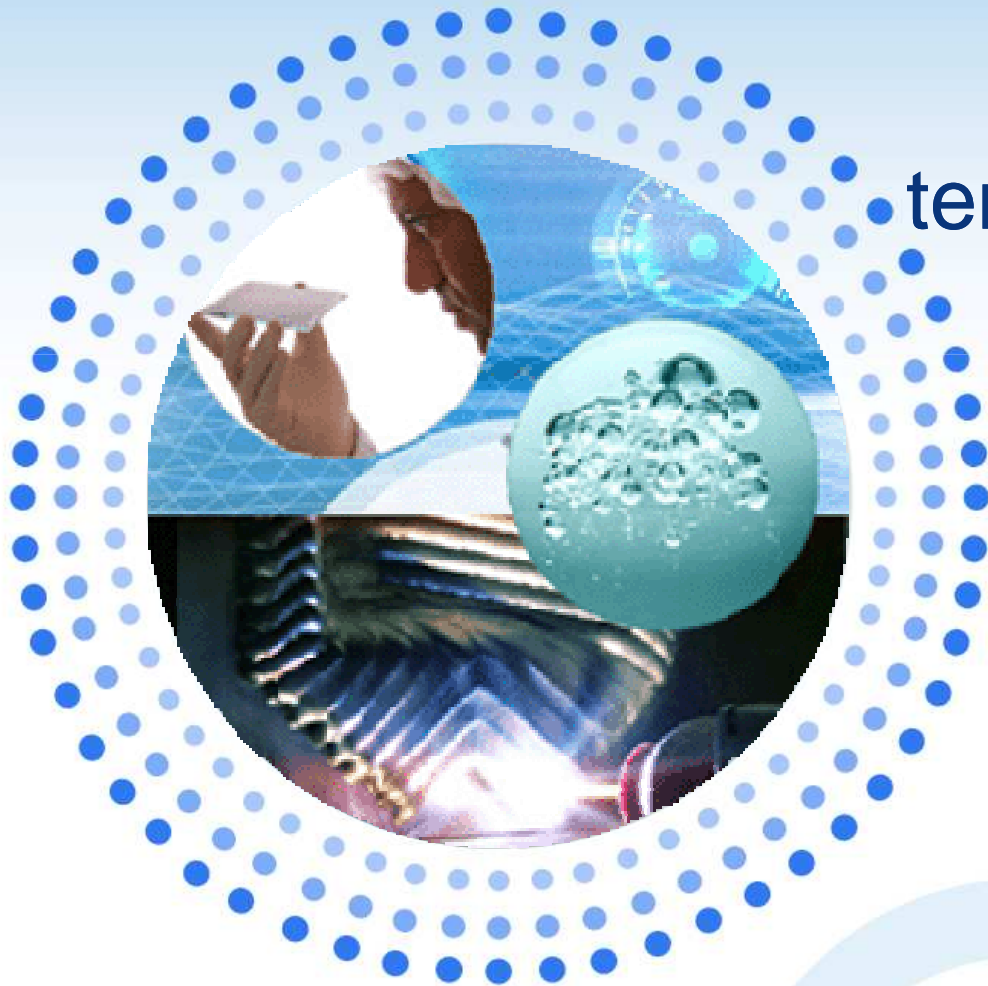


Changement climatique: constat et prévision d'évolution des températures des rivières

Philippe GOSSE

Frédéric HENDRICKX

(EDF R&D – LNHE)





Quelles conséquences du changement climatique (CC) sur la température des rivières ?

➔ Deux approches complémentaires

Détection d'évolution de température d'eau dans le passé

- ✓ Analyse de chroniques historiques de mesures de température d'eau
- ✓ Reconstitution du régime thermique des rivières en exploitant ces chroniques et des données d'observations météorologiques, de débit, de pressions/gestion ressource en eau, ...
- ✓ Caractérisation du rôle du climat et de perturbations anthropiques dans le bassin versant

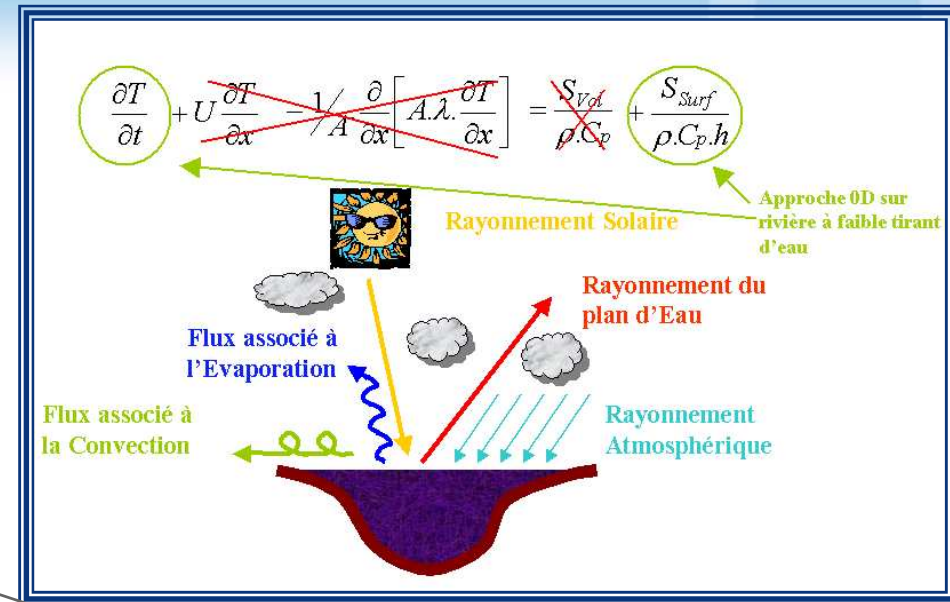
Prévision d'évolution de température d'eau dans le futur

- ✓ Considération de l'effet de scénarios CC sur les caractéristiques atmosphériques futures (température d'air, vent, ensoleillement, humidité, pluie)
- ✓ Projections socio-économiques aux échelles globale, européenne et locale (politique d'occupation du sol et de gestion de la ressource en eau incluant stratégie d'adaptation au CC)
- ✓ Modélisation de l'impact de ces forçages climatiques et socio-économiques sur la température des rivières



Ce qui fait varier la température d'une rivière

- ⊙ Echanges thermiques eau-atmosphère et eau-sol
 - Tair, Vent, ensoleillement et humidité sont des paramètres atmosphériques déterminants
- ⊙ Profondeur de l'écoulement
 - Elle influence l'inertie thermique de la masse d'eau et l'amplitude du cycle journalier
- ⊙ Vitesse d'écoulement
 - Elle définit l'influence thermique des apports d'eau du bassin versant amont. Cette influence est réduite à l'étiage dans les rivières de plaine caractérisées par un écoulement lent
- ⊙ Discontinuités thermiques locales (confluence d'une rivière à histoire climatique différente, résurgence de nappe, barrages, effluents urbains ou industriels)



Débit



Évolution sur les dernières décennies

© Tendence à la hausse des température des rivières en Europe:

Rivières autrichiennes (Webb, 1995), Le Rhin (Rutten, 2008) et le Danube (Bonnacci, 2008)

o Origines diverses invoquées (climat,régularisation, rejets thermiques, ...)

