



Séminaire transversal Science-Décision-Action (SDA) Risque torrentiel en montagne

Mercredi 9 Décembre



Guillaume Evin

HYDRODEMO: Evaluation de l'aléa torrentiel

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

Objectifs, méthodes, premiers résultats

Juliette BLANCHET, Guillaume EVIN, Catherine FOUCHIER,
Guillaume PITON, Caroline LE BOUTEILLER, Alain RECKING

Organisation :



Pôle Alpin Risques Naturels

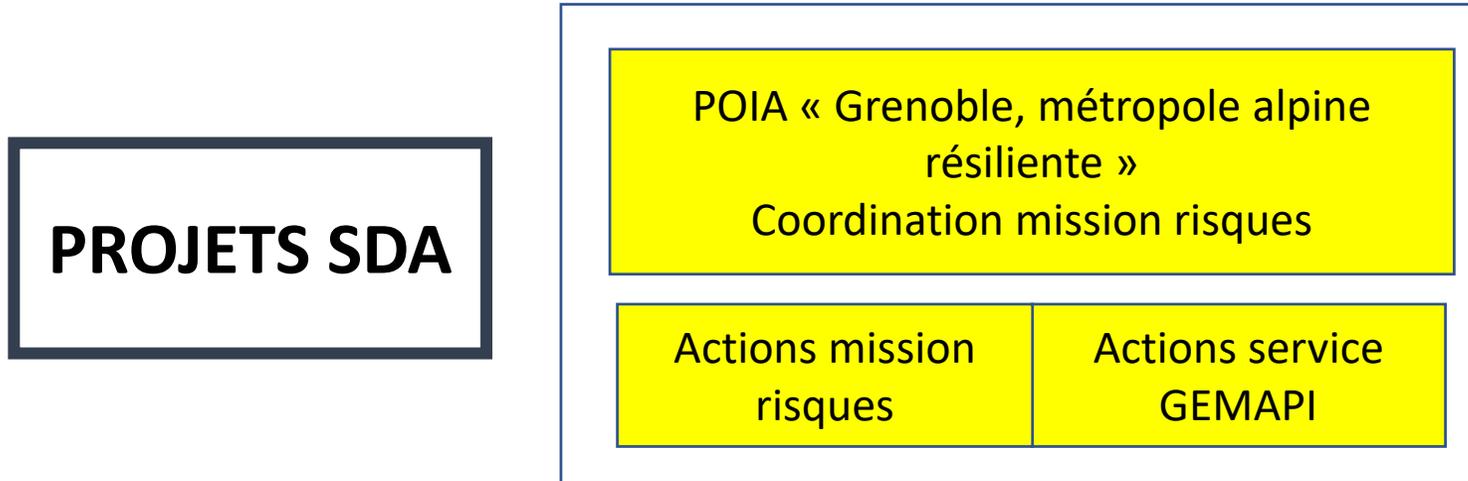
Soutiens et partenaires :



AGENCE
NATIONALE
DE LA COHÉSION
DES TERRITOIRES



TAGIRN Grenoble-Alpes Métropole



GRENOBLE-ALPES MÉTROPOLE

En bref

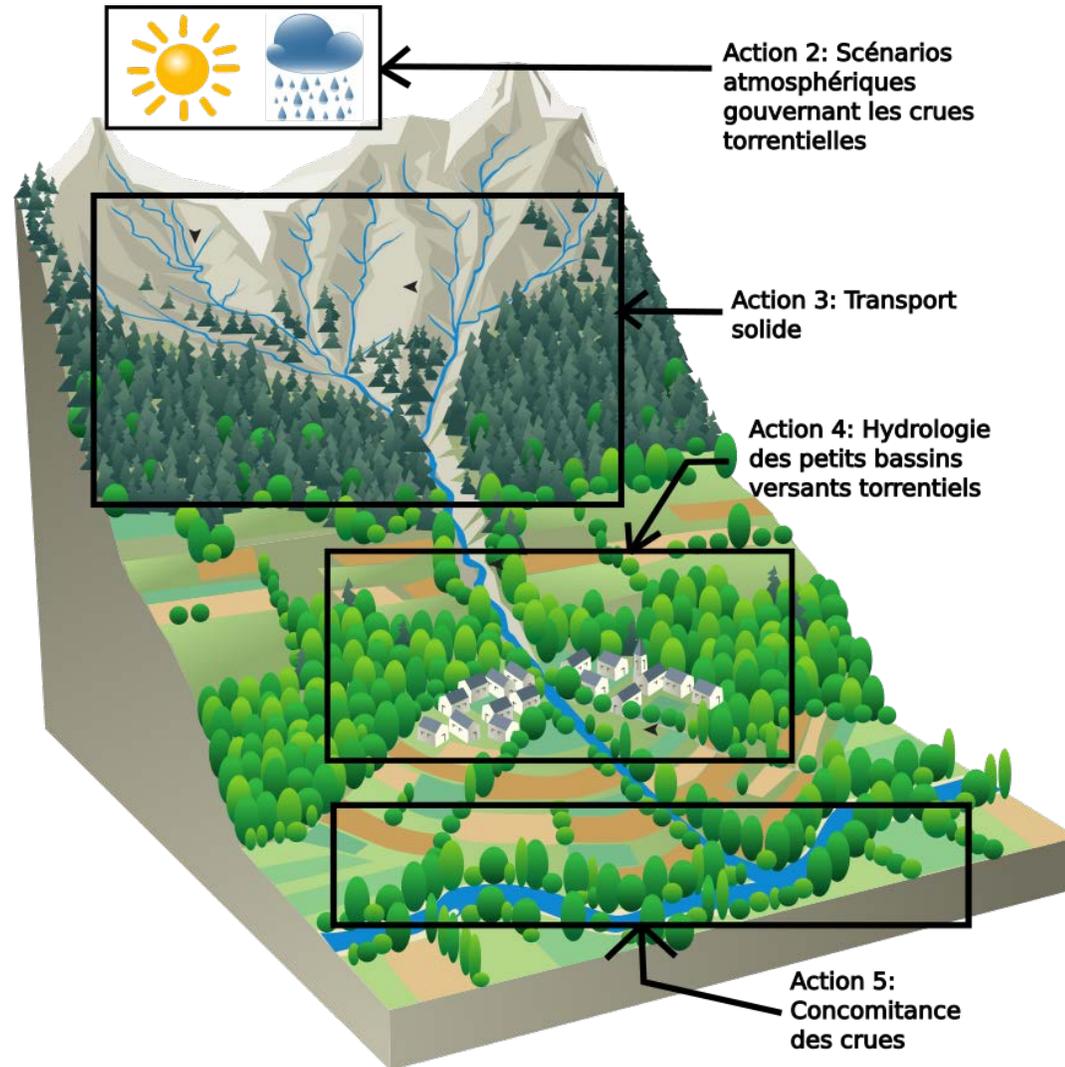
- **Objectif:** Caractériser l'hydrologie des petits bassins versants torrentiels des Alpes du Nord et leur activité de transport solide
- **Porteurs:** Collaboration INRAE-ETNA / IGE / INRAE-RECOVER
- **Partenaires:** Grenoble-Alpes Métropole, EDF-DTG, RTM 38, SPC Alpes du Nord,...
- **Période:** juillet 2019-décembre 2021
- **5 CDDs « Ingénieur de recherche » d'un an**
- **Pour plus de détails:** <https://www.inrae.fr/hydrodemo>



50%



Complémentarité des actions



Alix Reverdy (IGE, J. Blanchet)

Maxime Morel (ETNA, G. Piton, C. Le Bouteiller)

Alexandre Mas (ETNA, G. Evin)

François Colleoni (RECOVER, C. Fouchier)

Loïc Orillard (IGE, J. Blanchet)





Action 2: Caractérisation des scénarios atmosphériques gouvernant les crues torrentielles

Alix Reverdy, IGE

Supervision Juliette Blanchet

Objectifs et méthodes

- Caractériser les **conditions météorologiques** conduisant à des **crues torrentielles**
 - Comprendre la **dynamique atmosphérique** des crues torrentielles
 - Isoler des **situations génératrices de crues**
 - Etudier leur **évolution passée (et future)**
- Cas d'étude de la **Métropole Grenobloise**
- Observations de **crues historiques** → **situation atmosphérique grande échelle**
 - Contourner le problème de l'instrumentation
- 3 grands jeux de données de référence:
 1. La **base de données de crues IGE-METRO**
 2. La **classification de circulation grande échelle** de *Garavaglia et al. (2010)*
 3. Les **réanalyses atmosphériques** (20CRv2c, ERA5...)



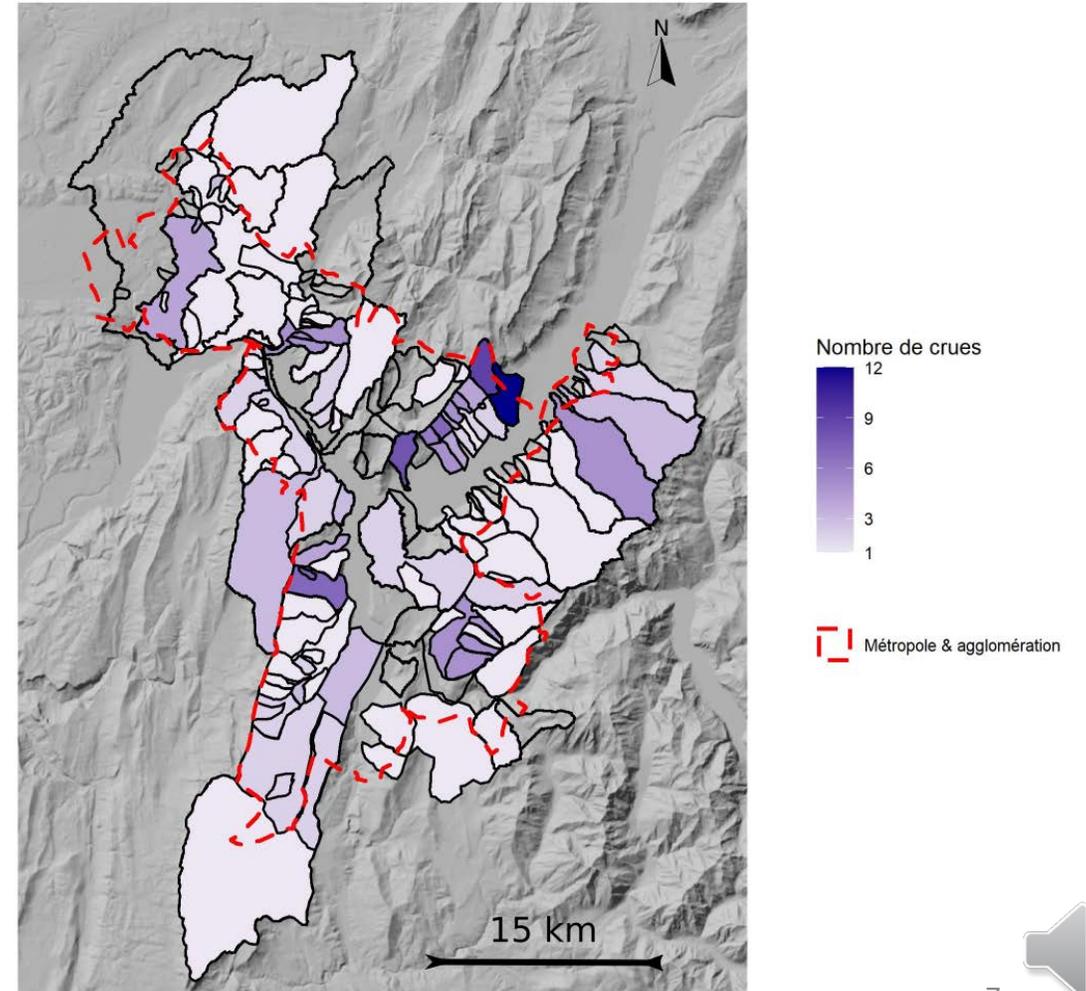
Crue du torrent de la Combe de Lancey (23/08/2005)



La base de données IGE-METRO

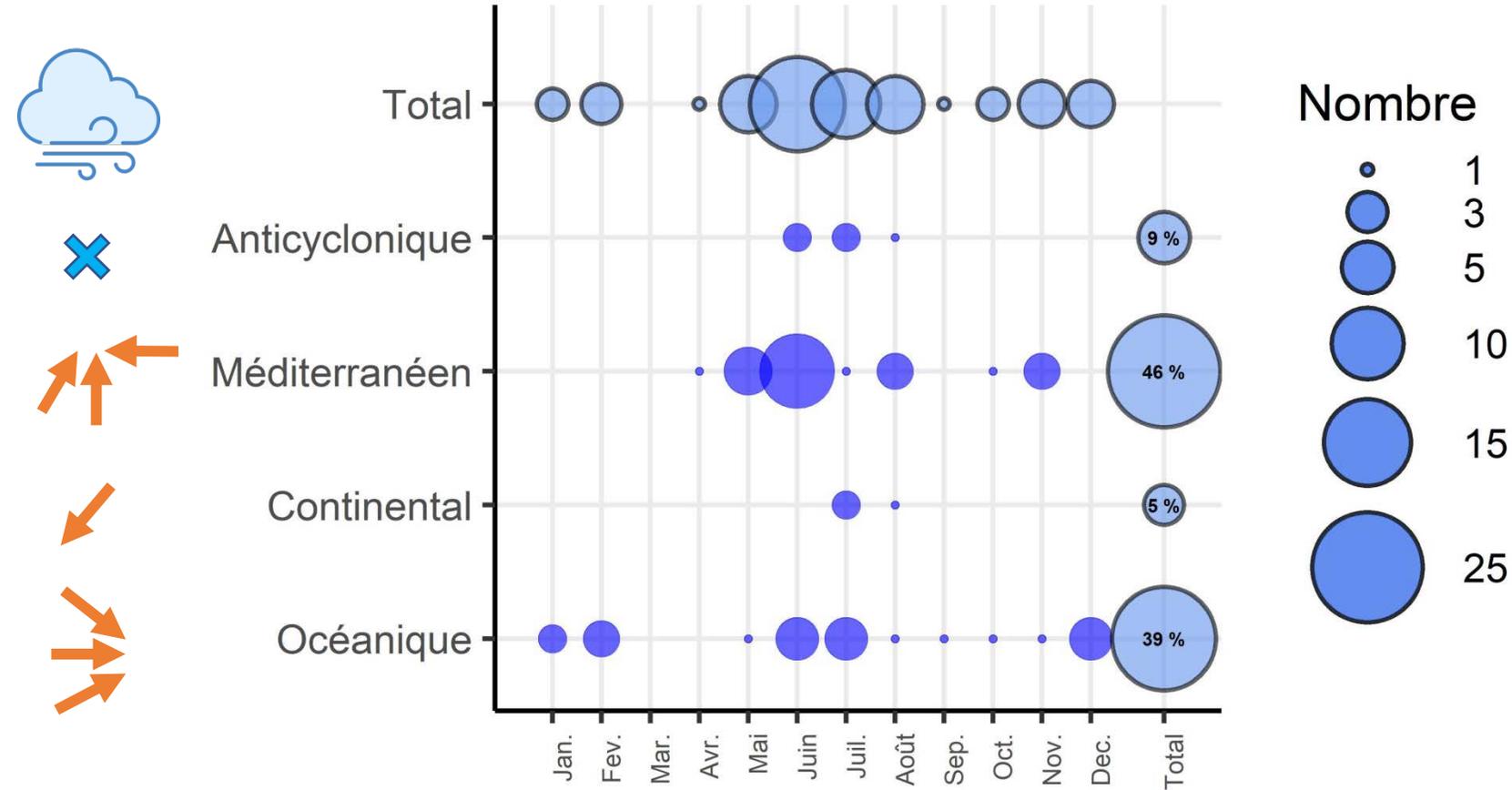
- **Crues torrentielles et inondations**
- **1850-2019**
- Territoire de la Métropole et de l'Agglomération Grenobloise
- Bassins versants de 0,1 à 200 km²
- **116 évènements hydrométéorologiques**
 - Séquences de date(s) où un ou plusieurs torrents/rivières ont causé des **dégâts remarqués**
 - Base de données **RTM**, complétée par: données CATNAT, publications scientifiques, rapports...

