

L'eau et le changement climatique en Bourgogne, peut-on parler de rupture ?

Philippe Amiotte-Suchet, Jérémy Bachmann, Etienne Brulebois, Thierry Castel, Olivier Legras, Nicolas Le Moine, Vivien Ponnou-Delaffon, Yves Richard, Aurélien Rossi, Marjorie Ubertosi



*Le changement climatique et la ressource en eau :
s'adapter ensemble, ici et maintenant
Restitution finale du projet HYCCARE-Bourgogne
Le 25 mars 2016, Dijon, MSH*

1 : Le changement climatique déjà observé et son impact sur la ressource en eau en Bourgogne

1

Climat observé

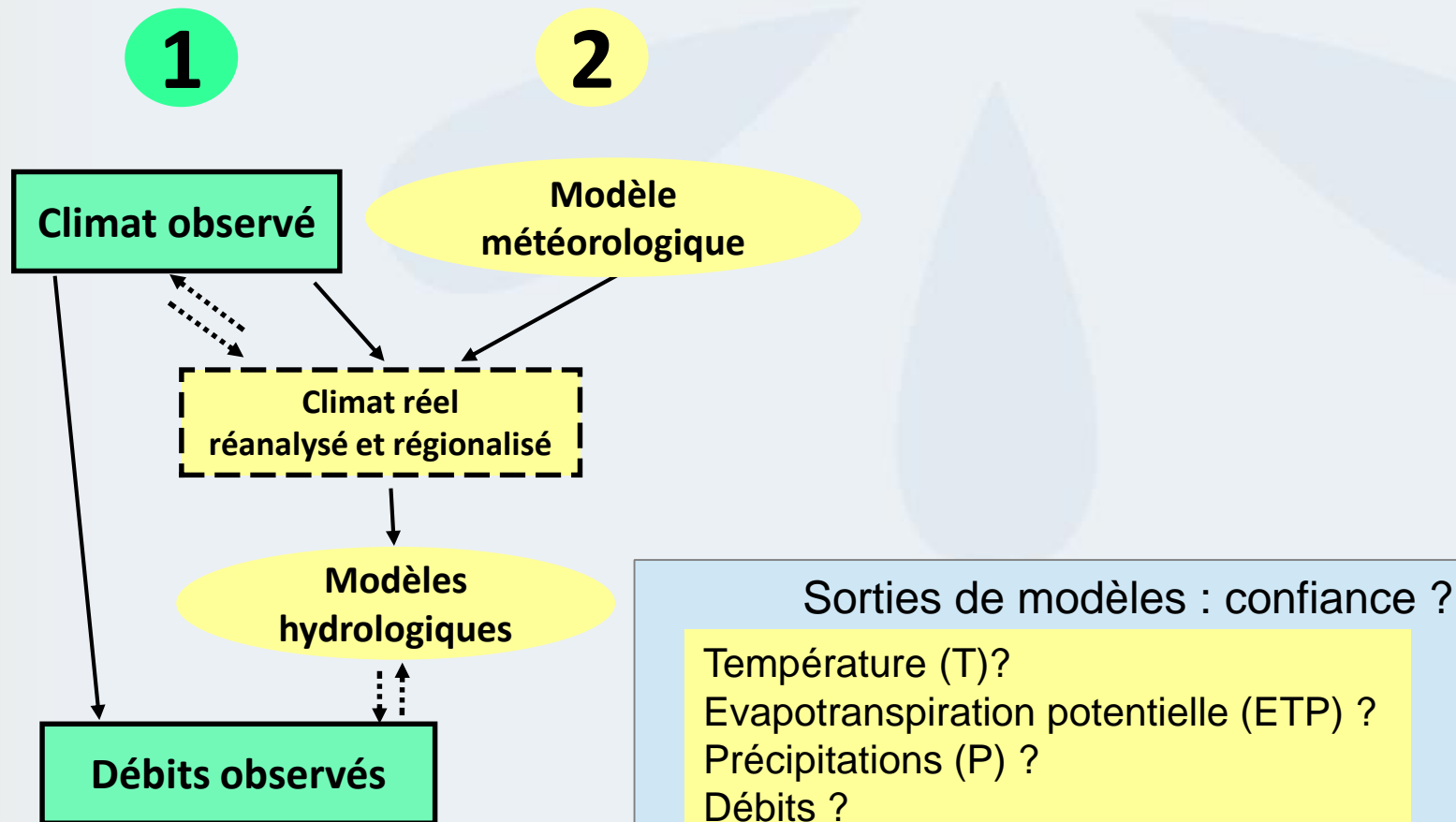
Débits observés

Du climat au débit des cours d'eau : le chemin

HYCCARE

1 : Le changement climatique déjà observé et son impact sur la ressource en eau en Bourgogne

2 : Développement d'une chaîne de modélisation hydro-climatique et application sur 1980-2011



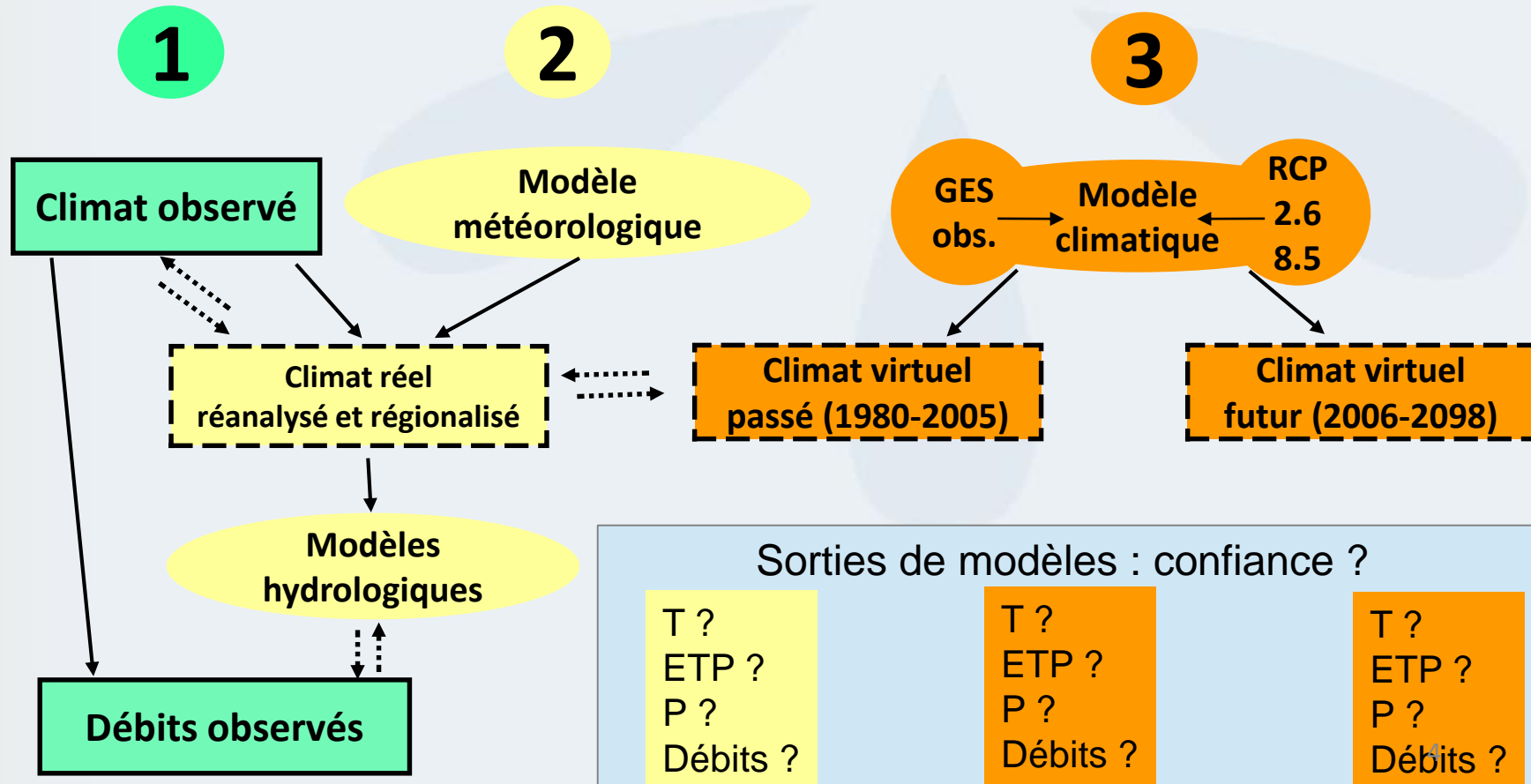
Du climat au débit des cours d'eau : le chemin

HYCCARE

1 : Le changement climatique déjà observé et son impact sur la ressource en eau en Bourgogne

2 : Développement d'une chaîne de modélisation hydro-climatique et application sur 1980-2011

3 : Projection de la chaîne de modélisation sur des climats virtuels (période 1980-2100)



1. Le changement climatique déjà observé et son impact sur la ressource en eau en Bourgogne

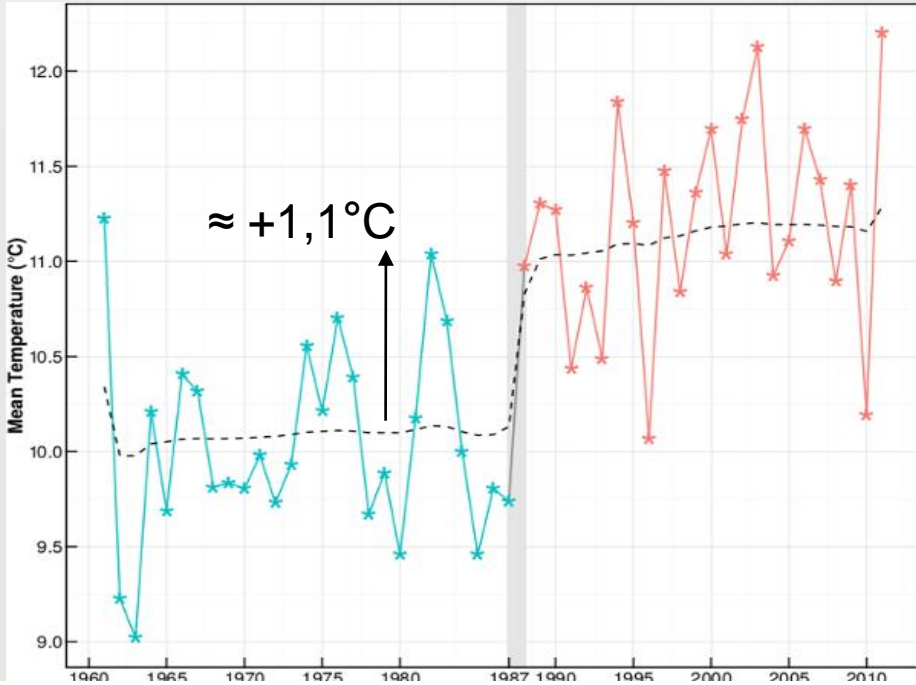
1

Climat observé

Débits observés



Température annuelle

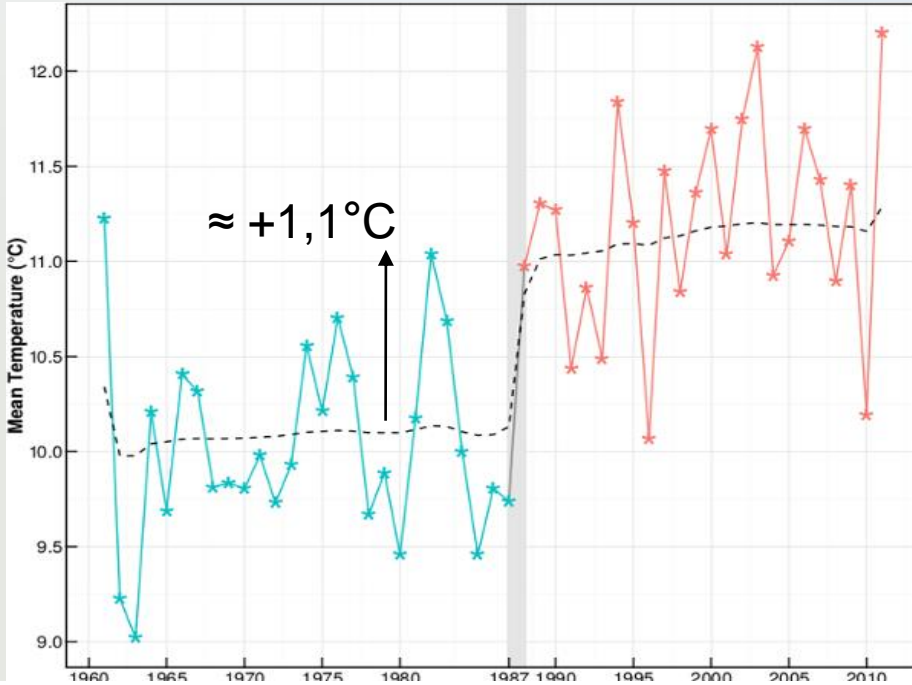


Climat 1 : avant 1987 ---> Climat 2 : après 1988

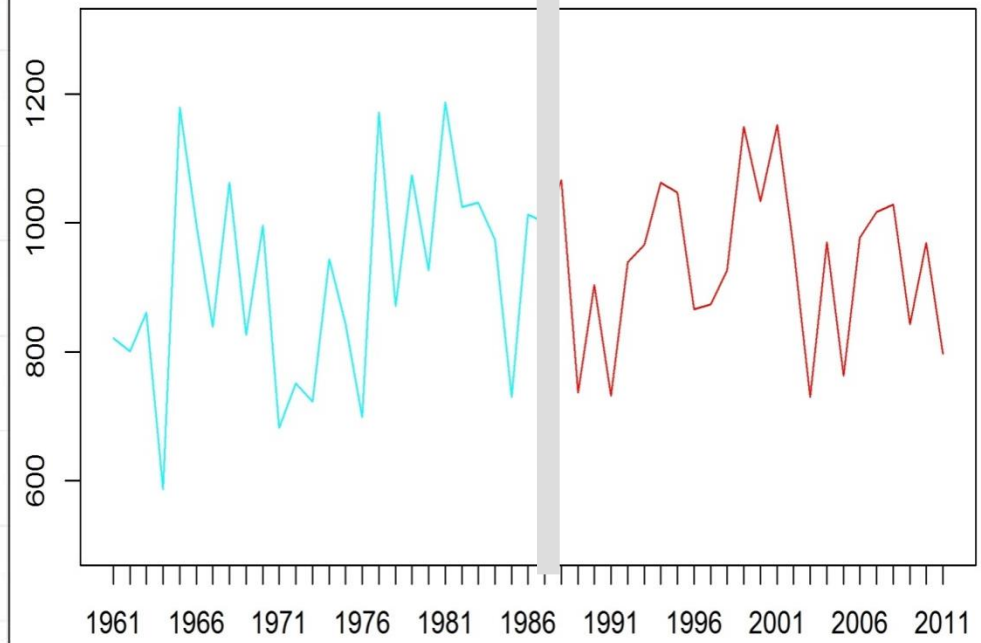
- 1 rupture : 1987/1988
- 2 périodes distinctes
- 2 climats



Température annuelle



Précipitations annuelles



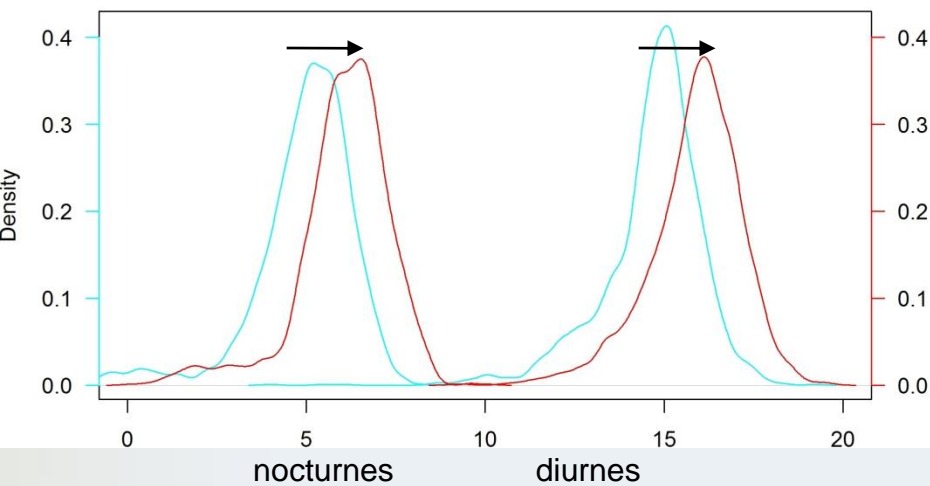
Climat 1 : avant 1987 ---> Climat 2 : après 1988

- 1 rupture : 1987/1988
- 2 périodes distinctes
- 2 climats

- Pas de changement ou petits changements ?
- Grande variabilité d'une année sur l'autre



Température annuelle

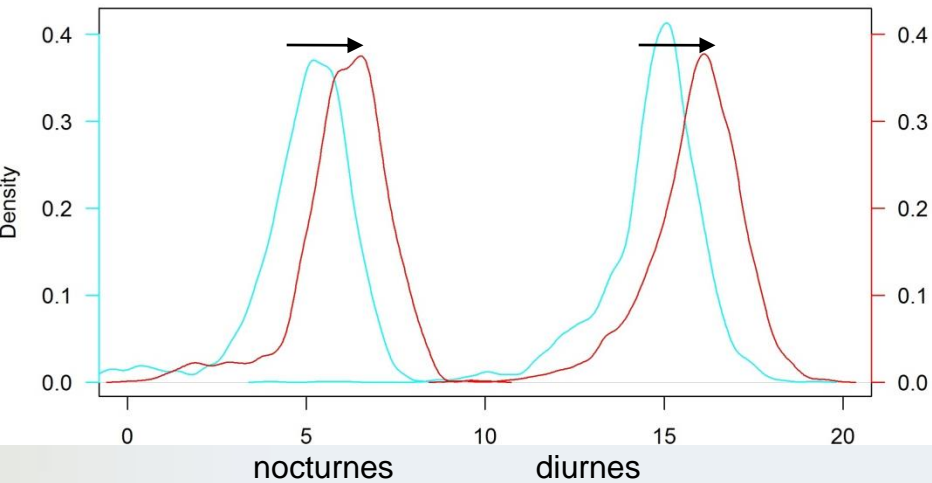


Climat 1 : avant 1987 ---> Climat 2 : après 1988

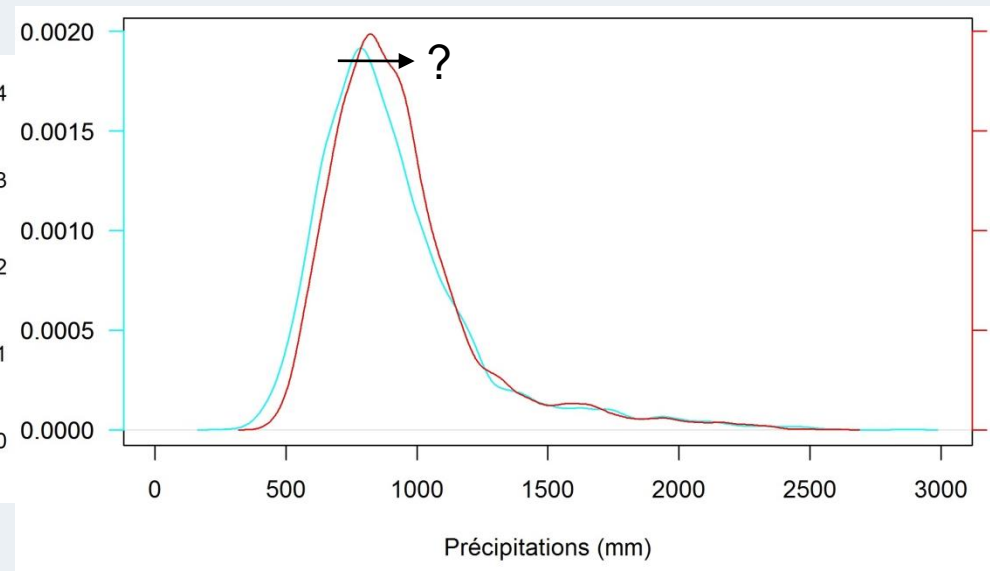
- Tmin (nocturnes) $\approx +1^{\circ}\text{C}$
- Tmax (diurnes) $\approx +1.2^{\circ}\text{C}$



