

Evolution du climat du Sud de la France 1950-2009

- Cette étude est un volet du projet CLIMFOUREL (Climat-Fourrages-Elevage) visant à comprendre et améliorer l'adaptation des systèmes fourragers du Sud de la France aux variations et aux changements climatiques en cours.
- Les variations climatiques et les tendances sont analysées depuis 1950.
- Le réchauffement climatique est rapide depuis environ 1979 : en 30 ans, les lignes iso-climatiques ont été transférées de 100 à 300 km au Nord (+1 à 2.5°N) selon les variables considérées, étendant le climat méditerranéen et renforçant l'aridité.

Climat
Sud de la France
Production Fourragère
Elevage
Changement global
Sécheresse

Contexte de recherche

Dans les départements français à climat tempéré sec sub-méditerranéen bordant les plaines méditerranéennes à l'ouest et au Nord, la fréquence des années à forte sécheresse et pénurie estivale d'herbe pâturable a été anormalement élevée depuis les années 2000 (2003, 2005, 2006 et 2009). L'achat et le transport de fourrages vers ces départements ont engagé des aides financières élevées de l'état et des collectivités territoriales ne pouvant être renouvelées à cette fréquence. Une question centrale était de savoir si la fréquence de ces pénuries a été conjoncturelle ou est structurelle. Dans ce cas, comment adapter les systèmes d'élevage? L'hypothèse d'un changement climatique plus marqué et d'effets amplifiés à l'interface des climats méditerranéen/tempéré a été posée au lancement du projet « Climfourel » (2007) quand la réalité du changement climatique était encore contestée et son ampleur minimisée en France : les tendances reconnues ne portaient que sur les températures, calculées sur un siècle (+0.74°C/siècle mondialement, +1.1°C/siècle en France), insuffisantes pour avoir changé la donne : le changement climatique ne s'étudiait qu'au futur.



Originalité des résultats

Le changement global (atmosphère, climat) induit par l'activité économique, notable depuis un siècle, a évolué en 3 phases visibles à l'échelle mondiale : environ 1900-49, 50-79 et 1980-2009. A toute échelle d'étude des données climatiques (ici 14 stations du Grand Sud), les durées et tendances de ces phases doivent être prises en compte, 1950-79 étant la période-référence du climat stable «avant changement notoire». Sur 1980-2009, les tendances évolutives sont très significatives. Le réchauffement a été général (+0.5°C/décennie; entre 0.4 et 0.65 °C/décennie selon les stations), similaire au continent Europe-Méditerranée. Il a été plus marqué en saison chaude-sèche (+0.8°C/décennie, mois MJJA) qu'en saison froide-humide (+0.25°C/décennie, mois NDJF). L'évapotranspiration annuelle (ETP) a fortement augmenté dans les plaines chaudes (+ 240 mm soit + 20 à 30% en 30 ans). La pluviométrie annuelle (P), très variable, n'a pas significativement changé par station (sauf une baisse à Pau), mais une tendance globale régionale est notée entre janvier et août (comme ailleurs en Méditerranée). Les indices d'aridité ont fortement évolué et les lignes d'iso-climat ont migré au Nord de 1 à 2.5°N selon les variables considérées. Le climat méditerranéen s'est étendu (ligne Toulouse-Albi-Millau-Montélimar). Ces changements sont assez importants pour avoir modifié les ressources fourragères.

Auteurs

François LELIEVRE (INRA CEFE Montpellier)
Stéphan SALA (INRA CEFE Montpellier)
Françoise RUGET (INRA Avignon)
Florence VOLAIRE (INRA CEFE Montpellier)

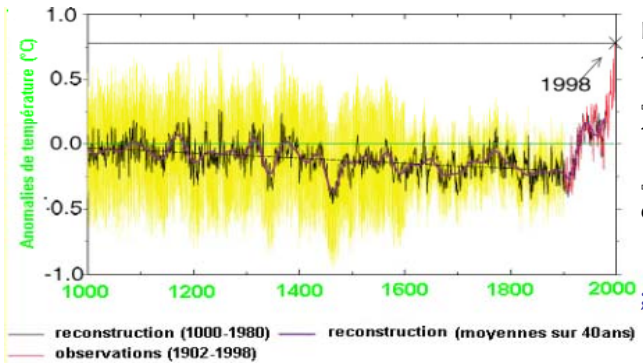
Partenaires

Météo-France (données climatiques)
SUAMME-Languedoc-Roussillon
Chambre d'Agriculture Ardèche
Chambre d'Agriculture Aveyron



1. Cadre et problématique : tenir compte des phases du changement mondial 1900-2009

1.1. Le changement climatique mondial engagé depuis 1900 a évolué en 3 phases



La température de l'Hémisphère Nord reconstruite sur 1000-2000 (Mann et al., 1999) montre :

⇒ une tendance très lente au refroidissement entre 1000 et 1900 (-0.3°C en 900 ans) ;

⇒ une forte tendance au réchauffement depuis environ 1900, mais en **3 phases** :

- ① 1900-45 environ : réchauffement lent ;
- ② 1945-79 environ : palier ou léger refroidissement
- ③ 1979-2010 : réchauffement rapide.

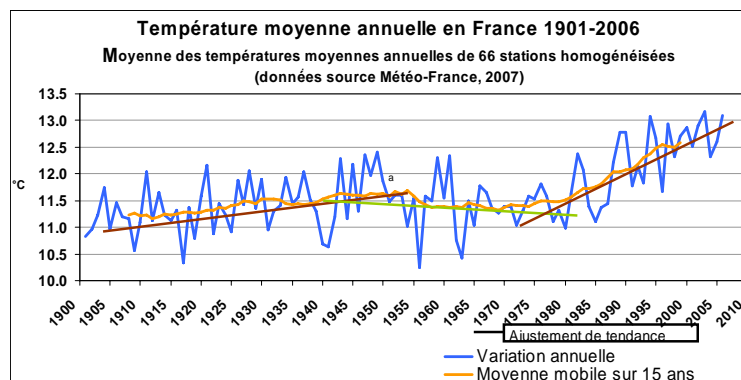
1.2. Ces phases se retrouvent dans les analyses temporelles à toute échelle d'espace

Ex. : France métropolitaine
(sur données de base Météo-France)

① 1901-1945, réchauffement lent, significatif, à environ $+0.1^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$ (total $+0.4^{\circ}\text{C}$) ;

② 1945-1979, stagnation à léger refroidissement, non significatif, à $-0.04^{\circ}\text{C}/\text{déc}$ (total -0.15°C) ;

③ 1979-2009, réchauffement rapide, très significatif, à $+0.5^{\circ}\text{C}/\text{déc}$ (total : $+1.5^{\circ}\text{C}$).

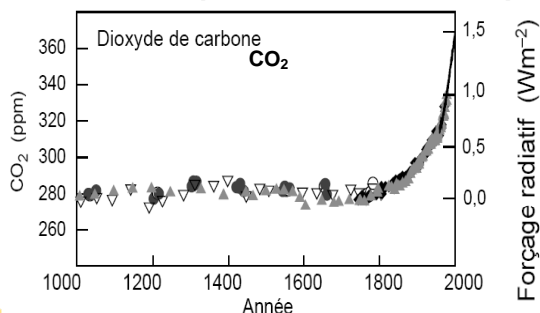


Soit un réchauffement de $+1.8^{\circ}\text{C}$ sur un siècle, dont 1.5°C sur 1979-2009

① fut non perçu car gain de $+0.1$ à $+0.4^{\circ}\text{C}$ en 50 ans selon les continents et les régions, alors que la température annuelle entre années consécutives en un lieu donné varie aléatoirement de $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

③ (en cours) est fortement perçu car les vitesses sont élevées, mais différentes entre continents et entre régions intra-continent : moyenne Europe post-1979 $\approx +0.4^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$ (GIEC, 2007). Selon pays et régions Europe-Méditerranée, $+0.3$ à $+0.6^{\circ}\text{C}/\text{déc}$ (parfois moins sur les côtes ouest car les mers se réchauffent moins vite).

