

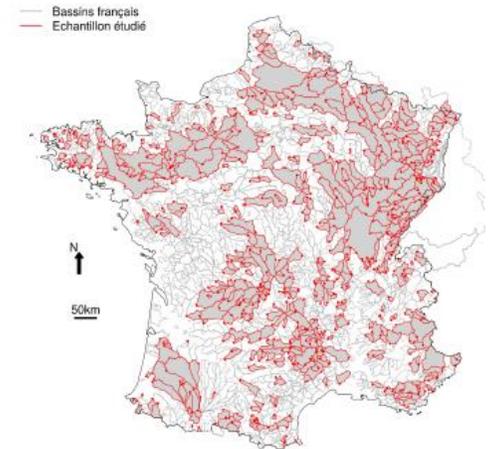
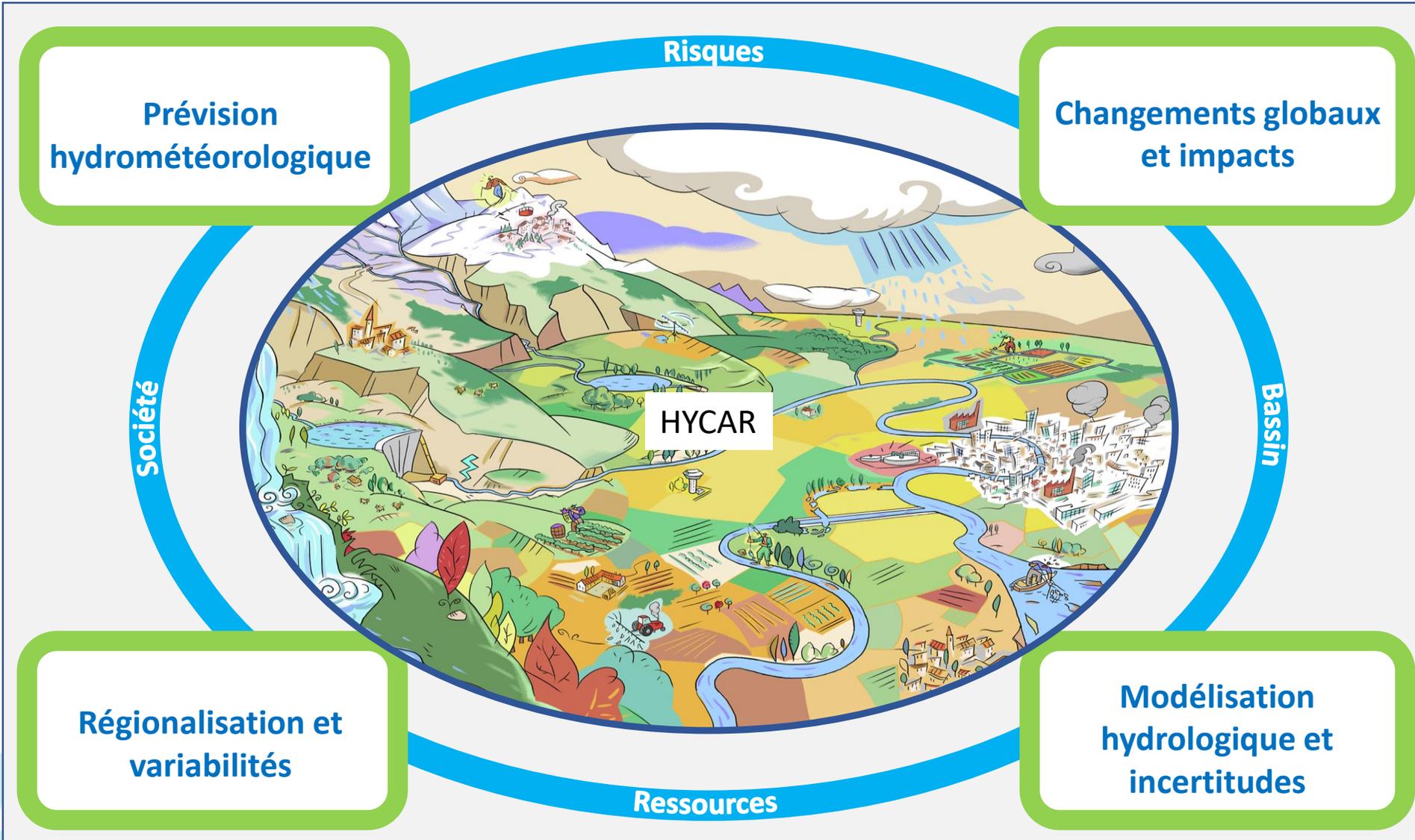


➤ **Modélisation de la ressource en eau en tête de bassin versant, modèles actuels et perspectives**

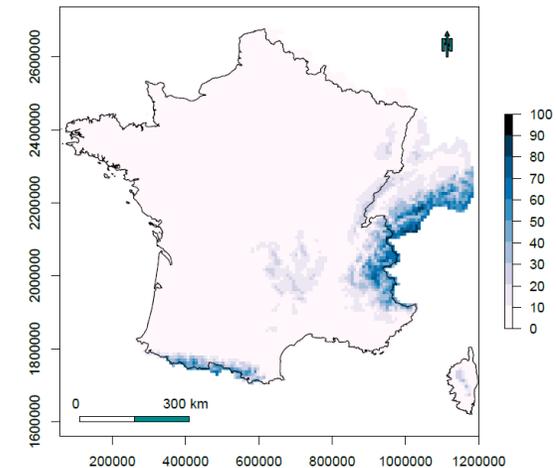
Guillaume Thirel

➤ Qui suis-je ?

Chercheur dans l'unité de recherche HYCAR d'INRAE (= Irstea + INRA), basée à Antony



Quelques bassins d'étude...



Fraction de précipitation neigeuse

➤ L'objet d'étude du modélisateur hydrologique : le bassin versant



Photo Ph. Bois (INPG)

Bassin Durance: Vallée de Ceillac (Hautes Alpes)



INRAE

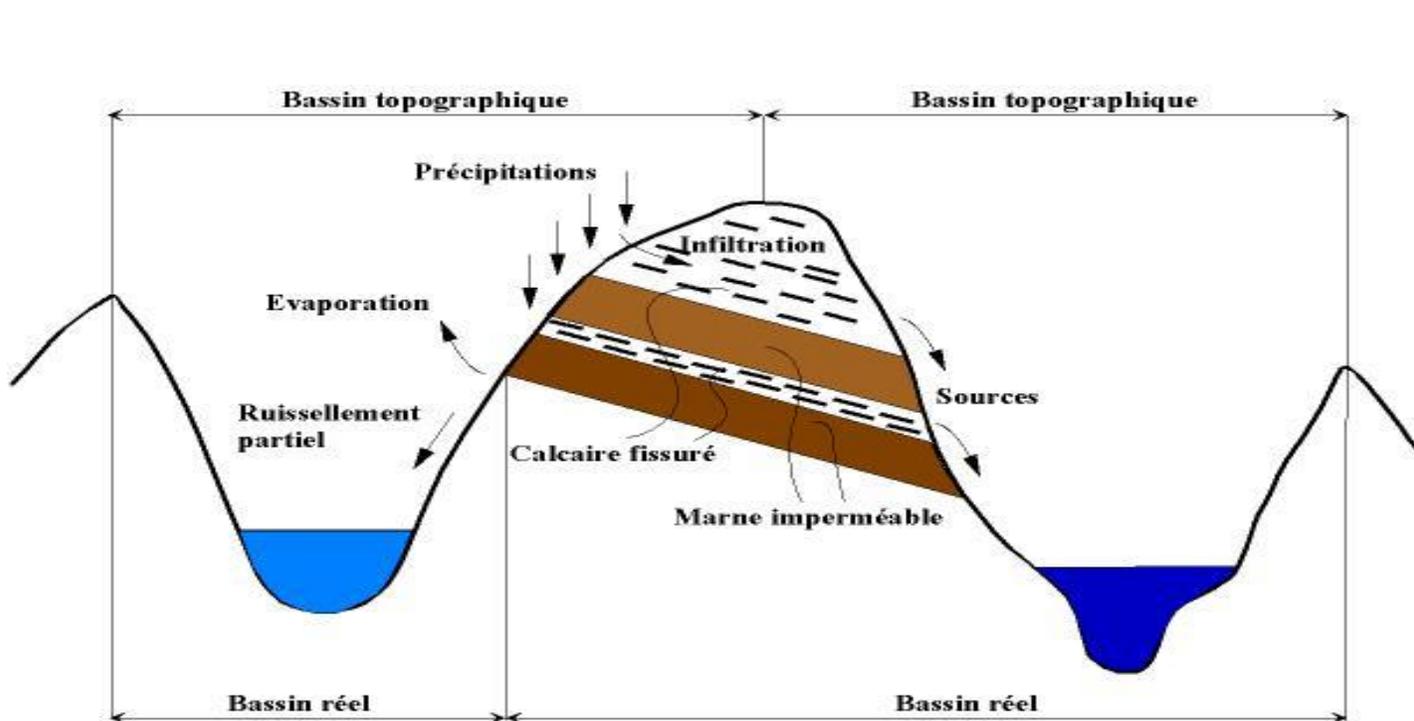
Modélisation de la ressource en eau en tête de bassin versant, modèles actuels et perspectives