Température annuelle



Précipitations annuelles



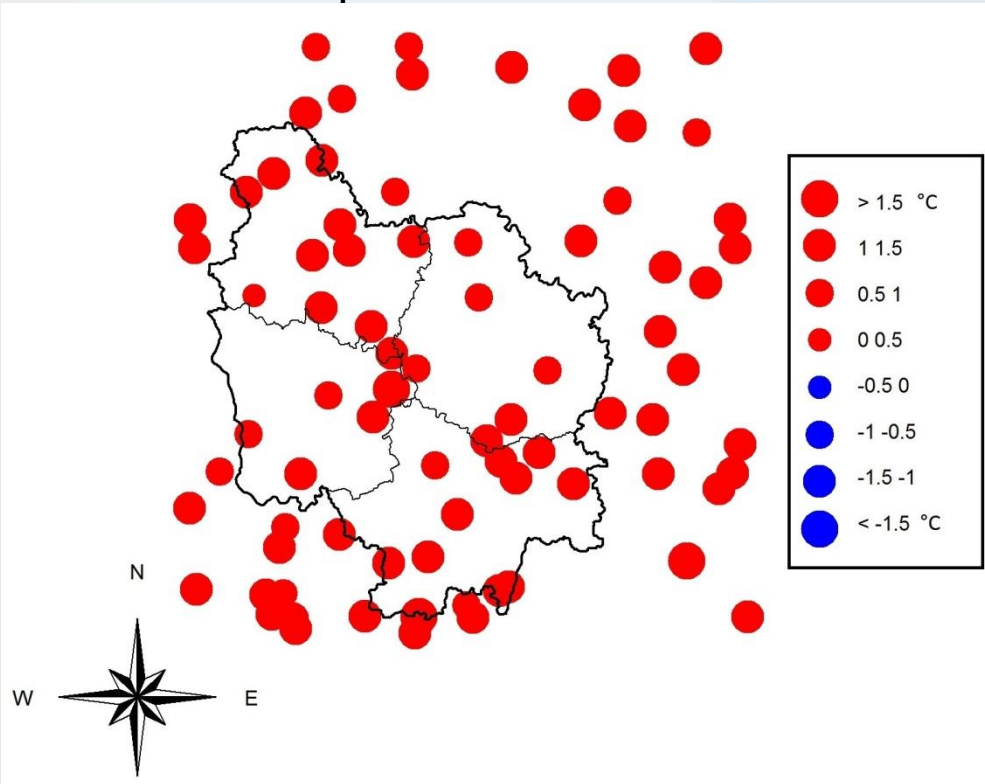
Climat 1 : avant 1987 ---> Climat 2 : après 1988

- Tmin (nocturnes) $\approx +1^{\circ}\text{C}$
- Tmax (diurnes) $\approx +1.2^{\circ}\text{C}$

Pas de changement ?
Il pleut un peu + ?

HYCCARE

Température annuelle

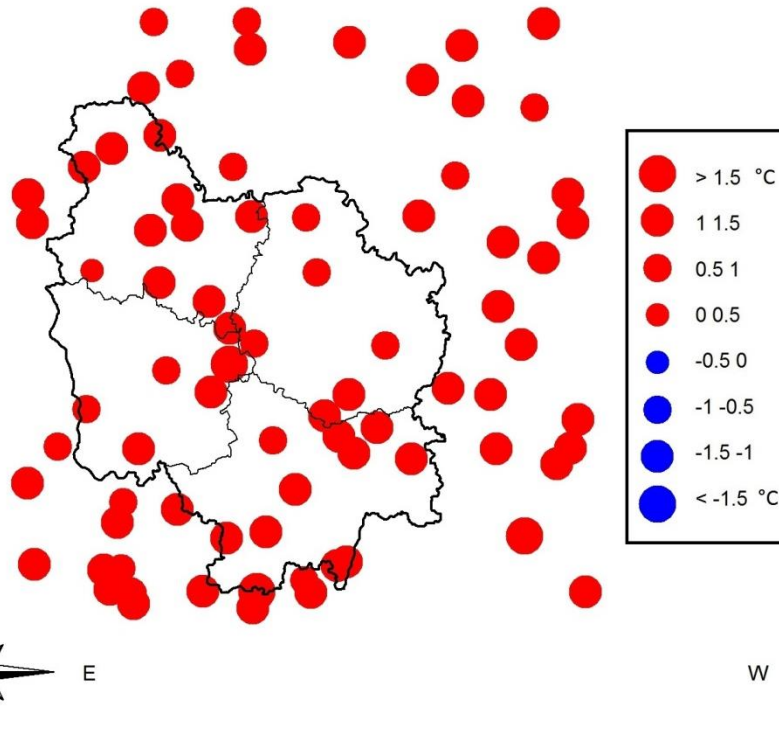


- Réchauffement généralisé
- Ne dépend ni de la situation ni du site
- Global > Local

Réchauffement : Confiance totale !

HYCCARE

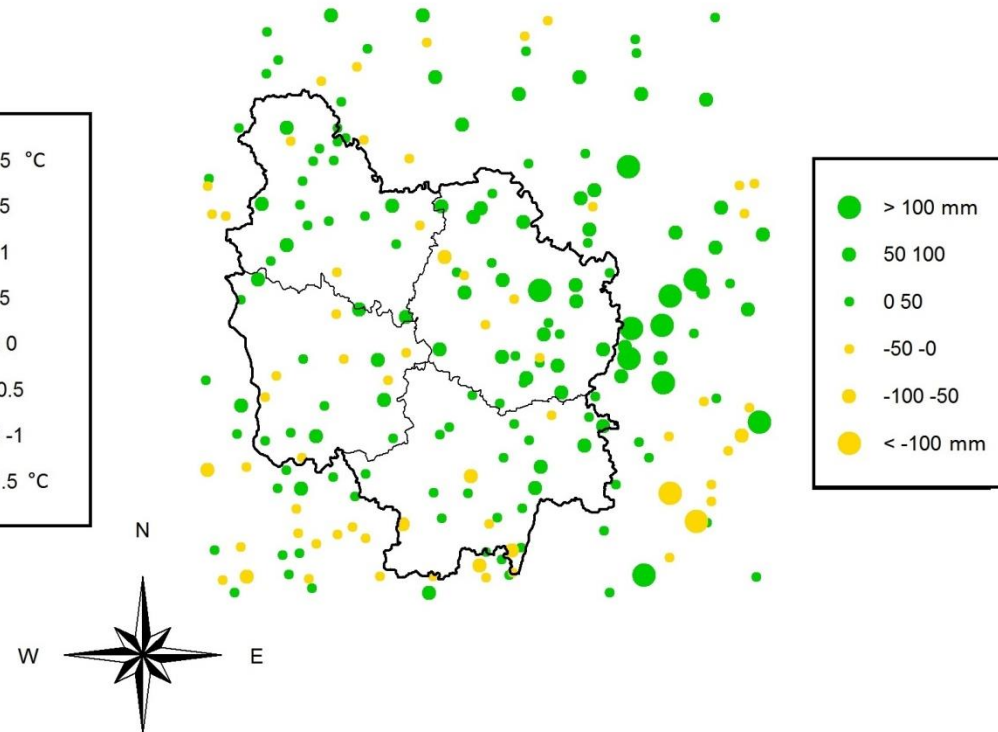
Température annuelle



- Réchauffement généralisé
- Ne dépend ni de la situation ni du site
- Global > Local

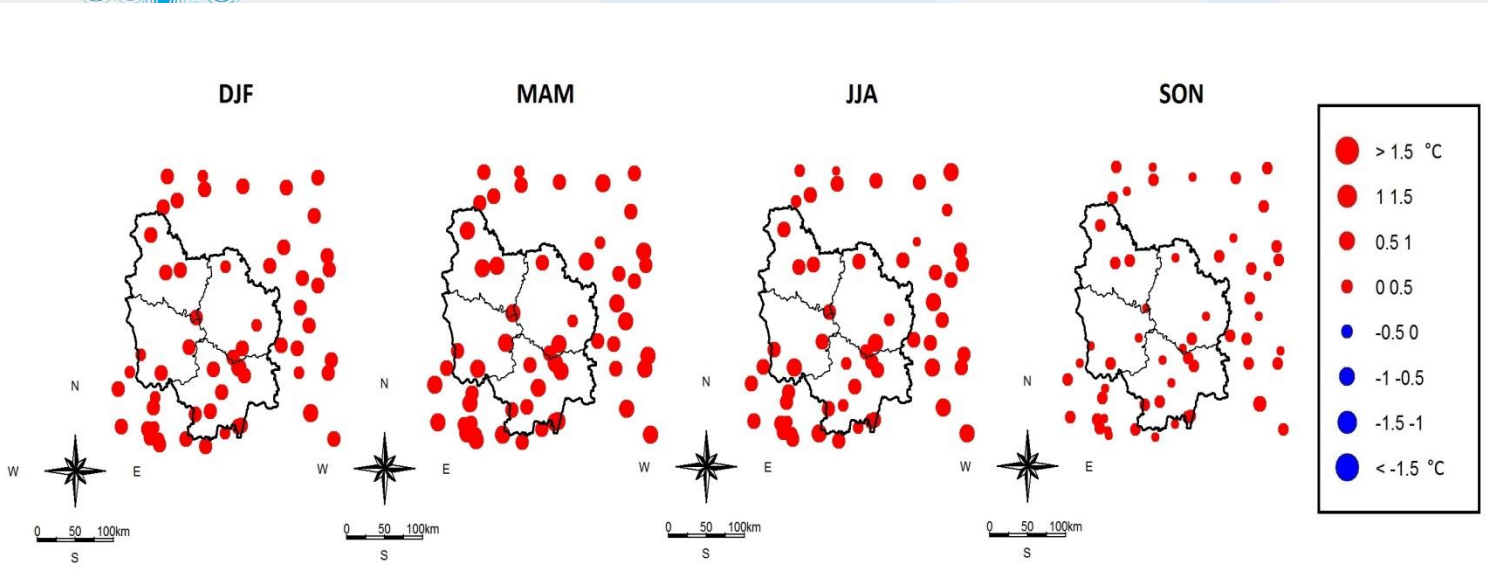
Réchauffement : Confiance totale !

Précipitations annuelles

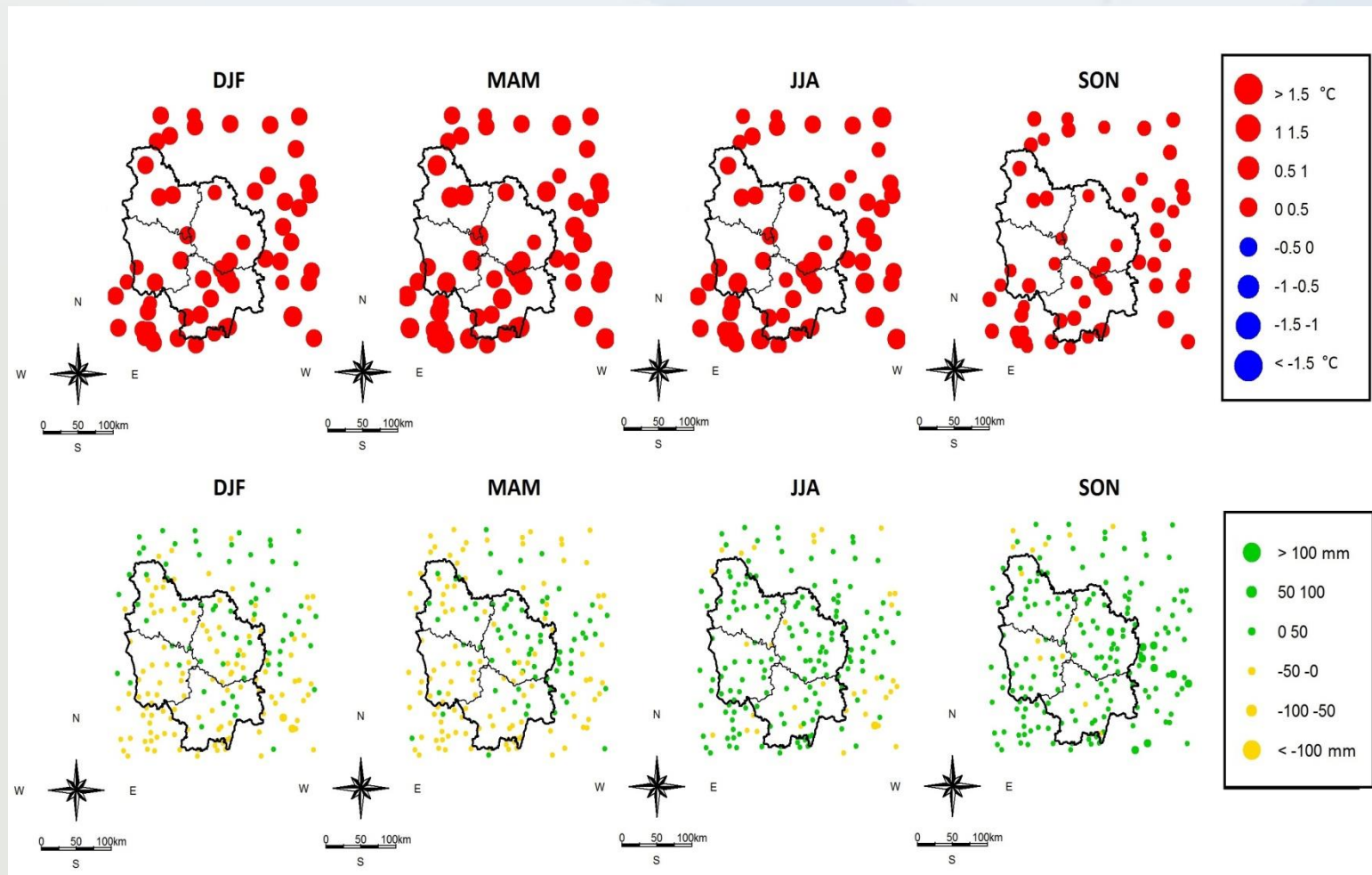


- Évolutions variables localement
- Dépend des conditions de mesure
- Dépend de facteurs locaux
- Dépend des années prises en compte

Précipitations sans grand changement



Température
Réchauffement
en toutes saisons



Température

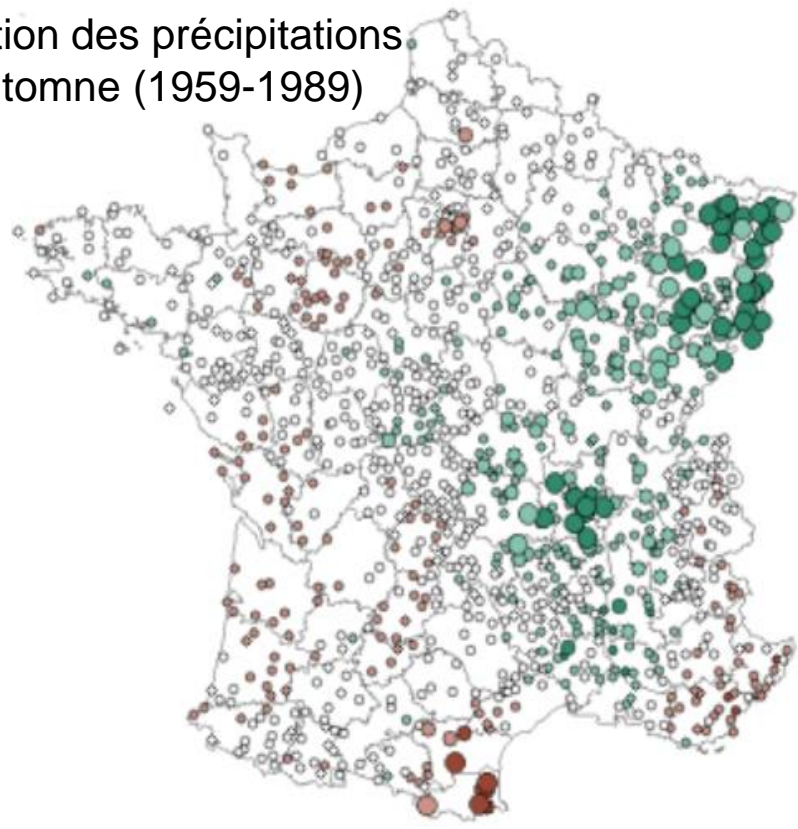
Réchauffement en toutes saisons

Précipitations

Variable selon la saison



Évolution des précipitations d'automne (1959-1989)



Couleur des symboles

- Augmentation
- Augmentation faible
- Pas d'évolution
- Diminution faible
- Diminution

Taille des symboles

- Confiance élevée
- Confiance modérée
- Confiance faible

Ouvrir sur la France permet de contextualiser les évolutions identifiées en Bourgogne

et d'en éprouver la robustesse...

© Météo-France

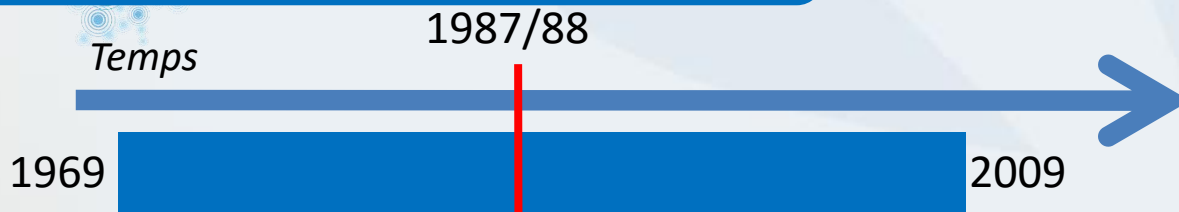
Évolution récente des précipitations variable selon :

- la station ;
- la saison ;
- la période ;
- la région.