1.3. Les variations depuis 1900 ont surtout pour origine les émissions des activités humaines :



Le bilan énergétique terrestre est modifié par des changements de composition et propriétés de l'atmosphère :

- **Gaz à effet de serre ou « GES »** (CO_2 , CH_4 , N_2O , ...) : leur concentration dans l'atmosphère augmente, ils augmentent le bilan d'énergie de la basse atmosphère (→ réchauffement) ;

- **Aérosols** (micro-particules, sulfures de charbon...) : ils réfléchissent les rayons solaires, baissent le bilan d'énergie (→ refroidissement). Ils ont augmenté jusqu'aux années 70, atténuant l'effet GES croissants, puis baissé (filtres industriels).

2. Méthodes

2.1. Quatorze stations Météo-France ou INRA représentatives du Grand Sud de la France

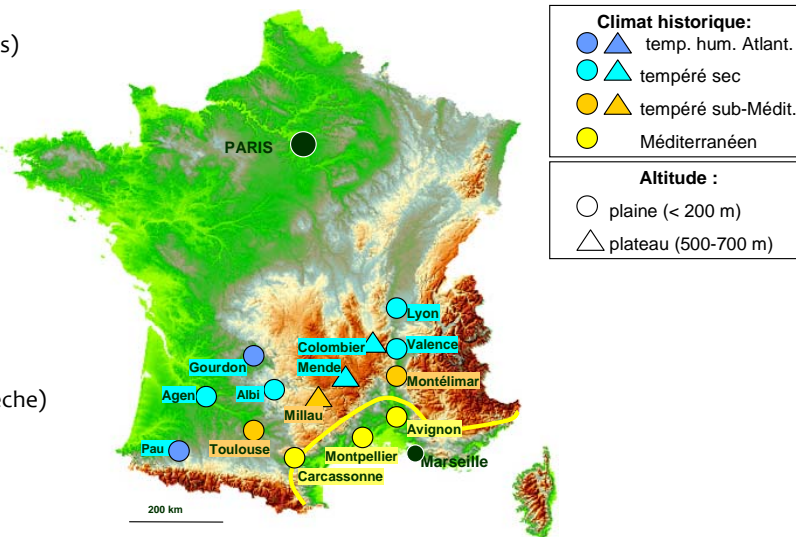
Plaines (<200-300 m)

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

Plateaux à 600-700 m

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

Stations : position et climat historique



Les stations ont été choisies pour couvrir un gradient de climats du Méditerranéen au tempéré humide atlantique ; à 2 altitudes : plaines <200-300 m ; plateaux à 600-700 m (mais peu de stations « plateaux » à données complètes sont disponibles). Les données 1980-2009 sont journalières, complètes, fiables, 7 variables dont ETP Penman-Monteith (référence internationale). Les données 1950-79 (référence « avant changement climatique ») sont au moins mensuelles, mais non disponibles pour 3 stations.

2.2. Adapter les méthodes de caractérisation du climat sur les séries climatiques passées

■ Les principales **variables climatiques Y** mesurées sont les températures (T) maximales ou minimales, la hauteur de pluie (P), l'évapotranspiration (ETP), etc. Leur mesure sert à caractériser le climat instantané (du jour, du mois, de l'année), et à faire des études de statistiques et probabilités caractérisant le climat local et régional, moyen ou probable.

■ Le **climat local ou régional** est caractérisé par la valeur « la plus probable » (**l'espérance eY**) de variables climatiques Y pour chaque mois et pour l'année. Depuis toujours, l'espérance eY est automatiquement assimilée à la **moyenne M des valeurs observées sur 20 à 50 ans** de T, P, ETP, etc, mensuelles ou annuelles. Il est recommandé internationalement d'utiliser la «normale» (= moyenne des trois dernières décennies complètes), voire la «normale-standard» (moyenne de 30 années fixes: 1931-60; 1961-90; 1991-2020; etc). Ainsi de 2011 à 2020, la normale va rester la moyenne M1981-2010 et la normale-standard M1961-90.

■ Ces méthodes conviennent dans les périodes où les variations interannuelles des variables climatiques sont effectivement équilibrées autour d'une espérance quasi fixe (modèle $eY = M$), comme 1950-1979. Elles sont par contre incorrectes pour les périodes où la plupart des variables climatiques ont eu des variations interannuelles autour d'une tendance significativement positive ou négative ($eY \neq M$), comme 1980-2009. La moyenne M1980-2009 estime eY au milieu de l'intervalle, soit en 1994-1995 : ce n'est plus la valeur la plus probable depuis 15 ans.

