

Interpolation “hydrologiquement assistée” des précipitations et températures pour la modélisation nivale et glaciaire

Nicolas Le Moine⁽¹⁾, Pierre-Stéphane Gsell⁽¹⁾,
Frédéric Hendrickx⁽²⁾, Joël Gailhard⁽³⁾, Rémy Garçon⁽³⁾

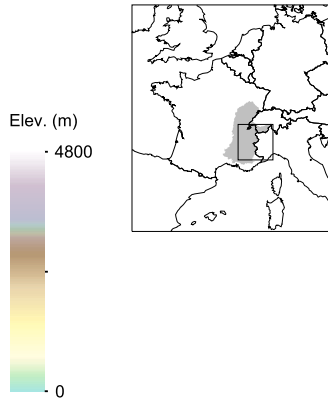
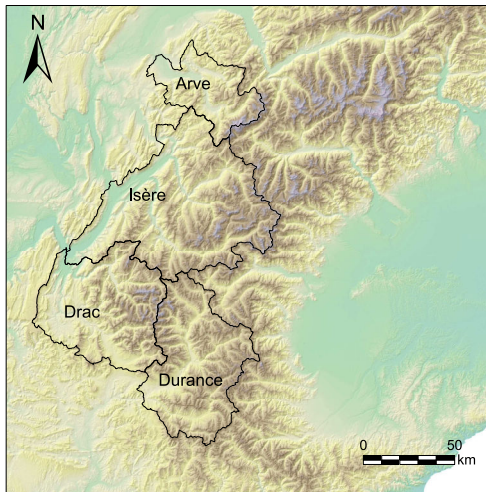
(1) UPMC, UMR 7619 Metis

(2) EDF R&D, LNHE, Chatou

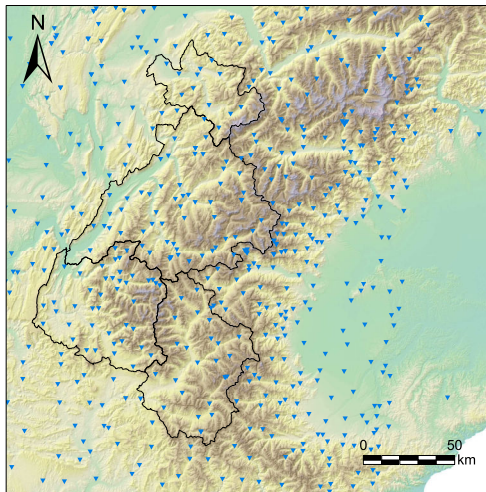
(3) EDF DTG, Grenoble

- Les têtes de bassin sont les “châteaux d'eau” des régions à l'aval
- Une bonne connaissance quantitative de la ressource est cruciale, en climat présent et futur
- Mais : les réseaux de mesures sont souvent peu denses dans ces régions

Exemple des Alpes françaises



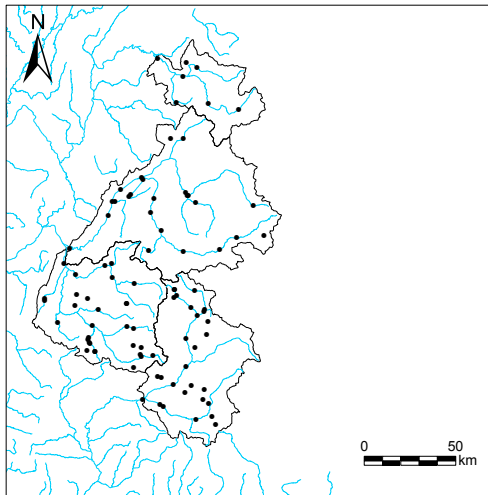
Un contexte météorologique peu favorable...



14600 km²
139 pluviomètres



Un contexte métrologique peu favorable...



14600 km²

139 pluviomètres

89 stations hydro

- Résolution hydro-météorologique : $\sim 100 \text{ km}^2$
- Taille typique des sous-bassins élémentaires dans un modèle à base topographique (“semi-distribué”) sur un domaine de méso-échelle

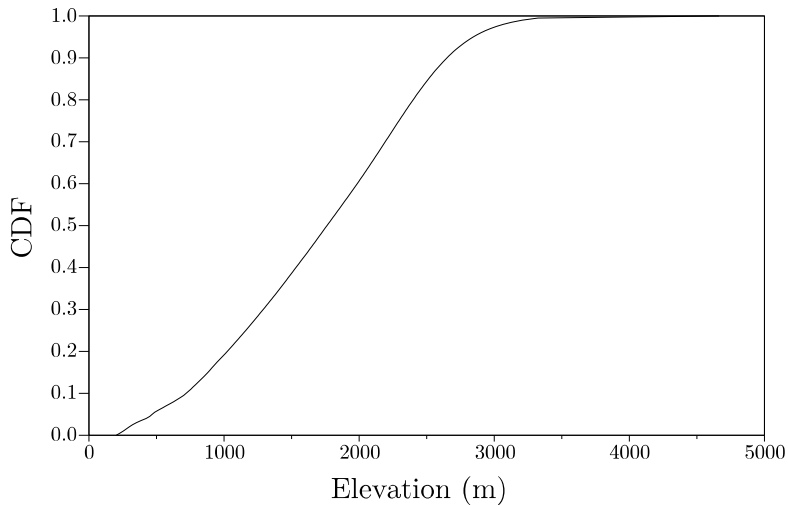
Échelle synoptique
 $> 1000 \text{ km}$
 $> 10^6 \text{ km}^2$