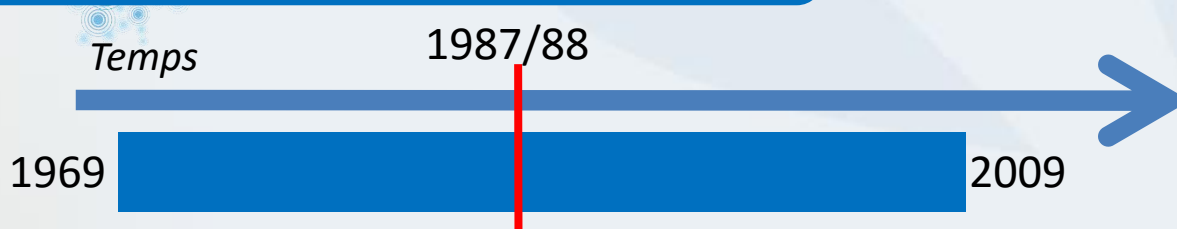
ne pas sur-interpréter le moindre frémissement ...

Analyse des débits observés face à la rupture climatique

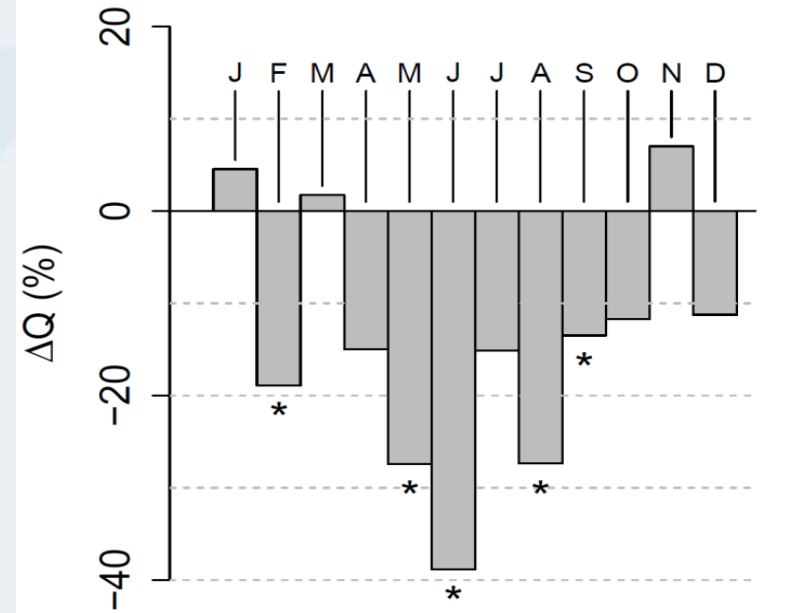
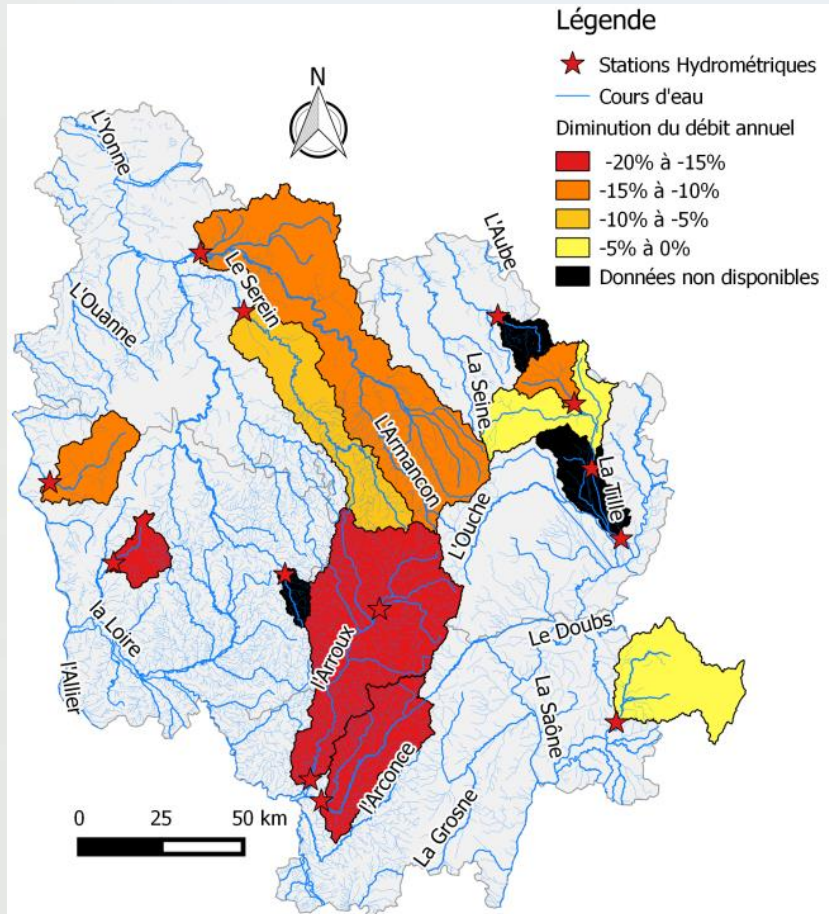


Evolution des débits observés entre 2 périodes : 1969-1987 et 1988-2009

Analyse des débits observés face à la rupture climatique

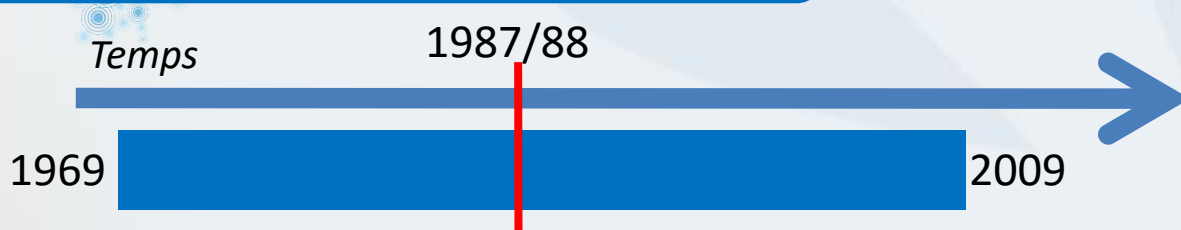


Evolution des débits observés entre 2 périodes : 1969-1987 et 1988-2009

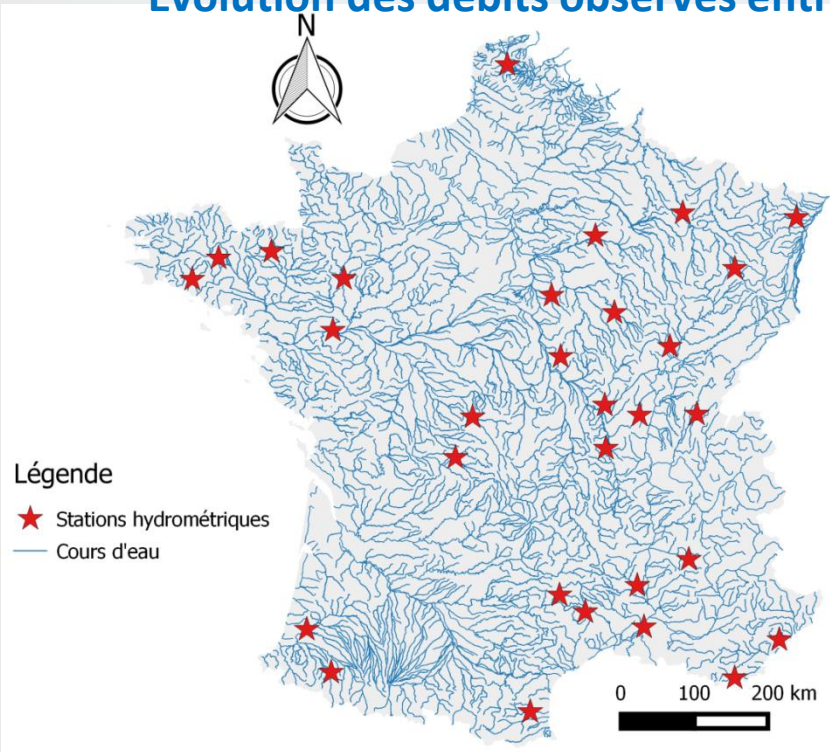


- ✓ Diminution des débits moyens (-11%)
- ✓ Mai à Août plus impactés

Analyse des débits observés face à la rupture climatique

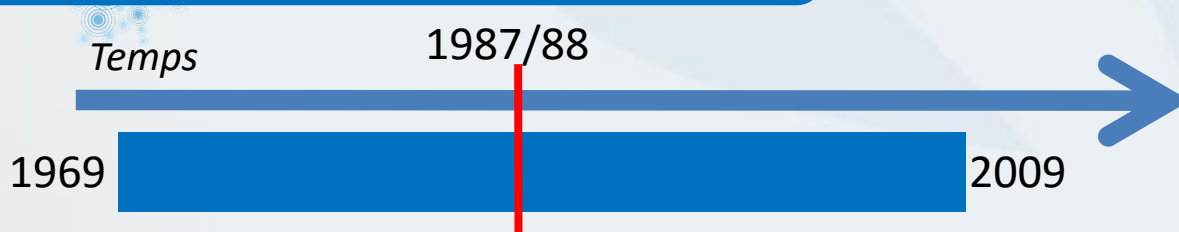


Evolution des débits observés entre 2 périodes : 1969-1987 et 1988-2009

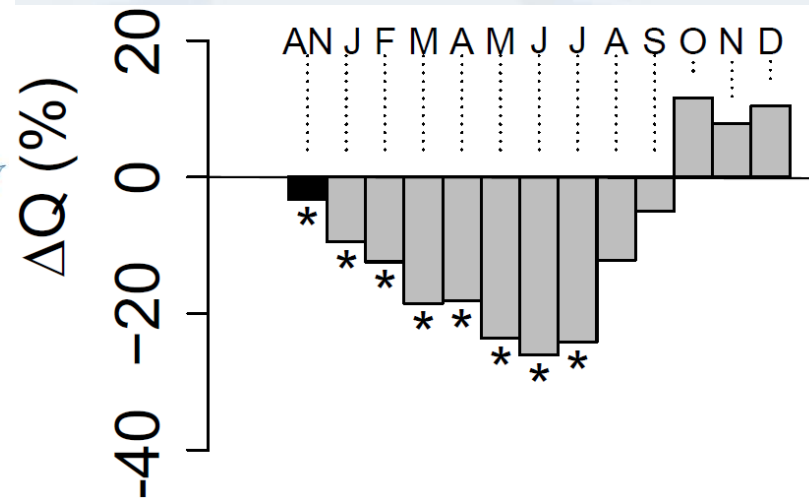
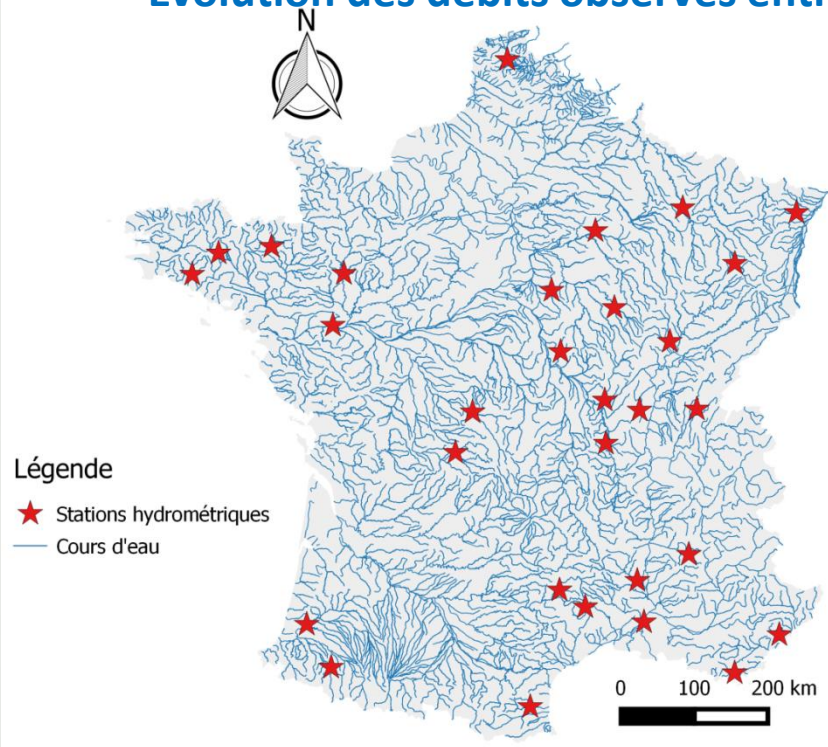


- ✓ 30 stations hydrométriques en France
- ✓ Données disponibles sur 1969-2009

Analyse des débits observés face à la rupture climatique



Evolution des débits observés entre 2 périodes : 1969-1987 et 1988-2009



- ✓ 30 stations hydrométriques en France
- ✓ Données disponibles sur 1969-2009

- ✓ Diminution des débits moyens (-5%)
- ✓ Mai à Juillet plus impactés

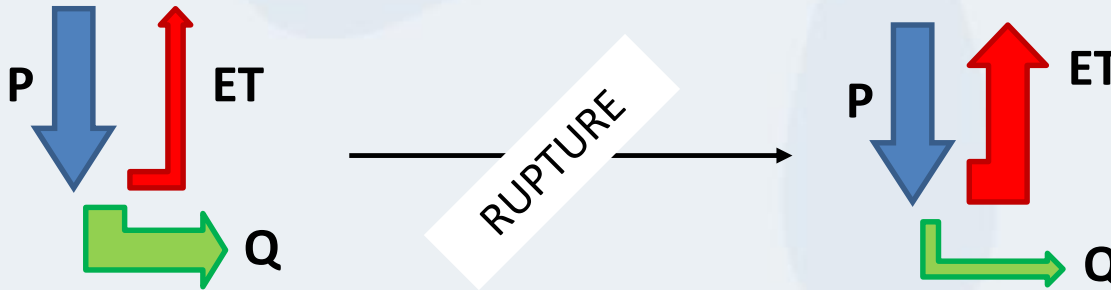


Analyse des débits observés face à la rupture climatique

Ce qu'il faut retenir :

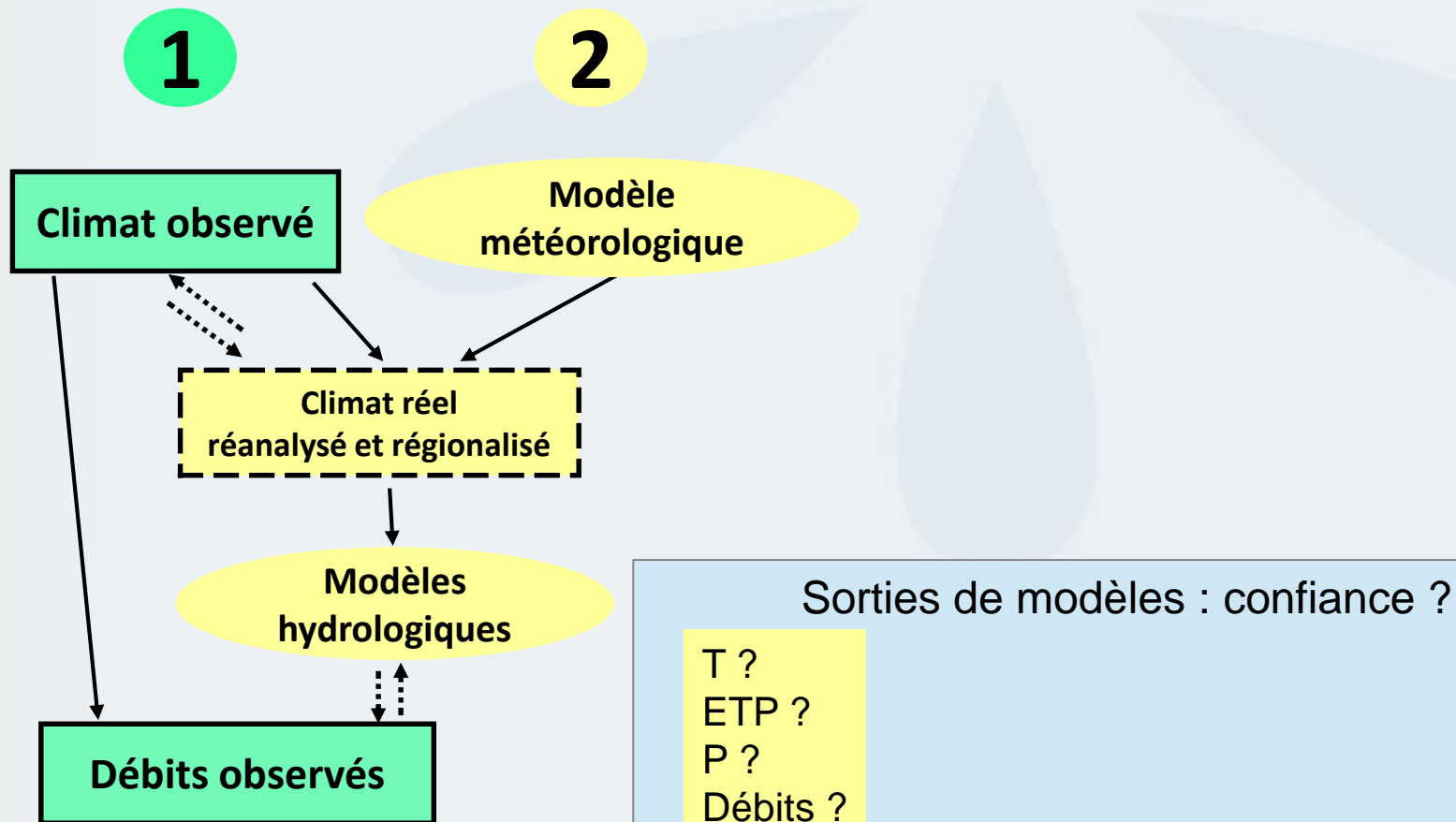
- Impacts d'une rupture climatique observée visible dans les débits des cours d'eau (échelle régionale et nationale)

$$\text{Débit (Q)} \approx \text{Précipitations (P)} - \text{Évapotranspiration (ET)} \\ + (\text{variation de stocks et transferts entre bassins versants})$$



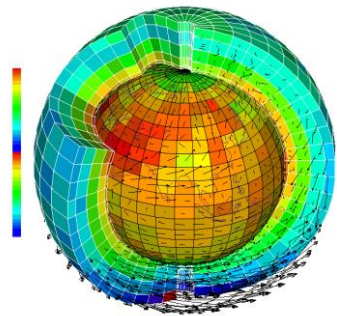
Il est probable que la réponse hydrologique future face à une évolution équivalente des températures soit de la même amplitude (voire accentuée).

