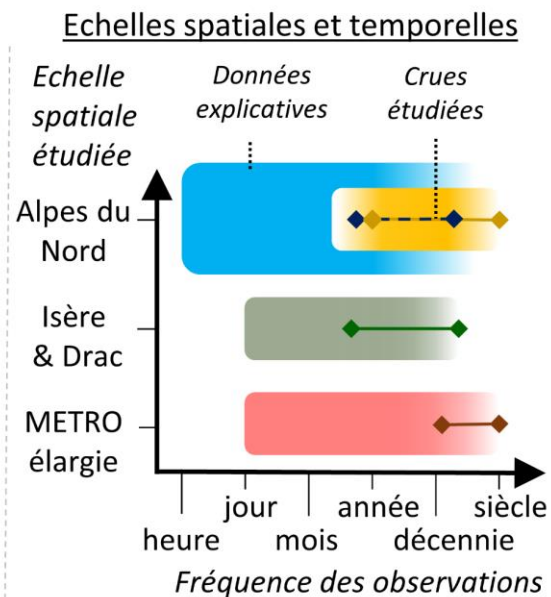
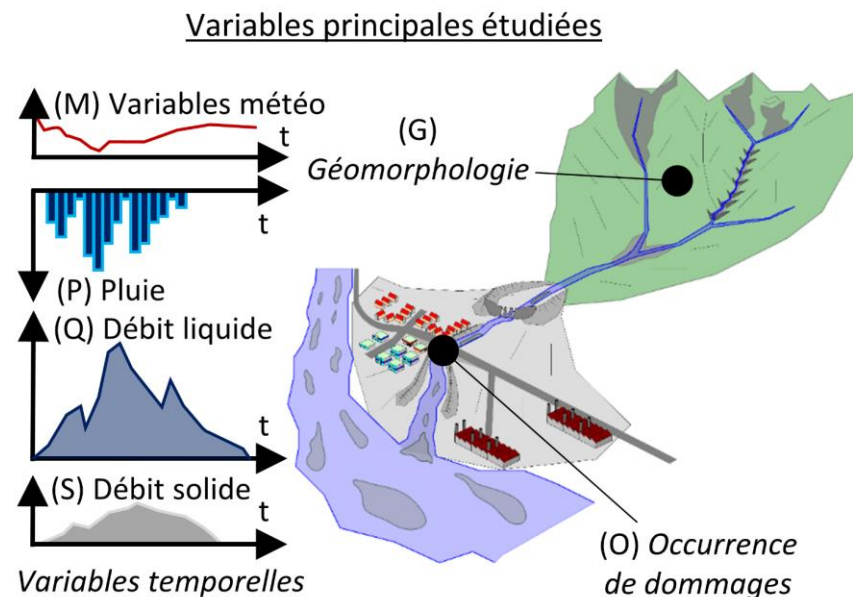
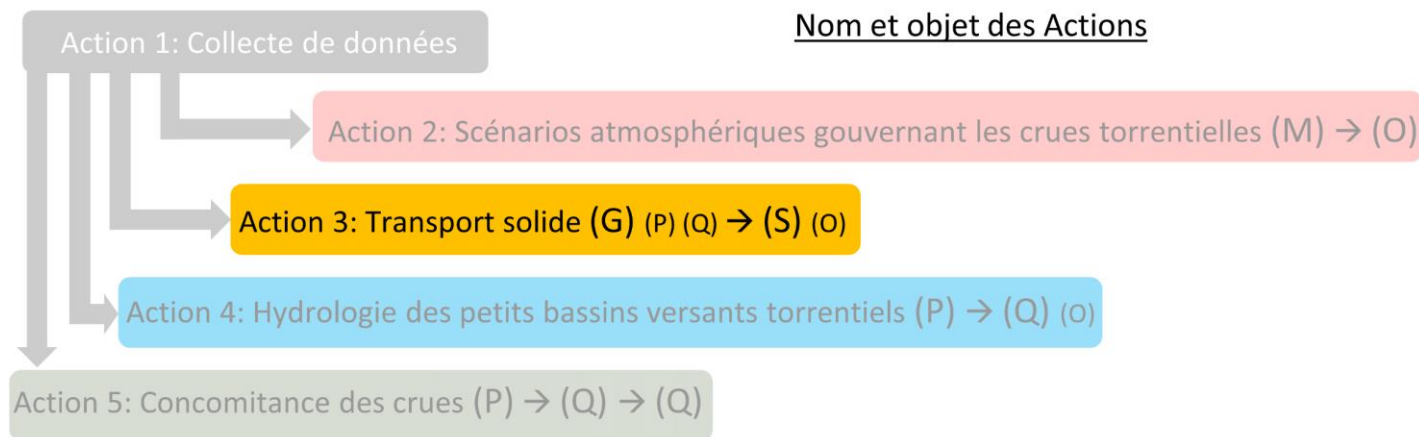


