

Changements du climat 1950-2009 dans le Sud de la France

Climfourel

Adaptation des systèmes fourragers et d'élevage péri-méditerranéens aux changements et aléas climatiques



François Lelièvre, Stephan Sala et Florence Volaire
INRA, UMR CEFE, Montpellier



Pour et Sur le Développement Régional (PSDR) 2007-2011, un programme soutenu et financé par :



RhôneAlpes Région



Impacts croissants des sécheresses dans les zones à l'interface tempéré/méditerranéen

« **Arc péri-méditerranéen** » = bordure de l'aire méditerranéenne (française); climat de type tempéré sec, avec influence médit. en été (axe Toulouse, Albi, Millau, Montélimar, Digne) : 30-40 000 km² (500 km long. x 50-100 km de largeur)

→ **Sécheresses d'été + fréquentes et + sévères :**

- *production très incertaine des prairies de mai-juin à octobre;*
- *ouverture des stocks (foin, ensilage) dès l'été;*
- *achats massifs de fourrages (coût, baisse autonomie, pb pour AOC)*

→ **Calamités/indemnités : 2003, 2005 et 2006; difficultés en 2004 et 2009...** Cela a généré une démarche des Chambres d'agriculture (Ardèche, Lozère, ...) vers INRA-Supagro



Projet CLIMFOUREL 2008-11

Questions posées

1. Diagnostic : les irrégularités et la baisse de la disponibilité fourragère sont-elles conjoncturelles ou structurelles ?

→ *Tester l'hypothèse structurelle : premiers effets sensibles du changement climatique? Sensibilité particulière à l'interface tempéré/médit.?*

→ **étude 1 : le climat a-t-il significativement changé?**

→ **étude 2 : quels impacts sur la production d'herbe?**

2. Adaptations: comment adapter les systèmes d'alimentation et d'élevage aux changements et aux aléas climatiques?

→ *Innover dans les systèmes d'alimentation, les conduites des prairies, les variétés fourragères semées, etc ?*

Projet pluri-régional en partenariat et réseau (cadre PSDR3)

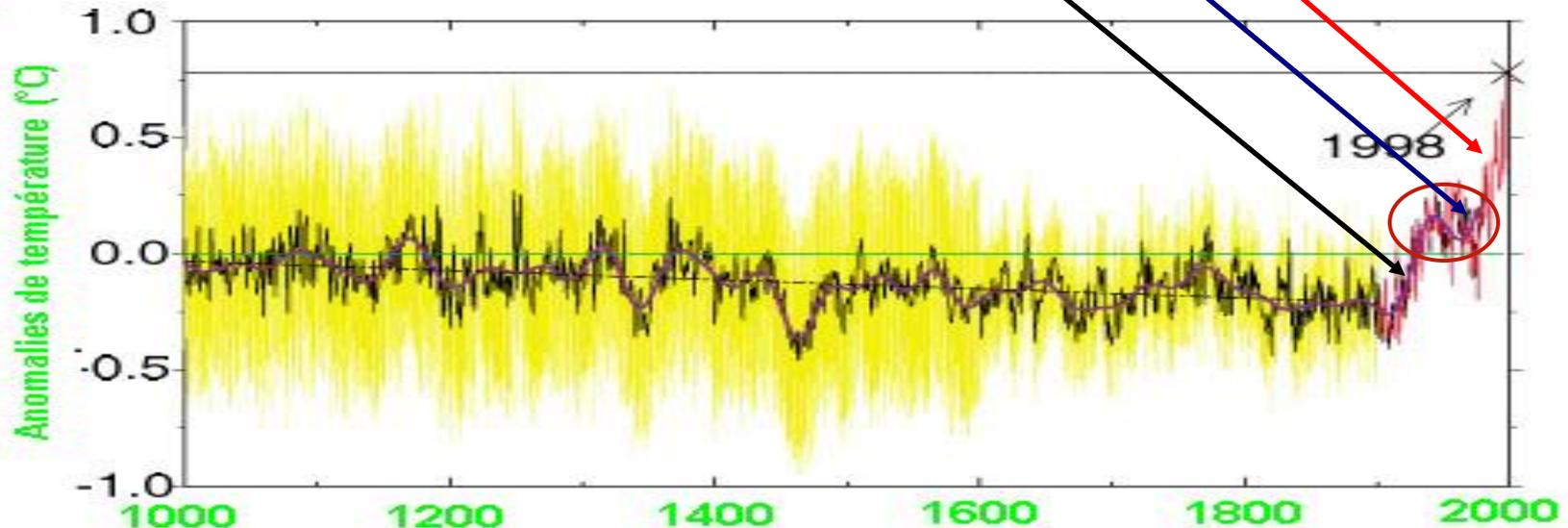
Financeurs : INRA, CEMAGREF, Régions RA, LR, MP (+ DATAR, UE)

Participants : Zootechniciens et agronomes

- *INRA Toulouse, Montpellier, Avignon*
- *Institut Elevage Montpellier et Toulouse*
- *Chambres d'Agriculture: SUAMME-LR,, Lozère, Aveyron, Ardèche, Drôme*

Température moyenne de l'hémisphère nord, période 1000-2000 (Mann et al. 1999)

- A toutes échelles, monde, continents, régions, les températures ont évolué :
- De 1000 à 1900, tendance très faible au refroidissement (-0.3°C en 900 ans)
 - Depuis 1900, selon 3 phases :
 - accroissement lent de 1900 à 1945-49 ($< 0.1^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$, total $< 0.5^{\circ}\text{C}$)
 - palier de 1945-50 à 1975-79 = dernière période à climat stable
 - réchauffement rapide entre 1975 et 1980, de $+0.1$ à $+0.5^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$

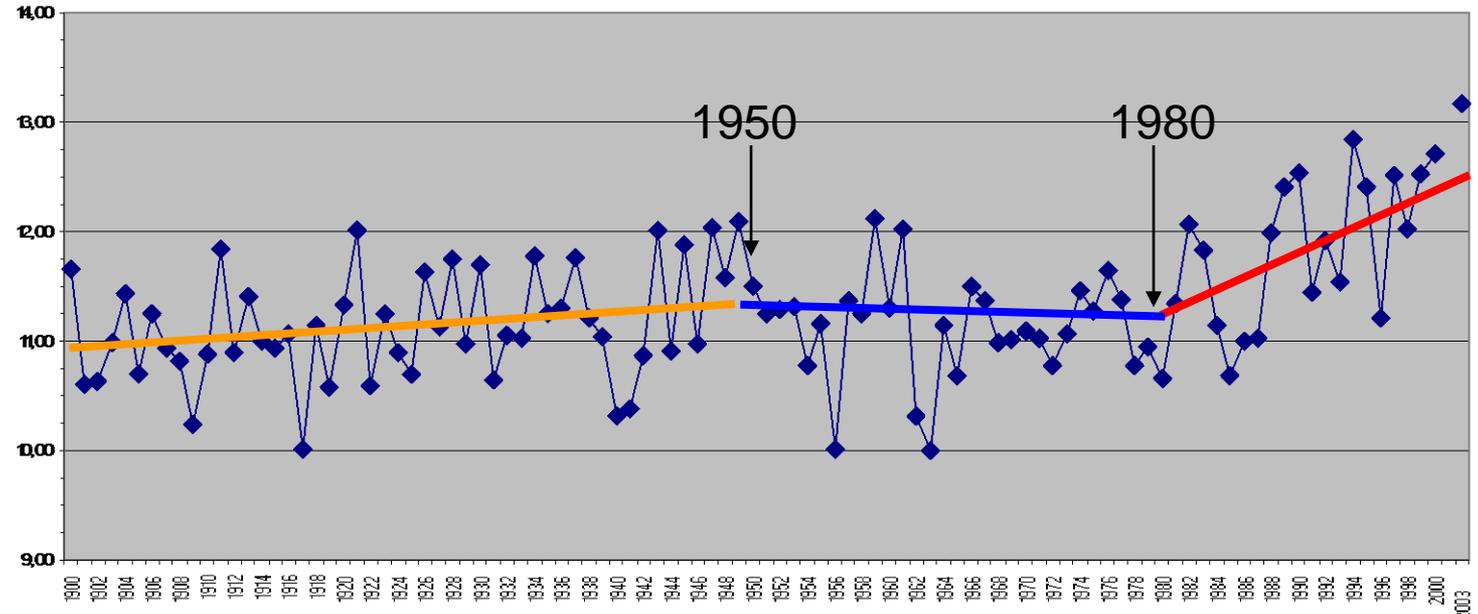


— reconstruction (1000-1980) — reconstruction (moyennes sur 40 ans)
— observations (1902-1998)

Cadre mondial : réchauffement 1900-2010 à 3 phases

Cas de la France métropolitaine : Temp. moy. annuelle 1900-2006 sur 66 stations M-F

Figure 1 Température moyenne annuelle sur la France métropolitaine (°C)



- Réchauffement lent environ de 1900 à 1950 (+0.1 °C/décennie)
- Stagnation ou léger refroidissement de 1950 à 1979 (-0.03 °C/déc)
- Réchauffement rapide depuis 1979 ou 1980 (+0.4 à 0.5 °C/déc)

Idem en Suisse, Allemagne, Grèce, Israël, Maroc, ... : de +0.3 à 0.5 °C/déc depuis 1980

1950-1979 = référence stable (avant réchauffement rapide)
1980-2009 = période de changement rapide analysée

Causes et conséquences des évolutions par phases

Causes des tendances, depuis 1900

Forçages du bilan énergétique terrestre par les activités humaines :

- positif (réchauffement) par les G.E.S. (CO_2 , CH_4 , N_2O , ...) qui ↗↗
- négatif (refroidissement) par les aérosols (ex: sulfures de charbon)
 - ont ↗ entre 1940 et 1980, annulant l'effet des G.E.S. croissants
 - ont ↘ de 1980 à 2005, accentuant le réchauffement en sus des GES

Conséquences méthodo pour étudier le climat passé

On caractérise le climat « normal » par l'espérance eY (eY =valeur la plus probable) de chacune des principales variables Y (températures, pluviométrie, etc) . L'habitude depuis toujours est d'assimiler eY à la moyenne M des valeurs observées sur 20 à 50 ans (dont la « normale » = moyenne des 3 dernières décennies).

- Ceci ($eY = M$) est OK sur les périodes où les variations interannuelles des Y ont été équilibrées autour d'une espérance quasi fixe, cas de 1950-1979

- Ce n'est pas adapté aux périodes où les variables Y ont suivi des tendances positives ou négatives: la variabilité tendancielle et la variabilité interannuelle imprévisible doivent être distinguées

⇒ Cela oblige à diviser le temps suivant les grandes phases mondiales et à choisir un modèle eY adéquat par phase

Adaptation du modèle d'étude du climat

Le temps est découpé en périodes respectant les variations générales :

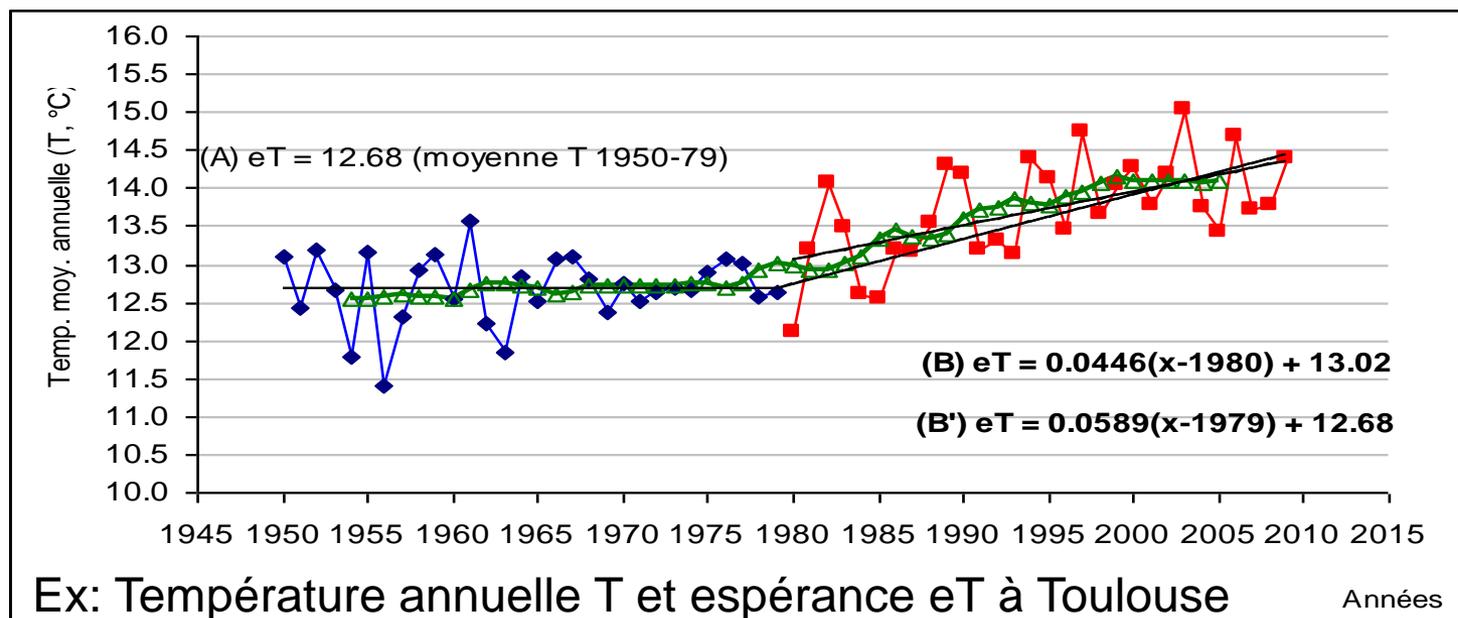
- 1950-79, pas de tendance ; période-référence avant changement signif. :

$$eY = \text{moyenne } M_{1950-79} \quad (\text{A})$$

- 1980-2009, tendance évolutive linéaire : $eY = a x + b$ (B)

Régression libre sur 30 points [1980-2009] = droite de « tendance réelle »)

On peut mettre eY en continuité sur 1950-79 et 1980-2009 en ajoutant l'année 1979 [$x=0$; $eY=M_{1950-79}$], et en faisant une 2ème régression imposant ce point-origine = tendance « corrigée » $eY = a'x + M_{1950-79}$ (B')



Le modèle 1980-2009 n'est valable que dans cet intervalle; il ne présume en rien du futur

Région et stations d'étude

Caractérisation dynamique du climat sur 14 stations (12 Météo-F+2 INRA:

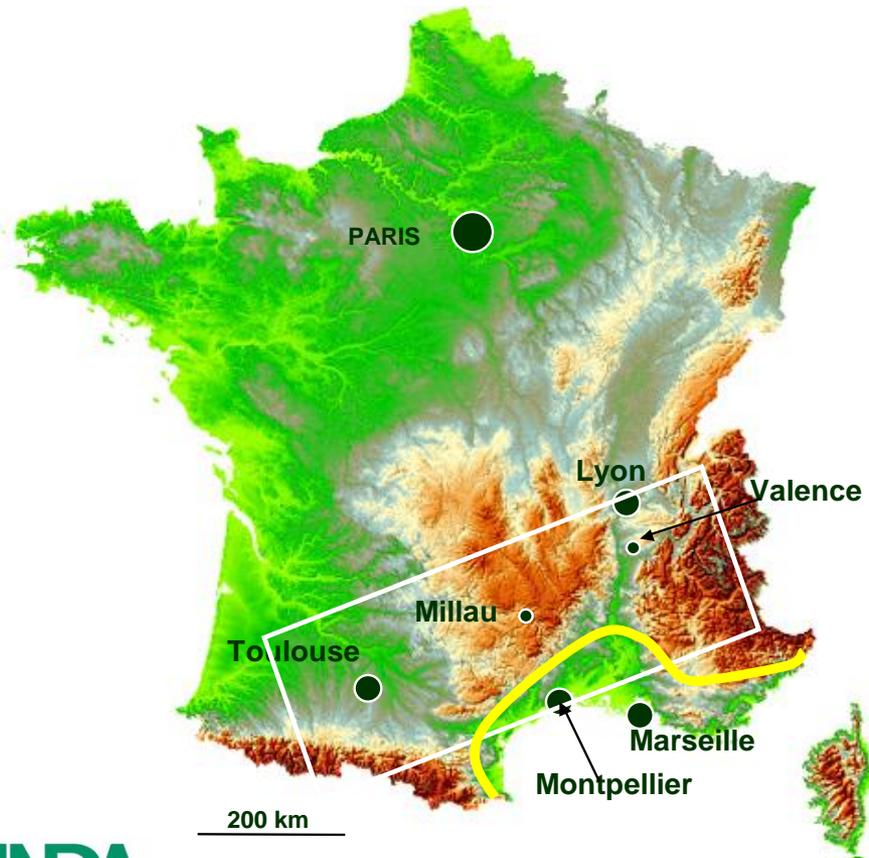
- séries 1980-2009 continues très fiables, 7 variables journalières
- données mensuelles 1950-79 (=référence « avant changement »)

● Plateaux 600-700 m:

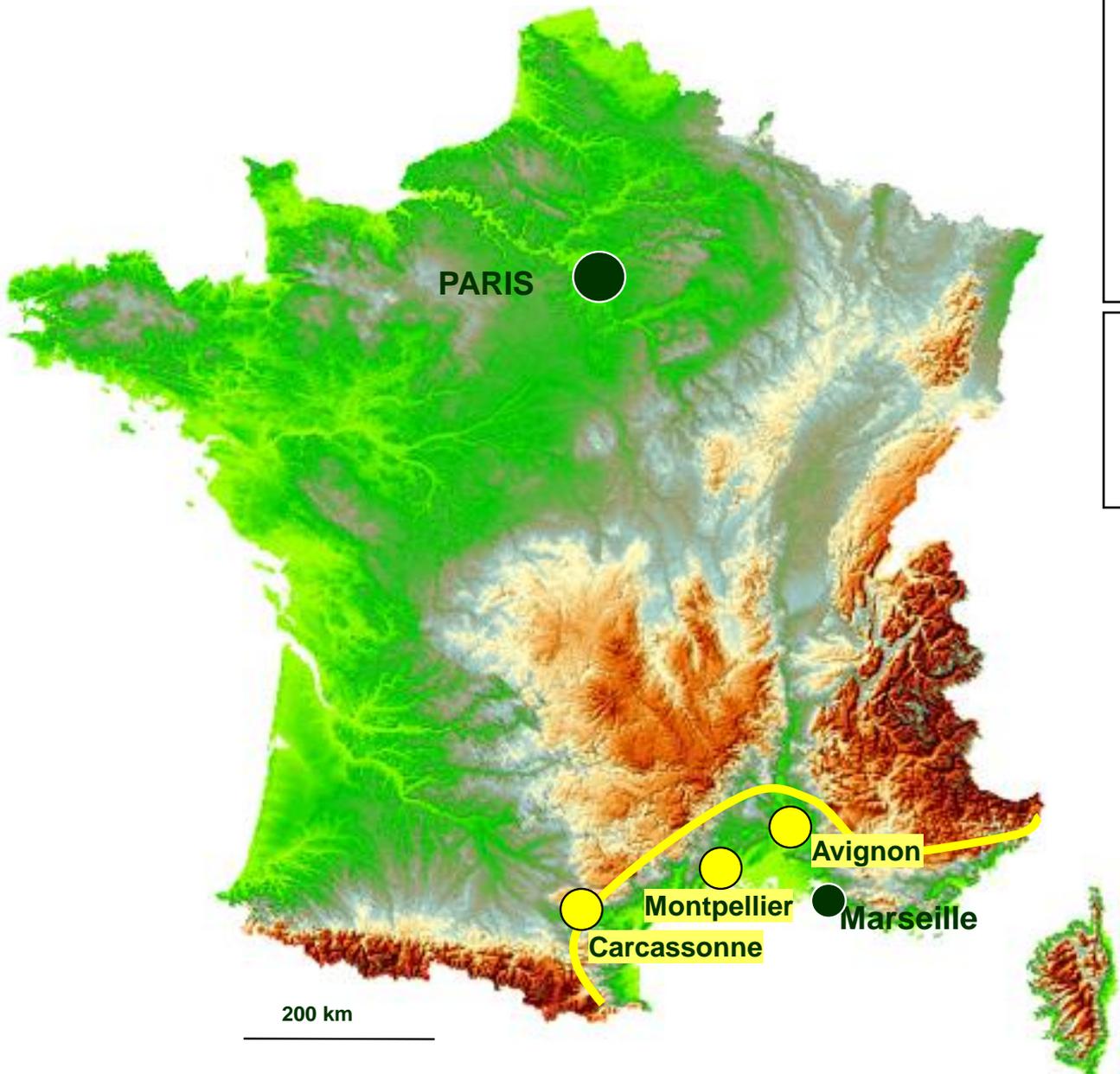
- **Colombier-le-Jeune MF (Ardèche)**
- **Mende MF (Lozère)**
- **Millau-Larzac MF (Aveyron)**

● Plaines :

- **Lyon-Bron MF (Rhône)**
- **Valence INRAv**
- **Montélimar MF (Drôme)**
- **Avignon INRA (Vaucluse)**
- **Montpellier MF (Hérault)**
- **Carcassonne MF (Aude)**
- **Toulouse MF (Hte Garonne)**
- **Albi MF (Tarn)**
- **Agen MF (Lot et Garonne)**
- **Gourdon MF (Lot)**
- **Pau MF (Pyrénées Atlantique)**



Stations : position et climat historique



Climat historique :

- ▲ temp. hum. Atlant.
- ▲ tempéré humide
- ▲ tempéré sub-Médit.
- Méditerranéen

Altitude :

- plaine (< 200 m)
- △ plateau (500-700 m)

Stations : position et climat historique



Climat historique :

- ▲ temp. hum. Atlant.
- ▲ tempéré humide
- ▲ tempéré sub-Médit.
- Méditerranéen

Altitude :

- plaine (< 200 m)
- △ plateau (500-700 m)

Stations : position et climat historique



Climat historique :

- ▲ temp. hum. Atlant.
- ▲ tempéré humide
- ▲ tempéré sub-Médit.
- Méditerranéen

Altitude :

- plaine (< 200 m)
- △ plateau (500-700 m)

Données analysées

Analyse des **VARIATIONS INTERANNUELLES** des variables :

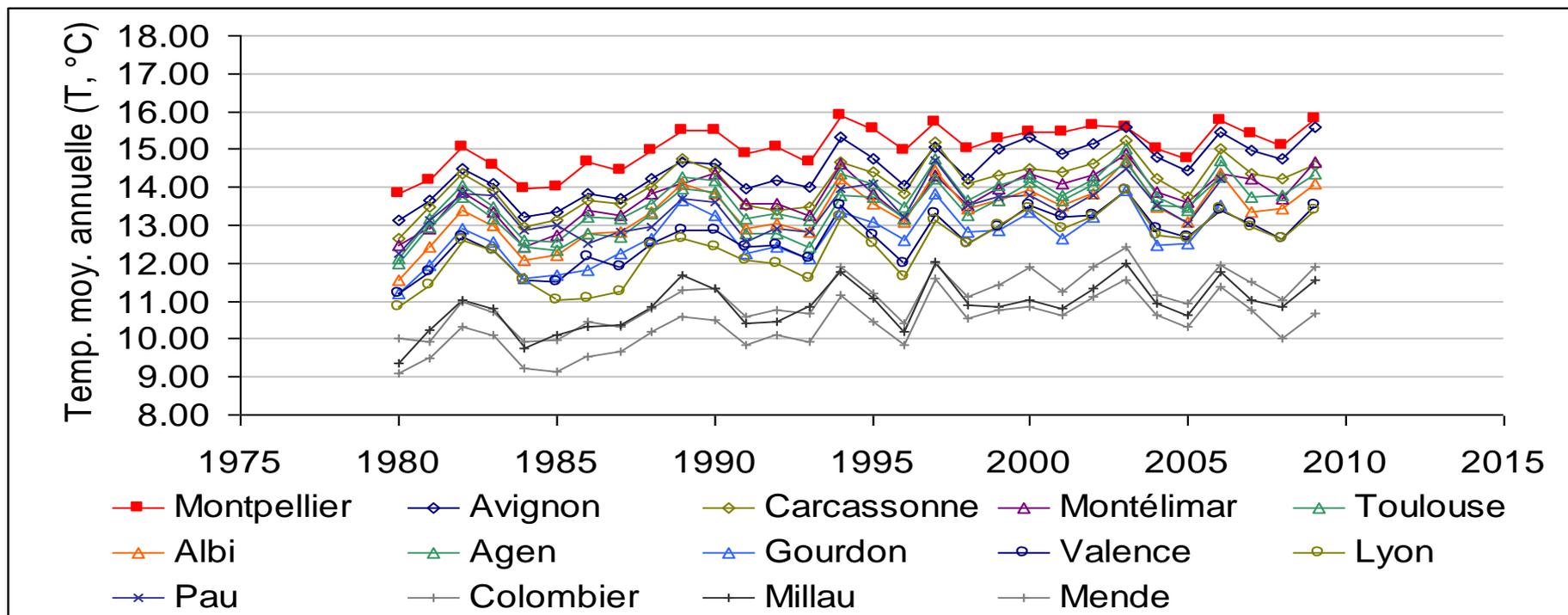
- Températures max, min, moy (annuelle, par mois, par saison)
- Pluviométrie (annuelle, par mois, par saison)
- ETP_{pm} (pm=Penman-Monteith) (annuelle, par mois, par saison)
- Déficit climatique ETP-P, indice d'aridité P/ETP (annuel, mois, saison)

Etudes des : - **30 valeurs caractérisant [1950-79]**

- **et 30 valeurs [1980-2009]**

- Représentation des valeurs annuelles et d'une moyenne glissante courte (chaque année caractérisée par les 5, 7 ou 9 années l'entourant)
- Tests de stabilité vs évolution par régressions linéaires f(30 années);
- Les pentes des droites de régression (= tendances) sont exprimées en vitesse décennales (/10 ans)

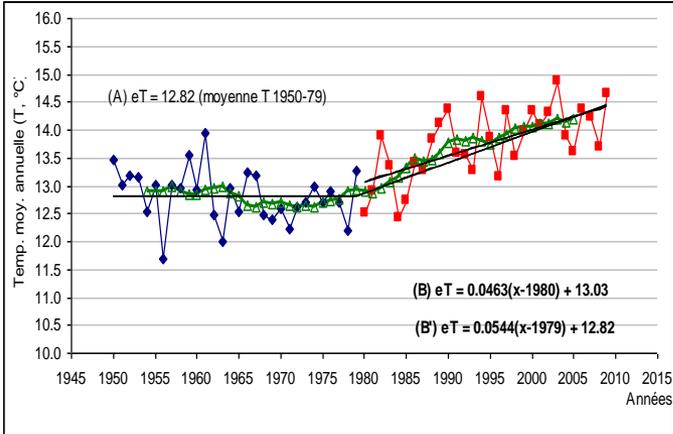
Températures moyennes annuelles de 1980 à 2009



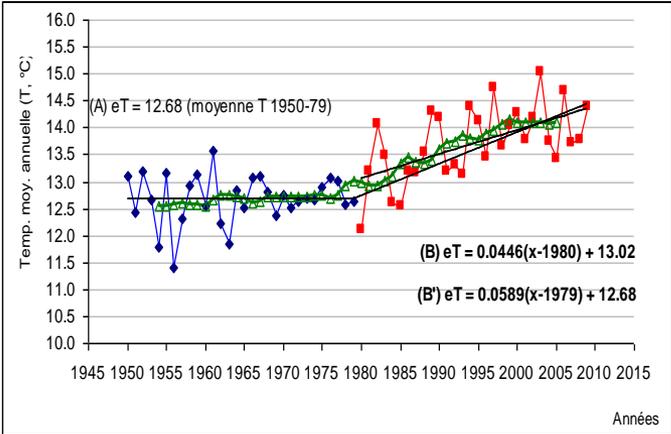
Evolutions très parallèles entre les 14 stations :

- **Tendance au réchauffement assez uniforme, très significatif: +0.5°C/décennie soit +1.5°C en 30 ans**
- **Mêmes variations interannuelles (mêmes années chaudes/froides)**

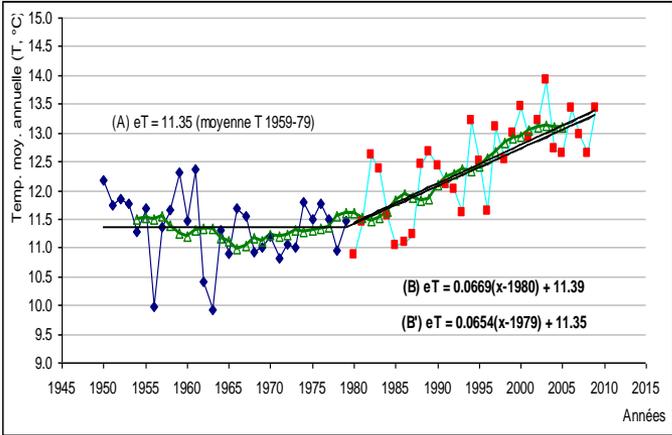
Evolution des températures annuelles par station 1950-79 et 1980-2009