11/03/2021 / CS Parc des Ecrins / Guillaume Thirel

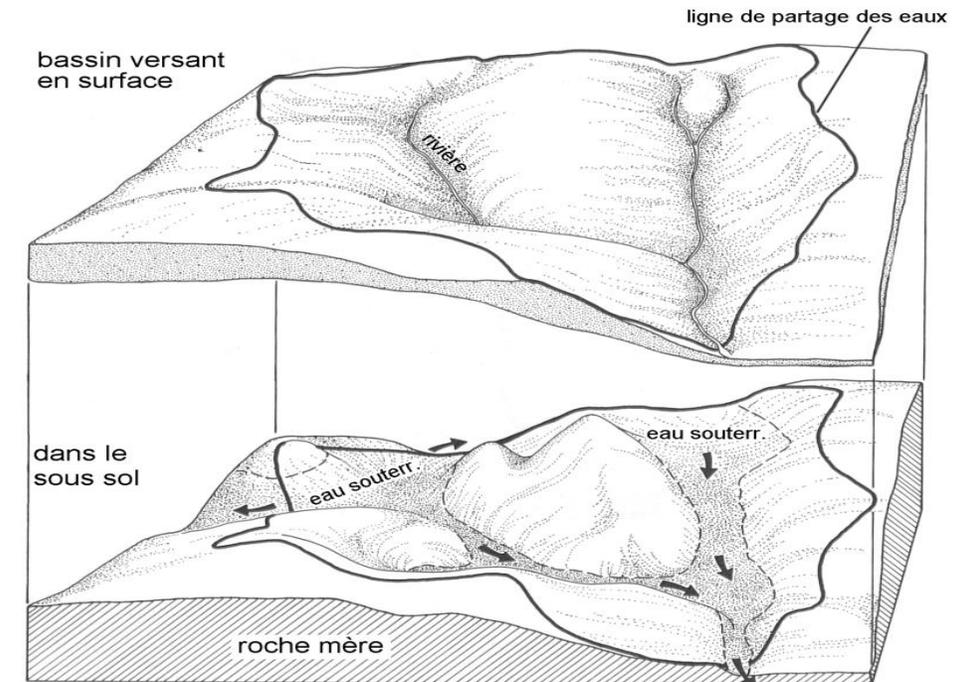
➤ L'objet d'étude du modélisateur hydrologique : le bassin versant

Bassin versant topographique VS bassin versant réel

En **hydrologie de surface**, on se limite le plus souvent à simuler le bassin versant topographique (sans nécessairement négliger le souterrain)



Musy (EPFL), d'après Roche - Hydrologie de surface, Ed. Gauthier-Villars, Paris 1963.



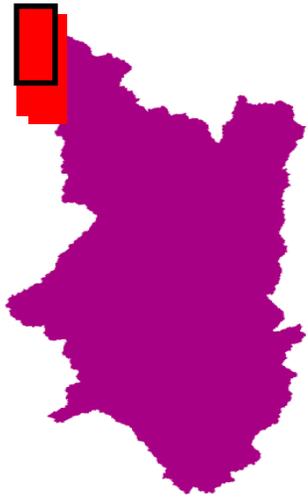
➤ Du bassin versant au modèle hydrologique

Le modèle hydrologique correspond à une triple simplification du système réel :

- dans l'espace (choix de l'échelle spatiale)
- dans le temps (choix de l'échelle temporelle)
- dans la description des processus (simplification toujours obligatoire mais jusqu'où ?)

➤ Simplification dans l'espace : choix de l'échelle spatiale

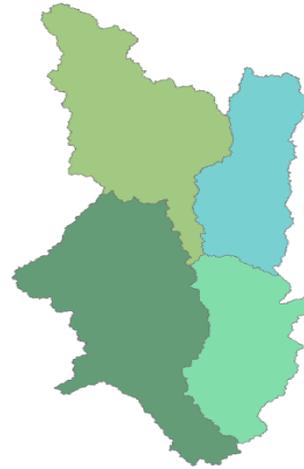
Modèles globaux/spatialisés ? (mailles : carrées ou sous-bassins versants)



Approche globale

Unité élémentaire :

Le bassin versant



n=4

Approche distribuée

Unité élémentaire :

Les n sous-bassins versants (ou mailles carrées)

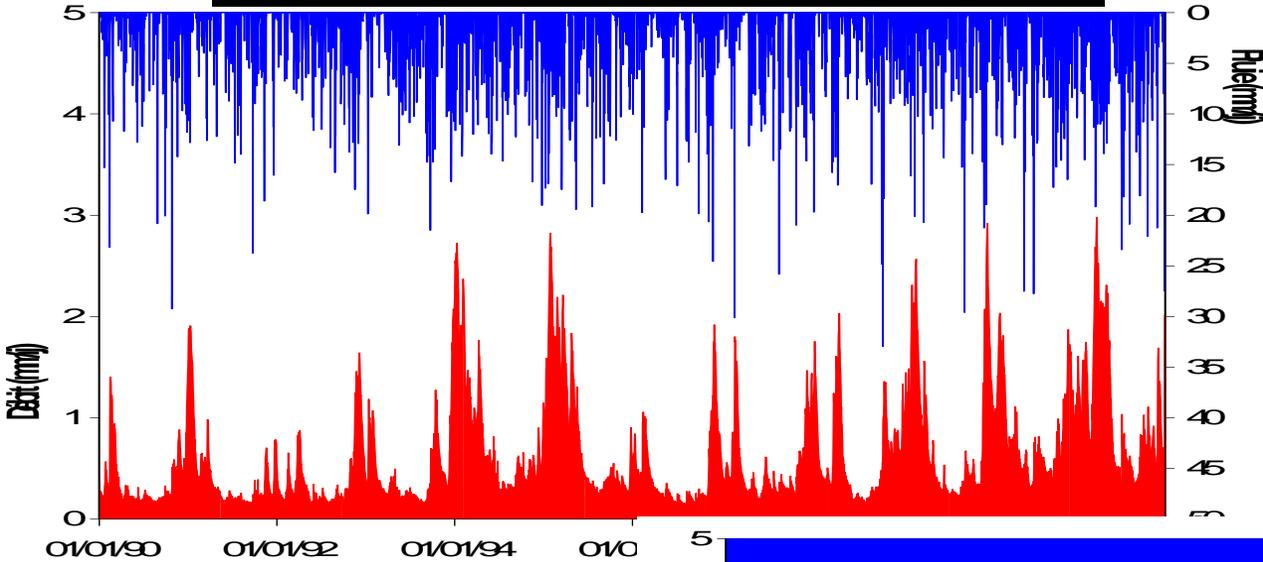


n=222

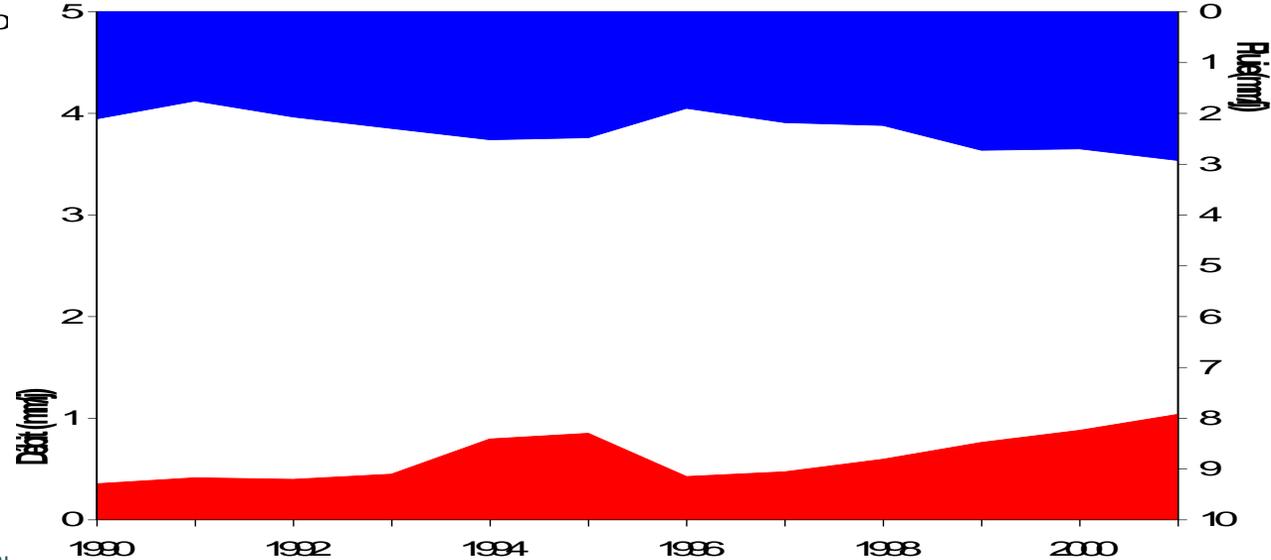
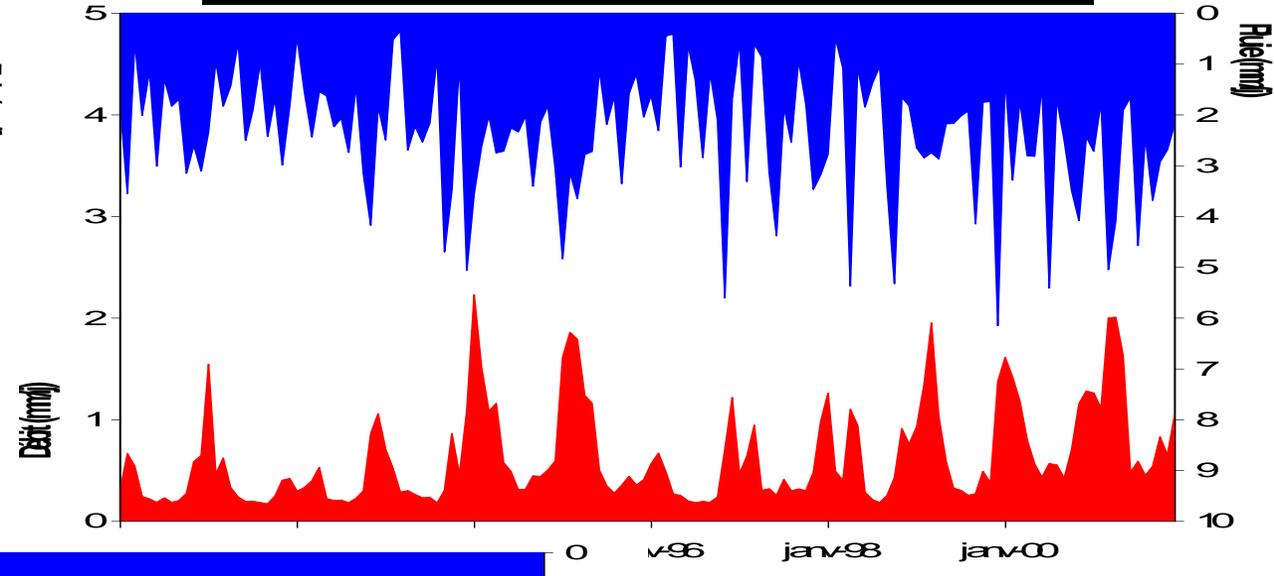
Taille fixe (exemple 10 km²) ou fonction de la taille du bassin versant (exemple 10 mailles minimum)

