Evolution de la température moyenne annuelle observée (ligne noire)



Qu'est-ce que le climat ?

□ Définitions du climat :

- **Définition OMM** (Règlement technique, Documents de bases n°2, vol.1, Pratiques météorologiques générales normalisées et recommandées, édition 2015 mise à jour en 2016 https://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=3218)

Observation météo = Moyenne trentenaire + Anomalie

→ La moyenne sur 30 ans représente la « normalité », i.e. le climat

- **Définition “V.Cailliez”** (Prix André Prud’homme 1992, SMF)

**Série homogénéisée observée = Combinaison des organisations +
Partie aléatoire**

→ Cette “combinaison des organisations” chronologiques a été re-désignée en 2013 sous l’appellation “**espérance climatique**” et ré-exposée dans des colloques scientifiques :

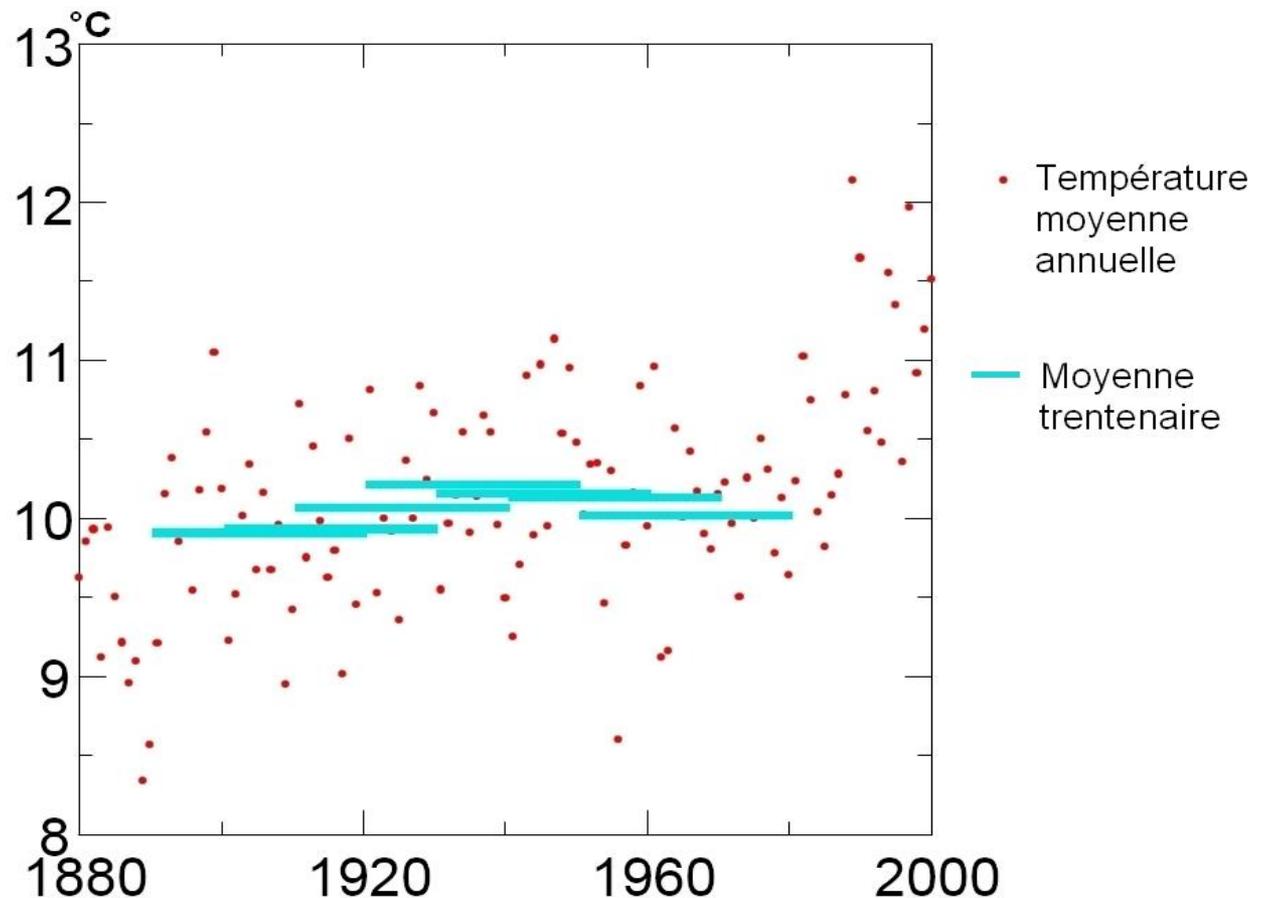
Ateliers Climat et Impacts, IPSL (nov. 2014)

Conférence climatique internationale, UNESCO (juil. 2015)

http://pool7.kermeet.com/C/ewe/ewex/unesco/DOCS/CFCC_abstractBook.pdf

- La normale trentenaire, un concept pertinent...autrefois !