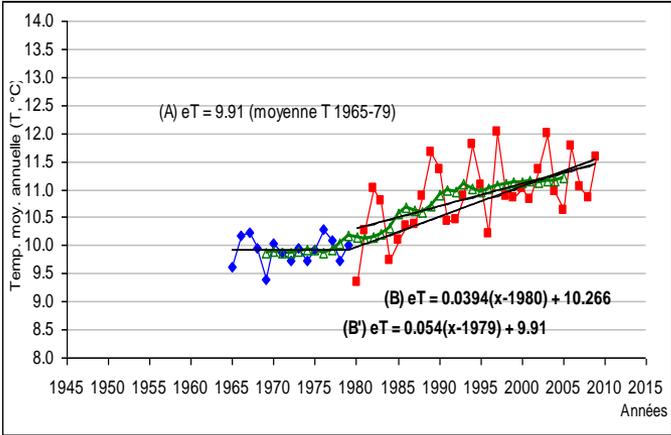
Avignon



Toulouse



Lyon-B

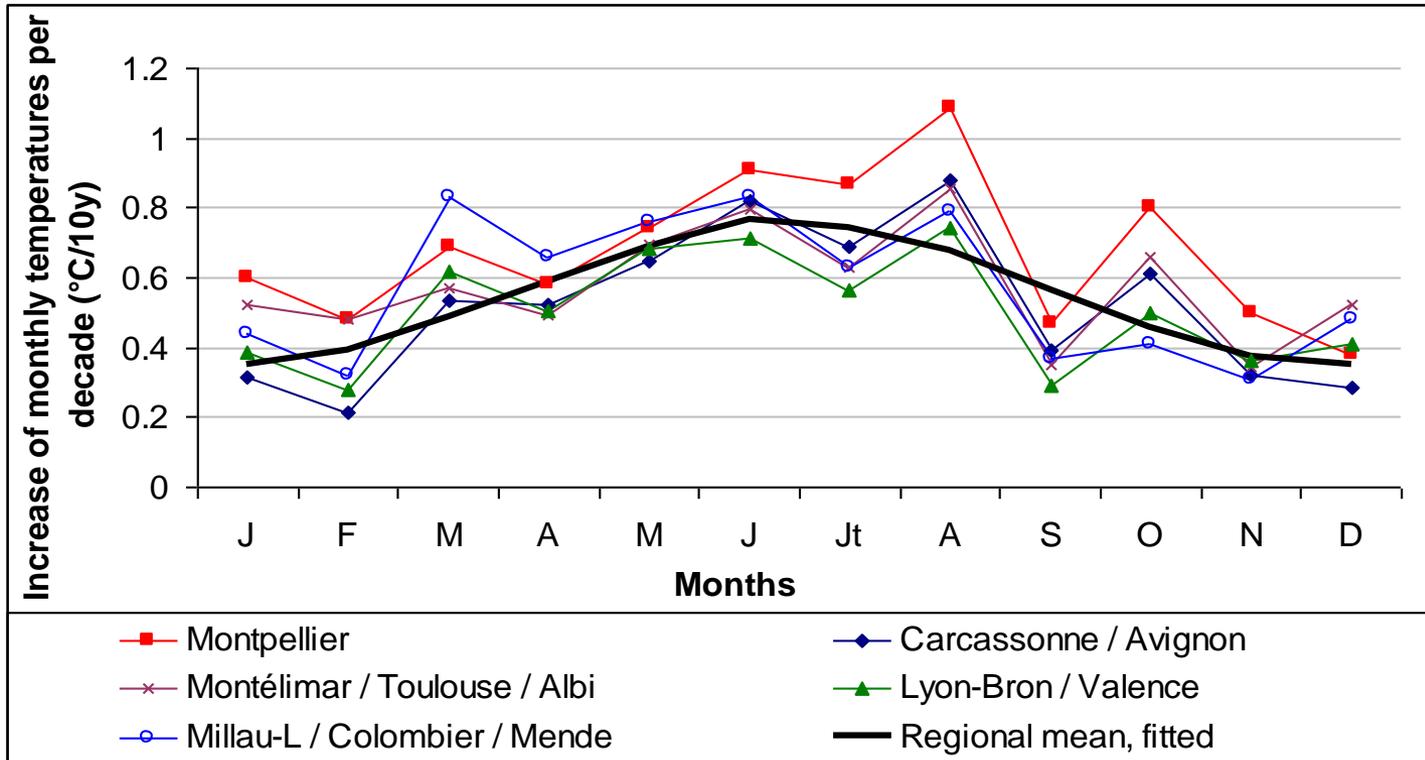


Millau-L

- ◆ T 1950-79
- T 1980-2009
- ▲ T 1950-2009, moyennes mobiles (9 ans)
- Modèle eT pour 1950-79 (A)
- Modèle eT pour 1980-2009 (B)
- Modèle eT pour 1979-2009 (B')



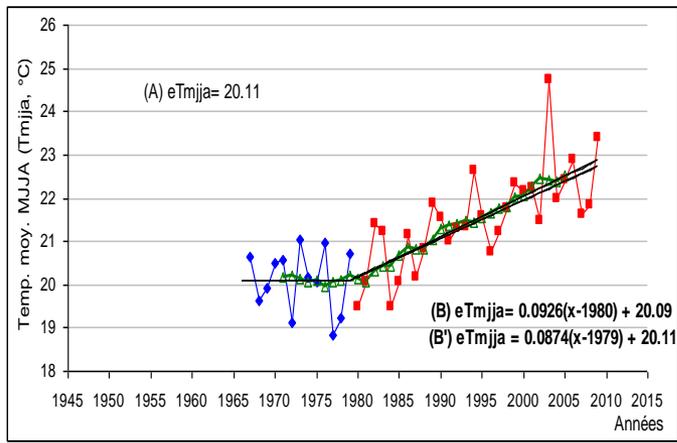
Tendances des températures moyennes mensuelles 1980-2009



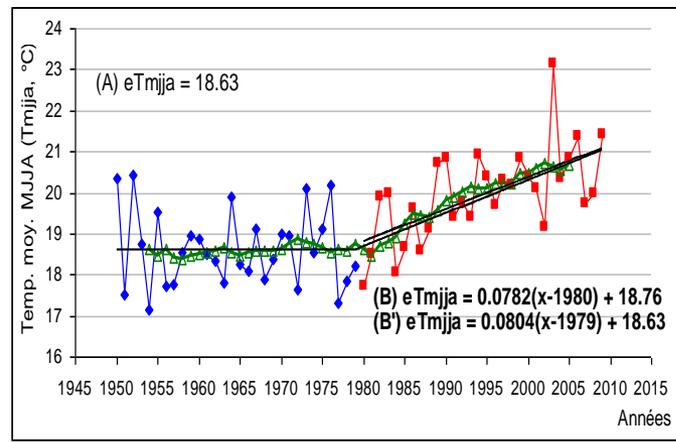
L'augmentation moyenne de $+0.5^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$ se répartit en :

- **ETE (de mai à août) : $+0.8^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$ ($+2.3^{\circ}\text{C}$ en 30 ans)**
- **HIVER (novembre à février) : $+0.3^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$ ($+0.8^{\circ}\text{C}$ en 30 ans)**

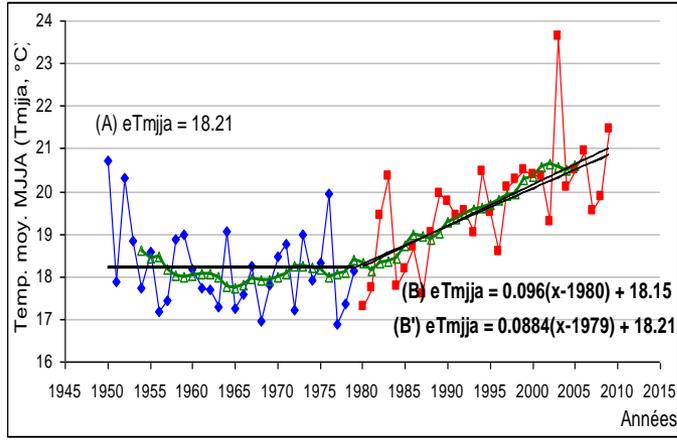
Evolution des températures moyennes de la période sèche-chaude, mois MJJA



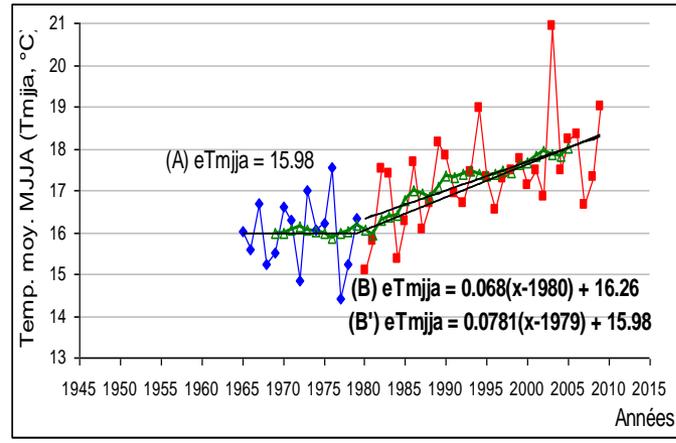
Avignon



Toulouse



Lyon-B

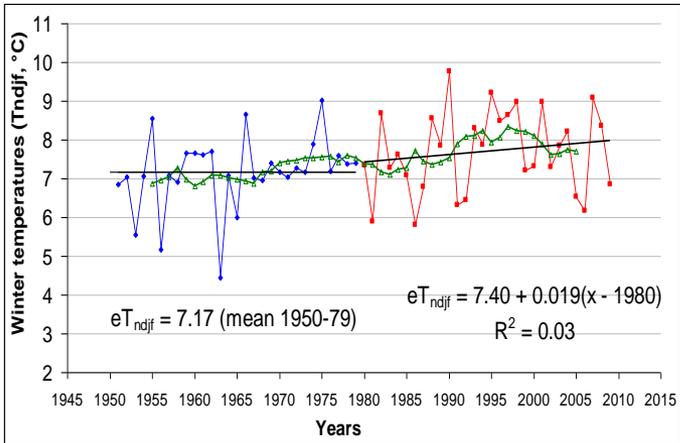


Millau-L

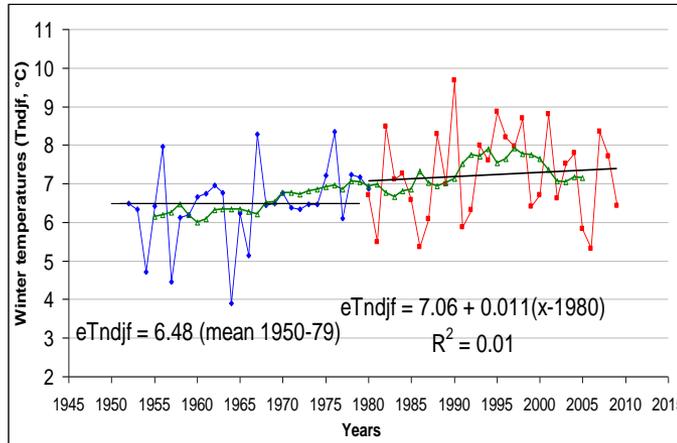
- ◆ T_{mija} 1950-79
- ◆ T_{mija} 1980-2009
- ◆ T_{mija} 1950-2009, moyennes mobiles (9 ans)
- Modèle eT_{mija} pour 1950-79 (A)
- Modèle eT_{mija} pour 1980-2009 (B)
- Modèle eT_{mija} pour 1979-2009 (B')



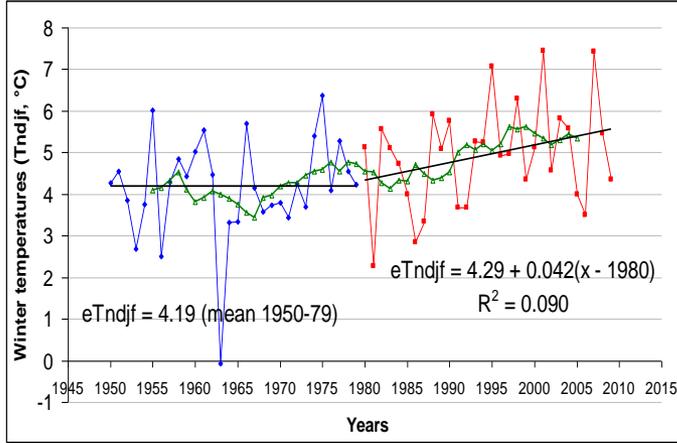
Evolution des températures moyennes de la période humide-froide, mois NDJF



Carcassonne



Toulouse



Lyon-B

- ◆ Winter temperatures Tndjf 1950-79
- Winter temperatures Tndjf 1980-2009
- ▲ Decadal average Tndjf 1955-2005
- Linear model eTndjf (expectancy) 1950-79
- Linear model eTndjf (expectancy) 1980-2009

Tendances décennales d'évolution des températures moyennes 1980-2009 (°C/décennie)

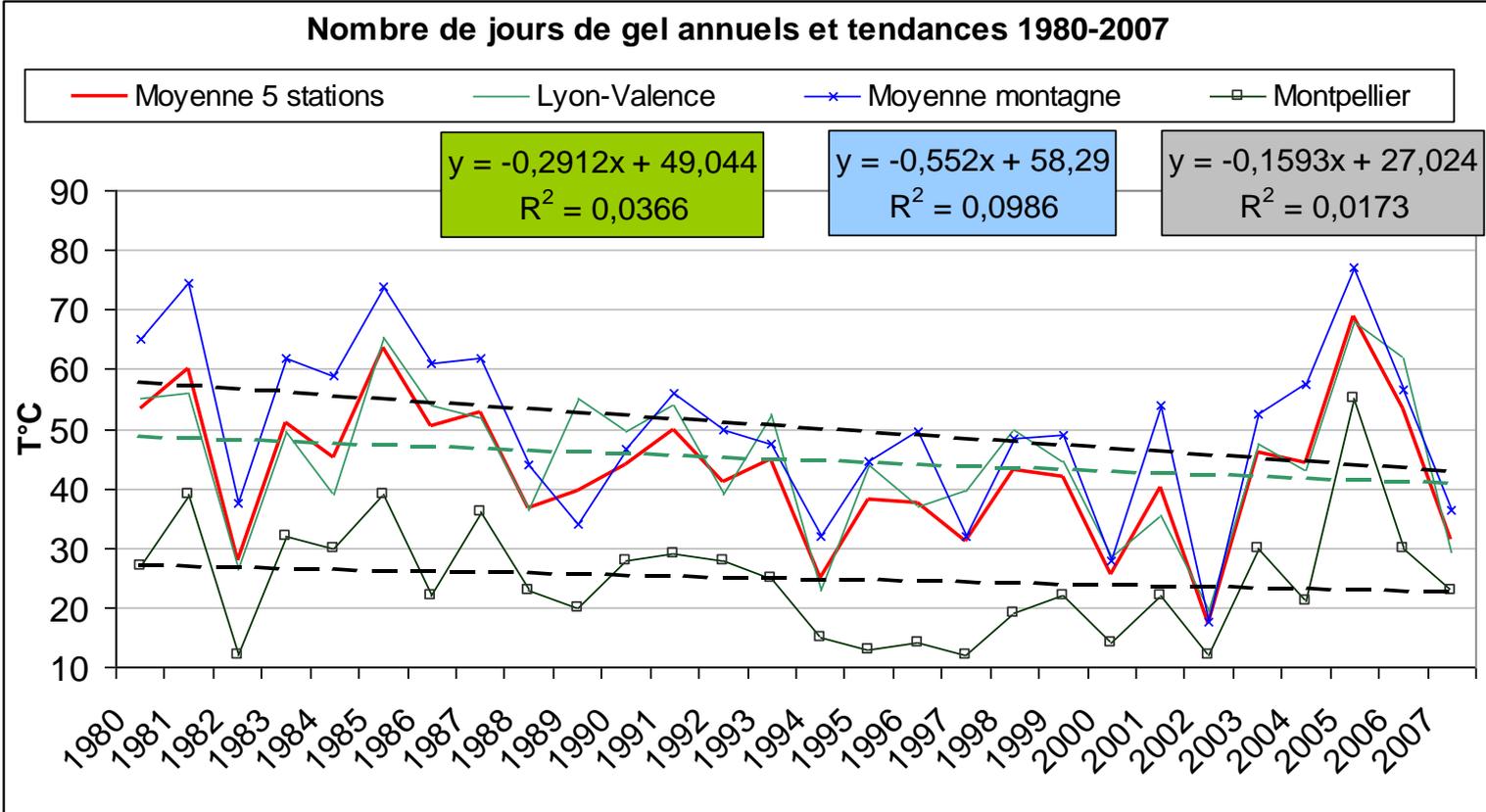
	ANNEE		ETE (mois MJJA)		HIVER (mois NDJF)	
	a	R	a	R	a	R
Montpellier	0.43	0.66	0.69	0.67	0.25	0.23
Avignon	0.61	0.77	0.93	0.73	0.36	0.32
Carcassonne	0.44	0.60	0.73	0.61	0.19	0.16
Montélimar	0.46	0.65	0.65	0.55	0.35	0.31
Toulouse	0.45	0.58	0.78	0.63	0.11	0.08
Albi	0.52	0.58	0.87	0.59	0.19	0.13
Valence	0.55	0.72	0.77	0.62	0.35	0.28
Lyon-B	0.67	0.73	0.96	0.66	0.42	0.30
Agen	0.56	0.65	0.91	0.71	0.20	0.14
Gourdon	0.52	0.53	0.91	0.60	0.10	0.06
Pau	0.39	0.43	0.80	0.60	-0.10	0.09
Millau-L	0.39	0.54	0.68	0.52	0.17	0.13
Colombier-J	0.55	0.68	0.81	0.58	0.32	0.22
Mende	0.51	0.62	0.85	0.64	0.26	0.20
Moyenne régionale	0.50	-	0.80	-	0.25	-