➤ Simplification temporelle : des pas de temps différents pour des objectifs différents

Pas de temps journalier



Pas de temps mensuel



Pas de temps annuel

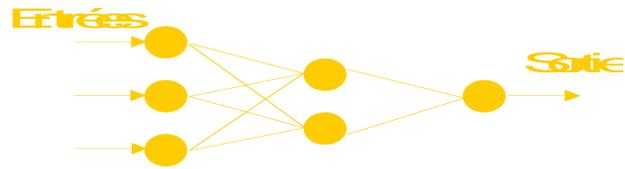
➤ Simplification sur les processus décrits ? Différentes écoles...

Modèles 'boîte noire'

Modèle auto-regressif ARMAX

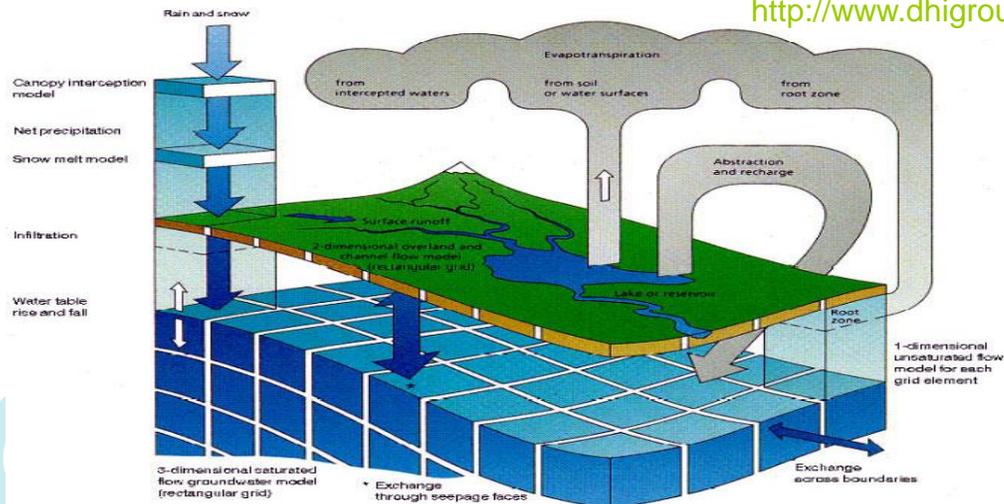


Réseaux de neurones



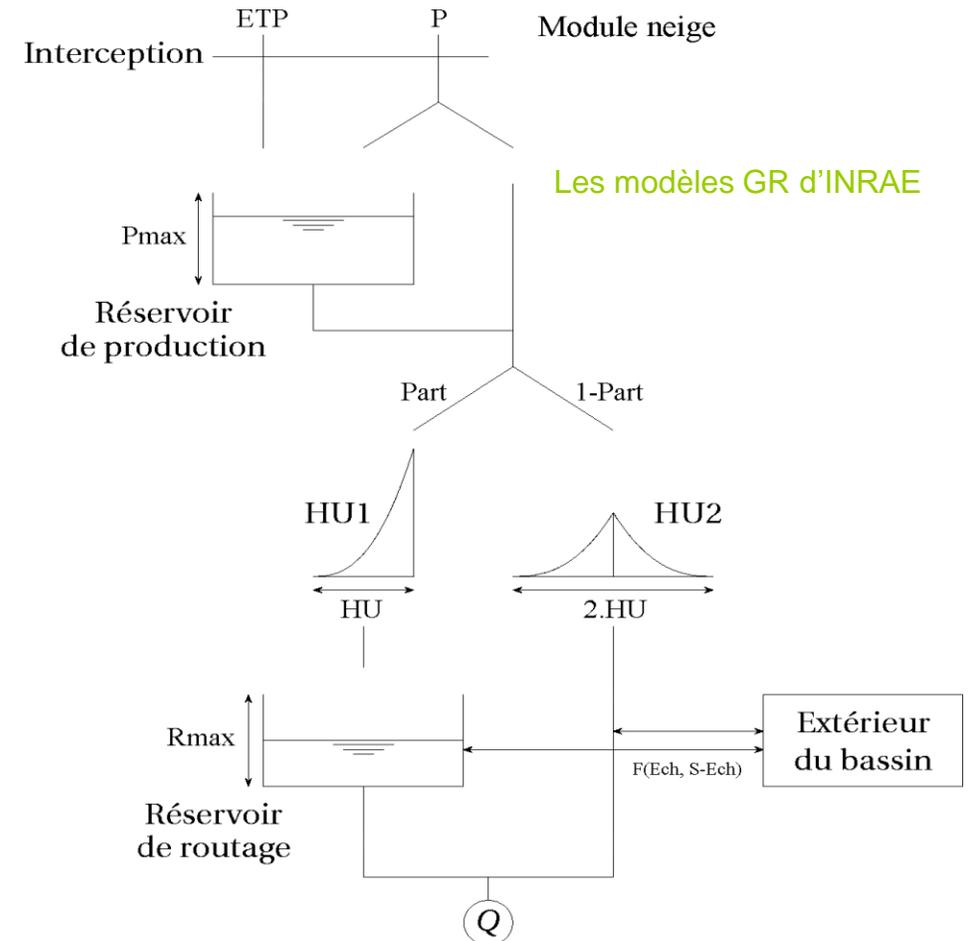
Modèles 'physiques'