Guéret (23), température moyenne annuelle

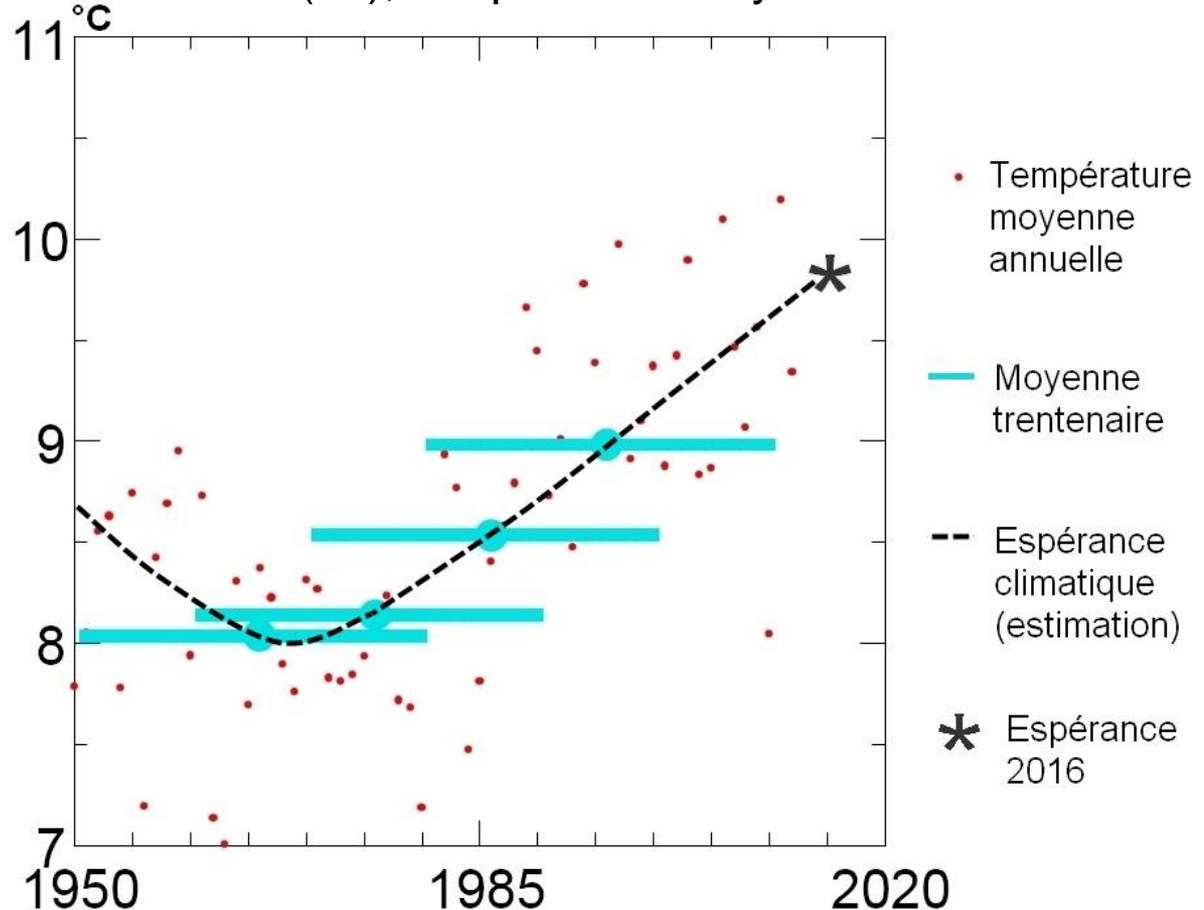


Source Météo-France et
Chambre d'agriculture Creuse

- L'espérance climatique, une re-définition indispensable ...