Nombre de crues torrentielles
référéncées par bassins (1850-2019)



Approche par type de temps

Saisonnalité du type de temps des crues torrentielles (1948-2019)



- **Classification de type de temps** EDF (*Garavaglia et al., 2010*)

- Crues torrentielles principalement **Méditerranéennes** et **Océaniques**

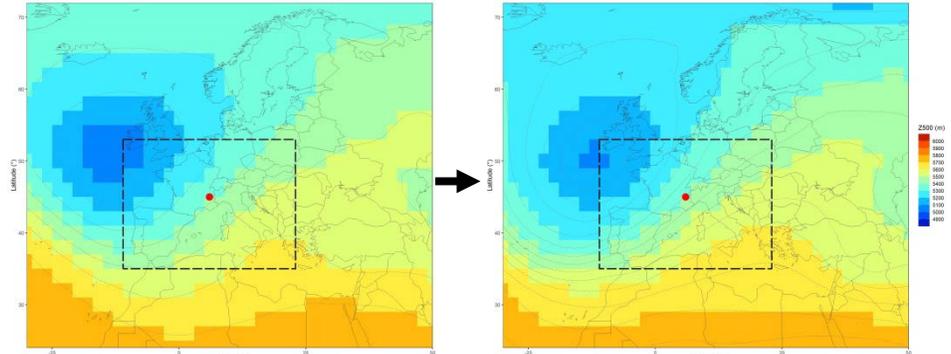
- Pic de crues **printemps-été** porté par le Méditerranéen

- Uniquement océanique en hiver

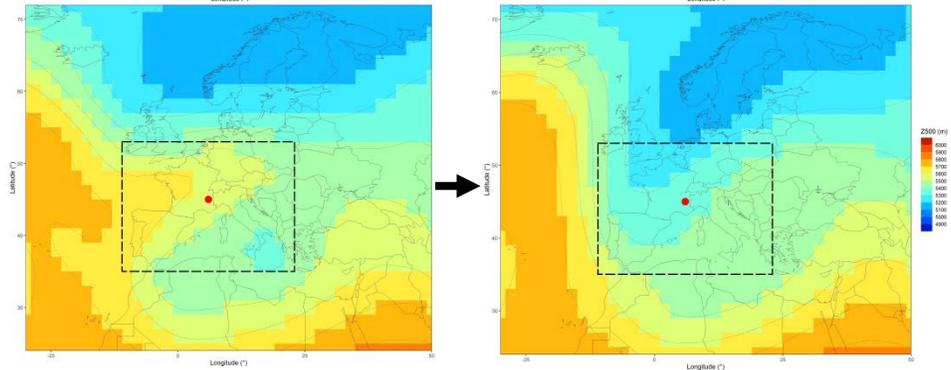
Approche par situation synoptique

- Réanalyse atmosphérique 20CRv2c
 - Europe de l'Ouest
 - 1851-2011 journalier
- Altitude du géopotentiel 500hPa
- Déformation spatio-temporelle du champ entre 2 dates: Teweles-Wobus Score (TWS)
- Résumé de la circulation atmosphérique par 2 indicateurs (d'après TWS) (*Blanchet et al. 2018,2020*):
 - La **célérité**: la vitesse de déformation du champ
 - La **singularité**: la reproductibilité du champ