Action 3 : Relier la fourniture sédimentaire aux caractéristiques morphologiques et hydrologiques des bassins versant

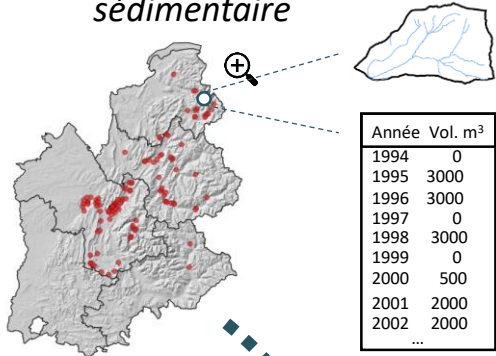
INRAE: Maxime MOREL, Guillaume Piton, Guillaume Evin & Caroline Le Bouteiller



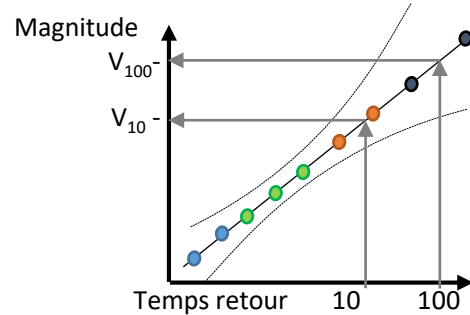
<https://www6.inrae.fr/hydrodemo/>

➤ Méthodologie générale

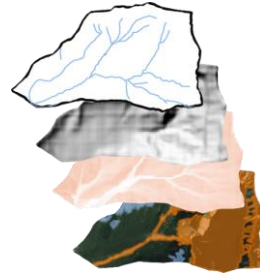
Recueil de données d'apport sédimentaire



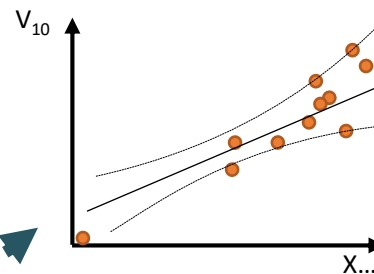
Caractérisation du transport solide de chaque bassin



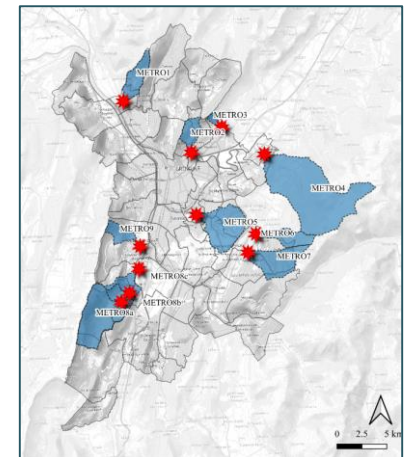
Caractérisation géomorphologique et hydro-climatique des bassins



Modélisation statistique
Volume solide = $f(\text{paramètres})$



Application de la méthode sur les bassins « METRO »



INRAE

Le projet HYDRODEMO – Evaluation de l'aléa torrentiel : hydrologie et transport solide des petits bassins versants de montagne

