

**HYDRODEMO: Evaluation de l'aléa torrentiel**

Hydrologie et transport solide des petits bassins versants de montagne des Alpes du Nord



Juliette BLANCHET, François COLLEONI, Guillaume EVIN, Catherine FOUCHIER, Caroline LE BOUTEILLER, Alexandre MAS, Maxime MOREL, Loïc ORILLARD, Guillaume PITON, Alix REVERDY

**Partenaires**



Avec le soutien de



Organisation

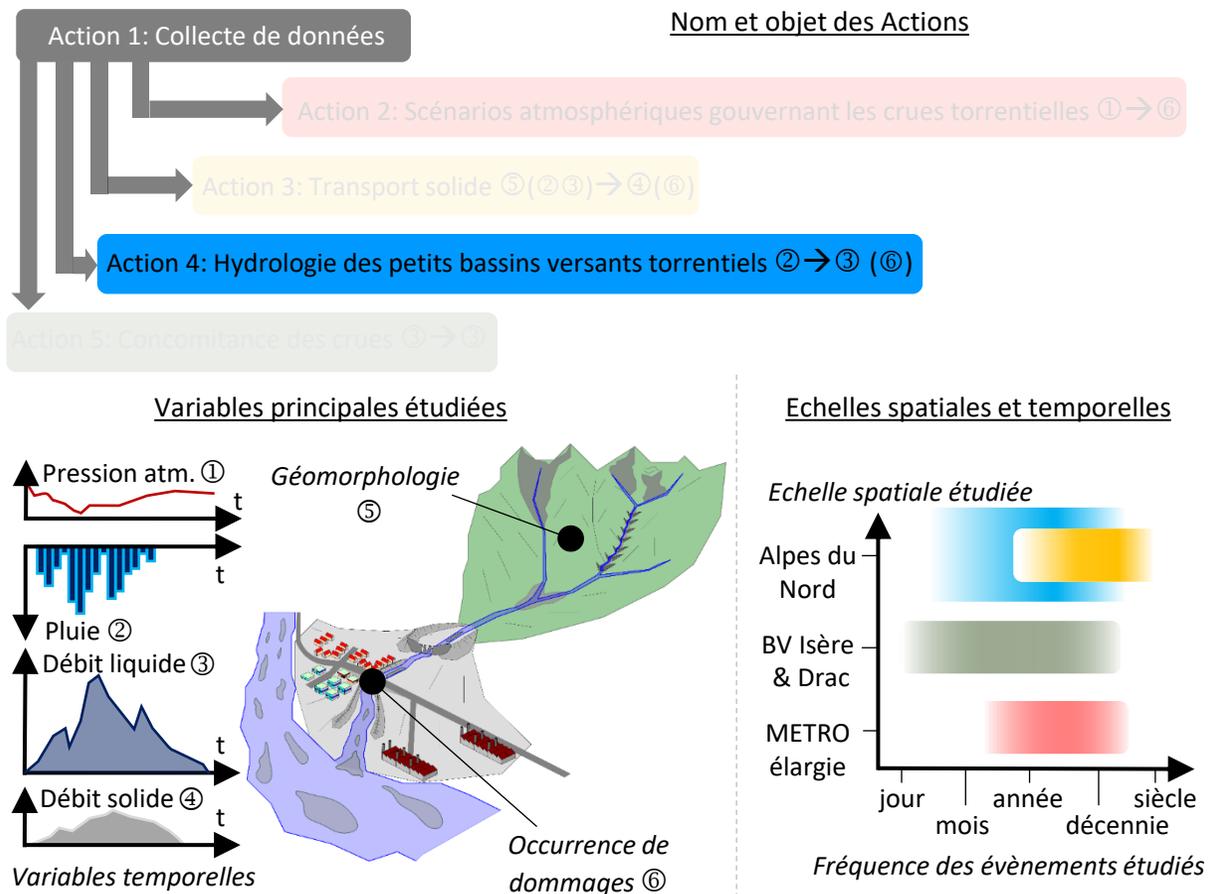


**Pôle Alpin Risques Naturels**

# Action 4: Caractériser l'hydrologie

**INRAE-RECOVER:** François Colléoni (IR), Supervision Catherine Fouchier

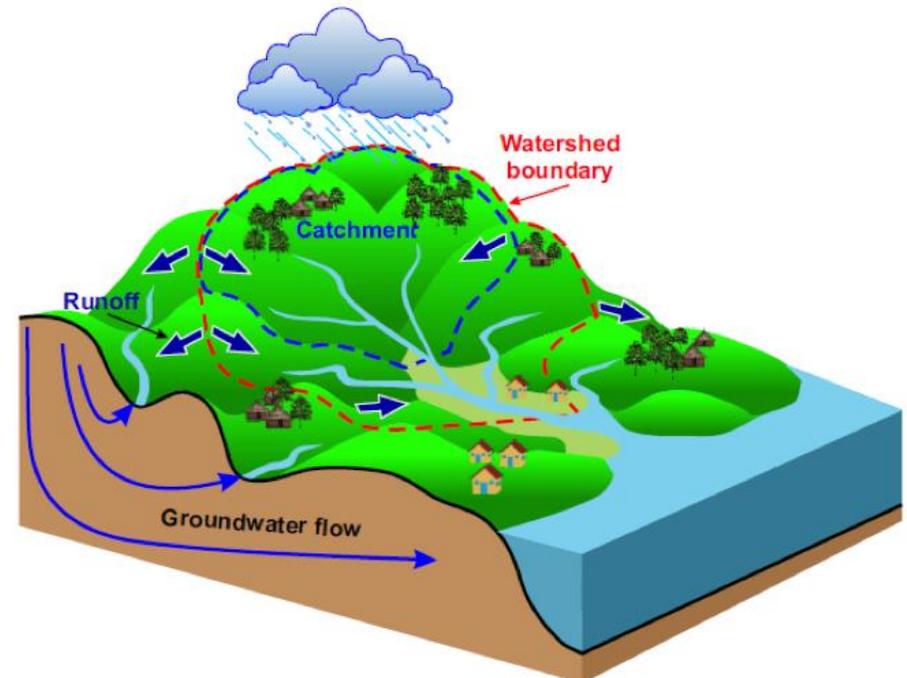
**INRAE-ETNA:** Alexandre Mas (IR), Supervision Guillaume Evin



- Des connaissances limitées du fonctionnement hydrologique des bassins versants torrentiels, principalement en raison de la limite des données disponibles
- Des approches pratiques « expertes » (SCS, Crupedix) peu renouvelées et parfois mal adaptées



- Utiliser les réanalyses météo disponibles et la modélisation hydrologique avancée comme outil support
- Proposer des estimateurs pour la prédétermination des quantiles de crues

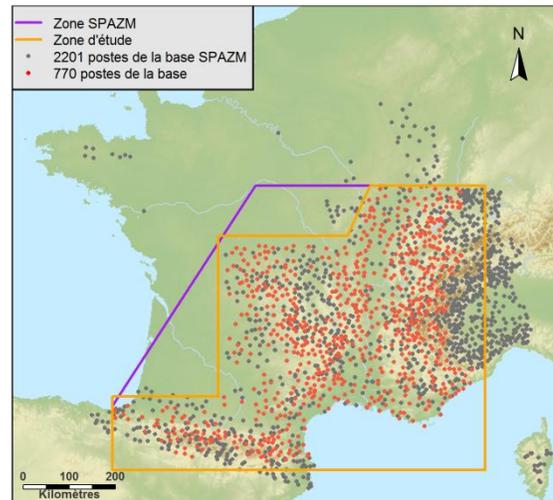


Source:

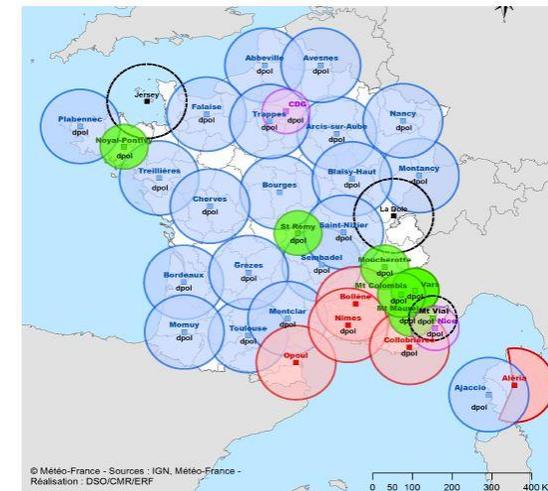
<http://www.catchmentguidelines.org.mw/en/catchment-management/what-catchment>

# Forçages météorologiques

	SPAZM	COMEPHORE
<b>Résolution</b>	km <sup>2</sup> journalier	km <sup>2</sup> horaire
<b>Méthode d'interpolation</b>	EDF-DTG: Réanalyse journalière par type de temps et gradient altitudinal	Météo-France: Compositage données radar et pluviomètres
<b>Disponibilité</b>	1958-2017	1997-2017
<b>Avantages</b>	Reproduit bien les bilans annuels en zone de montagne	Résolution horaire Evènements localisés
<b>Limites</b>	Peu d'évènements convectifs Nécessité de désagréger au pas de temps horaire	Faible visibilité des massifs intérieurs Non-homogénéité

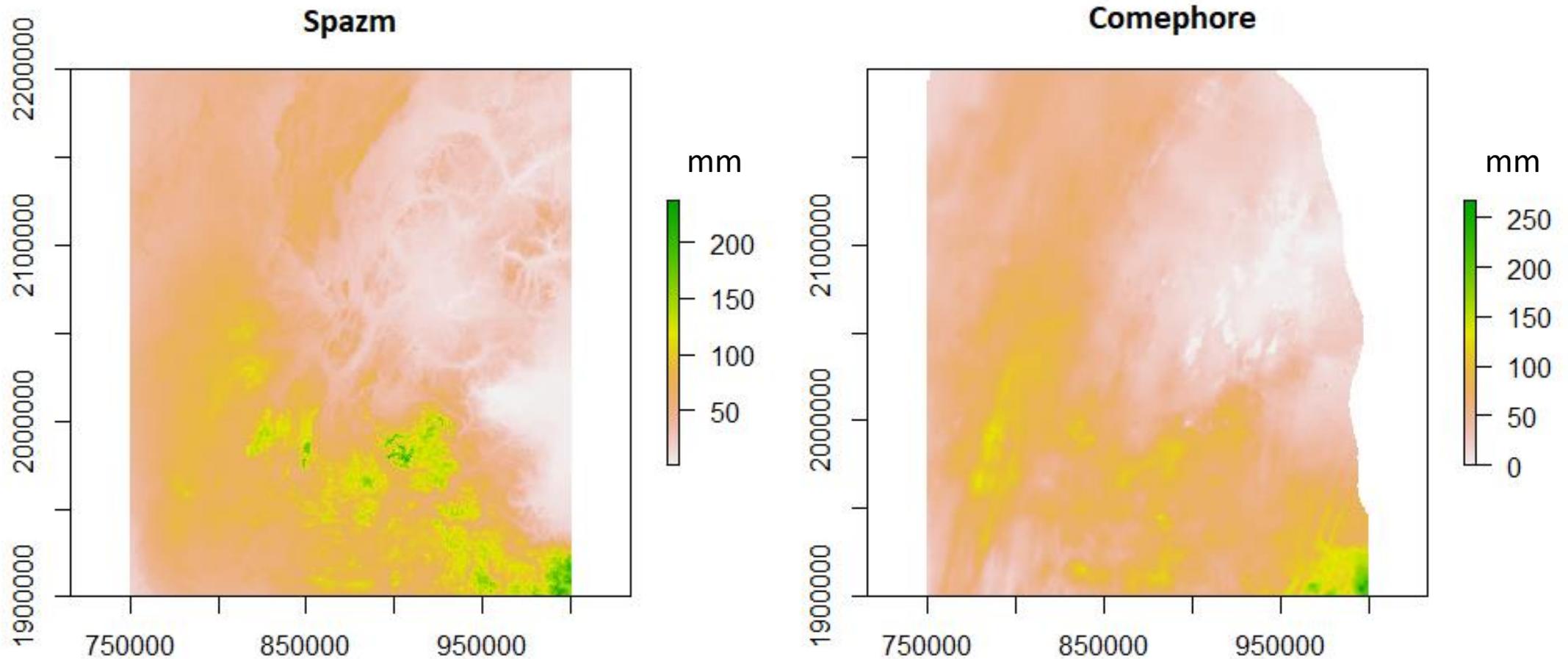


Source: Penot, 2014



Source : <http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/observer-le-temps/moyens/les-radars-meteorologiques>

# Forçages météorologiques

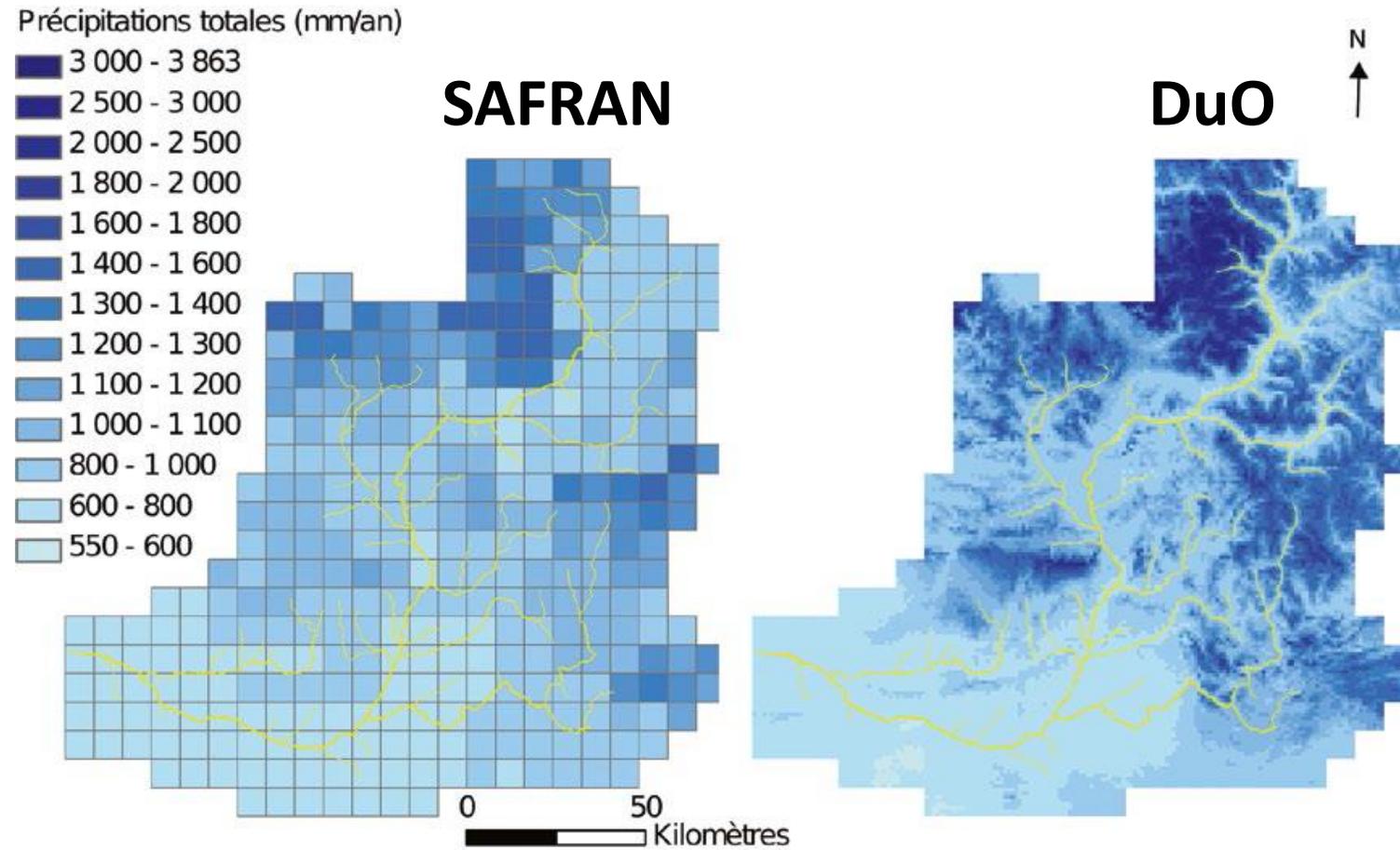


Exemples de champs de précipitations journaliers Spazm (gauche) et Comephore (droite) pour la journée du 04-11-2014.