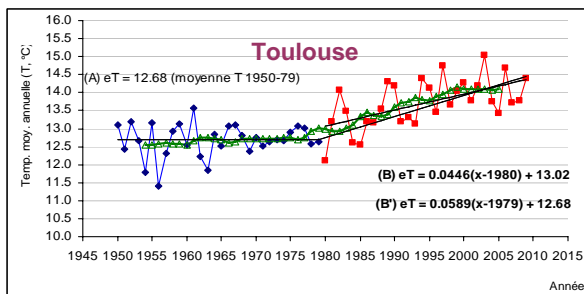
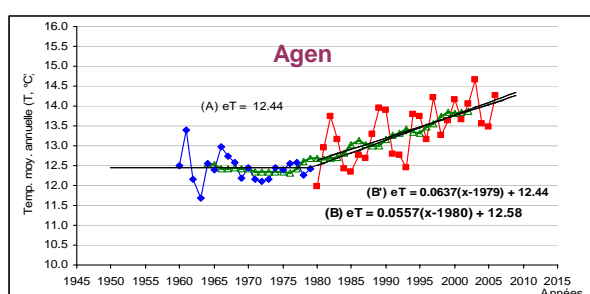
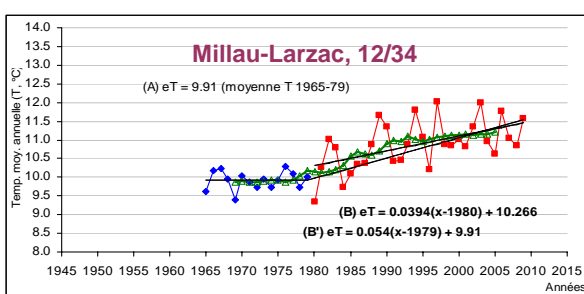
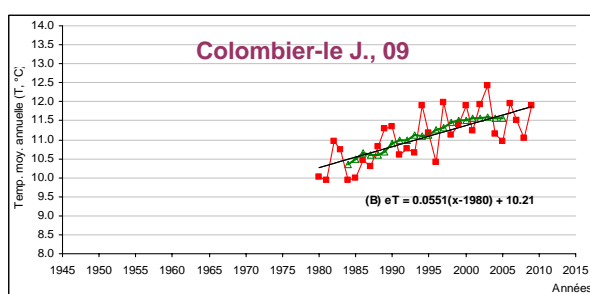
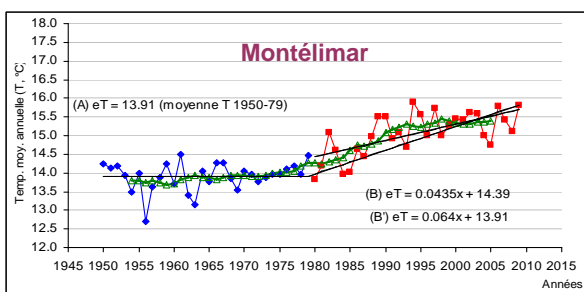
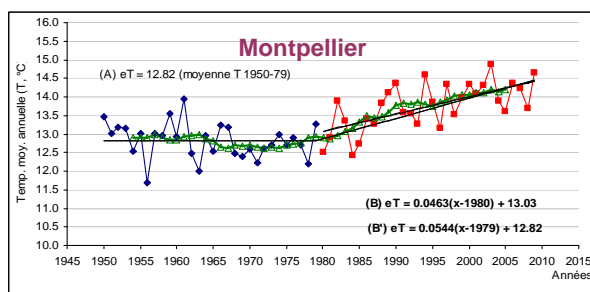
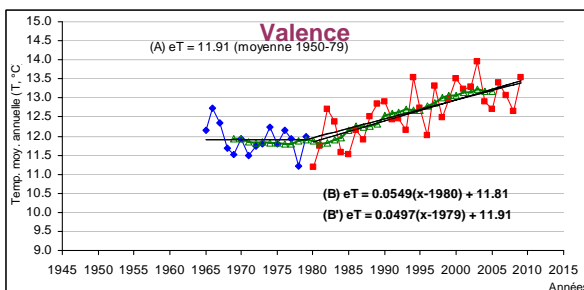
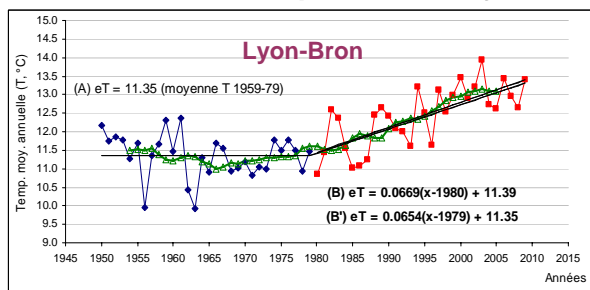
■ Les paramètres de variabilité doivent distinguer la **tendance évolutive** de la **variabilité interannuelle stricto sensu**.

Les adaptations

La représentation des moyennes glissantes (caractérisation d'une année X par la moyenne des 5, 7 ou 9 années qui l'entourent) est une bonne représentation de l'évolution de eY préliminaire au choix d'un modèle mathématique. Le temps est découpé selon les grandes phases des variations climatiques générales, et un modèle simple d'espérance eY en fonction des années X est privilégié dans chaque période : - périodes sans tendance à changement (ex: 1950-79): modèle $eY = M$ (sauf démonstration d'invalidité) ; - périodes avec changement continu (ex: 1980-2009): $eY = AX + B$ (sauf démonstration d'invalidité).

3. Un réchauffement annuel rapide et homogène depuis 1979, autour de +0.5°C/décennie

3.1. Evolution des températures moyennes annuelles 1950-1979 + 1980-2009



● **1950-79, tendance nulle** : la température la plus probable est la moyenne longue (30 ans), soit la droite horizontale (A) : $eT = M_{1950-79}$, normale-référence de la dernière période sans changement significatif.

● **1980-2009, climat évolutif, 2 méthodes** :

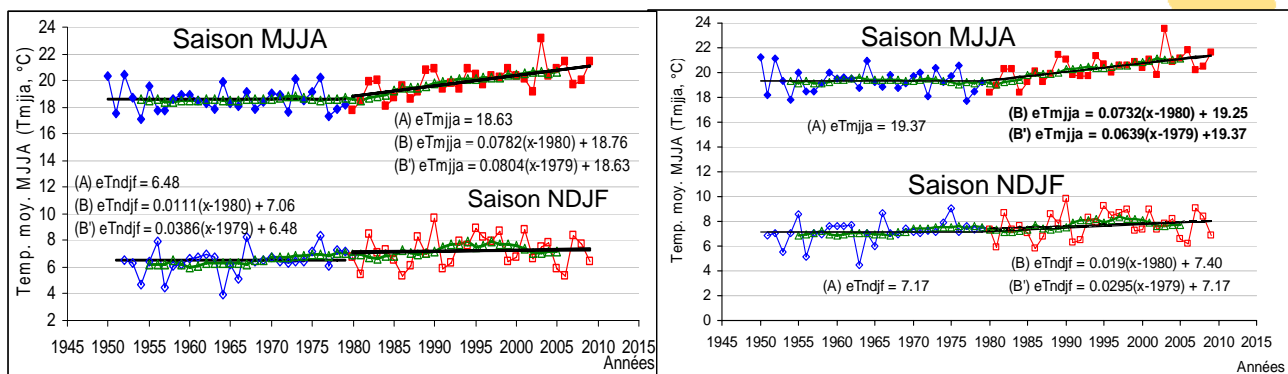
(B) Droite de régression libre [1980-2009] croissante : $eT = aX + b$ ($X=1$ en 1980 ; a est la tendance brute) ;
 (B') Régression en ajoutant en 1979 [$X=0$, $eT = M_{1950-79}$], point-origine imposé à la régression, soit : $eT = a'X + M_{1950-79}$ (où a' est la tendance corrigée).

(A)-(B') établit un modèle continu d'évolution de eY en 2 droites raccordées (mais il faut des données fiables et continues 1950-79). Ce modèle n'est valable que dans l'intervalle étudié ; il ne présume en rien du futur.

Depuis 1979, l'espérance de la température annuelle (eT) a augmenté de façon très significative et très homogène dans tout le Grand Sud : environ +0.50°C/décennie (+1.5°C en 30 ans) selon la méthode (B) et +0.59°C/décennie selon la méthode (B'). C'est similaire ou légèrement supérieur à la moyenne française.