Réchauffement total en 30 ans :

Moyenne régionale	+1.5	-	+2.4	-	+0.75	-
--------------------------	-------------	---	-------------	---	--------------	---

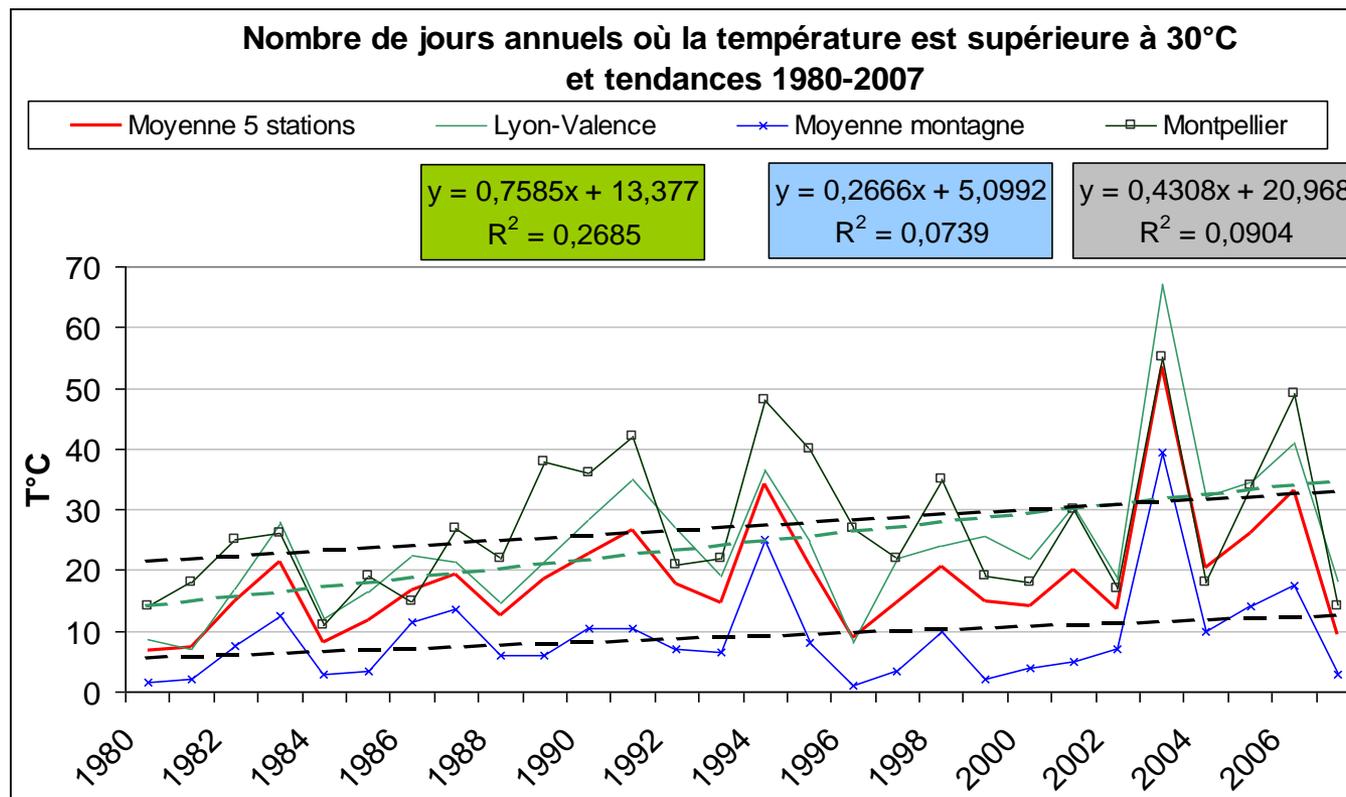
Changement très important, surtout en saison chaude-sèche MJJA

Le nombre de jours de gel par an



→ **Tendance à la baisse, non significative (2005 année très gélive)**

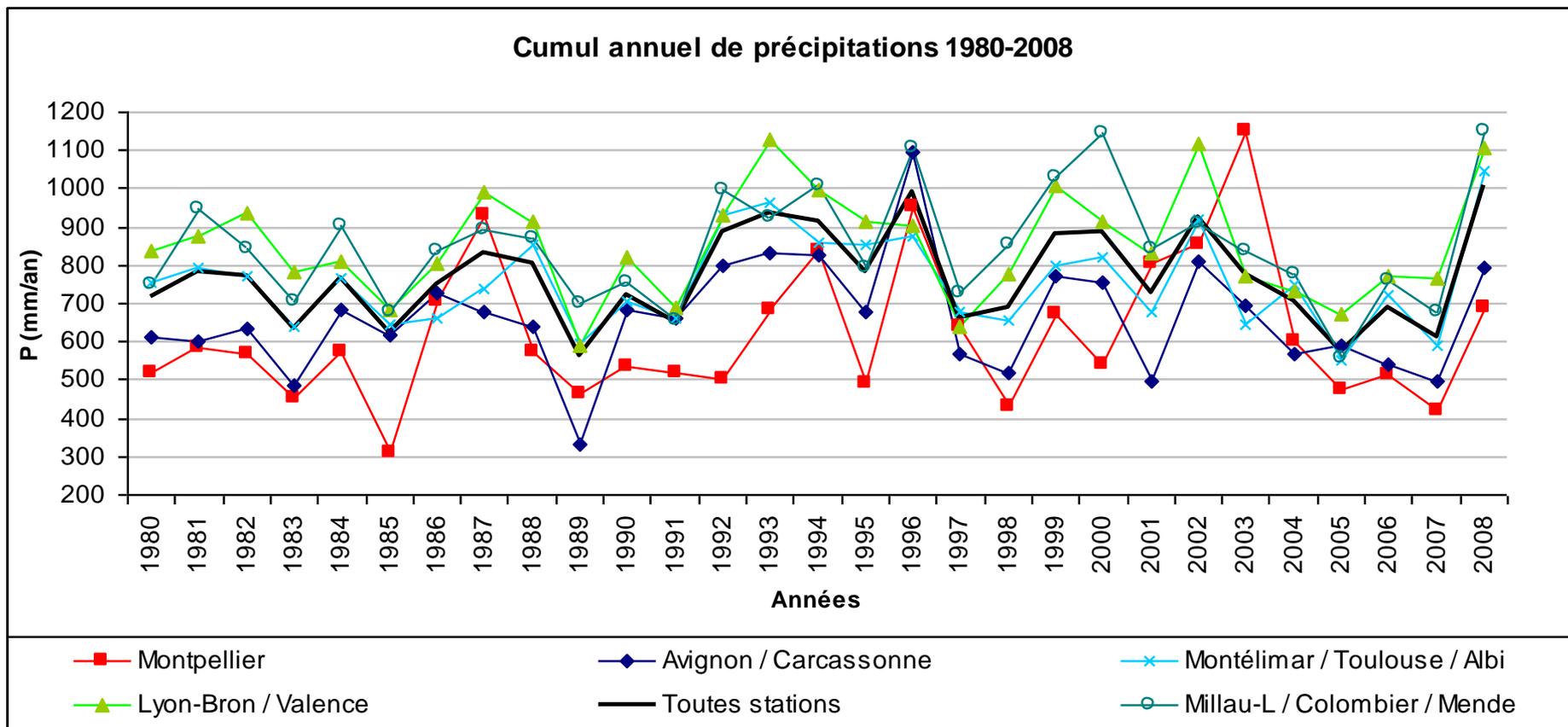
Nombre de jours annuels où la température est supérieure à 30°C



→ Augmentation la plus nette : Lyon et Valence : + 7 j/décennie

→ Moyenne montagne et Montpellier : + 2 à 4 jours/ décennie

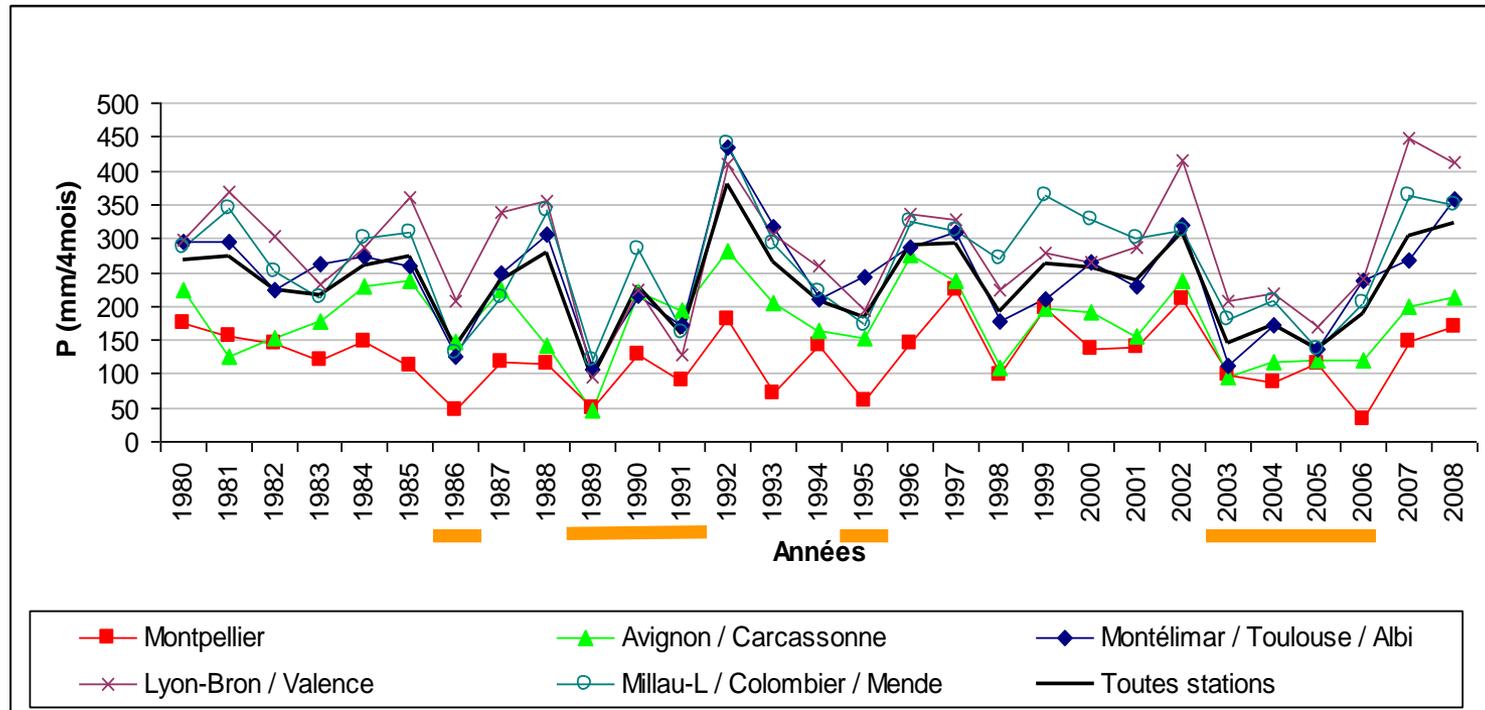
Pluviométrie moyenne annuelle 1980-2009



→ Forte variabilité inter-annuelle

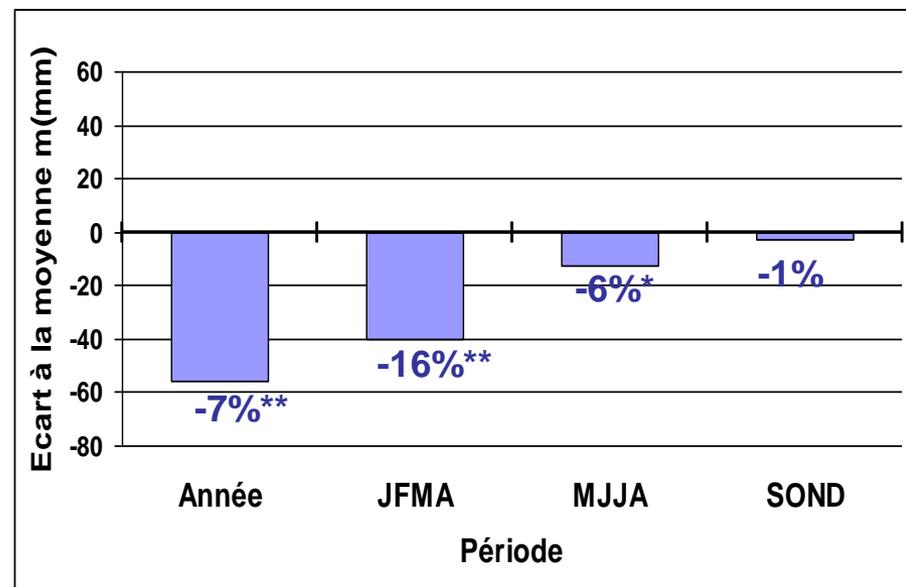
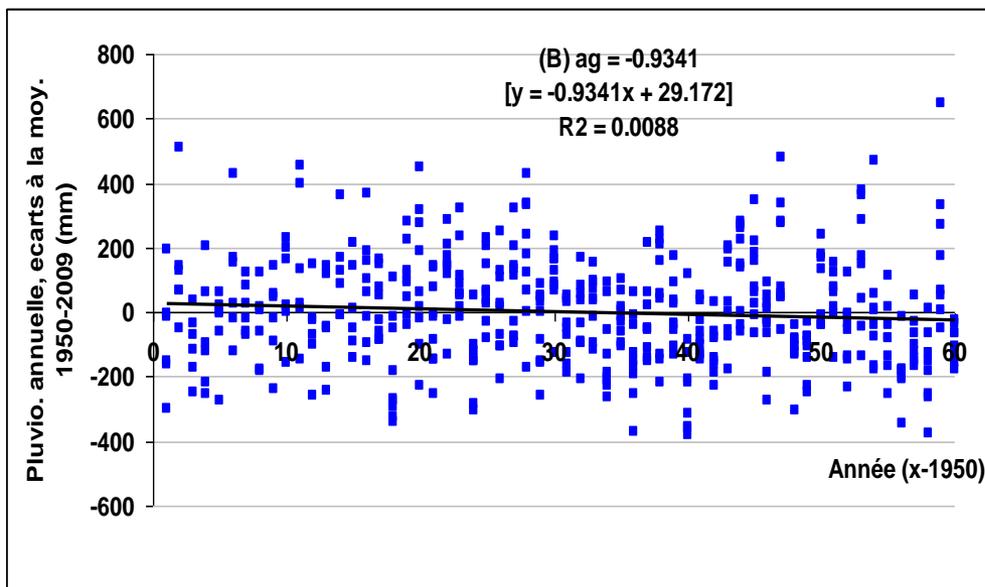
→ Pas de tendance perceptible par station