# Forçages météorologiques

## Désagrégation des précipitations et températures SPAZM avec SAFRAN: Méthode DuO

*C. Magand, A. Ducharne, F. Tilmant, N. Le Moine, E. Sauquet, T. Mathevet, J.-P. Vidal and C. Perrin (2018)  
Hybridation de réanalyses météorologiques de surface pour les zones de montagne : exemple du produit DuO sur le bassin de la Durance, La Houille Blanche, 3: 77-85 DOI: <https://doi.org/10.1051/lhb/2018035>*



# Modélisation hydrologique: MORDOR-SD

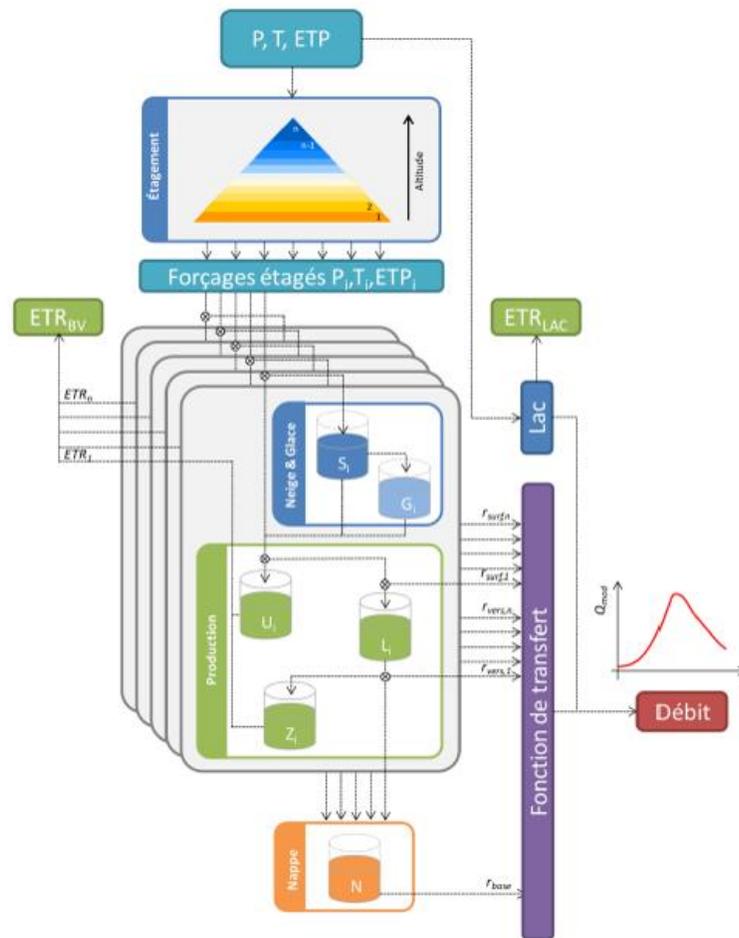


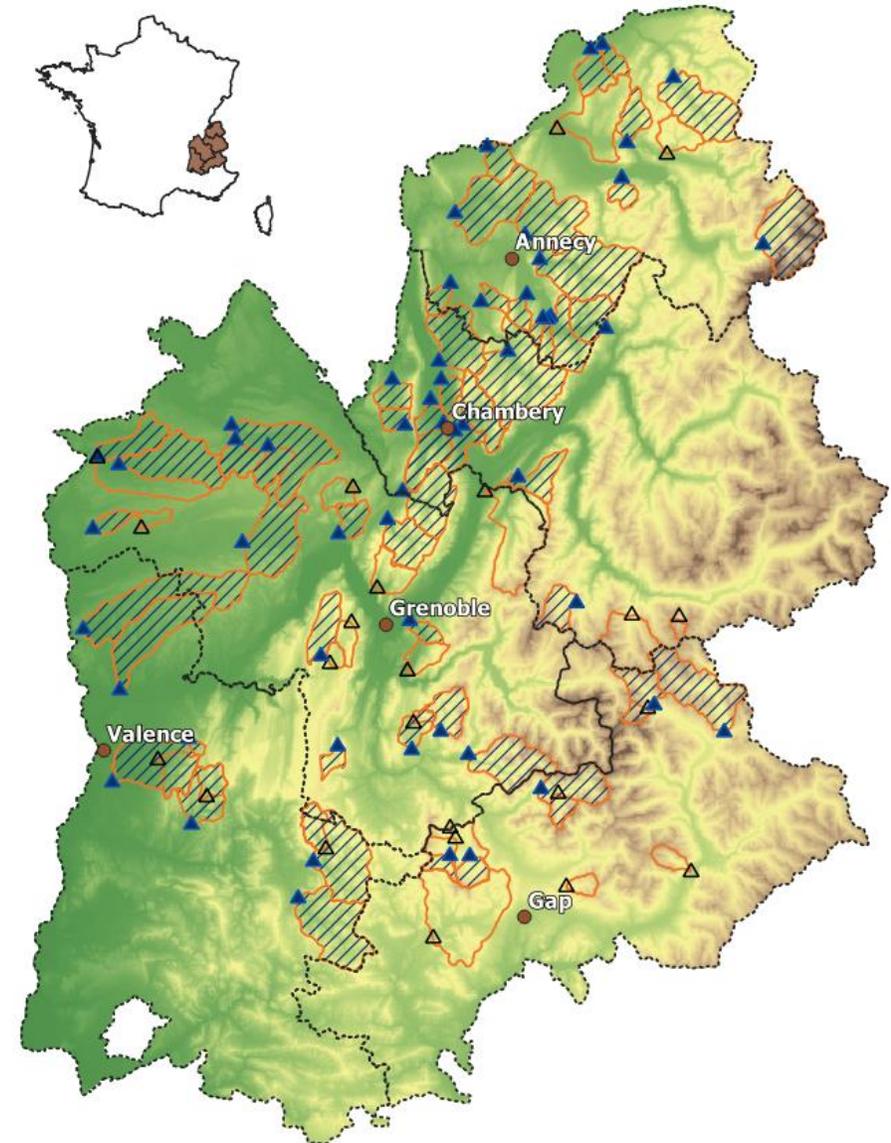
Figure 1 : Schéma fonctionnel de MORDOR SD.

- Modèle hydrologique semi-distribué MORDOR-SD (Garavaglia et al. 2017)
- 21 paramètres libres (hors glace)
- Modules neige et glace
- Calibration multicritères (séries de débits, saisonnalité des débits, variance des débits et des extrêmes)
- Régionalisation à développer

Garavaglia, F., M. Le Lay, F. Gottardi, R. Garçon, J. Gailhard, E. Paquet, et T. Mathevet. « Impact of Model Structure on Flow Simulation and Hydrological Realism: From a Lumped to a Semi-Distributed Approach ». *Hydrology and Earth System Sciences* 21, n° 8 (1 août 2017): 3937-52. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3937-2017>.

# Modélisation hydrologique: application sur bassins jaugés

- 79 bassins versants « Alpes du Nord » (Banque Hydro + EDF)
- Echantillon large, représentatif de conditions variées
- Surface : 8 à 300 km<sup>2</sup>
- Altitude médiane : 270 à 2500 mètres
- Quelques bassins glaciaires



# Modélisation hydrologique: application sur bassins jaugés

Module	Paramètres	Description [unité]	Calage HYDRODEMO	Valeur ou plage de recherche
Forçages	cp	Coefficient correctif des précipitations [-]	Oui	[0.6 , 2]
	csbv	Coefficient correctif de la superficie du bassin versant [-]	Indépendant	[0.1 , 2]
	cetp	Coefficient correctif de l'ETP [-]	Non	1
	gtz	Gradient altitudinal de température [°C/100m]	Oui	[-0.8 , -0.4]
	gpz	Gradient altitudinal de précipitation [%/km]	Oui	[0.1 , 0.7]
Production	kmin	Coefficient cultural minimal [-]	Non	1
	umax	Capacité à un pas de temps du réservoir superficiel U [mm]	Oui	[30 , 300]
	lmax	Capacité à un pas de temps du réservoir intermédiaire L [mm]	Oui	[30 , 300]
	zmax	Capacité à un pas de temps du réservoir évaporant Z [mm]	Non	umax
	evl	Exposant de la vidange du réservoir intermédiaire L [-]	Oui	[1.5 , 4]
	kr	Clé de répartition entre les écoulements retardés et lents [-]	Oui	[0.1 , 0.9]
Transfert	cel	Célérité de l'onde de propagation [km/h]	Oui	[0.1 , 5]
	dif	Diffusion de l'onde de propagation [km²/h]	Oui	[0.1 , 5]
Ecoulements lents	lkn	Logarithme du coefficient de tarissement du réservoir profond N [mm/h]	Oui	[-6 , -1]
	evn	Exposant de la vidange du réservoir profond N [-]	Non	3
Neige	kf	Part fixe du coefficient de fonte superficielle [mm/°C]	Oui	[0 , 5]
	kfp	Part variable du coefficient de fonte superficielle [mm/°C]	Non	0.5
	eft	Correction additive de la température de fonte [°C]	Oui	[-3 , 3]
	efp	Correction additive de la température de partition pluie/neige [°C]	Oui	[-3 , 3]
	lts	Lissage exponentiel de la température du stock de neige [-]	Non	0.96
	gm	Lame de fonte basale [mm]	Non	0.6
Glace	kg	Part fixe du coefficient de fonte glaciaire [mm/°C]	Oui	[0 , 8]
	kgp	Part variable du coefficient de fonte glaciaire [mm/°C]	Non	0
	efg	Correction additive de la température de fonte glaciaire [°C]	Oui	[-3 , 3]

# Modélisation hydrologique: application sur bassins jaugés

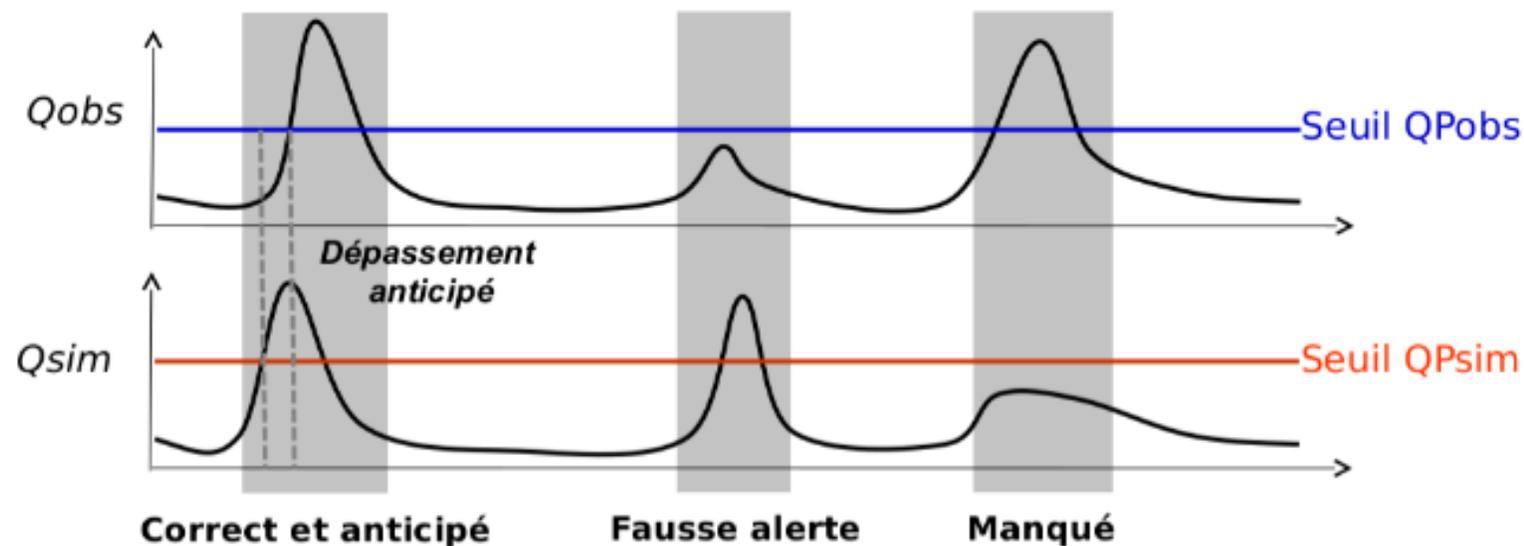
Module	Paramètres	Description [unité]	Calage HYDRODEMO	Valeur ou plage de recherche
Forçages	cp	Coefficient correctif des précipitations [-]	Oui	[0.6, 2]
	csbv	Coefficient correctif de la superficie du bassin versant [-]	Indépendant	[0.1, 2]
	cetp	Coefficient correctif de l'ETP [-]	Non	1
	gtz	Gradient altitudinal de température [°C/100m]	Oui	[-0.8, -0.4]
	gpz	Gradient altitudinal de précipitation [%/km]	Oui	[0.2, 0.7]
Production	knin	Coefficient cultural minimal [-]	Non	1
	umax	Capacité à un pas de temps du réservoir superficiel U [mm]	Oui	[30, 300]
	lmax	Capacité à un pas de temps du réservoir intermédiaire L [mm]	Oui	[30, 300]
	zmax	Capacité à un pas de temps du réservoir évaporant Z [mm]	Non	umax
	evl	Exposant de la vidange du réservoir intermédiaire L [-]	Oui	[1.5, 4]
	kr	Clé de répartition entre les écoulements retardés et lents [-]	Oui	[0.1, 0.9]
Transfert	cel	Célérité de l'onde de propagation [km/h]	Oui	[0.1, 5]
	dif	Diffusion de l'onde de propagation [km²/h]	Oui	[0.1, 5]
Écoulements lents	lkn	Logarithme du coefficient de tarissement du réservoir profond N [mm/h]	Oui	[-6, -1]
	evn	Exposant de la vidange du réservoir profond N [-]	Non	3
Neige	kf	Part fixe du coefficient de fonte superficielle [mm/°C]	Oui	[0, 5]
	kfp	Part variable du coefficient de fonte superficielle [mm/°C]	Non	0.5
	eft	Correction additive de la température de fonte [°C]	Oui	[-3, 3]
	efp	Correction additive de la température de fonte [pluie/neige] [°C]	Oui	[-3, 3]
	lts	Exposant de la température du stock de neige [-]	Oui	0.96
	gm	Lame de fonte basale [mm]	Non	0.6
Glace	kg	Part fixe du coefficient de fonte glaciaire [mm/°C]	Oui	[0, 8]
	kgp	Part variable du coefficient de fonte glaciaire [mm/°C]	Non	0
	efg	Correction additive de la température de fonte glaciaire [°C]	Oui	[-3, 3]