... sinon :
erreur de position

La Courtine (23), température moyenne annuelle

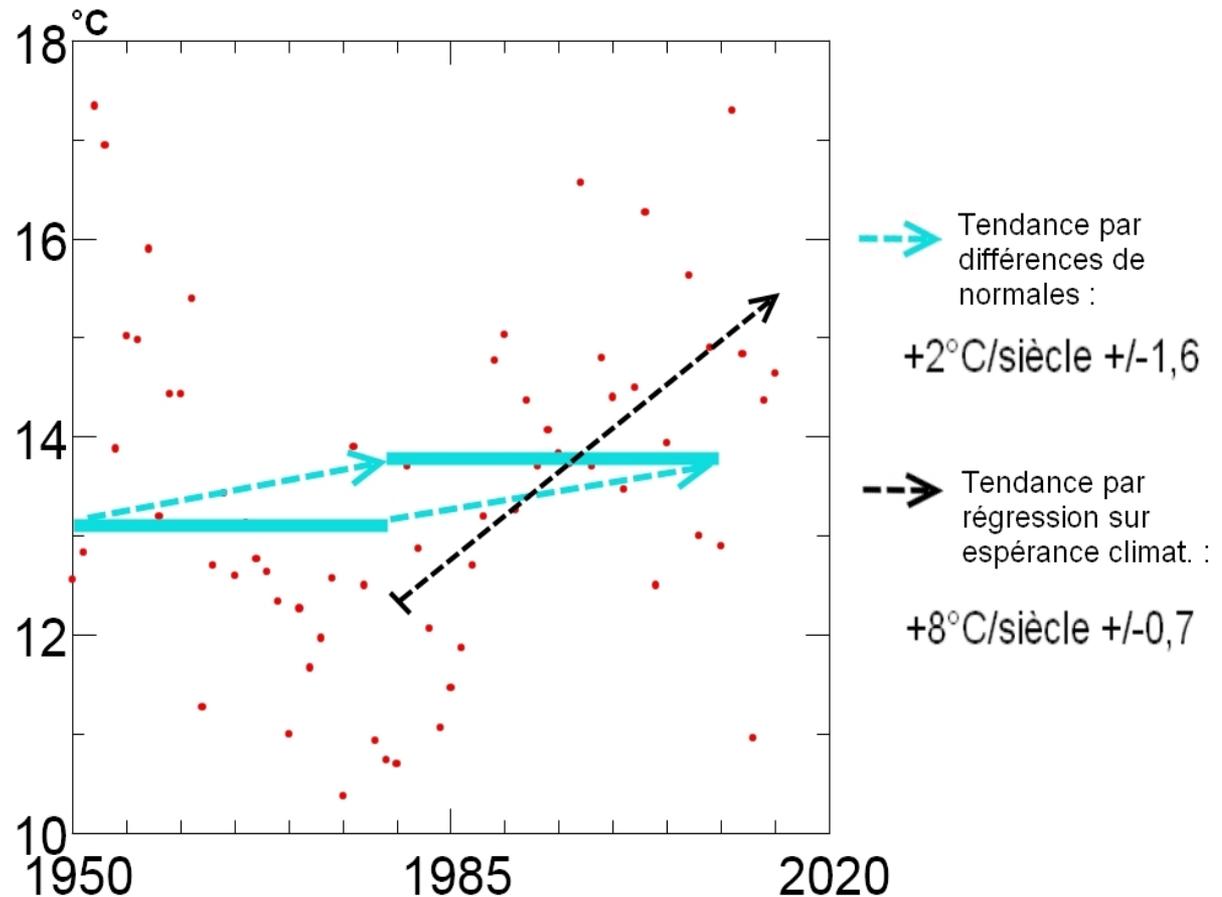


Source Météo-France et
Chambre d'agriculture Creuse

□ L'espérance climatique, une re-définition indispensable ...

La Courtine (23), moyenne des température maximales quotidiennes du printemps

... sinon :
erreur de pente
(tendance)



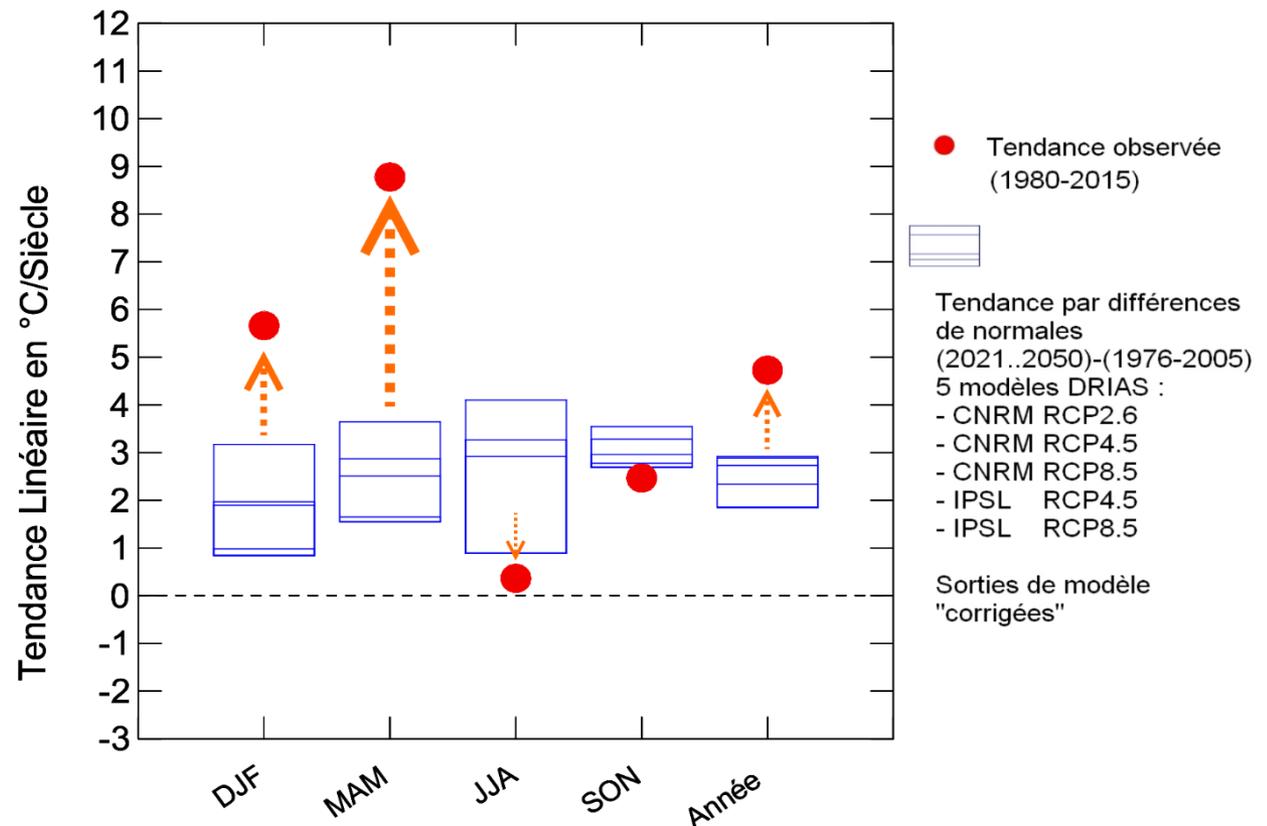
Source Météo-France et
Chambre d'agriculture Creuse

□ L'espérance climatique, une re-définition indispensable ...