2. Développement d'une chaîne de modélisation hydro-climatique et application sur 1980-2011

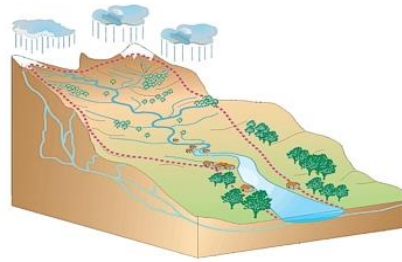


2.1 Choix méthodologiques

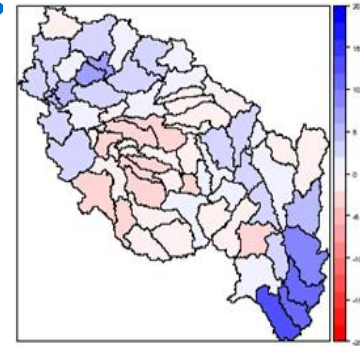
Chaîne de modélisation hydro-climatique



Modélisation climatique



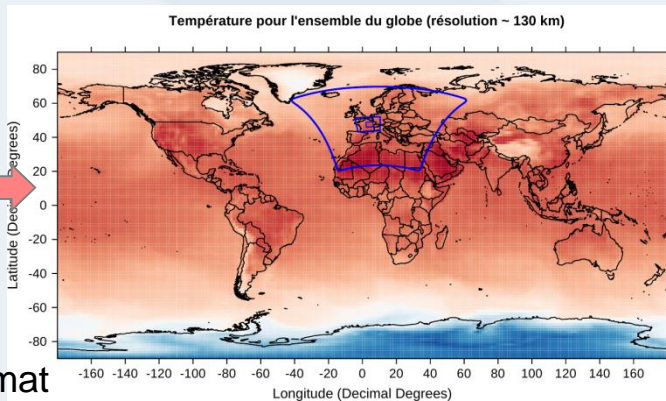
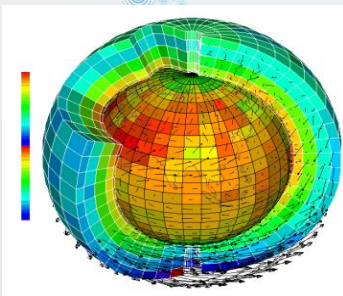
Modèles d'impact



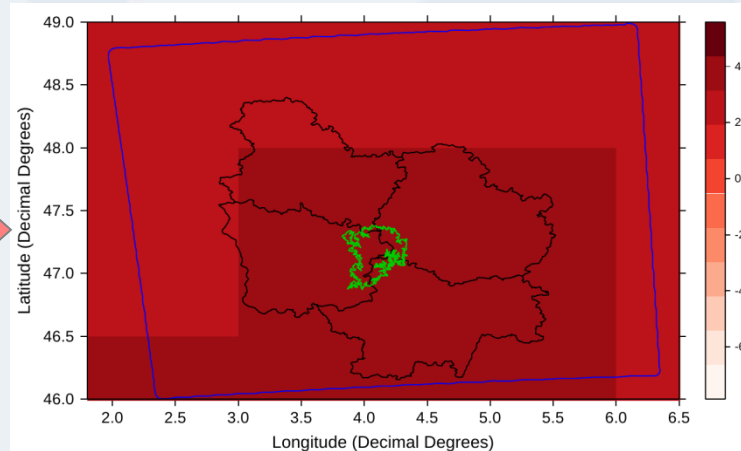
Vulnérabilité de la ressource en eau

Méthode de régionalisation climatique

HYCCARE



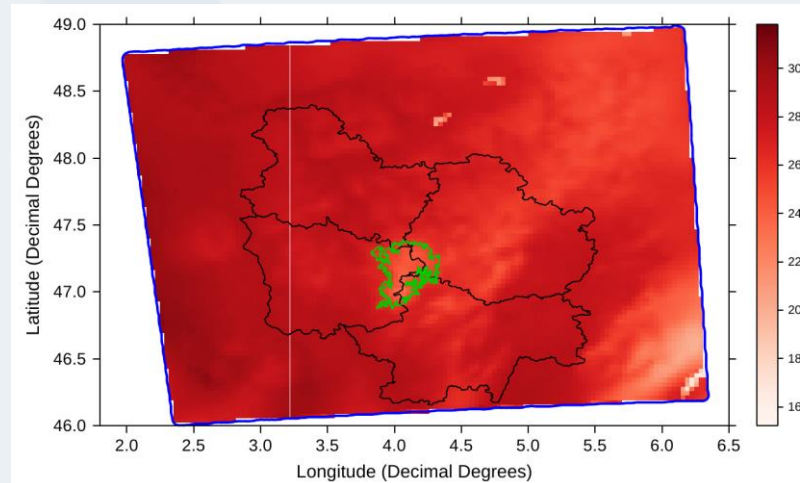
Spécificités du territoire mal reproduites



désagrégation
statistique



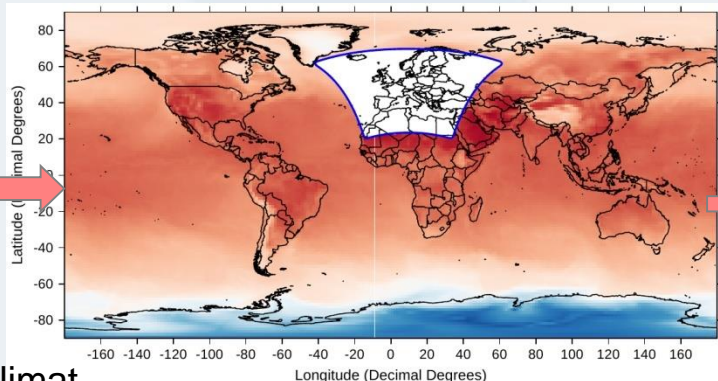
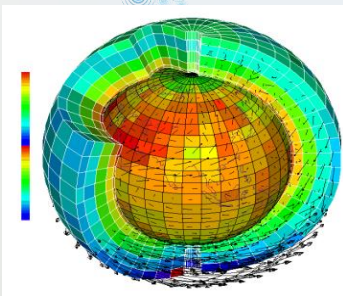
Spécificités du territoire plus réalistes



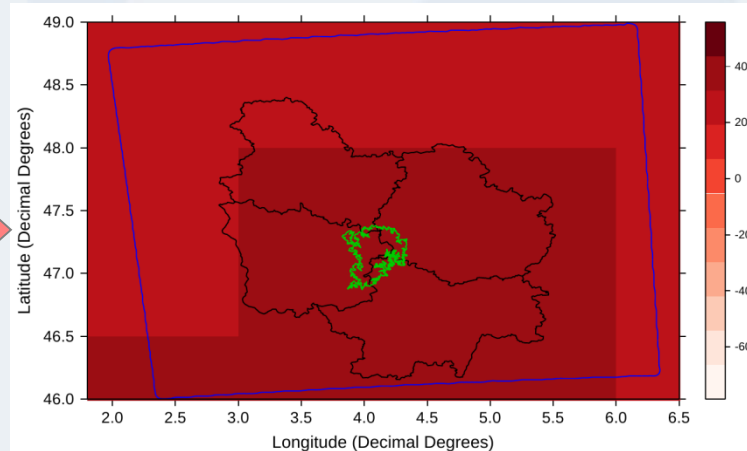
Modèles Globaux de Climat
Pour climat réalisé : ré-analyses
Pour climat futur : simulations GIEC

Méthode de régionalisation climatique

HYCCARE



Spécificités du territoire mal reproduites



Modèles Globaux de Climat
 Pour climat réalisé : ré-analyses
 Pour climat futur : simulations GIEC

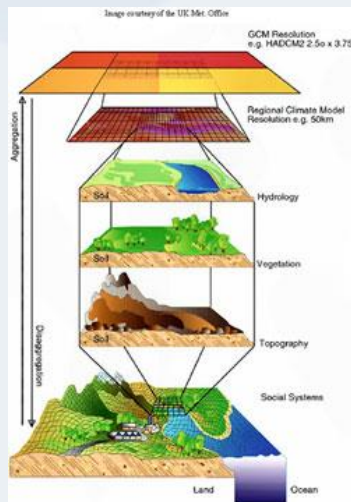
désagrégation
dynamique

désagrégation
statistique

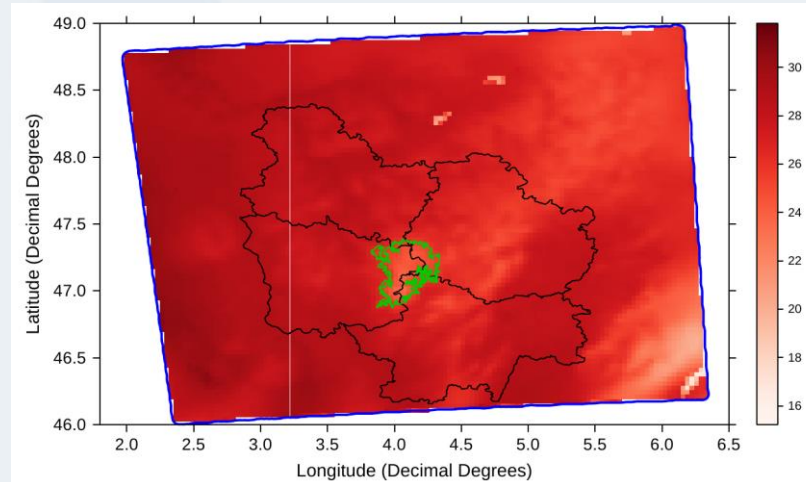


Moyens de calcul
Univ. Bourgogne

Modèles Régionaux de Climat



Spécificités du territoire plus réalistes

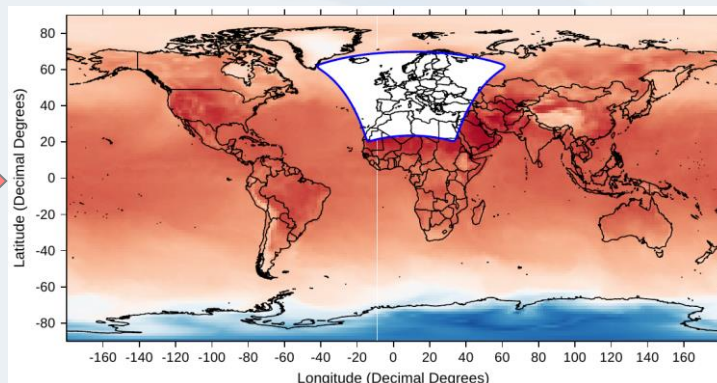
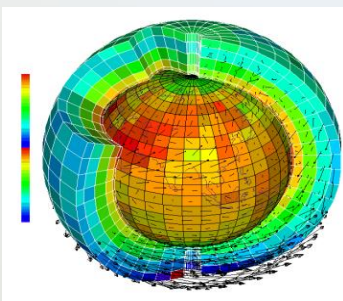


pour HYCCARE : choix de la désagrégation dynamique et en continu

Méthode de régionalisation climatique

HYCCARE

Validation sur le passé récent (1980-2011)

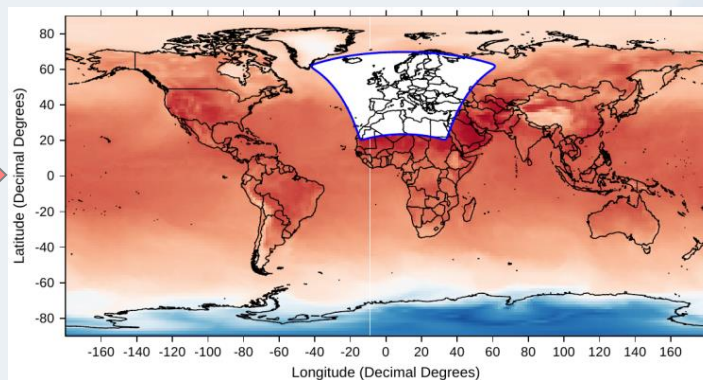
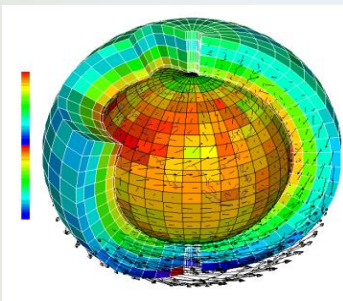


Le climat tel :
- qu'il s'est effectivement déroulé

Exemple : le 25 décembre 1980 est bien le 25 décembre 1980

MCG + observations = réanalyses (ERA Interim)

Une période de contrôle (1980-2005) et le siècle à venir (2006-2098)

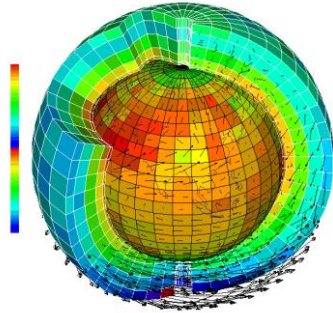


Le climat tel :
- qu'il aurait pu se dérouler (1980-2005)
- qu'il pourrait se dérouler (2006-2098)

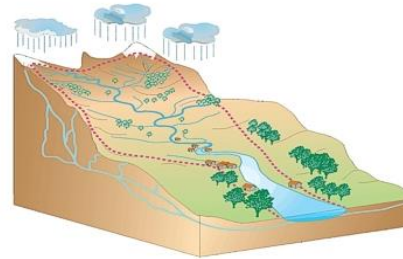
Exemple : le 25 décembre 1980 ou 2030 aurait pu ou pourrait se passer ainsi

Modèles Globaux de Climat
Pour climat virtuel : MCG (ARPEGE Climat)

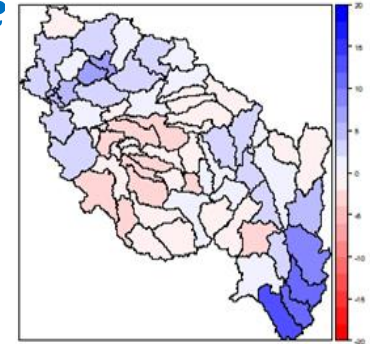
Chaîne de modélisation hydro-climatique



Modélisation climatique



Modèles d'impact



Vulnérabilité de la ressource en eau

Plusieurs types de vulnérabilité



Disponibilité globale de la ressource

- Débit à l'exutoire des bassins versants
- Indicateurs d'étiages



Disponibilité au sein des bassins versants

Carte d'indicateurs



Choix des modèles hydrologiques



Débit journalier

+ indicateurs d'étiage

GR4J et GARDENIA

Modèles simples (peu de paramètres)

Implémentation facile

Robuste

Sortie : débit à l'exutoire du bassin versant

Vulnérabilité des territoires

SWAT

Modèle plus complexe (grand nombre de paramètres)

Beaucoup de données nécessaires à son fonctionnement

Robuste

Sorties : grand nombre de paramètres à l'échelle des sous-bassins



Calibration/validation des modèles hydrologiques

Calibration

Modifier les paramètres du modèle pour optimiser la reproduction des débits observés.

Validation

Appliquer le modèle calibré sur une période différente de celle ayant servi à la calibration.

Période d'observation

10 ans 10 ans 10 ans





Calibration/validation des modèles hydrologiques

Calibration

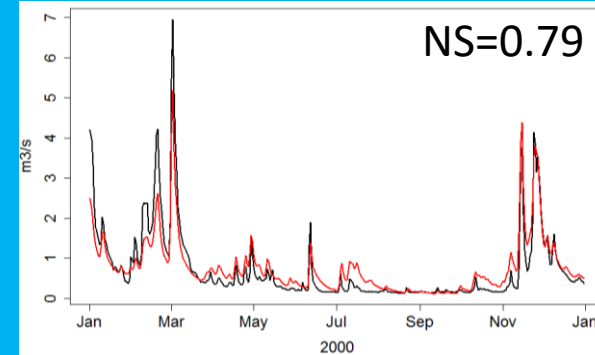
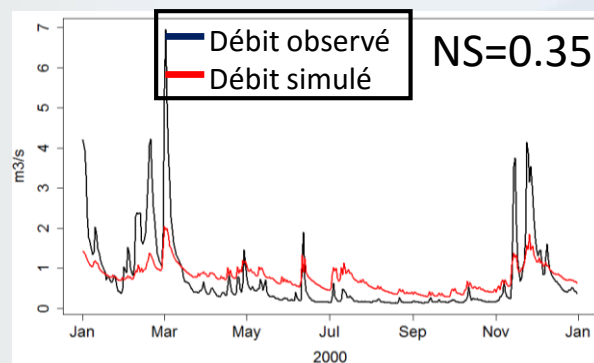
Modifier les paramètres du modèle pour optimiser la reproduction des débits observés.

Validation

Appliquer le modèle calibré sur une période différente de celle ayant servi à la calibration).

Période d'observation

10 ans 10 ans 10 ans



Calibration/validation des modèles hydrologiques

Calibration

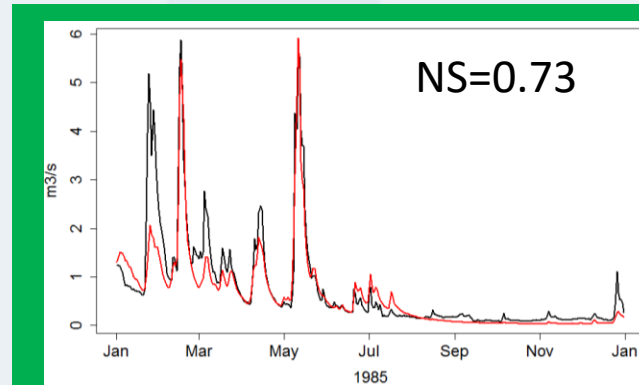
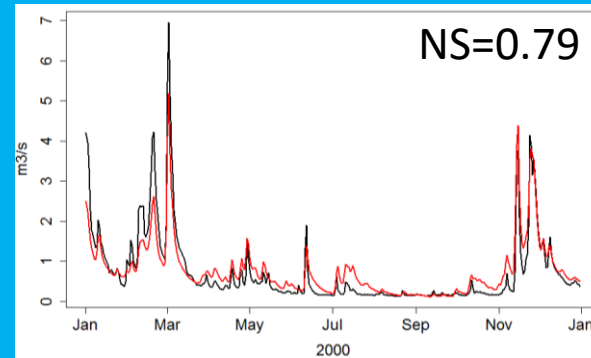
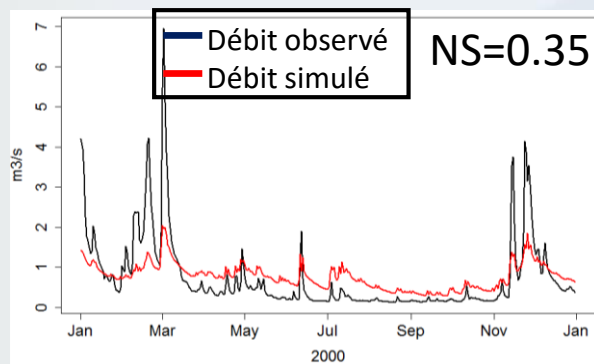
Modifier les paramètres du modèle pour optimiser la reproduction des débits observés.