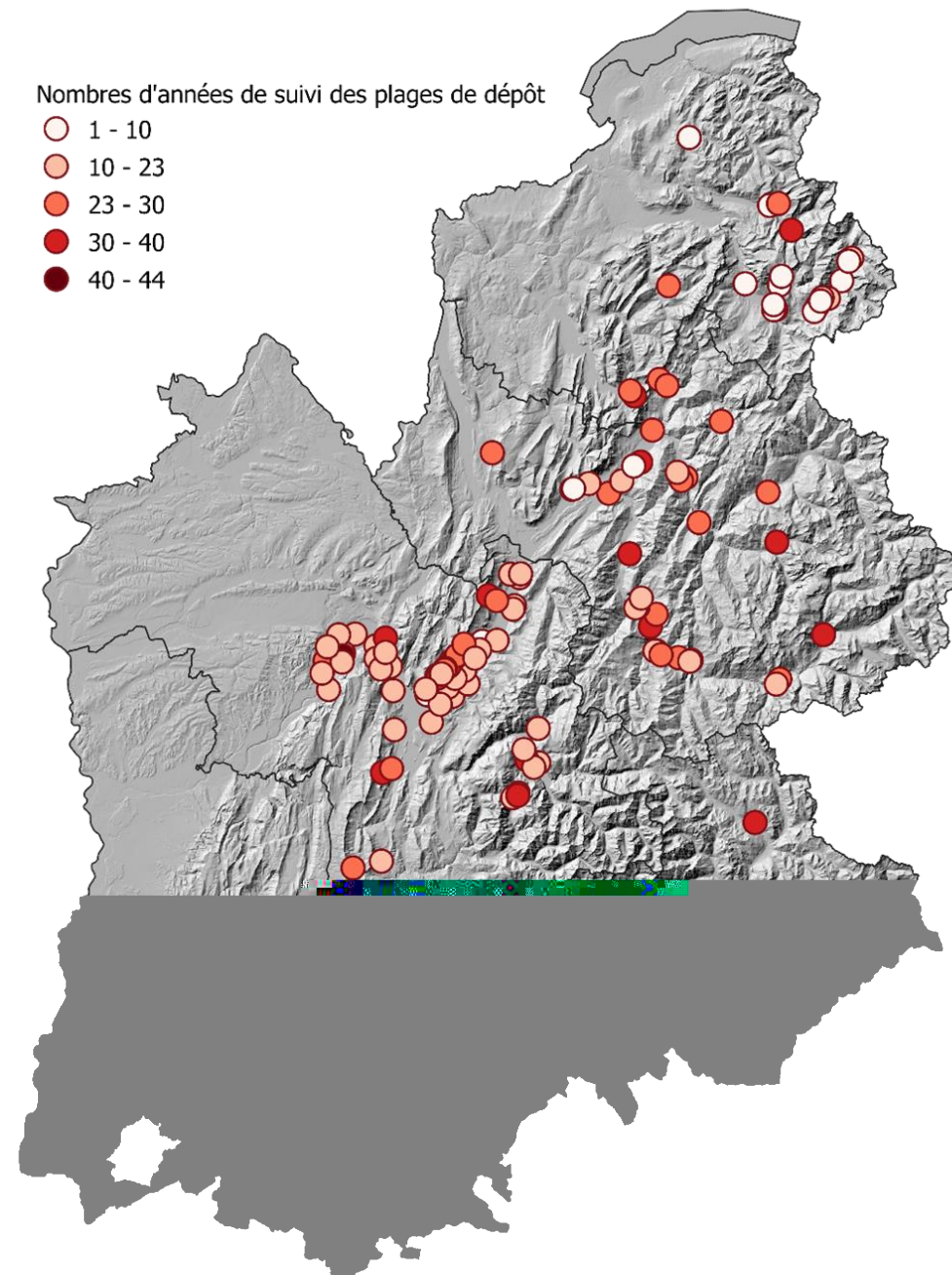
06/12/2021 – séminaire de restitution / Action 3 : Relier la fourniture sédimentaire aux caractéristiques morphologiques et hydrologiques des bassins versant

➤ Recueil des données

Synthèse des gestionnaires des plages de dépôts

Gestionnaire	Nombre d'ouvrages
SM3A	14
AS	31
RTM (domanial)	44
RTM (communal)	26
RTM (privé)	1
Métropole de Grenoble	4