Fontannes (Haute-Loire)

moyennes saisonnières et annuelles des températures maximales quotidiennes

... car l'erreur de tendance n'est pas rattrapable par l'usage des modèles physiques du climat



- *Une accumulation des erreurs de position et de pente, c'est possible...*
 - Le concept de « normale trentenaire +1 °C »
 - Calculs classiques en saison printanière
 - La normale 1981-2010 est le climat de maintenant !
 - La tendance calculée par différence de normales ou par modélisation physique est de +2 à +2,5°C/siècle
 - +1 °C, c'est donc dans 40 à 50 ans, soit vers **2060**
 - Calculs experts en saison printanière
 - La normale 1981-2010 est centrée sur 1995, c'est (très proche de) l'espérance climatique de 1995
 - La tendance calculée sur l'espérance climatique depuis 1980 est de +6 à +8°C/siècle
 - +1 °C, c'est donc environ 15 ans après 1995, soit vers **2010**

- Une aggravation de l'accumulation des erreurs, c'est possible...
 - Utilisation de la période de référence 1961-1990,
(extractions site SCAMPEI par exemple)
- N.B. : La tendance simulée au printemps, sur le scénario médian A1B à long terme et pour tout scénario à court terme, est environ 3,5 fois plus faible que la tendance réellement engagée
- La période dite « futur proche » (2021-2050, centrée sur 2035) est distante de 60 ans de la période de référence.
 - Le décalage réel est de $60/3,5$ soit 17 ans
 - Le « **climat 2035** » est en fait un « **climat 1992** » (car $1992=2035-60+17$)
 - La période dite « futur lointain » (2071-2100, centrée sur 2085) est distante de 110 ans de la période de référence
 - Le décalage réel est de $110/3,5$ soit 31 ans
 - Le « **climat 2085** » est en fait un « **climat 2006** » (car $2006=2085-110+31$)
 - Donc, en ce qui concerne le printemps, ces erreurs conduisent à « inverser le sens du temps ». Ce qu'on pense être du futur proche ou même lointain est déjà dépassé par le climat actuel...

Quelle est la méthodologie climatique de AP3C ?

- Dépasser les erreurs académiques d'observation et des simulations physiques dans AP3C
 - Recrutement d'un climatologue ...
 - Conception et utilisation d'un « générateur stochastique de temps » (SWG)
 - Mise en équation de la re-définition du climat
 - Stratégie de paramétrisation vers le futur

- Le générateur stochastique de temps en détails
 - Soit $Par(t)$ une série de précipitations (RR), d'ETP ou de températures (T_n , T_x) quotidiennes, sur 1980-2015
 - Homogénéisation de la série
 - Extraction progressive des organisations
 - De long terme (tendance, cycles et évolutions de cycles...)
 - De court terme (persistance...)
 - Etude du résidu
 - Réduction de variance
 - Tests du caractère aléatoire
 - Description du résidu ultime (dissymétrie, aplatissement...)

□ Extraction de l'organisation de long-terme

■ $\text{Par}(t) = a*t+b$ (si linéaire...)	Tendance
+ $A1*\sin(2\pi t/P1 + \varphi1)$	Cycles
+
+ $Ak*\sin(2\pi t/Pk + \varphik)$...
+ $\text{ParSOLT}(t)$	Résidu

t : temps en jours, mois, années

Par : Paramètre météorologique (températures, précipitations, vent...)

SOLT : Sans Organisation de Long Terme

- N.B. : - Les coefficients A_i et φ_i peuvent également être organisés
- Seuls les coefficients statistiquement significatifs sont conservés

□ Extraction de l'organisation de court-terme

■ ParSOLT(t) = a1*ParSOLT(t-1)	Autorégression
+ a2*ParSOLT(t-2)	...
+
+ an*ParSOLT(t-n)	...
+ ParSOCT(t)	Résidu

SOCT : Sans Organisation de Court Terme

- N.B. : - les ai peuvent également être organisés
 - les séries de Tn, Tx (et ETP) sont liées via le schéma autorégressif
- schéma multi-varié, d'où variables combinées cohérentes (ex. Tm)
- n varie de 3 à 7

- Utilisation de cette analyse organisationnelle pour une comparaison des organisations chronologiques
observations/ 7 simulations physiques DRIAS
- Exemple de la température maximale T_x à USSEL les PLAINES (19)
 - Schéma de long terme à 7 coefficients
 - Tendance linéaire, coefficient directeur (1)
 - Cycle 12 mois, amplitude et phase variables en tendance (4)
 - Cycle 6 mois, amplitude et phase fixes (2)
 - Schéma de court terme à 33 coefficients
 - 17 paramètres sur les T_x des jours précédents jusque $j-6$
 - 16 paramètres sur les T_n du jour et des jours précédents jusque $j-3$
- Règles de comparaisons
 - Si valeur simulée différente de moins de 1 erreur-type → en vert
 - Si valeur simulée différente, entre 1 et 2 erreurs-type → en jaune
 - Si valeur simulée différente, entre 2 et 3 erreurs-type → en orange
 - Si valeur simulée différente de plus de 3 erreurs-type → en rouge

□ Tableau comparatif des organisations de long terme

	Constante de la tendance linéaire en °C	Coefficient directeur de la tendance en °C/siècle	Amplitude du cycle de 12 mo- nstante en °C	Tendance de l'amplitude du cycle de 12 mois en °C/siècle	Phase du cycle de 12 mois, constante en rad	Tendance de la phase du cyc- de 12 mois en rad/siècle	Amplitude du cycle de 6 mois en °C	Phase du cycle de 6 mois en rad
Observée	14,5590	3,6702	9,0909	0,2099	-1,9707	0,3344	0,9390	-0,3382
Erreur-type	0,0859	0,4131	0,1236	0,5837	0,0136	0,0640	0,0607	0,0646
SE Markov	0,2095	1,0076	0,3015	1,4237	0,0332	0,1561	0,1481	0,1576
IPSL ref	11,6348	3,9433	8,1499	-0,1222	-2,0053	-0,2862	1,1764	-0,3638
IPSL 4.5	12,8779	3,4434	8,5762	-2,4840	-2,1395	0,3926	1,1717	-0,2233
IPSL 8.5	12,9917	0,0485	8,5435	-3,9565	-2,0231	-0,3154	1,1425	-0,5229
CNRM ref	11,8995	4,6899	8,1338	1,8074	-1,9999	-0,0444	1,3365	-0,2623
CNRM 2.6	13,4522	1,6368	8,7766	1,5426	-1,9845	-0,2221	1,4315	-0,5572
CNRM 4.5	13,7729	0,3325	9,8180	-5,1088	-2,0977	0,6320	1,3765	-0,5477
CNRM 8.5	13,4978	2,4625	8,0621	4,5407	-2,0181	-0,1253	1,2631	-0,4538