Validation

Appliquer le modèle calibré sur une période différente de celle ayant servi à la calibration).

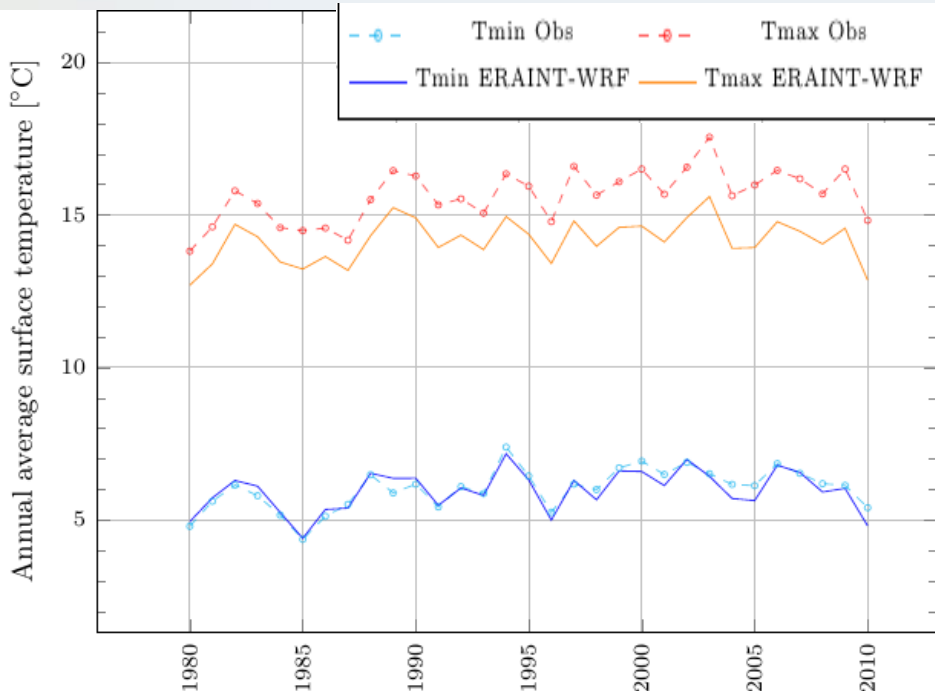
Période d'observation

10 ans 10 ans 10 ans

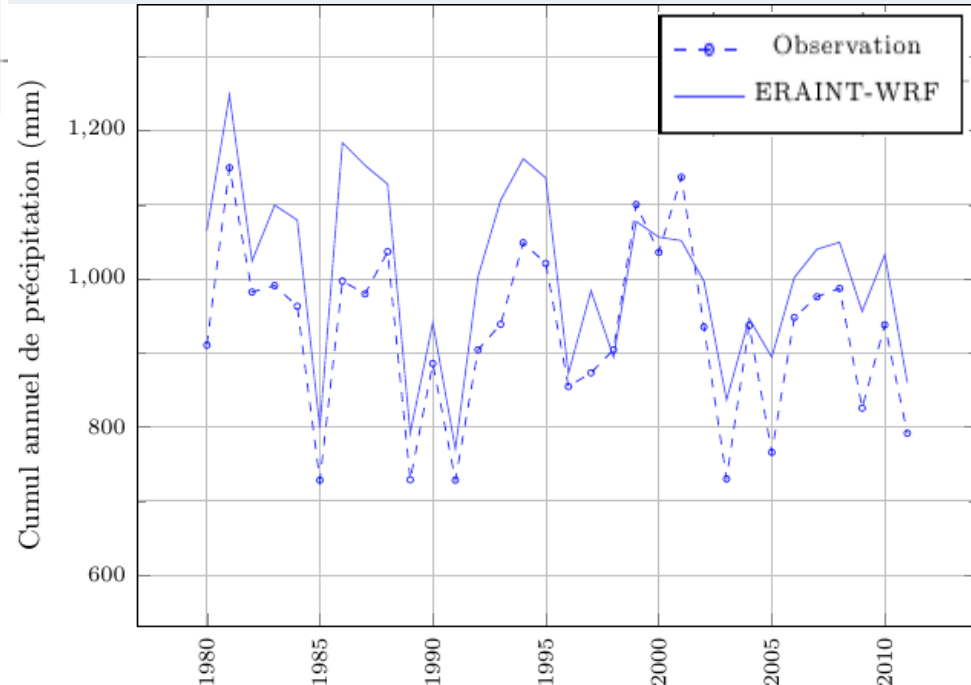


2.2 Validation et application sur la période 1980-2011

Températures



Précipitations

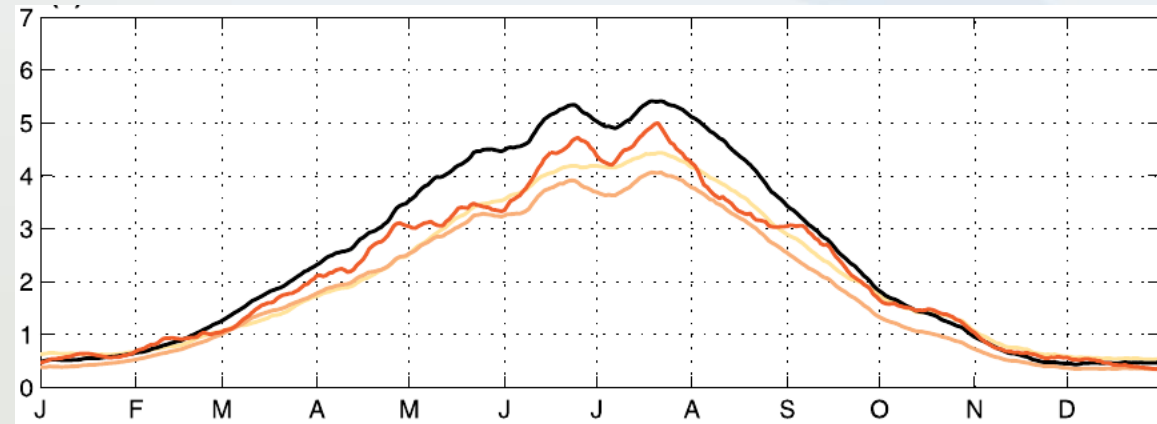


Variabilité inter-annuelle bien reproduite avec :

- biais froids sur Tmax ;
- biais humides sur les pluies ;

Les températures saisonnières bien reproduites, biais marqué sur Tmax en été;

ETP simulée (1980-2011)

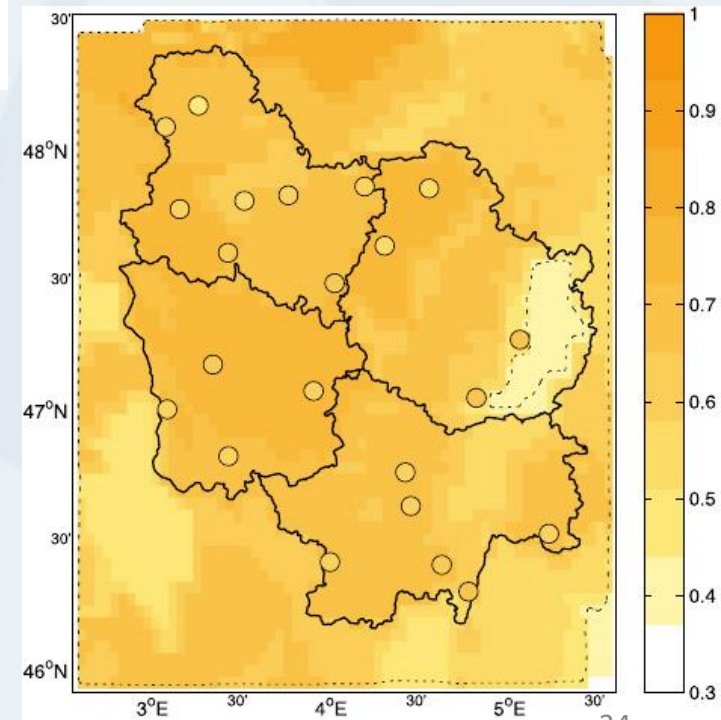


- ERA-Interim
- SAFRAN
- ERA/WRF
- Observations

Cycle annuel bien reproduit et similaire aux données stationnelles observées et SAFRAN

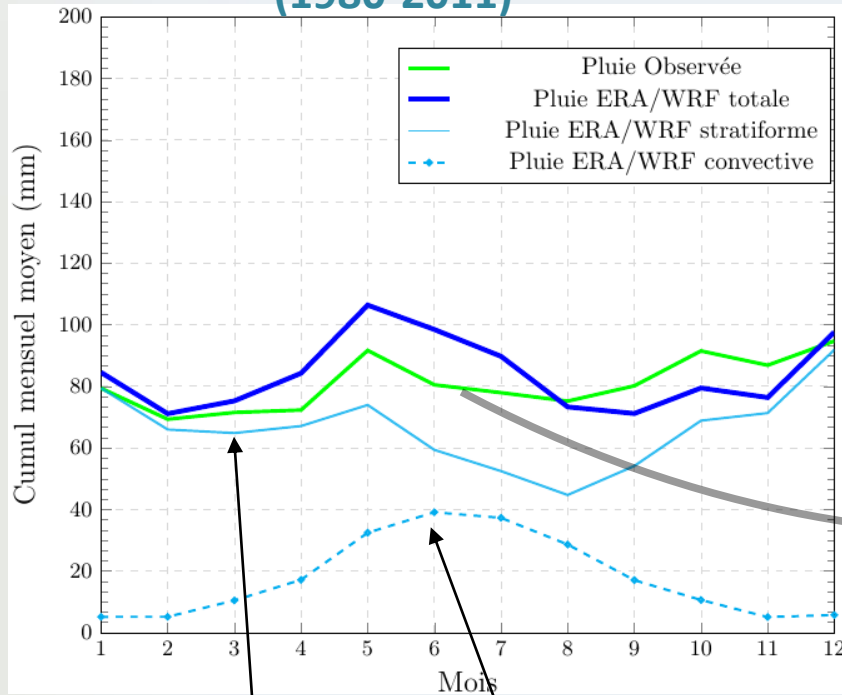
ETP issue de ERA-Interim est significativement améliorée

Forte corrélation temporelle sur la quasi-totalité de la Bourgogne (excepté plaine de Saône)



Simulations hydro-climatiques

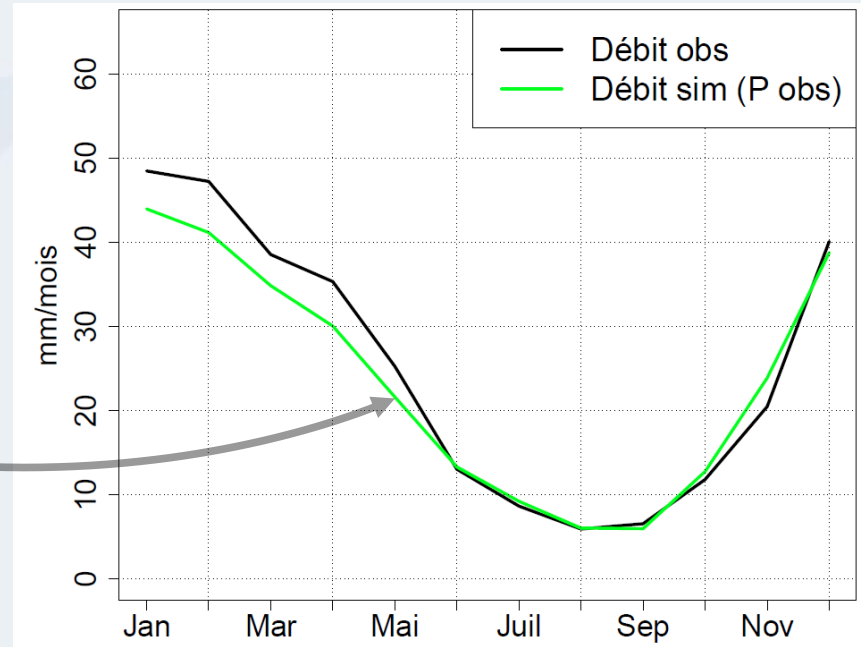
Cycle annuel des pluies simulées (1980-2011)



Pluie convective (intense et localisée e.g. orage)

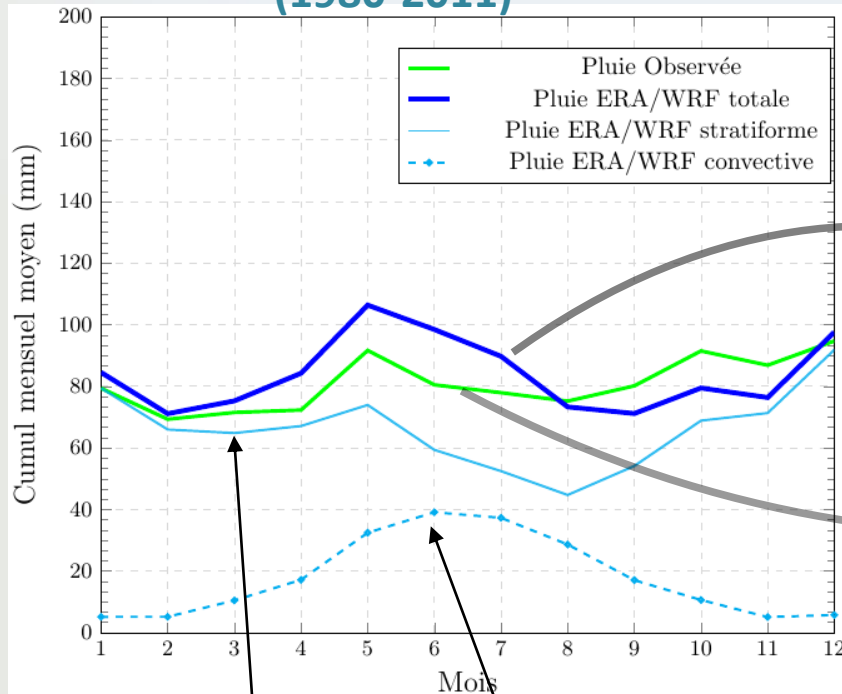
Pluie stratiforme (faible intensité, étendue)

Débits observés vs. débits calculés avec : ETP simulée et pluies observées



Forte saisonnalité des biais humides → pluie convective sur-estimée (Alapaty et al. 2012, Marteau et al. 2014)

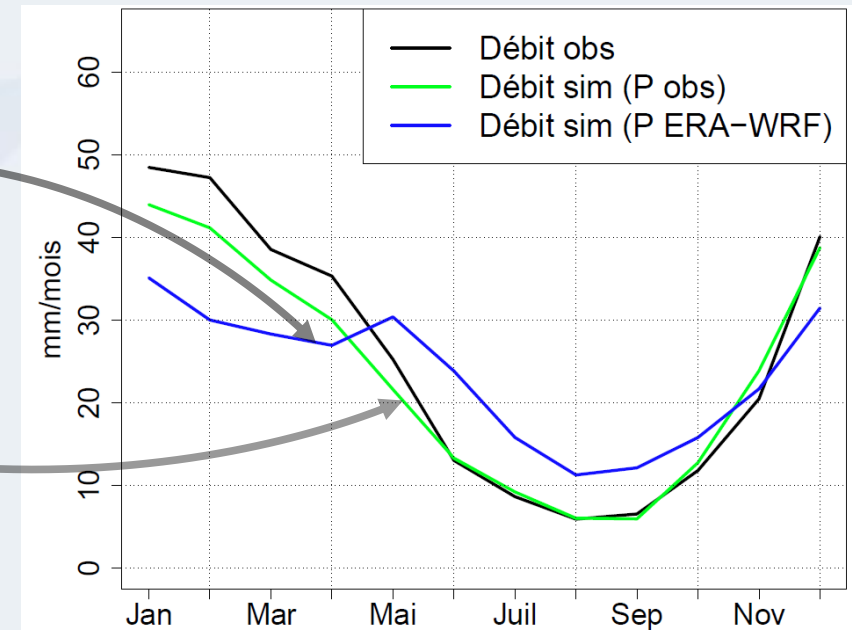
Cycle annuel des pluies simulées (1980-2011)



Pluie convective (intense et localisée e.g. orage)

Pluie stratiforme (faible intensité, étendue)

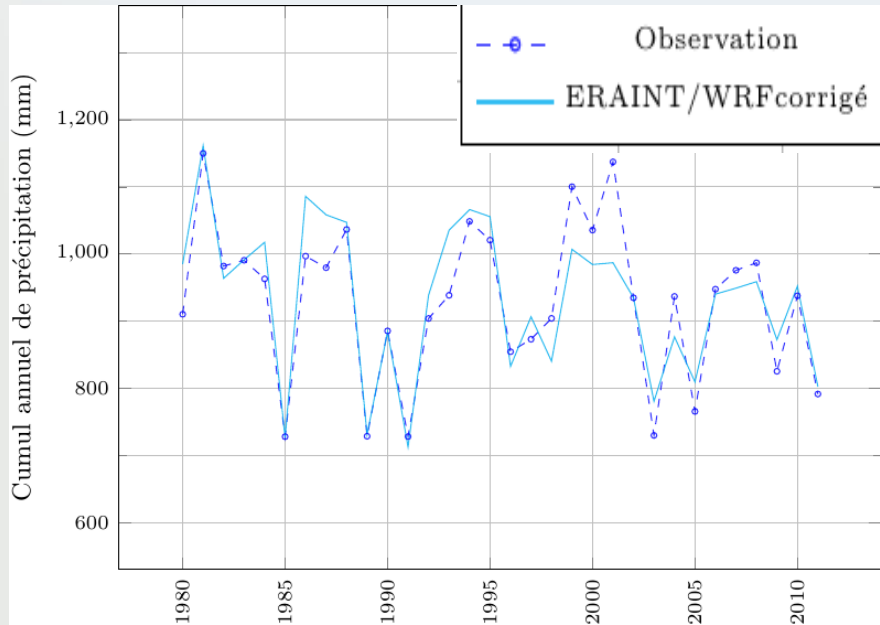
Débits observés vs. débits calculés avec : ETP simulée et pluies observées ou simulées



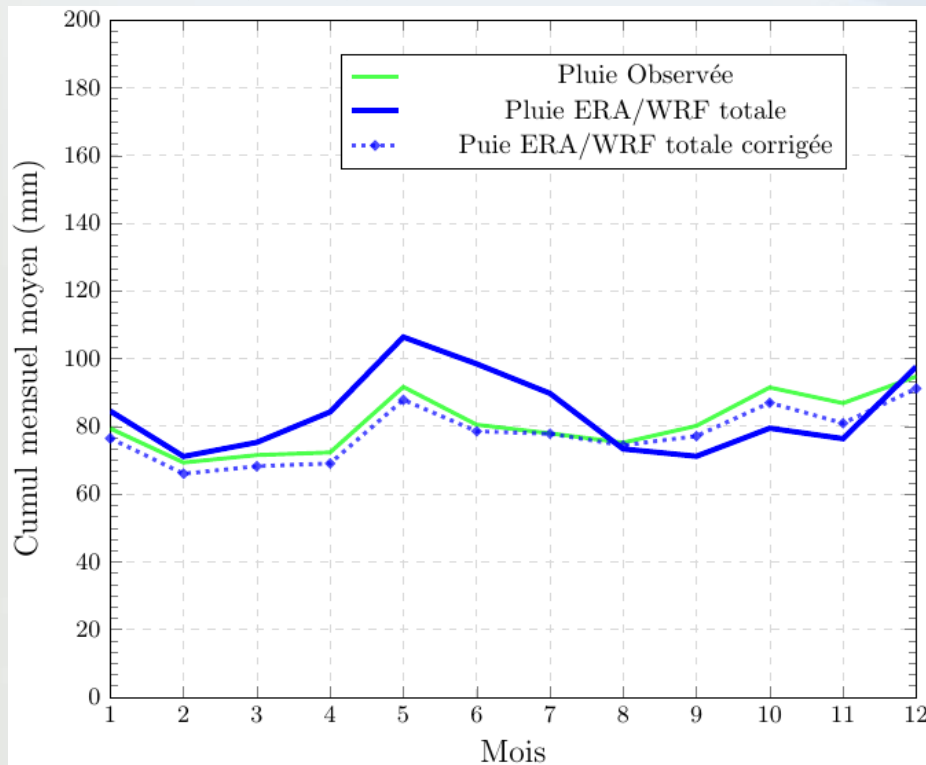
Forte saisonnalité des biais → pluie convective sur-estimée (Alapaty et al. 2012, Marteau et al. 2014)

Avec les précipitations du modèle, le régime hydrologique est mal reproduit.