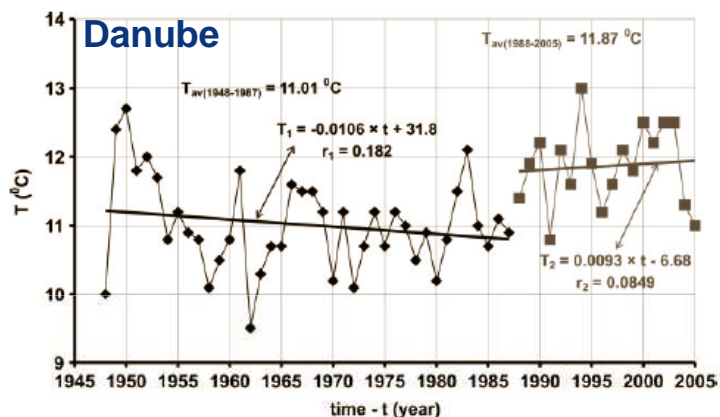


Figure 10. Trends in mean annual water temperatures at Donji Miholjac in the two sub-periods are defined in Figure 9

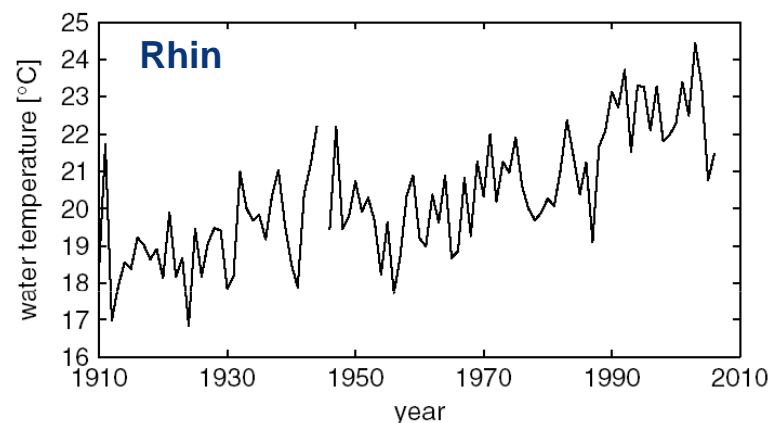


Figure 2. Increase in August water temperatures at measurement location Lobith over the past century

Table 3 Trends in water temperature for individual months in the period 1901-1990 based on linear regression analysis of monthly mean values

| Study site | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Kremsmünster | - | + | - | - | -0.82 | - | - | + | +0.53 | + | + | - |
| Mittersill | + | - | -0.64 | -0.61 | - | - | +0.53 | +0.73 | +0.67 | + | +0.58 | - |
| Spittal | + | + | + | +1.00 | +1.19 | +1.26 | +2.73 | +2.89 | +2.16 | +1.19 | + | - |
| Federaun | +0.88 | +1.84 | +1.35 | +0.62 | + | - | + | +0.56 | +0.59 | + | - | - |
| Wels | +1.16 | +1.30 | +0.71 | +1.21 | +1.50 | +1.14 | +1.32 | +1.16 | +1.60 | +1.39 | +1.50 | +0.90 |
| Salzburg | +0.74 | +1.17 | +0.77 | + | -0.66 | -1.00 | -1.01 | -0.79 | + | +0.63 | +0.98 | +0.51 |
| Graz | +1.02 | +1.53 | +0.67 | +0.67 | + | - | - | + | +1.04 | +1.03 | +1.10 | +0.72 |
| Schärding | + | +0.72 | + | +0.62 | + | + | + | +0.77 | +1.04 | +1.27 | +1.26 | +0.55 |
| Linz | +0.76 | +1.28 | + | + | + | - | + | +0.94 | +1.51 | +1.74 | +2.03 | +1.28 |
| Ybbs | +0.70 | +1.32 | + | +0.66 | + | + | + | +1.37 | +1.89 | +2.15 | +2.00 | +1.19 |

+ = increase; - = decrease; bold figures indicate change significant at $P < 0.05$, other figures indicate change significant at $P < 0.10$.

Autriche

B. W. Webb & F. Nobilis

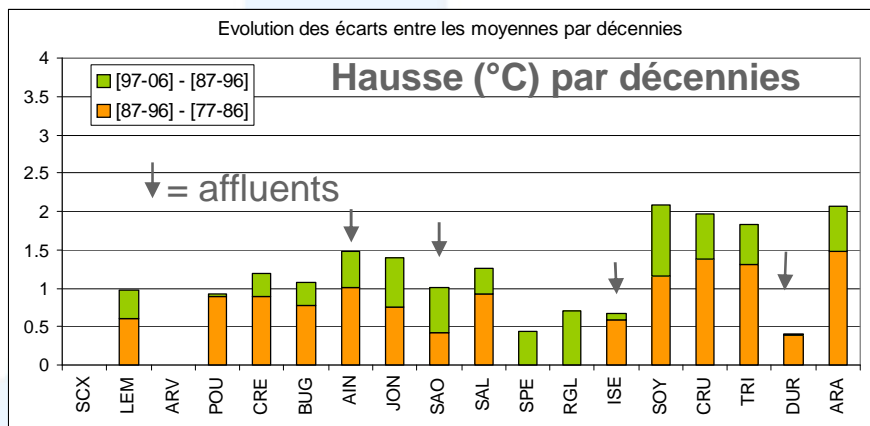
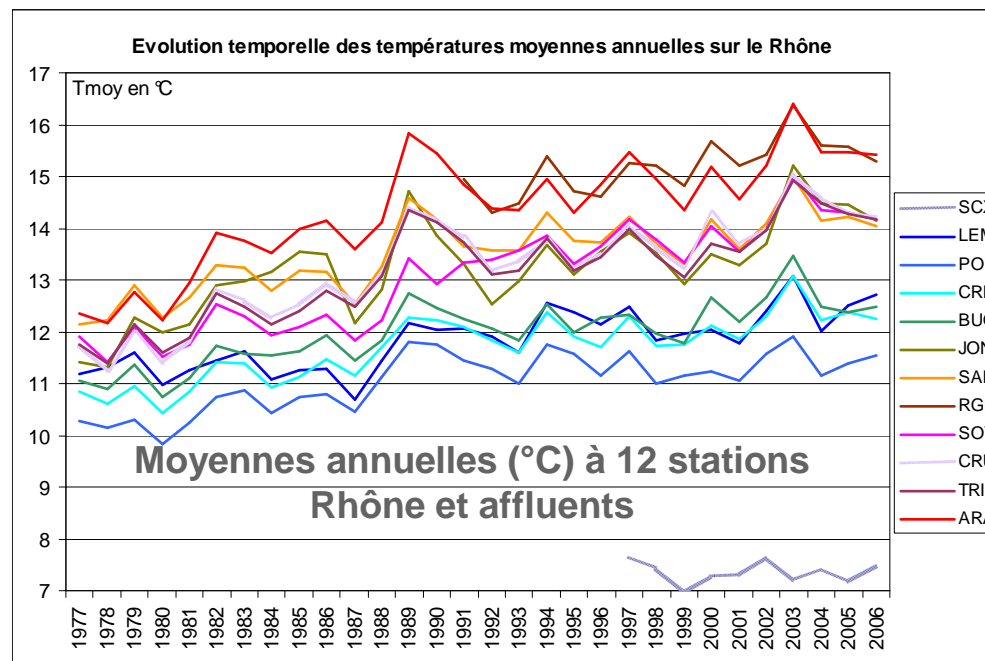