*Localisation des plages de dépôts
et durée des chroniques de curage*



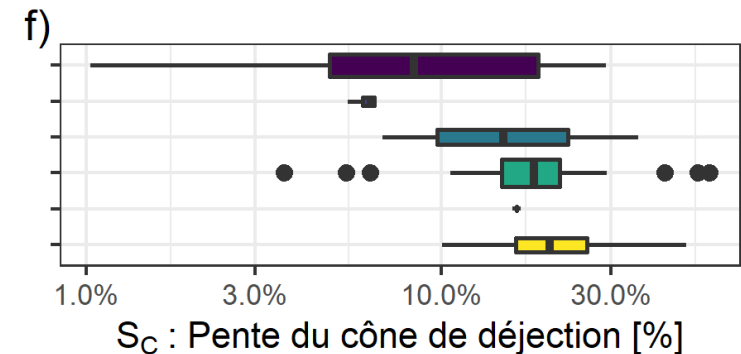
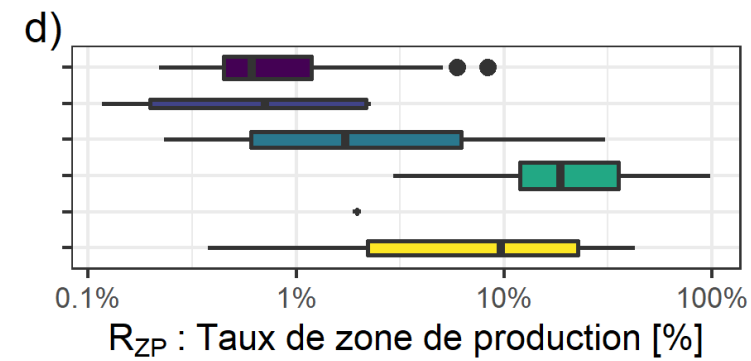
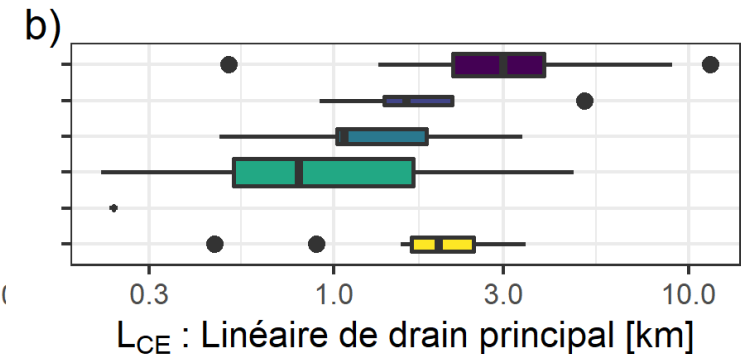
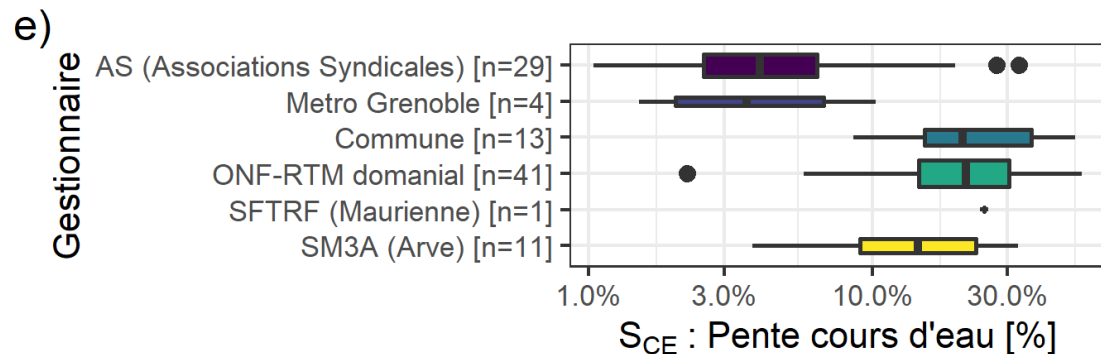
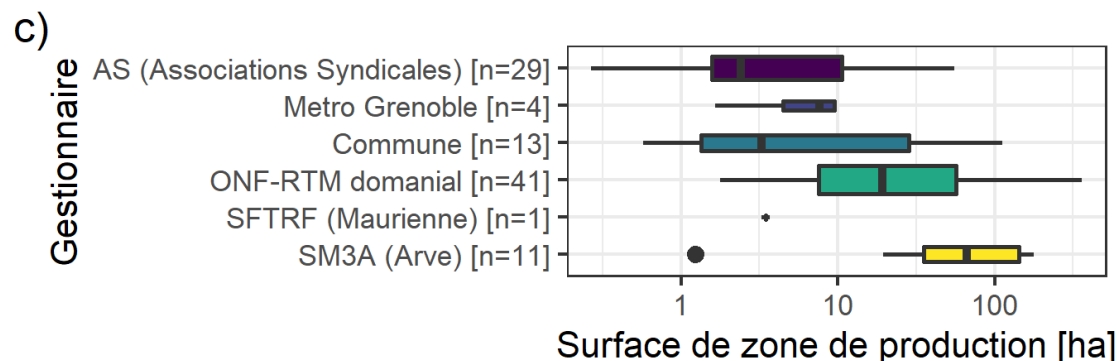
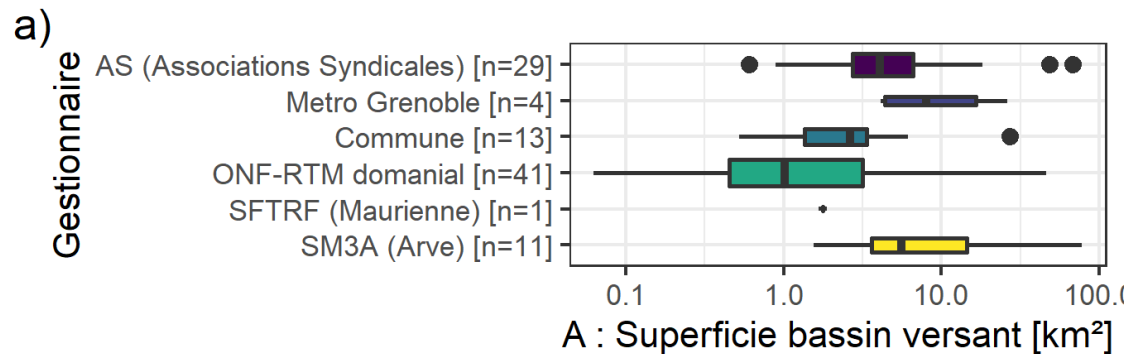
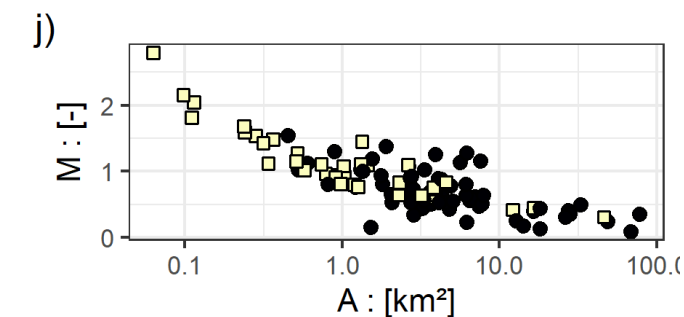
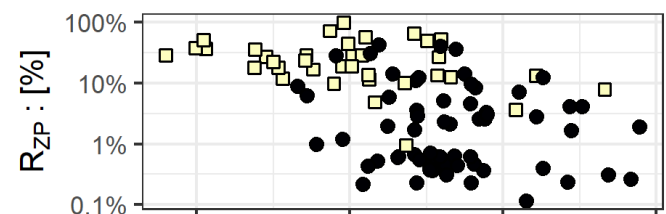
> Des bassins très diversifiés