Méso-échelle
10–100 km
100–10000 km²

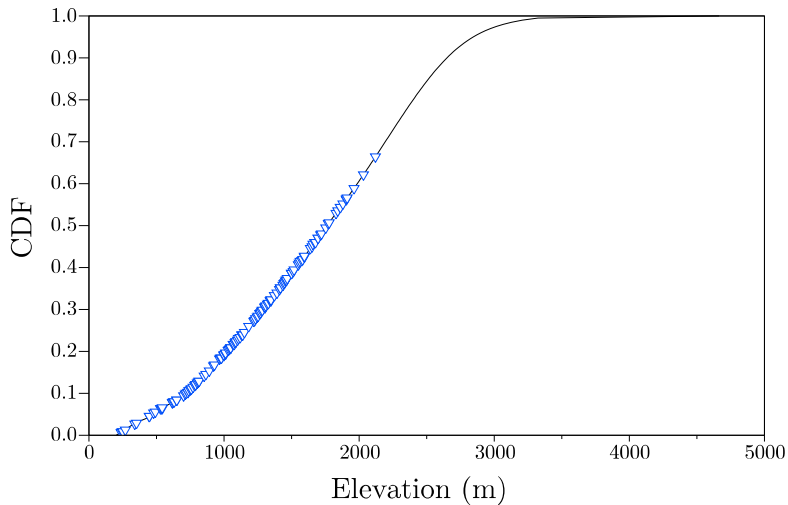
Micro-échelle
 $\sim 1 \text{ km}$
qques km²

- Problèmes :
 - Hétérogénéité sous-maille
 - Absence d'observations en altitude

Absence d'observations en altitude



Absence d'observations en altitude



Modélisation hydrologique de méso-échelle

- Résolution hydro-météorologique : $\sim 100 \text{ km}^2$
- Taille typique des sous-bassins élémentaires dans un modèle à base topographique (“semi-distribué”) sur un domaine de méso-échelle

Échelle synoptique
 $> 1000 \text{ km}$
 $> 10^6 \text{ km}^2$

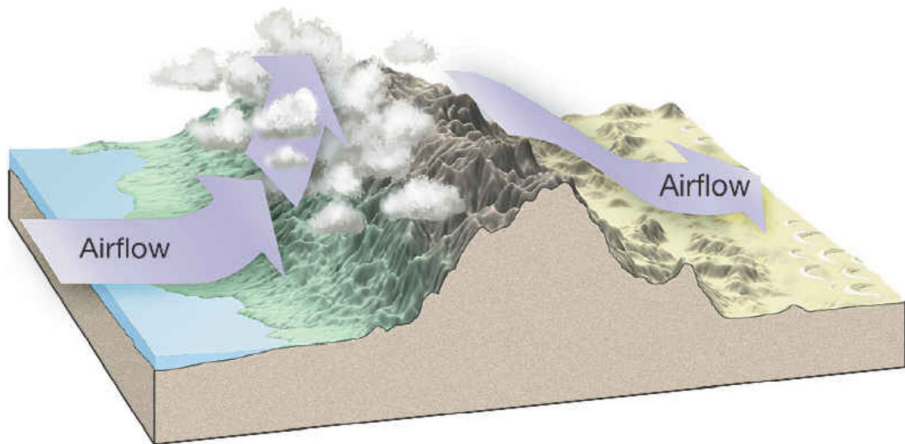
Méso-échelle
10–100 km
100–10000 km²

Micro-échelle
 $\sim 1 \text{ km}$
qques km²

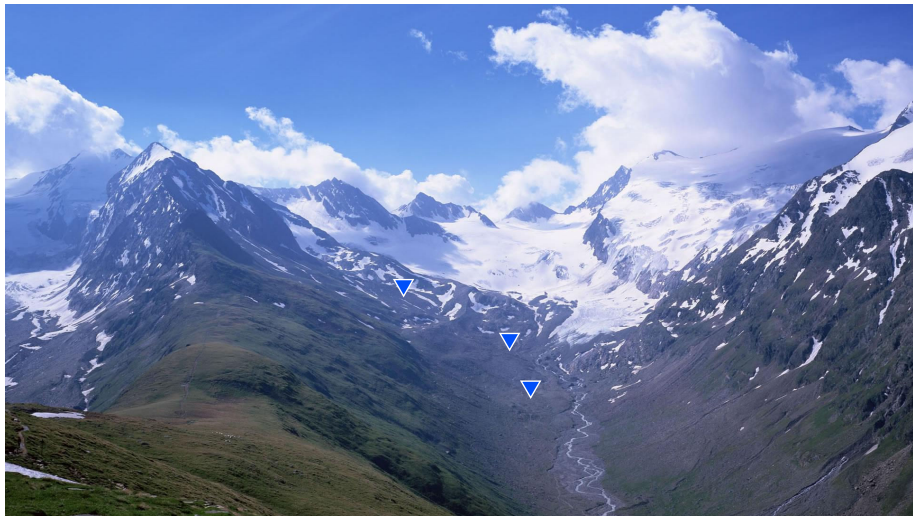
- Problèmes :
 - Hétérogénéité sous-maille $\Rightarrow$ INTERPOLATION en (x, y)
 - Absence d'observations en altitude $\Rightarrow$ EXTRAPOLATION en z

Forçage orographique des précipitations

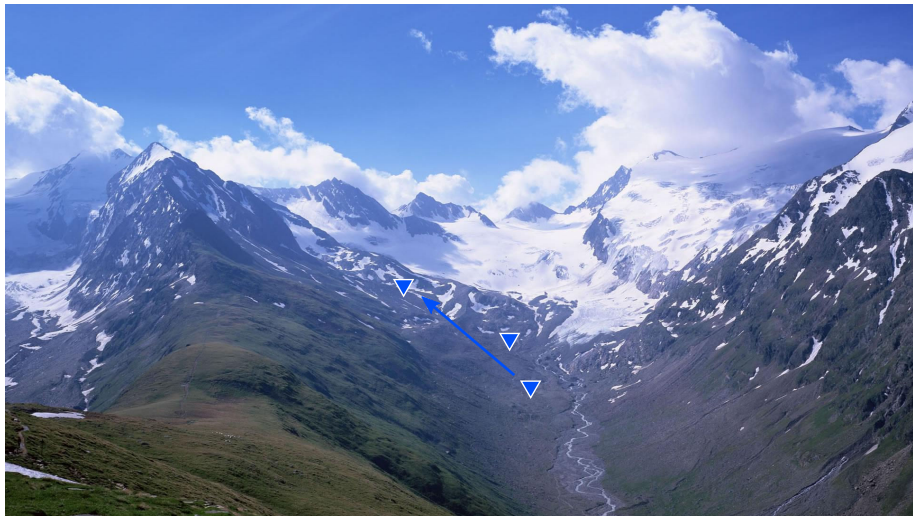
- Forçage orographique = effet de condensation provoquée par l'ascension forcée d'une parcelle d'air humide (détente adiabatique)