Évolution sur trois dernières décennies

Le Rhône français (Poirel, 2008)

- o Hausse de T sur tout le fleuve sur 1977-2006 (+1°C à +2°C en moyenne entre 1ere et 3eme décennies)
- o Présente dès la sortie du Léman et plus marquée sur le bas Rhône
- o Hausse de T de 4 affluents principaux (+0.5°C à +1.5°C)
- o Corrélation avec l'évolution de la température d'air

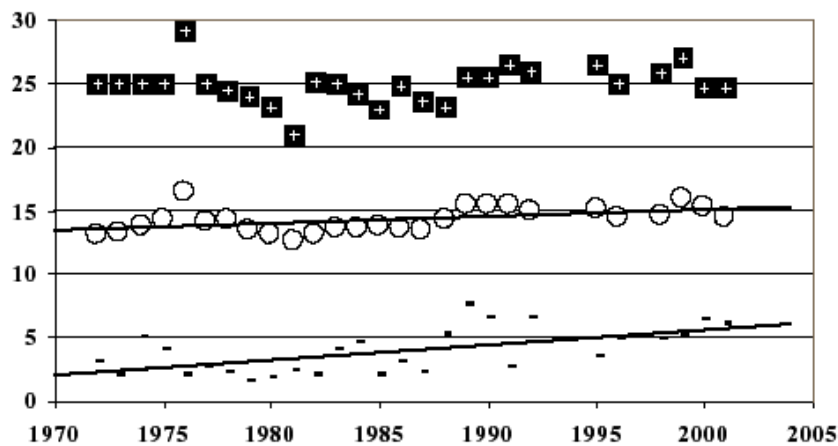




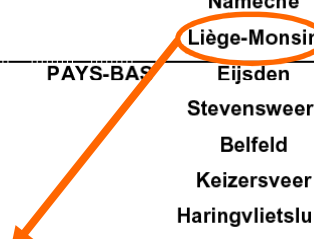
Évolution sur trois dernières décennies

© La Meuse (Laborelec - Univ. Namur, 2008)

- Hausse généralisée de la moyenne annuelle de température sur l'ensemble de la Meuse sur la période 1970-2005 (+0.3 à +0.75°C)
- Des hausses sur les Tmin plus fortes que l'élévation en moyenne annuelle
- Des hausses sur les Tmax moins marquées



| | | T° minimale | T° moyenne | T° maximale |
|-------------|------------------|---------------|-------------|--------------|
| FRANCE | Goncourt | 0,21 (0,61) | 0,73 (0,78) | 1,12 (0,93) |
| | Brixey | -0,02 (-0,06) | 0,36 (0,46) | 0,41 (0,56) |
| | Saint-Mihiel | -0,09 (0,12) | 0,54 (0,5) | 0,76 (0,64) |
| | Belleray | 0,24 (0,24) | 0,68 (0,68) | 0,8 (0,79) |
| | Bras-s-Meuse | 0,26 (0,24) | 0,62 (0,61) | 0,76 (0,74) |
| | Inor | -0,35 (-0,18) | 0,61 (0,57) | 0,97 (0,83) |
| | Donchery | 0,14 (0,16) | 0,24 (0,29) | 0,18 (0,11) |
| | Nouzonville | 0,28 (0,36) | 0,31 (0,38) | 0,2 (0,17) |
| Ham-s-Meuse | 0,06 (-0,21) | 0,52 (0,44) | 0,61 (0,65) | |
| BELGIQUE | Tailfer | 1,9 | 0,46 | -1,3 |
| | Namêche | -0,21 | 0,51 | 0,36 |
| | Liège-Monsin | 1,2 | 0,56 | 0,24 |
| PAYS-BAS | Eijsden | 0,3 (0,38) | 0,52 (0,4) | 0,71 (0,33) |
| | Stevensweert | 1,03 (0,8) | 0,5 (0,36) | 0,29 (0,12) |
| | Belfeld | 0,55 (0,63) | 0,18 (0,21) | -0,56 (-0,4) |
| | Keizersveer | 0,54 (0,54) | 0,42 (0,54) | 0,19 (0,31) |
| | Haringvlietsluis | 0,69 (0,6) | 0,65 (0,64) | 0,45 (0,51) |





Évolution sur trois dernières décennies

© La Loire moyenne (Moatar, 2006)

- **Hausse généralisée sur la Loire moyenne (+1.5 à +2°C) en moyenne annuelle sur la période 1977-2003 (stations amont centrales EDF)**
- **Plus marquée sur printemps / été**
- **Corrélation avec Tair; effet refroidissant des résurgences aval Orléans l'été**