Modèle MIKE_SHE
<http://www.dhigroup.com/>

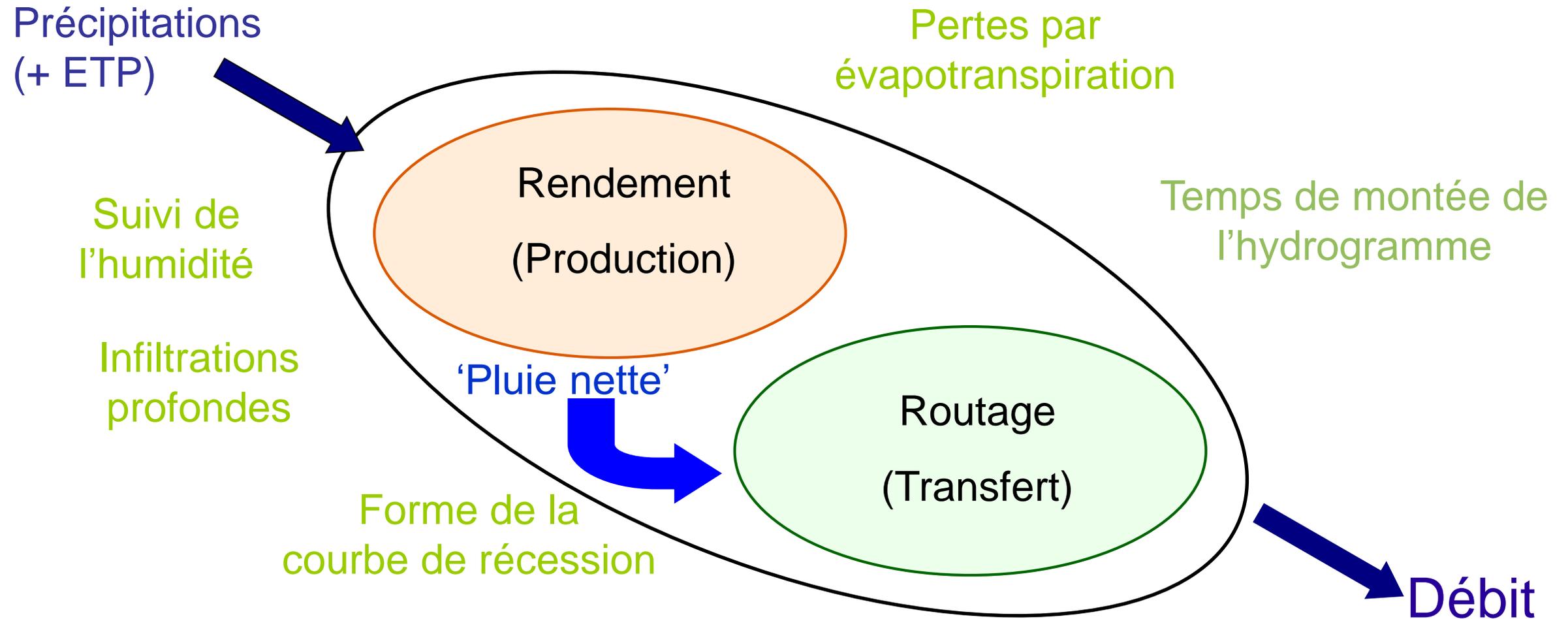


et perspectives

Modèles conceptuels (« à réservoir ») et empiriques



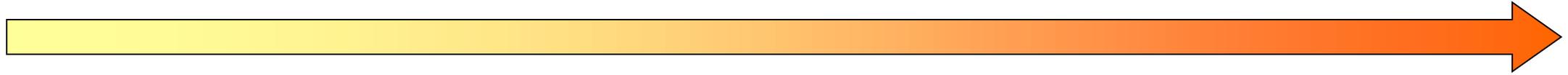
➤ Structure générale d'un modèle conceptuel empirique pluie-débit à l'échelle du bassin versant



+ paramètres à optimiser : adaptation au cas d'étude, au plus proche des observations

➤ Dépendance de la structure du modèle au pas de temps

Importance croissante des fonctions de production (bilan)



Importance croissante des fonctions de transfert



➤ Cas des modèles GR

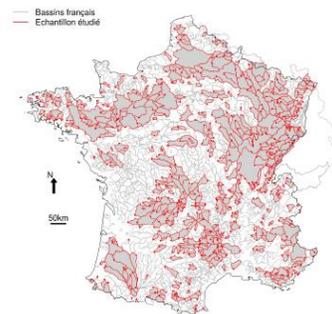
GR = modèles du Génie Rural

Inventés dans les années 80 au CTGREF (devenu Cemagref, puis Irstea, puis INRAE).

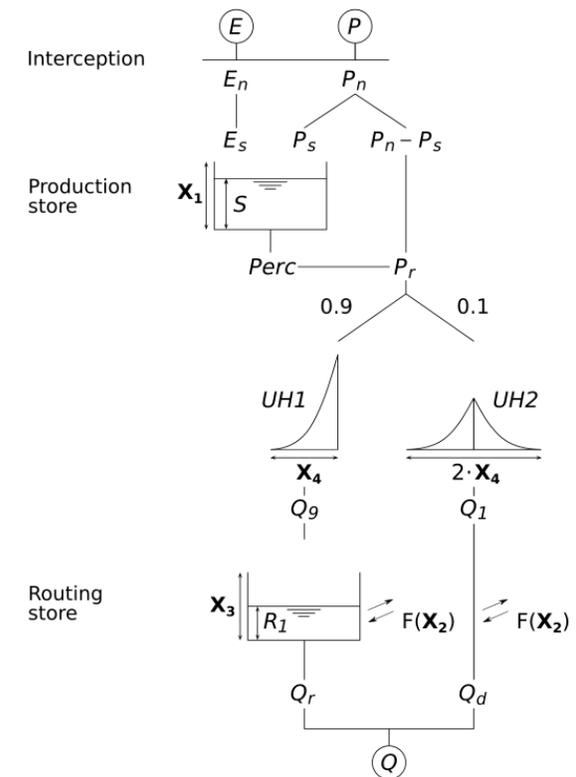
Objectif initial : développer des modèles efficaces et faciles à mettre en œuvre pour des besoins d'hydrologie opérationnelle quantitative

Modèles empiriques, parcimonieux (rasoir d'Ockham), à réservoirs et globaux.

Modèles continus conçus pour être polyvalents (appliqués sur de nombreux bassins versants).



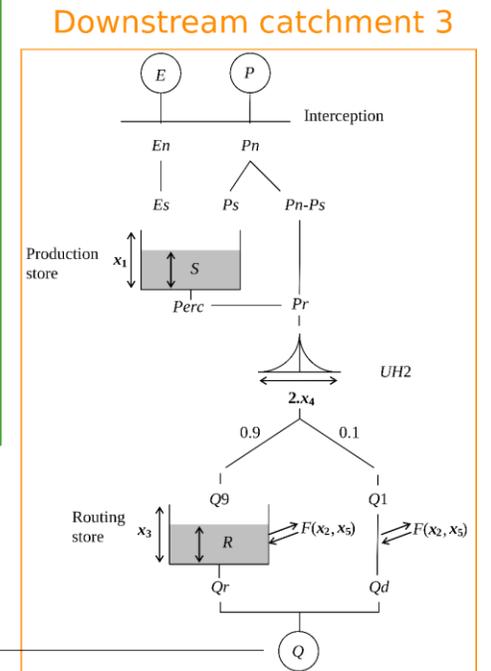
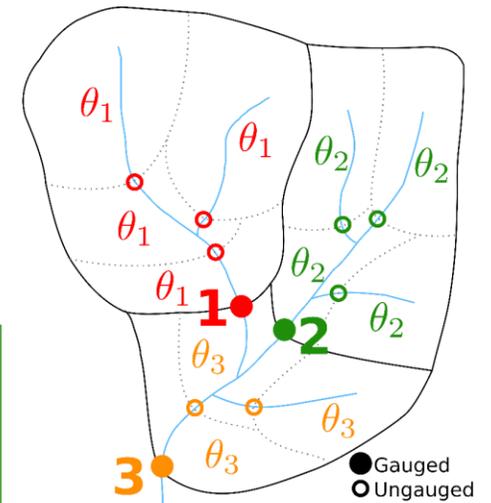
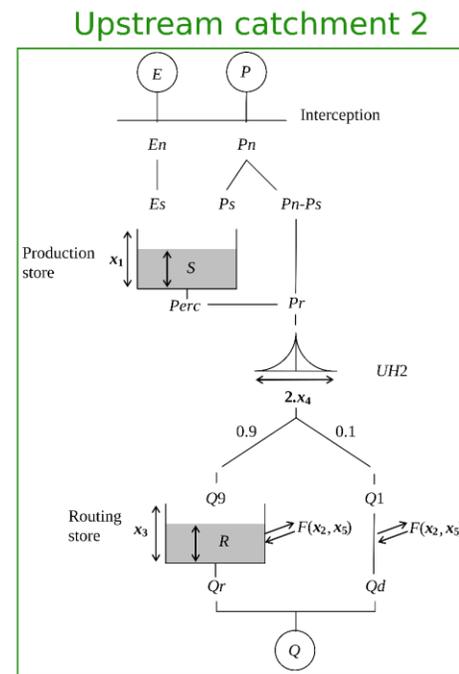
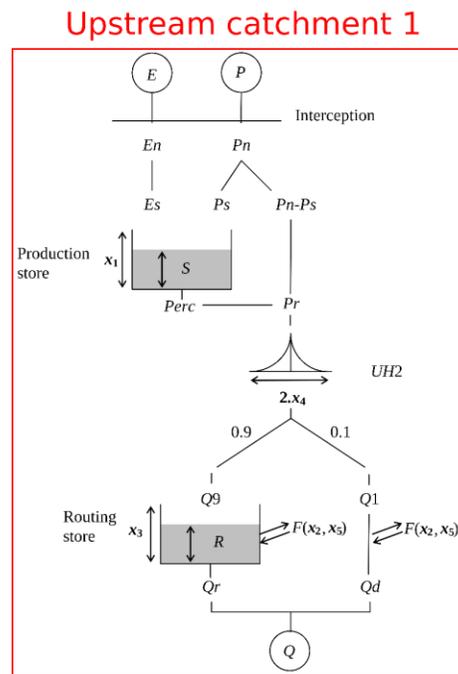
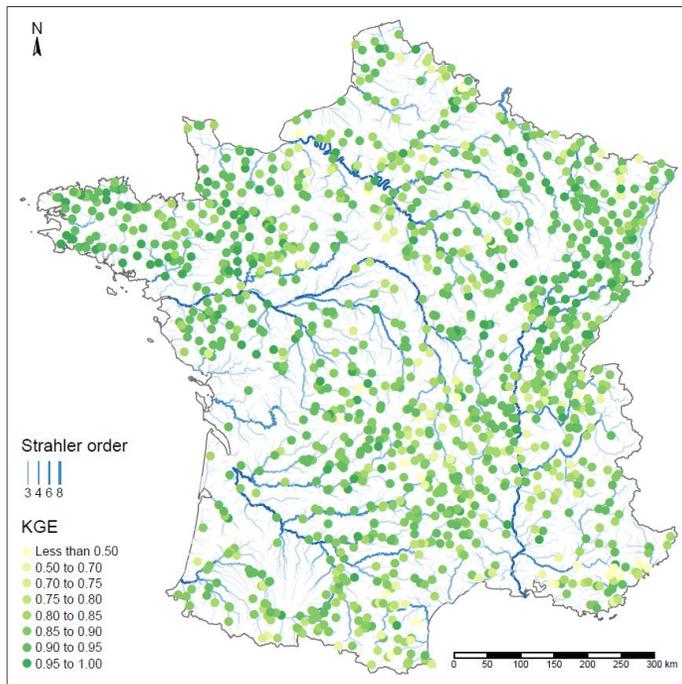
Exemple d'application de GR (Poncelet, 2016)