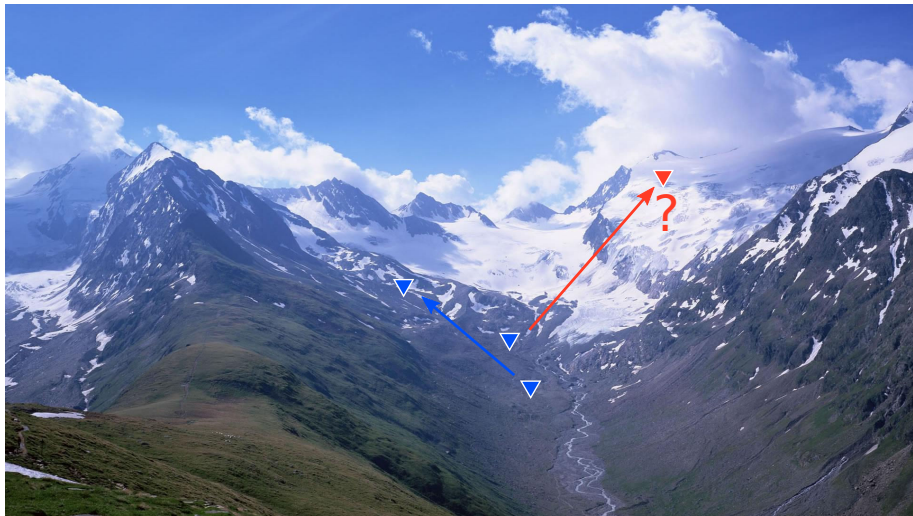
Comment interpoler ?



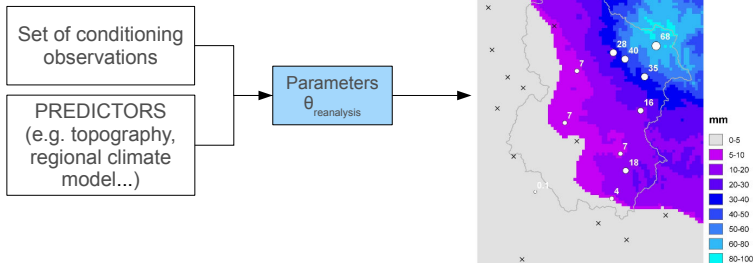
Comment interpoler ?



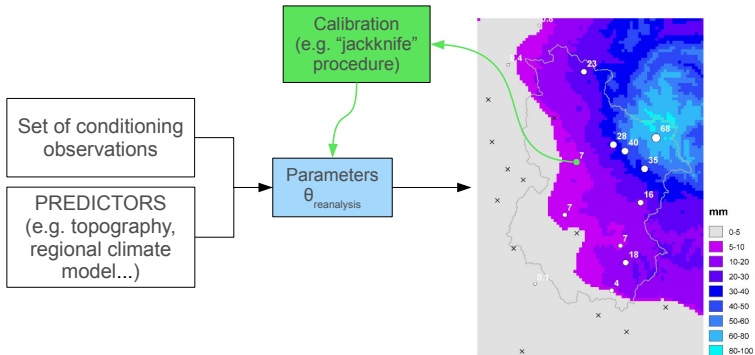
Comment interpoler ?



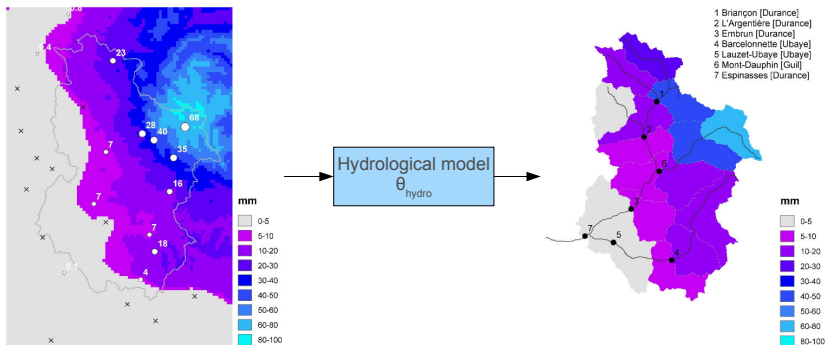
Approche séquentielle / Étape 1 : réanalyse météo



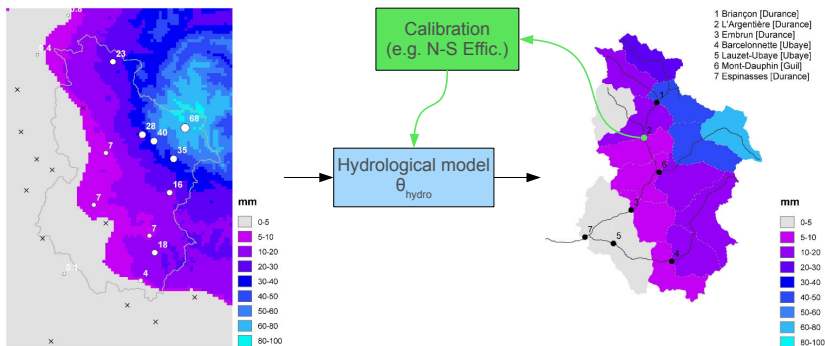
Approche séquentielle / Étape 1 : réanalyse météo



Approche séquentielle / Étape 2 : modélisation hydro

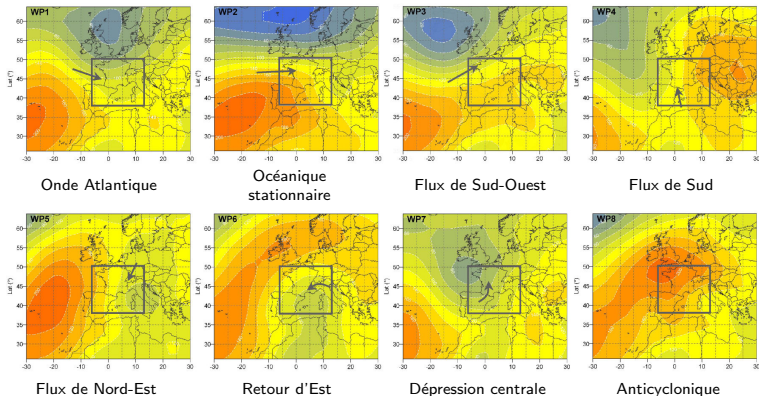


Approche séquentielle / Étape 2 : modélisation hydro



Formulation de l'interpolateur

- Chaque journée est classée dans un **type de temps**, selon la forme du géopotential à 1000 hPa à l'échelle synoptique (*Paquet et al.*, 2006 ; *Garavaglia et al.*, 2010)