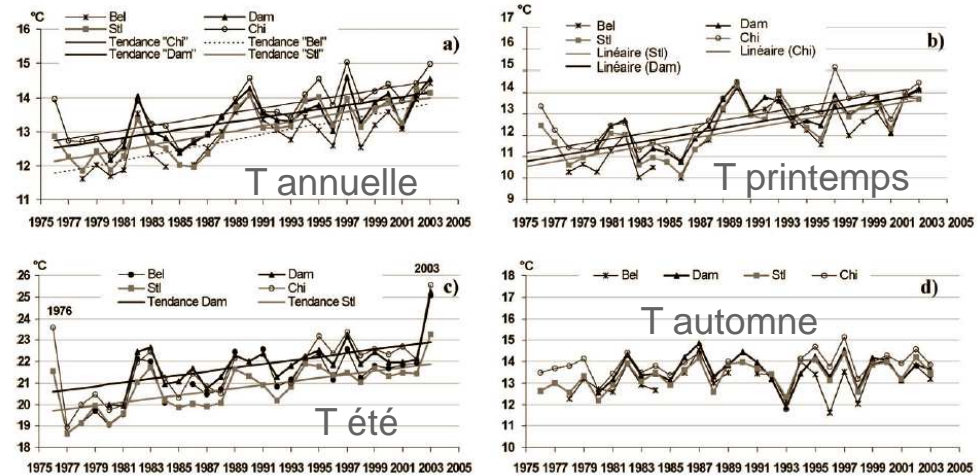


Fig. 2. Trend of temperatures of the middle Loire since 1976: (a) annual mean values, (b) spring mean values (March to May), (c) summer mean values (June to August), (d) autumn mean values (September to November). Bel = Belleville, Dam = Dampierre, Stl = Saint-Laurent-des-Eaux, Chi = Chinon (Avoine).

Tableau 11. Significativité et amplitude des tendances observées sur les données de température de la Loire (Belleville, Dampierre, Saint-Laurent des Eaux, Chinon), atmosphériques (Orléans), et des débits (Gien et Blois). La probabilité de rejeter à tort une tendance est : < à 1% (en gras), < à 5% (en gras italique), et < 10% (en italique). L'amplitude des tendances n'est indiquée que pour les détections avec un niveau de confiance de 99% (prob.< 1%).

| Teau | Mars à Mai | | Juin à Aout | | Sept - Nov | | Dec-Fev | | Année | |
|------------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|
| | Hausse (°C) | prob. | Hausse (°C) | prob. | Hausse (°C) | prob. | Hausse (°C) | prob. | Hausse (°C) | prob. |
| Belleville | 2.9 | 0.0002 | 2.8 | 0.0019 | + | 0.0891 | + | 0.0545 | 1.9 | 0.0001 |
| Dampierre | 2.4 | 0.0002 | 2.4 | 0.0116 | + | 0.1825 | + | 0.0407 | 1.7 | 0.0000 |
| St Laurent | 2.7 | 0.0001 | 2.5 | 0.0005 | + | 0.0141 | 2.1 | 0.0021 | 2 | 0.0000 |
| Chinon | 2.6 | 0.0000 | 3.0 | 0.0006 | + | 0.0723 | 1.6 | 0.0088 | 1.9 | 0.0000 |
| Tair | Hausse (°C) | prob. | Hausse (°C) | prob. | Hausse (°C) | prob. | Hausse (°C) | prob. | Hausse (°C) | prob. |
| Orléans | 2.1 | 0.0002 | 2.0 | 0.0109 | + | 0.5859 | + | 0.0695 | 1.5 | 0.0009 |
| Débits | Baisse | prob | Baisse | prob | Baisse | prob | Baisse | prob | Baisse | prob |
| Gien | - | 0.0925 | - | 0.0191 | - | 0.5435 | - | 0.4053 | - | 0.0102 |



Évolution sur une dizaine de dernières décennies

© La Loire moyenne (Moatar, 2006)

- o Calage d'un modèle statistique de températures trimestrielles sur 1977-2003

$$T_{eau} = a + b \cdot T_{air} - c \cdot \text{Log}(Q)$$

avec a, b, c constantes, T_{air} température d'air Orléans et Q débit du fleuve à Blois

- o Application du modèle sur 1880-2003

- o Relativise les évolutions de la période d'observation 1977-2003 (+1°C environ en moyenne annuelle en 100 ans)

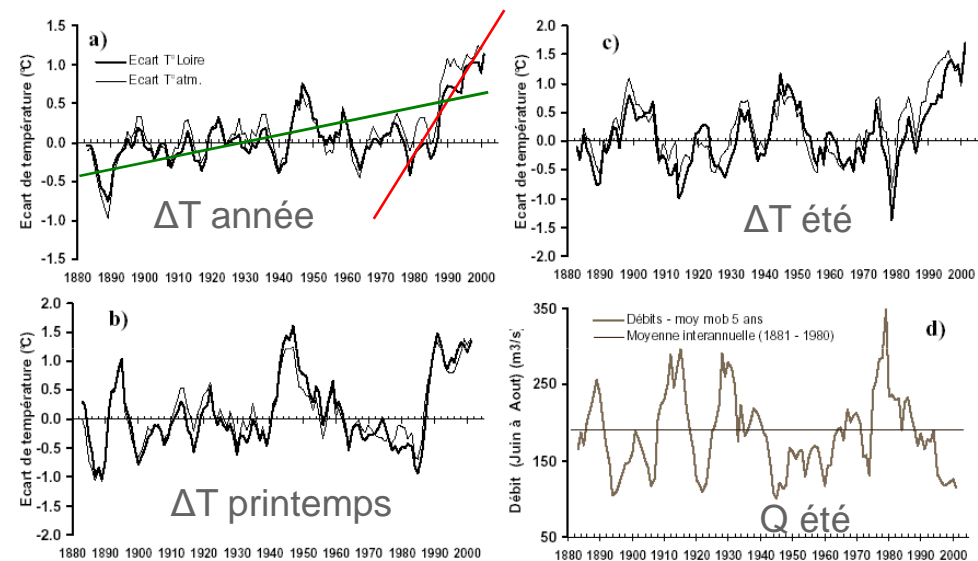


Figure 22. Evolution des débits estivaux et des écarts de température de la Loire et atmosphérique aux moyennes interannuelles (1881-1980) respectives. Les séries représentent des moyennes glissantes de 5 ans: a) moyennes annuelles, b) moyennes printanières, c) moyennes estivales, d) moyenne estivale (juin à août) des débits à Blois (Moatar et Gailhard, 2005, annexe 6).

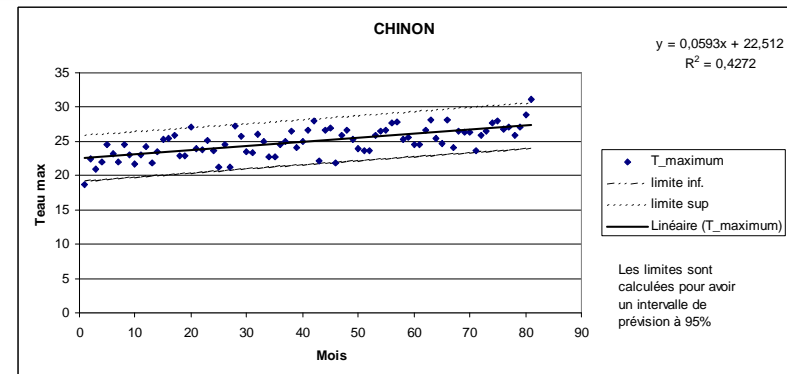


Quels extrêmes de température?