Gestionnaire

- SM3A (Arve) [n=11]
- SFTRF (Maurienne) [n=1]
- ONF-RTM domaniaal [n=41]
- Commune [n=13]
- Metro Grenoble [n=4]
- AS (Associations Syndicales) [n=29]

i) Jeux de donnée

ECSTREM & HydroDemo
HydroDemo



➤ Caractérisation des apports sédimentaires dans les bassins

Deux sources de données d'apports solides

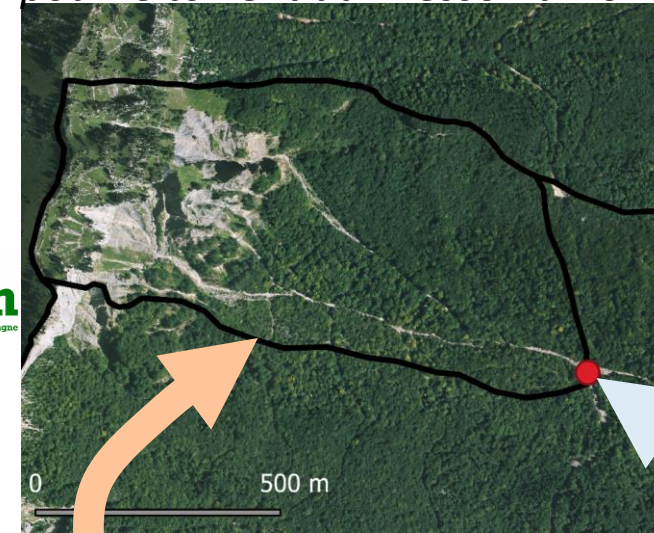
- Archives historiques de la BD RTM
- Chronique de curages (gestionnaire)