Formulation de l'interpolateur (précipitations)

- Chaque jour, le champ de pluie est décomposé comme le produit d'une **ébauche** (*template* ou “*first guess*”) et d'un **facteur correctif** spatialement variable

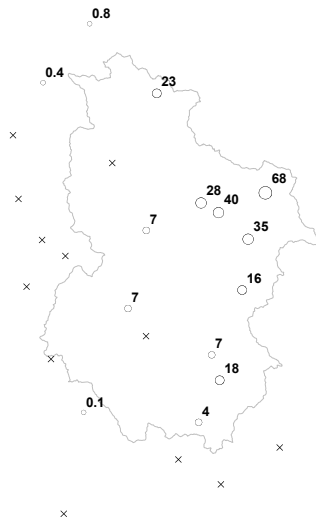
$$p(\mathbf{x}, j) = \lambda(\mathbf{x}, j) \cdot p_{\text{tt}(j)}^*(\mathbf{x})$$

Formulation de l'interpolateur (précipitations)

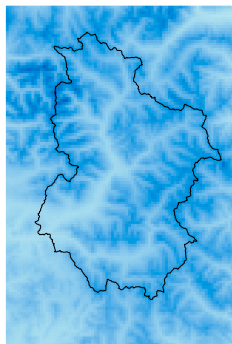
- Chaque jour, le champ de pluie est décomposé comme le produit d'une **ébauche** (*template* ou “*first guess*”) et d'un **facteur correctif** spatialement variable
- L'ébauche est elle-même le produit d'une **dérive** déterministe et d'un **residu**

$$p(\mathbf{x}, j) = \lambda(\mathbf{x}, j) \cdot p_{\text{tt}(j)}^*(\mathbf{x})$$
$$p(\mathbf{x}, j) = \lambda(\mathbf{x}, j) \cdot \overbrace{p_{\text{tt}(j)}^0 \exp\left(\frac{z(\mathbf{x})}{H_{\text{tt}(j)}}\right) \cdot r_{\text{tt}(j)}(\mathbf{x})}$$

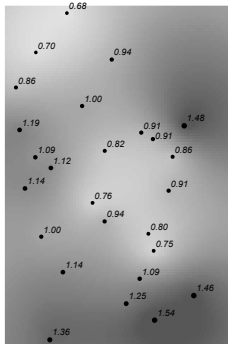
Exemple : champ de pluie du 1er Mars 1993 sur la Durance



Exemple : champ de pluie du 1er Mars 1993 sur la Durance

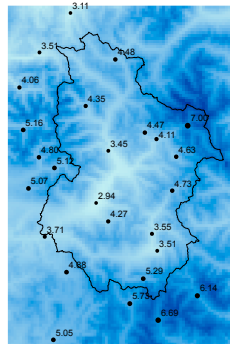


mm
10
3



Résidu

$$r_{tt(j)}(\mathbf{x})$$



mm
10
3

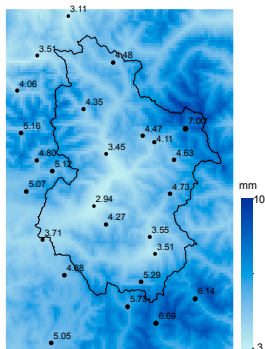
Ébauche

$$p_{tt(j)}^*(\mathbf{x})$$

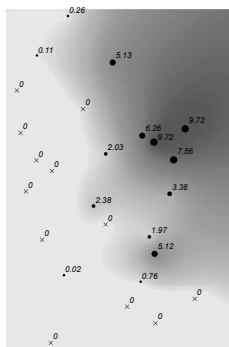
Dérive

$$p_{tt(j)}^0 \exp\left(\frac{z(\mathbf{x})}{H_{tt(j)}}\right)$$

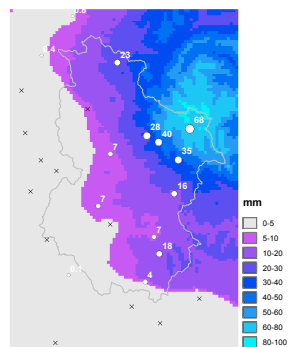
Exemple : champ de pluie du 1er Mars 1993 sur la Durance



Ébauche
 $p_{tt(j)}^*(\mathbf{x})$

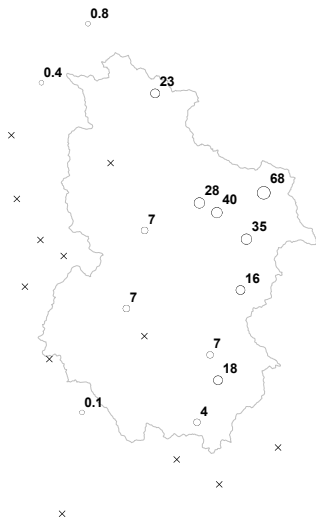


Facteur correctif
 $\lambda(\mathbf{x}, j)$



Champ journalier
 $p(\mathbf{x}, j)$

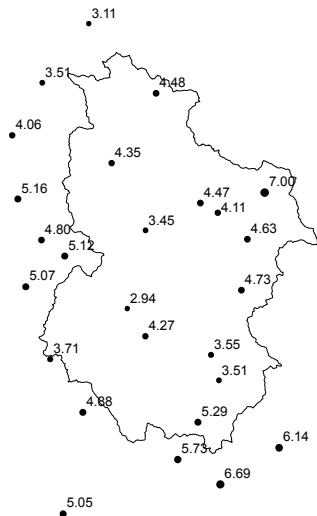
Exemple : champ de pluie du 1er Mars 1993 sur la Durance