Variabilité interannuelle des précipitations



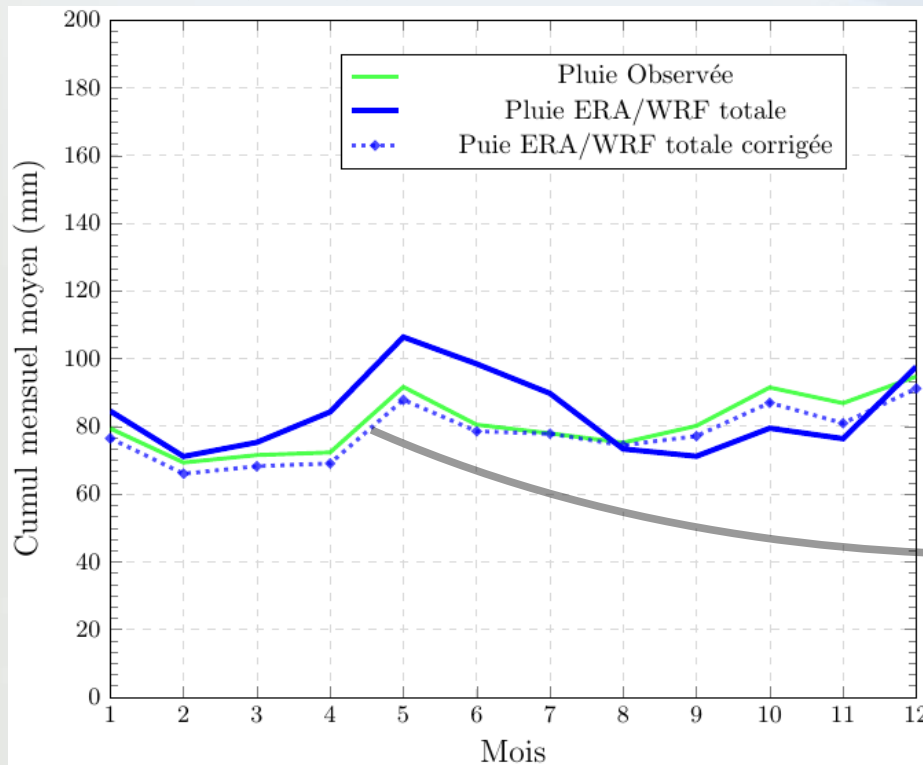
Nécessité de post-corriger les pluies (quantile-mapping) pour améliorer la simulation des débits



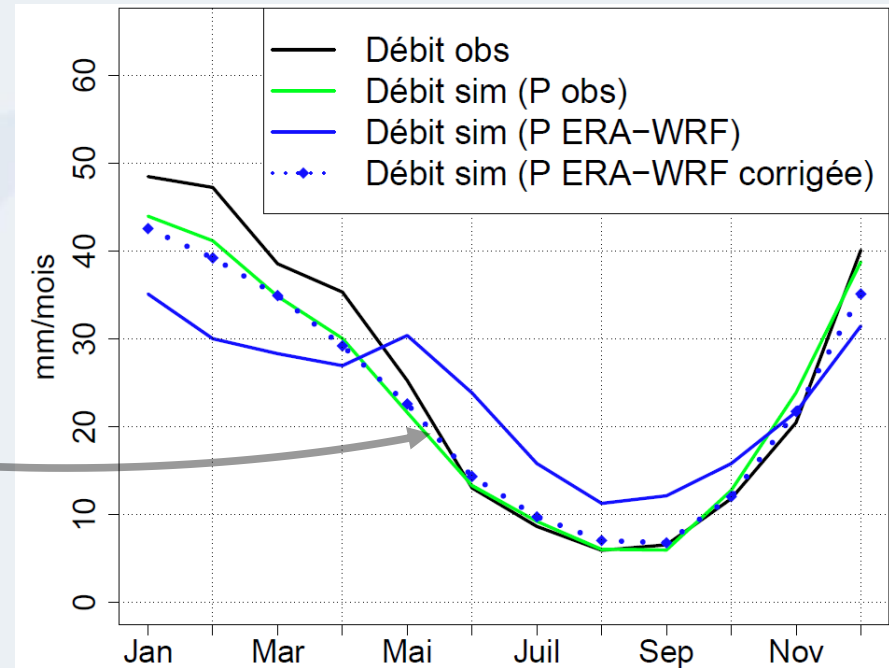
Nécessité de post-corriger les pluies (quantile-mapping) pour améliorer la simulation des débits

Correction statistique des pluies valide pour le futur ?

Post-correction des précipitations



Débits observés vs. débits calculés avec : ETP simulée et précipitations observées ou simulées



Nécessité de post-corriger les pluies pour améliorer la simulation des débits

Biais interne du modèle climatique régional WRF du à la paramétrisation des cumulus

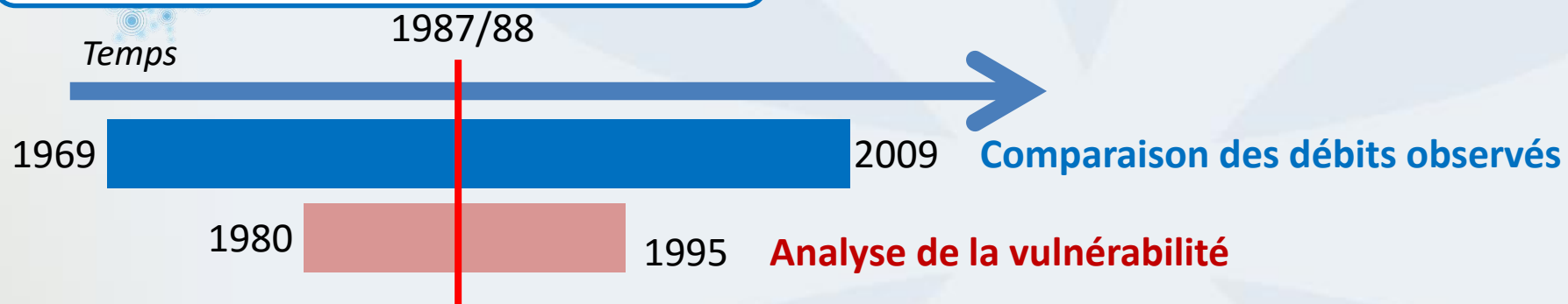
Correction statistique des pluies valide pour le futur ?

Simulation correcte du régime des précipitations → élément clef

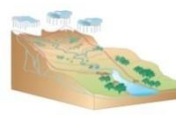
- ✓ Mise en place et validation de la chaîne de modélisation hydro-climatique
- ✓ Après post-correction des précipitations, tous les modèles hydrologiques reproduisent correctement les débits sur la période d'observation
- ✓ Sélection de plusieurs indicateurs d'étiages, correctement reproduits par les modèles hydrologiques.



**Application sur 1980-2011 :
Vulnérabilité des territoires**



Application sur 1980-2011 : Vulnérabilité des territoires



Temps

1987/88

1969

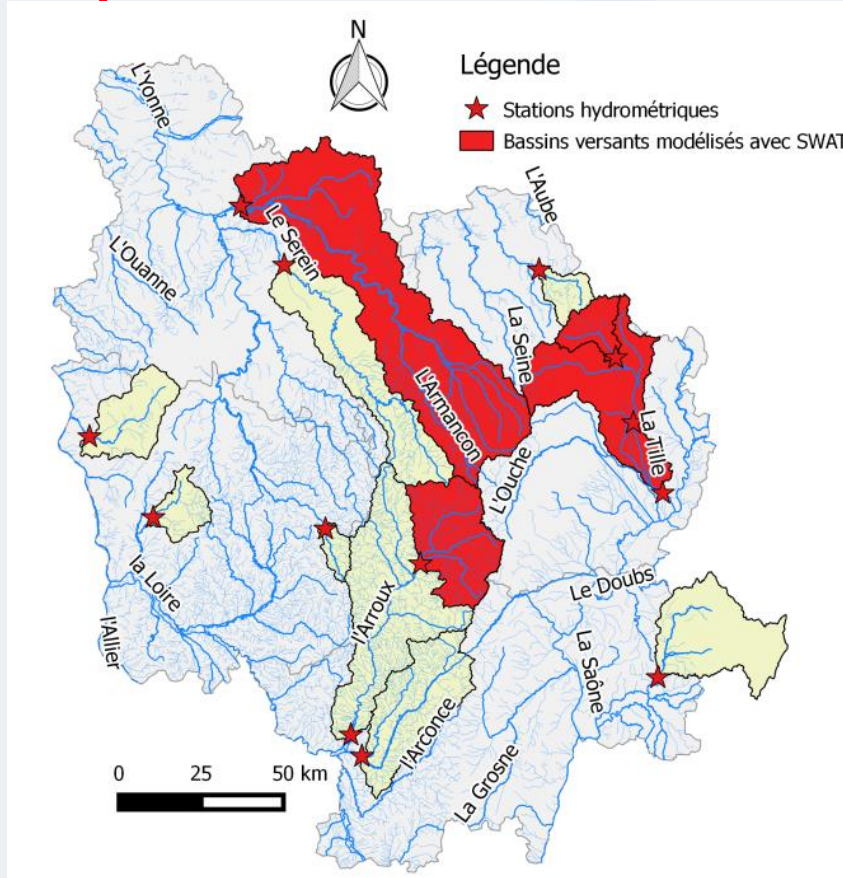
2009

Comparaison des débits observés

1980

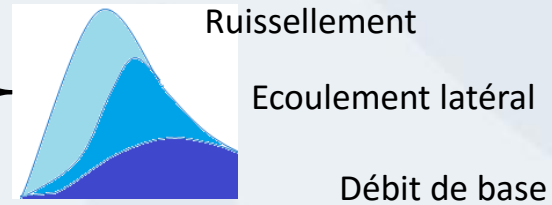
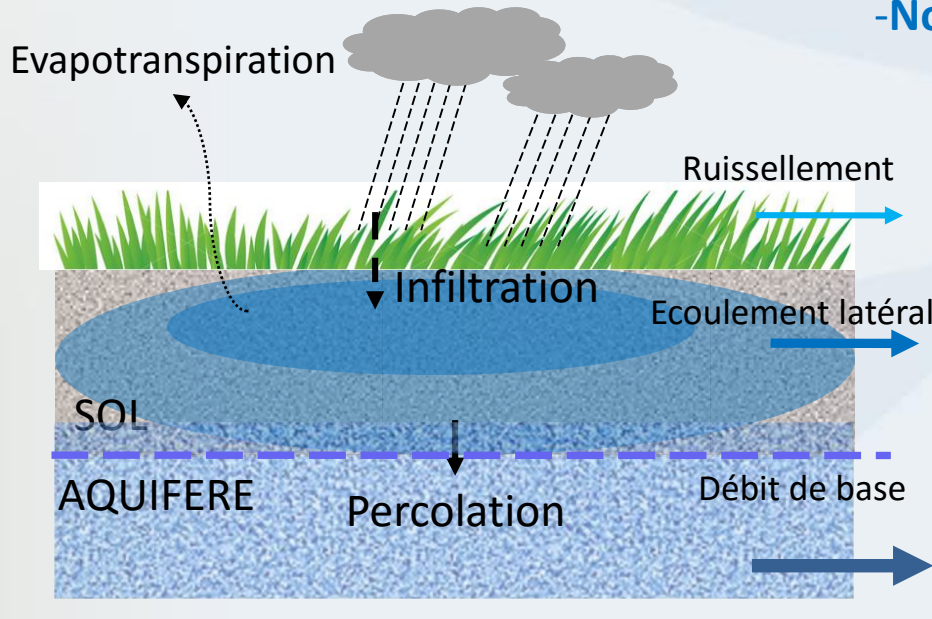
1995

Analyse de la vulnérabilité

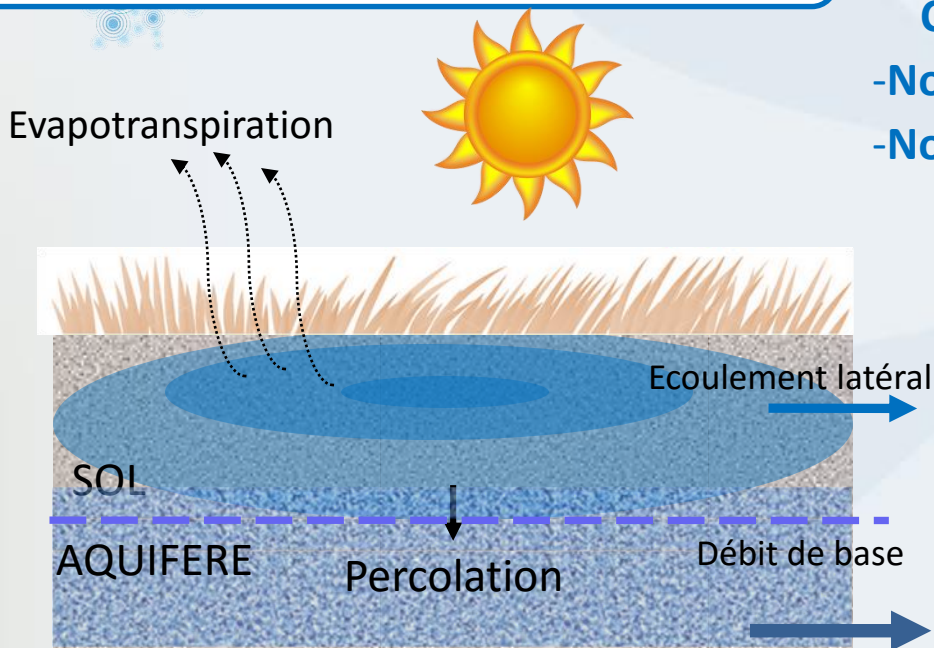


**Application sur 1980-2011 :
Vulnérabilité des territoires**

**Calcul de 2 indicateurs
-Nombre de jours de percolation par an**



Application sur 1980-2011 : Vulnérabilité des territoires



Calcul de 2 indicateurs

- Nombre de jours par an de percolation
- Nombre de jours par an de stress hydrique

	Percolation (jours/an)		Stress hydrique (jours/an)	
	1980-87	1988-95	1980-87	1988-95
Arroux	110	105	45	60
Armançon	111	105	34	42
Tille	114	104	80	96

Ruissellement vs infiltration

Occupation du sol, capacité d'infiltration du sol,

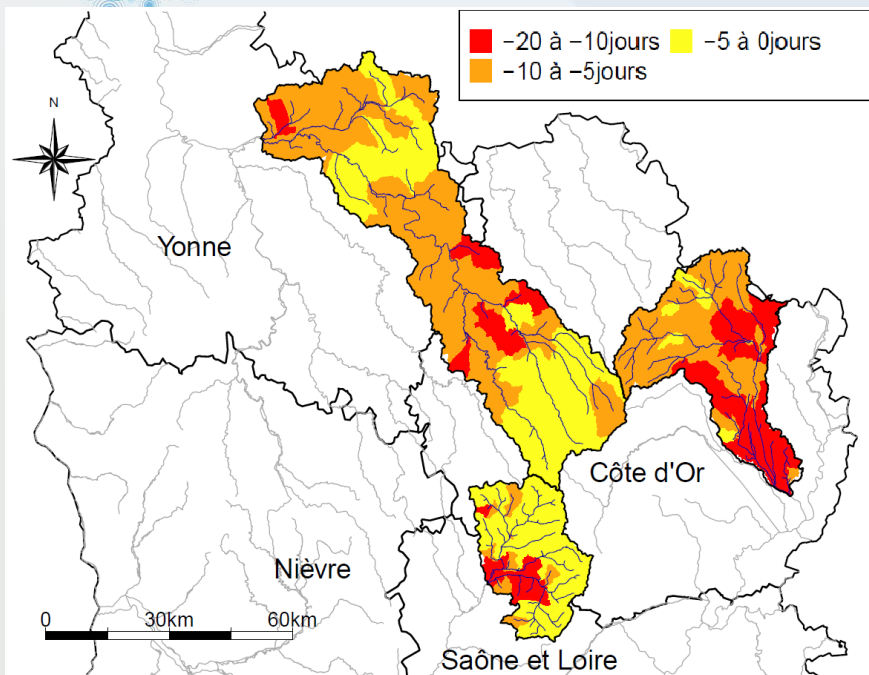
Teneur en eau du sol

Evapotranspiration (période de l'année, type de végétation), réserve utile (RU) du sol

Percolation

Etat de la teneur en eau du sol

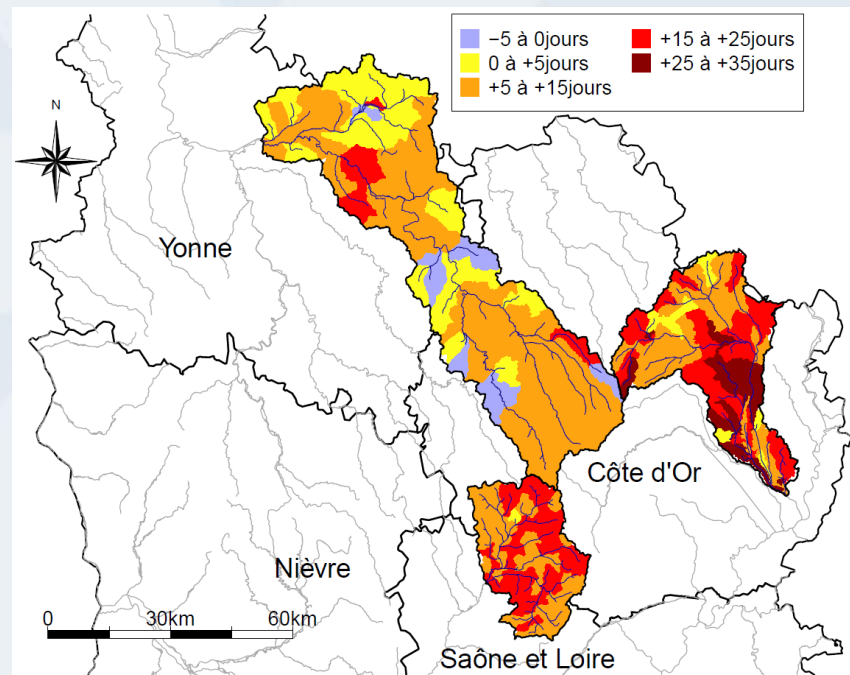
Application sur 1980-2011 : Vulnérabilité des territoires