Pluviométrie saison sèche MJJA 1980-2009



- Forte variabilité inter-annuelle
- pas de tendance d'évolution
- 3 groupes : Montpellier < Avignon-Carcassonne < autres sites
- Des années ou suites d'années à été sec :
 1986 1989-90-91 (1995) 2003-04-05-06

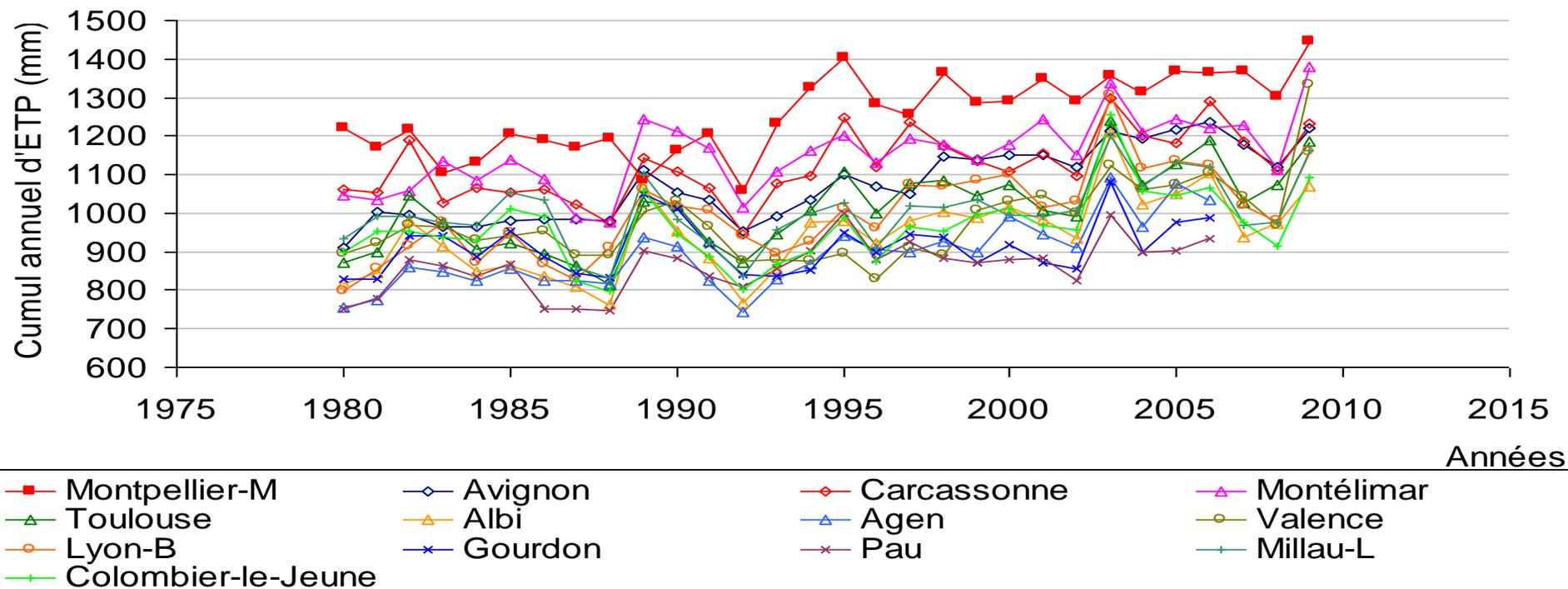
Pluviométrie moyenne annuelle de 1950 à 2009



Si on transforme les données des 60 années de chaque station en écart à sa moyenne 1950-2009 et qu'on traite toutes les stations ensemble, on a une baisse significative de janvier à août : - 50 mm .

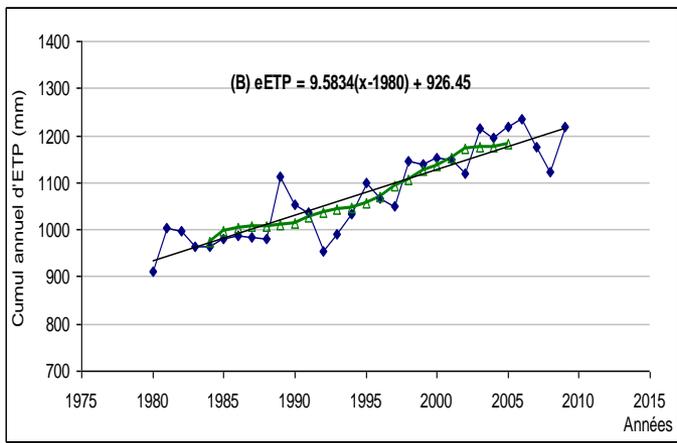
- Pas de changement de la pluviométrie d'automne (SOND)

Évapotranspiration annuelle ETP 1980-2009

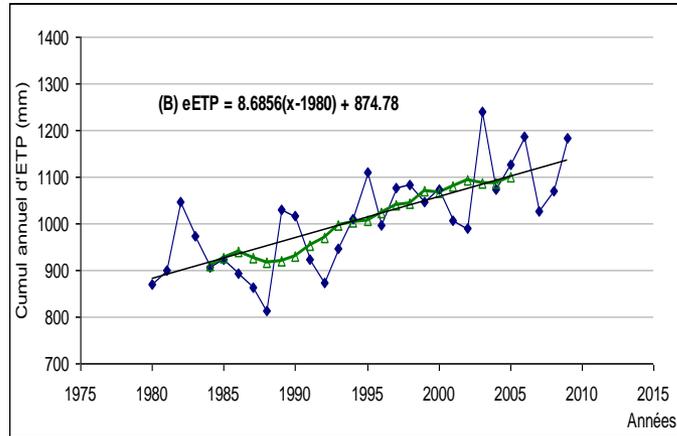


- **Evolution positive, un peu moins parallèle que la température;**
- **Fortement croissante : régressions hautement significatives sur chaque stations**

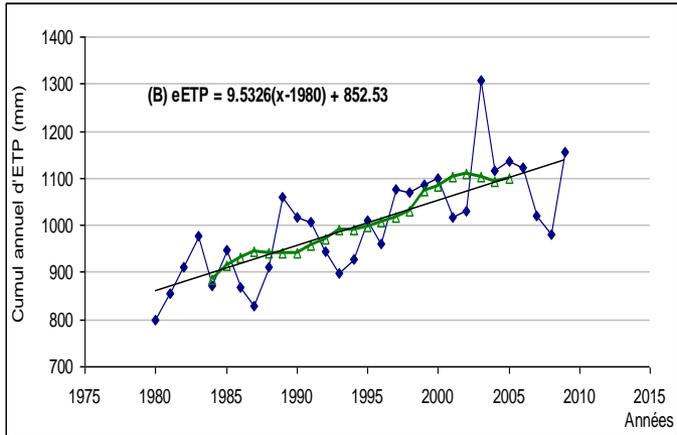
Evolution de l'évapotranspiration potentielle (ETP) annuelle 1980-2009



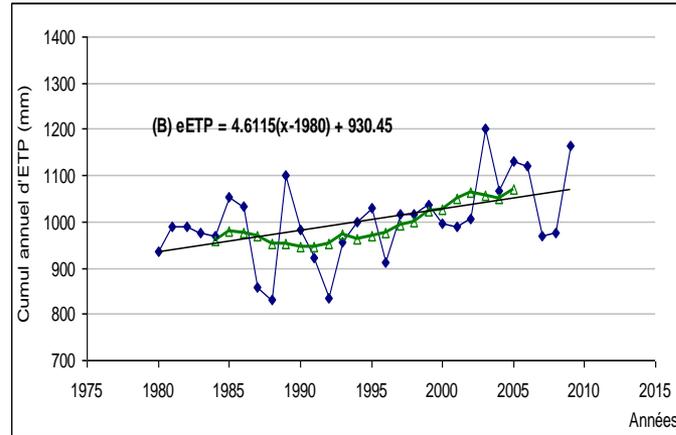
Avignon



Toulouse



Lyon-B



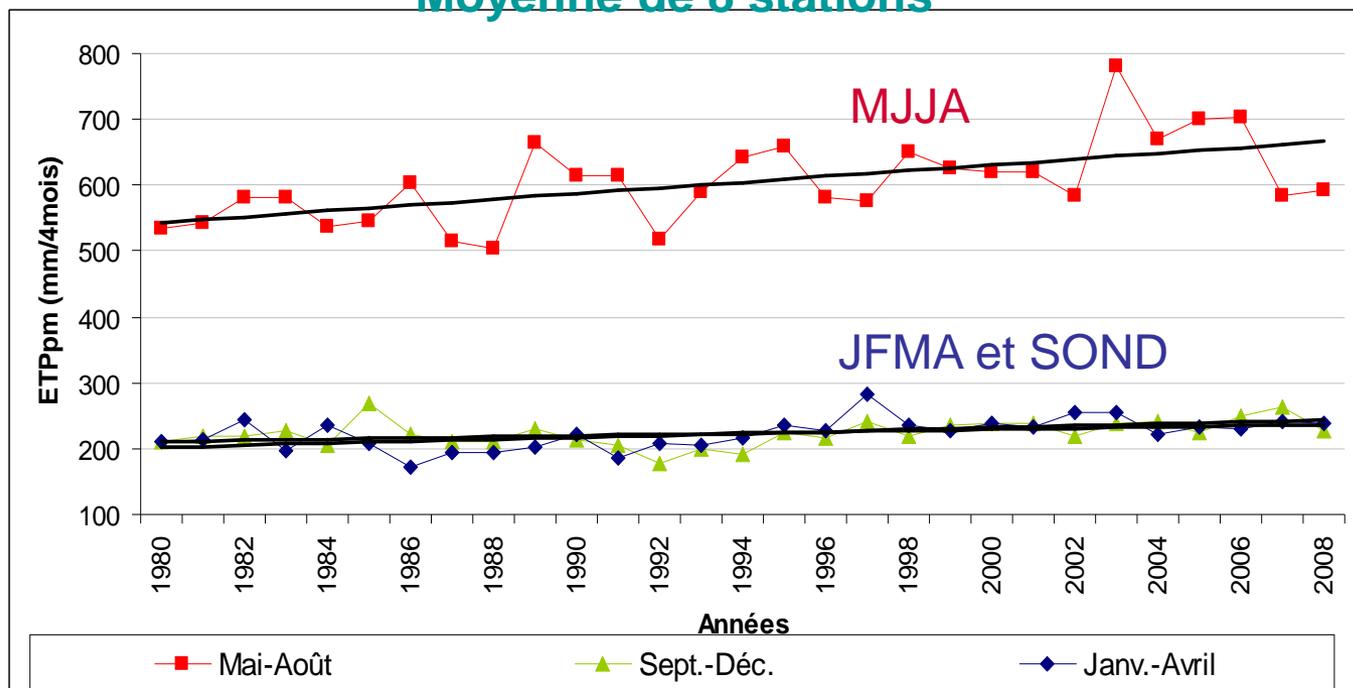
Millau-L

◆ ETP 1980-2009 ▲ ETP 1980-2009, moyenne mobile (9 ans) — Modèle eETP pour 1980-2009



Evapotranspiration ETP par périodes

Moyenne de 8 stations



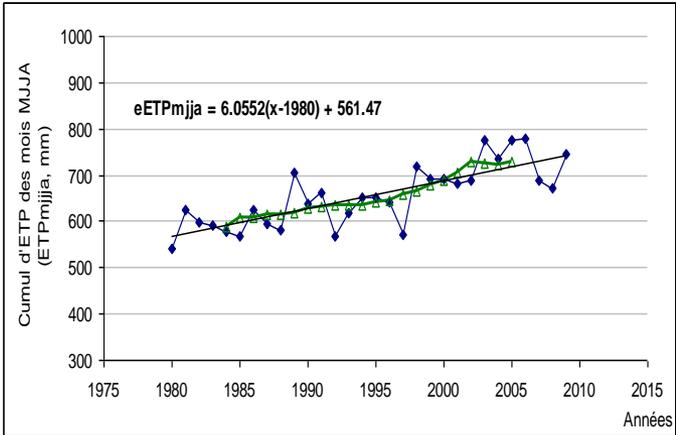
L'été-MJJA représente 60-70% de l'ETP annuelle et génère :

= les 2/3 de la tendance annuelle en plaine (soit +50 mm/décennie),

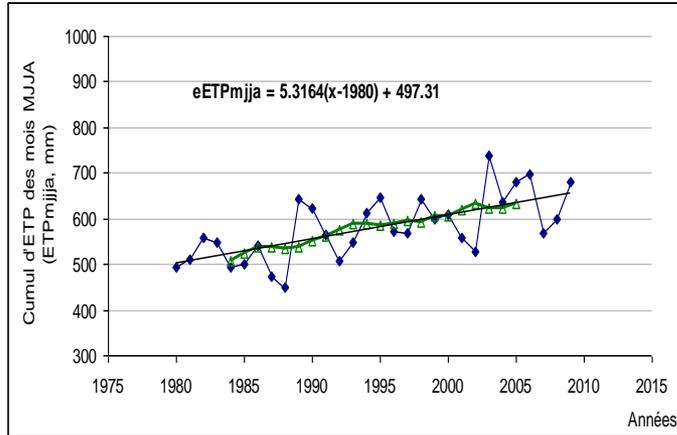
= la quasi totalité sur les plateaux (soit +35 mm/décennie).