- Circulation de type
"Retour d'Est" ($tt(j) = 6$)
- Première étape : construction de
l'ébauche pour le type de temps 6

$$p_6^*(\mathbf{x}) = p_6^0 \exp\left(\frac{z(\mathbf{x})}{H_6}\right) \cdot r_6(\mathbf{x})$$

Exemple : champ de pluie du 1er Mars 1993 sur la Durance

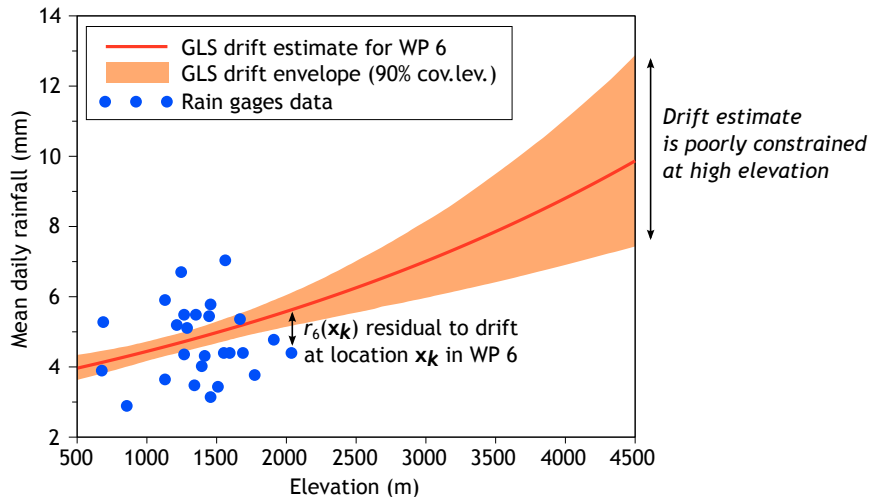


- Calcul du cumul journalier moyen à chaque poste pluvio pour toutes les journées de type 6 :

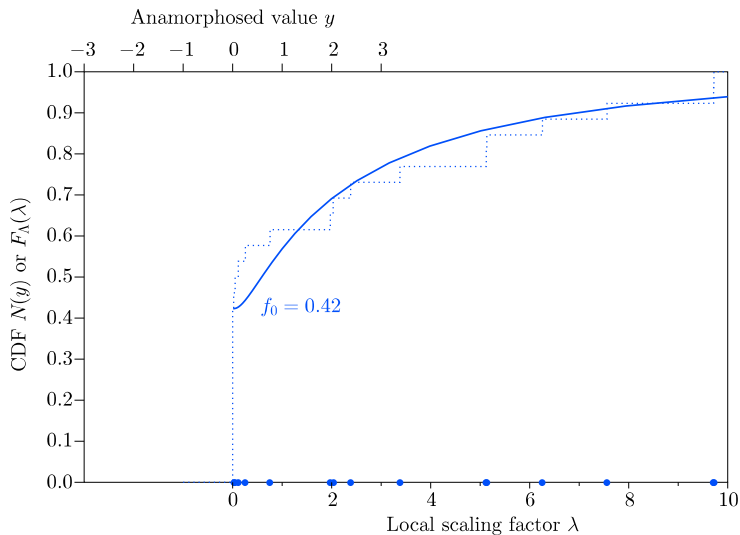
$$p_6^*(\mathbf{x}_k) = \frac{1}{N_6} \sum_{j/\text{tt}(j)=6} p(\mathbf{x}_k, j)$$

- Une façon possible d'estimer le paramètre de dérive H_6 : Moindres Carrés Généralisés (GLS) sur les $\left\{ z(\mathbf{x}_k) ; \ln p_6^*(\mathbf{x}_k) \right\}$

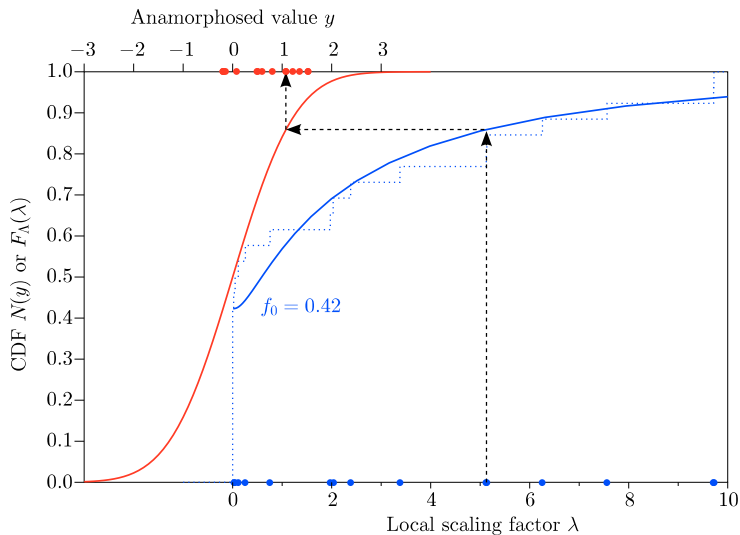
Le hic : estimation de la dérive



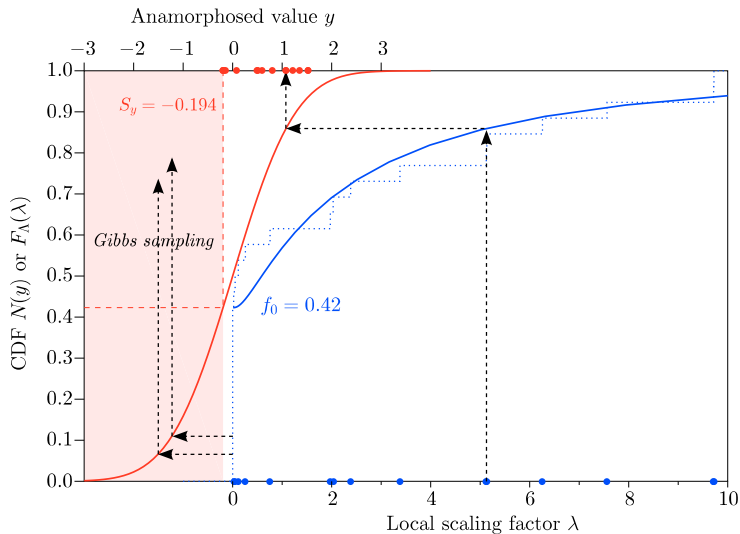
Krigeage du résidu journalier à la dérive : anamorphose gaussienne