Différences en nombre de jours par an de percolation

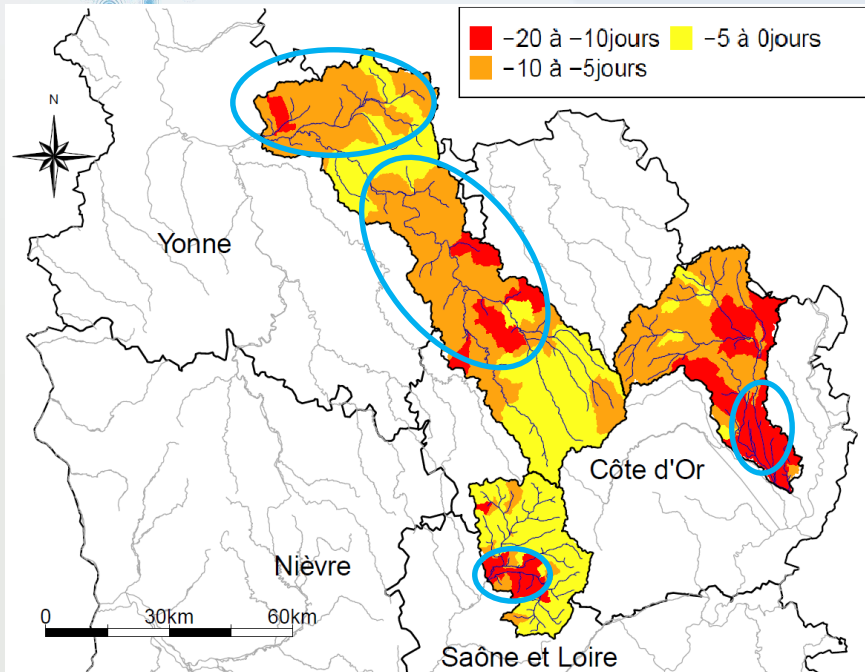
- Tendence lourde à la diminution de la ressource

Evolution des indicateurs entre 1980-1987 et 1988-1995



Différences en nombre de jours par an de stress hydrique

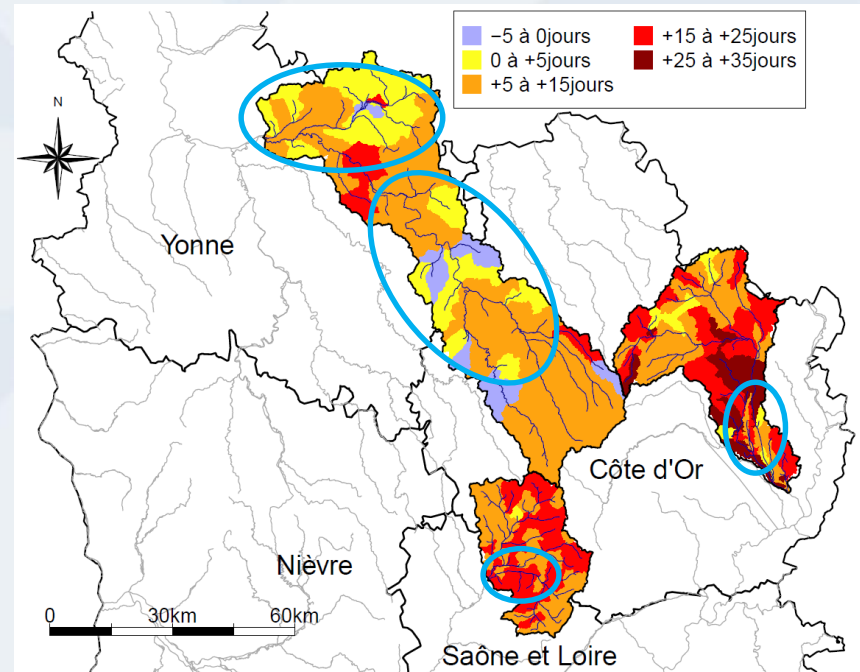
Application sur 1980-2011 : Vulnérabilité des territoires



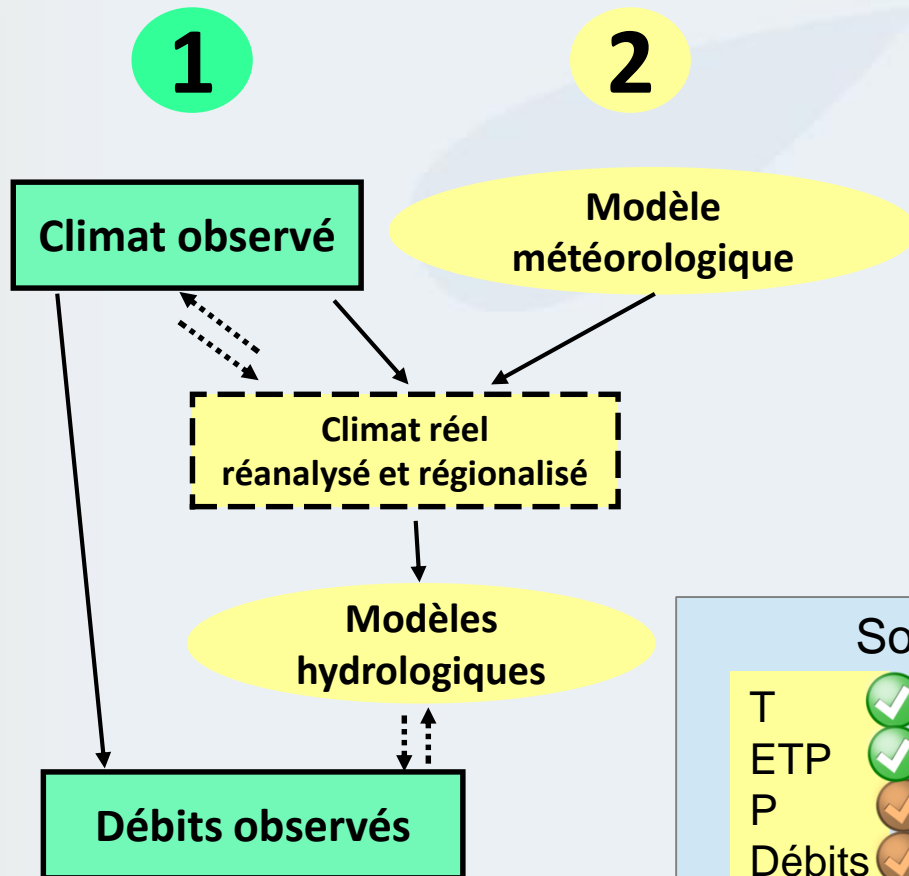
Différences en nombre de jours par an de percolation

- Tendence lourde à la diminution de la ressource
- La vulnérabilité est inégale au sein des bassins versants
- et fonction des processus considérés (ici recharge des nappes et stress hydrique des plantes).

Evolution des indicateurs entre 1980-1987 et 1988-1995



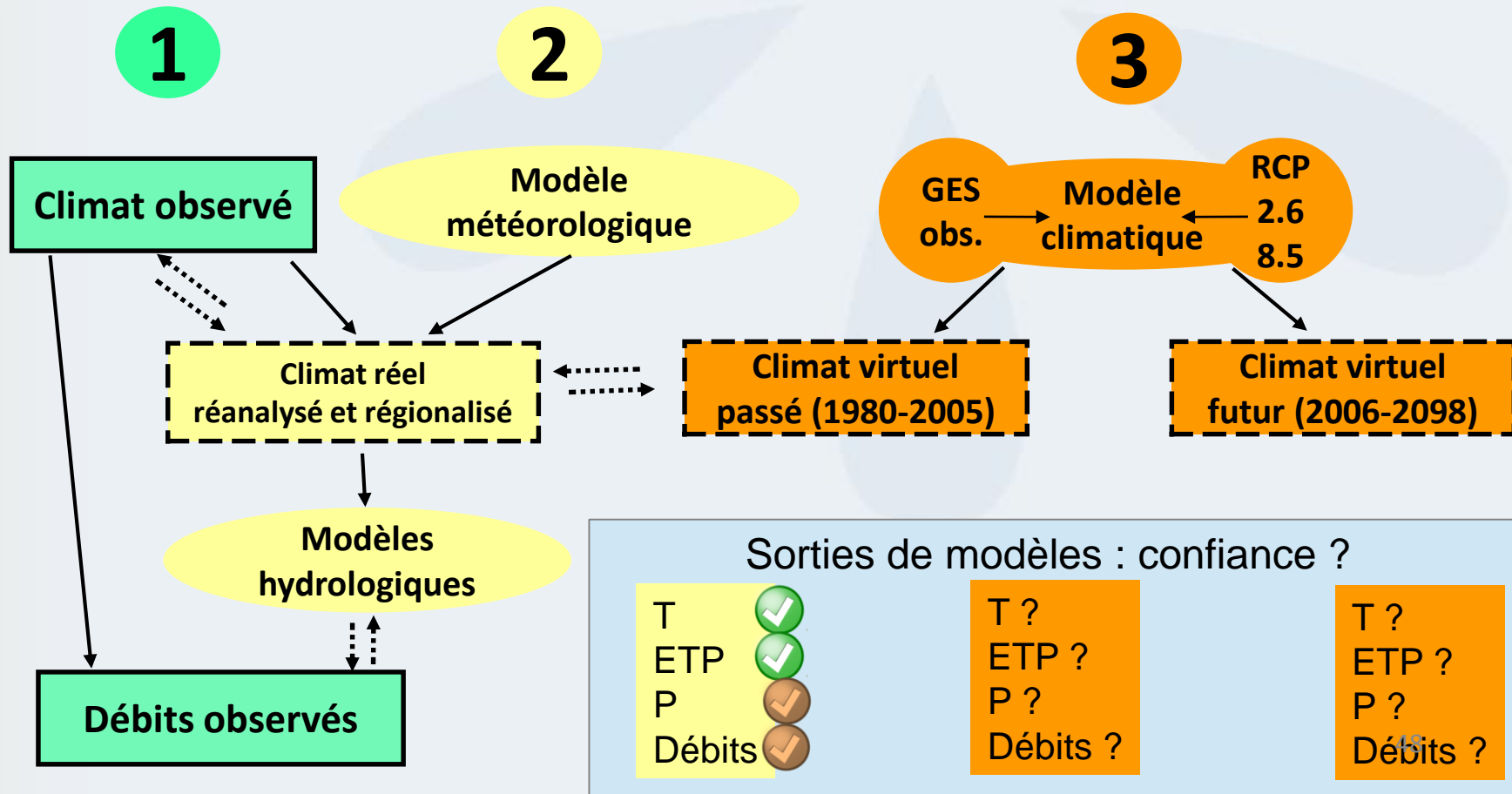
Différences en nombre de jours par an de stress hydrique



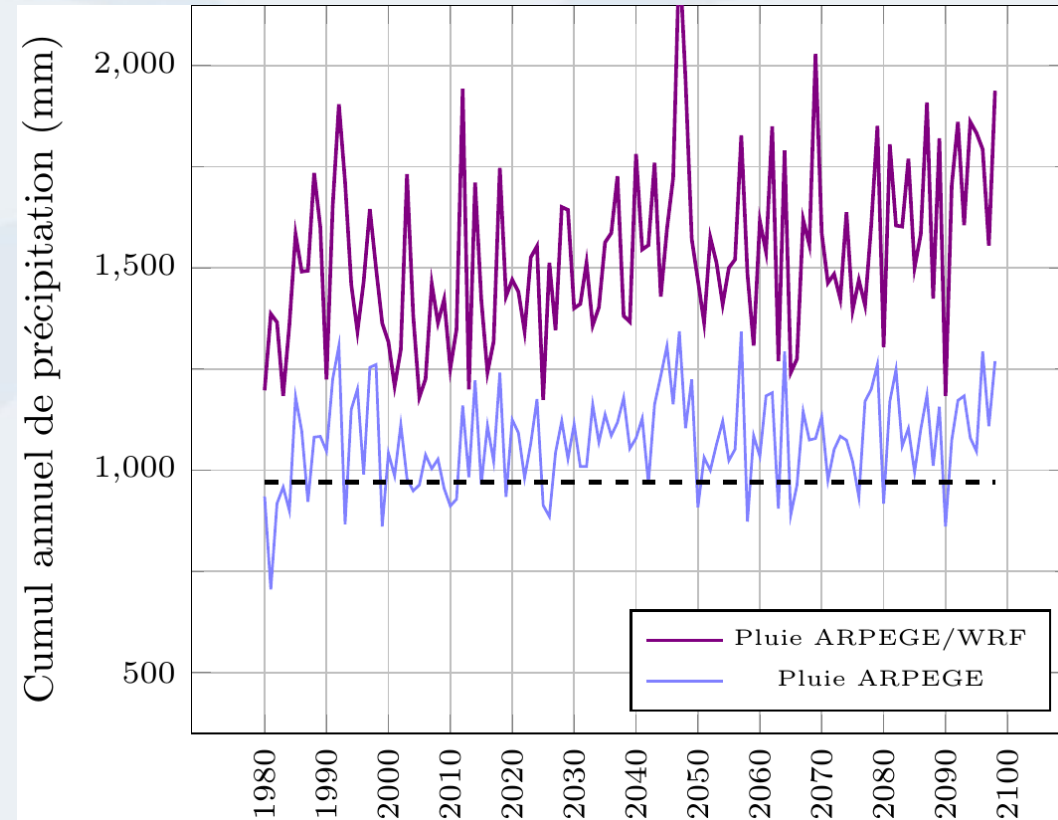
Sorties de modèles : confiance ?

T	✓
ETP	✓
P	✓
Débits	✓

3. Projection de la chaîne de modélisation hydroclimatique sur la période 1980-2098



Précipitations moyennes sur la Bourgogne (mm/an)



Plus de précipitations au 21^e siècle ?

Cette hypothèse :

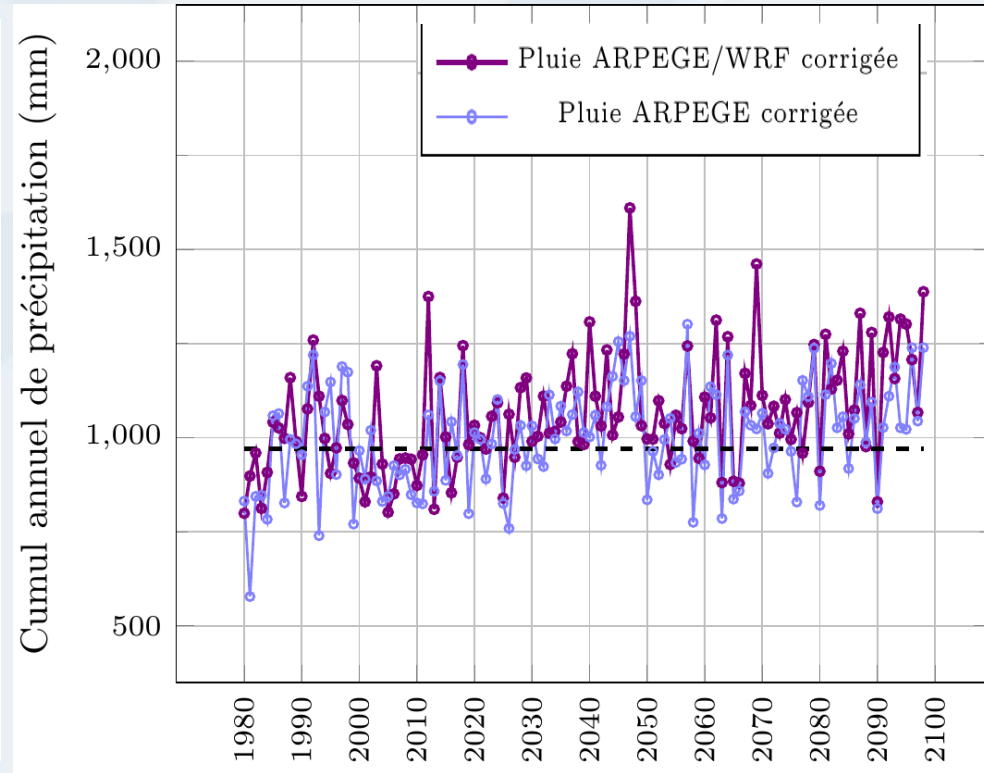
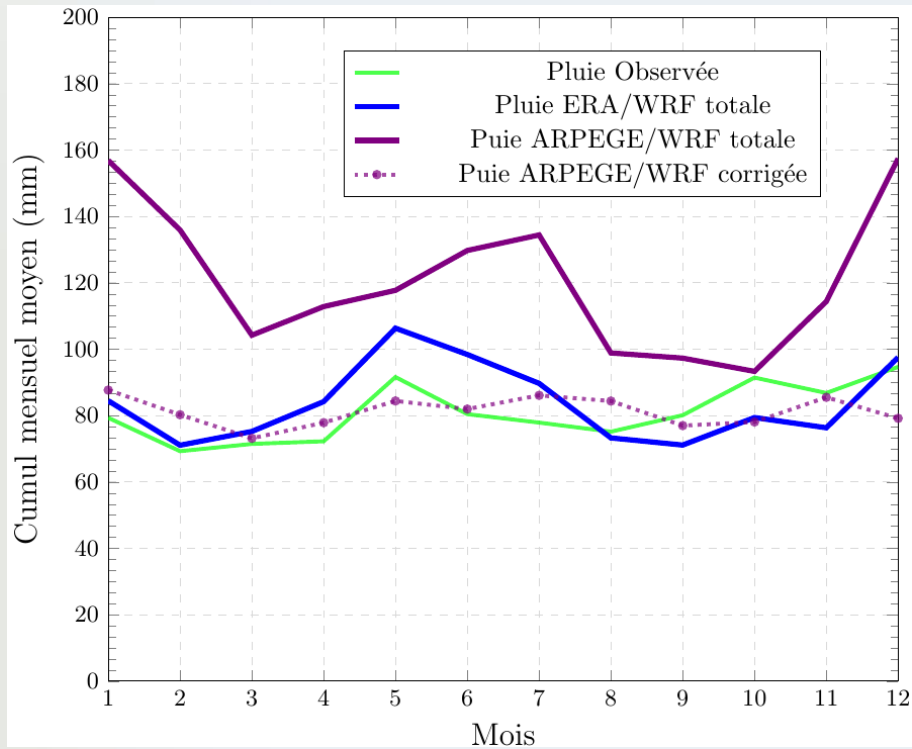
- peut être plausible ..
- mais non corroborée par l'évolution observée;
- assujettie au choix du modèle (ici ARPEGE de Météo-France) ;
- et peu fréquente sur la vingtaine de modèles du GIEC.