- Périodes : Observée 1980-2015, simulations ref 1976-2005, simulations RCP 2021-2050
- Avec des séries compatibles, on aurait du observer :
 - 68,3% de cases vertes, 27,2% de cases jaunes, 4,2% de cases orange et 0,3% de cases rouges

□ Tableaux comparatifs des organisations de court terme

Organisations en Tx des jours précédents

	B1C	B1Tend	B1Amp1	B1Phas1	B1Amp2	B1Phas2	B2C	B2Tend	B2Amp1	B2Phas1	B2Amp2	B2Phas2	B3C	B3Amp2	B3Phas2	B4C	B6C
Observée	0,7886	0,0118	0,0611	-1,8519	0,0151	-0,4596	-0,0678	-0,0824	0,0461	1,3051	0,0322	-2,7341	0,0240	0,0493	0,5165	0,0166	0,0142
Erreur-type	0,0180	0,0844	0,0130	0,2044	0,0127	0,8406	0,0194	0,0864	0,0135	0,2790	0,0158	0,4978	0,0108	0,0129	0,2646	0,0092	0,0069
IPSL ref	0,6188	0,0289	0,2156	-1,8065	0,0838	-0,4600	-0,0823	0,0812	0,0958	1,5809	0,0451	2,8220	0,0277	0,0339	-1,2203	0,0131	0,0123
IPSL 4.5	0,6344	-0,1231	0,2099	-1,9472	0,0616	-1,2178	-0,0279	-0,4389	0,0828	1,6587	0,0177	-0,4467	0,0437	0,0391	2,9042	0,0112	0,0154
IPSL 8.5	0,6644	-0,3777	0,2619	-1,9909	0,1010	-0,7785	-0,1139	0,1377	0,1079	1,3564	0,0231	1,9859	0,0484	0,0135	-0,9147	0,0008	0,0207
CNRM ref	0,7835	0,1887	0,1035	-1,9794	0,0222	-1,3562	-0,0617	-0,1629	0,0434	1,2814	0,0134	2,8737	0,0252	0,0146	0,7448	-0,0062	0,0240
CNRM 2.6	0,8248	0,0120	0,1040	-2,2338	0,0447	-1,1438	-0,1272	0,0524	0,0633	0,8855	0,0220	2,5320	0,0125	0,0269	0,6712	0,0381	0,0056
CNRM 4.5	0,8504	-0,1715	0,1034	-2,0195	0,0075	1,7085	-0,1351	0,2601	0,0531	0,6309	0,0165	-1,8791	0,0213	0,0334	0,6154	0,0242	0,0121
CNRM 8.5	0,7956	0,0070	0,0847	-2,0531	0,0274	-0,0131	-0,0498	-0,1146	0,0302	0,7535	0,0382	-2,9961	-0,0066	0,0324	0,0218	0,0215	0,0231

Organisations en Tn des jours précédents

	A0C	A0Tend	A0Amp1	A0Phas1	A0Amp2	A0Phas2	A1C	A1Tend	A1Amp1	A1Phas1	A1Amp2	A1Phas2	A2Amp2	A2Phas2	A3Amp2	A3Phas2
Observée	-0,1676	-0,0929	0,1894	1,6212	0,0845	2,2117	0,0865	0,1024	0,0776	-0,9565	0,0547	-1,3710	0,0312	-0,1247	0,0225	3,0730
Erreur-type	0,0199	0,0932	0,0145	0,0734	0,0140	0,1655	0,0199	0,0923	0,0142	0,1831	0,0157	0,2847	0,0154	0,4973	0,0130	0,5774
IPSL ref	0,4075	-0,0766	0,2849	1,4221	0,0523	2,0484	-0,0913	-0,0843	0,1488	-1,6329	0,0236	0,7376	0,0015	0,5323	0,0209	1,0145
IPSL 4.5	0,4168	-0,0623	0,2209	1,0847	0,0276	1,3199	-0,2125	0,9489	0,0836	-1,7384	0,0696	1,2354	0,0163	0,3847	0,0205	-0,8902
IPSL 8.5	0,3690	0,4124	0,3145	1,2016	0,1006	2,3057	-0,1010	-0,0240	0,1593	-1,8101	0,0705	0,7805	0,0334	-2,5027	0,0109	-1,8975
CNRM ref	0,0371	0,0048	0,2893	1,5913	0,0793	1,6539	-0,0233	0,0263	0,1457	-1,3491	0,0448	-1,8916	0,0147	1,5868	0,0388	-1,3246
CNRM 2.6	0,0330	-0,0934	0,2697	1,6638	0,0951	1,5808	0,0110	-0,1012	0,1226	-1,4149	0,0640	-2,0871	0,0226	-0,6489	0,0179	2,0931
CNRM 4.5	0,0370	-0,0165	0,2588	1,5727	0,0854	1,7563	-0,0200	-0,0650	0,1109	-1,2846	0,0663	-2,0239	0,0235	-0,3215	0,0078	2,6306
CNRM 8.5	-0,0028	0,2126	0,2664	1,5491	0,0726	2,2206	-0,0426	0,0792	0,0811	-1,3182	0,0183	-1,4672	0,0311	-0,8413	0,0105	1,1417