4. La saison chaude-sèche (mois MJJA) se réchauffe plus vite que la saison froide-humide (mois NDJF)

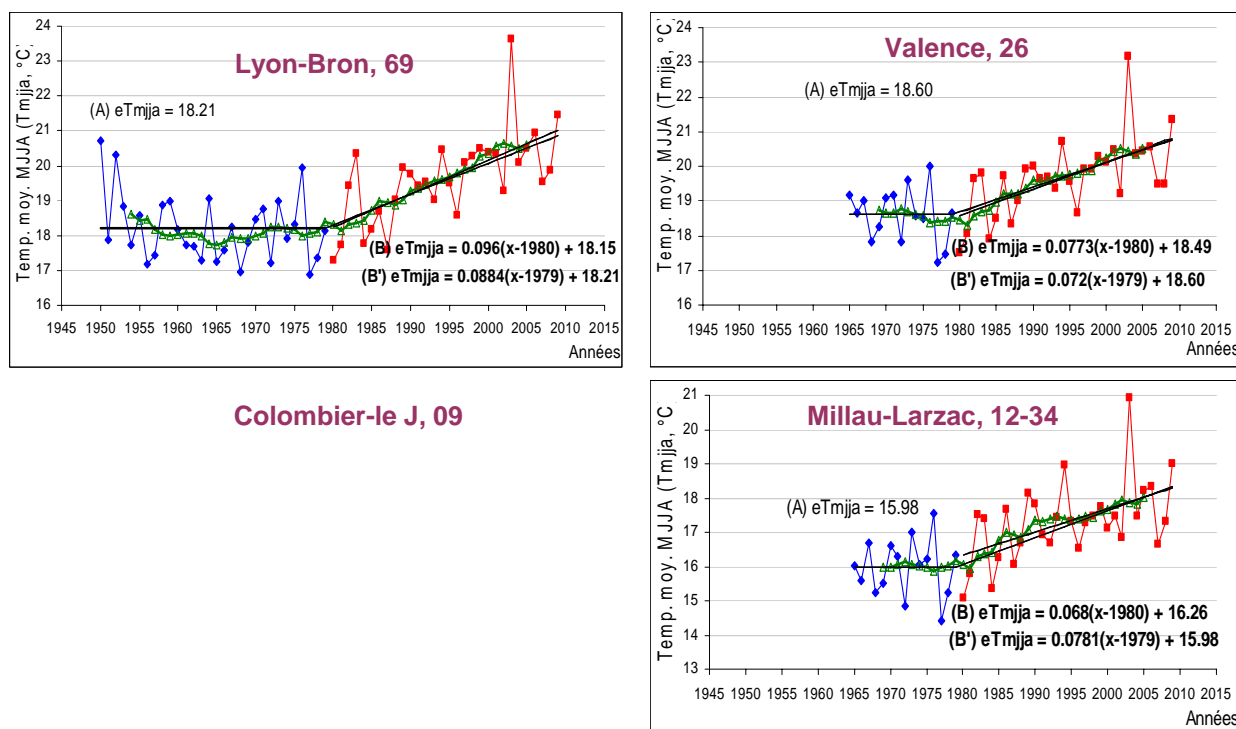
4.1. Evolution des températures moyennes (Tmoy) ETE vs HIVER



La saison chaude-sèche MJJA s'est réchauffée 3 à 4 fois plus vite que la saison froide-humide NDJF :

- Saison chaude-sèche : tendance positive très significative de eT pour chaque station (Moy : +0.8°C/décennie, +2.4°C/30 ans) ;
- Saison froide-humide : tendance positive non significative par station individuelle, mais significative globalement toutes stations (+0.2 à 0.3°C/décennie; +0.7 à 0.8°C en 30 ans).

4.2. Exemples d'évolution des températures de saison chaude-humide (MJJA)



Remarque : l'été 2003 est très exceptionnel, s'écartant de +3°C de l'espérance eT, alors que les variations interannuelles sont à 90% dans la bande $\pm 1^\circ\text{C}$ autour des droites eY, à 98% dans la bande $\pm 1.5^\circ\text{C}$. L'été 2003 tire donc vers le haut les tendances du réchauffement estival 1979-2009. Sans 2003, la tendance moyenne reste néanmoins très élevée: +0.7°C/décennie (+2.1°C/ en 30 ans).

5. Vitesses de réchauffement 1980-2009 (année, été, hiver) par station

| Groupe | Station | Année | | Eté MJJA | | Hiver NDJF | |
|---------------------------------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | A | A' | A | A' | A | A' |
| Plaines méditerranéennes sub-humides | Montpellier-M | 0.43 | 0.64 | 0.69 | 0.87 | 0.25 | 0.44 |
| | Avignon | 0.61 | 0.57 | 0.93 | 0.87 | 0.36 | 0.36 |
| | Carcassonne | 0.44 | 0.45 | 0.73 | 0.64 | 0.19 | 0.30 |
| Plaines tempérées sub-méditerran. | Montélimar | 0.46 | 0.54 | 0.65 | 0.72 | 0.35 | 0.43 |
| | Toulouse | 0.45 | 0.59 | 0.78 | 0.80 | 0.11 | 0.39 |
| | Albi | 0.52 | - | 0.87 | - | 0.19 | - |
| Plaines tempérées humides | Valence | 0.55 | 0.50 | 0.77 | 0.72 | 0.35 | 0.21 |
| | Lyon-Bron | 0.67 | 0.65 | 0.96 | 0.88 | 0.42 | 0.46 |
| | Agen | 0.56 | 0.64 | 0.91 | 0.87 | 0.20 | 0.34 |
| Plaines tempérées humides atlantiques | Gourdon | 0.52 | 0.64 | 0.91 | 1.00 | 0.10 | 0.37 |
| | Pau | 0.39 | 0.62 | 0.80 | 0.89 | -0.10 | 0.07 |
| Plateaux | Millau-Larzac | 0.39 | 0.54 | 0.68 | 0.78 | 0.17 | 0.29 |
| | Colombier-le-J | 0.55 | - | 0.81 | - | 0.32 | - |
| | Mende | 0.51 | - | 0.85 | - | 0.26 | - |
| Moyenne | | 0.50 | 0.59 | 0.81 | 0.82 | 0.22 | 0.33 |

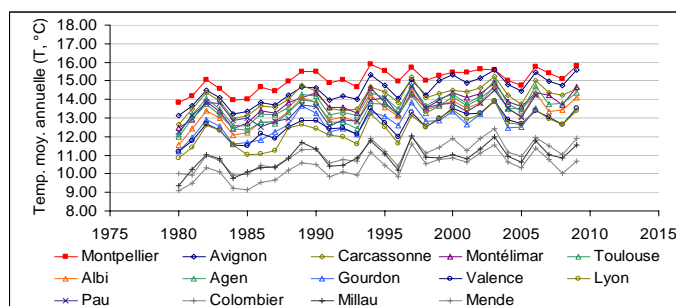
A/A' : vitesses brutes/corrigées (valeurs en °C/décennie ; les valeurs en gras sont significatives)

- Les vitesses annuelles et d'été-MJJA sont très significativement positives pour chaque station, pas celles d'hiver-NDJF mais la valeur toutes stations confondues l'est. Sur 11 stations ayant des données 1950-79, la tendance A', obtenue en imposant le point de départ du réchauffement [1979; M₁₉₅₀₋₇₉], donne une vitesse de réchauffement un peu plus élevée pour l'hiver et l'année ;
- Le réchauffement a été très homogène aussi bien pour l'année (+0.5°C/déc) que pour les valeurs saisonnières (+0.8°C/déc pour MJJA ; +0.2 à +0.3°C/déc pour NDJF) ;**
- La moyenne annuelle est élevée mais elle a été observée ailleurs en France, en Europe et dans le Bassin Méditerranéen sur les séries de données post-1979 ;
- Pendant l'été-MJJA, l'espérance de température moyenne a augmenté de 2.4°C. A Lyon, Albi, Gourdon, Agen ou Pau, elle est aujourd'hui supérieure au niveau (20°C) qui caractérisait les stations méditerranéennes Montpellier-Avignon jusqu'en 1980. En 30 ans, les isothermes ont avancé de + 250-300 km au N et NO en plaine, autour du Massif Central (soit en latitude +2.5°N). Les étés les plus froids aujourd'hui sont au niveau des plus chauds de 1950-79 ;
- Par contre les hivers (NDJF) ont moins changé (+0.8°C en 30 ans) ;
- Aujourd'hui, la température la plus probable n'est plus la moyenne et n'est pas fixe : elle augmente chaque année selon la droite de régression $eT = aX + b$ (X est l'année, X=1 en 1980, b étant l'espérance eT_{1979} pour X=0).