13 paramètres calés

+ 2 par. « glace »

# Evaluation des performances sur bassins jaugés

- Exercices calage-validation
- Critères NSE et KGE sur les débits, le régime, les débits classés
- Critères de contingence: Evaluation de la performance du modèle en terme de temporalité des évènements basé sur les dépassements de seuil



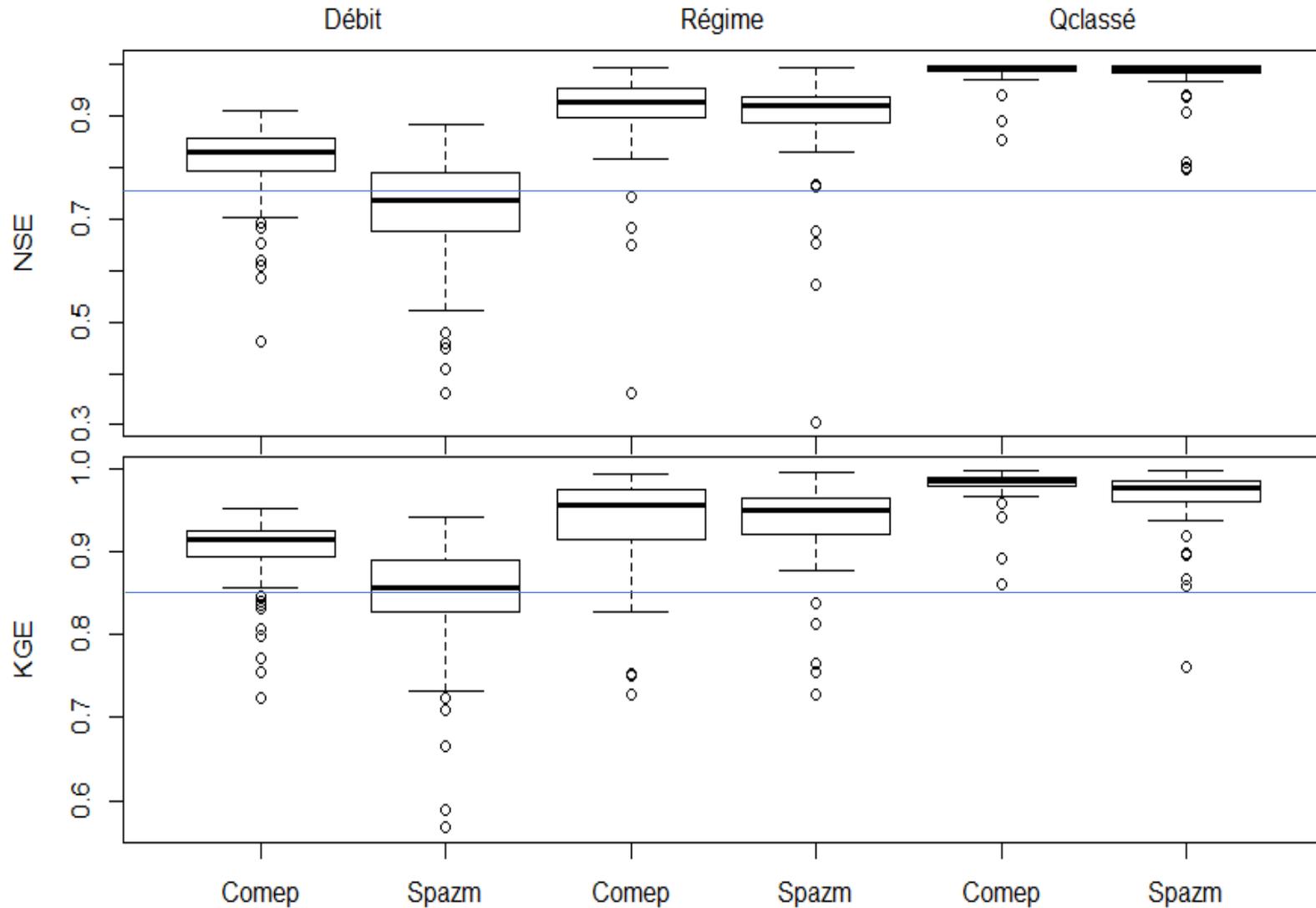
$$POD = \frac{BA}{BA + AM}$$

$$FAR = \frac{FA}{BA + FA}$$

$$CSI = \frac{BA}{BA + FA + AM}$$

# Calage de MORDOR SD

## Performances globales



### Bilan :

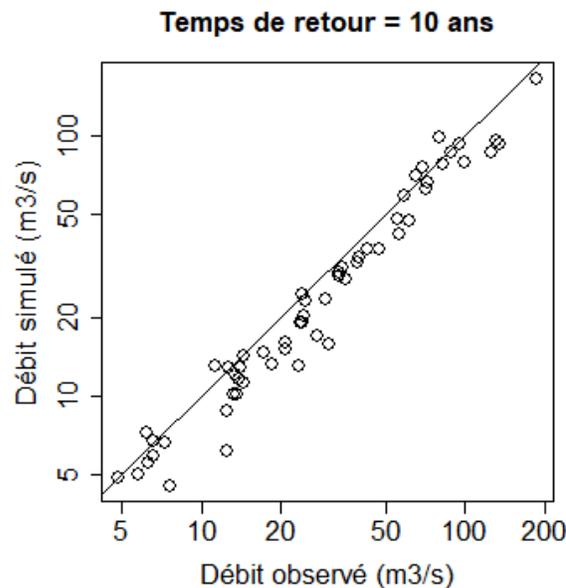
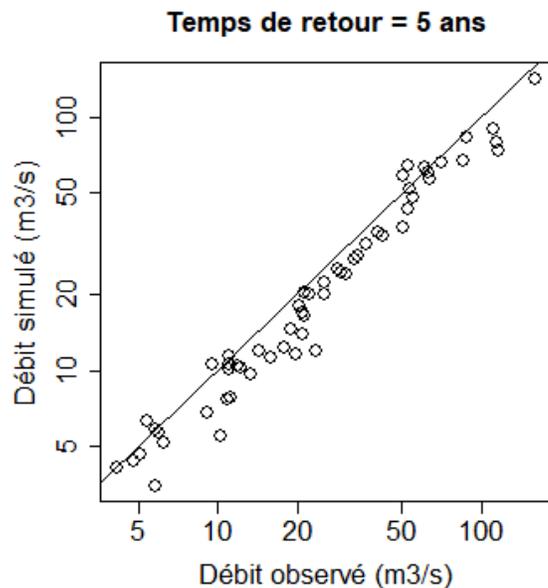
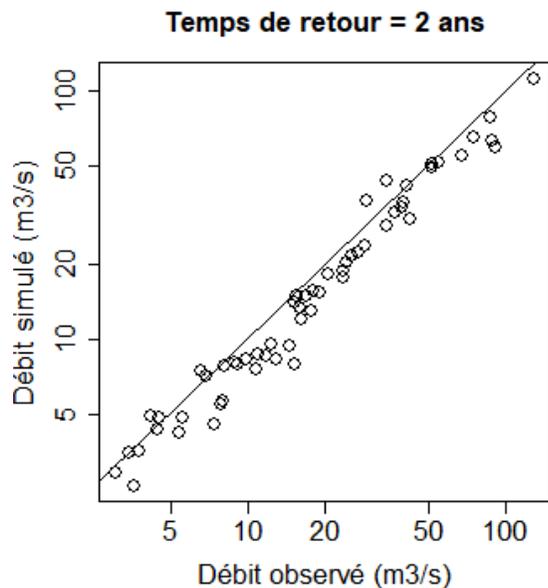
- Bonnes performances avec les deux forçages

- Peu de bassins problématiques

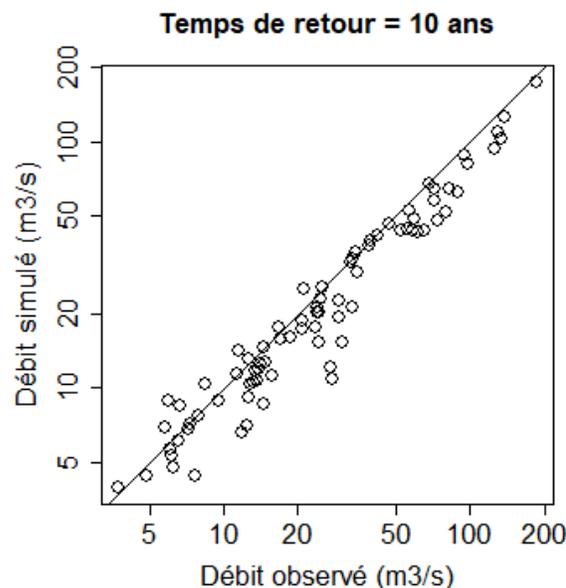
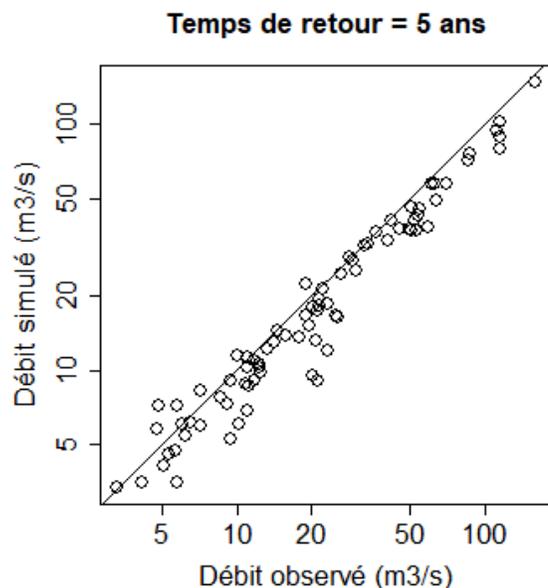
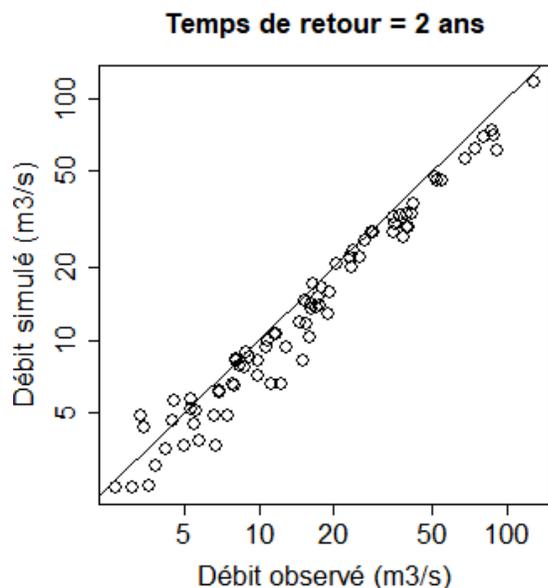
- Meilleures performances avec Comephore