- Périodes : Observée 1980-2015, simulations ref 1976-2005, simulations RCP 2021-2050
- Avec des séries compatibles, on aurait du observer :
 - 68,3% de cases vertes, 27,2% de cases jaunes, 4,2% de cases orange et 0,3% de cases rouges

□ Commentaires sur les tableaux

- Avec les séries des simulations physiques, on a observé
 - 34,5% de points verts, 21,4% de points jaunes
 - 13,1% de points orange et 30,0% de points rouges
 - environ 100 fois plus d'erreurs fortes (rouges) qu'attendues avec des séries à organisations chronologiques compatibles
 - Il n'y a pas que la tendance qui est fortement incompatible avec les évolutions climatiques réelles
 - Des divergences très significatives sur les organisations majeures :
 - Amplitude du cycle annuel (12 mois) et de son harmonique (6 mois)
 - Persistance d'ordre 1 (soit $j-1$) en T_x , en valeur constante et en amplitude du cycle annuel (B1C, B1Amp1)
 - Persistance d'ordre 0 et 1 en T_n , en valeur constante et en amplitude du cycle annuel (A0C, A0Amp1, A1C, A1Amp1)

- Qu'en est-il du résidu après extraction des organisations sur séries observées
 - Les tests statistiques indiquent une très grande proximité du caractère purement aléatoire
 - On idéalise la distribution résiduelle
 - Caractérisation intensive (pas en quantiles)
 - Moyenne nulle (si la méthode a été bien appliquée...)
 - Variance organisée en tendance et en cycles fixes
 - Dissymétrie et aplatissement très faiblement organisés, considérés comme constantes
- N.B. : La valeur de l'espérance climatique « centrale » $\text{ClimPar}(t)$, s'obtient par le simple calcul :
$$\text{ClimPar}(t) = \text{Par}(t) - \text{ParSOCT}(t)$$

- Ré-analyse du climat sur la période d'observation
 - Re-génération du résidu désorganisé
 - On utilise un « générateur de nombres aléatoires », calé sur la distribution idéalisée de ParSOCT(t)
 - On construit 10 000 séries quotidiennes 1980-2015 pour chaque point de mesure (~130 millions de valeurs)
 - Reconstruction du schéma auto-régressif, jour par jour
 - Addition de l'organisation de long terme
 - On obtient 10 000 séries complètes, dont il faut vérifier la compatibilité en distribution et en organisation chronologique avec la série initiale observée

- **Compatibilité simulations SWG / observations**
 - Vérifications sur la distribution totale $Par(t)$
 - Déformations des distributions simulées ($T_x < T_n < ETP < RR$)
 - Correction Quantile-Quantile à appliquer immédiatement
 - Vérifications sur les organisations chronologiques (après correction Quantile-Quantile)
 - Pour chaque paramètre d'organisation
 - Moyenne des 10 000 coefficients = coefficient observé
 - Ecart-type des 10 000 coef. = erreur-type du coefficient observé
 - Vérifications sur indicateurs climatiques classiques
 - $T_x > 30^\circ\text{C}$, $T_x > 25^\circ\text{C}$, $T_n < 0^\circ\text{C}$, $T_x < 0^\circ\text{C}$, $T_n < -5^\circ\text{C}$
 - $ETP < 1\text{mm}$, $ETP > 5\text{mm}$, $RR > 1\text{mm}$, $RR > 5\text{mm}$, $RR > 10\text{mm}$

□ Et vers le futur ?

□ Prolongation des organisations chronologiques

- Vers un futur pas trop lointain (2016-2050)

- Sans accélération

 - Hypothèse (hélas!) très modérée

□ Production en masse de statistiques d'ensemble sur

- Indicateurs climatiques

- Indicateurs agro-climatiques

□ Les limites de la méthode

- Pas d'exploration de l'ensemble des possibilités
 - Uniquement les évolutions climatiques « minimales compatibles » avec les évolutions réellement engagées
- Limitation à une période avec influence négligeable des scénarios d'émission de GES (+30 à +40 ans)
- Pas conçue pour étudier les évènements « très » rares
 - Durée de retour ≤ 10 ans pour températures
 - Durée de retour ≤ 5 à 10 ans pour les précipitations
 - Adaptable pour certains évènements très rares au cas par cas

- Un exemple d'évènement « très » rare
 - Vagues de fortes chaleurs de l'été 2003 en France
 - Indicateur : moyenne estivale (JJA) de la température maximale quotidienne

Types de calcul	Durée de retour
Calcul originel (Météo-France, « La Météorologie », n°46, Août 2004)	140 ans
Espérance climatique 2003	35 ans
Espérance climatique 2015	18 ans
Espérance climatique 2040	5 ans