Et la variabilité interannuelle autour des droites de tendance ?

Les températures moyennes annuelles des 14 stations évoluent parallèlement (1980-2009 dans la figure ci-contre) : cela indique qu'en plus de vitesses de réchauffement très voisines, les fluctuations interannuelles sont aussi très similaires: une année chaude (ou froide) est chaude (ou froide) partout.

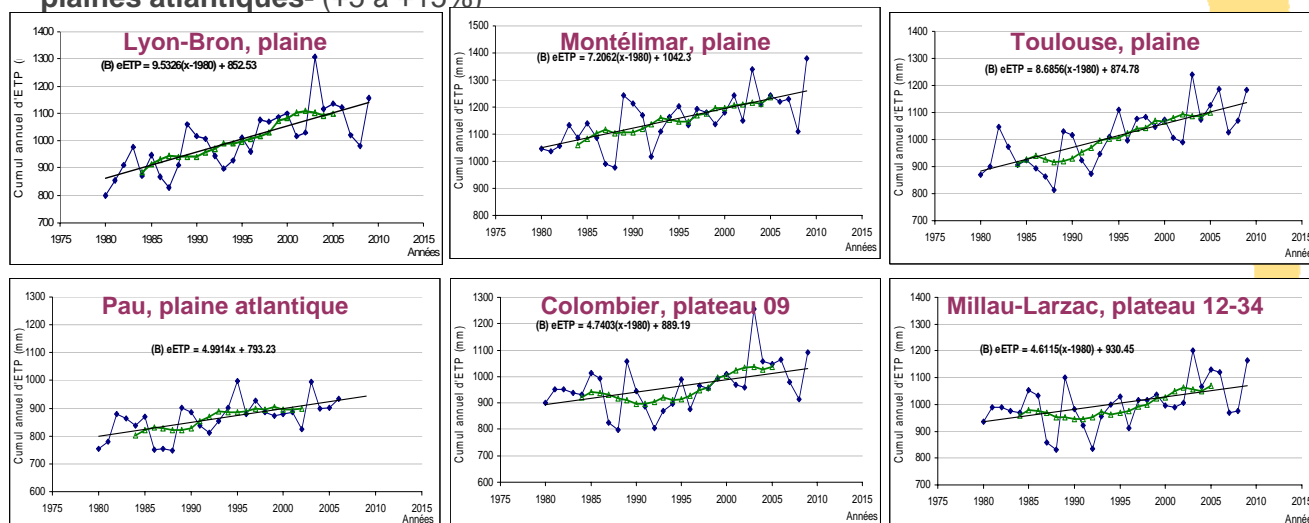
La variabilité 1980-2009 autour de la tendance a été testée contre la variabilité 1950-79 pour 11 stations : il n'y a pas de différences significatives.



6. Forte augmentation de l'ETP* annuelle et l'été (MJJA)

(*) L'ETP (évapotranspiration) mesure le pouvoir évaporant du climat, ou besoin en eau des cultures pour produire à l'optimum. Il s'agit ici de l'ETP-PM (Penman-Monteith, référence internationale).

6.1. L'augmentation d'ETP annuelle a été très forte dans les plaines intérieures (+18 à +30% en 30 ans), forte dans les régions plus fraîches -plateaux, plaines atlantiques- (+5 à +15%)



L'augmentation d'ETP-an provient pour 65-80% de la saison sèche-chaude MJJA, du fait que l'ETP-été-MJJA représente 60% (plaine) à 70% (plateaux) de l'ETP-an, et que le climat se réchauffe plus en été qu'en hiver.

6.2. Vitesses d'accroissement de l'ETP-an et de l'ETP-été-MJJA, en mm/décennie

| | 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 |
| G2 | Plaines tempérées humides | Valence | 68 | 42 |
| | | Lyon-Bron | 95 | 57 |
| | | Agen | 90 | 58 |
| | Plaines tempérées humides atlantiques | Gourdon | 25 | 27 |
| | | Pau | 50 | 38 |
| | | Millau-Larzac | 46 | 39 |
| | Plateaux | Colombier-J. Mende | 47 | 35 |
| | | | - | - |
| Moyenne G1 (plaines sauf atlantiques) | | | 80 | 50 |
| Moyenne G2 (plateaux, plaines atlantiques) | | | 42 | 35 |

Plaines intérieures (Languedoc, Rhône, S-O) :
+240 mm d'ETP-an en 30 ans
(dont +150 mm mois déjà secs MJJA)

Plateaux, plaines atlantiques:
+125 mm d'ETP-an en 30 ans
(dont +105 mm mois déjà secs MJJA)

Toutes les valeurs sont significatives. La tendance corrigée A' n'est pas calculée car peu de stations ont des données ETP-PM 1950-79. L'ETP a donc connu des accroissements considérables (+20 à 30% en plaines) : c'est le facteur de la production agricole le plus modifié en 30 ans.

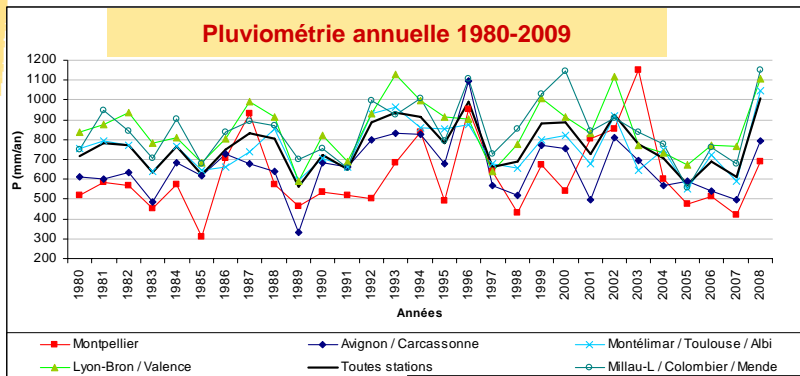
6.3. Causes: l'espérance de chacune des variables composantes de l'ETP a changé (très significatif sur l'été-MJJA et sur l'année, plus marqué en plaines intérieures, cf. 3 cas de plaines ci-dessous)

L'augmentation de rayonnement net (+8% en 30 ans) a : (i) augmenté la température, et (ii) fortement abaissé l'hygrométrie de l'air, surtout l'été. Ponctuellement (à Lyon-B), il y a même eu augmentation de turbulence de l'air.

| Station | Rayonnement net | | Temp. Moy. | | Hygrométrie air | | Vitesse du vent | |
|---------|-----------------|----------|------------|----------|-----------------|----------|-----------------|----------|
| | année | été MJJA | année | été MJJA | année | été MJJA | année | été MJJA |
| Viontp. | +8% | +7% | +1.5°C | +2.2°C | -9% | -14% | (+11%) | (+10%) |
| Agen | +8% | +10% | +1.8°C | +2.7°C | -9% | -13% | (+8%) | (+12%) |
| Lyon | +7% | +7% | +2.0°C | +2.8°C | -11% | -17% | +24% | +32% |
| Moy. | +8% | +8% | +1.7°C | +2.6°C | -10% | -15% | +14% | +17% |

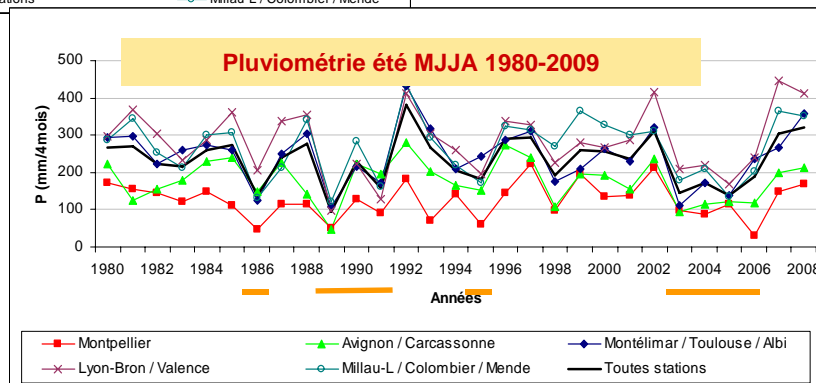
7. Evolutions de la pluviométrie et de l'aridité

7.1. Evolution de la pluviométrie annuelle et de l'été-MJJA



Par station, aucune tendance significative pour la pluviométrie annuelle. Cependant, la très grande variabilité interannuelle peut masquer des tendances réelles.