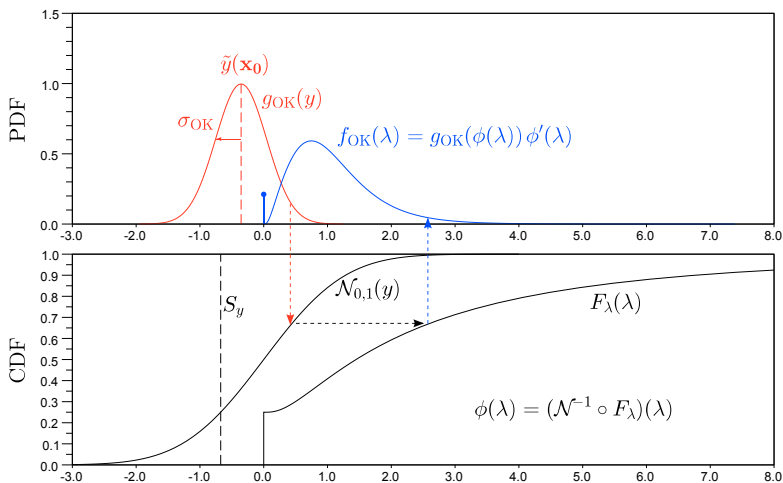
Krigage du résidu journalier à la dérive : anamorphose gaussienne



Krigage du résidu journalier à la dérive : anamorphose gaussienne



Anamorphose inverse après krigeage ordinaire (OK)



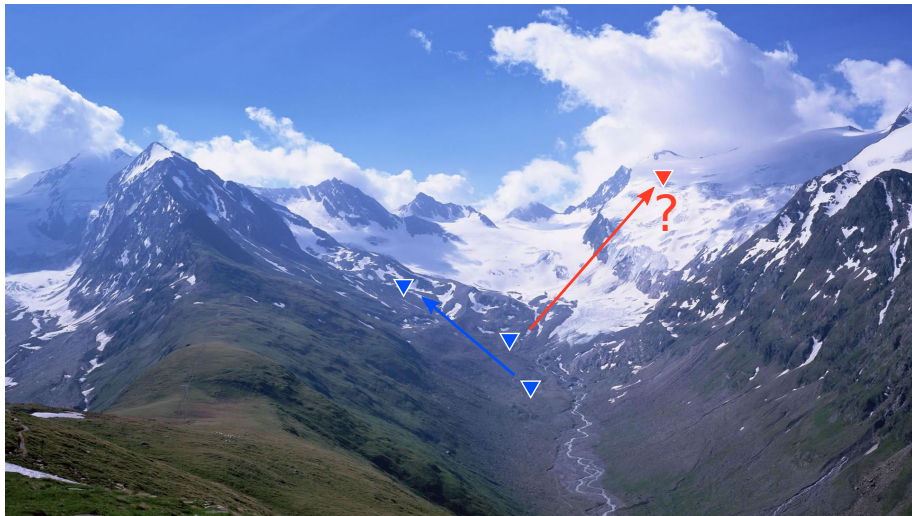
Formulation de l'interpolateur (température)

- On procède de façon similaire pour la température, avec un modèle additif (plus simple !)

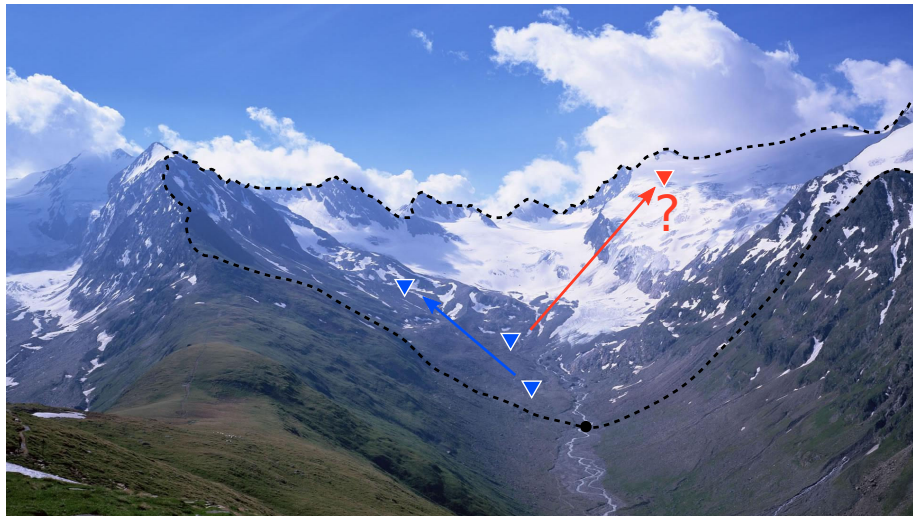
$$t(\mathbf{x}, j) = \delta(\mathbf{x}, j) + t_{\text{tt}(j)}^*(\mathbf{x})$$

$$t(\mathbf{x}, j) = \delta(\mathbf{x}, j) + \overbrace{\left[t_{\text{tt}(j)}^0 - \Gamma_{\text{tt}(j)} \cdot z(\mathbf{x}) \right]} + \varepsilon_{\text{tt}(j)}(\mathbf{x})$$

L'hydrologie à l'envers...



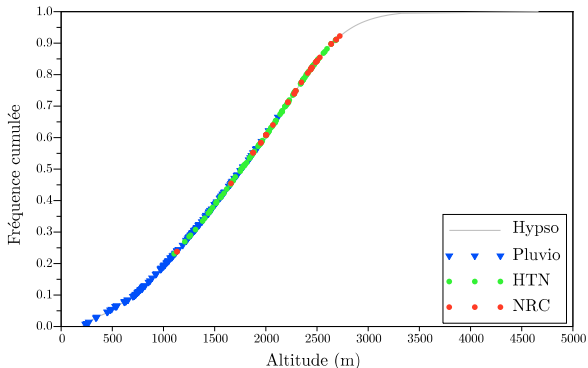
L'hydrologie à l'envers...