ANNEXES

Comparaisons d'indicateurs agroclimatiques

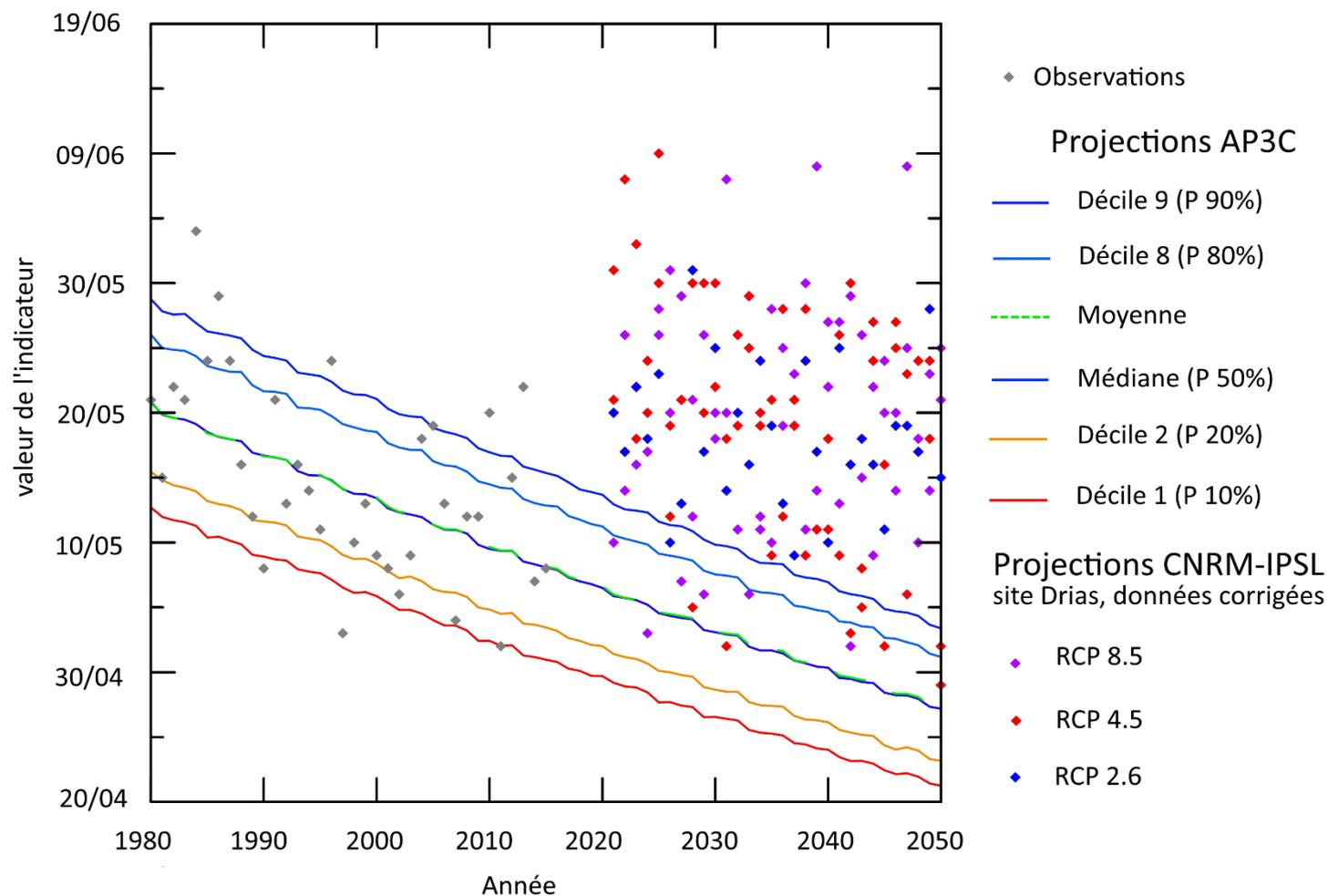
Observés / Projetés par AP3C / Projetés par simulations physiques corrigées (site Drias)

IAC 3 – Date de « fauches précoces »