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

Estimation des volumes de production

- 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



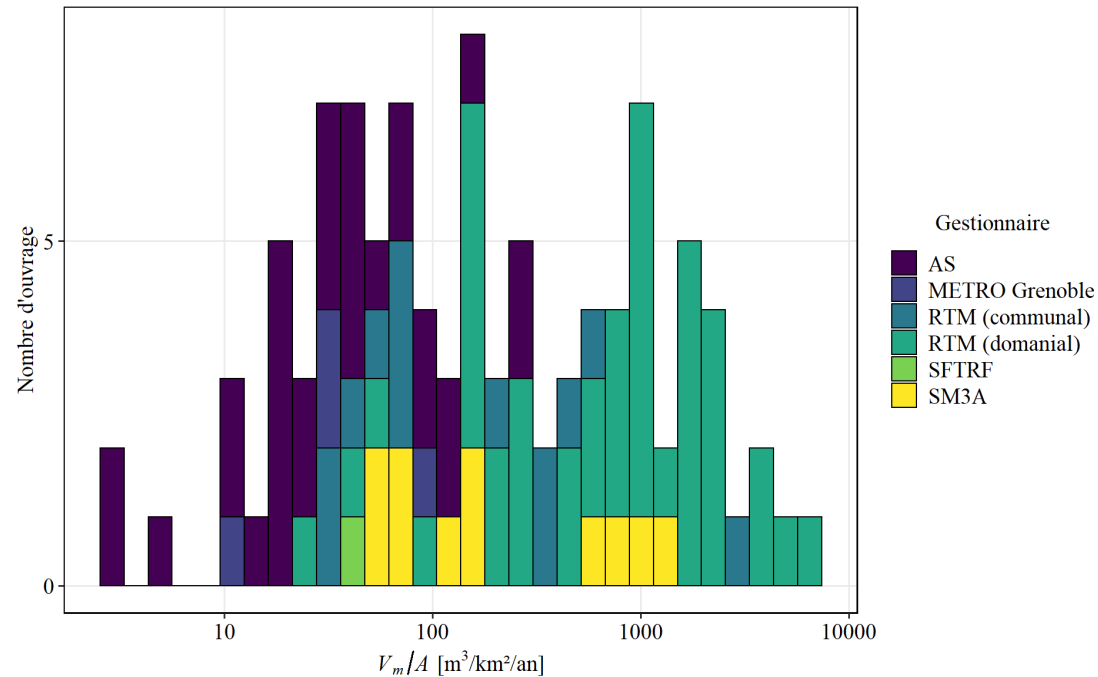
Archives historiques « évènements »

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
...		