La pluviométrie moyenne d'été-MJJA a un fort gradient décroissant NO-SE : 300 mm à Pau, Gourdon et Lyon ; 124 mm à Montpellier. Par station, aucune tendance 1980-2009 n'est décelable mais la grande variabilité interannuelle peut masquer des tendances.



Remarque : Pour 9 stations dont on avait les données sur 60 ans 1950-2009, les écarts à la moyenne ont été traités toutes stations confondues, ainsi que les différences ($P_{1950-79} - P_{1980-2009}$). Une tendance significative apparaît (-54 mm, soit -11% sur JFMA+MJJA, alors que l'automne SOND ne change pas. Cette tendance est nette dans tous les pays méditerranéens plus au sud.

7.2. Evolution du bilan hydrique et de l'aridité du climat 1980-2009

L'espérance de la pluviométrie annuelle eP est considérée comme constante et égale à la moyenne : $eP = M_{1980-2009}$

L'espérance de l'ETP augmente : $eETP_{1980}$ et $eETP_{2009}$ sont données par les droites de régression $eETP = f(\text{années})$. Deux indicateurs de déficit hydrique du climat « moyen » sont utilisés :

- **$eETP - eP$: déficit climatique (en eau) ;**
- **$eP/eETP$ ou indice d'aridité**, base simple de classification climatique annuelle ci-dessous (Le Houérou, 1996).

| Stations | eP 80-09 | eETP 1980 | eETP 2009 | eETP-eP 1980 | eETP-eP 2009 | eP/eETP 1980 | eP/eETP 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 |
| Colomblie-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 |

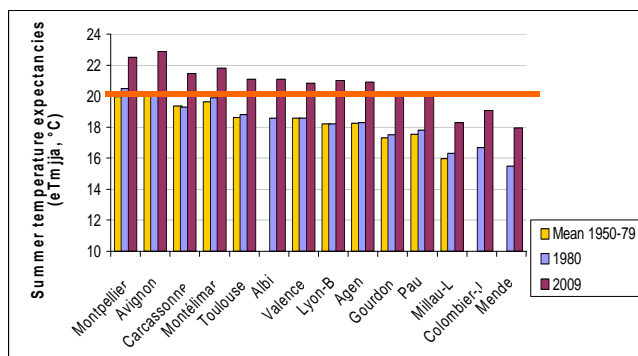
- La forte augmentation d'ETP (+240 mm/30 ans dans les plaines) a eu pour conséquences :
 - d'augmenter d'autant le déficit climatique annuel « moyen » ($eETP - eP$) (ex : à Albi, Agen, Lyon, Valence, l'espérance de déficit, quasi nulle jusqu'en 1979, est passée à 220-300 mm) ;
 - d'abaisser les ratios $eP/eETP$ (augmenter l'aridité) sans changement de pluviométrie.

▪ Un indice d'aridité a été calculé pour la saison sèche-chaude MJJA : il confirme la nette remontée des climats définis sur des critères d'aridité : le climat méditerranéen subhumide s'est nettement étendu, incluant maintenant Toulouse, Millau-Larzac et Montélimar.

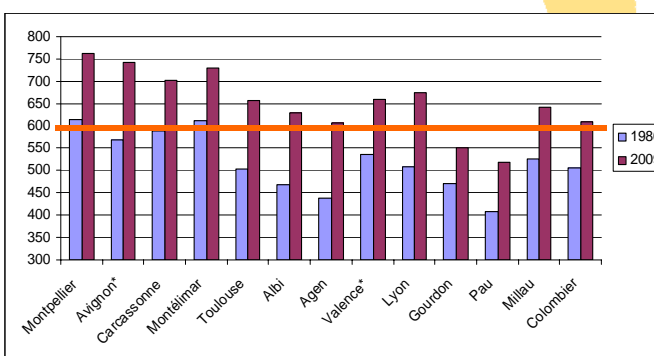
| eP/eETP | Classe de climat |
|-----------|------------------|
| <0.05 | Hyper-aride |
| 0.05-0.2 | Aride |
| 0.2-0.5 | Semi-aride |
| 0.5-0.65 | Subhumide sec |
| 0.65-0.75 | Subhumide |
| 0.75-1.0 | Humide |
| >1 | Hyper-humide |

8. Principaux changements climatiques de la saison chaude-sèche 'MJJA' 1980-2009

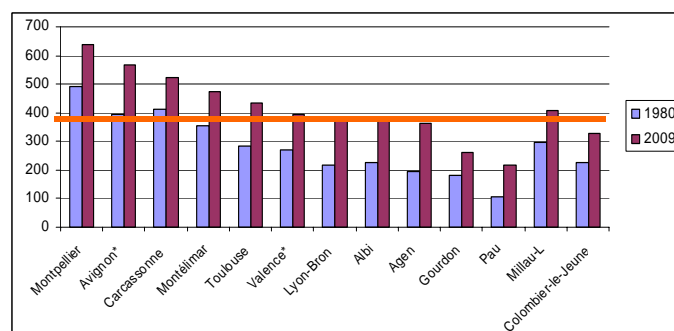
8.1. température moyenne été (MJJA)