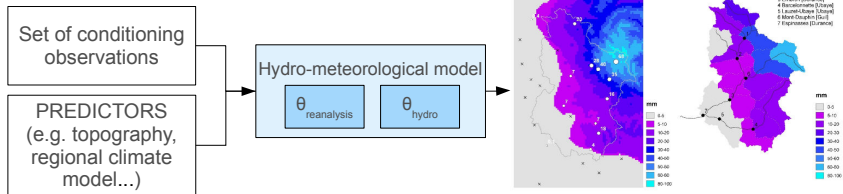
- Une manière de vérifier la cohérence des précipitations et températures réanalysées est de forcer un modèle hydro avec
- Le plus souvent effectué *a posteriori*
- La fermeture du bilan en eau à l'échelle du bassin est une forte **contrainte de bloc**, mais pas simple à implémenter :
 - la relation pluie-débit est hautement non-linéaire, surtout au pas de temps journalier dans des bassins de régime nival (variation de la phase des précipitations dans le bassin)
 - certains paramètres du modèle hydro doivent aussi être calés : dans les inconnues, on a **à la fois des entrées et des paramètres**

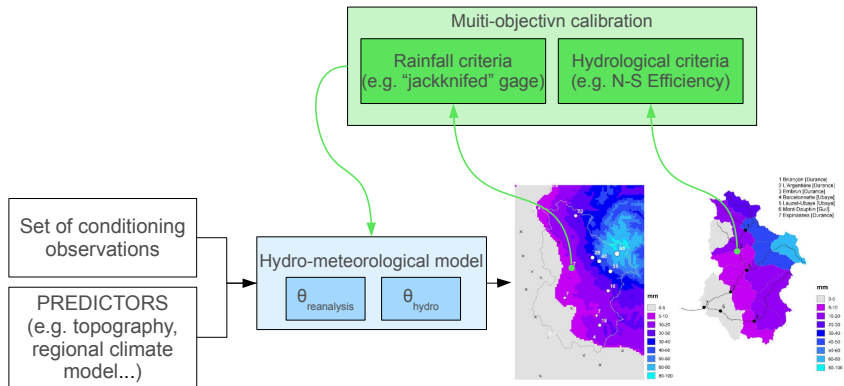
Contraintes additionnelles de support ponctuel

- Mesures **ponctuelles** de l'équivalent en eau ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$) ou de la hauteur du manteau neigeux (m)
- À nouveau, besoin du modèle hydro pour intégrer ces contraintes i.e. simuler l'EEN $W(\mathbf{x}, z, t)$ et/ou la masse volumique $\rho_{\text{snow}}(\mathbf{x}, z, t)$



Approche intégrée

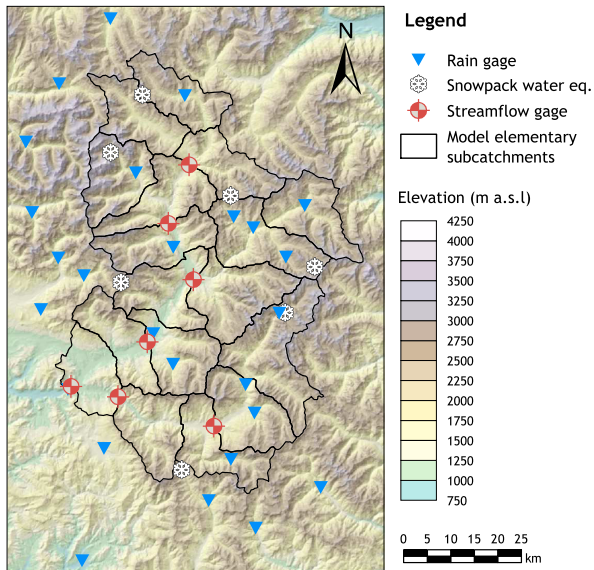




Estimation des paramètres par l'approche intégrée

- Difficulté principale : estimer les paramètres de dérive $H_1, \dots, H_8$ (hauteur caractéristique d'augmentation des précipitations avec z) et $\Gamma_1, \dots, \Gamma_8$ (gradients thermiques)
- L'approche intégrée permet de prendre simultanément l'ensemble des contraintes, que leur support soit **ponctuel** (postes pluvio de validation croisée, perches neige, etc.) ou **de bloc**
- On cale conjointement les paramètres de l'interpolateur et ceux du modèle pluie-débit, à l'aide d'un algorithme multi-objectif (inversion stochastique)

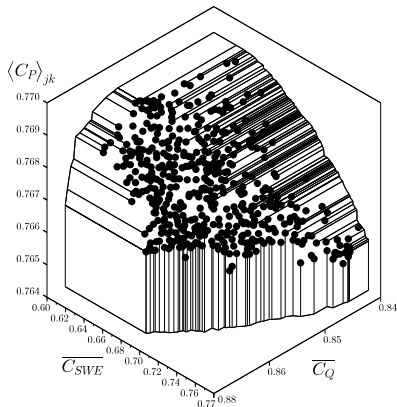
Estimation des paramètres par l'approche intégrée



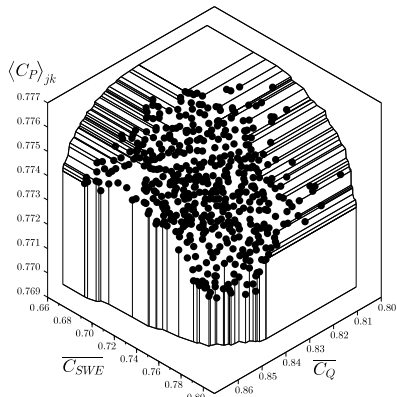
Exemple d'inversion sur 3 variables : calage