➤ Une évolution des modèles GR vers la semi-distribution

GRSD : une « grappe » de modèles GR sur les sous-bassins versants

Application sur la France entière (de Lavenne et al., 2019)



➤ Principes de CemaNeige

Thèse d'Audrey Valéry (2006-2010)

CemaNeige

Degré-jour

Appliqué par bandes d'altitude d'égale surface

Couplé aux modèles hydrologiques GR (mais peut aussi l'être à d'autres)

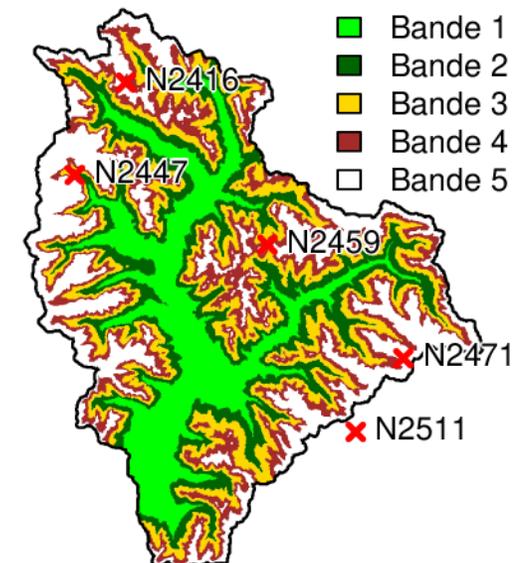
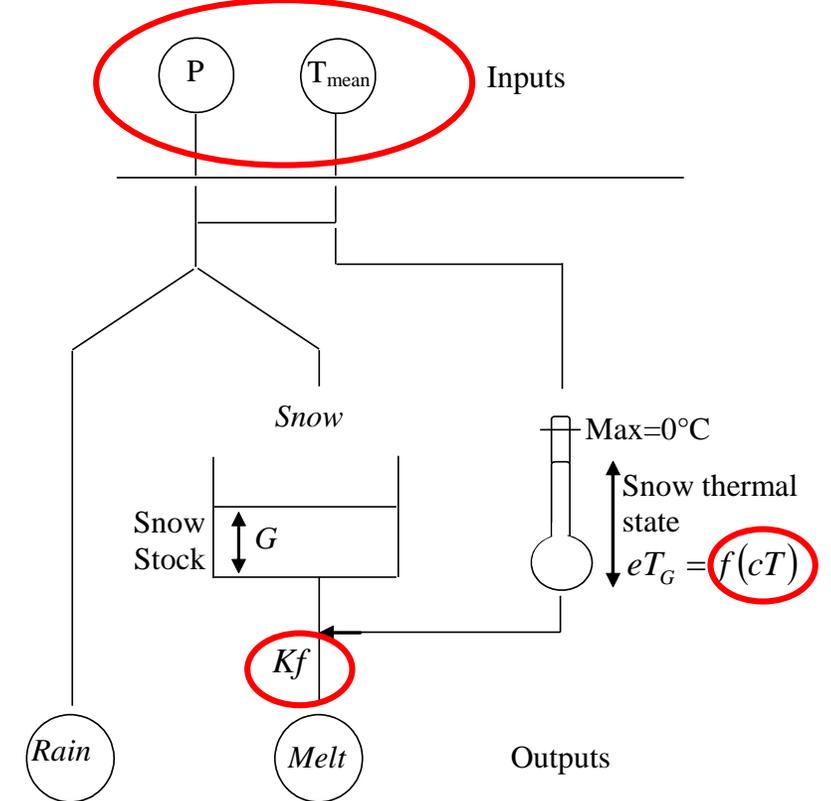
Variables de forçage

Température moyenne de l'air

Précipitations

Paramètres

2 paramètres à caler

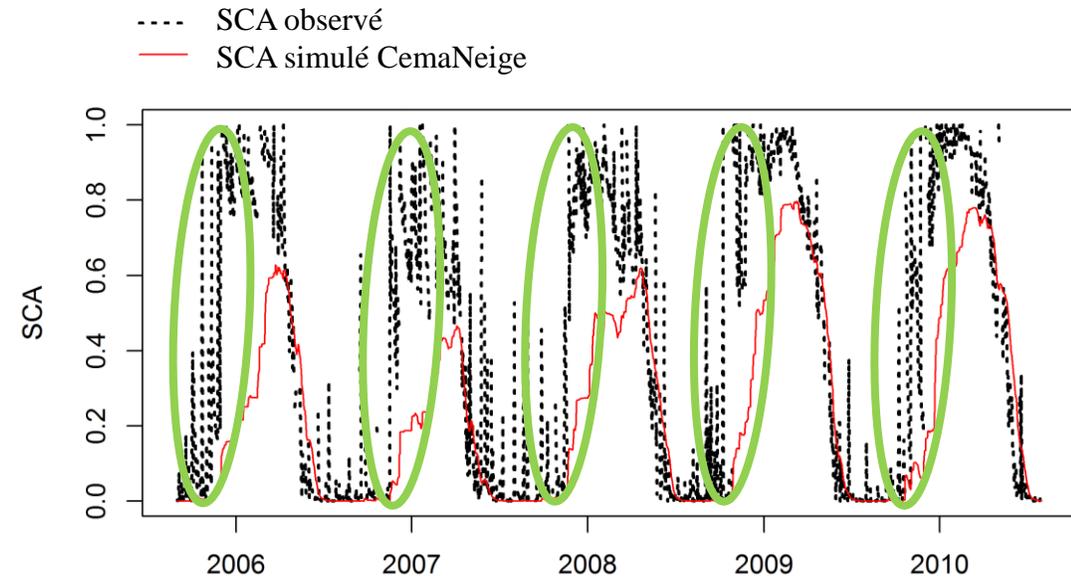
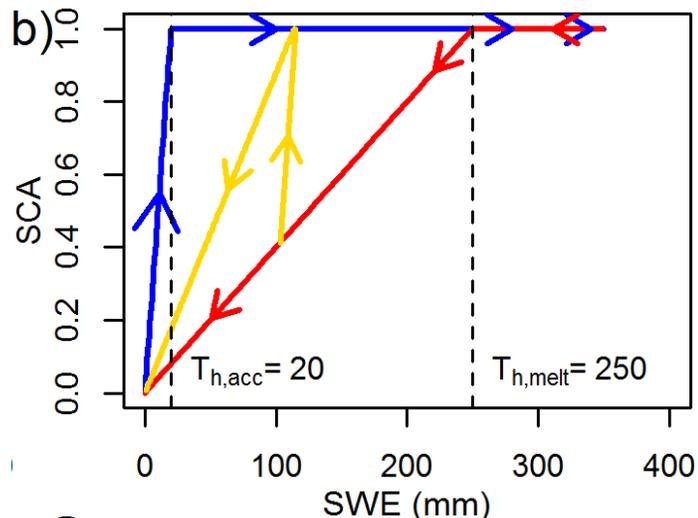


➤ Principes de CemaNeige

Thèse de Philippe Riboust (2014-2018)

Une simulation du manteau neigeux qui reste imparfaite (exemple de la Durance à Embrun)

-> amélioration en utilisant des données MODIS

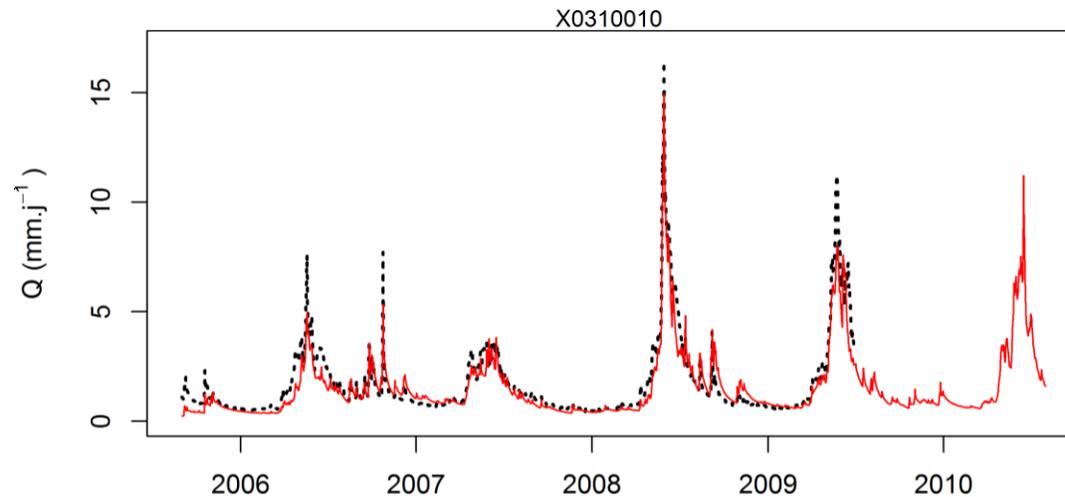


- Relation d'hystérésis entre le SCA et le SWE (Luce and Tarboton, 2004 ; Magand et al., 2014)
 - **Augmentation rapide du SCA lors de l'accumulation**
 - **Diminution lente du SCA lors de la fonte**
- 2 paramètres supplémentaires à caler