# Prédétermination des caractéristiques de crues

**COMEPHORE**



**SPAZM**



Débits  
décennaux  
généralement  
sous-estimés

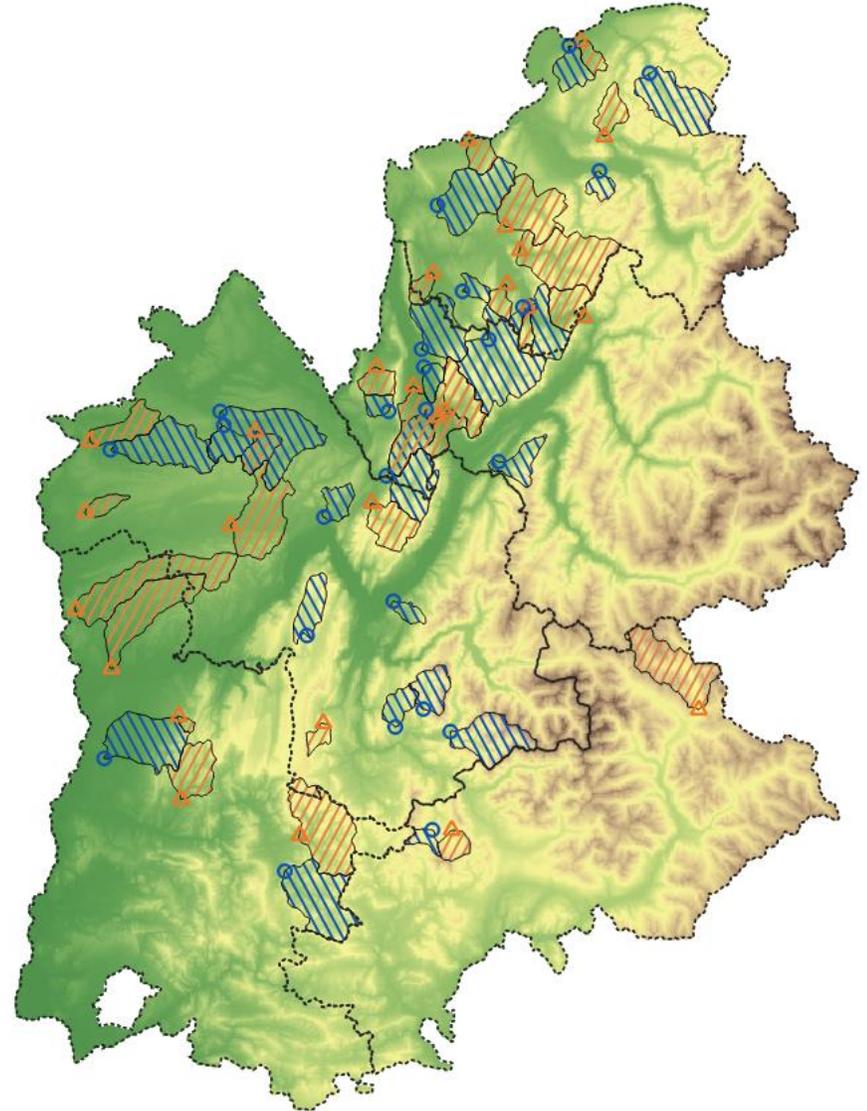


# Régionalisation des paramètres

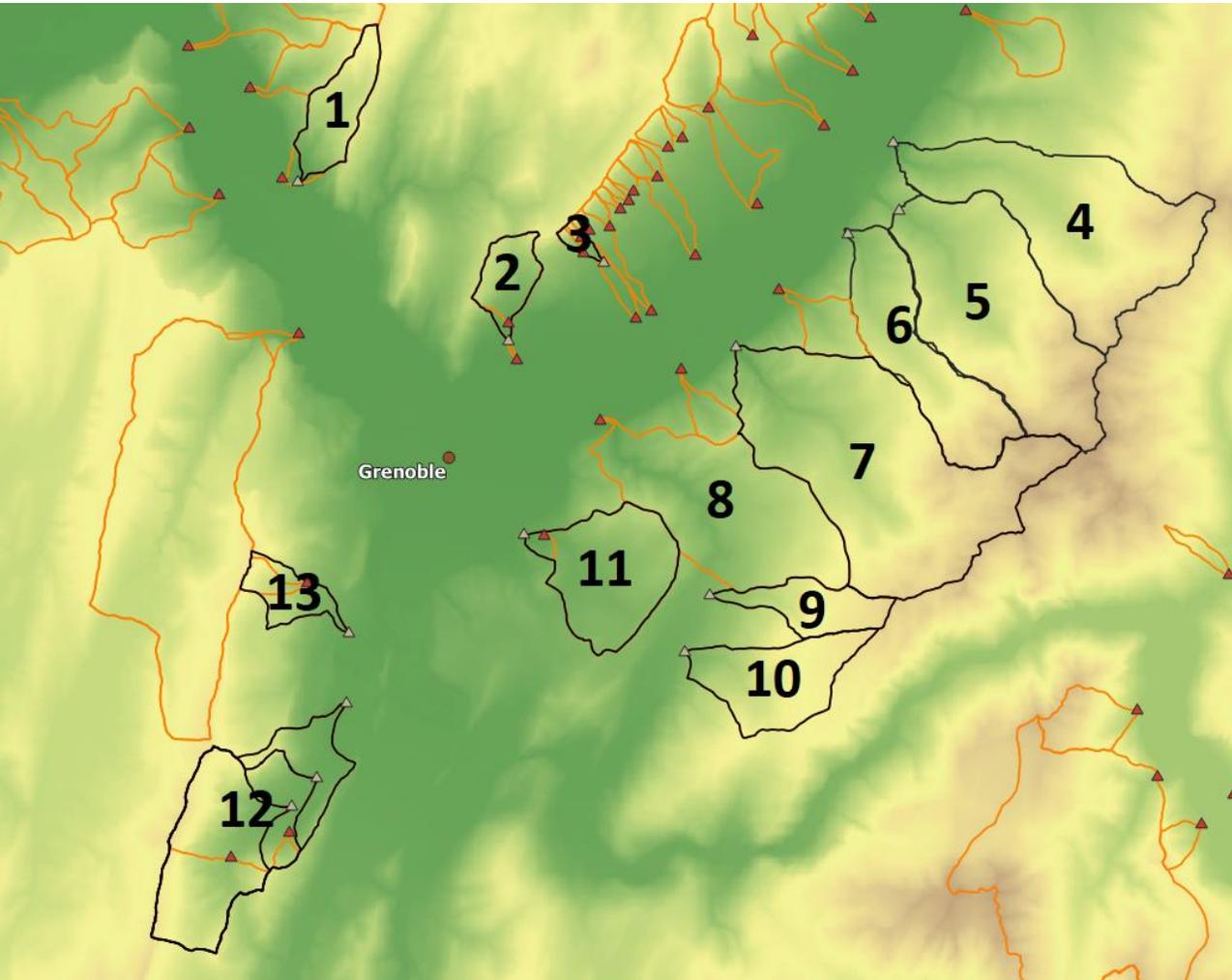
## 3 stratégies de transfert pour les paramètres à régionaliser

Sur les deux groupes de 26 bassins versants, on teste les performances avec le:

1. Jeu de paramètres **médian**,
2. Jeu de paramètres du bassin le plus **similaire** selon des critères de surface, altitude et de distance,
3. Jeu de paramètre « **optimal** » -> le jeu qui donne les meilleurs performances en moyenne sur tous les bassins « donneurs ».



# Zoom sur 13 bassins GAM - Grésivaudan



Identifiant	Nom	Surface (km2)
1	Le Lanfrey au Fontanil	6.4
2	Le Charmeyran à La Tronche	4.4
3	Torrent de Jailleres à Montbonnot	0.88
4	Ruisseau de Laval à Brignoud	31.7
5	Le Vorz à Sainte-Agnès	32
6	Ruisseau de Lancey à Villard Bonnot	16.9
7	Le Domeynon à Domène	46.2
8	Le Sonnant à Gières	26.3
9	Le Vernon à Vaulnaveys le Haut	6.1
10	Le Premol à Vaulnaveys le Bas	11.6
11	Le Verderet à Eybens	14.8
12	Le Lavanchon à St Paul de Varcès [Maubourg]	16.2
13	Le Rif Talon à Claix	4.1

# Zoom bassins Métro - Grésivaudan

- Estimations Q10 avec plusieurs méthodes

Bassin	Surface (km <sup>2</sup> )	Shyreg	Mordor (Comephore)	Mordor (Spazm)	Crupedix (Comephore)	Crupedix (Spazm)	Valeur/plage litt.
Lanfrey	6.4	5.2	3.6	2.2	6.2	3.7	6.6 - 9 <sup>1</sup>
Charmeyran	4.4	4.8	1.9	1.4	2.3	1.8	
Torrent de Jailleres	0.88	0.4	0.49	0.37	0.65	0.58	
Ruisseau de Laval	31.7	16	20.5	17.2	11.9	20.5	20 <sup>2</sup>
Vorz	32	16	20.4	16.7	15.7	22.6	17.5 <sup>2</sup>
Ruisseau de Lancey	16.9	7.8	11.3	8.9	9.3	12.6	15 <sup>2</sup>
Domeynon	46.2	17.5	29.9	23.4	22.7	28.9	30 <sup>2</sup>
Sonnant	25.8	8.8	7.7	7.4	7.6	8.7	16 <sup>3</sup>
Vernon	6.1	2.7	3.8	3	5.2	5.4	4 <sup>3</sup>
Premol	11.6	3.2	6.3	5.1	7.2	7.1	7.0 <sup>3</sup>
Verderet	14.8	4.6	3	2.9	4	4.1	9.2 - 10.5 <sup>4</sup>
Lavanchon	16.2	4.6	8.9	5.3	7.8	8.6	
Rif Talon	4.1	0.9	1.7	1.1	2.3	2.3	

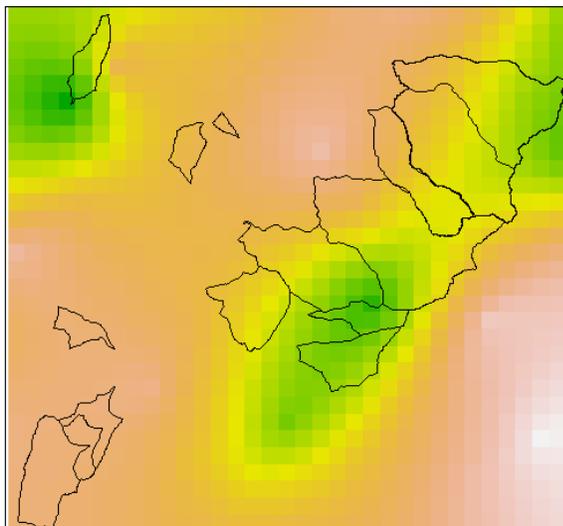
- Q10 spécifique  $\approx 0.6 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$
- Incertitude principale = précipitations

Estimations du débit de pointe de temps de retour 10 ans (en m<sup>3</sup>/s) avec Shyreg, MORDOR-SD et Crupedix et valeurs trouvées dans la littérature. Les exposants renvoient aux références bibliographiques (<sup>1</sup>Hydretudes(2012a); <sup>2</sup>Alp'Géorisques(2007); <sup>3</sup>TEREO - Hydretudes(2013); <sup>4</sup>Hydretudes(2012c)).

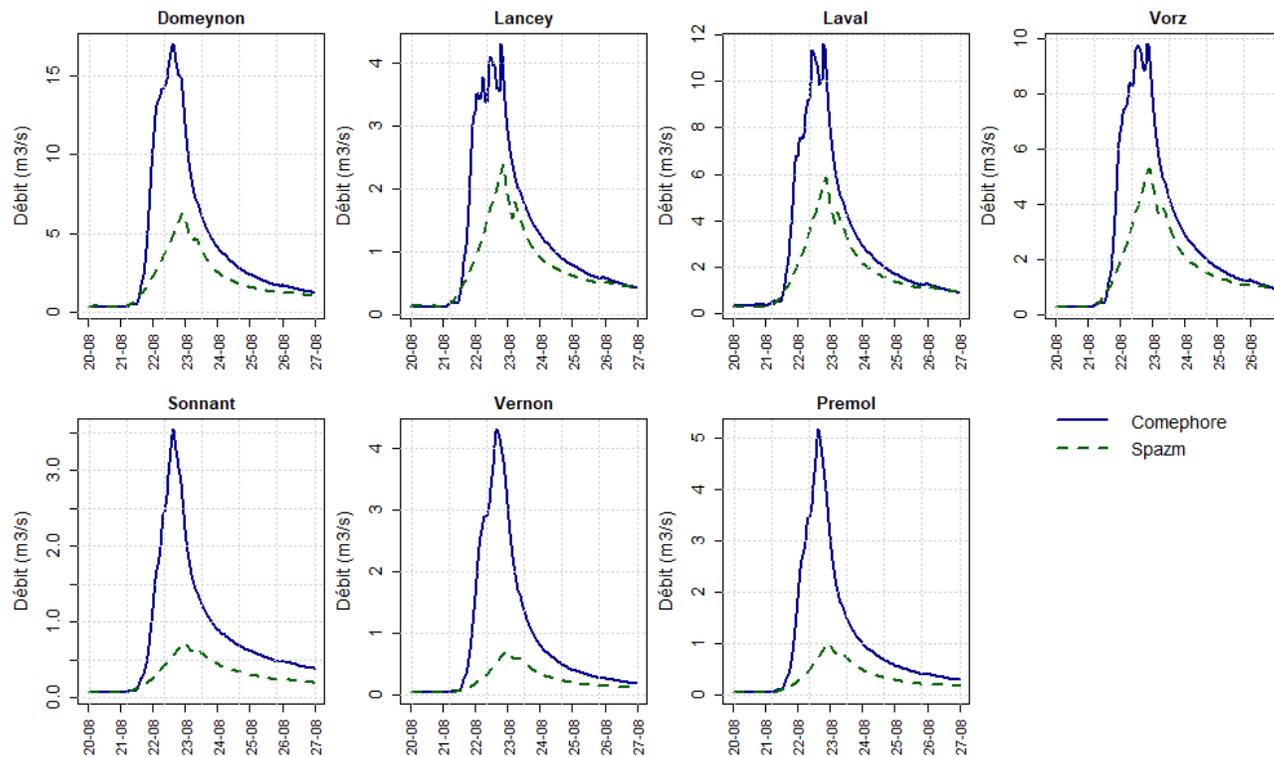
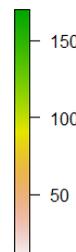
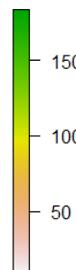
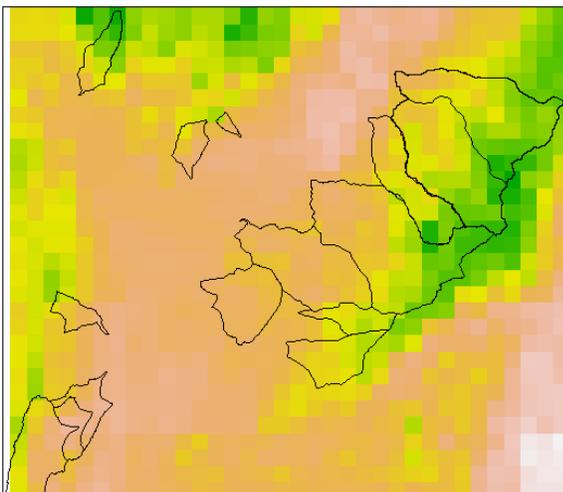
# Zoom bassins Métro - Grésivaudan

- Comparaison évènementielle : crues de Belledonne - août 2005

Cumul Comephore brut (mm)  
du 21/08 00:00 au 22/08 23:00



Cumul Spazm désagrégé (mm)  
du 21/08 00:00 au 22/08 23:00

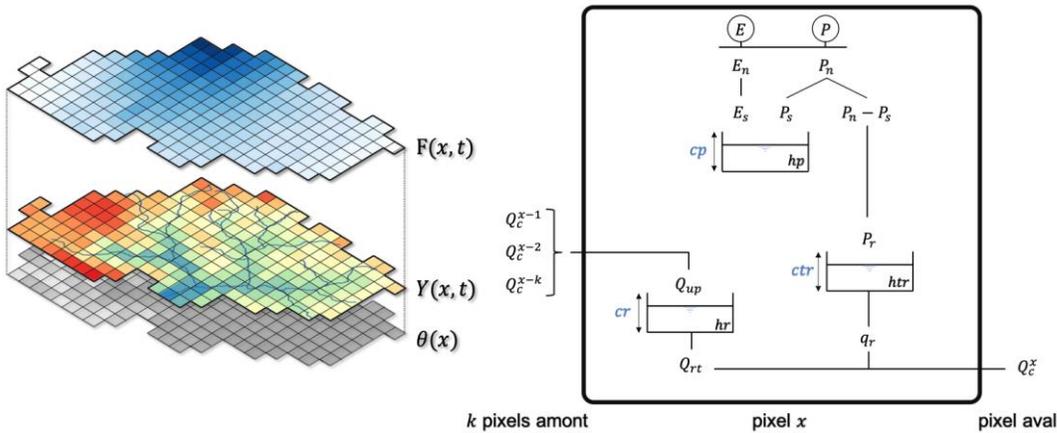


— Comephore  
- - - Spazm

Bassin	Mordor (Comephore)	Mordor (Spazm)	Valeur/plage litt.
Ruisseau de Laval	11.6	5.9	20 <sup>1</sup>
Vorz	9.8	5.3	20 - 28 <sup>1,2</sup>
Ruisseau de Lancey	4.3	2.4	14 <sup>1</sup>
Domeynon	17	6.2	25 - 37 <sup>1,3</sup>
Sonnant	3.5	0.7	
Vernon	4.3	0.7	
Premol	5.2	1	7 - 8 <sup>1</sup>

# Deuxième modélisation hydrologique : SMASH

Spatially distributed Modelling and ASSimilation for Hydrology



- Plateforme de modélisation hydrologique distribuée et d'assimilation de données (Haruna et al., 2021)
  - Résolution spatiale : 1 km<sup>2</sup>
  - Représentation possible de différents processus hydrologiques, à différents pas de temps :
    - journalier pour la ressource en eau,
    - horaire à 15 minutes pour les crues,
  - Utilisation opérationnelle dans Vigicrues Flash (Piotte et al., 2020) :
    - version simplifiée à 2 paramètres, sans routage et sans prise en compte de la neige,
- exclusion des bassins versants alpins du service

Haruna A., Garambois P.-A., Roux H., Javelle P., Jay-Allemand M. Signature and sensitivity-based comparison of conceptual and process oriented models, GR4H, MARINE and SMASH, on French Mediterranean flash floods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, Preprint, <https://doi.org/10.5194/hess-2021-414> .