Cumul sept-déc et janvier-avril : augmente aussi significativement

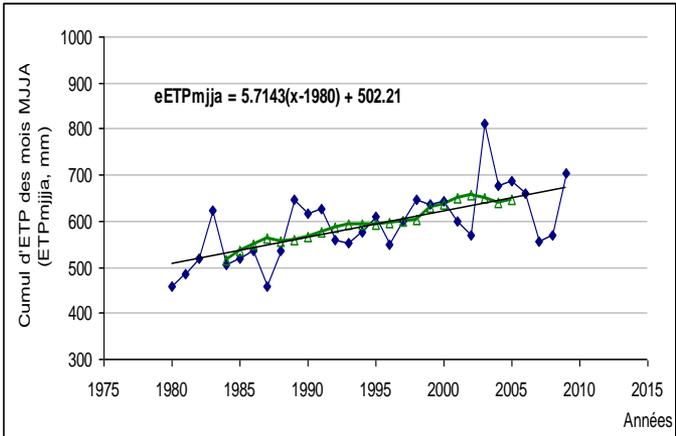
Evolution de l'évapotranspiration potentielle (ETP) période sèche-chaude, mois MJJA



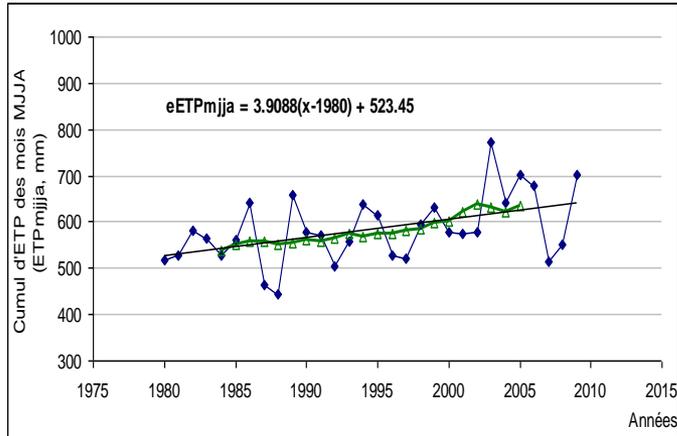
Avignon



Toulouse



Lyon-B



Millau-L



Tendances d'évolution de l'évapotranspiration ETP

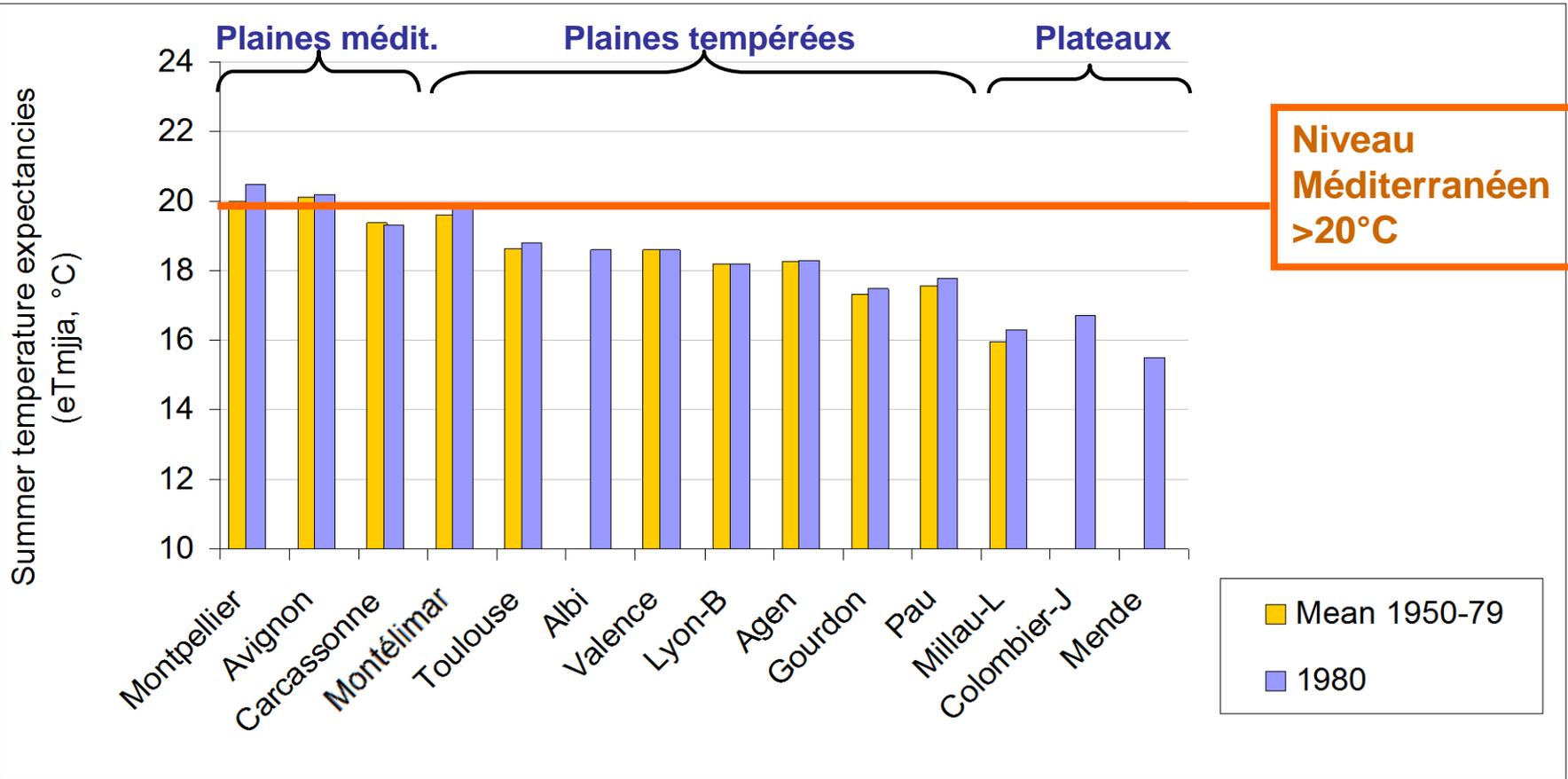
Vitesses d'accroissement de l'ETP-an et de l'ETP-été-MJJA, en mm/décennie : toutes les valeurs sont significativement positives par station individuelle.

Groupe		Station	Année	été MJJA
G1	Plaines méditerranéennes sub-humides	Montpellier-M	87	51
		Avignon	96	61
		Carcassonne	62	39
	Plaines tempérées sub-méditerran.	Montélimar	72	41
		Toulouse	87	53
		Albi	76	55
	Plaines tempérées humides	Valence	68	42
		Lyon-Bron	95	57
		Agen	90	58
G2	Plaines tempérées humides atlantiques	Gourdon	25	27
		Pau	50	38
	Plateaux	Millau-Larzac	46	39
		Colombier-J.	47	35
		Mende	-	-
Moyenne G1 (plaines sauf atlantiques)			80	50
Moyenne G2 (plateaux, plaines atlantiques)			42	35

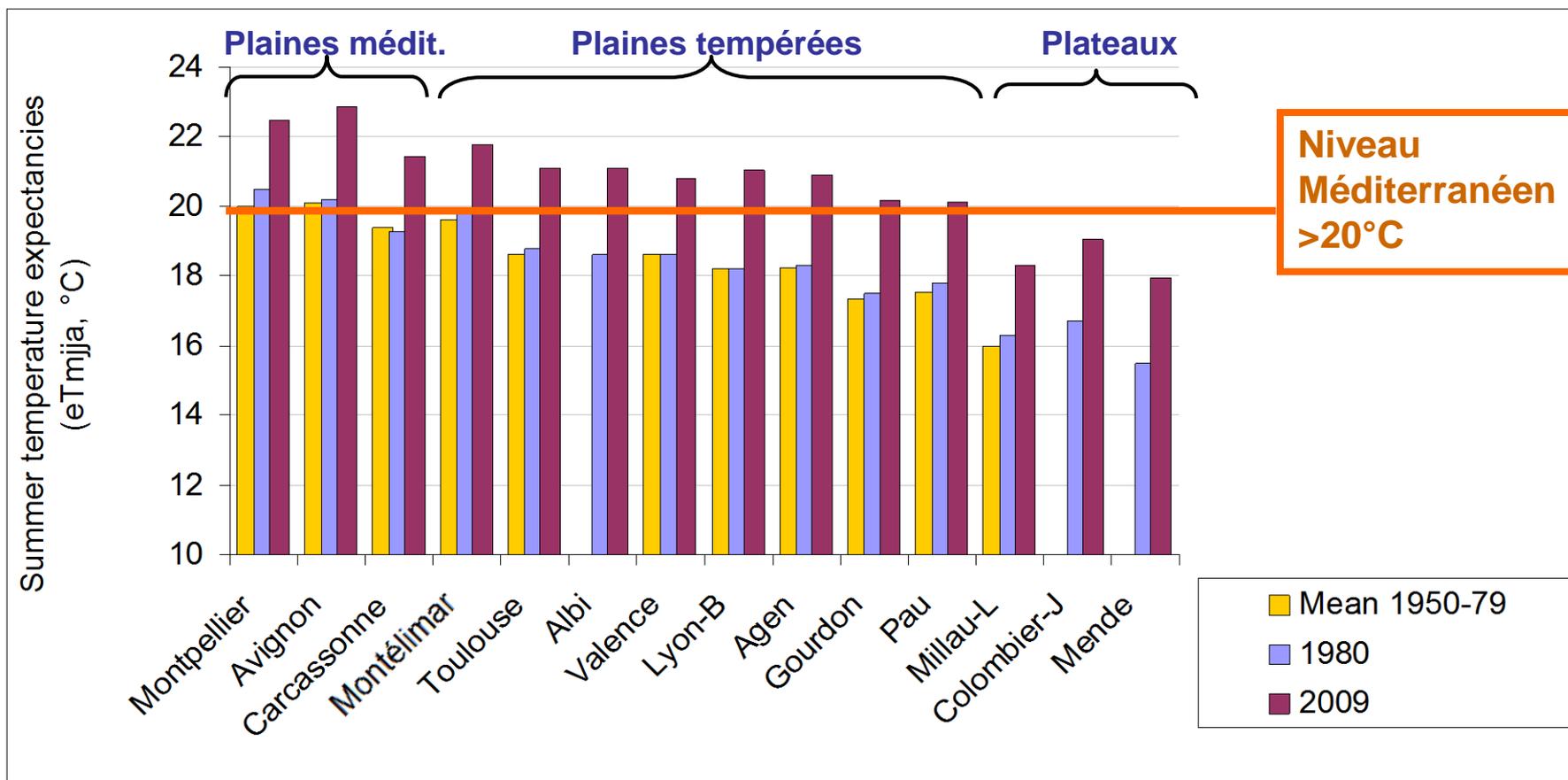
En 30 ans: +240 mm en plaines dont +150 mm MJJA, soit +20 à +30% (considérable)
 +125 mm en G2 dont +105 mm en MJJA, soit +15 à +20% (important)

C'est le facteur de la production agricole le plus modifié en 30 ans.

Période mai-août 1980/2009 : Température moyenne



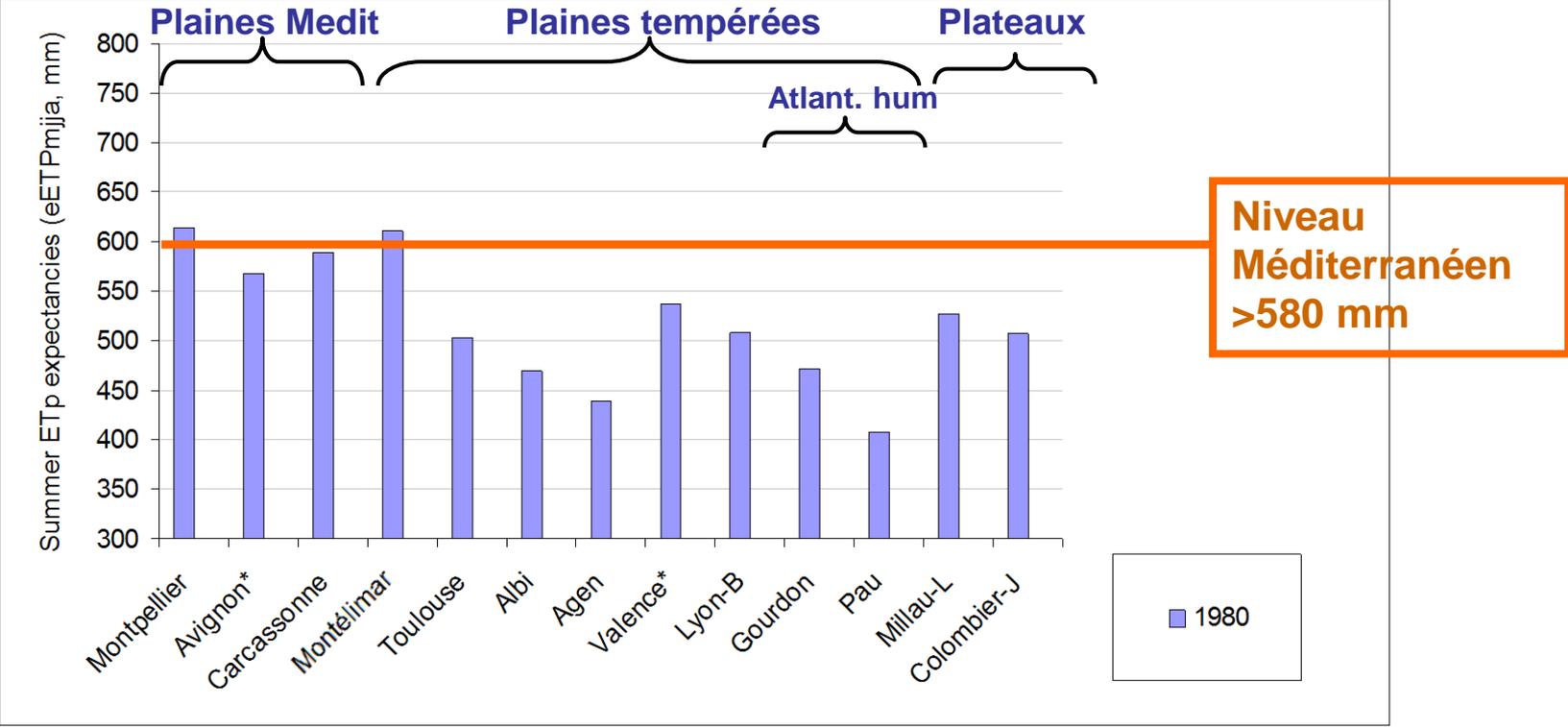
Période mai-août 1980/2009 : Température moyenne