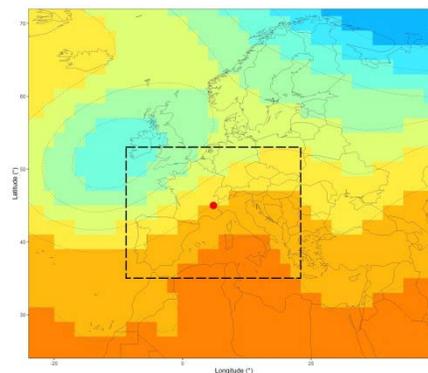
Faible
célérité



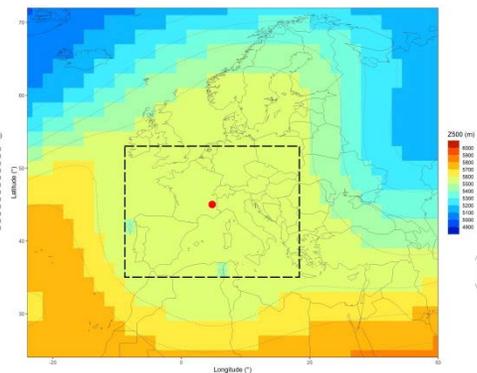
Forte
célérité



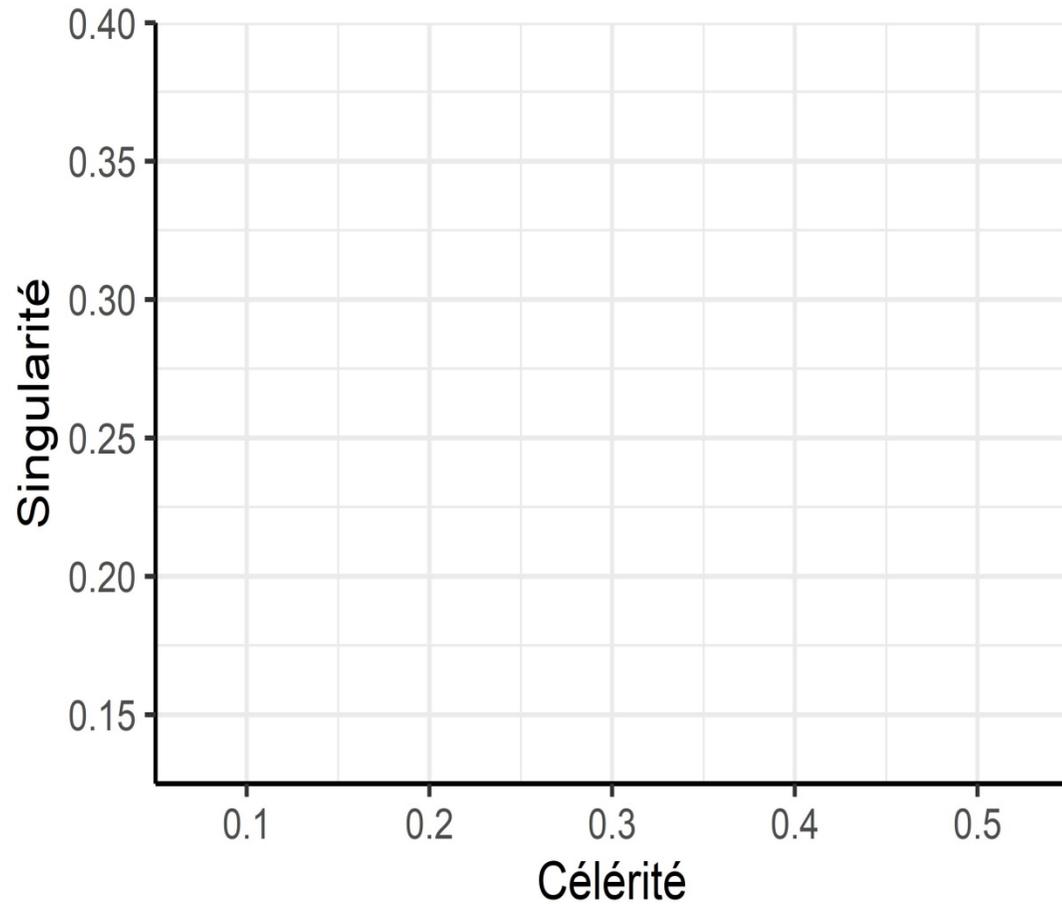
Faible singularité



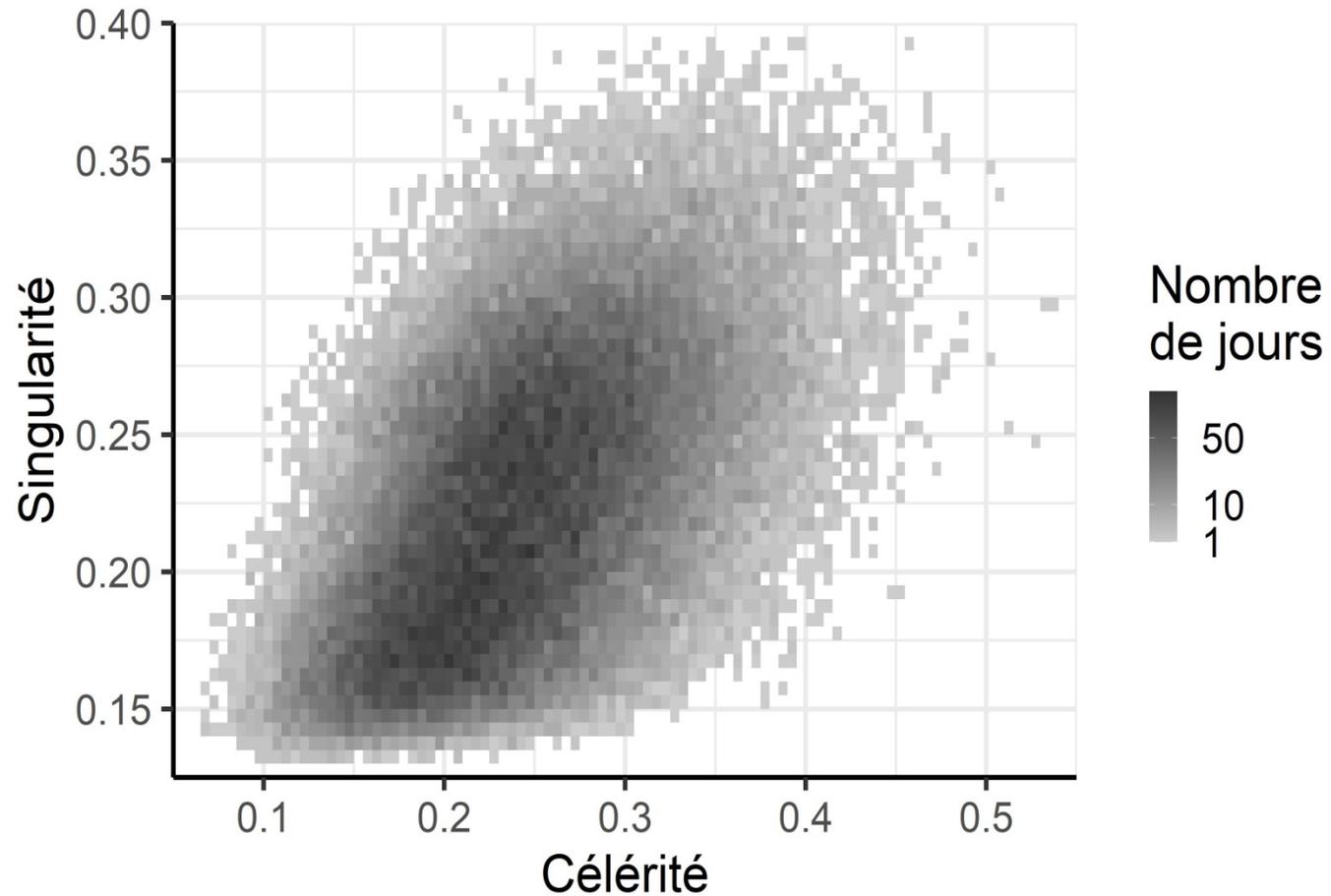
Forte singularité



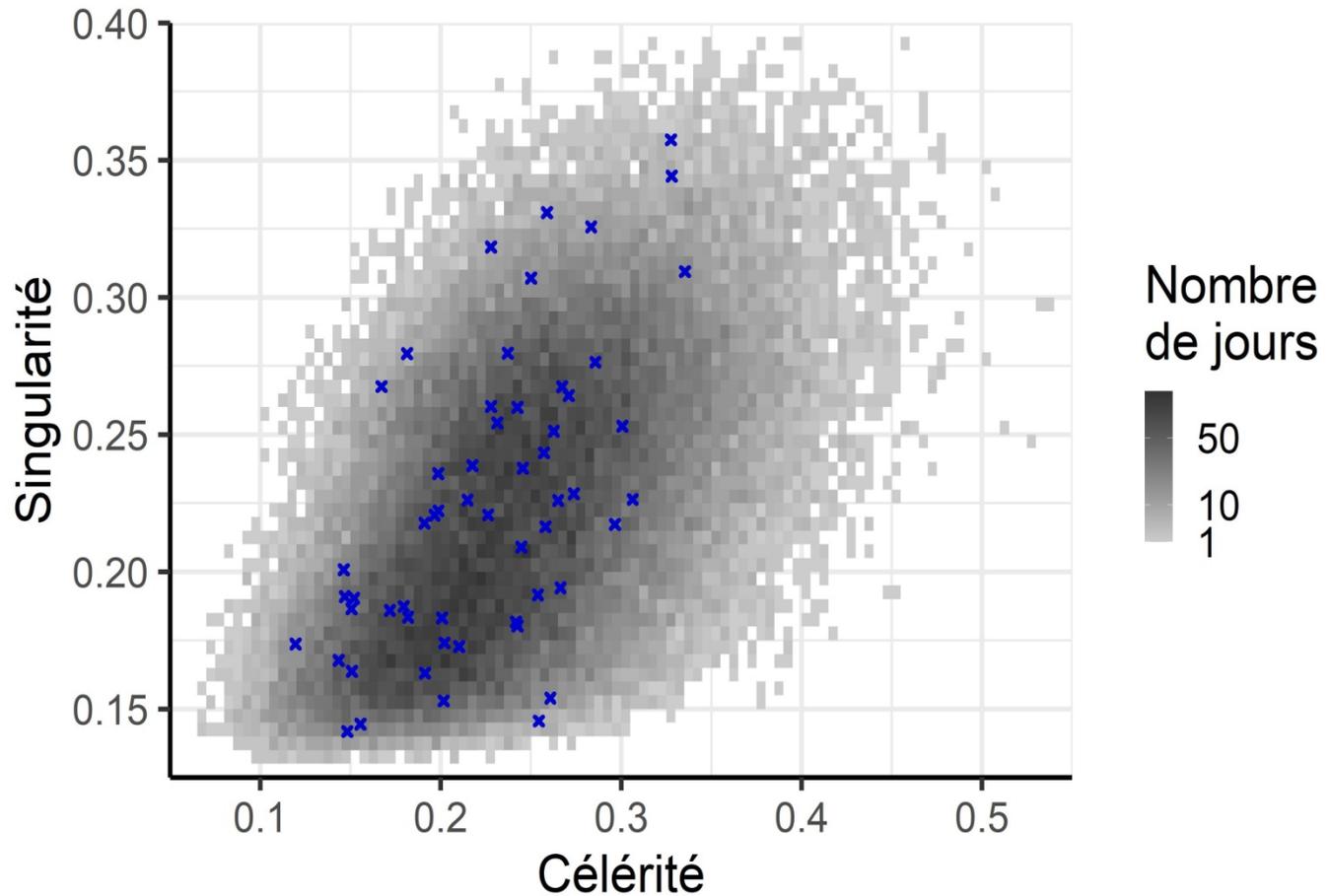
Indicateurs du géopotentiel 500hPa



Indicateurs du géopotentiel 500hPa



Indicateurs du géopotential 500hPa

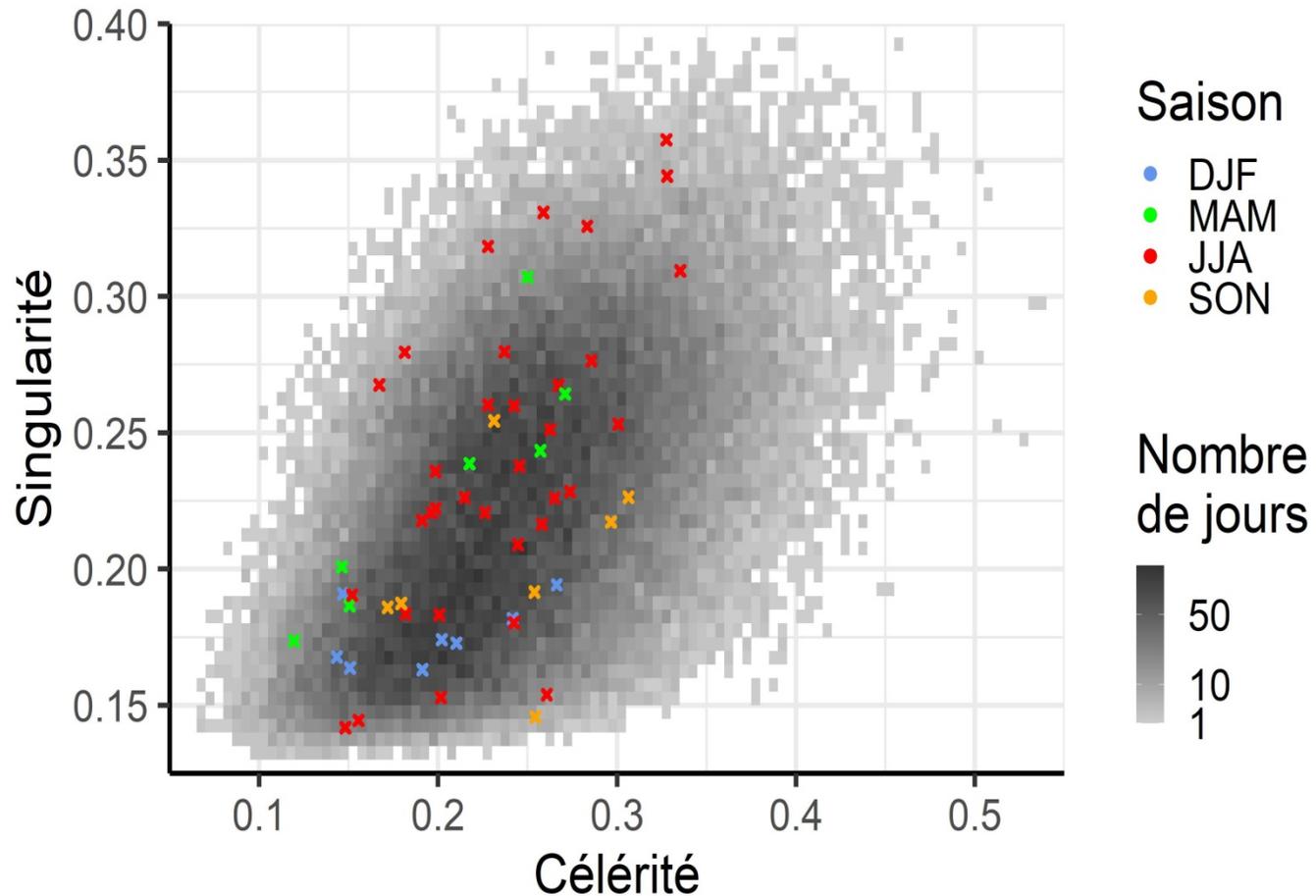


- **Mauvais discriminants** pour l'ensemble des **évènements torrentiels**



Indicateurs du géopotential 500hPa

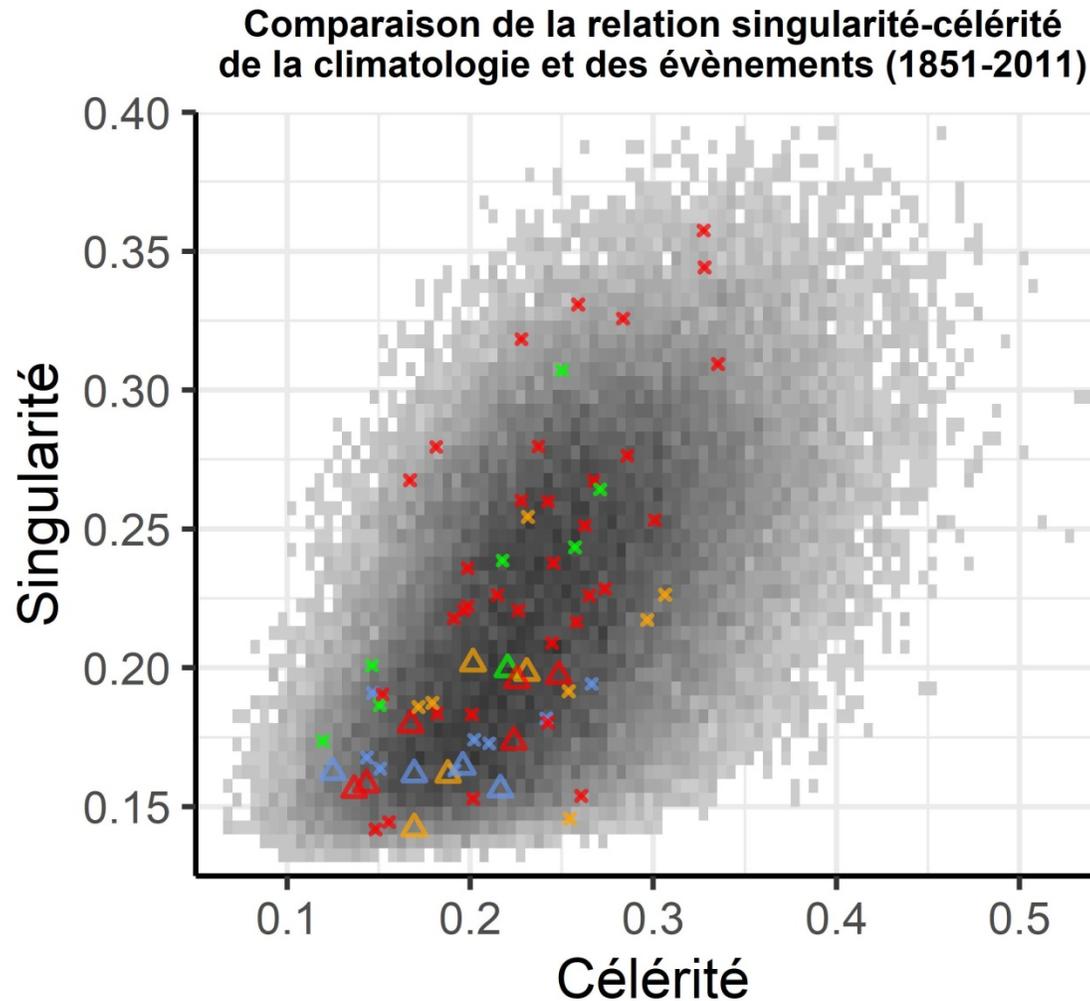
Comparaison de la relation singularité-célérité de la climatologie et des évènements (1851-2011)



- **Mauvais discriminants** pour l'ensemble des **évènements torrentiels**
- **Bons discriminants** pour les **crues hivernales**



Indicateurs du géopotential 500hPa

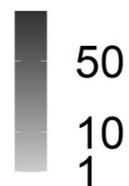


Saison

- DJF
- MAM
- JJA
- SON

- △ Concomitant torrent-rivière
- × Torrentiel

Nombre de jours

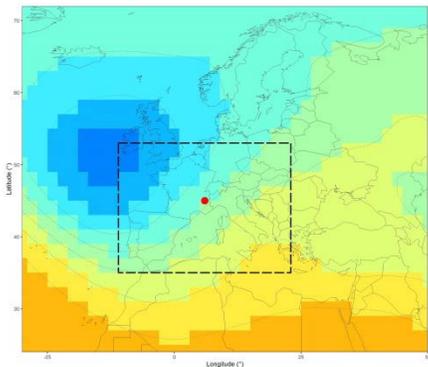


- **Mauvais discriminants** pour l'ensemble des **événements torrentiels**
- **Bons discriminants** pour les **crues hivernales** et les **crues concomitantes rivière-torrent**
 - Faible singularité (situation typique)
 - Relativement faible célérité (stationnarité)



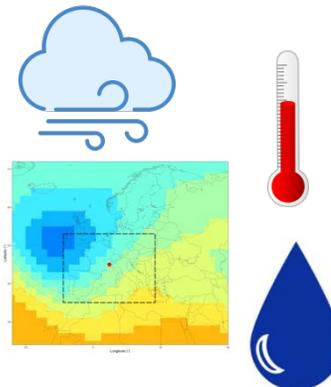
Résumé

- Flux **Méditerranéens** et **Océaniques** les plus générateurs de crues
- Pic de crue **printemps-été**
- Etude statistique du **géopotential 500hPa** et des **circulations grandes échelles**
 - Indicateurs actuels **discriminent uniquement** les **situations météorologiques de concomitance rivière-torrent** et de **crues hivernales**
 - Précipitations stratiformes étendues?



Perspectives

- **Nouveaux indicateurs** sur **d'autres variables météorologiques** pour d'autres types de crues
- **Evolution passée (et future)** des conditions génératrices de crues torrentielles sur le « Y Grenoblois »





Action 3: Transport solide: caractérisation géomorphologique et pré-détermination des volumes transportés

Maxime Morel, INRAE / UR ETNA

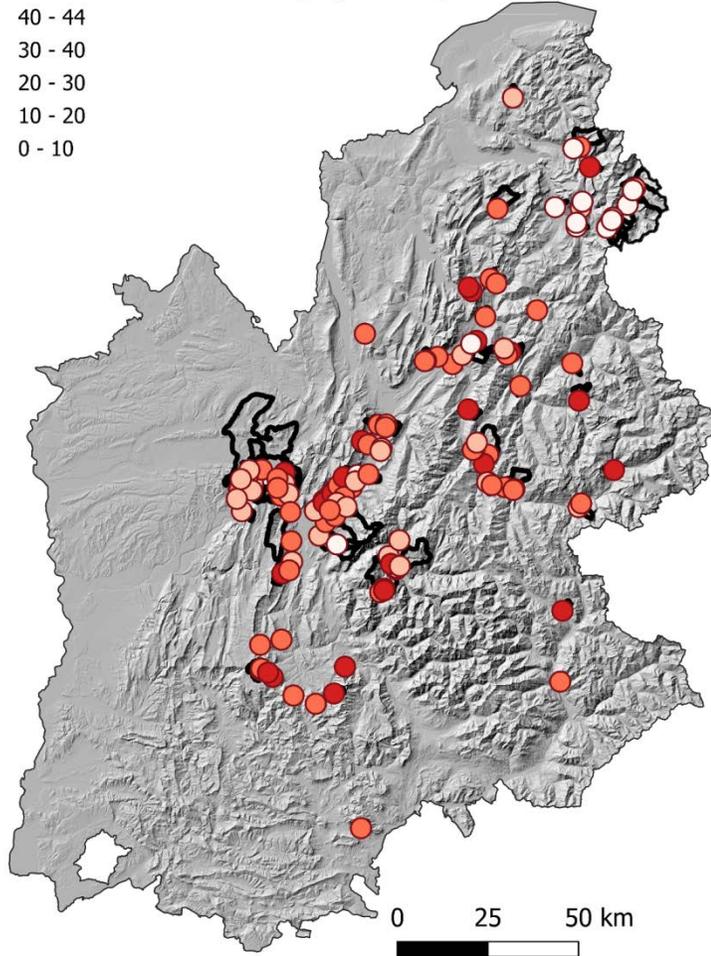
Supervision Guillaume Piton, Caroline Le Bouteiller



Recueil des données

Nombre d'années de suivi des plages de dépôt

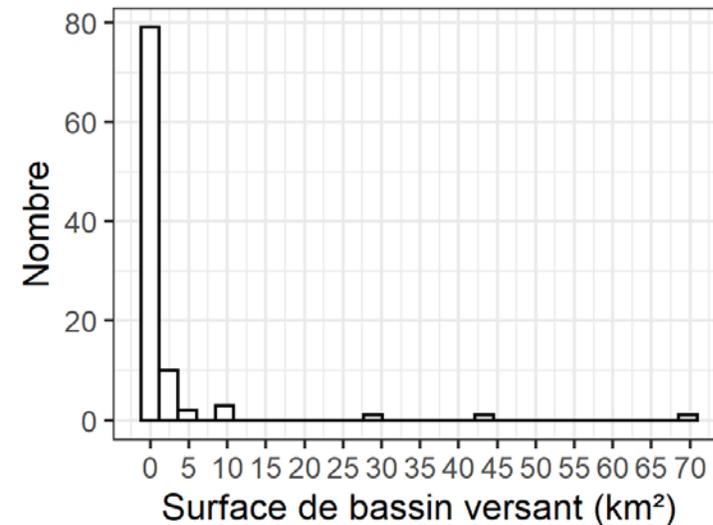
- 40 - 44
- 30 - 40
- 20 - 30
- 10 - 20
- 0 - 10



Localisation des plages de dépôts et durée des chroniques de curage

Synthèse des gestionnaires des plages de dépôts

Gestionnaire	Nombre d'ouvrages
SM3A	17
AS	33
RTM (domanial)	45
RTM (communal)	29
RTM (privé)	1
Métropole de Grenoble	4



Distribution des surfaces des bassins versants étudiés



Caractérisation des apports sédimentaires dans les bassins

Deux sources de données d'apports solides

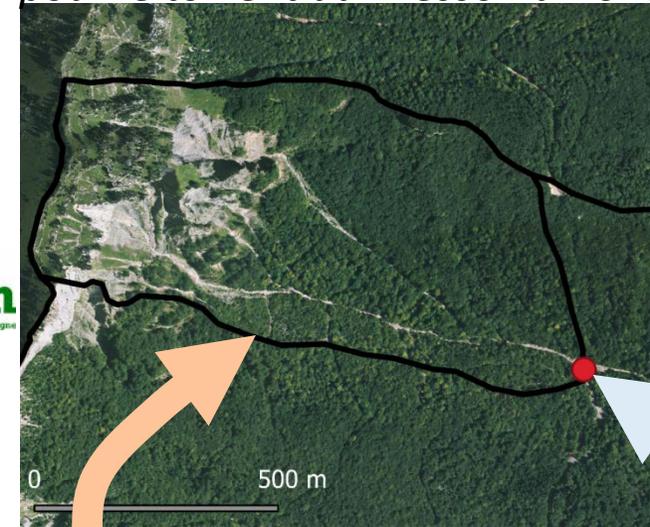
- Archives historiques de la BD RTM
- Chronique de curages (gestionnaire)

Création de séries temporelles d'apports sédimentaires pour chaque bassin versant

Estimation des volumes d'apports solides

- Volumes moyens annuels
- Volumes extrêmes (ex: période de retour 10 ans, 20 ans, 50 ans...)

Exemple des données d'apports sédimentaires pour le torrent du Bresson amont



Archives historiques « évènements »

Date	Vol. m ³	Intensité
16/06/1819	?	3
...		
02/07/1987	700	2
...		
30/06/1990	1000	2
...		
03/08/1998	?	1
...		
10/08/2002	?	2
...		
10/08/2004	?	2
...		
01/06/2008	1500	2
...		
01/07/2016	?	2
...		

Chroniques de curage

Année	Volume m ³
1987	5700
...	
1994	1500
...	
1998	3000
1999	3000
...	
2002	2000
...	
2004	800
2005	3000
...	
2008	1500
...	
2015	700
...	