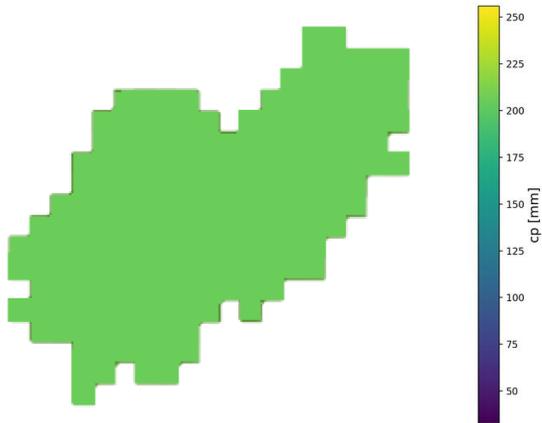
Piotte O., Montmerle T., Fouchier C., Belleudy A., Garandeau L., Janet B., Jauffret C., Demargne J., Organde D. Les évolutions du service d'avertissement sur les pluies intenses et les crues soudaines en France. *La Houille Blanche* 2020, n°6 : 75-84  
<https://doi.org/10.1051/lhb/2020055>

# Deuxième modélisation hydrologique : SMASH

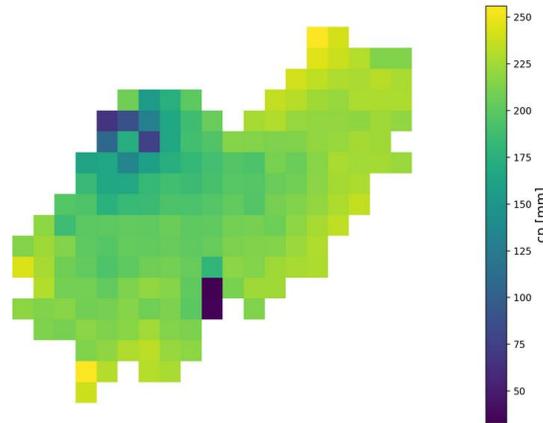
Spatially distributed Modelling and ASSimilation for Hydrology

## Enjeux :

- améliorer les modélisations SMASH sur les bassins versants alpins :
  - en améliorant la structure du modèle
  - en exploitant son caractère distribué
  - en utilisant les modélisations Mordor comme référence



Paramètre de production calé de manière uniforme



Paramètre de production calé de manière distribuée

## Travaux en zone de montagne antérieurs à Hydrodemo (Colleoni, 2020) :

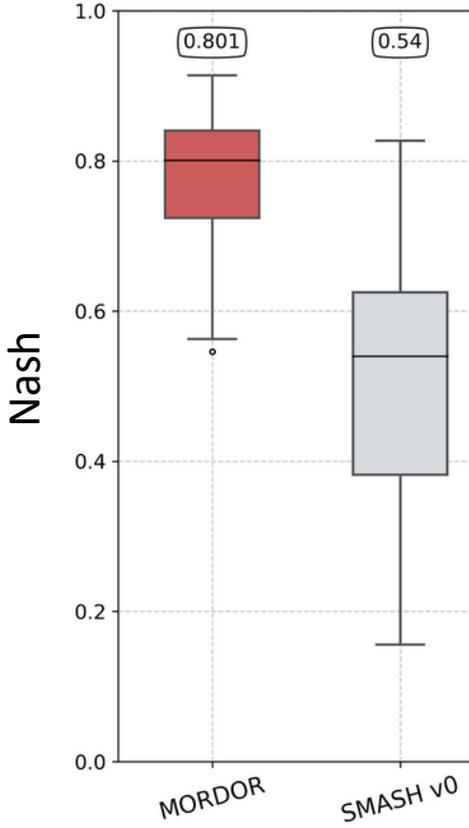
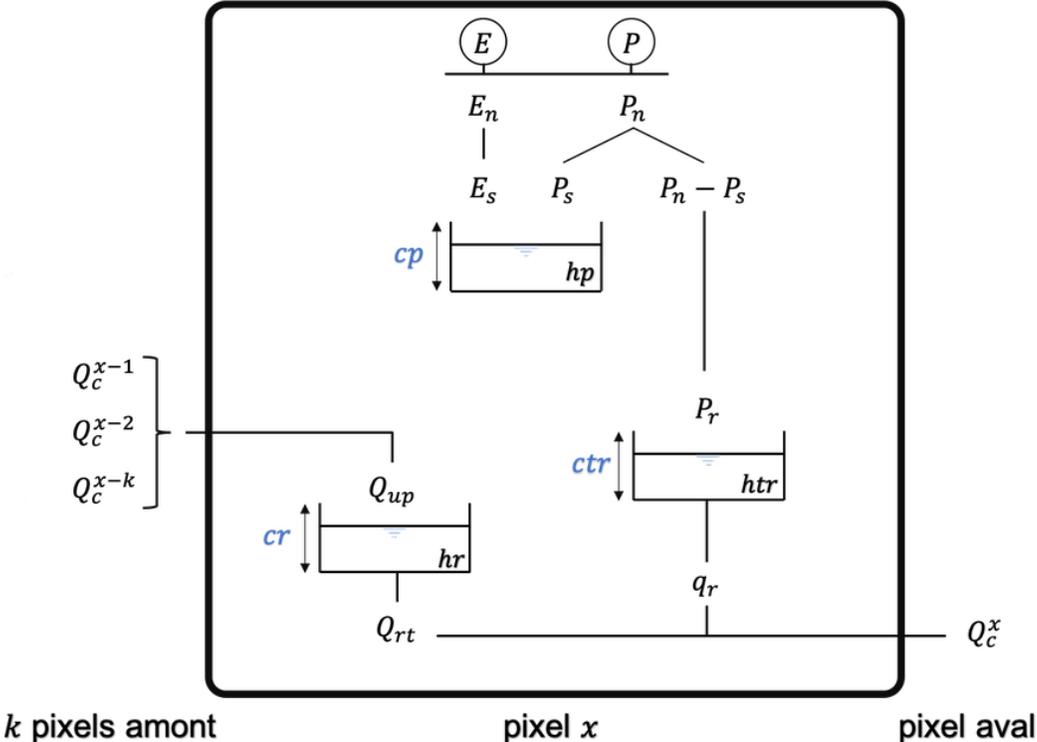
- prise en compte de la composante nivale
  - amélioration de la modélisation :
    - moindre surestimation des crues en période de chute de neige
    - moindre sous-estimation des crues de fonte
- évolution de la structure du modèle : introduction d'un deuxième réservoir de transfert au pixel
  - amélioration des performances générales du modèle
- travaux menés au pas de temps **journalier**

- mettre en œuvre la nouvelle version de SMASH sur les bassins versants du projet

# Amélioration de la structure du modèle SMASH

Travaux menés en calage uniforme des paramètres, performances en validation sur une période n'ayant pas servi au calage

Structure de base : modèle à 3 paramètres



Distribution des critères de Nash sur les 55 bassins versants, période de validation p1 (1997-2007)

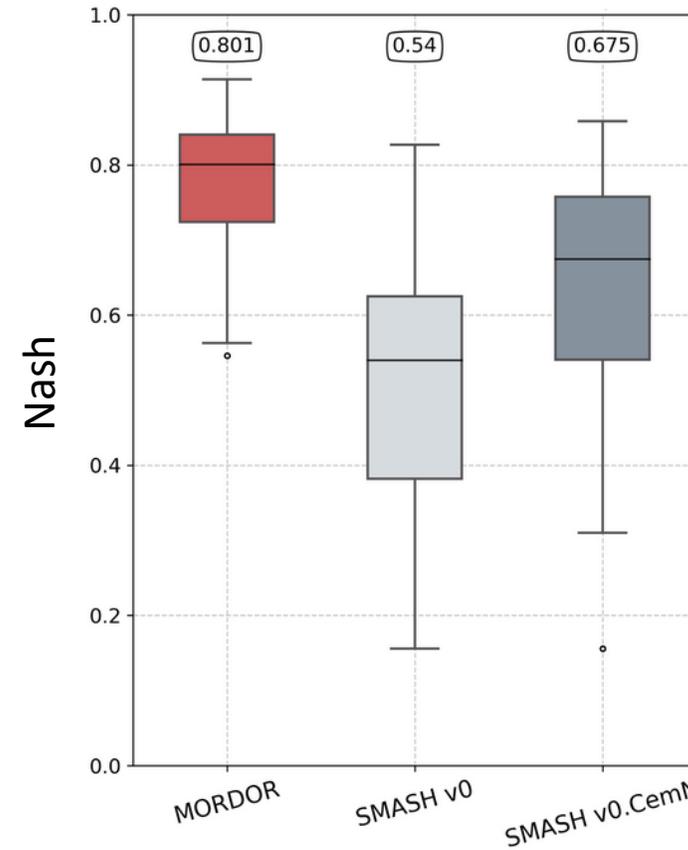
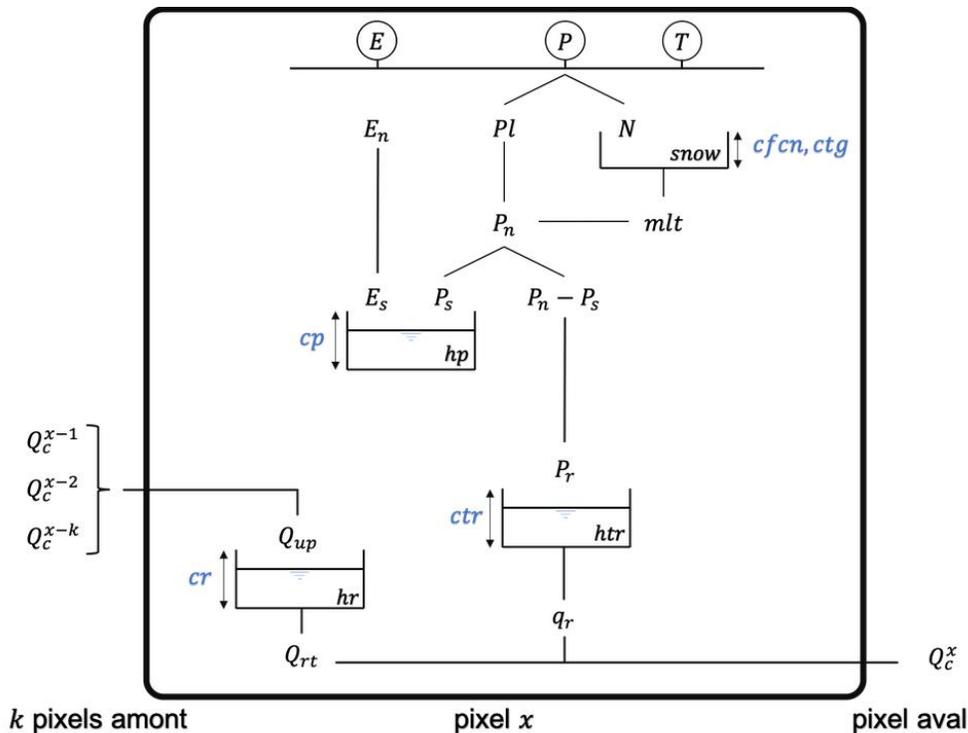
# Amélioration de la structure du modèle SMASH

Travaux menés en calage uniforme des paramètres, performances en validation sur une période n'ayant pas servi au calage

Structure de base : modèle à 3 paramètres

Améliorations progressives :

- prise en compte de la composante nivale



Distribution des critères de Nash sur les 55 bassins versants, période de validation p1 (1997-2007)

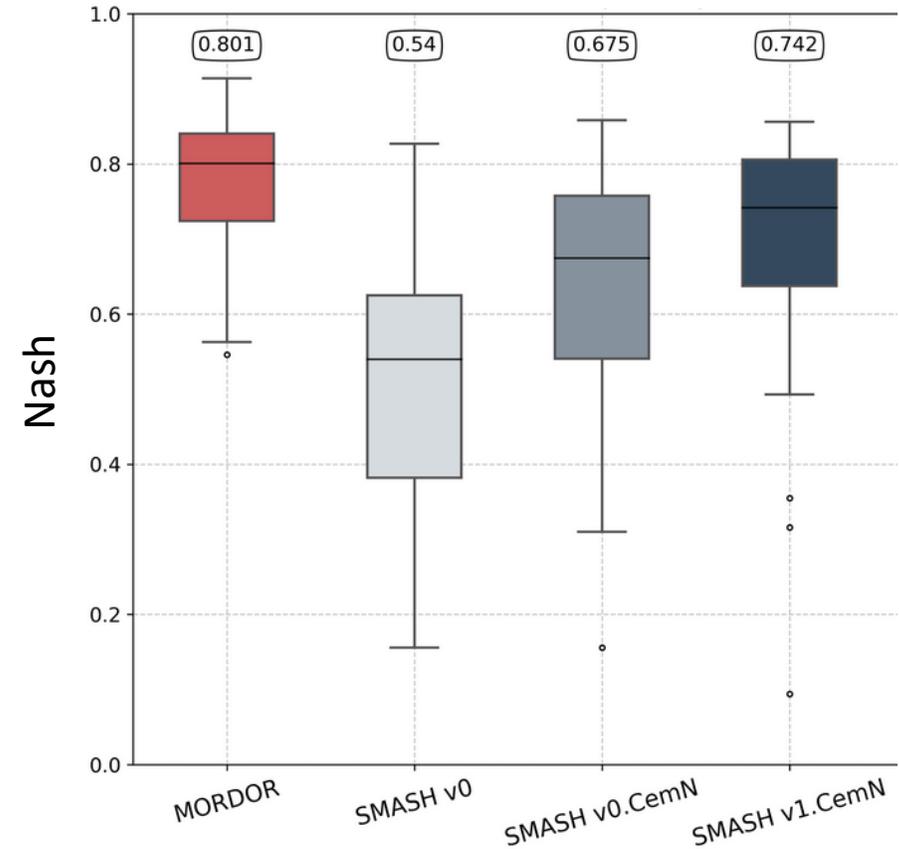
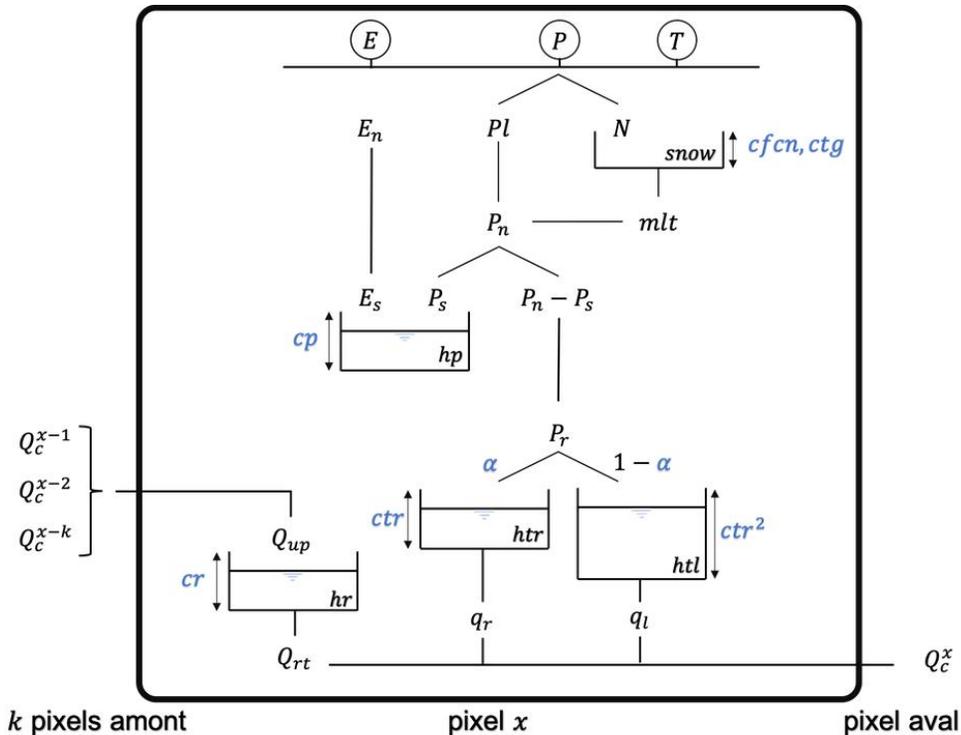
# Amélioration de la structure du modèle SMASH