Chronique de curage

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

➤ Caractérisation du transport solide des bassins: Production annuelle moyenne

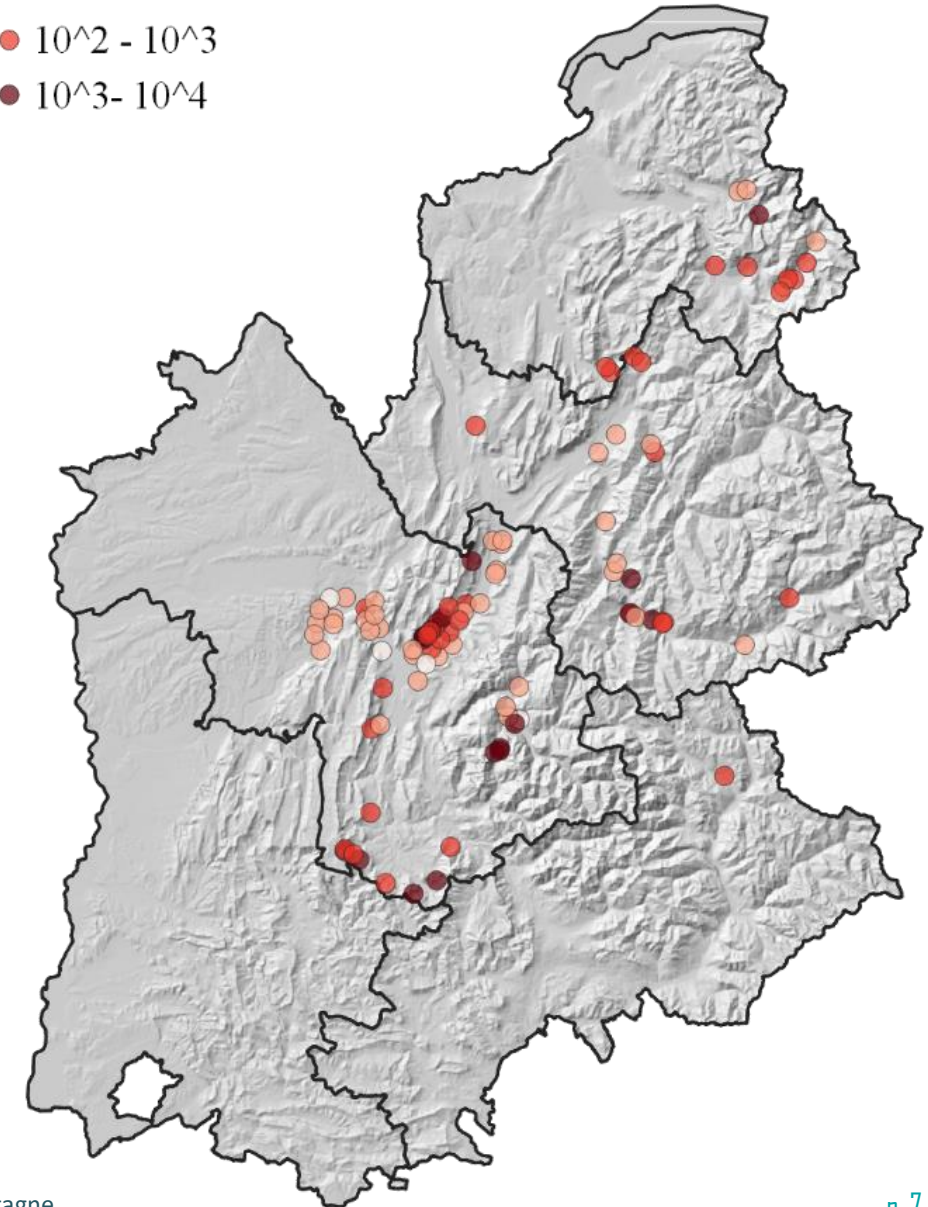


Distribution des volumes spécifiques moyen annuel d'export sédimentaire

- Nous avons estimé la production sédimentaire moyenne annuelle sur 100 bassins.
- La production moyenne des bassins varie sur plusieurs ordres de grandeurs

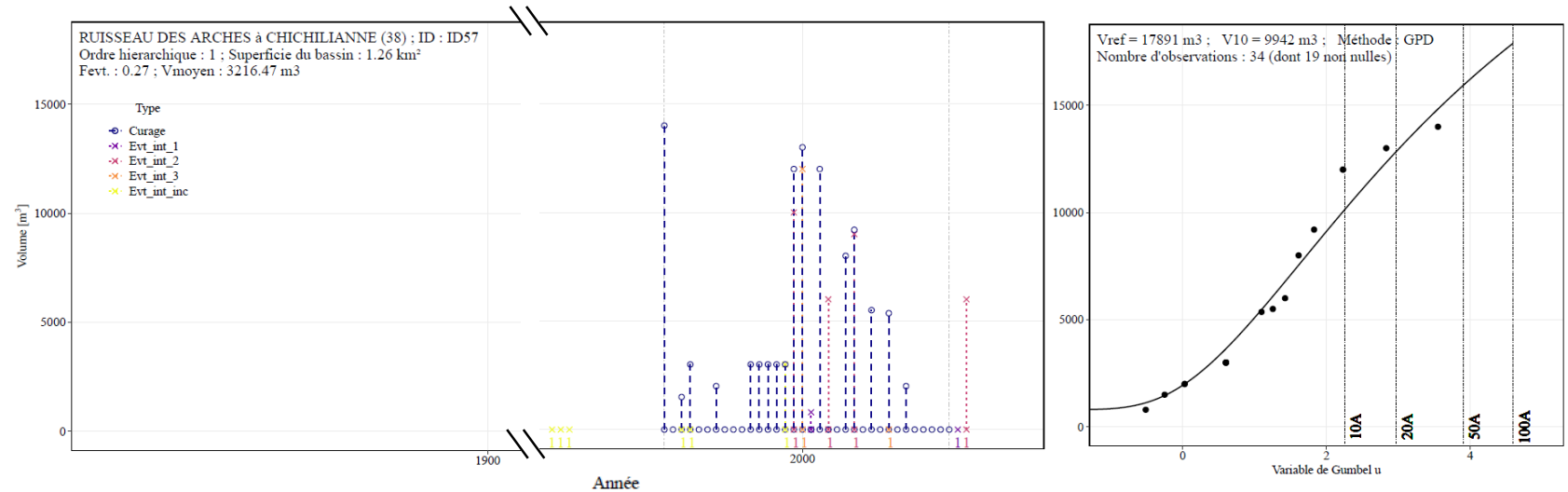
Volume moyen annuel spécifique ($\text{m}^3/\text{an}/\text{km}^2$)

- $1 - 10^1$
- $10^1 - 10^2$
- $10^2 - 10^3$
- $10^3 - 10^4$



➤ Caractérisation de la production sédimentaire

Production événementielle



Exemple du torrent des Arches (38); historique des apports et application des extrapolations pour les estimations de V_{10} et V_{100}

Estimation du volume décennal V_{10}

Estimation du volume de référence V_{ref}

➔ Volume centennal ou maximum observé

Ajustements lorsqu'il y a suffisamment d'observation non nulles ($n > 5$)

- Si $5 \leq n < 10$: Ajustement Exponentiel
- Si $10 \geq n$: Ajustement par Distribution de Pareto Généralisée (GPD)

Estimations des volumes événementiels sur 70 bassins versants



INRAE

Le projet HYDRODEMO – Evaluation de l'aléa torrentiel : hydrologie et transport solide des petits bassins versants de montagne

06/12/2021 – séminaire de restitution / Action 3 : Relier la fourniture sédimentaire aux caractéristiques morphologiques et hydrologiques des bassins versant