● Etude sur la T max journalière (EDF R&D, 2006)

- Ajustement d'un modèle probabiliste (loi Gen. val. extrêmes) sur les températures d'eau journalières max observées chaque année en juin, juillet et août sur 1977-2003, avec prise en compte ou pas de la tendance d'échauffement observée

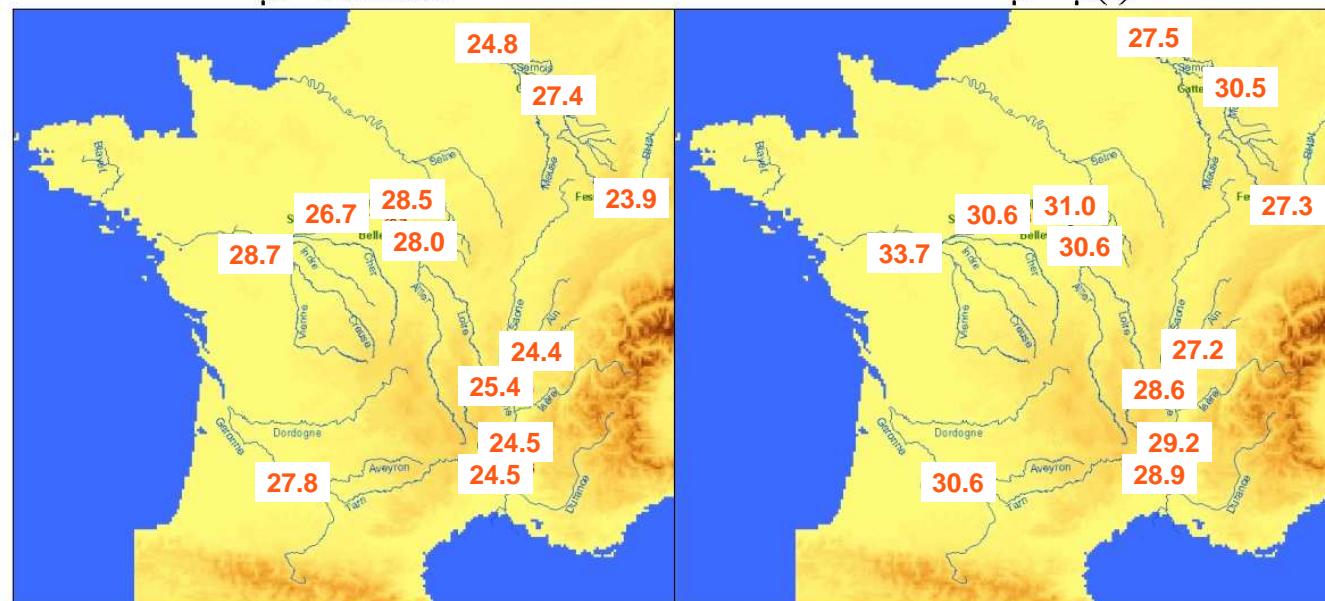
- Évaluation d'une température d'eau max journalière à temps de retour 30 ans (+ de 2°C avec prise en compte de la tendance d'échauffement)



results for 30 years return levels

$\mu = \text{constant}$

$\mu = \mu(t)$





Évolution sur les dernières décennies: parts du climat et des perturbations anthropiques dans le bassin versant

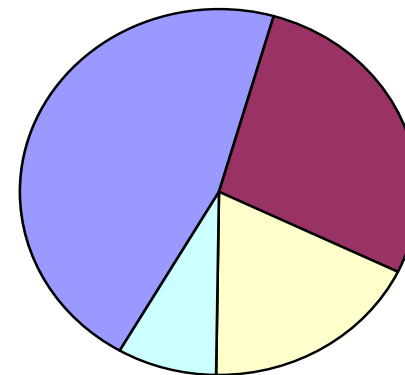
- Concept de température naturelle locale = T_{nat} = température d'un plan d'eau évoluant sous la seule influence des variations de sa profondeur et des conditions météorologiques locales (Gras, 1970)
- Des modèles numériques déterministes à base physique calculent au pas journalier T_{nat} et la température de rivières et grands réservoirs à 1°C près en utilisant des données trihoraires de 5 paramètres atmosphériques acquis en routine à une station météorologique voisine (Gras et al, 1986; Salençon et Thébaud 1997)
- Constat 1, rivières typables : T_{nat} une grande partie de l'année (ex: parties moyenne et aval de Loire, Moselle, Saône, Seine, dites rivière de plaine); T_{nat} peu fréquent (ex: Garonne près du confluent du Tarn) ou exceptionnel (Rhin et Rhône français)
- Constat 2: des codes de calcul disponibles permettent de dégager le rôle de facteurs climatiques et anthropiques (hydrologie, morphologie, rejets) dans les évolutions observées de température d'eauet sont utilisables pour tester l'effet de scénarios d'évolution de ces facteurs



Évolution sur les dernières décennies: parts du climat et des perturbations anthropiques dans le bassin versant

- ⊙ Température moyenne estivale de la Loire moyenne 1949 -2003 : modèle déterministe à base physique Tnat (*Gosse et al, 2008*)
 - o 85% de l'échauffement de l'eau constaté de 1980 à 2003 (+1.9°C) expliqué par les variations des conditions atmosphériques locales en Tair (+1.5°C), vent, pression partielle de vapeur d'eau et nébulosité
 - o ces 4 paramètres ont tous une variation sur 1980 - 2003 favorisant l'échauffement de l'eau (figure)
 - o mais ne jouent pas dans le même sens sur 1949 - 2003 (environ +0.5°C Teau pour +0.9°C Tair)
 - o valeur du débit peu déterminante dans la plage 50 m³/s –300 m³/s