Travaux menés en calage uniforme des paramètres, performances en validation sur une période n'ayant pas servi au calage

Structure de base : modèle à 3 paramètres

Améliorations progressives :

- prise en compte de la composante nivale
- introduction d'un deuxième réservoir de transfert



Distribution des critères de Nash sur les 55 bassins versants, période de validation p1 (1997-2007)

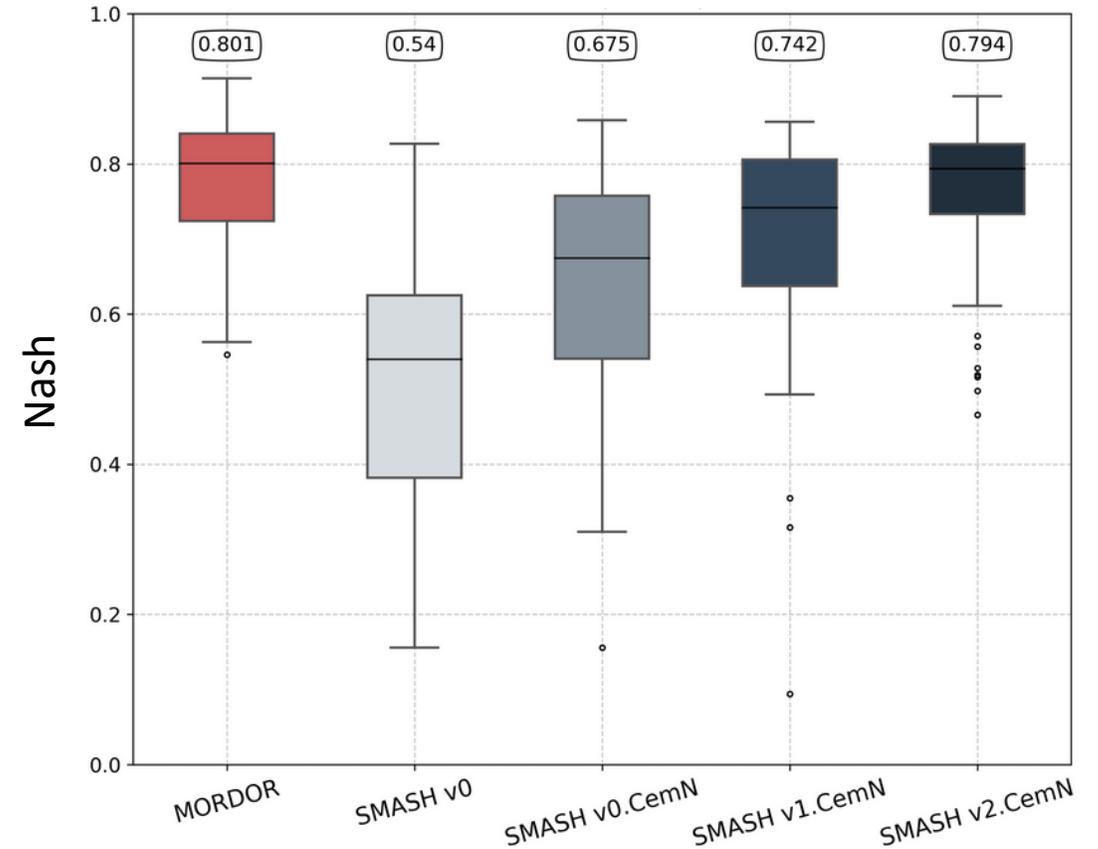
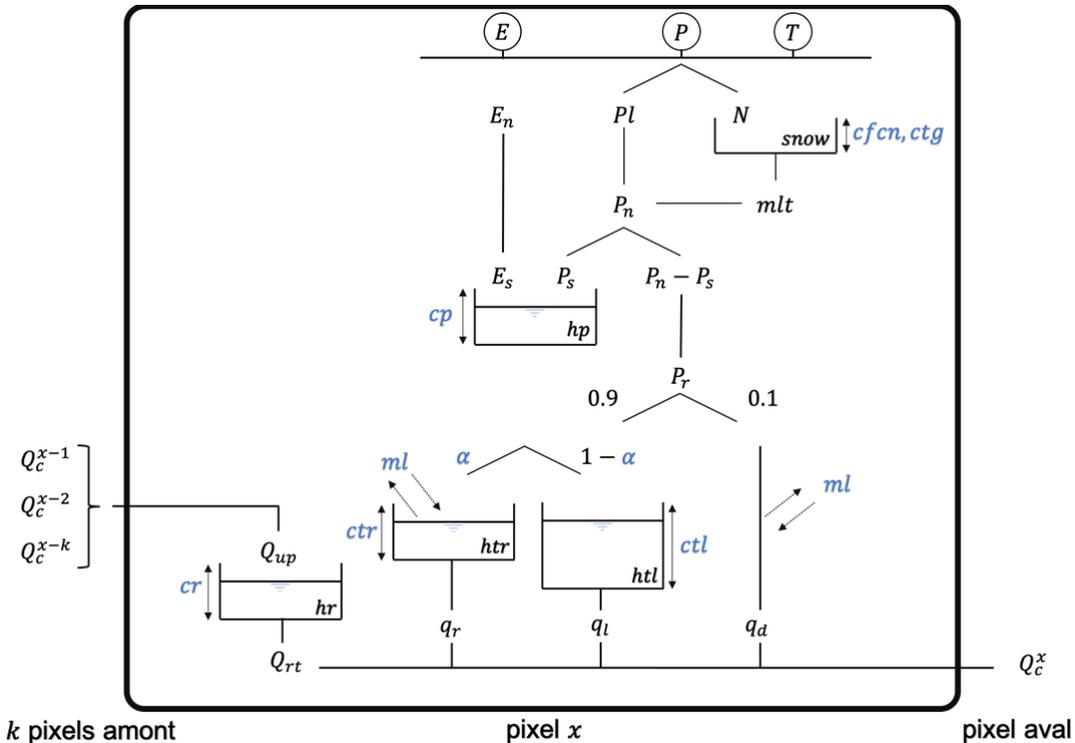
# Amélioration de la structure du modèle SMASH

Travaux menés en calage uniforme des paramètres, performances en validation sur une période n'ayant pas servi au calage

Structure de base : modèle à 3 paramètres

Améliorations progressives :

- prise en compte de la composante nivale
- introduction d'un deuxième réservoir de transfert
- prise en compte des flux non conservatifs



Distribution des critères de Nash sur les 55 bassins versants, période de validation p1 (1997-2007)

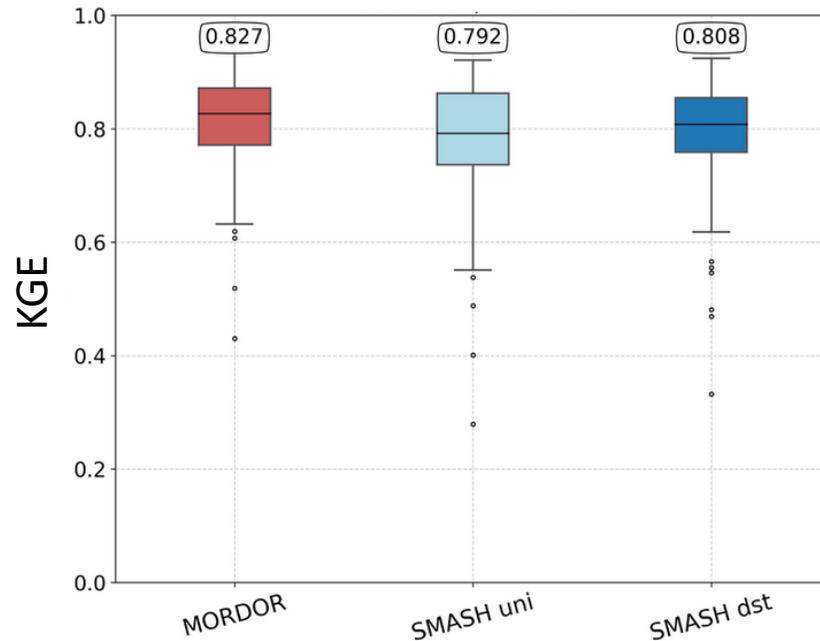
→ Les performances en validation rejoignent celles de Mordor

# Inter-comparaisons MORDOR, SMASH

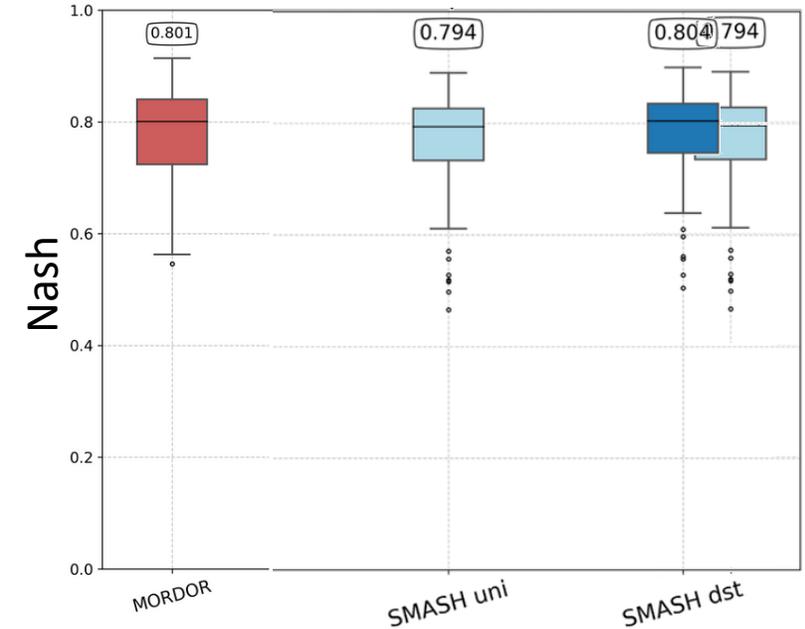
Potentialités du modèle SMASH complètement distribué

Comparaison en validation :

- meilleures performances avec les forçages Comephore
- pour SMASH : meilleures performances en calage distribué des paramètres



Distribution des KGE sur les 55 bassins versants, période de validation p1 (1997-2007)



Distribution des critères de Nash sur les 55 bassins versants période de validation p1 (1997-2007)

# Inter-comparaisons MORDOR, SMASH

Potentialités du modèle SMASH complètement distribué

Comparaison en validation :

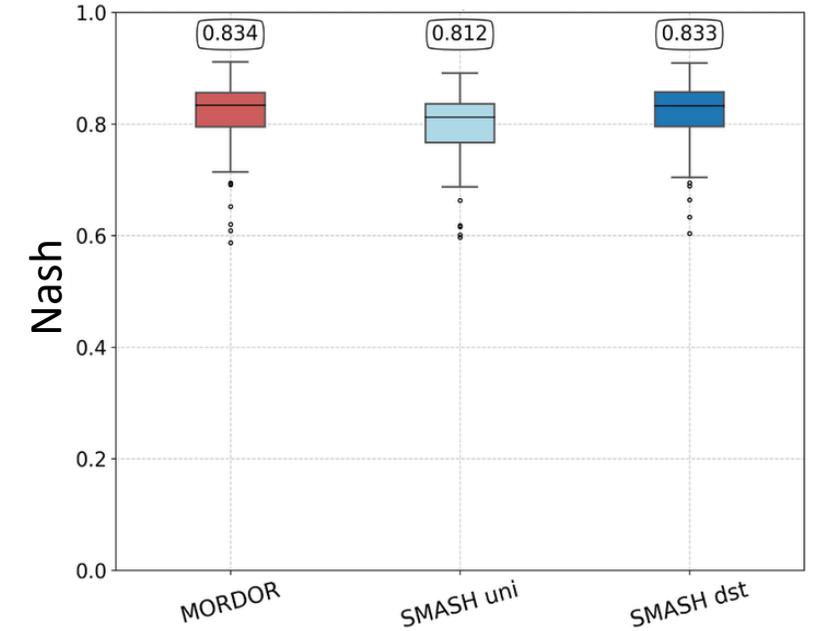
- meilleures performances avec les forçages Comephore
- pour SMASH : meilleures performances en calage distribué des paramètres

Comparaison en calage période complète :

- meilleures performances avec les forçages Comephore
- pour SMASH : meilleures performances en calage distribué des paramètres

Quantile	M.S	M.C	Suni.S	Suni.C	Sdst.S	Sdst.C
2 ans	0.11	0.2	0.12	0.2	0.13	0.23
5 ans	0.11	0.25	0.1	0.22	0.09	0.26
10 ans	0.08	0.24	0.1	0.18	0.07	0.21
20 ans	0.07	0.15	0.04	0.16	0.05	0.16

Valeurs des CSI pour différents seuils de débit, période de calage complète (1997-2017)



Distribution des critères de Nash sur les 55 bassins versants, période de calage complète (1997-2017)