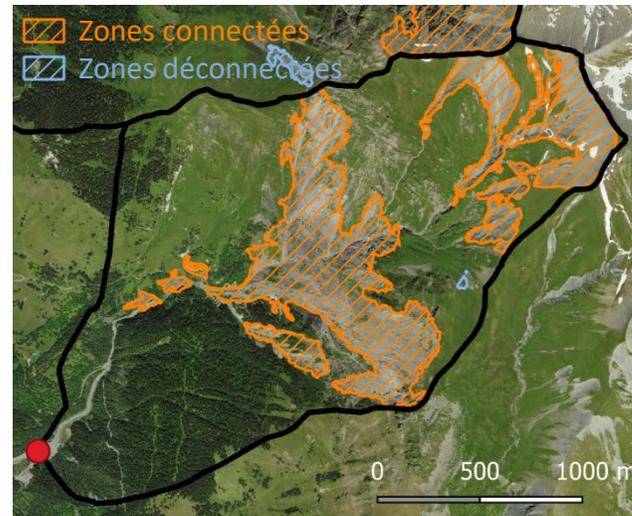
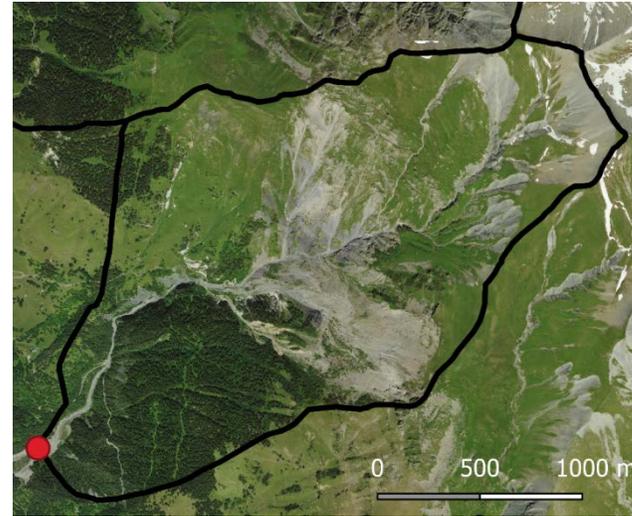


Description des caractéristiques géomorphologiques des bassins versants

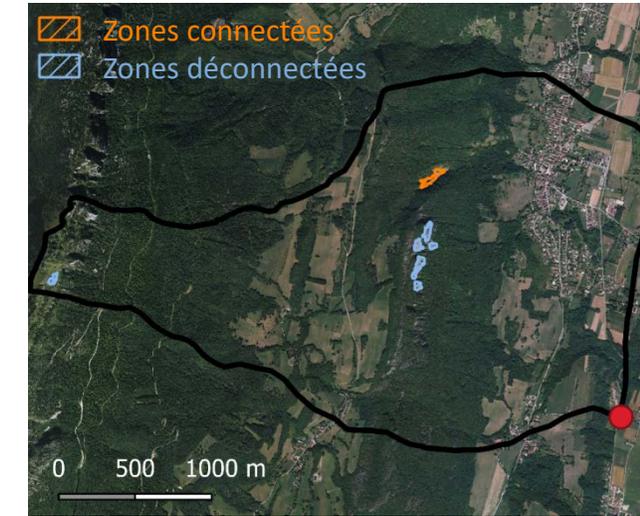
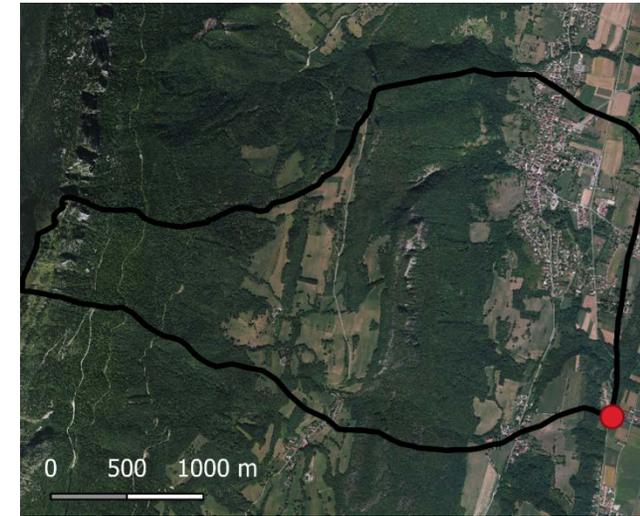
Descriptions des caractéristiques de bassins versants afin d'expliquer les apports solides

- **Taux de zones en érosion connectées dans le bassin versant**
- Index de connectivité sédimentaire
- Pente du cours d'eau
- Pente du cône de déjection
- Indice de Melton
- Indice géologique
- Descripteurs météorologiques

Torrent la Ravoire



Torrent la Maladière



Délimitation des zones d'érosion dans les bassins versants

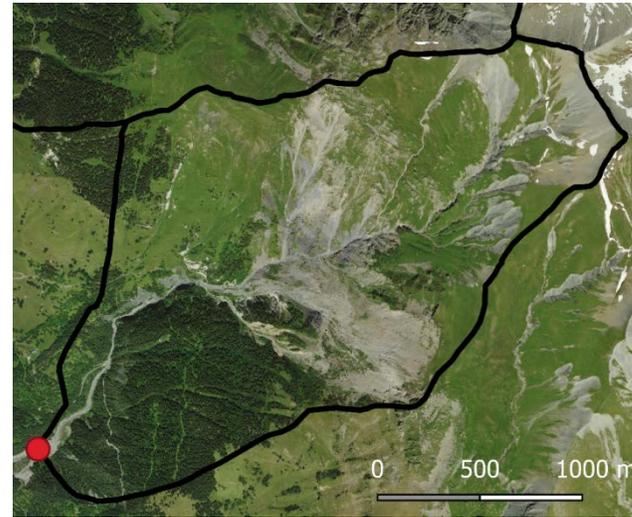


Description des caractéristiques géomorphologiques des bassins versants

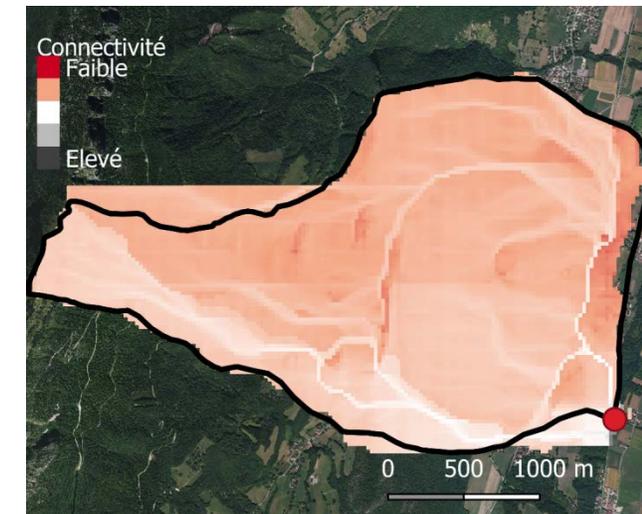
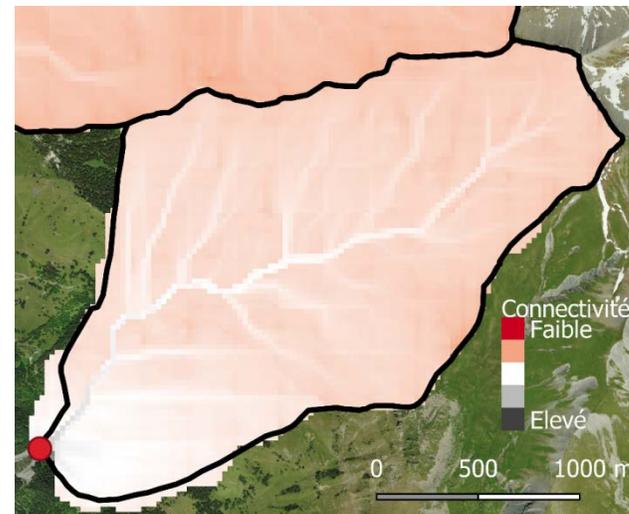
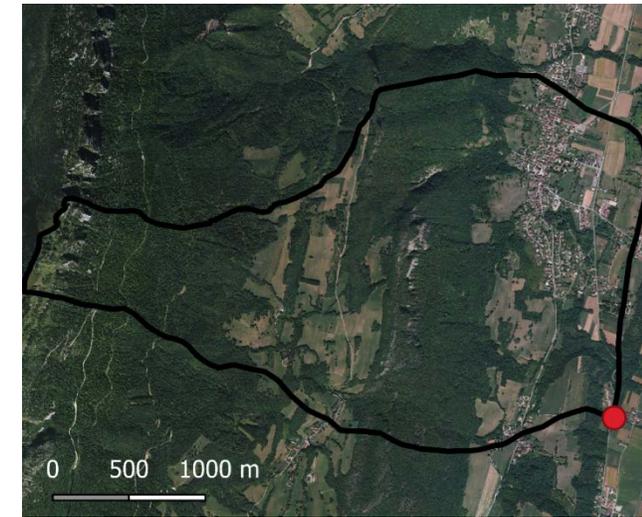
Descriptions des caractéristiques de bassins versants afin d'expliquer les apports solides

- Taux de zones en érosion connectées dans le bassin versant
- **Index de connectivité sédimentaire**
- Pente du cours d'eau
- Pente du cône de déjection
- Indice de Melton
- Indice géologique
- Descripteurs météorologiques

Torrent la Ravoire



Torrent la Maladière

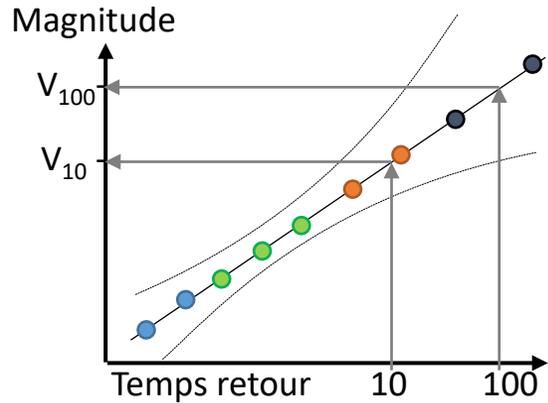


Index de connectivité sédimentaire (Cavalli et al. 2013, Geomorphology)

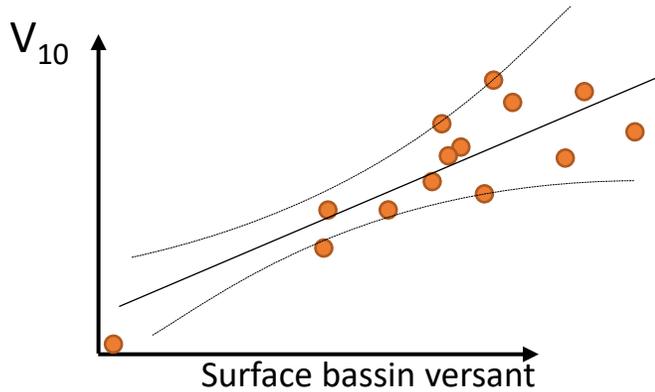


Suites sur l'action 3

Caractériser l'activité de transport solide ∇ bassin



Ensemble des bassins

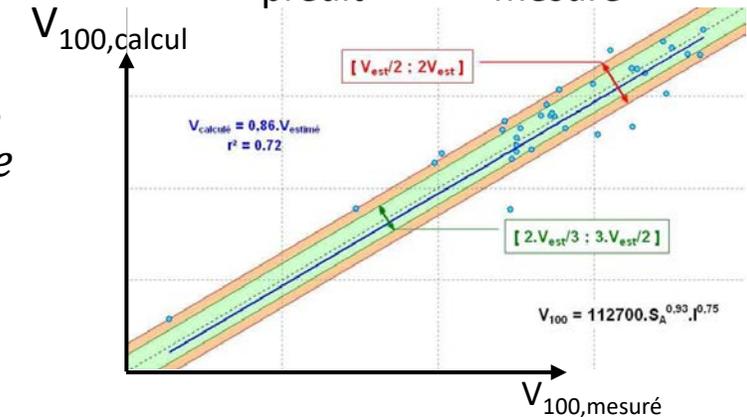


Ajustement (random forest)

$$V_{10} = f(S_{bv}, S_{active}, \text{Pente}, \text{Melton}, \text{Indice}, \text{Connectivité}, \text{pluie}, \dots)$$

Analyse des résidus

$V_{\text{prédit}}$ VS $V_{\text{mesuré}}$



Peteuil (2010)

1. Ajustement des volumes solides par chaque bassin, éventuellement incluant données Fiches Evènements BD RTM
2. Démonstration des corrélations majeures (surface de bassin versant, Melton, laves VS charriage)
3. Ajustement de formules empiriques Volume solide = f(paramètres)
4. Etude des résidus entre Volume prédit et Volume mesuré
5. Application de la méthode à une dizaine de bassins versants sélectionnés par la METRO en début de projet





Action 4: Développer un cadre de modélisation hydrologique pour les petits bassins versants torrentiels

Résultats avec le modèle hydrologique MORDOR-SD

Alexandre Mas, INRAE / UR ETNA

Supervision Guillaume Evin



Approche méthodologique

Forçages hydro-météorologiques

Précipitations :

	Spazm	Comephore
Construction	Réanalyse journalière (EDF) désagrégée avec Safran	Compositage radar et pluviomètres horaires (Météo France)
Disponibilité	1958-2017	1997-2017
Avantages	Disponibilité étendue Gradients orographiques	Intensités horaires « réelles » Evènements localisés
Limites	Surestimation en altitude Désagrégation perfectible	Sous estimation des cumuls Faible visibilité massifs intérieurs

Températures : Spazm désagrégé Safran

Débits observés : Banque Hydro (interpolation des débits pas de temps variable) + EDF



Approche méthodologique

Modélisation hydrologique

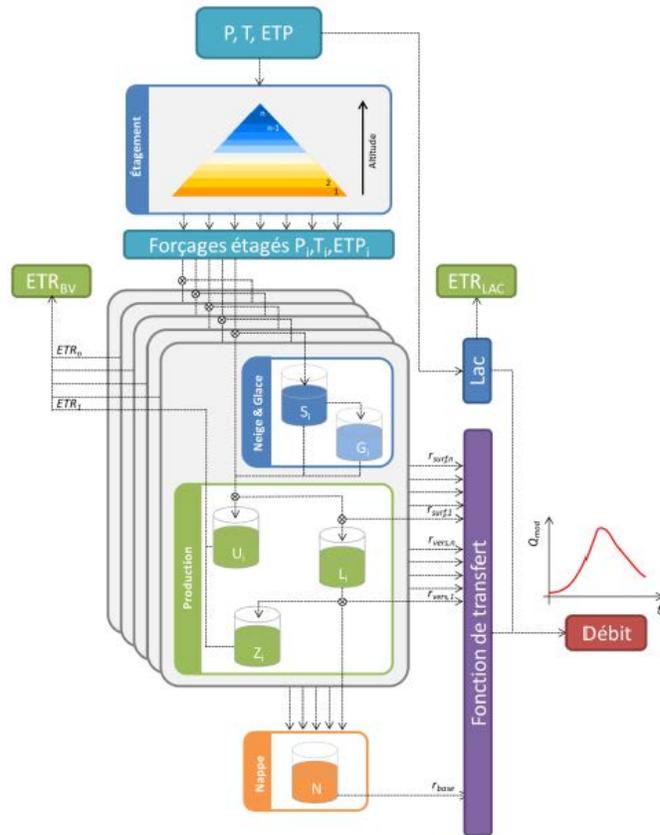


Figure 1 : Schéma fonctionnel de MORDOR SD.

Modèle MORDOR-SD :

- modèle conceptuel à réservoirs
- adapté aux bassins de montagne : découpage en bandes d'altitudes et spatialisation des forçages, module neige et glace.
- expertise EDF-DTG
- 14 paramètres à caler

Calage du modèle (= estimation des paramètres) :

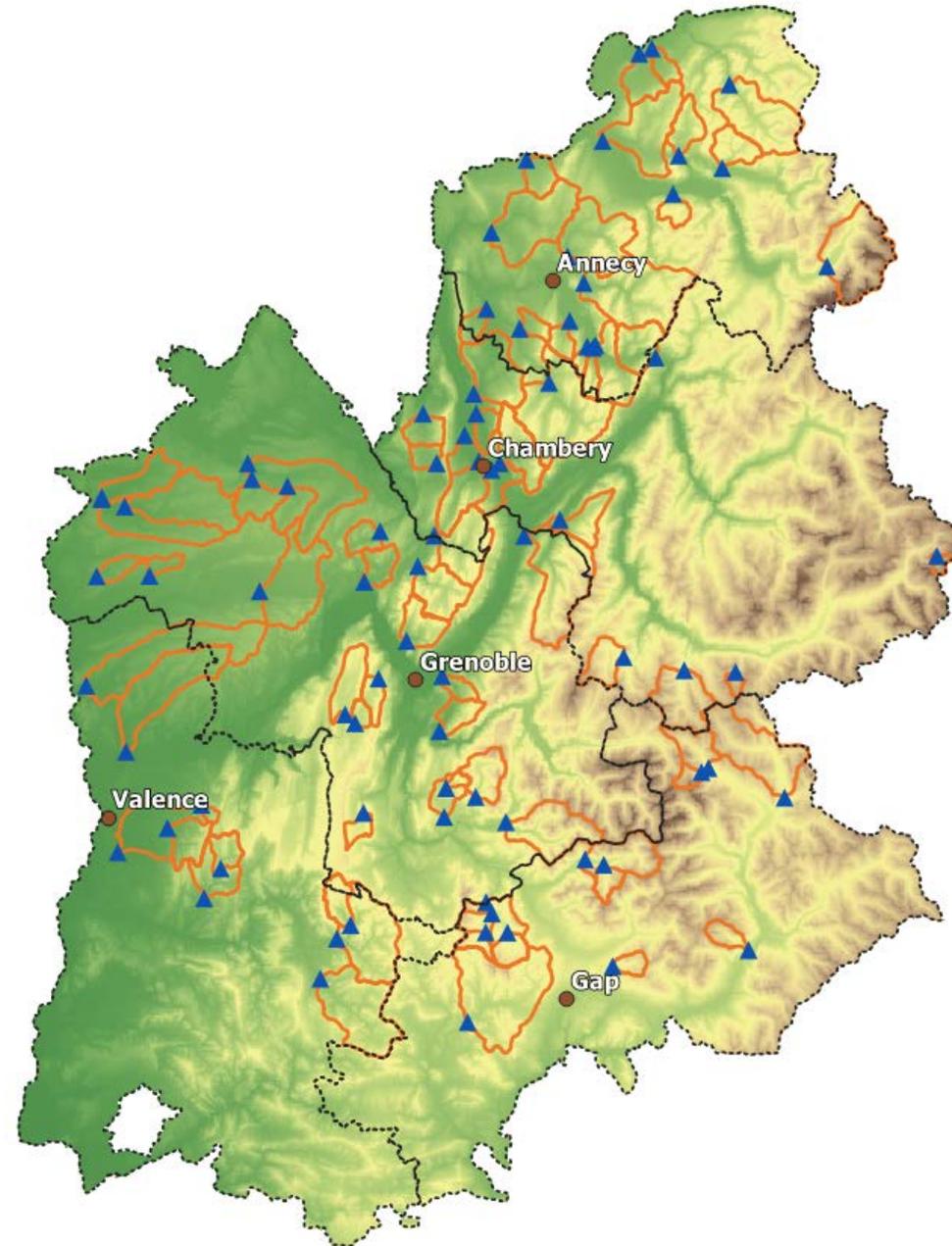
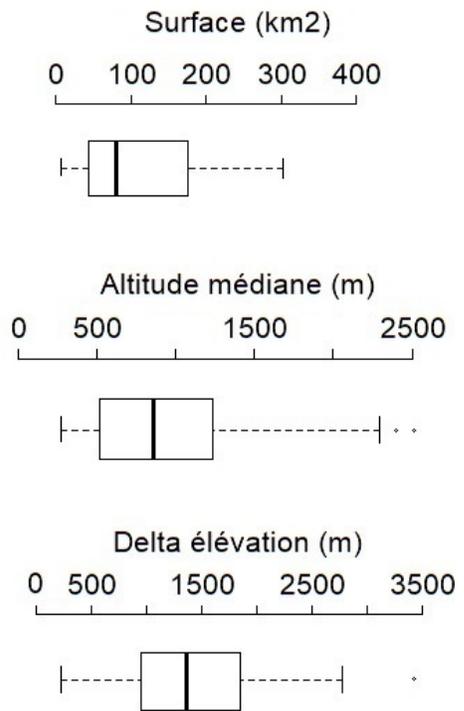
- comparaison des débits observés et simulés
- performances évaluées par un critère synthétisant 3 signatures hydrologiques (débits horaires, régime interannuel, débits classés)
- sélection du jeu de paramètres donnant la meilleure performance