Simulation des précipitations non-robuste :

- données de forçage plus humides (plus d'humidité issue d'ARPEGE)
- WRF amplifie la sur-estimation (absence de rétroaction)

Que projettent les modèles ?

Régime et évolution des précipitations

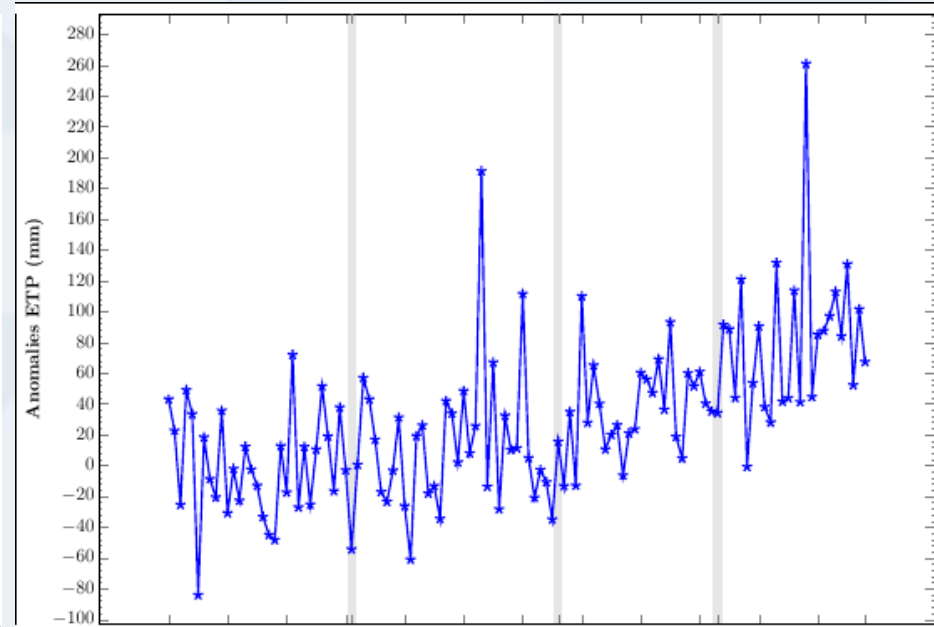
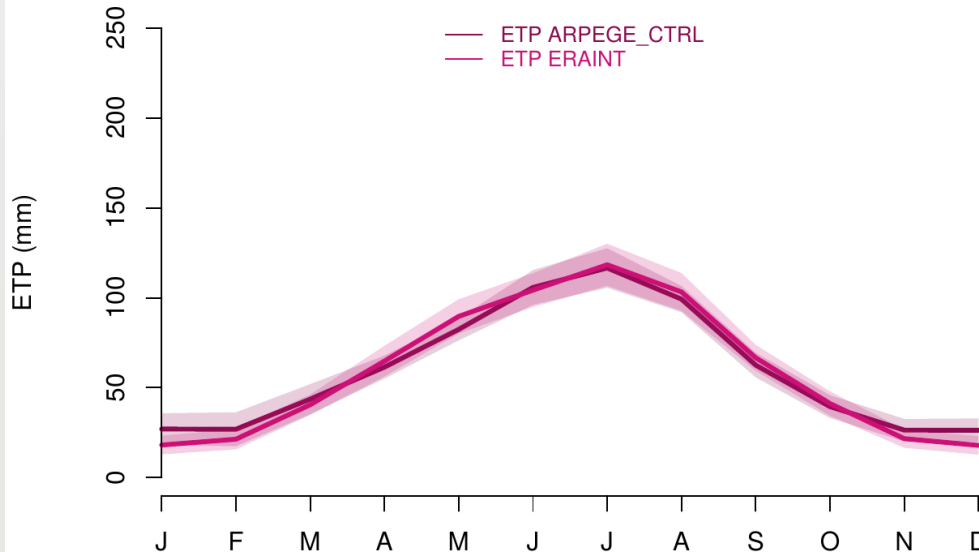


Biais exacerbé et présent sur tout le cycle ;

Malgré la correction, biais non constant : + il faut chaud + le biais pluvieux s'amplifie

Simulation des débits pas fiable avec ces données de précipitations

Régimes de l'ETP (1980–2011)



Régime de l'évapotranspiration potentielle (ETP) correctement reproduit ;

Capacité d'ARPEGE-WRF à simuler les principales variables (température, humidité relative, rayonnement, vent ... *Boulard et al. 2015*)

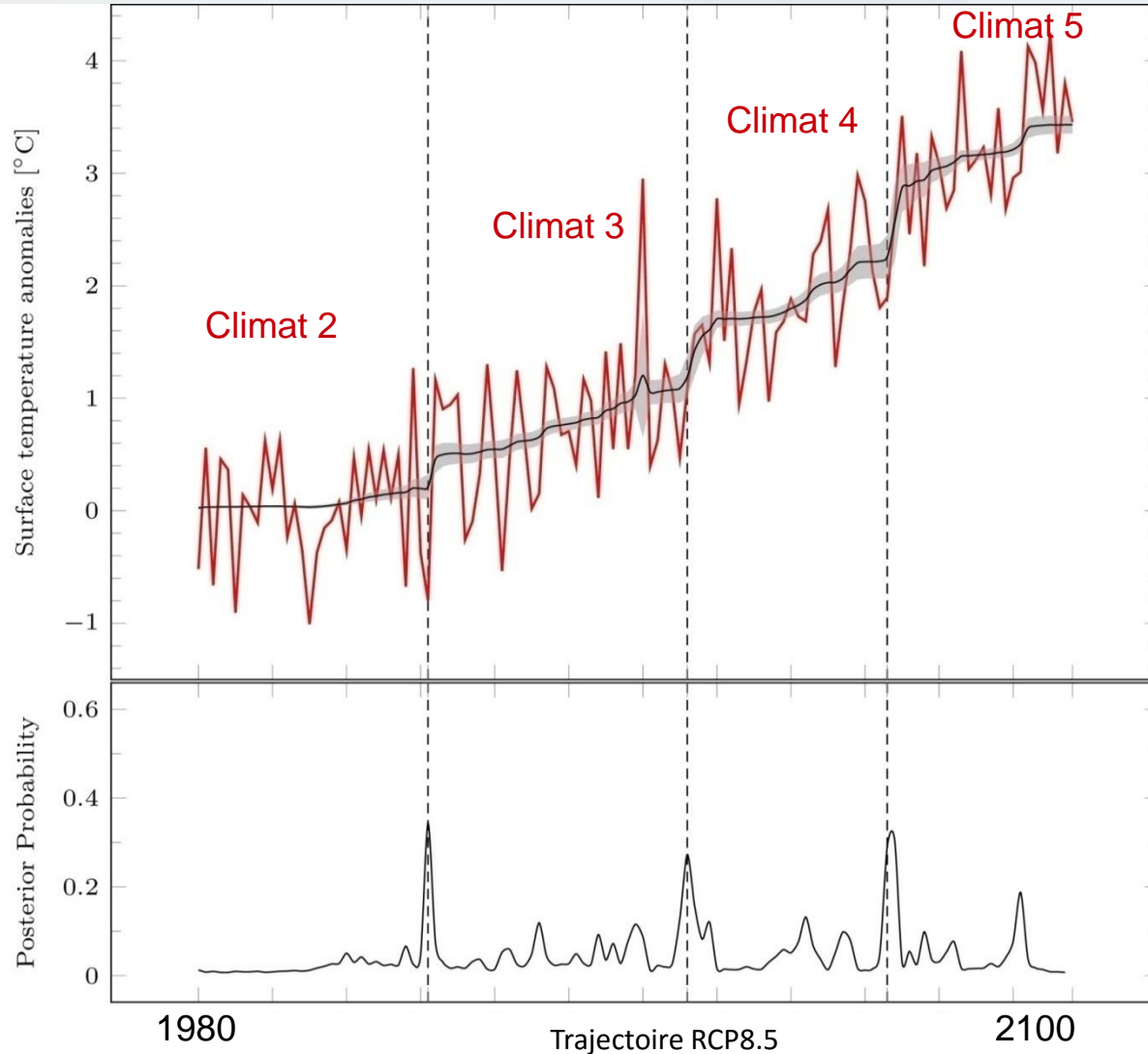
Evapotranspiration : une augmentation marquée en deuxième partie du 21^e siècle ;

Modalités du réchauffement projeté similaire à celui observé ?

Que projettent les modèles ?

Bourgogne : simulations sur 120 ans

Évolution de la température annuelle moyenne 1980-2098



et si la
température
continuait à
augmenter
par sauts
successifs ?

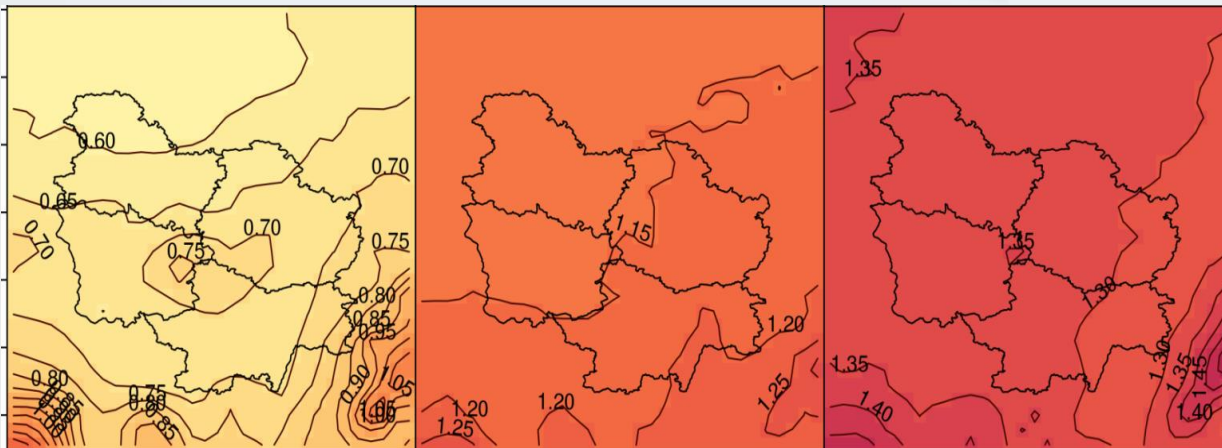
Que projettent les modèles ? Bourgogne : simulations sur 120 ans

Climat 2 → 3
≈ bientôt !

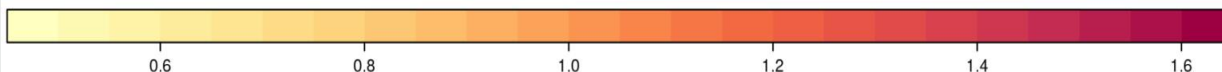
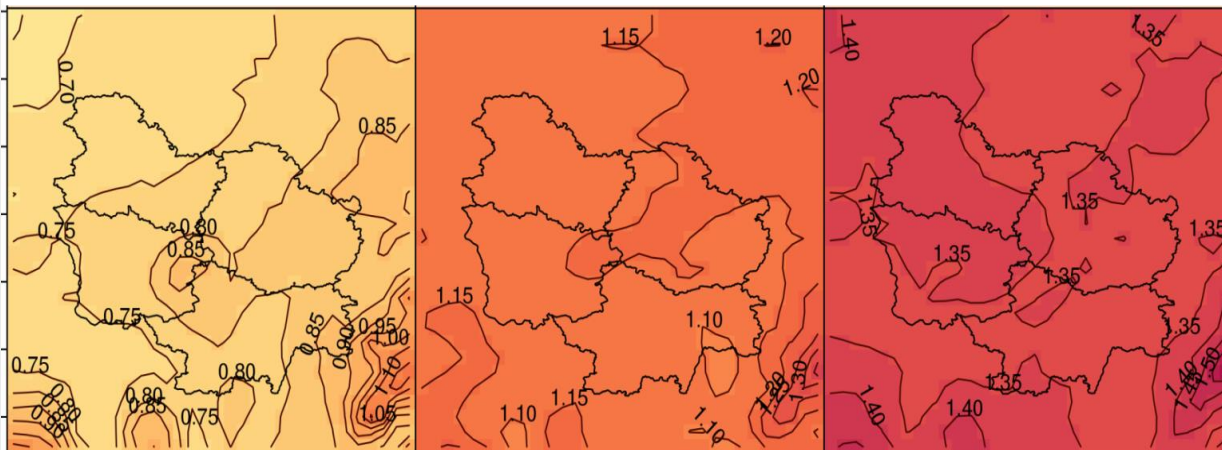
Climat 3 → 4
≈ mi-siècle

Climat 4 → 5
≈ fin de siècle

T° nocturne



T° diurne



Des sauts de + en + forts ?

Oui si RCP 8,5 ...

Mais COP21 et politiques locales donnent des espoirs

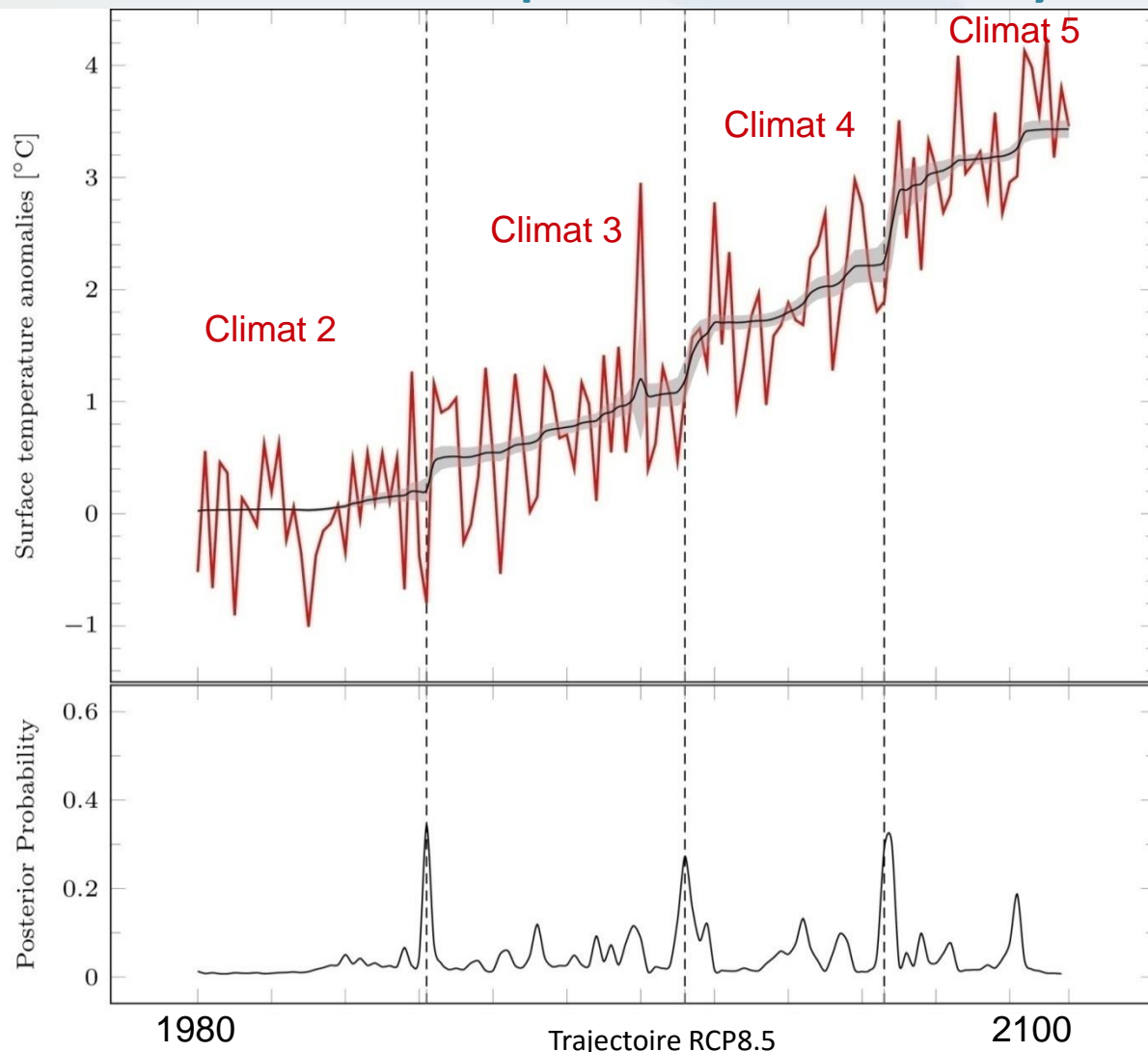
Des augmentations maximales en montagne ?

Rétroactions >0 liées à réduction de la neige

Que projettent les modèles ?

Bourgogne : simulations sur 120 ans

Évolution de la température annuelle moyenne 1980-2098



Cette hypothèse :

- est corroborée par l'évolution observée ;
- est portée par l'ensemble des modèles du GIEC.

Incertitude principale :

l'ampleur et le nombre de sauts dépendent de la trajectoire radiative (Cf COP 21).

Si les températures augmentaient par sauts successifs ?

Incertitudes

- Politiques d'atténuation ;
 - Signe de l'évolution des précipitations sur le passé récent ;
 - Difficulté des modèles de climat à simuler des précipitations conformes aux observations en termes de :
 - volumes annuels ;
 - régimes (saisonnalité) ;
 - intensité des épisodes pluviométriques ;
- reste un verrou pour alimenter les modèles hydrologiques.

Incertitudes

- Politiques d'atténuation ;
 - Signe de l'évolution des précipitations sur le passé récent ;
 - Difficulté des modèles de climat à simuler des précipitations conformes aux observations en termes de :
 - volumes annuels ;
 - régimes (saisonnalité) ;
 - intensité des épisodes pluviométriques ;
- reste un verrou pour alimenter les modèles hydrologiques.

Certitudes

- Réchauffement va se poursuivre
- Par sauts successifs (le saut 1987/88 constitue une prise pour le futur)
- Augmentation de l'ETP se poursuit
- Réduction des débits s'accroît
- Vulnérabilités inégales selon les territoires
- Nécessite une adaptation en continu et modulable selon les territoires

Le scénario construit dans HYCCARE

De + en + chaud, par étapes, en toutes saisons :

- Température des cours d'eau et évaporation ↗
- Besoins en eau des plantes ↗
- Stress et sécheresses hydriques ↗
- Débits des cours d'eau ↘
- Percolation et recharge des nappes ↘
- Ressource en eau ↘

Et nous ?

Vers des tensions entre usagers, des conflits d'usages ?

Quelle appropriation sur les territoires ?

Quelles stratégies d'adaptation en continu ?