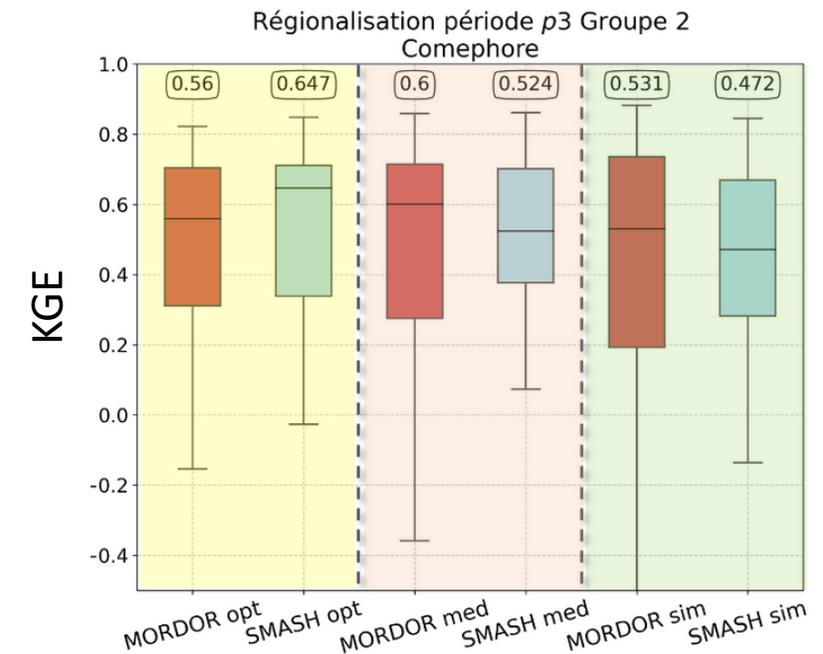
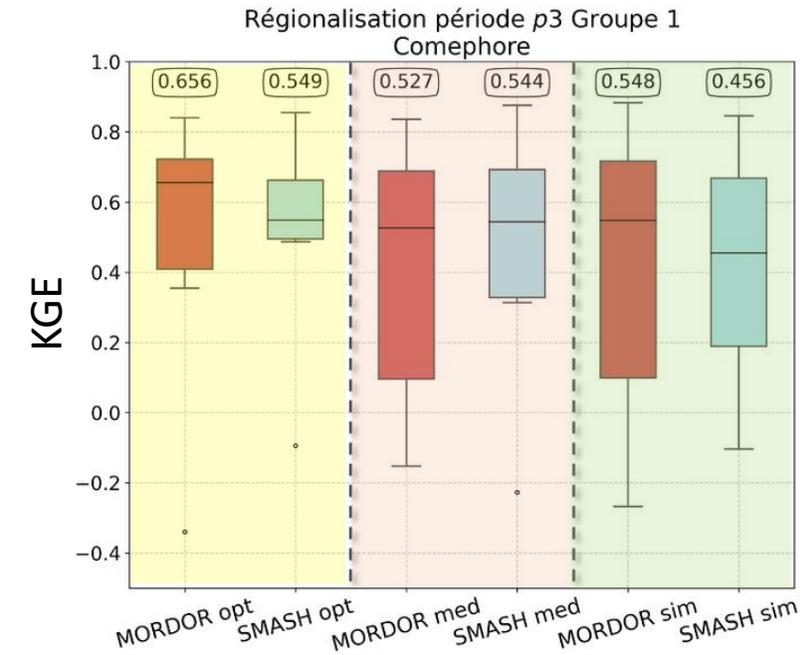
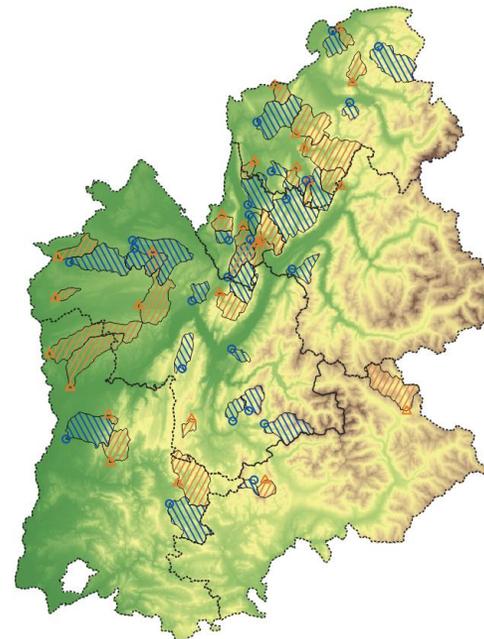
# Inter-comparaisons MORDOR, SMASH

Quelle transposabilité des modèles ?

Comparaison en contexte non jaugé avec les pluies Comephore

- Test de 3 méthodes de régionalisation
- Etapes :
  - calage des modèles sur la période 1997-2017,
  - séparation des bassins en deux groupes, un groupe donneur et un groupe receveur puis inversion des rôles,
  - estimation des paramètres « régionaux » à partir du groupe donneur,
  - évaluation, sur le groupe receveur, des performances en modélisation avec les paramètres régionaux transférés.

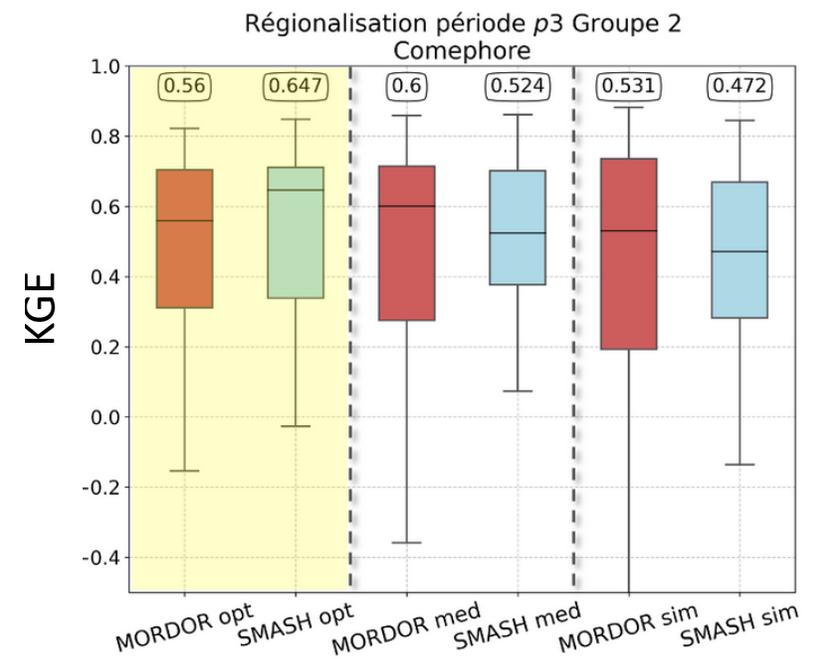
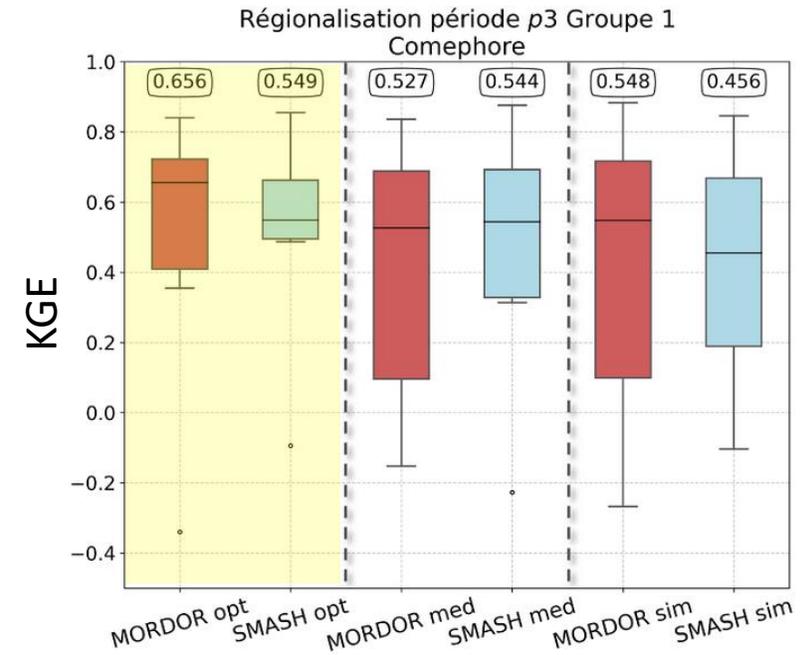
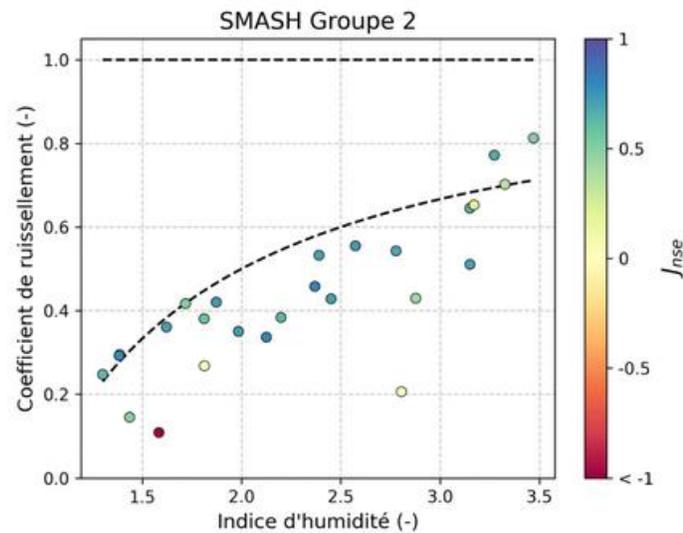
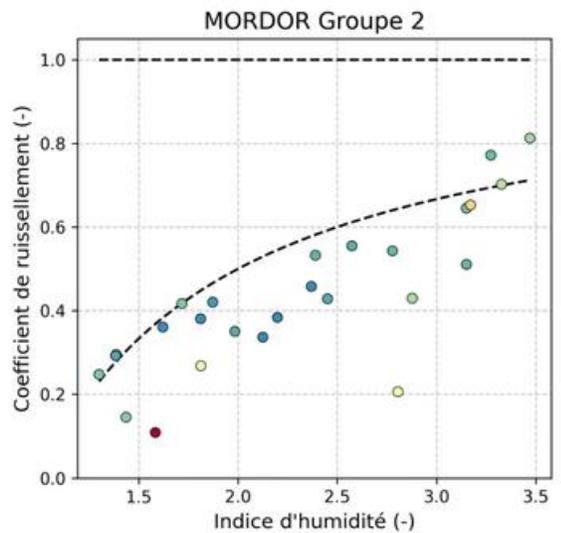
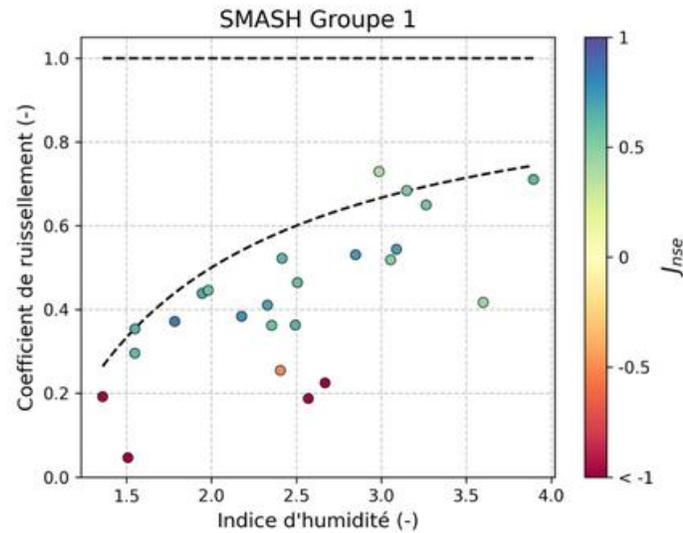
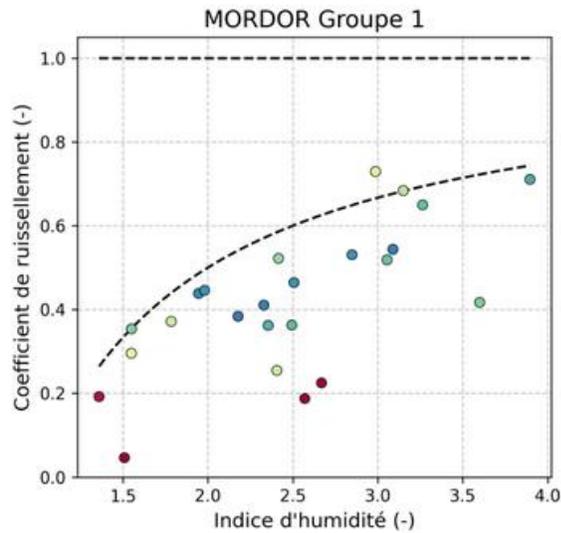
1. Jeu de paramètre « **optimal** » : jeu issu du groupe de bassins donneurs qui donne les meilleures performances en moyenne sur tout le groupe donneur.
2. Jeu de paramètres **médians** du groupe donneur transféré au groupe receveur.
3. Jeu de paramètres du bassin le plus **similaire** dans le groupe donneur, selon des critères de surface, altitude et de distance.



# Inter-comparaisons MORDOR, SMASH

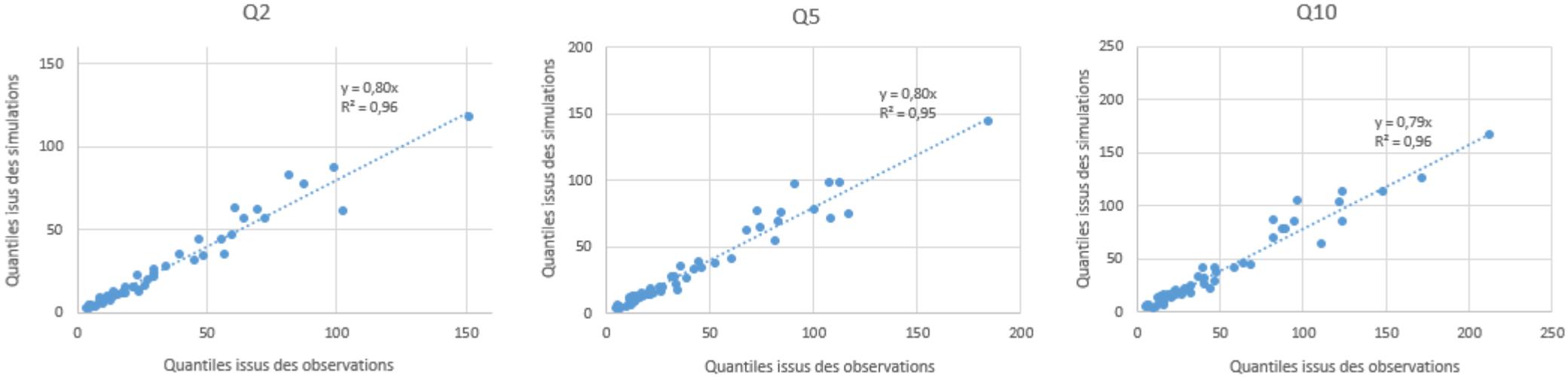
Quelle transposabilité des modèles ?