Source: Garavaglia et al., 2017



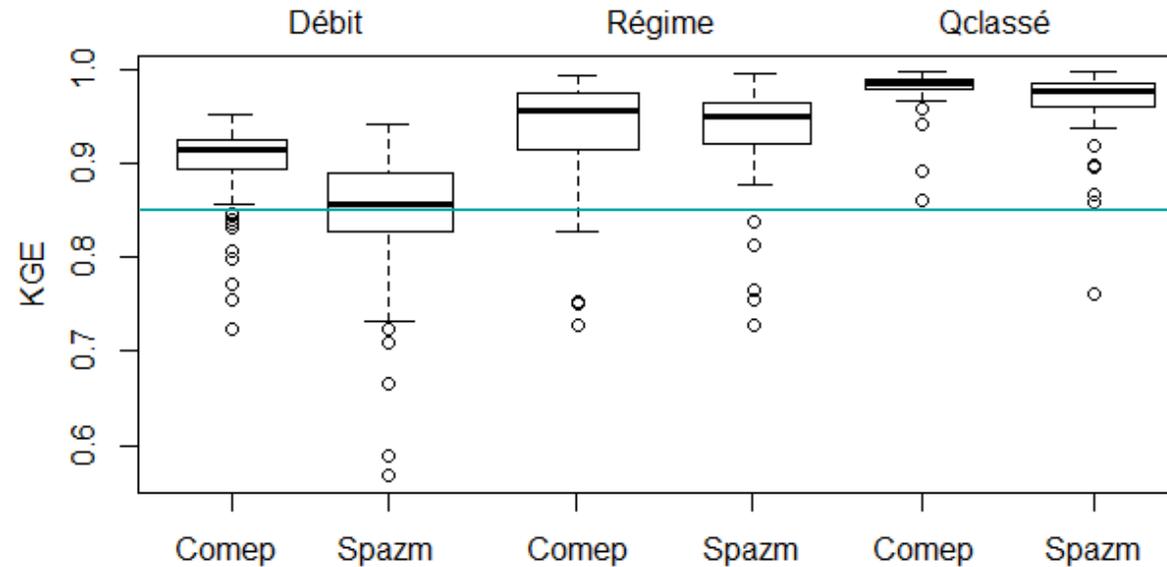
Zone d'étude

**79 bassins jaugés retenus
(62 sur 1997 – 2017)**



Résultats

Performances globales



Pour chaque signature hydrologique :

$$KGE = \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2}$$

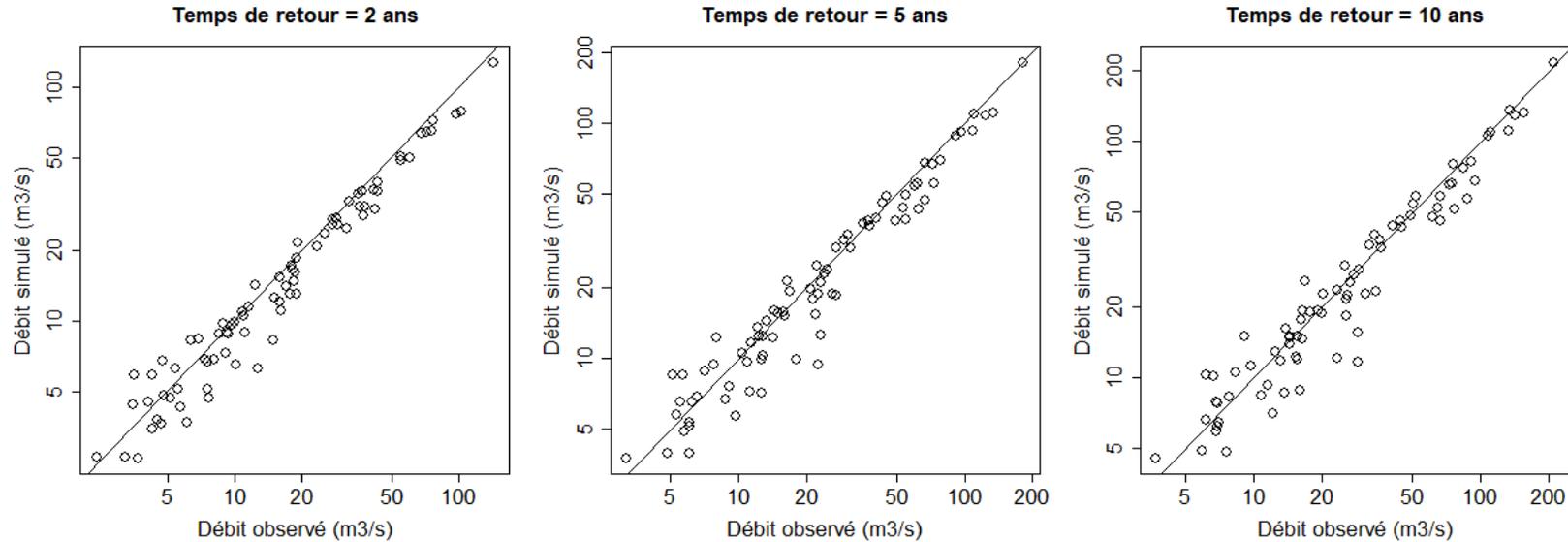
avec r le coefficient de corrélation entre les séries observées et simulées, μ la moyenne et σ l'écart type.

- De bonnes performances avec les deux forçages
- Limites de la désagrégation -> moins bons scores de Spazm sur le critère KGE-débit
- L'impact reste limité sur les débits classés et le régime



Résultats

Prédétermination des caractéristiques de crue (pluie Spazm)

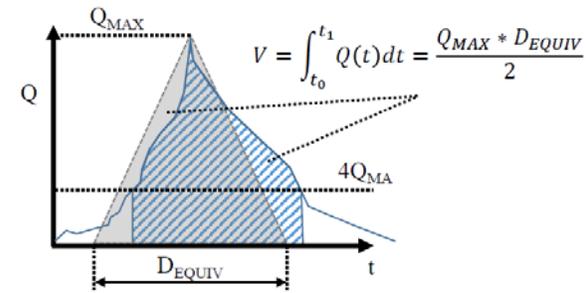


- Les distributions statistiques des débits de pointe sont globalement bien reproduits
- Les intervalles de confiance statistique pour les débits observés peuvent être relativement étendus lorsque les séries sont courtes : en moyenne +/- 15% du débit estimé et jusqu'à +/- 30%.



Suites sur l'action 4 « MORDOR-SD »

- Estimation de caractéristiques de crues additionnelles



- **Combinaison d'informations en sites non jaugés** : sorties du modèle hydrologique MORDOR-TS (Action 5) et données de gestion sédimentaire (Action 3).
- Comparaison aux quantiles de crues de référence (formules ingénierie, SHYREG)





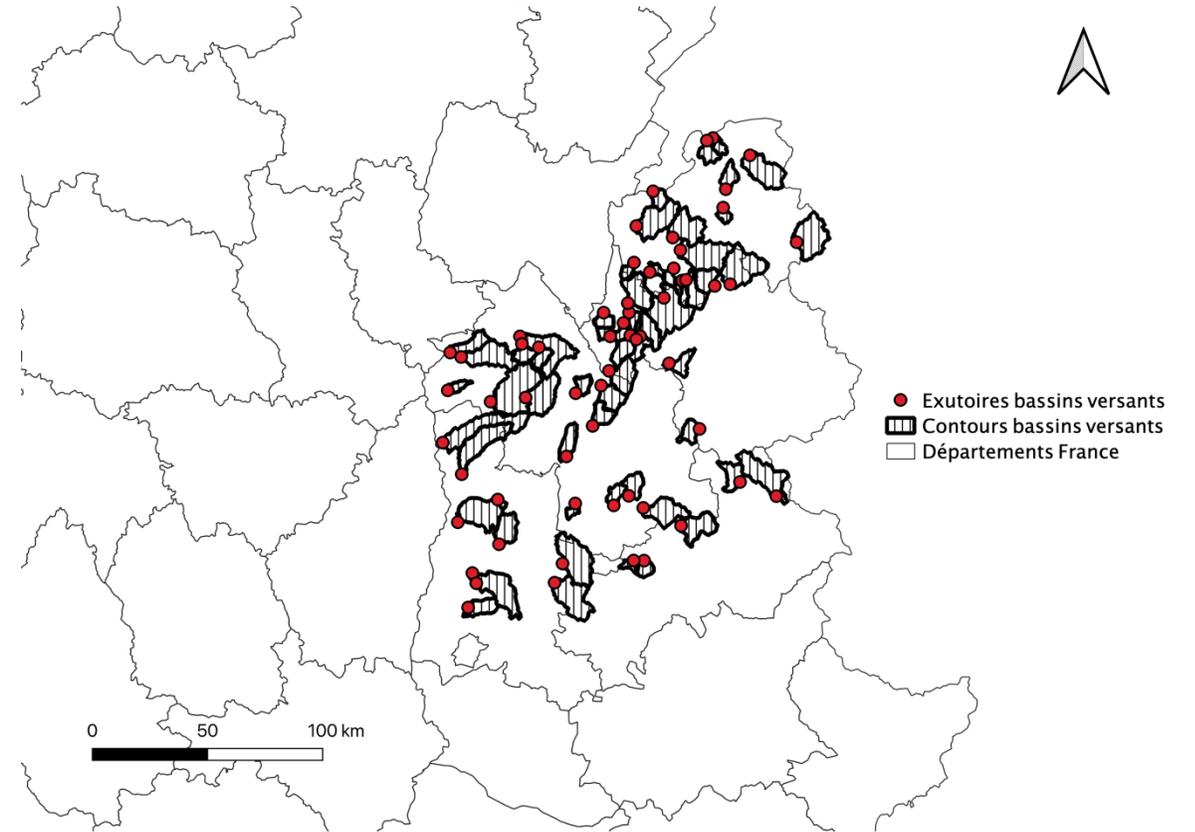
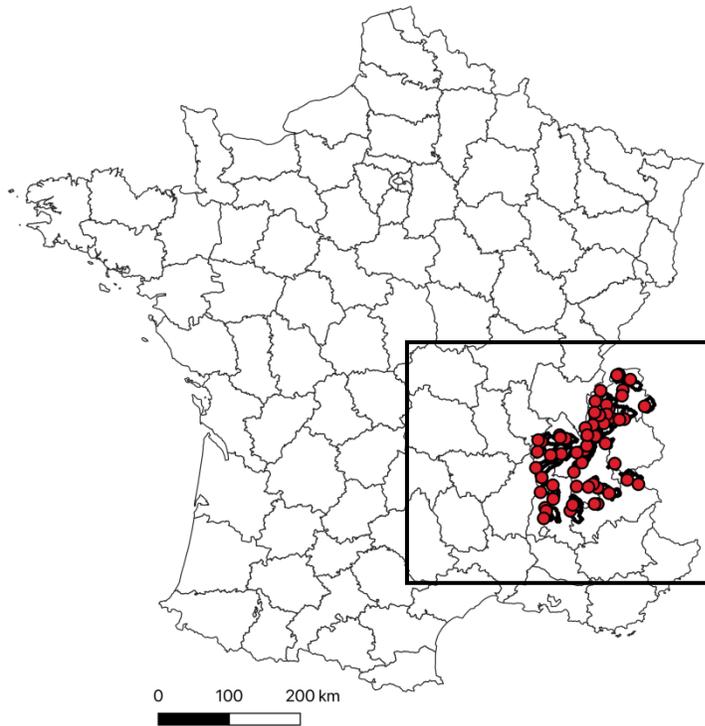
Action 4: Développer un cadre de modélisation hydrologique pour les petits bassins versants torrentiels

Résultats avec le modèle hydrologique GRDv2

François Colleoni, INRAE / UR RECOVER

Supervision Catherine Fouchier





Organisation :



Pôle Alpin Risques Naturels

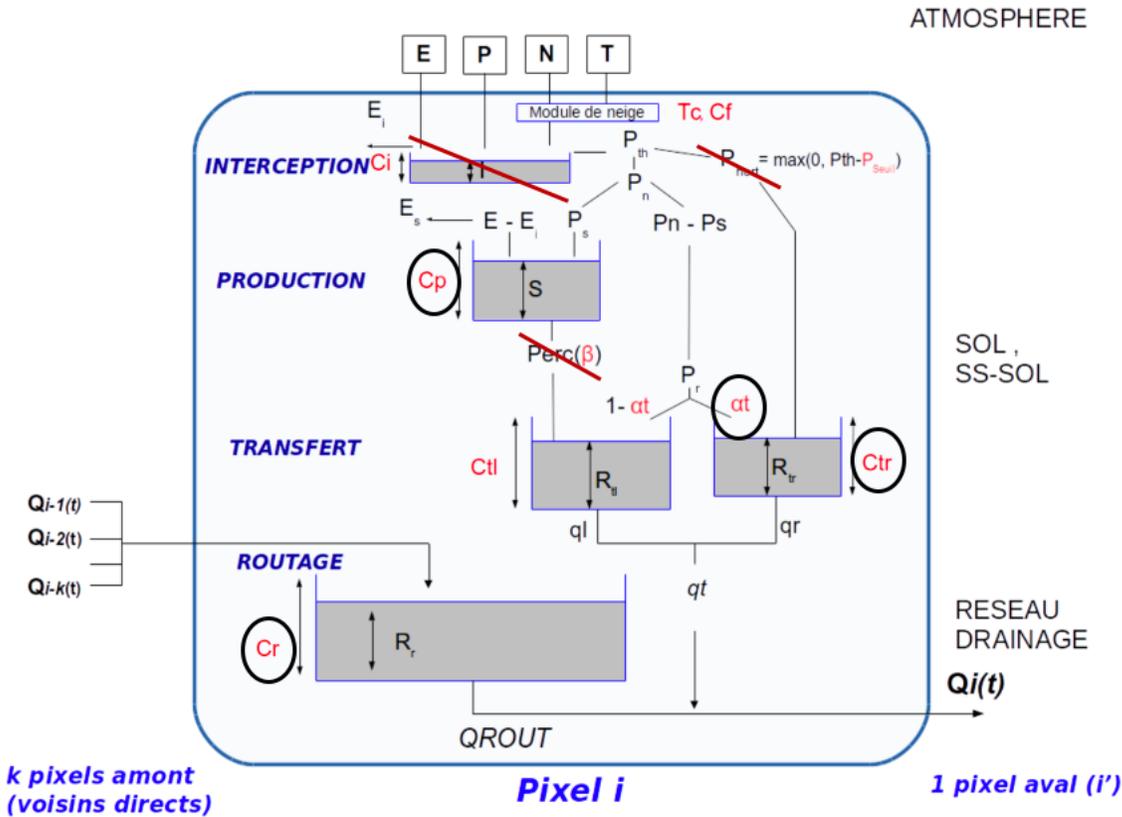
Soutiens et partenaires :