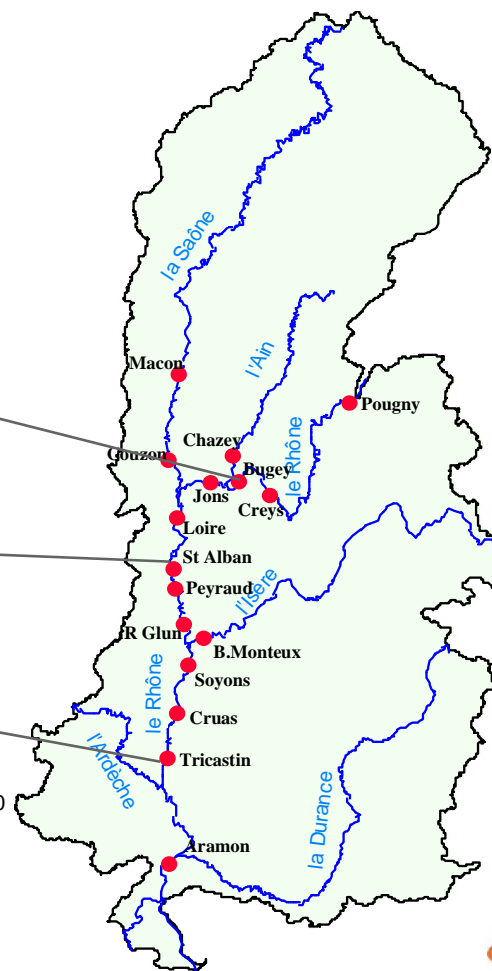
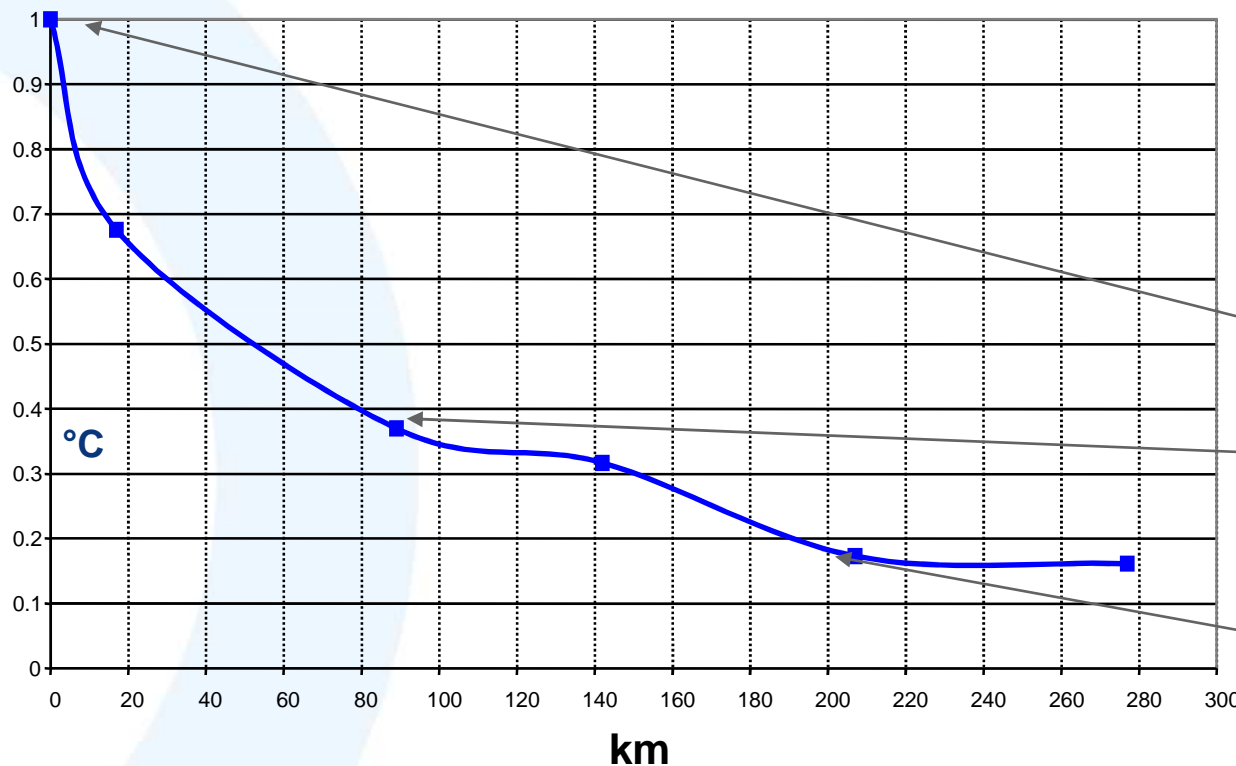
Evaluation de l'Influence de 4 paramètres dans la contribution de la météo locale à l'échauffement de la Loire moyenne en été sur 1980-2003 (station Météo France de Tours)





Évolution sur les dernières décennies: parts du climat et des perturbations anthropiques dans le bassin versant

- ◎ Effet résiduel aval d'un échauffement artificiel de 1°C en moyenne annuelle sur le Rhône à Bugey (De Saint, 2005)





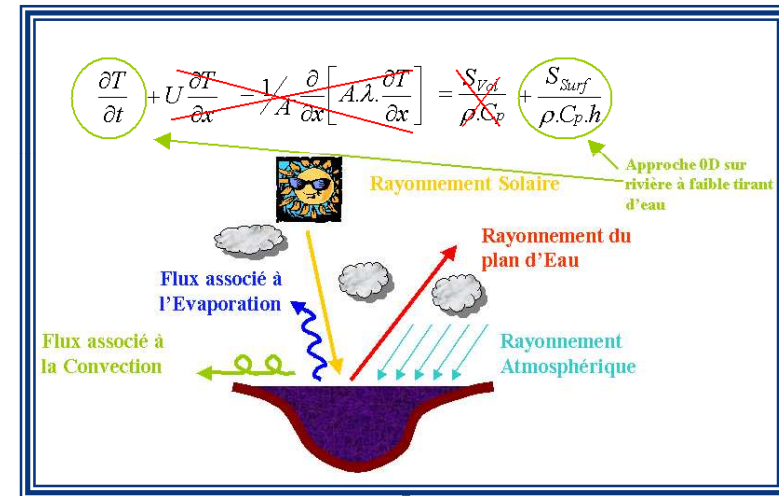
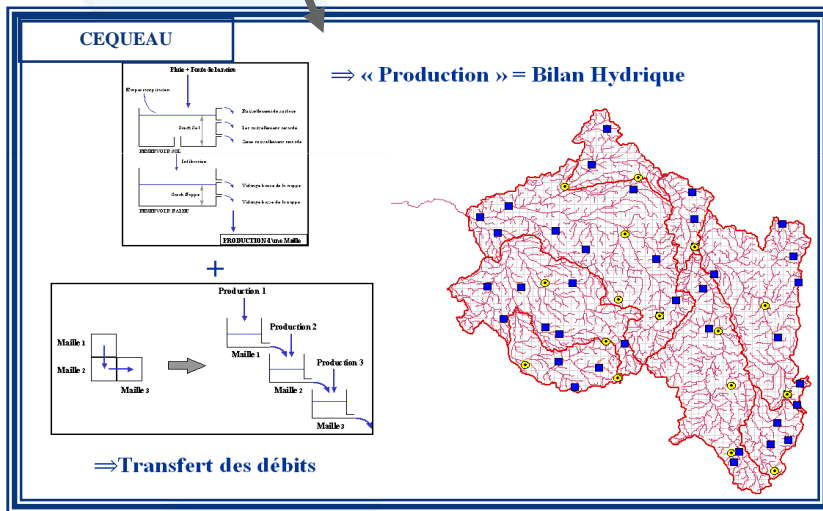
Quelles projections pour le futur ?