➤ Performances de CemaNeige version Valéry et version Riboust

Exemple de la Durance à Embrun

- Débit observé
- Débit simulé CemaNeige-GR4J

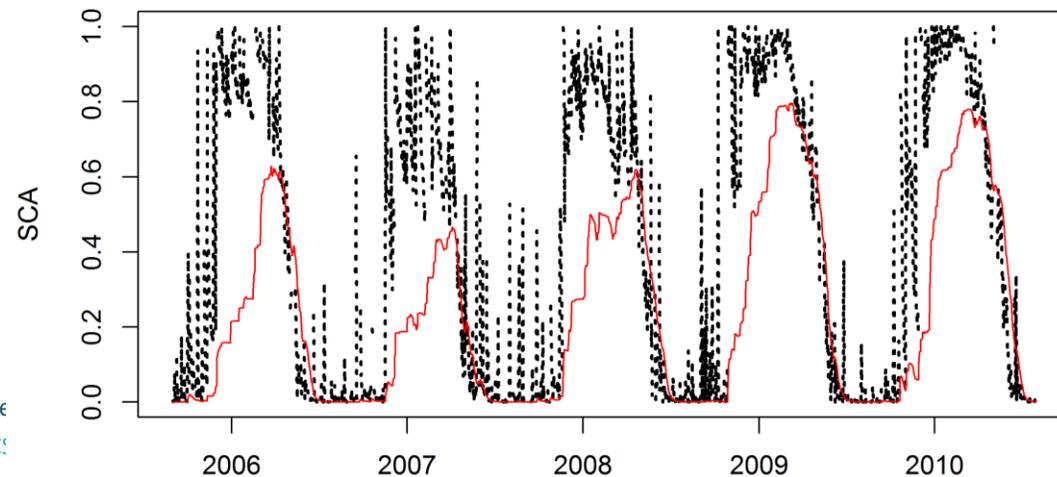


Performances CemaNeige en validation

KGE' Q = 0.86

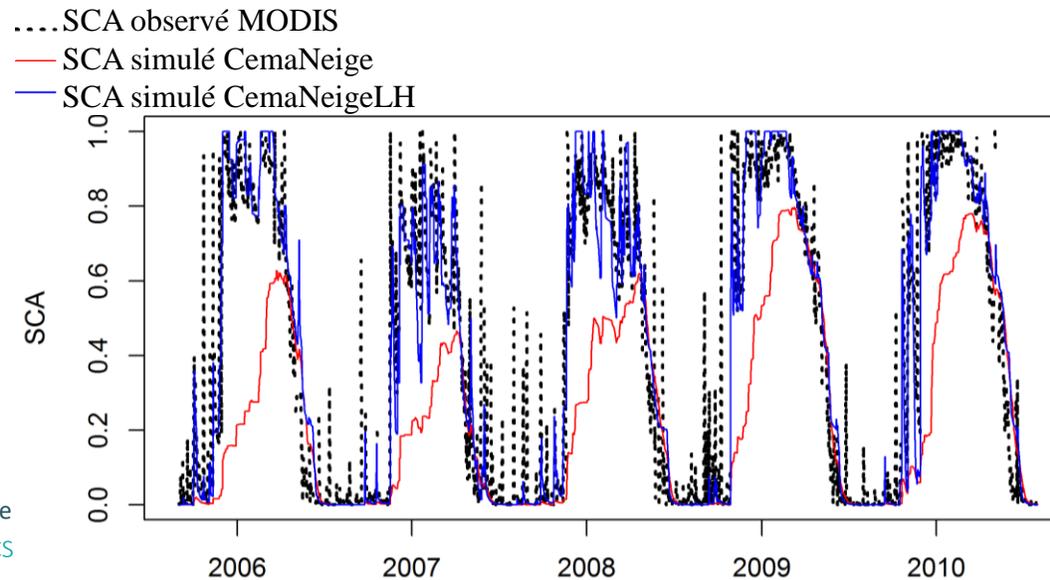
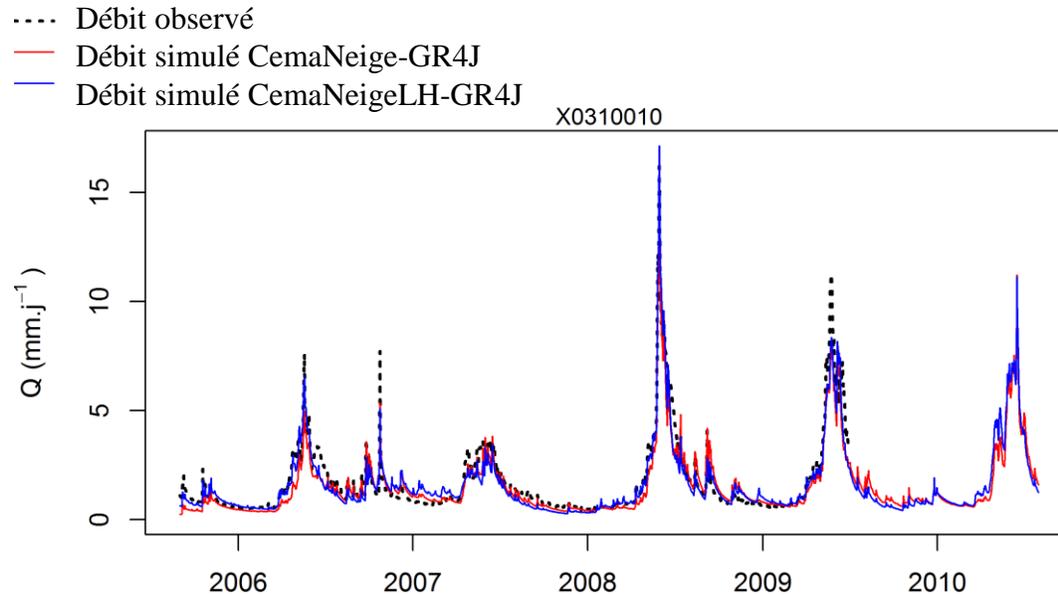
KGE' SCA = 0.53

- SCA observé MODIS
- SCA simulé CemaNeige



➤ Performances de CemaNeige version Valéry et version Riboust

Exemple de la Durance à Embrun



Performances CemaNeige en validation

$KGE' Q = 0.86$

$KGE' SCA = 0.53$



Performances CemaNeige Hystérésis en validation

$KGE' Q = 0.92$

$KGE' SCA = 0.97$

➤ Proposition d'outils pour des applications opérationnelles : airGR

airGR : package R de modélisation hydrologique

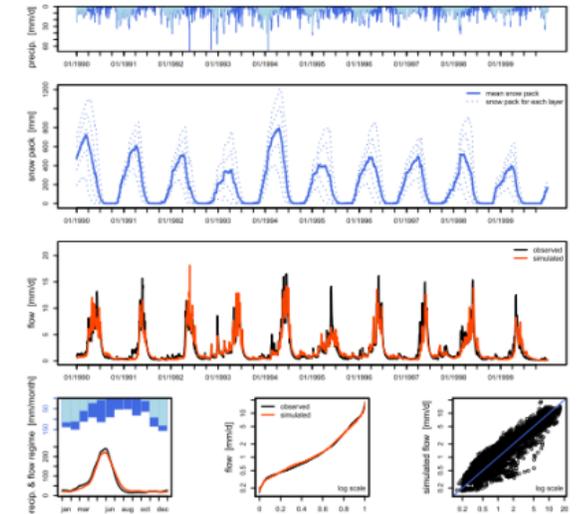


Logiciel libre développé et maintenu en  depuis 2015

Propose la famille de modèles hydrologiques GR d'INRAE

Disponible sous CRAN depuis janv. 2017 – plusieurs milliers de téléchargements depuis 40 pays

Exemple de sortie d'airGR



Téléchargements



airGRteaching : une version pour l'enseignement et les formations



Coron, L. et al., 2017: The Suite of Lumped GR Hydrological Models in an R package, Environmental Modelling & Software, 94, 166-171, DOI: 10.1016/j.envsoft.2017.05.002