AGENCE NATIONALE DE LA COHÉSION DES TERRITOIRES

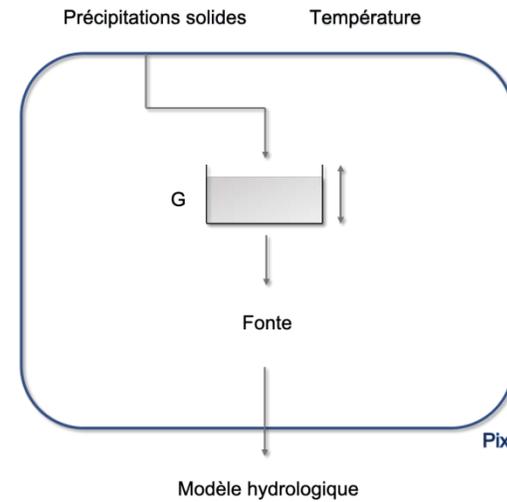


Modèle hydrologique GRDv2
Evolution du modèle utilisé dans Vigicrue Flash

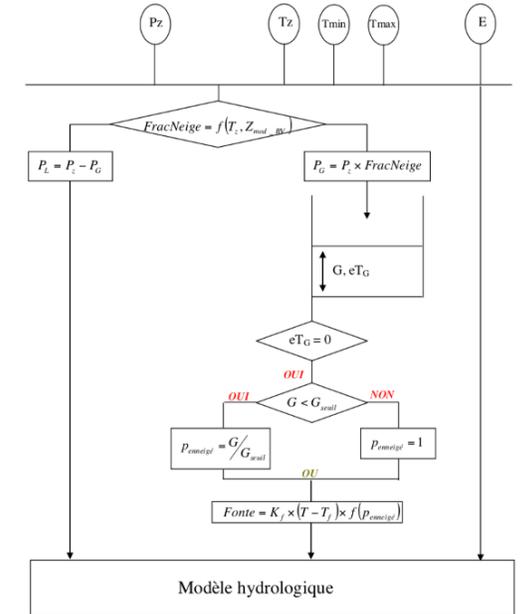


Deux modules neige testés

Module neige Loieau



Module neige CemaNeige (A. Valery 2010)



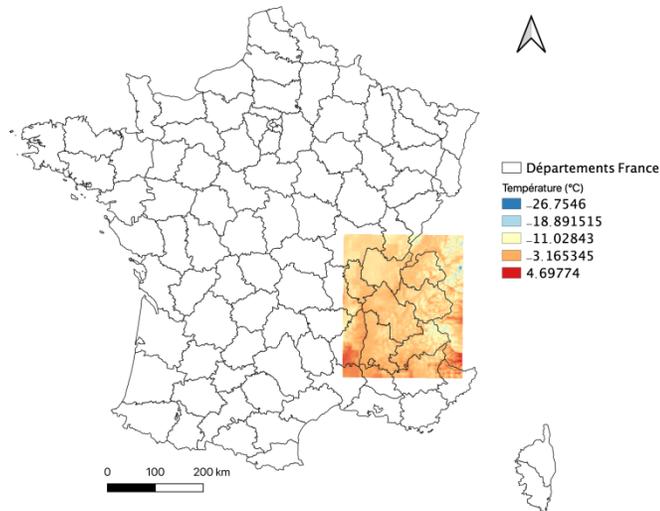
Organisation :



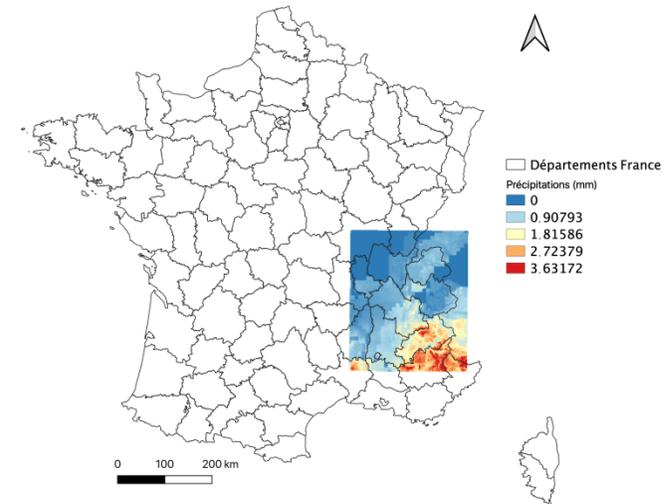
Soutiens et partenaires :



- Calage-Validation sur la période du 1 Janvier 1997 au 31 Décembre 2017 au pas de temps horaire avec optimisation du critère de Nash.
- Calage uniforme des paramètres. Une seule valeur du paramètre par bassin versant.
- Utilisation des forçages atmosphériques SPAZM précipitations totales et températures. Les données sont distribuées au km² et désagrégées au pas de temps horaire par la méthode de Magand et al. 2014. (Mas Alexandre)



Températures SPAZM – 01/01/1997 00h00



Précipitations SPAZM – 01/01/1997 00h00

Organisation :



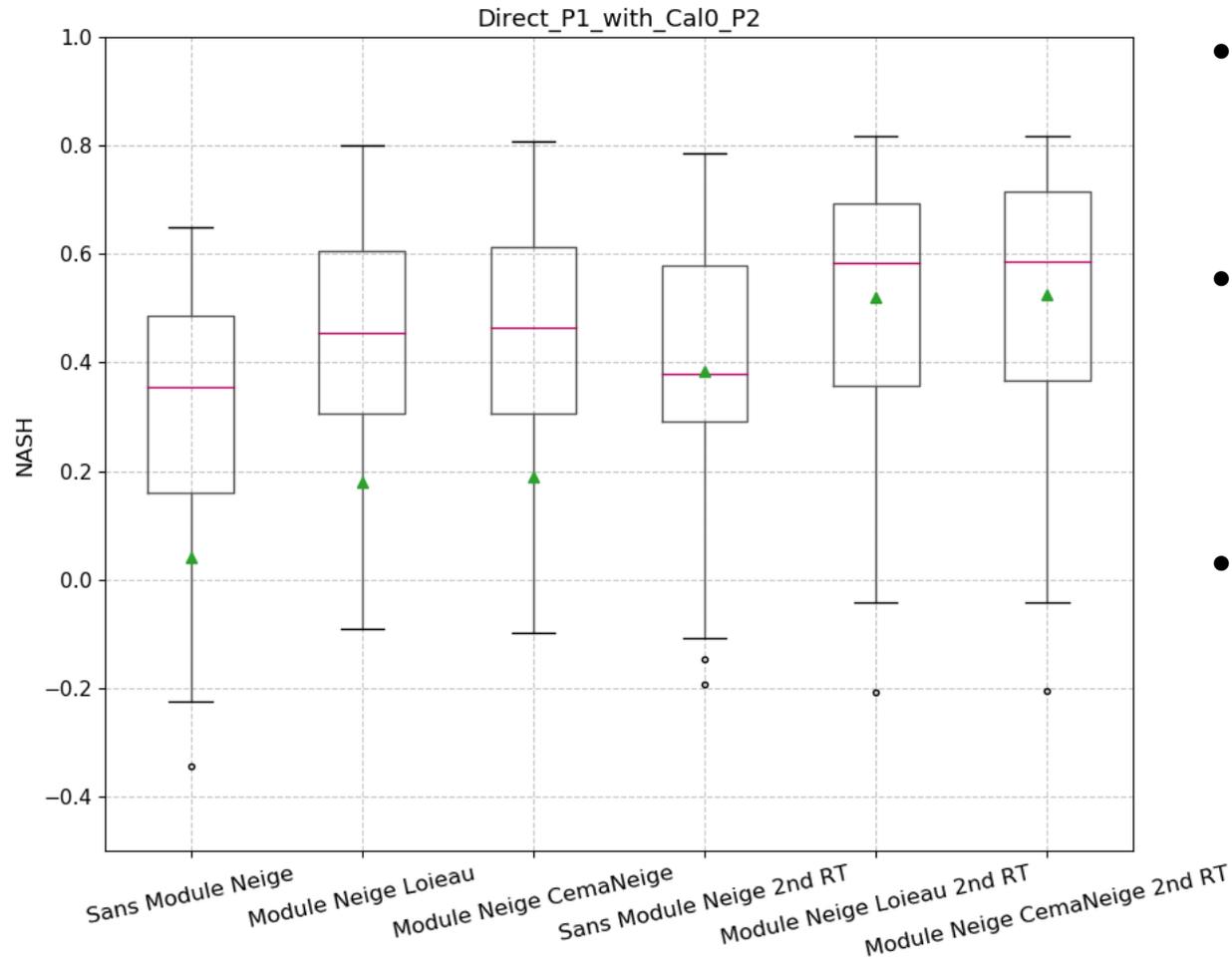
Pôle Alpin Risques Naturels

Soutiens et partenaires :



AGENCE NATIONALE DE LA COHÉSION DES TERRITOIRES





- Les 3 premiers Boxplots représentent les performances du modèle hydrologique GRDv2 pour une version à 3 paramètres libres.
- Les 3 derniers Boxplots représentent les performances du modèle hydrologique GRDv2 pour une version à 4 paramètres libres introduisant un second réservoir de transfert.
- Pour chaque version de GRDv2, une comparaison est faite entre une simulation sans module neige, avec le module neige Loieau et le module neige CemaNeige.

Organisation :



Pôle Alpin Risques Naturels

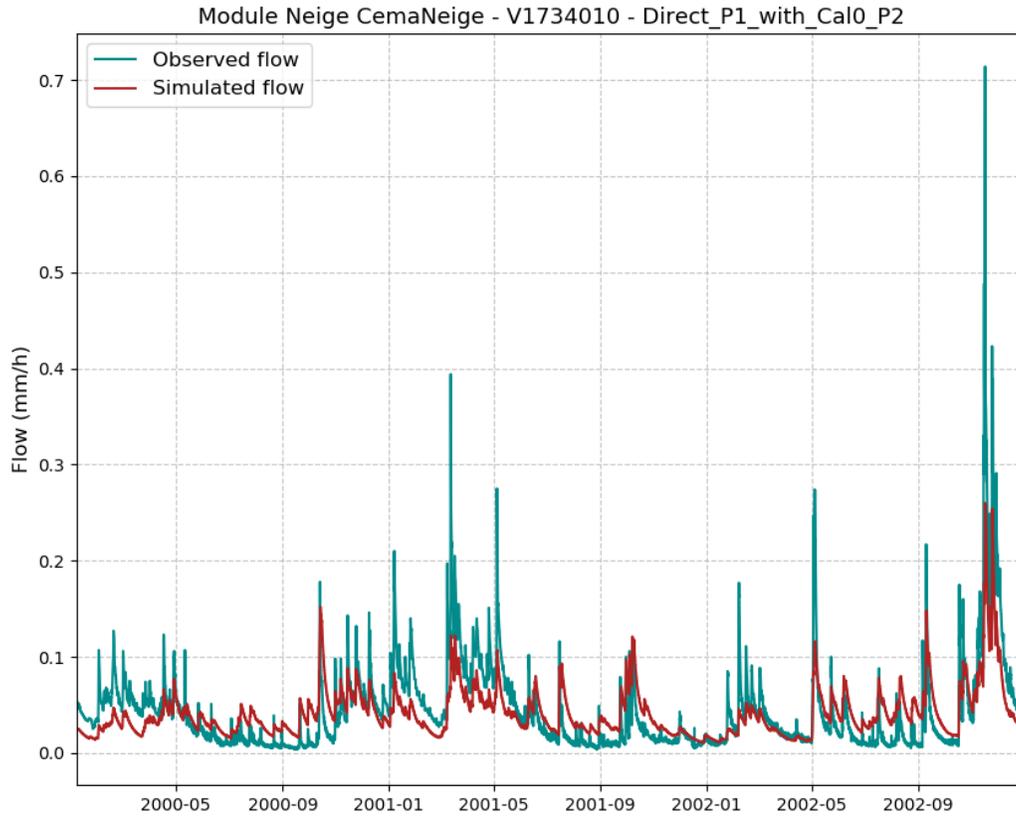
Soutiens et partenaires :



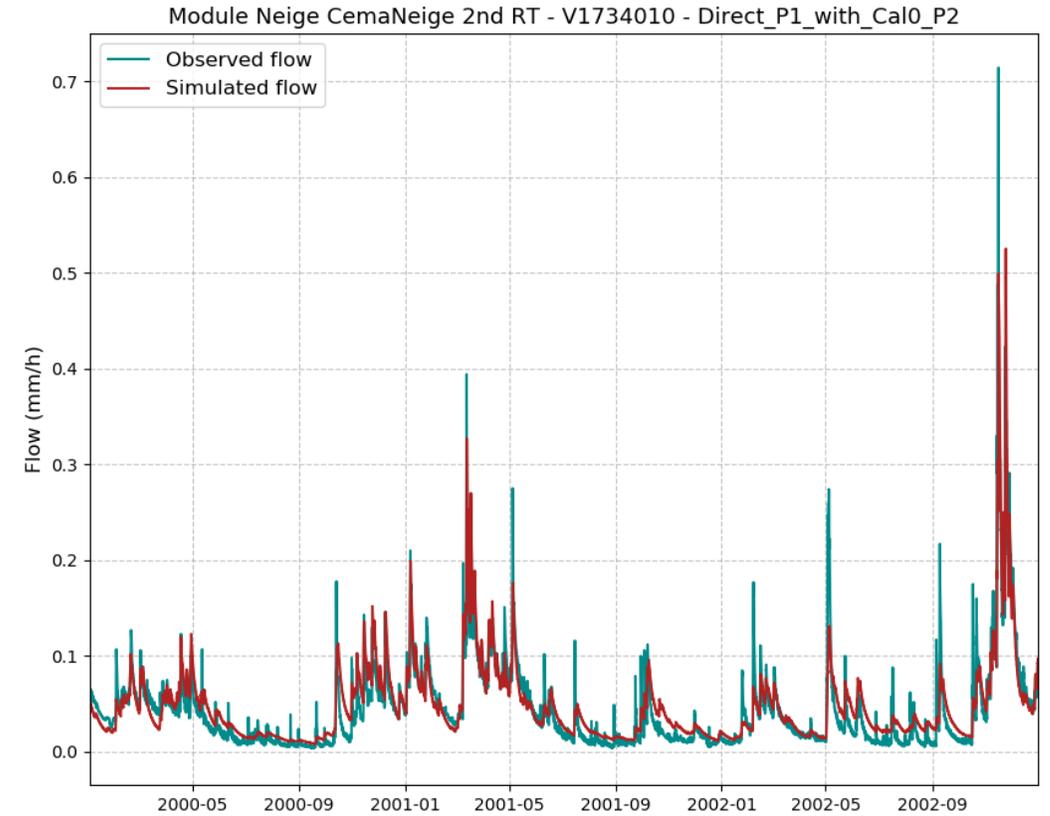
AGENCE NATIONALE DE LA COHÉSION DES TERRITOIRES



Hydrogrammes sur la période Janvier 2000 – Janvier 2003



Version à 3 paramètres libres de GRDv2



Version à 4 paramètres libres de GRDv2

Organisation :