Anomalies
Climatiques et
modifications
aménagement
territoire

Chroniques Météorologiques :
Tair, Vent, Humidité,
ensoleillement, pluies

+ chroniques débits,
hauteur/vitesse, rejets

Modèle thermique
(pas temps =3h)



Anomalies
T eau

Chroniques de températures de
l'eau

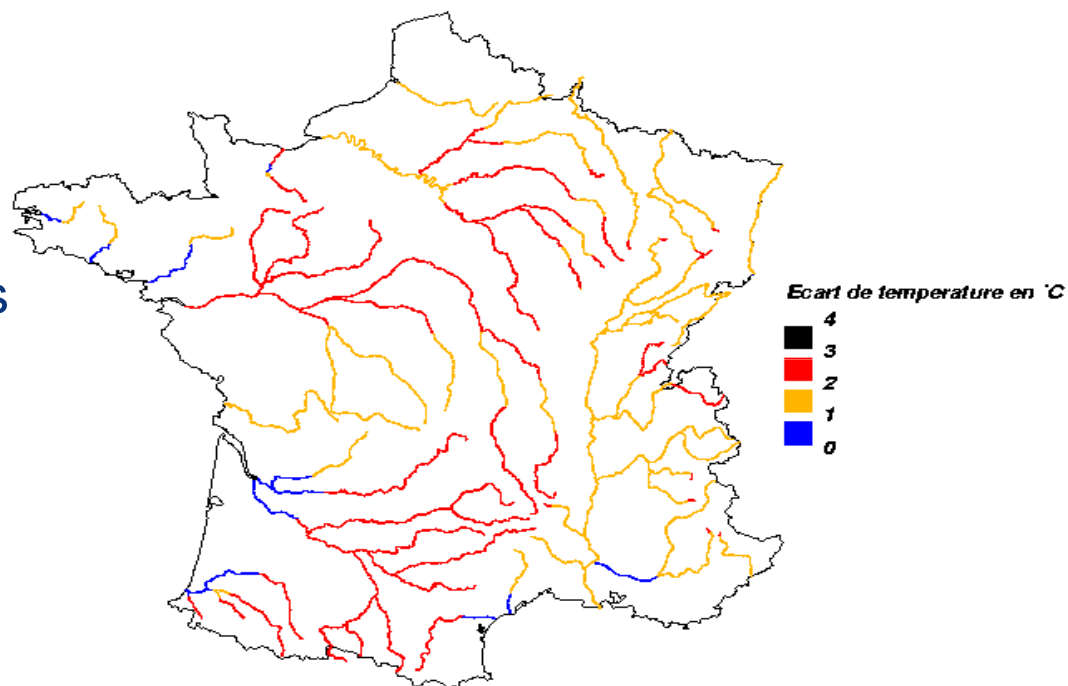


Quelle projection sous effets Tair, vent et nébulosité ?

⊙ modèle déterministe à base physique exploitant un scénario climat LMD 1995 doublement CO2 (*Gosse et al, 1996*)

● élévation (°C) des températures moyennes d'Août de rivières françaises considérées pérennes

(référence conditions météo année 1978 à 16 stations Meteo France)

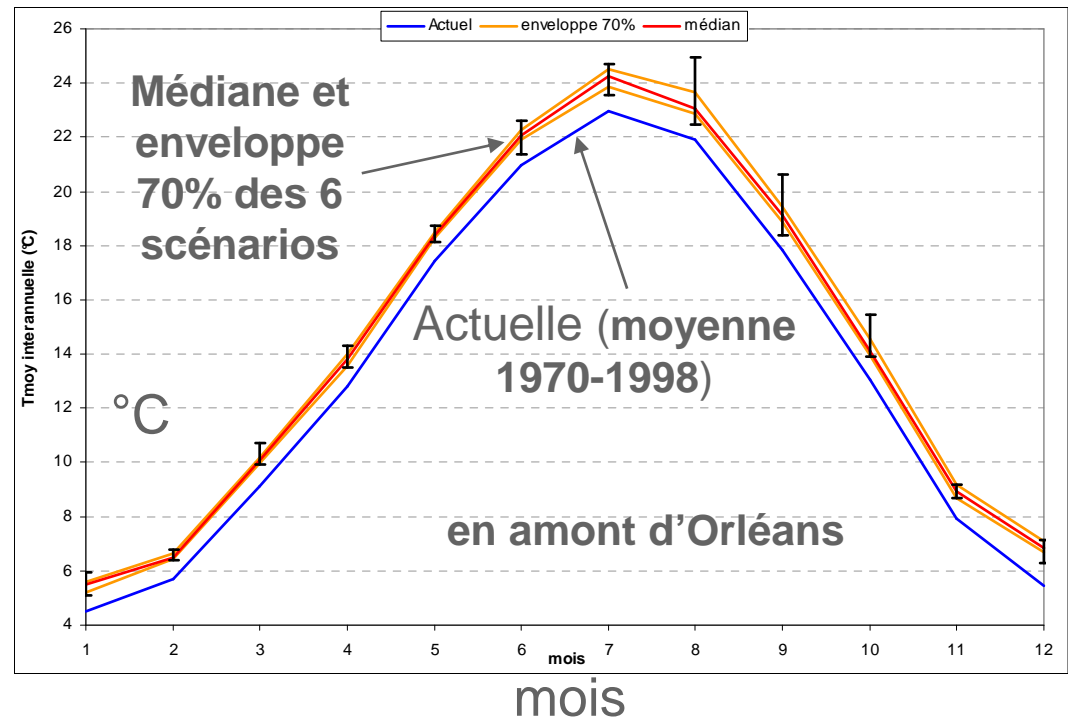




Quelle projection sous effets Tair et débit ?