Cumul de T base 0°C à 750°CJ, à partir du 01/02



Station de Chanac (48), alt. 672m

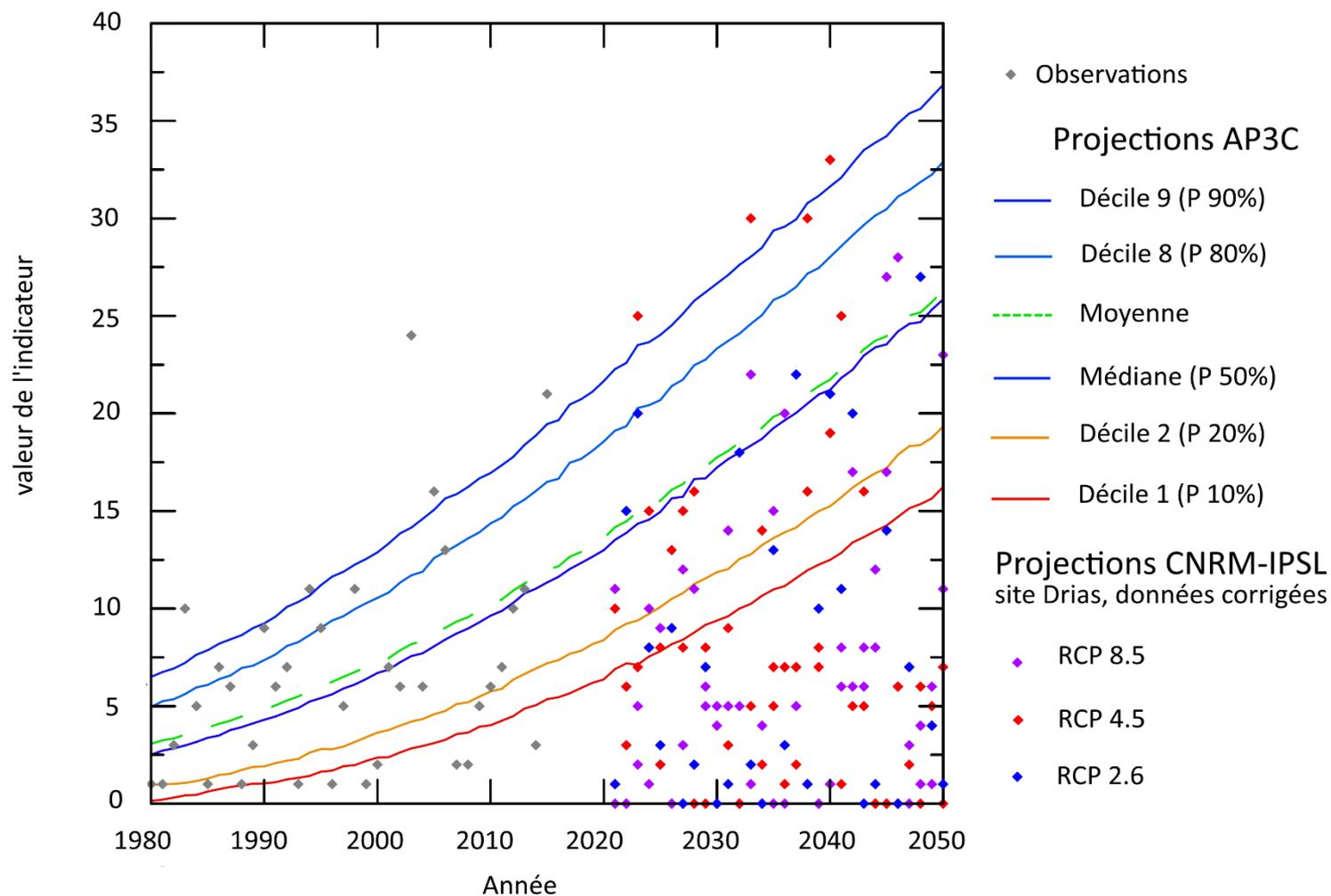


IAC 8 – Intensité échaudage du maïs

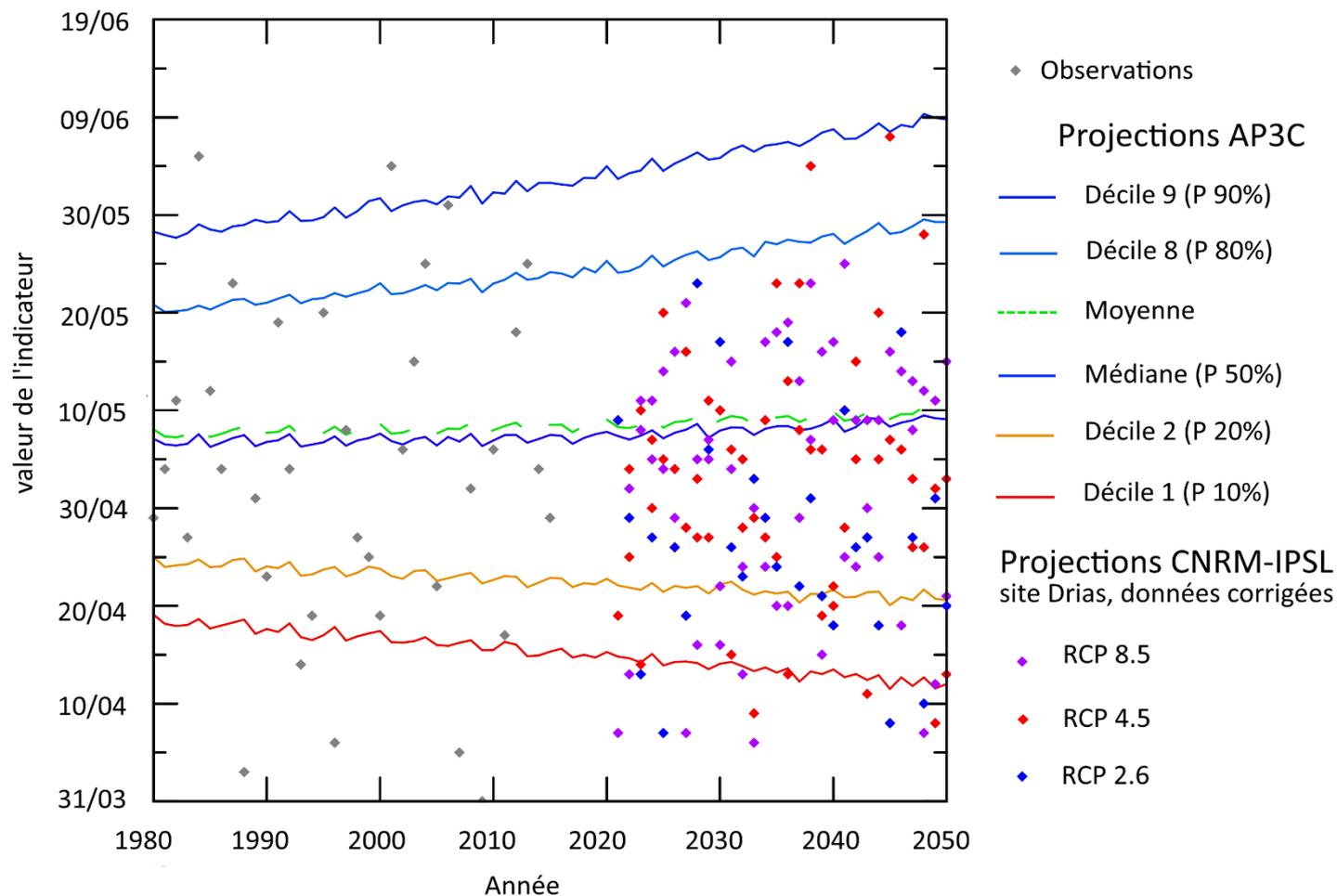
Nb de dépassements de $T_x=32^{\circ}\text{C}$ du 01/06 au 30/09



Station de Lurcy-Levis (03), alt. 225m



Station de Mazet-Volamont (43), alt. 1130m



IAC 13 – Indice héliothermique de Huglin

Calcul du 01/04 au 30/09



Station de Limoges-Bellegarde (87), alt. 402m