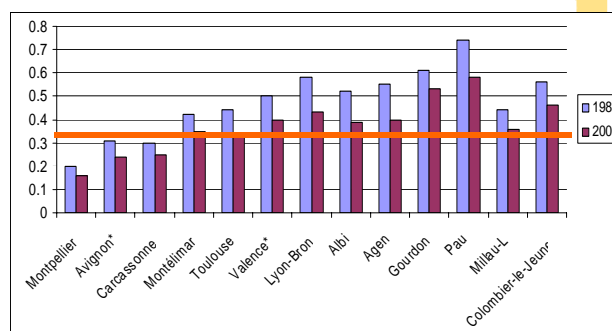
8.2. ETP cumulé été-MJJA



8.3. Déficit climatique eETP-eP



8.4. Indice d'aridité eP/eETP



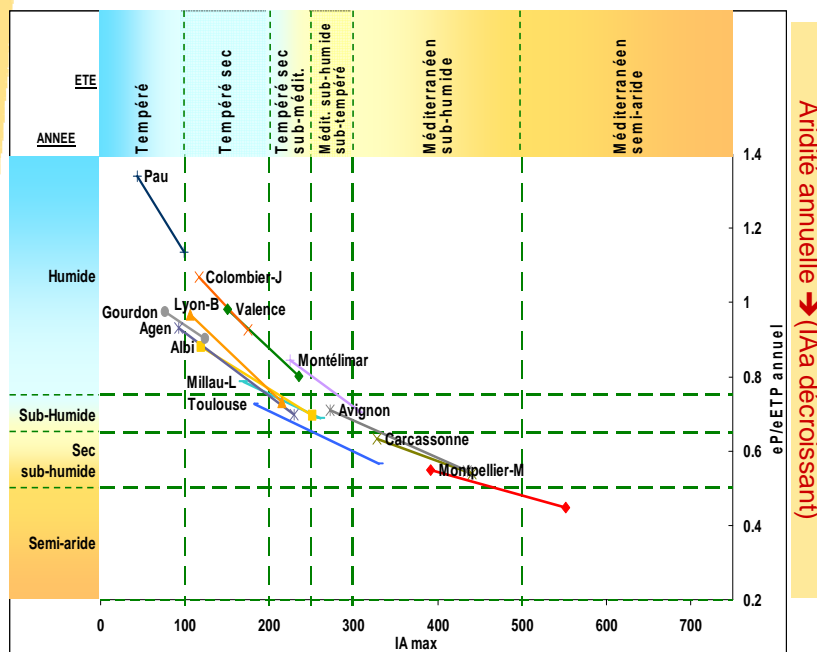
[— Niveau-seuil méditerranéen-tempéré, défini par Montpellier-Avignon-Carcassonne avant 1980]

QUELQUES CONCLUSIONS ESSENTIELLES SUR LA SAISON SECH-CHAUD 'MJJA'

- Toutes les stations, sauf les plateaux (alt. 700 m), ont une (espérance de) **température d'été devenue $\geq 20^{\circ}\text{C}$** (seuil méditerranéen, isotherme Montpellier-Avignon jusqu'en 1980);
- Toutes les stations, sauf celles sous forte influence atlantique (Pau, Gourdon), ont une **eETP de 4 mois devenue ≥ 600 mm** (seuil médit, ligne iso-ETP Montpellier-Carcassonne avant 1980).
- Toutes les stations, sauf celles sous forte influence atlantique et forte pluviométrie (Pau, Gourdon, et Colombier à alt. 700 m) ont une **espérance de déficit climatique en eau (eETP-eP) sur 4 mois ≥ 400 mm** (seuil méditerranéen iso-déficit Avignon-Carcassonne avant 1980).
- **L'aridité s'est renforcée partout** (baisse de l'indice eP/eETP). **A Montélimar, Toulouse et Millau-Larzac (700 m), l'indice a atteint le seuil méditerranéen (≤ 0.35)**. Les plaines méditerranéennes sont devenues semi-arides (cf. Montpellier).

Le changement global se traduit par une remontée des lignes d'iso-climat, plus importante en été qu'en hiver. En été, en 30 ans, les lignes iso-thermes et iso-ETP ont migré de 250-300 km vers N et NO (+2 à 2.5° N en latitude). Par contre, les lignes isohyètes n'ont pas encore bougé significativement : il en résulte que les lignes d'iso-climat de la zone d'étude (définis par l'aridité) ont eu un transfert intermédiaire (+100 à +130 km N-NO ; +1 à +1.2° N), étendant d'autant le domaine méditerranéen. Des changements similaires ou plus importants sont observés dans le Bassin Méditerranéen. Ils sont renforcés aux latitudes $\leq 40^{\circ}\text{N}$ car une baisse très significative des pluies de janvier à août est observée. Inversement, ces évolutions sont atténuées en façade atlantique et en altitude.

9. Trajectoires de changement climatique depuis 1979

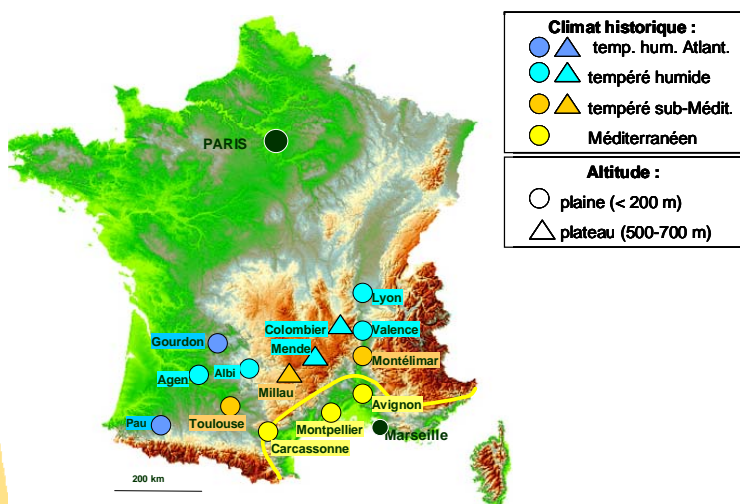


- En Y : **Indice d'aridité annuel** : $IAa = eP/eETP$ (l'aridité augmente quand IAa décroît).
 - En X : **Indice d'aridité d'été optimisé** : $IAe = (eETP - eP) * [1 - (eP/eETP)]$.
- L'indice IAe est calculé pour chaque année sur 6 périodes (1 à 6 mois : J_t , J_tA , JJ_tA , MJJ_tA , MJJ_tJAS , $AMJJ_tAS$) avec une règle : quand $eP < eETP$, on applique la formule et quand $eP > eETP$, on applique $IAe = 0$. Sur les six valeurs, on retient la valeur maximale.

Aridité estivale → (IAe croissant)

L'indice IAe est le produit de la quantité de sécheresse ($eETP - eP$) et de son intensité $[1 - (eP/eETP)]$. Il varie de 0 (cas de climats hyper-humides ayant tous les mois $eP > eETP$) à environ 1800 (déserts sans aucune pluie pendant les 6 mois d'été $AMJJ_tAS$, avec ETP-jour moyen de 10-12mm).

Carte 1950-79



Carte en 2009 (transitoire)



● Depuis 1979, toutes les stations suivent une trajectoire d'évolution du climat moyen vers plus d'aridité, la plupart ayant déjà changé une fois de classe. Le méditerranéen semi-aride ($eP < 0.5$ ETP annuellement) s'étend aux plaines méditerranéennes (cf. Montpellier) ; le méditerranéen sub-humide s'avance jusqu'à Toulouse, Albi, Millau, et Montélimar. Agén, Mende, Colomblert, Valence et Lyon ont pris leur place comme tempérées sub-humides sèches (sub-médit.).

● La ligne d'isoclimat [$IAa \approx 1.0$ et $IAe \approx 120$] sépare deux grandes zones climatiques **Nord/Sud où les impacts du changement climatique s'opposent**. Noter que la limite migre vers le Nord. Toutes les stations de l'étude sauf Pau ont aujourd'hui un climat de type «Sud» ($IAa < 1$ et $IAe > 120$) ; sub-méditerranéen à méditerranéen, où le fort gradient de déficit hydrique est le premier critère distinctif des climats.