● La Loire moyenne horizon 2050:
 modèle à base physique exploitant
 6 simulations doublement CO2
 3eme rapport GIEC (*Dupeyrat, Berhier
 2006*)

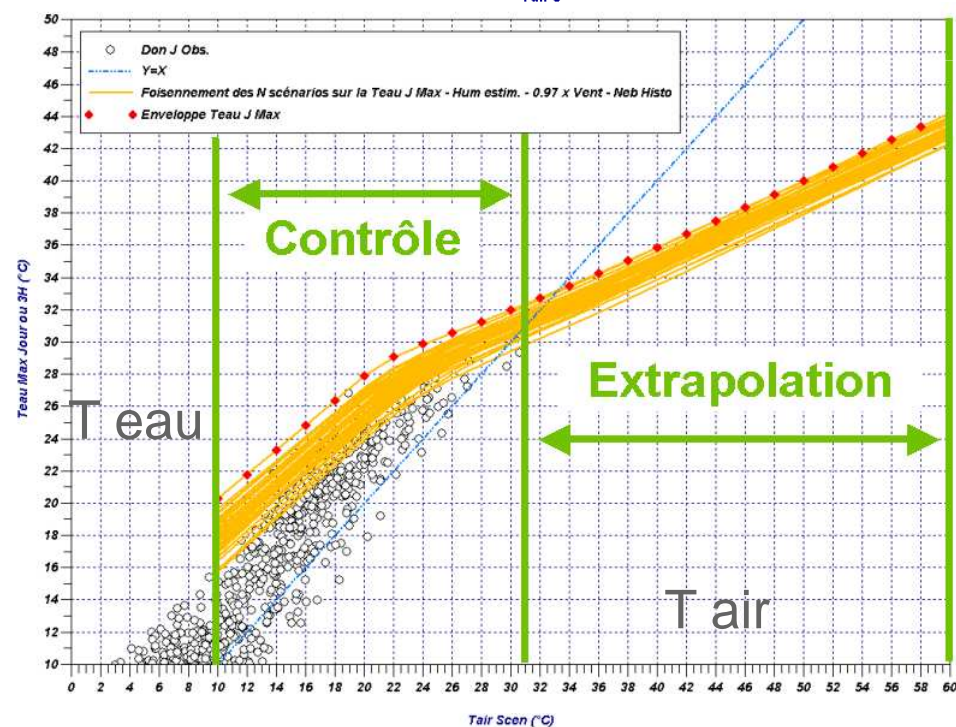
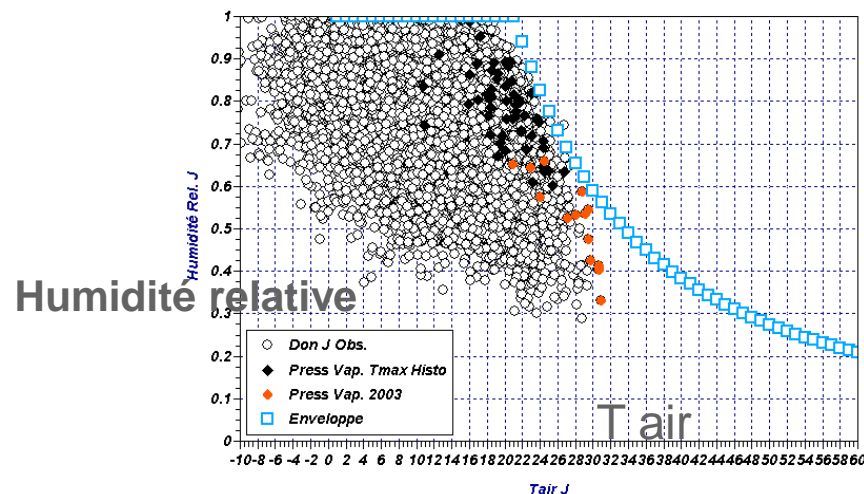
- +0.8 à +1.5°C en moyenne
- +0.6 à +3°C sur normales des mois les plus chauds (pour anomalies de Tair allant jusqu'à +8°C).
- Effets antagonistes non considérés
 - Vent très légèrement à la baisse (-5%) pour la fin de siècle
 - Baisse humidité relative



| | janvier | février | mars | avril | mai | juin | juillet | août | septembre | octobre | novembre | décembre |
|---------------|---------|---------|------|-------|------|------|---------|------|-----------|---------|----------|----------|
| CNRM_HR | 0.96 | 0.78 | 1.02 | 0.98 | 1.04 | 0.94 | 0.91 | 1.14 | 1.44 | 1.08 | 1.02 | 1.40 |
| CNRM_LR | 0.55 | 0.77 | 0.79 | 0.73 | 1.29 | 1.64 | 1.75 | 1.14 | 1.07 | 0.91 | 1.27 | 1.67 |
| HC_LR | 0.98 | 0.77 | 1.60 | 1.53 | 0.91 | 1.31 | 1.54 | 3.03 | 2.80 | 2.36 | 0.75 | 1.39 |
| LMD_HR | 1.08 | 1.08 | 1.03 | 0.76 | 0.70 | 1.24 | 1.20 | 0.95 | 0.54 | 0.85 | 1.02 | 1.27 |
| LMD_LR | 1.44 | 0.68 | 0.83 | 1.05 | 1.05 | 0.39 | 0.58 | 0.56 | 1.11 | 0.98 | 0.76 | 0.85 |
| UR_LR | 0.69 | 0.97 | 0.82 | 1.22 | 0.84 | 0.96 | 1.40 | 1.72 | 1.58 | 1.47 | 1.28 | 1.71 |
| médian | 0.95 | 0.84 | 1.01 | 1.05 | 0.97 | 1.08 | 1.23 | 1.42 | 1.42 | 1.28 | 1.02 | 1.38 |

Quelle limite physique aux températures maximales de rivière de plaine ?

- Extrêmes de la température de l'eau évalués avec un modèle à base physique (*Travaux EDF R&D 2008*)
 - Construction de scénarios par la méthode des perturbations pour T_{air} + appariement d'une hypothèse d'humidité majorante mais décroissante
 - Simulation des températures journalières de l'eau et retenir l'enveloppe de toutes les simulations
 - Exemple Loire en amont de l'Indre : températures journalières 77-2003 + chroniques météo 49-2003 à Tours
 - Conclusion: les extrêmes de T_{eau} devraient évoluer plus modérément que les extrêmes de T_{air} , sous l'effet de l'évaporation





Conclusion

- Hausse de la température des rivières de France et d'autres régions d'Europe ces trente dernières années: reconstitution possible par modèles statistiques et à base physique
- Débat ouvert sur la part des facteurs explicatifs (Tair, ensoleillement, vent, humidité, hydrologie, facteurs anthropiques dans le bassin versant) : des modèles déterministes permettent d'apporter des réponses
- Quelle évolution future des températures de rivière et des grands réservoirs?
 - **Importance de modéliser les processus physiques (limite des corrélations Teau-débit et Teau-Tair)**
 - **Importance de disposer de scénarios pertinents en projection climatique (température d'air, précipitations mais aussi vent, humidité, ensoleillement) et sur l'évolution pressions/gestion de la ressource en eau dans le bassin versant fluvial (surtout pour les rivières qui ne sont pas assimilables à des rivières de plaine)**