Pôle Alpin Risques Naturels

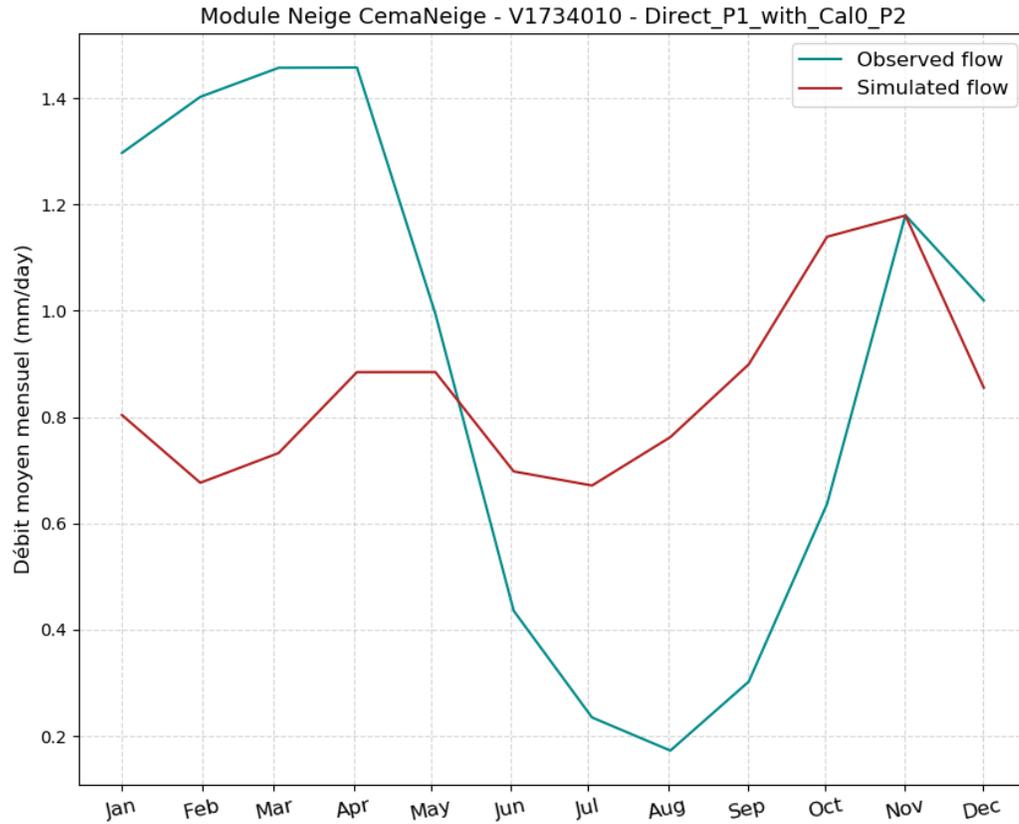
Soutiens et partenaires :



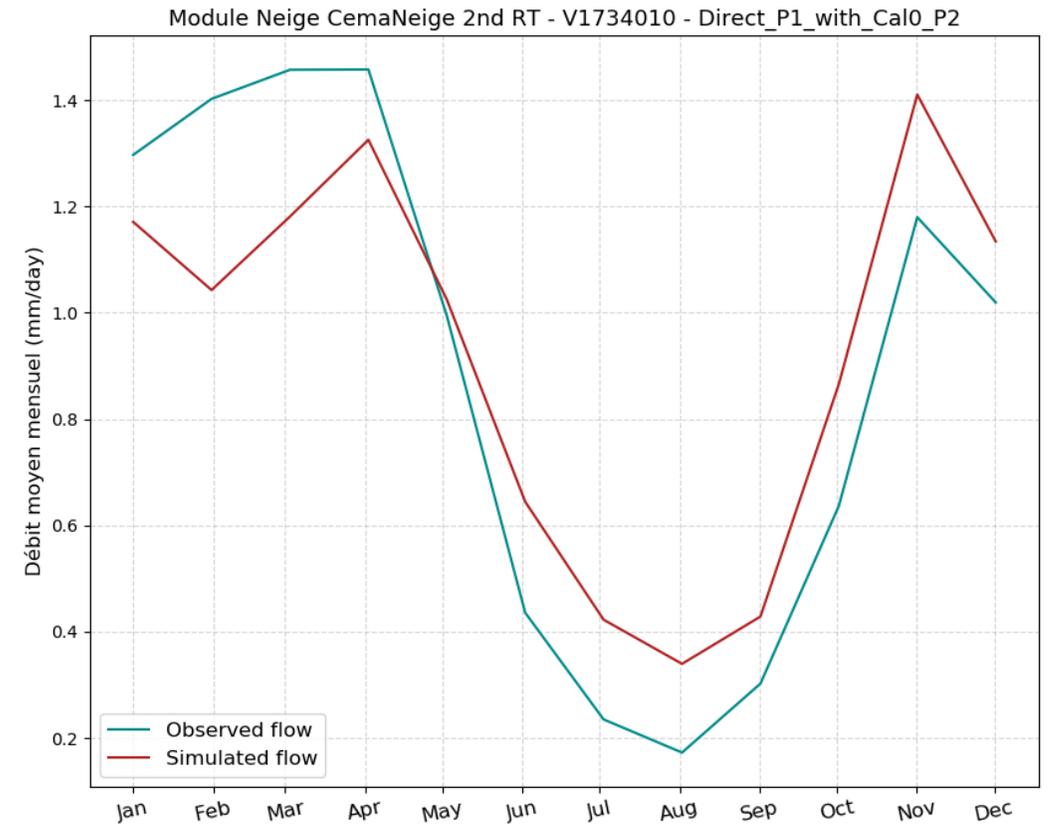
AGENCE NATIONALE DE LA COHÉSION DES TERRITOIRES



Débits moyens mensuels



Version à 3 paramètres libres de GRDv2



Version à 4 paramètres libres de GRDv2

Organisation :



Pôle Alpin Risques Naturels

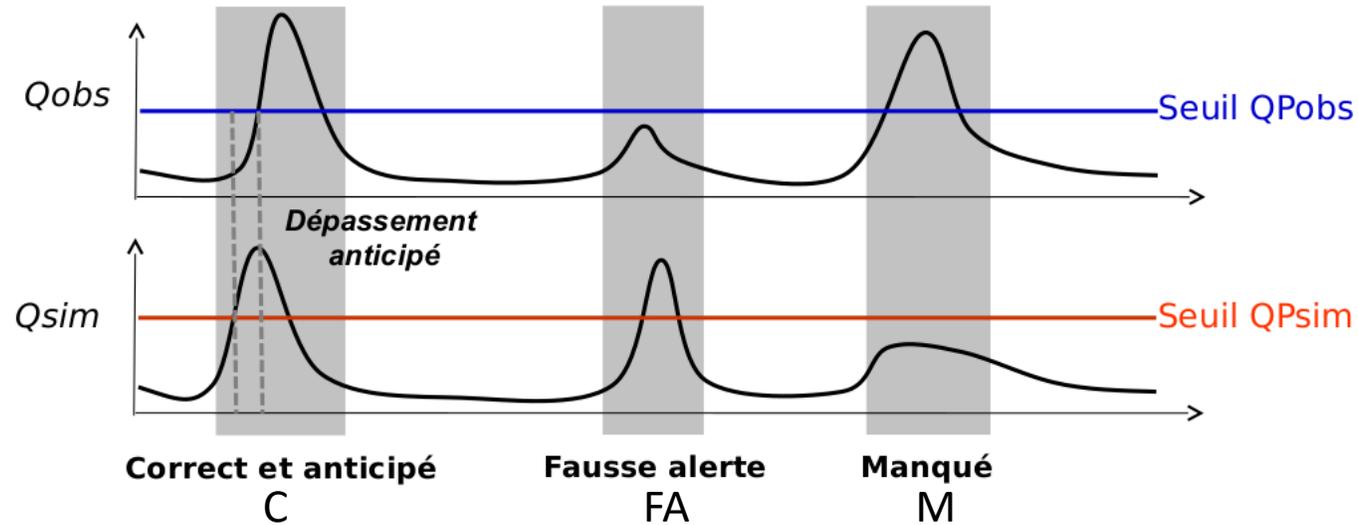
Soutiens et partenaires :



AGENCE NATIONALE DE LA COHÉSION DES TERRITOIRES



Travaux en cours : évaluation des performances du modèle en anticipation de crues



- **POD : Taux de bonne détection** (*Probability of Detection, sur dépassements observés*)
- **SR : Taux d'alerte correcte** (*Success Ratio, conditionné sur dépassements prévus*)
- **CSI : Critical Success Index** (*incluant alertes manquées et fausses alertes*)

$$POD = \frac{C}{C + M}$$

$$SR = \frac{C}{C + FA}$$

$$CSI = \frac{C}{C + M + FA}$$

Source: J. Demargne

Organisation :



Pôle Alpin Risques Naturels

Soutiens et partenaires :



AGENCE NATIONALE DE LA COHÉSION DES TERRITOIRES



- Mettre en œuvre un calage distribué des paramètres de GRDv2.
- Implémentation d'un module de transfert souterrain pour palier les moindres performances des bassins versants à faible coefficient d'écoulement.

Organisation :



Pôle Alpin Risques Naturels

Soutiens et partenaires :



AGENCE
NATIONALE
DE LA COHÉSION
DES TERRITOIRES





Action 5: Concomitances de crues dans les Alpes du nord

Utilisation du modèle pluie-débit distribué MORDOR-TS

Loïc Orillard, IGE

Supervision Juliette Blanchet



Objectifs et méthodes

- Utiliser le modèle hydrologique MORDOR Totalemment Spatialisé de EDF sur les bassins-versants de l'Isère et du Drac.
 - Avec les réanalyses de précipitations SPAZM de EDF
 - Avec les réanalyses de précipitations radar COMEPHORE de Météo France
 - Performance de ces réanalyses pour de l'hydrologie sur des phénomènes de méso-échelle (100-1000 km²)
- Etude et caractérisation de la concomitance inter-torrent



Les produits pluviométriques d'entrée

SPAZM: (1997-2017)

Interpolateur de pluie de référence pour l'hydrologie à EDF issu d'une **classification par type de temps**.

Résolution journalière au km²

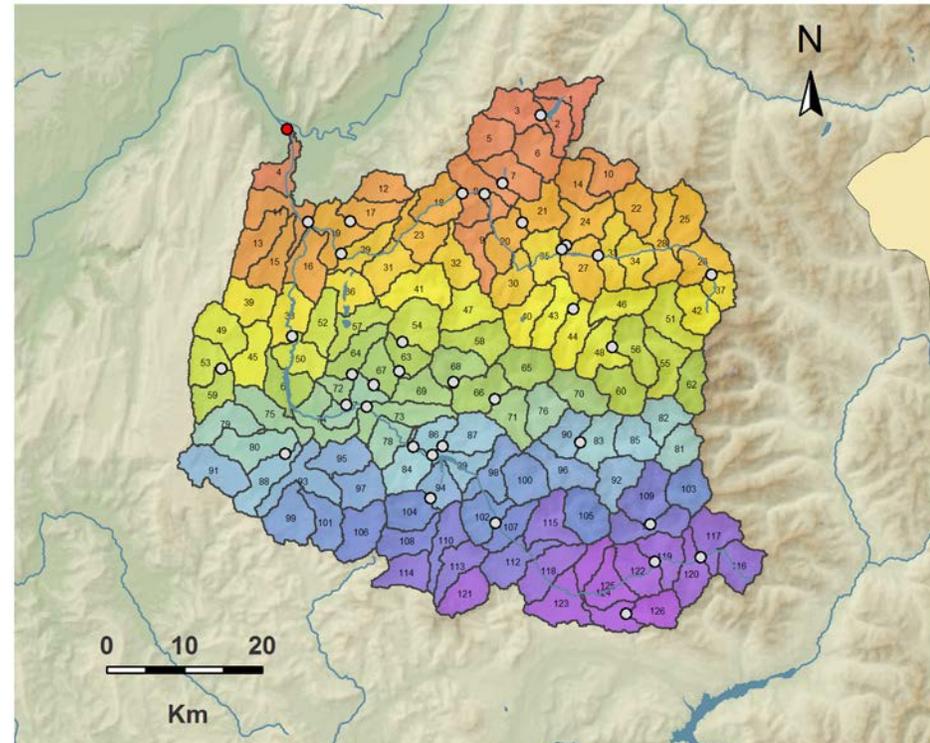
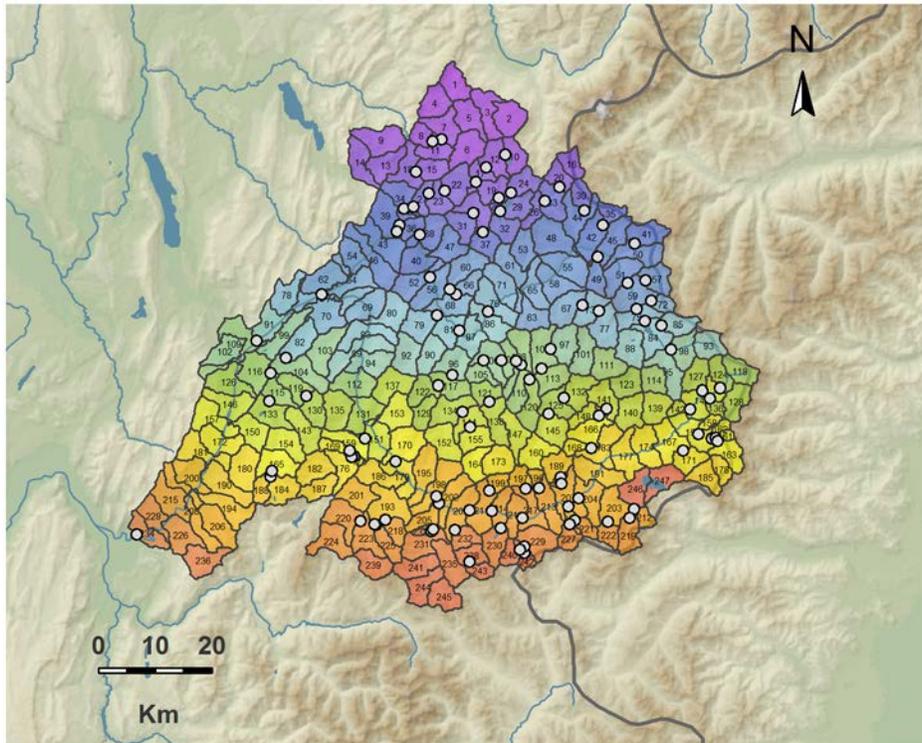
COMEPHORE: (1997-2017)

Produit pluviométrique de météo France issu de la **fusion radar/pluviomètres**.