10. Changement climatique réalisé et perspectives

10.1. Changements 1950-2010 en résumé

En respectant le phasage mondial et européen, l'analyse du climat passé (1950-2009) a montré que :

- **sur 1950-79, il n'y a pas eu de tendance évolutive = période-référence d'avant changement ;**
- **sur 1980-2009, la plupart des variables climatiques ont significativement évolué selon des tendances linéaires.** Les droites de régression estiment les espérances, les pentes sont les tendances ; ce n'est valide que dans les intervalles observés. Les moyennes sur de longues séries comme M1980-2009 ou la «normale» M1981-2010 estiment l'espérance au milieu de l'intervalle (eY1994-95), non l'espérance aujourd'hui (eY2011). Celle-ci est estimée par la dernière eY établie (eY2009 ou eY2010), éventuellement par une moyenne courte-récente (les 6 à 10 dernières années). **Les changements 1979-2009 se résument par le transfert des lignes d'iso-climat moyen** (+100-130 km vers N et NO, +1 à +1.2°N en lat.). Il est tiré par rayonnement, température et ETP mai-août, freiné par la pluviométrie. La variabilité aléatoire (hors tendance), mesurée par les écarts aux droites d'espérance eY pour les variables T, P, ETP, ETP-P, par station, n'est pas significativement différente entre 1950-79 et 1980-2009, en général.

- **Trois facteurs principaux de la croissance et des rendements agricoles et forestiers changent :**

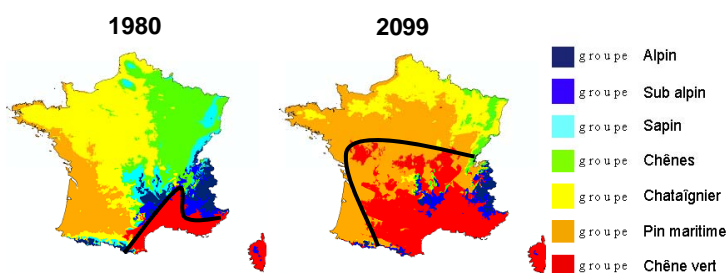
- **[CO₂]air** stimule la photosynthèse et accroît la biomasse ;
- **les températures (air, sol)** augmentent, tendant à accroître la précocité, la photosynthèse et la biomasse ;
- **le déficit climatique en eau (eETP-eP)** tend à augmenter (par l'ETP). Dans les régions restant très humides (IAa>1 et IAe<120), c'est sans effet négatif. Dans celles à déficits fréquents (IAa<1 et IAe>120), la durée-intensité des sécheresses augmente (années sèches de plus en plus déficitaires).

Ces changements sont suffisants pour avoir modifié l'offre fourragère des prairies entre 1979 et 2009 : entre «Nord-gagnant» et «Sud-perdant», la limite (environ IAa≈1 et IAe≈120) remonte vite en latitude et en altitude.

10.2. Evolutions pour le futur proche (d'ici 2040-50)

Les tendances d'évolution à moyen-long terme (10-100 ans) des climats et des variables climatiques sont estimées par des modèles climatologiques (Ex: Arpège-Météo-France, simulateur 2050-2100, www.meteofrance.com/). Ils intègrent les modèles ou scénarios d'émission de gaz à effet de serre établis par le GIEC (2000). Les incertitudes sur les tendances futures sont grandes, surtout après 2050. Pour les 3-4 décennies post-2010, les prévisions de tendances Sud-Europe et Bassin Méditerranéen ont une certaine convergence dans les intervalles suivants :

- **Les températures de l'air augmenteront de +0.3 à +0.6°C/décennie selon les régions et les lieux;** ce serait un peu plus lent que le réchauffement 1980-2009 (+0.5°C/déc) car ce dernier a probablement été amplifié par un rattrapage du non-réchauffement 1945-79 (variations d'émissions d'aérosols). La différence de vitesse été-hiver pourrait s'atténuer ;
- **La pluviométrie baisserait de janvier-février à septembre (-3 à -5%/décennie, soit -10 à -30 mm/décennie).** Une forte tendance à la baisse de pluviométrie annuelle (-3 à -10%/décennie) est déjà constatée depuis 3-4 décennies aux latitudes méditerranéennes <40°N (sauf côtes ouest) : Sud-Espagne, Sud-Italie, Grèce, Israël, Maroc. Aux latitudes 40-45°N, **une tendance à la baisse de la pluviométrie janv-août**, déjà observée dans quelques régions (dont Sud-France) s'affirmerait et se généraliserait ;
- **L'ETP (peu étudiée) augmenterait de +30 à +60 mm/décennie selon les lieux,** donc moins que précédemment dans les plaines du sud car le réchauffement printemps-été serait moindre ;
- **Le déficit climatique (eETP-eP) et l'indice d'aridité (eP/eETP), annuels ou saison MJJA, évolueraient donc à une vitesse proche de 1980-2009,** les lignes d'iso-climat continuant de remonter (+0.3 à +0.5°N/décennie). Vers 2040-50, les trajectoires climatiques auront doublé : les plaines méditerranéennes seront entièrement passées de sub-humides à semi-arides (eP < 0.5 eETP sur l'année). **Le climat méditerranéen sub-humide couvrira le Sud-Ouest au-delà d'Agen, la vallée du Rhône jusqu'à Lyon et le sud du Massif Central à altitude <600 m.**



Et en fin de siècle ?

Les climats méditerranéens (déficit en eau > 400 mm), recouvriront 25-30% du territoire métropolitain dès 2040 et pourraient arriver à la Loire (ligne Nantes-Orléans-Mulhouse) en fin de siècle. Les changements écologiques, hydrologiques, agricoles et paysagers seront considérables, comme illustrés par la cartographie des formations végétales ci-contre.



Pour aller plus loin...

- Moulin C.H. (2008). *Adaptation des systèmes fourragers et d'élevage peri-méditerranéens aux changements et aléas climatiques*. Projet CLIMFOUREL, PSDR-3, Régions L-R, R-A, M-P. Série Les 4-pages PSDR3.
- Site internet du projet : <http://www.climfourel.fr>
- Archer D., Rahmstorf S. (2010). *The climate crisis*. Cambridge University Press, London, UK, 250 p.
- Lelièvre F., Satger S., Sala S. et Volaire F. (2009). Analyse du changement climatique récent sur l'arc péri-méditerranéen et conséquences sur la production fourragère, in *Changement climatique : conséquences et enseignements pour les grandes cultures et l'élevage herbivore*. (c.f. collectif 2009 ci-dessous).
- Collectif (2009). *Changement climatique : conséquences et enseignements pour les grandes cultures et l'élevage herbivore*, actes du colloque. Arvalis et Institut de l'Elevage, Paris, 22 oct. 2009. 145p.
- Lelièvre F., Sala S. et Volaire F. (2010). Climate change at the temperate-Mediterranean interface in southern France and impacts on grasslands production. *Options méditerranéennes*, A, 92, 187-192.

Pour citer ce document :

Lelièvre F., Sala S., Ruget F., Volaire F. (2011). *Evolution climatique du Sud de la France 1950-2009*, Projet CLIMFOUREL PSDR-3, Régions L-R, M-P, R-A. Série *Les Focus PSDR3*.

Plus d'informations sur le programme PSDR

- **PSDR Rhône-Alpes** : psdr-ra@caprural.org ; droybin@suacigis.com
Site web : www.psd-r-a.fr
- **PSDR Languedoc-Roussillon** : ollagnon@supagro.inra.fr
Site web : www1.montpellier.inra.fr/PSDR/
- **PSDR Midi-Pyrénées** : danielle.galliano@toulouse.inra.fr
Site web : <http://www4.inra.fr/psdr-midi-pyrenees>
- **Direction nationale PSDR** : André Torre (INRA) - torre@agroparistech.fr
Animation nationale PSDR : Frédéric Wallet (INRA) - wallet@agroparistech.fr

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



Les partenaires du projets PSDR sont :