Jeu de paramètre « **optimal** » : jeu issu du groupe de bassins donateurs qui donne les meilleurs performances en moyenne sur tout le groupe donneur



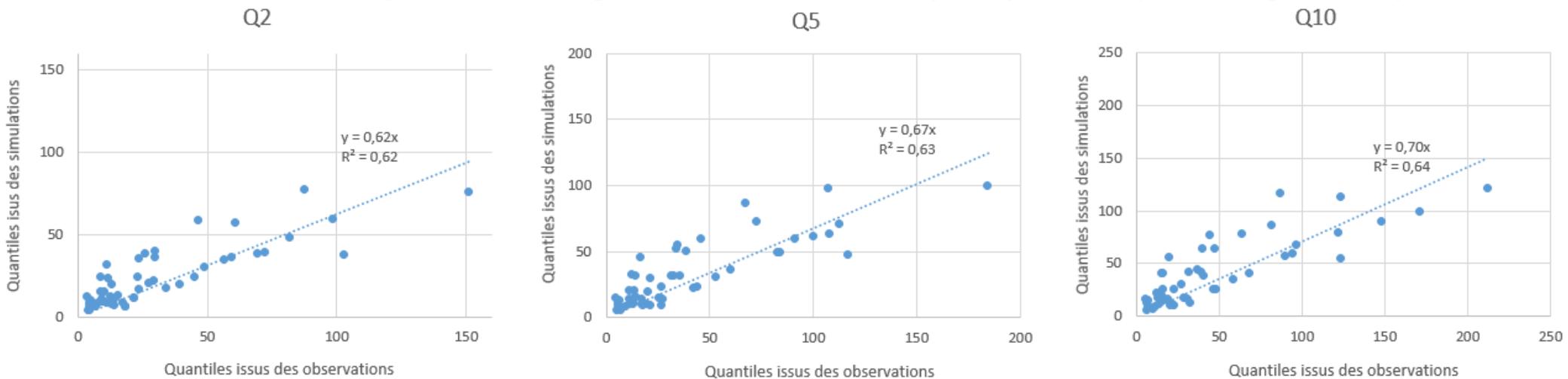
# Examen des quantiles issus des simulations SMASH

Modélisations avec les paramètres calés sur la période 1997-2017, données Comephore, calage uniforme



Sous-estimation des quantiles avec les paramètres calés

Modélisations avec les paramètres régionalisés (transfert du jeu optimal) après calage sur la période complète

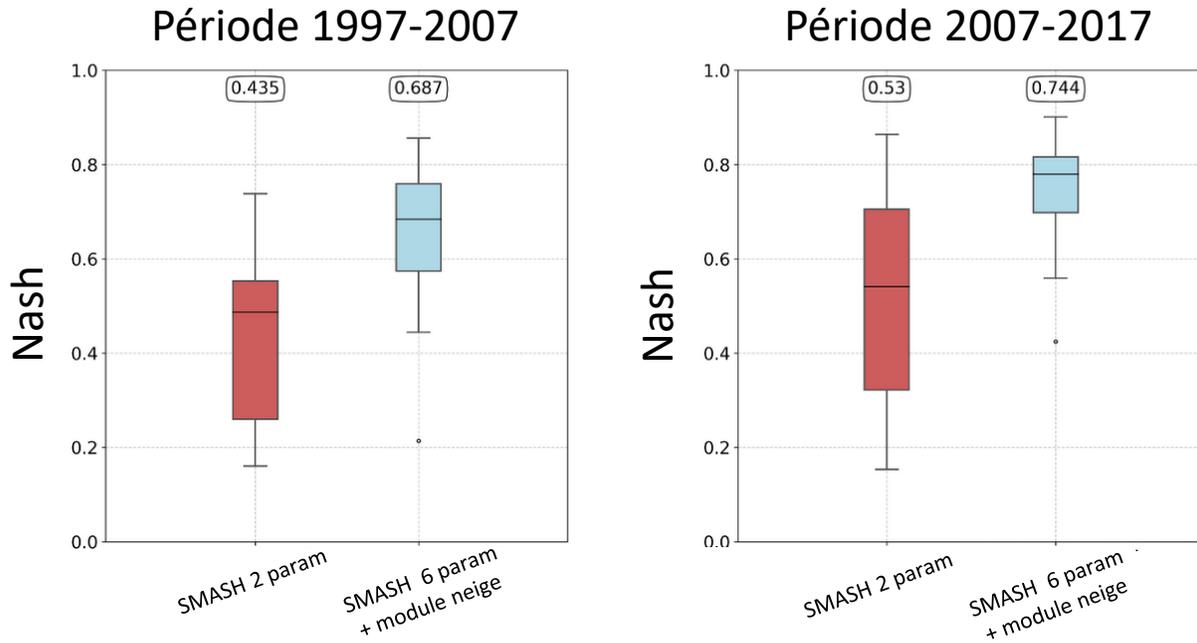


La régionalisation introduit une très grande dispersion des quantiles : seuls 5 bassins ont le Q2obs dans l'IC 90% du Q2sim

# Inter-comparaison des modélisations SMASH

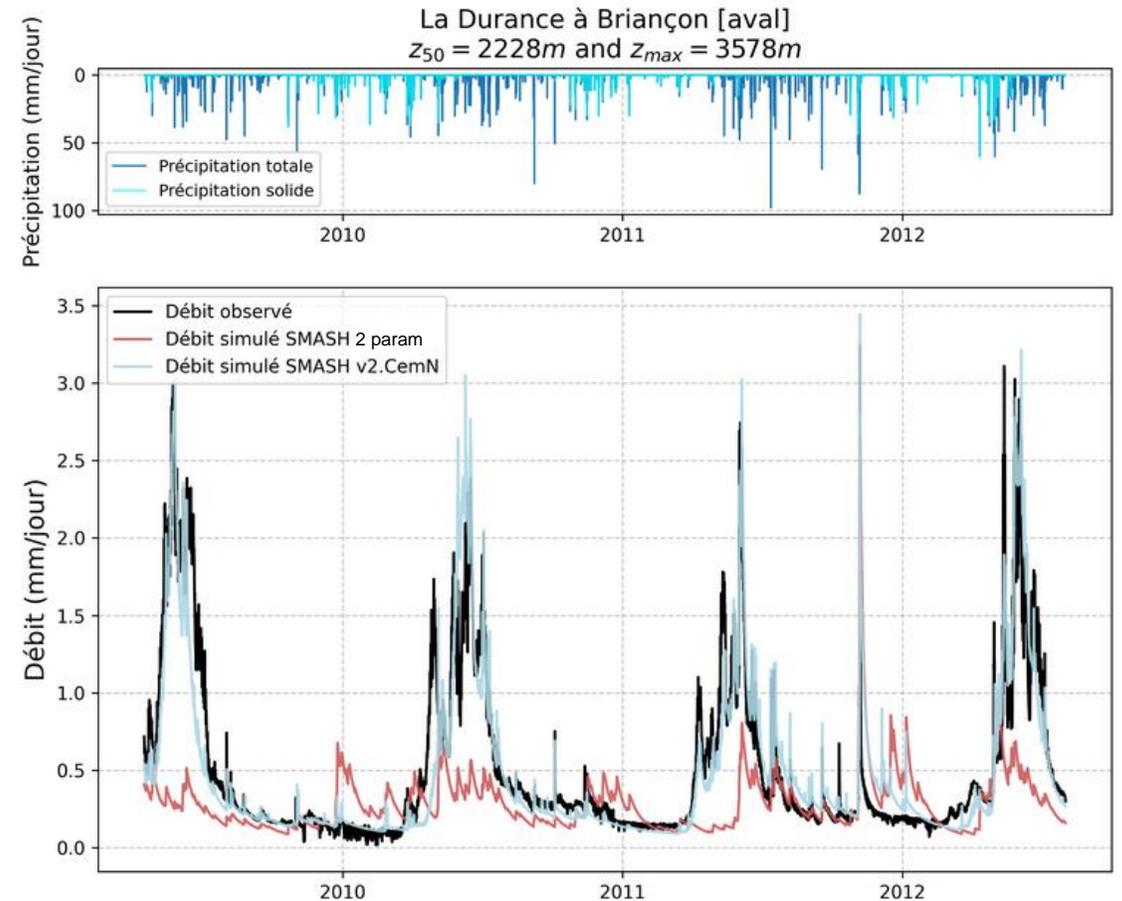
Version « Hydrodemo » vs. Version « 2 paramètres »

Comparaison en validation au pas de temps 15 min avec les pluies Antilope après calage uniforme des paramètres



→ Un modèle mieux adapté à l'échantillon de bassins du projet :

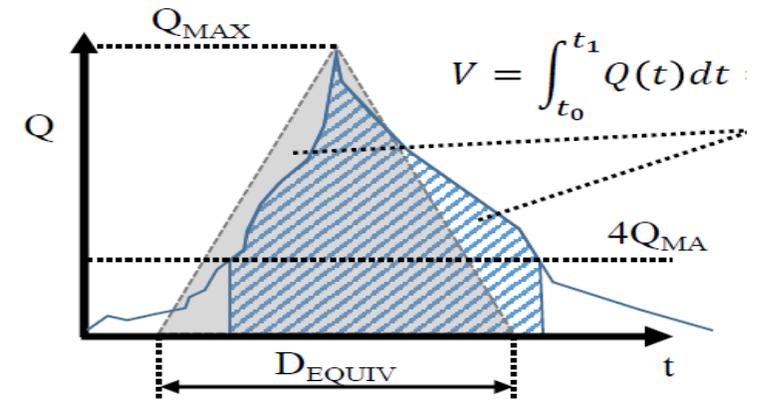
- meilleure performance globale
- meilleure restitution des hydrogrammes



# Conclusion

## Résultats principaux

- Amélioration de la structure du modèle SMASH
- Performances satisfaisantes sur bassins jaugés avec MORDOR-SD et SMASH V2
- Des outils beaucoup plus riches que les méthodes classiques de pré-détermination (fournissent hydrogrammes),
- Une première méthode de régionalisation
- Sous-estimation des quantiles :
  - Impact probable des précipitations,
  - Impact de la régionalisation

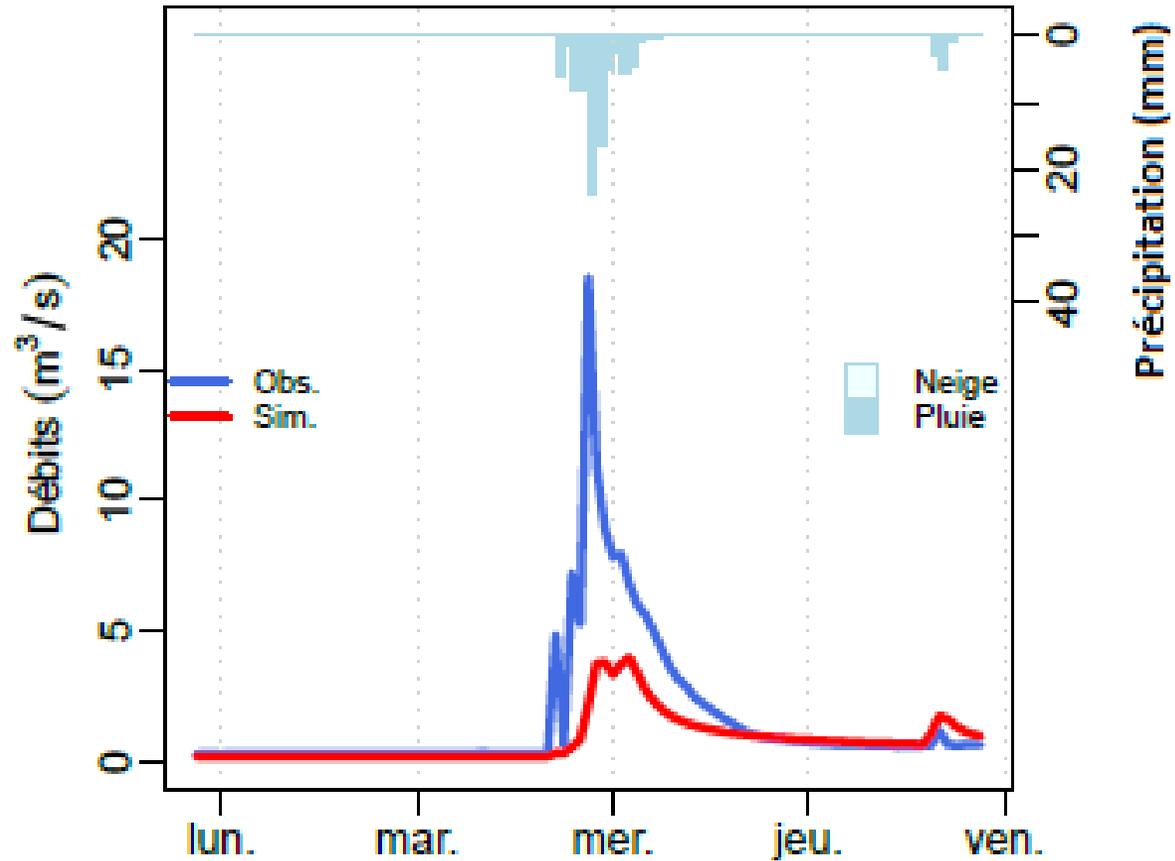


## Limites, perspectives

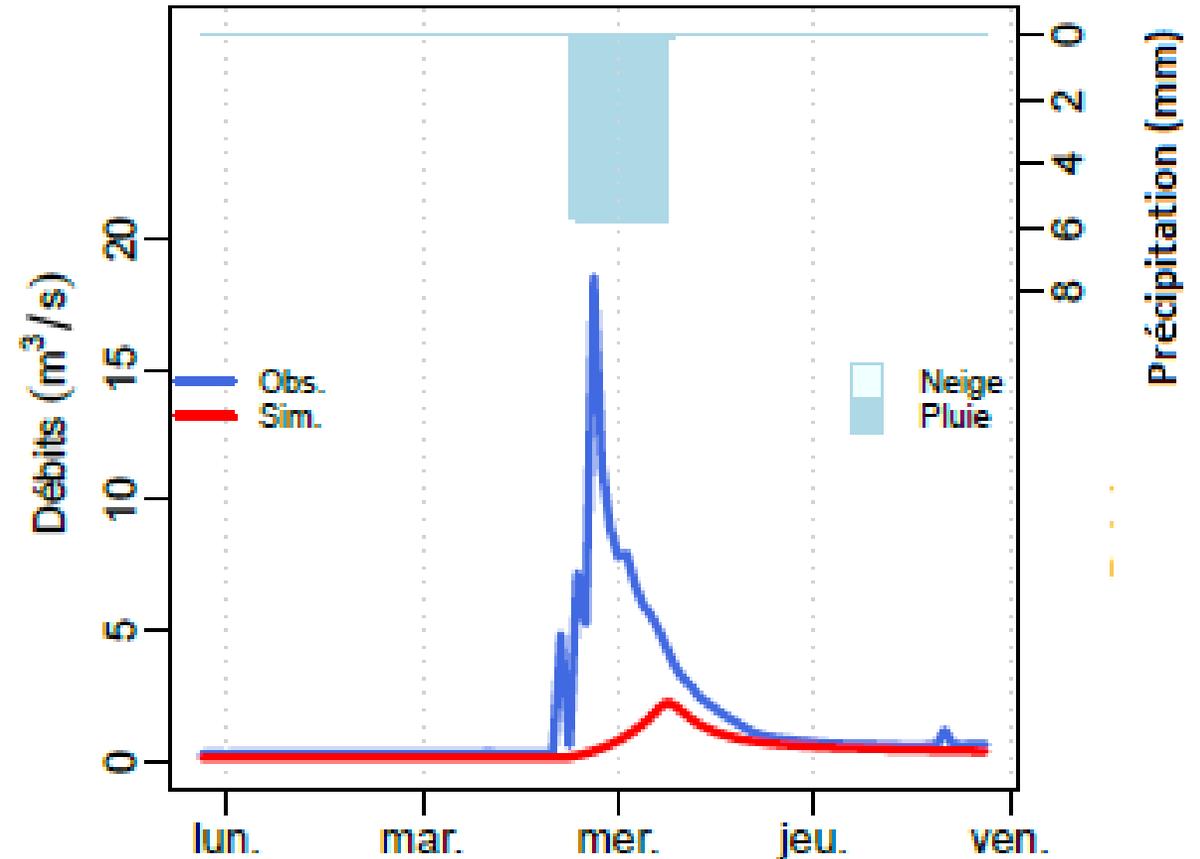
- Apport de COMEPHORE sur les Alpes de Nord mais problème d'homogénéité (Moucherotte installé en 2015)
- Méthode de désagrégation SPAZM à améliorer pour applications à de petits BV
- Régionalisations à améliorer, notamment pour SMASH en s'appuyant sur le calage distribué sous contraintes physiographiques
- Analyse critique des valeurs caractéristiques disponibles.

# ANNEXES

Sorties du modèle hydrologique MORDOR-SD pour l'évènement du 10 août 2004 sur le bassin de la Morge à Voiron avec a) la précipitation Comephore et b) la précipitation Spazm désagrégé.



**a) Avec précipitation Comephore**  
**Cumul averse = 81 mm**



**b) Avec précipitation Spazm désagrégé**  
**Cumul averse = 75 mm**