Interface graphique d'airGRteaching



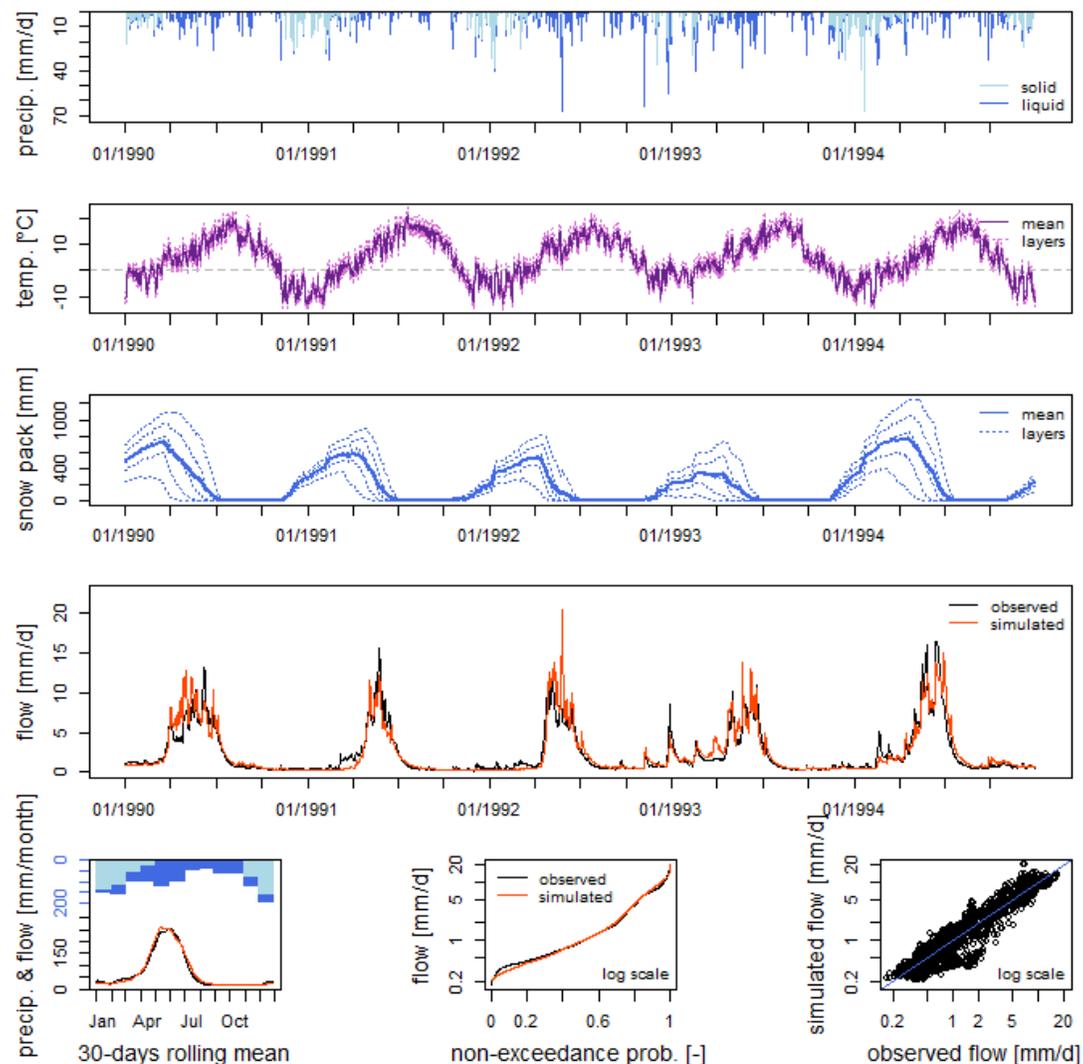
Modélisation de la ressource en eau en tête de bassin versant, modèles actuels et perspectives
11/03/2021 / CS Parc des Ecrins / Guillaume Thirel

➤ Disponibilité en accès libre dans airGR

airGR : suite des modèles GR programmés sous R : <https://hydrogr.github.io/airGR/>

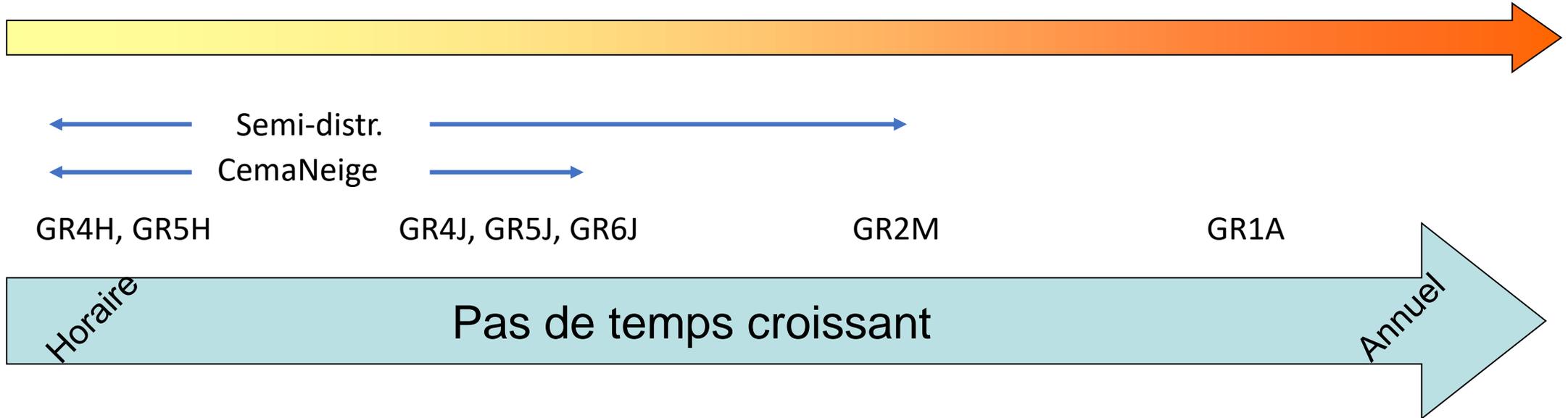
Versions CemaNeige disponibles :

- Version A. Valéry
- Version P. Riboust
- Pas de temps journalier
- Pas de temps horaire
- Couplé ou non avec un modèle GR
 - GR4H, GR5H
 - GR4J, GR5J, GR6J
 - Ces 5 modèles en version SD



➤ Dépendance de la structure du modèle au pas de temps

Importance croissante des fonctions de production (bilan)



Importance croissante des fonctions de transfert



➤ Impact du changement climatique sur les ressources en eau

Des évolutions futures alarmantes

Changement climatique :

- Augmentation de la température
- Augmentation de la part de précipitation liquide
- Evolution de la quantité totale de précipitation incertaine
- Evènements extrêmes plus probables

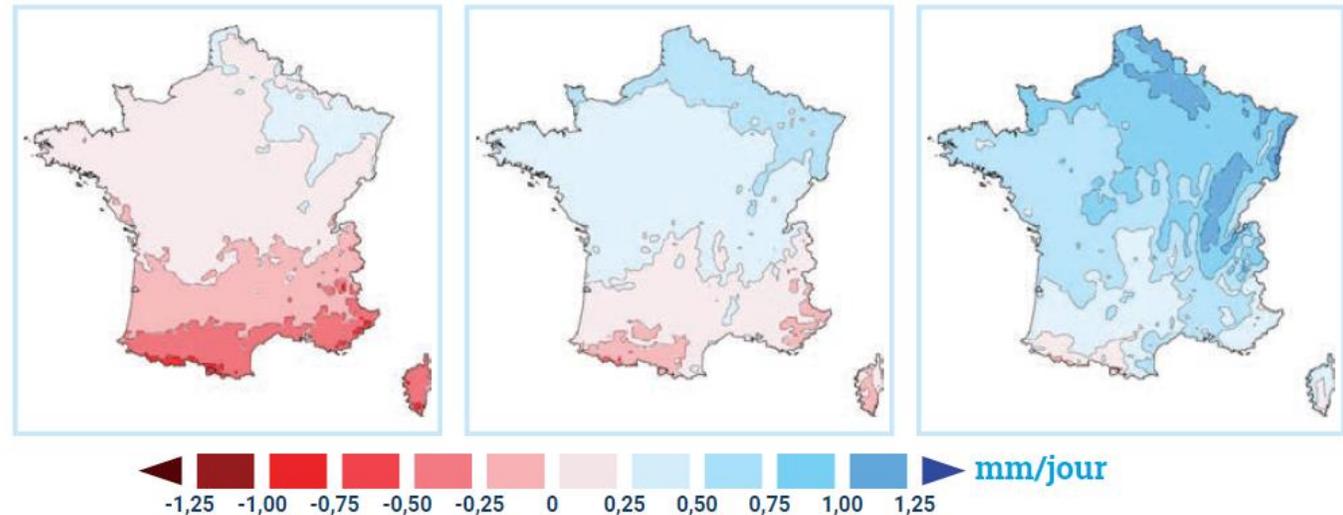
Impact sur les ressources :

- Modification du régime hydrologique
 - Manteau neigeux moins important, la neige jouera moins son rôle de réservoir naturel
 - Fonte plus précoce
 - Etiages hivernaux moins marqués
 - Etiages estivaux plus marqués
- Diminution potentielle du débit moyen
- Evènements de crues intenses plus marqués ?