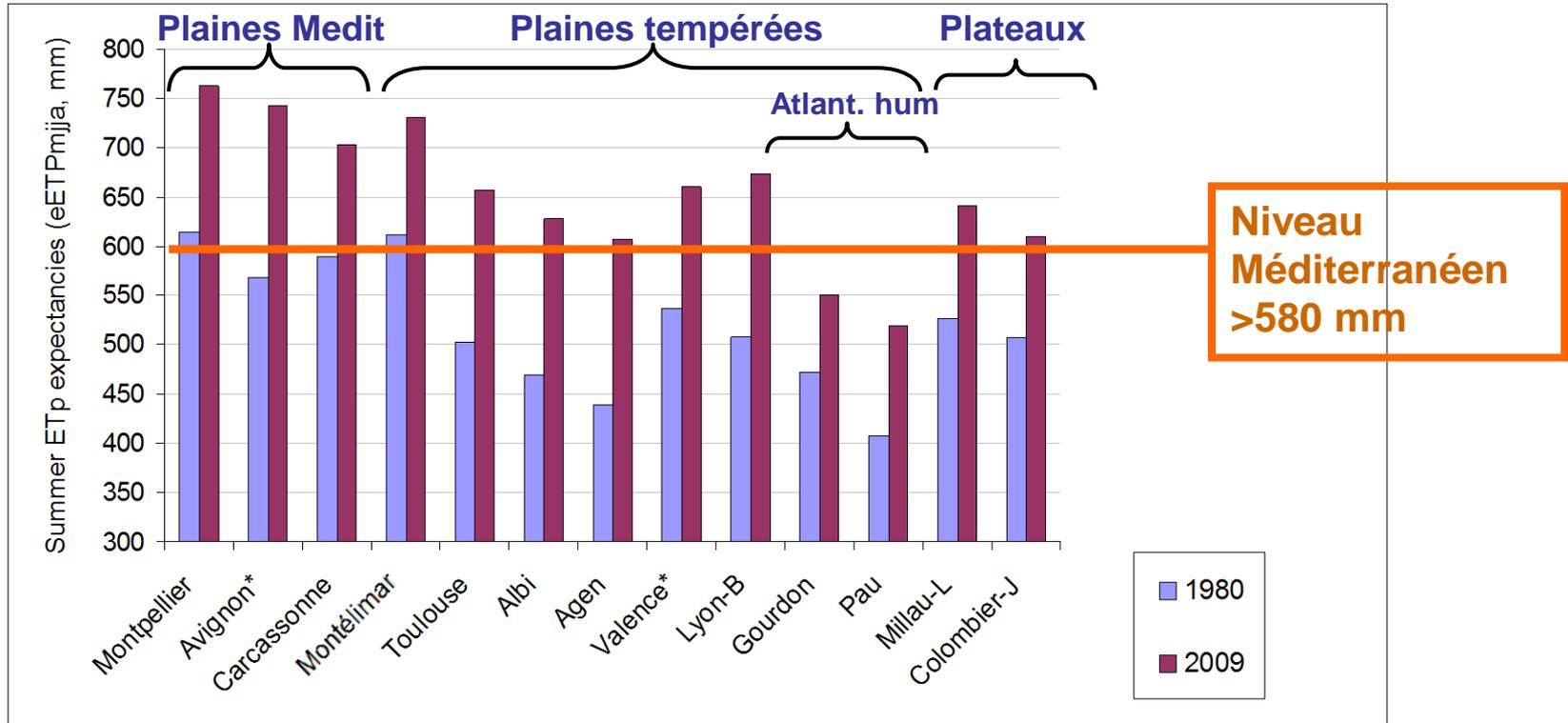
- En moyenne +2.3 °C sur 30 ans

- En plaine, les espérances de températures jusqu'à Lyon-Bordeaux sont supérieures à celle de Montpellier-Avignon jusqu'en 1980
(Avancée des isothermes vers N et NO de 250 à 300 km)

Période mai-août 1980/2009 : Evapotranspiration ETP



Période mai-août 1980/2009 : Evapotranspiration ETP

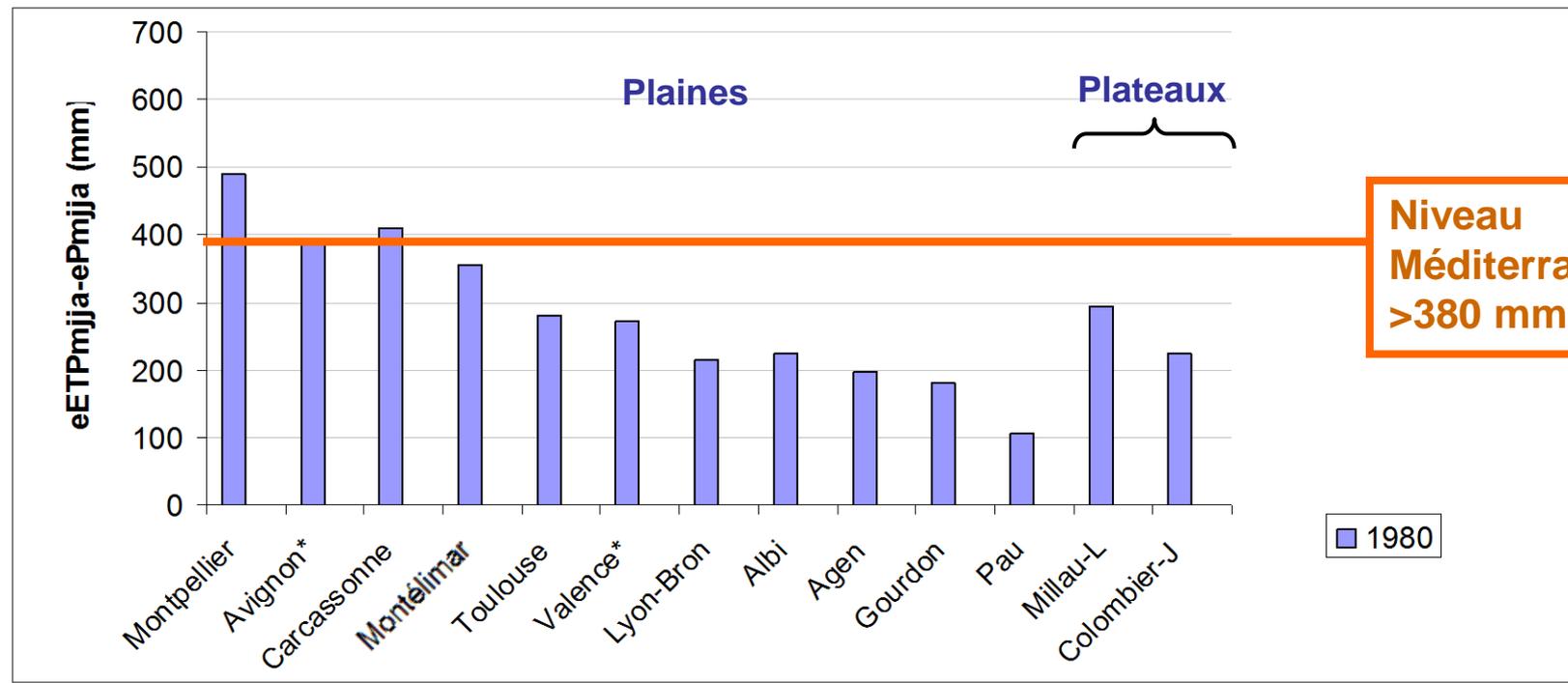


+125 mm sur 30 ans (+150 mm plaines médit; +100 mm sur plateaux)

- En plaines toutes les espérances d'ETP (sauf plaines atlantiques) sont supérieures à celles de Montpellier-Avignon-Carcassonne 1980

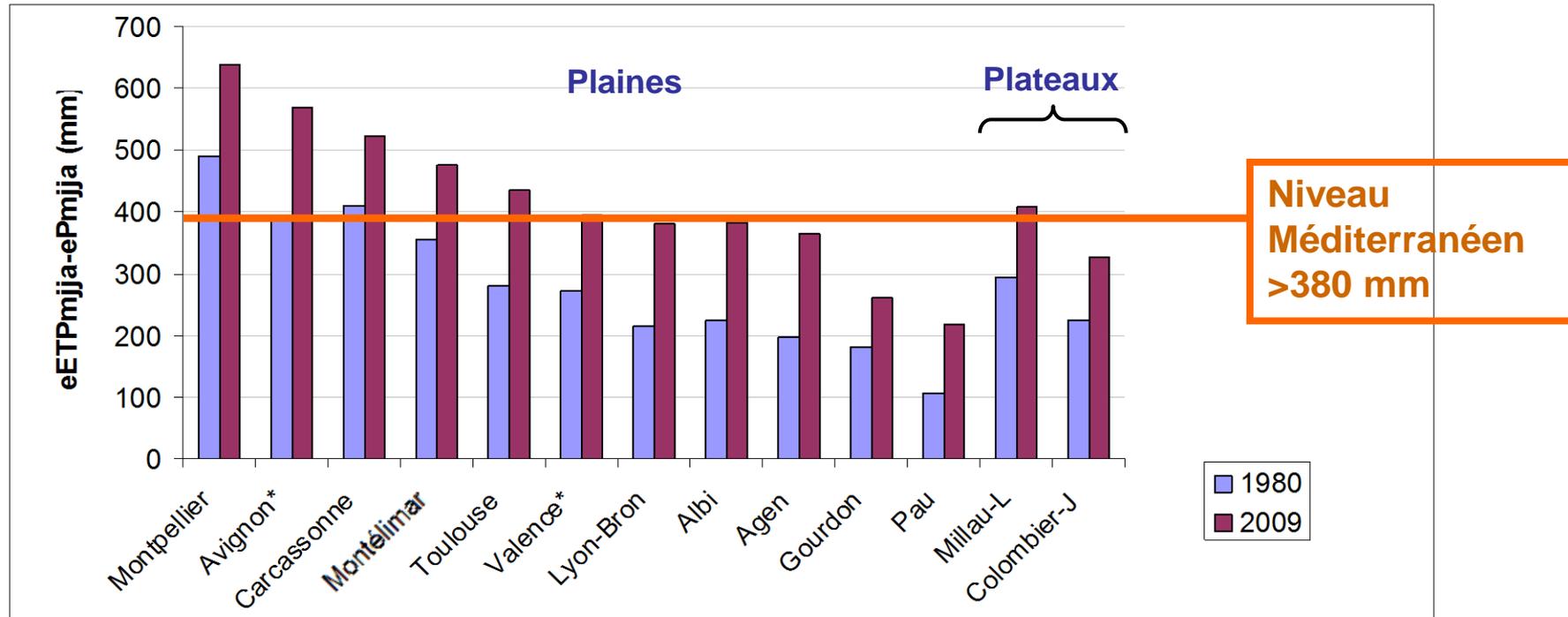
(Avancée iso-ETP d'environ 300 km vers N et NO)

Période mai-août 1980/2009 : Déficit hydrique climatique (eETP-eP)



Niveau Méditerranéen >380 mm

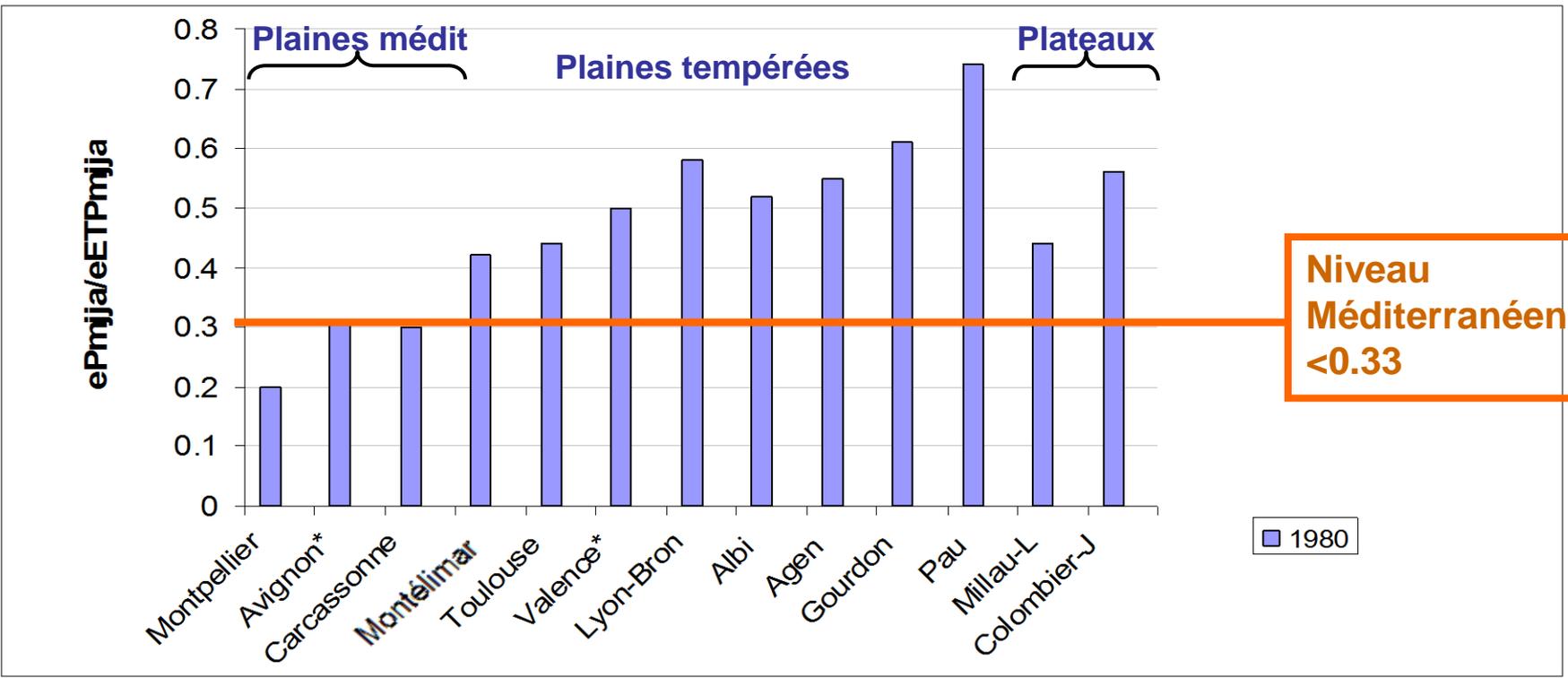
Période mai-août 1980/2009 : Déficit hydrique climatique (eETP-eP)