Résolution horaire au km²

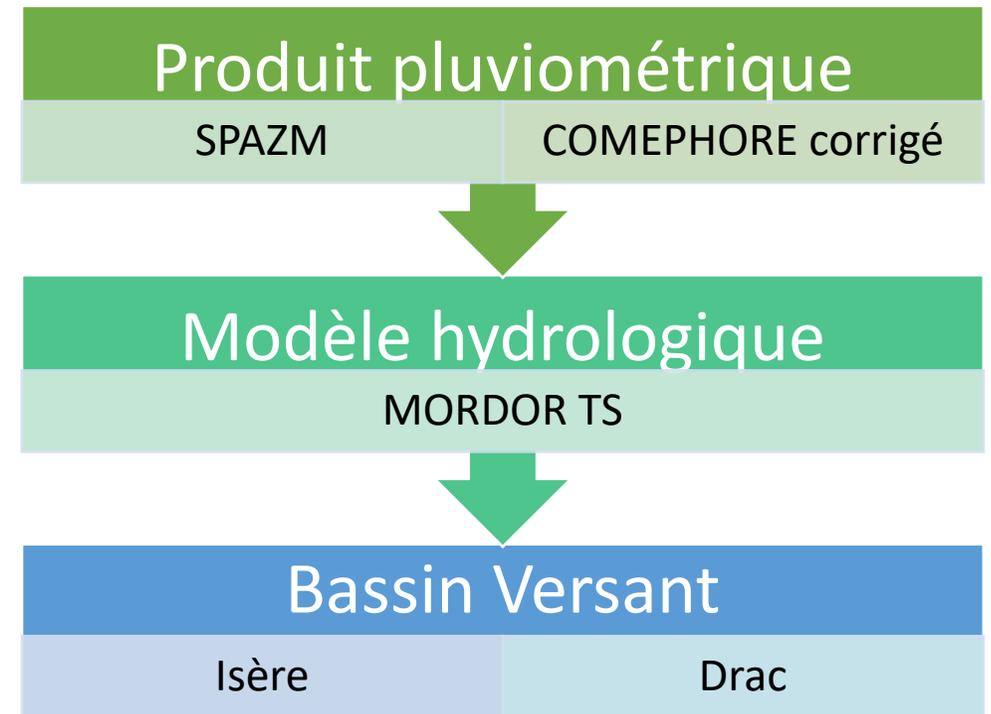
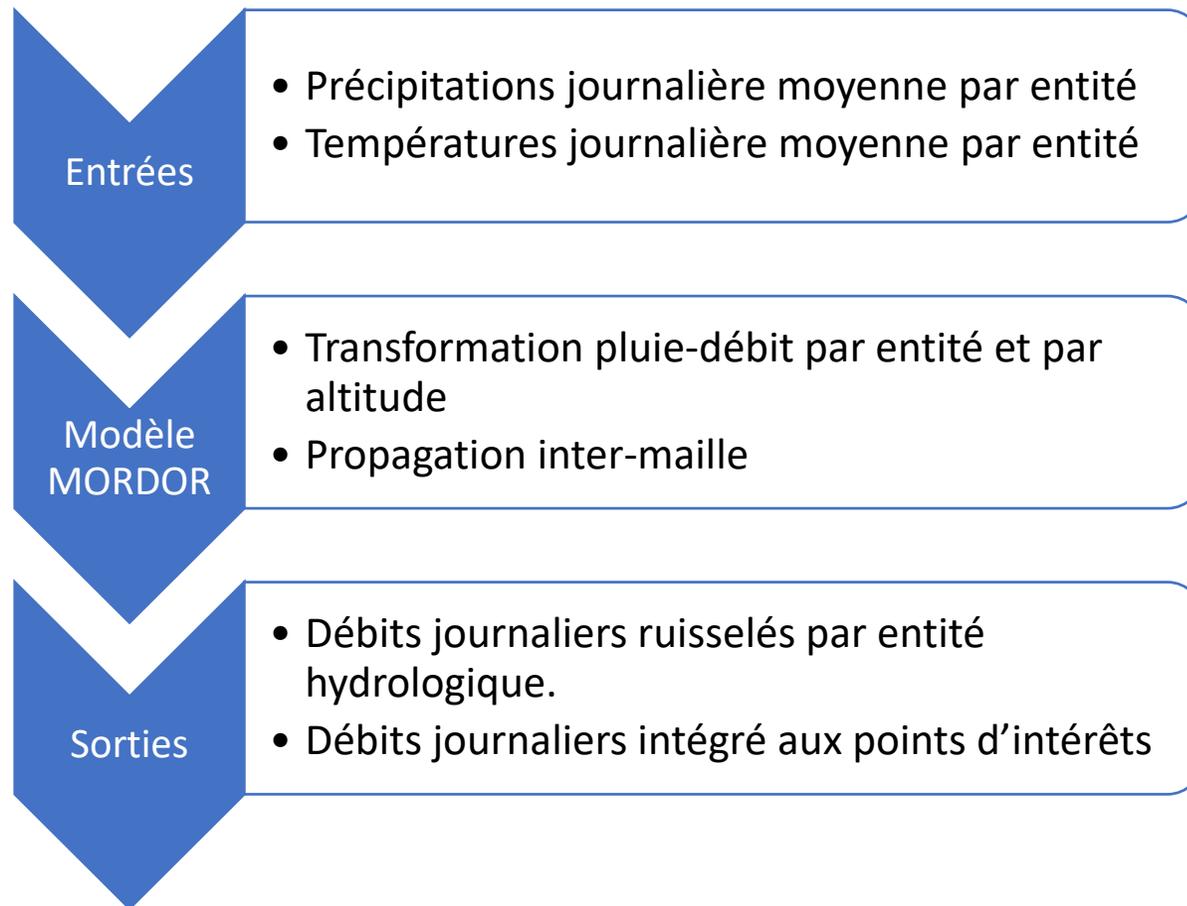
Les entités hydrologiques de MORDOR TS

Découpage géographique du modèle par entité hydrologique (maille)



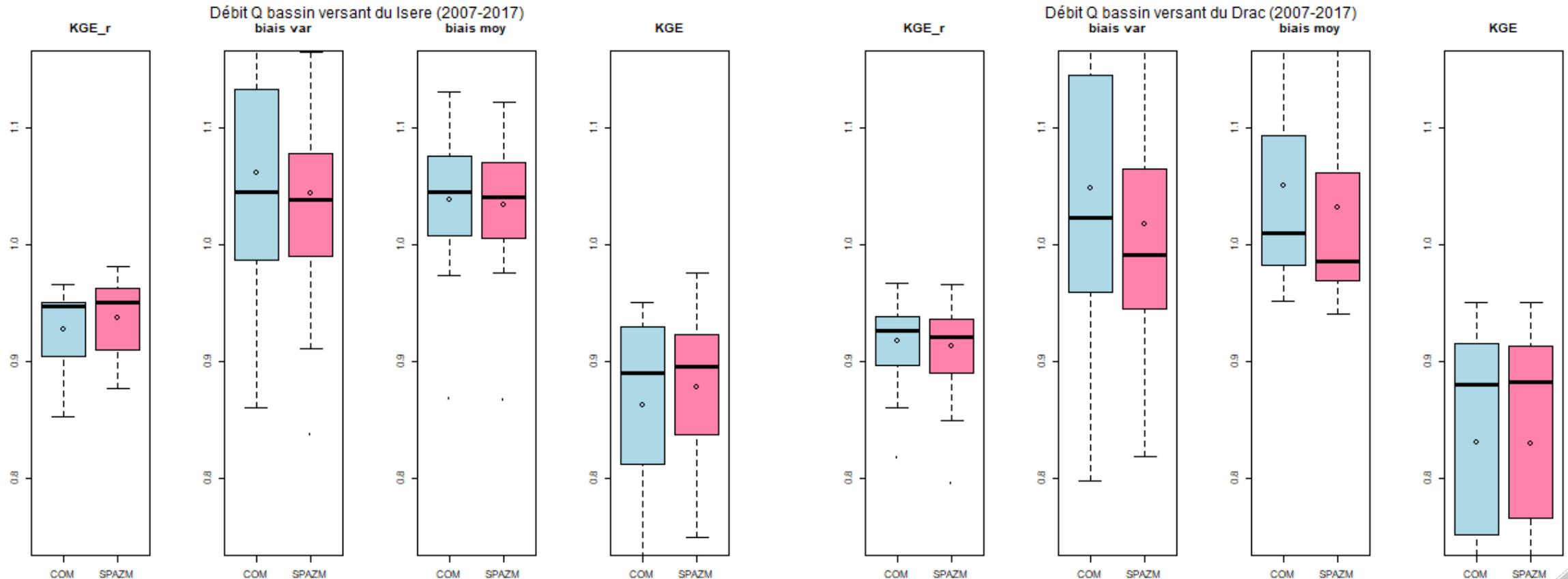
- Débit ruisselé par entité (phénomènes torrentiel)
- Débit aux points de contrôle à certaines confluences

Utilisation du modèle Pluie débit MORDOR TS



Performance des réanalyses pour l'hydrologie

Distribution des scores KGE en débit aux points de contrainte



Le score KGE (SPAZM et COMEPHORE) sont comparables.



Analyse de résultats sur la Concomitance inter-torrent

Création de graphiques de concomitance du débit ruisselé sur l'entité

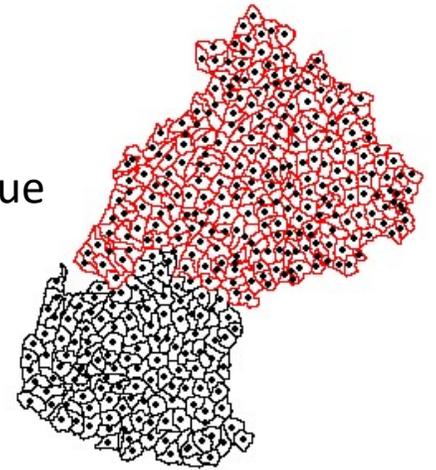
Pour une entité (i) fixée:

→ Calcul des probabilités conditionnelles qu'une entité (j) dépasse son quantile associé à une probabilité 0.99 en débit sachant que l'entité (i) dépasse le sien.

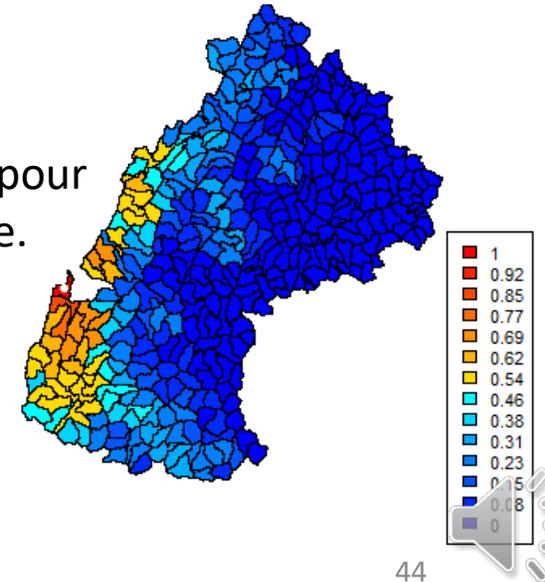
→ Chaque centre d'entité est coloré en fonction de la probabilité conditionnelle obtenue.

On répète ce schéma en changeant l'entité (i).

Centre géographique de chaque entité hydrologique.

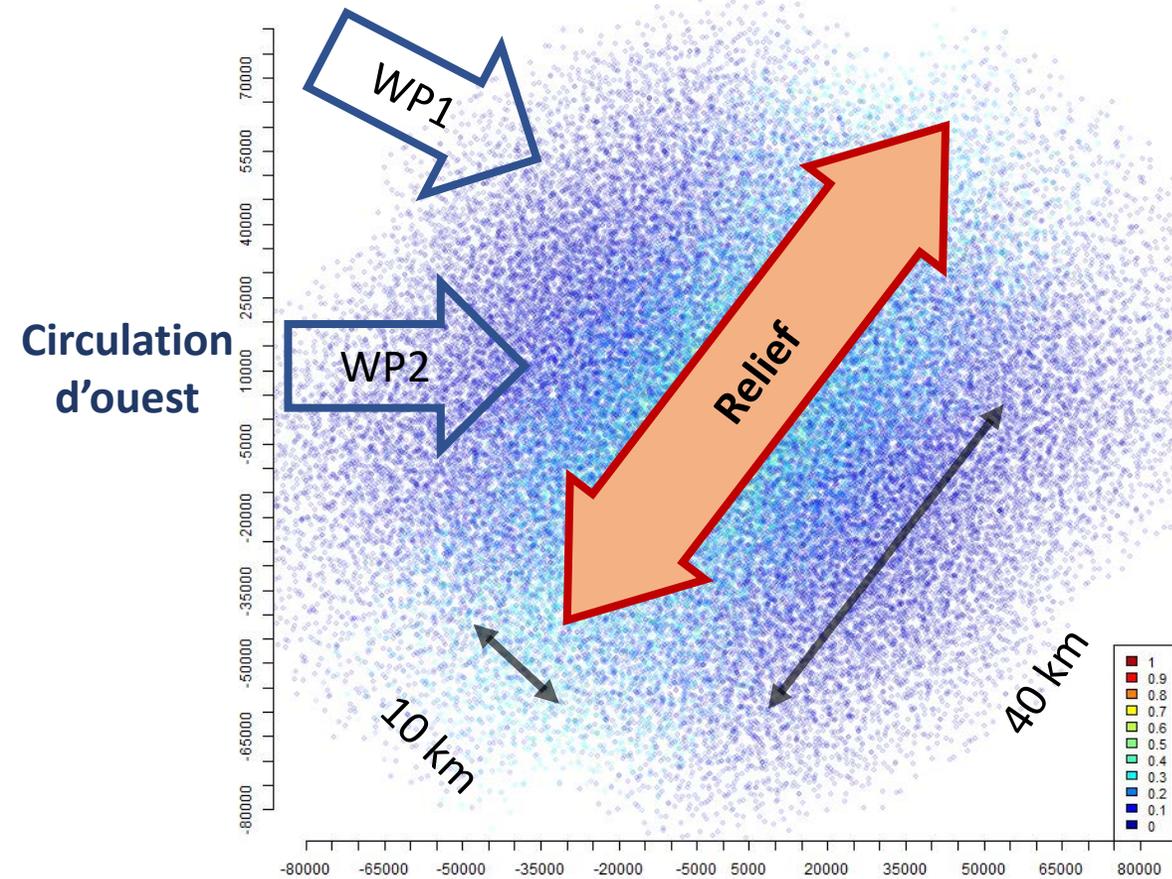


Carte de concomitance pour une entité fixée.

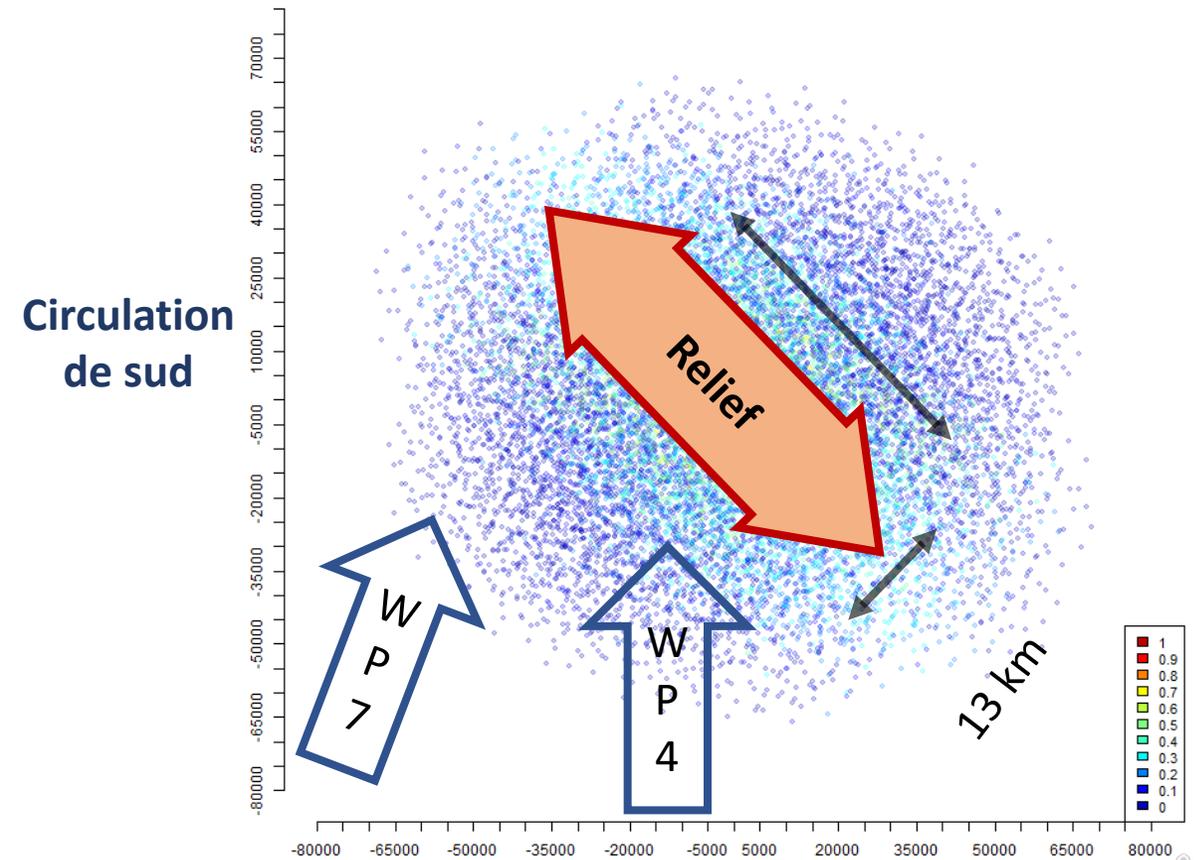


Cartes de concomitance Isère et Drac

Distribution géographique des probabilités de réaction simultanée (Isère, SPAZM)



Distribution géographique des probabilités de réaction simultanée (Drac, SPAZM)



Ellipse formée par la direction principale et la direction secondaire de concomitance pour une probabilité conditionnelle de 0.5



Résumé

- **Bonnes performances de MORDOR TS** avec les forçages SPAZM et COMEPHORE.
- Etude évènementielle montre la **complémentarité des deux forçages** notamment dans la période récente (post 2015).
 - SPAZM intègre une forte composante orographique
 - COMEPHORE localise précisément certains évènements récents.
- Les **concomitances** inter-torrent sont **anisotropes**.
 - Les directions principales dépendent des types de temps générateurs.
 - Les directions principales dépendent de l'orographie des massifs.

Perspectives

- Approche de la **concomitance multi-échelle** (concomitance Torrent / Bassin versant méso-échelle).
- Utilisation d'un **simulateur de pluies stochastiques** (RAINSIM) comme forçage de MORDOR TS
 - Études sur **des périodes de retour importantes**.