Evolution médiane des températures, RCP 8.5 fin de 21^e siècle (rapport Drias 2020)

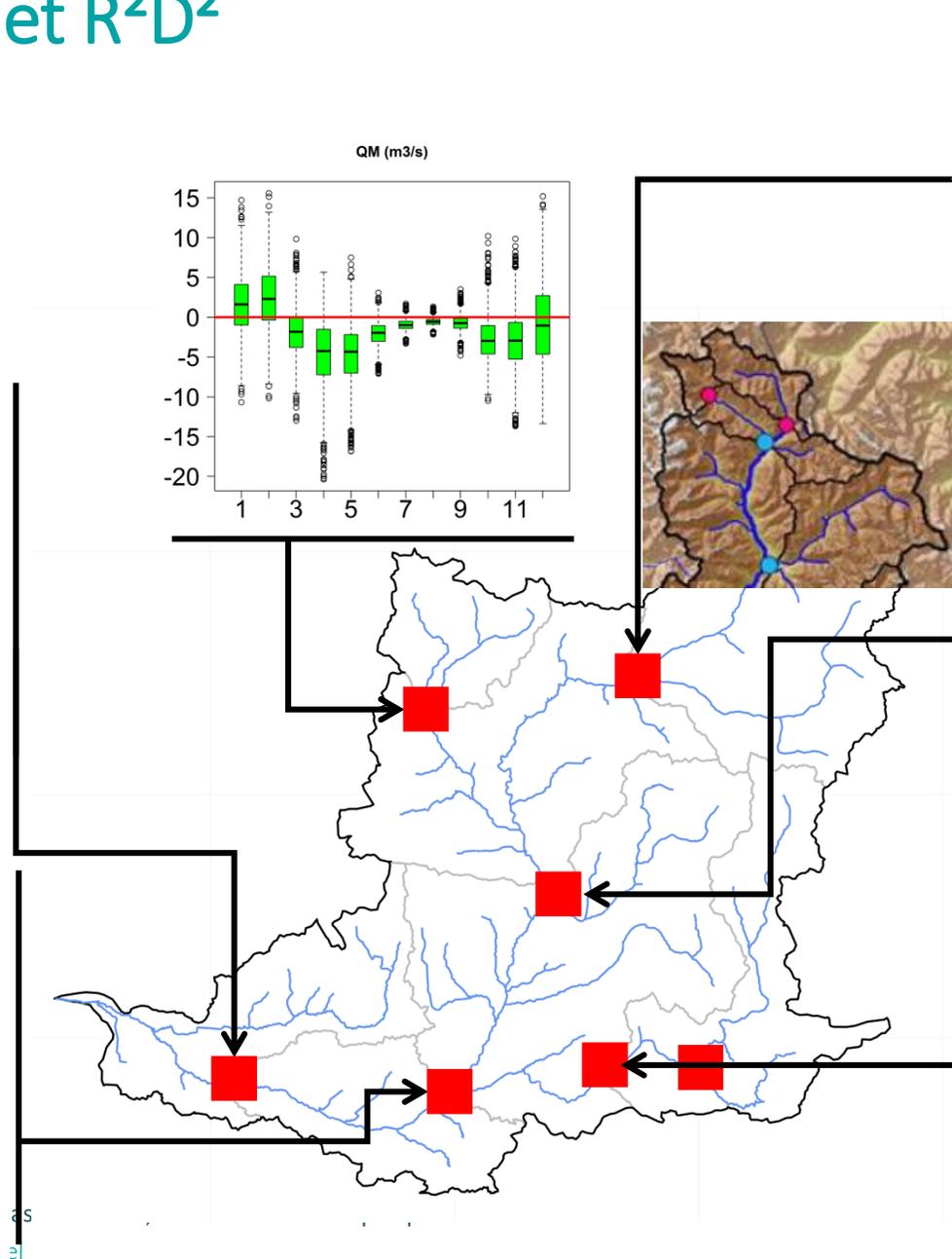
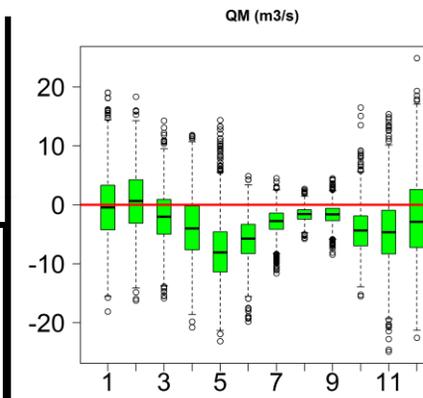
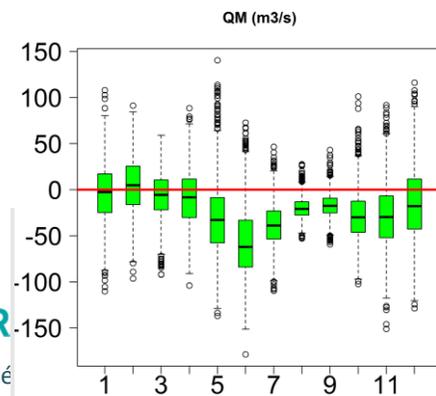
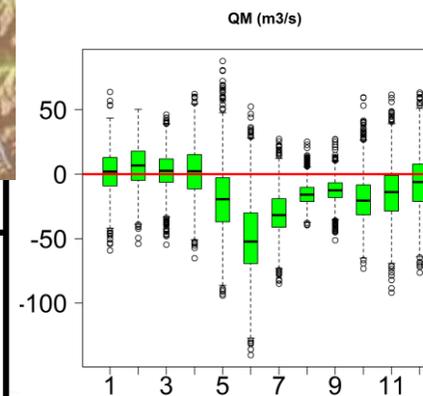
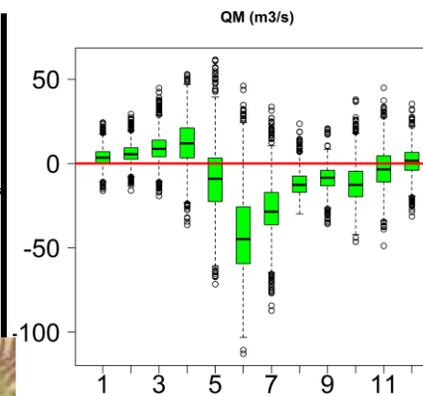
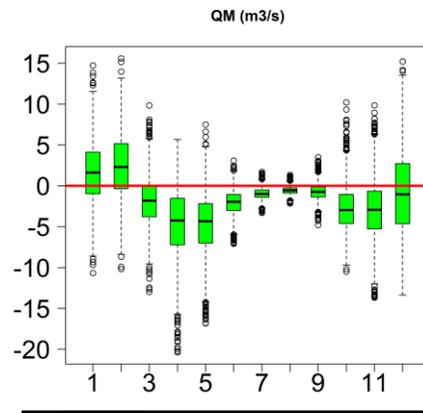
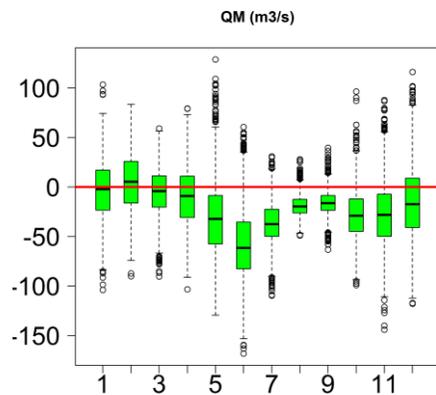


Evolution (quantiles 5, 50 et 95) des précipitations, RCP 8.5 fin de 21^e siècle (rapport Drias 2020)



➤ Résultats du projet R²D²

Diagnostic sur les débits mensuels QM



➤ Perspectives en modélisation hydrologique

Vers une utilisation accrue de données satellites (calage, assimilation) :

- Accès de plus en plus important à différentes variables du cycle de l'eau
- Satellites de plus en plus précis (meilleure résolution, e.g. Sentinel)

Prévision des débits :

- Possibilité de prévoir l'évolution de la ressource à quelques heures voire quelques jours ou semaines d'échéance
- Précision des prévisions météorologiques encore incertaine notamment à longue échéance ou très localement

Prise en compte des changements globaux :

- Besoin de projections climatiques toujours plus fines et précises en montagne
- Communication difficile sur les incertitudes et la prise de décision
- Développement de modules d'usage de l'eau dans nos modèles
- Projet national Explore2



➤ Limites actuelles à la modélisation en tête de bassin

Peu de stations hydrologiques disponibles en tête de bassin ou sur des périodes trop courtes

Comparaison à des données de neige in situ :

- Données peu nombreuses, peu représentatives spatialement
- Modèle (hydrologique + de neige) qui ne cherche pas forcément à représenter fidèlement ce qui est mesuré (hauteur, SWE)

Modèles plus complexes trop lourds à mettre en place

Les petits bassins versants sont difficiles à modéliser, certains modèles ne sont valables qu'au-delà de plusieurs milliers de kilomètres

Merci pour votre attention !



Bonus



INRAE

Modélisation de la ressource en eau en tête de bassin versant, modèles actuels et perspectives

11/03/2021 / CS Parc des Ecrins / Guillaume Thirel

➤ Principes de CemaNeige

Thèse d'Audrey Valéry (2006-2010)

Extrapolation des données d'entrée

1. Découpage du bassin en cinq bandes d'altitude de même superficie (utilisation de la courbe hypsométrique)
2. Extrapolation des données d'entrée de précipitation et température par bandes d'altitude en utilisant un gradient orographique :

$$T_m(t, bande) = T_{bassin}(t) + \Theta_T * (z_{bande} - z_{bassin})$$

$$P(t, bande) = P_{bassin}(t) \cdot \exp(\Theta_P \cdot (z_{bande} - z_{bassin}))$$

avec $T_m(t, bande)$, $P(t, bande)$: température, précipitation de la bande considérée au temps t

$T_{bassin}(t)$, $P_{bassin}(t)$: température, précipitation moyenne de bassin au temps t

Θ_T (K/m) : gradient de température (variable ou fixé)

Θ_p (m^{-1}) : facteur de correction de la pluie (fixé à $4 \cdot 10^{-4} m^{-1}$)

z_{bande} , z_{bassin} : altitudes médianes de la bande considérée et du bassin