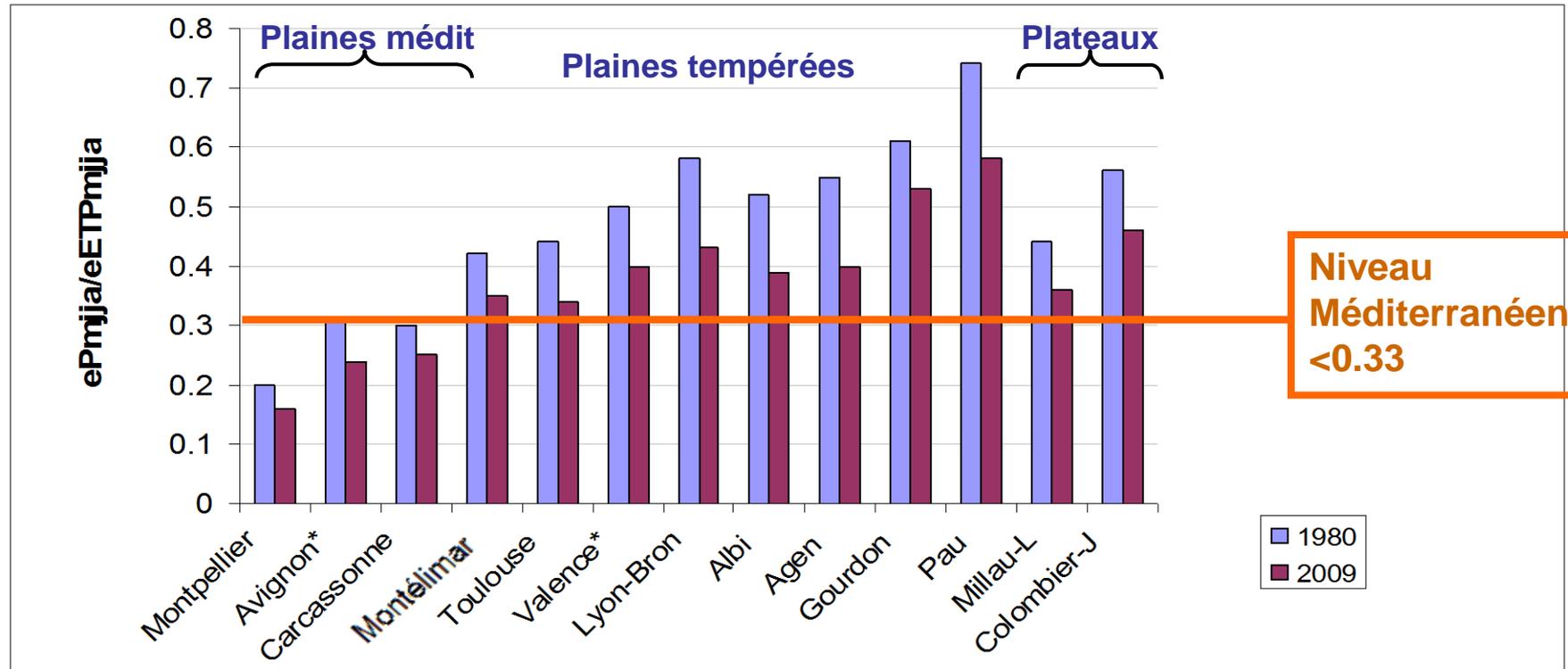
- **Même progression que ETP**

- Montélimar, Toulouse et Millau-L ont en 2009 des niveaux moyen de déficit climatique ETP-P = critères du climat méditerranéen
- Forte évolution Valence, Lyon, Albi, Agen : « pré-méditerranéens »

Période mai-août 1980/2009 : Indice d'aridité (eP/eETP)



Période mai-août 1980/2009 : Indice d'aridité (eP/eETP)



Niveau
Méditerranéen
<0.33

- **Même progression que ETP**

- Montélimar, Toulouse et Millau-L ont en 2009 des niveaux moyen d'aridité estivale P/ETP = critères du climat méditerranéen

- Forte évolution Valence, Lyon, Albi, Agen : « pré-méditerranéens »

Importance du changement des paramètres climatiques

- **Pour l'année : indicateurs du déficit hydrique :**
 - **P/ETP** donne la classification climatique annuelle (Le Houérou, 1996) ;
 - **ETP-P** (très important pour la production agricole et autres activités).
- **Pour la période estivale : Indicateurs d'Aridité maximum (IA max) :**
 - **IA = (1-(P/ETP)) x (ETP-P)** donne la classification climatique estivale ;
 - On utilise l'IA maxi entre des périodes allant de 1 mois (Jt) à 6 mois (AMJJAS)
 - **ETP_{mjja}-P_{mjja}** (très important pour la production agricole et autres activités)

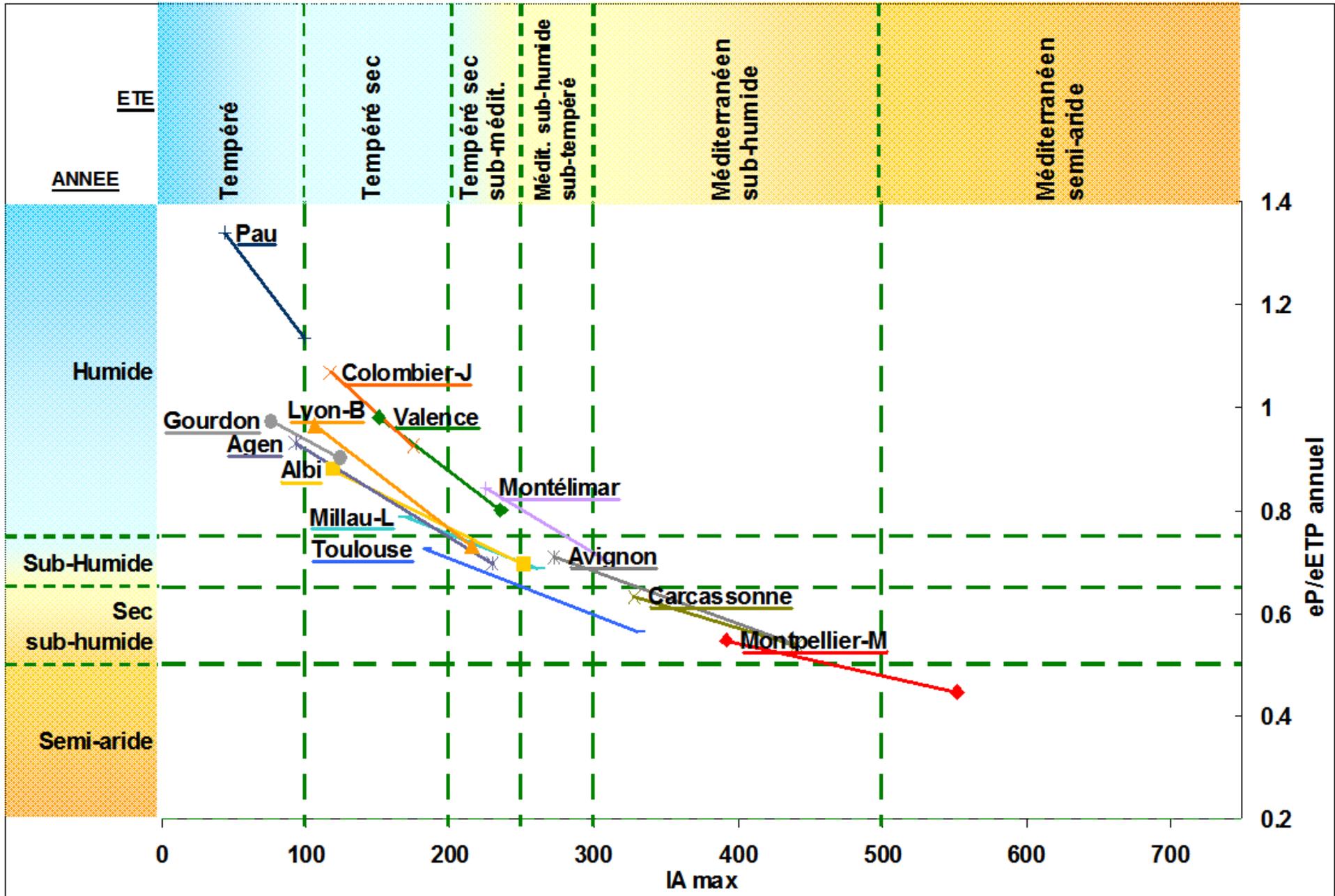
eP/eETP	Classification climatique annuelle	IA max	Classification climatique estivale
<0.05	Hyper-aride	>900	Aride
0.05-0.2	Aride	500-900	Méditerranéen semi-aride
0.2-0.5	Semi-aride	300-500	Méditerranéen sub-humide
0.5-0.65	Sec sub-humide	250-300	Méditerranéen sub-humide sub-tempéré
0.65-0.75	Sub-Humide	200-250	Tempéré sec sub-méditerranéen
>0.75	Humide	100-200	Tempéré sec
		<100	Tempéré

Classification climatique annuelle

Stations	eP	eETP		eETP-eP		eP/eETP	
	80-09	1980	2009	1980	2009	1980	2009
Montpellier	620	1130	1383	510	763	0.55	0.45
Carcassonne	654	1035	1213	381	559	0.63	0.54
Avignon	664	936	1214	272	550	0.71	0.55
Toulouse	642	883	1135	241	493	0.73	0.57
Montélimar	887	1050	1258	163	371	0.84	0.71
Millau-L	735	935	1069	200	334	0.79	0.69
Albi	735	835	1056	100	321	0.88	0.70
Agen	722	776	1035	54	313	0.93	0.70
Lyon-B	834	862	1139	28	305	0.97	0.73
Valence	862	879	1075	17	213	0.98	0.80
Gourdon	858	881	952	23	94	0.97	0.90
Colombier-J	954	894	1031	-60	77	1.07	0.93
Pau	1070	798	943	-272	-127	1.34	1.13
Moyenne régionale	787	915	1116	127	328	0.88	0.72

Classification climatique estivale

Stations	e(ETP-P) _{mjja}		e(ETP-P) _{mjja}		e-IA max		Δ-eIA max (29 ans)
	1980	2009	Δ mm	Δ %	1980	2009	
Montpellier	490	638	148	30	391	551	160
Carcassonne	410	524	114	28	328	441	113
Avignon*	393	568	175	45	272	435	163
Montélimar	356	475	119	33	225	309	84
Toulouse	282	436	154	55	182	330	148
Millau-L	295	408	113	38	169	261	91
Albi	224	383	159	71	119	252	132
Valence*	271	394	123	45	150	235	85
Lyon-B	215	381	166	77	106	215	108
Colombier-J	224	327	103	46	117	175	58
Agen	197	365	168	85	93	230	137
Gourdon	182	261	79	43	77	124	47
Pau	107	218	111	104	44	99	56
Moyenne régionale	280	413	133	53	175	281	106
Niveau méditerranéen	>400				>250		



Trajectoires d'évolution climatique 1980-2009

Stations : climat historique (années 70)



Climat historique :

- ▲ temp. hum. Atlant.
- ▲ tempéré humide
- ▲ tempéré sub-Médit.
- Méditerranéen

Altitude :

- plaine (< 200 m)
- △ plateau (500-700 m)

Stations : nouveau climat (2009)



Climat historique :

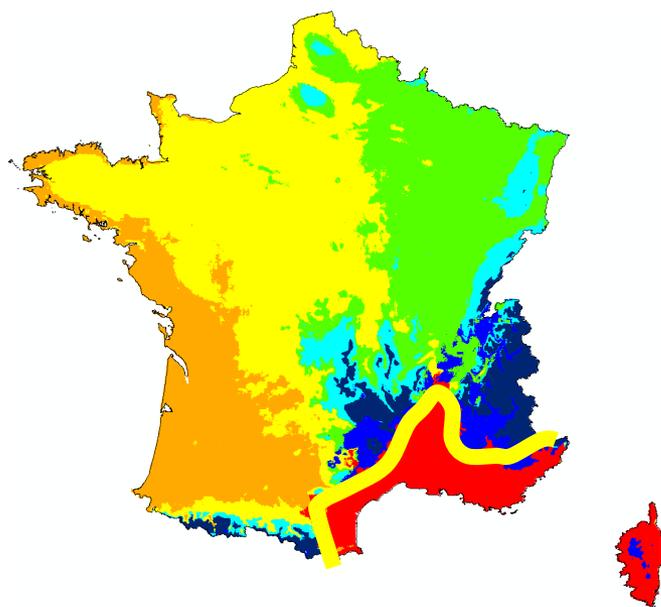
- ▲ temp. hum. Atlant.
- ▲ tempéré humide
- ▲ tempéré sub-Médit.
- Méditerranéen

Altitude :

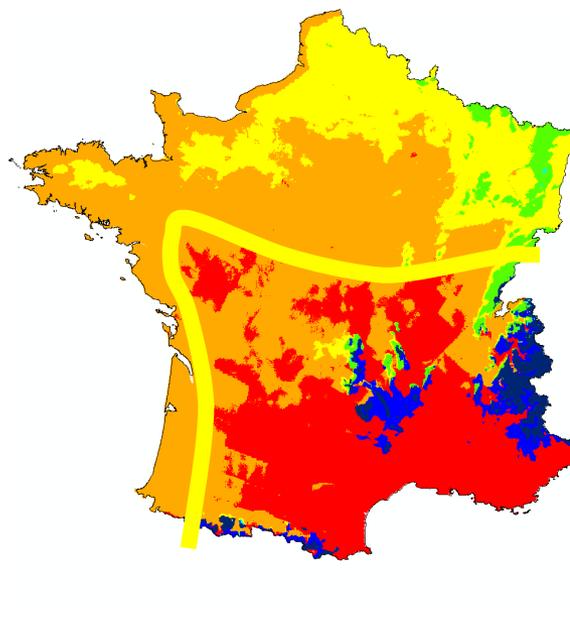
- plaine (< 200 m)
- △ plateau (500-700 m)

Prévision des transferts climatiques et impacts paysagers

Climat 1980



Climat 2100



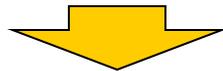
- groupe 1 Alpin
- groupe 2 Sub alpin
- groupe 3 Sapin
- groupe 4 Chênes
- groupe 6 Chataîgnier
- groupe 7: Pin maritime
- groupe 8 Chêne vert



Conclusions et perspectives

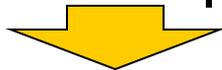
1) Changements climatiques rapides depuis 1979 :

- Année : réchauffement à $+0.5^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$ ($+0.8^{\circ}\text{C}/\text{déc}$ l'été, $+0.25^{\circ}\text{C}/\text{déc}$ l'hiver).
L'ETP est le facteur climatique qui change le plus
- Saison sèche-chaude MJJA en 30 ans 1979-2009:
 $+2.3^{\circ}\text{C}$ en température et $+150\text{ mm}$ d'ETP en plaines
 - la pluviométrie estivale, très variable entre années, a résisté
 - Le déficit hydrique et l'aridité $\nearrow \nearrow$: $(\text{ETP}-\text{P})\nearrow$ et $(\text{P}/\text{ETP})\searrow$



2) Migration des isothermes et iso-ETP de plus de 250 km vers N et NO (2°lat.N) ; Migration des lignes d' iso-aridité et des limites d'iso-climats médit. de +100 à 130 km vers N et NO ($+1$ à 1.2°lat.N)

- Les plaines médit (ex: Montpellier) deviennent semi-arides ($\text{P} < 0.5 \text{ ETP an}$)
- Montélimar, Millau-Larzac et Toulouse passées médit; Albi quasi médit.
- Agen, Valence, Lyon et Colombier passées de tempéré à « pré-médit »



3) Perspective 30 ans (2010-40) : réchauffement et augmentation d'ETP un peu moins rapides (car teneur de l'atmosphère en aérosols stabilisée), mais baisse des pluies print-été : la vitesse de progression du déficit hydrique, de l'aridité et des limites climatiques va rester élevée:

4) Impacts : ces changements ont déjà modifié structurellement l'offre fourragère (cf. exposé 2)

Merci de votre attention

Les partenaires du projet CLIMFOUREL