Débits (Q), Nivelles (SWE), Pluviomètres de validation croisée spatiale

Pareto front in calibration Aug 1982 – Jul 1993

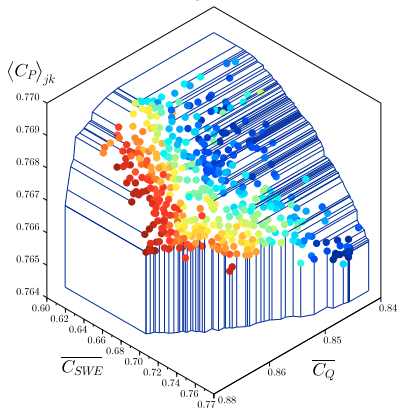


Pareto front in calibration Aug 1993 – Jul 2004

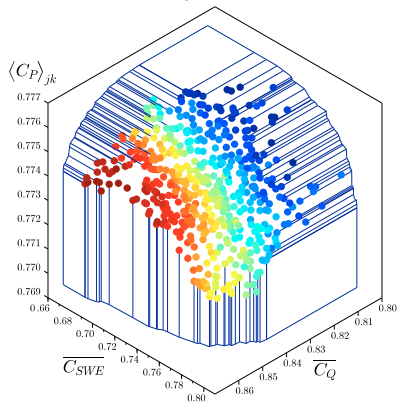


Résultats en validation croisée temporelle

Front de Pareto, calage Août 1982 – Juillet 1993



Front de Pareto, calage Août 1993 – Juillet 2004

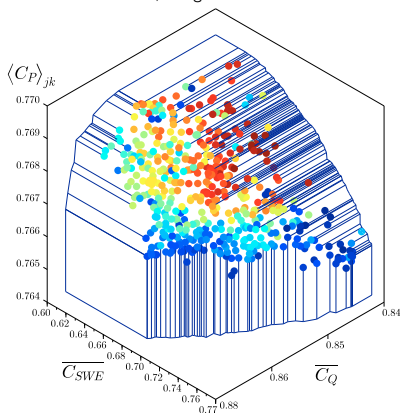


Lowest  Highest

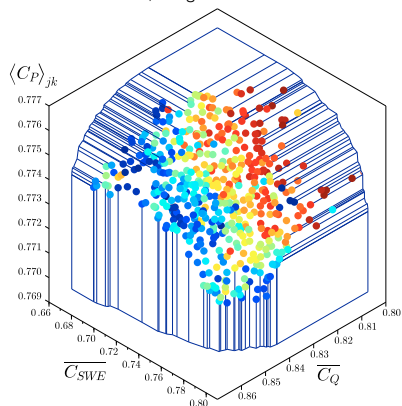
$\langle C_P \rangle_{jk}$ in the control period

Résultats en validation croisée temporelle

Front de Pareto, calage Août 1982 – Juillet 1993



Front de Pareto, calage Août 1993 – Juillet 2004

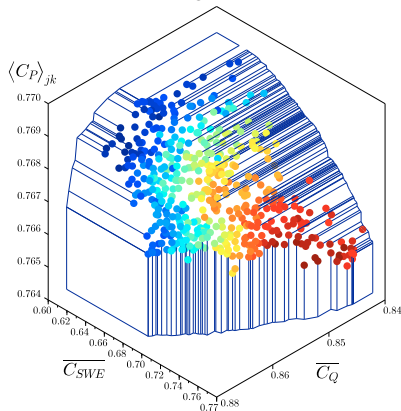


Lowest  Highest

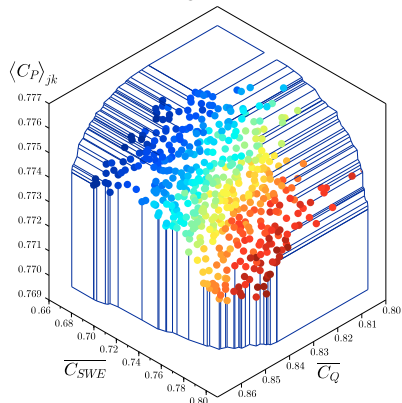
$\overline{C_Q}$ in the control period

Résultats en validation croisée temporelle

Front de Pareto, calage Août 1982 – Juillet 1993



Front de Pareto, calage Août 1993 – Juillet 2004



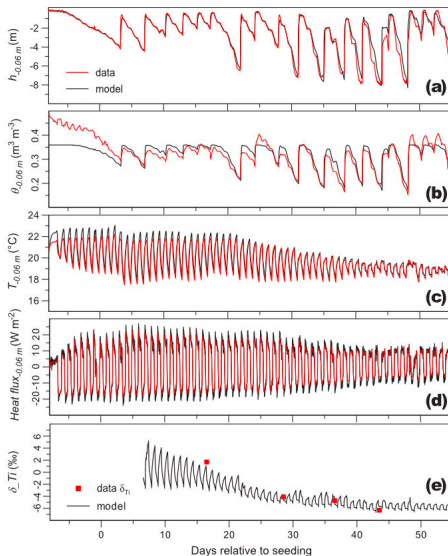
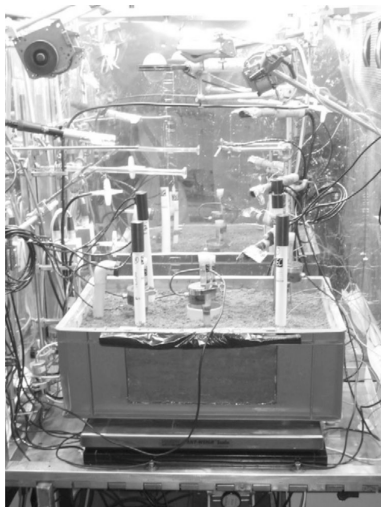
Lowest  Highest

$\overline{C_{SWE}}$ in the control period

Conclusions & Perspectives

- Complémentarité d'informations ayant différents supports spatiaux (ponctuel ou bloc) pour l'estimation des paramètres de l'interpolateur et du modèle pluie-débit
- Travaux en cours : test d'autres variables de contrainte : surfaces enneigées vues par télédétection, surfaces glaciaires (thèses C. Magand, P.S. Gsell), mesures radar ?
- Approche de réconciliation Modèle / Mesures applicable à d'autres problématiques que l'hydro de montagne !

Conclusions & Perspectives



Croissance d'une fétuque dans un monolithe de sol en milieu contrôlé, et simulations avec SiSPAT-Isotope (Rothfuss *et al.*, 2012)

Merci de votre attention !

nicolas.le_moine@upmc.fr