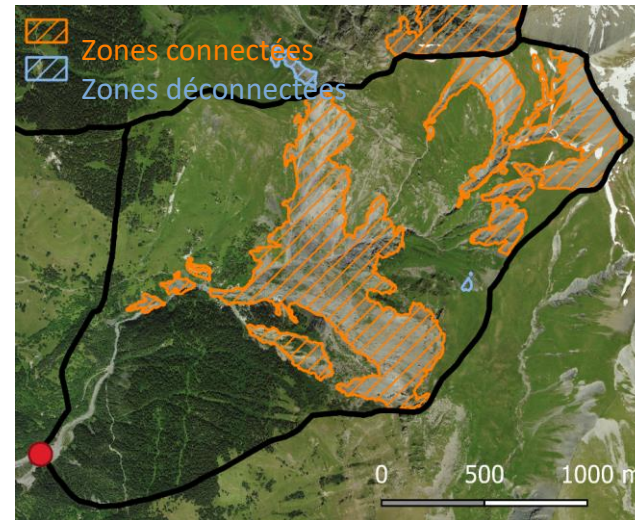
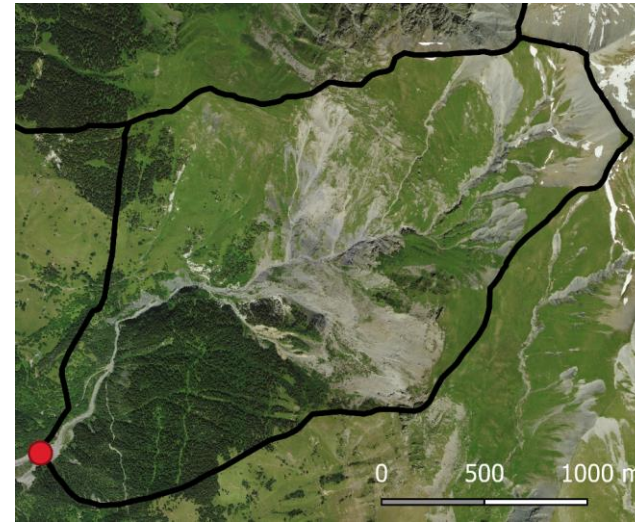
➤ Descriptions de caractéristiques géomorphologiques des bassins versants

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

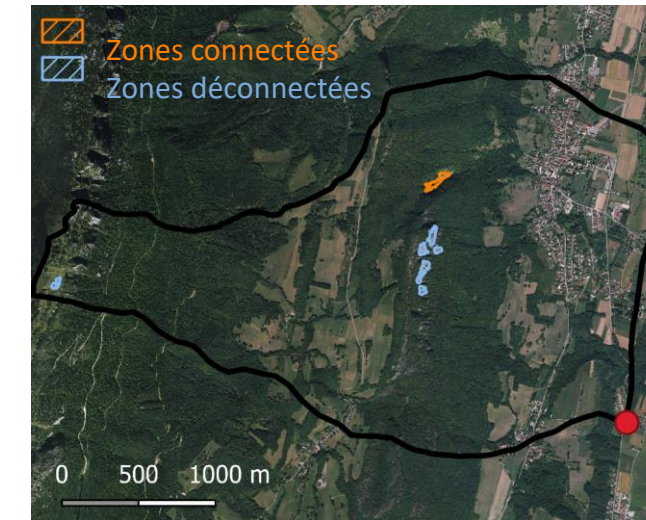
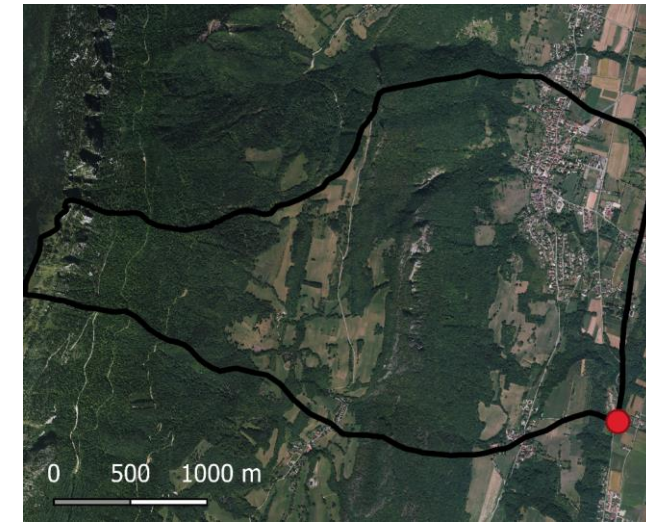
- **Taux de zones production sédimentaire dans le bassin versant**
- Index de connectivité sédimentaire
- Pente du cours d'eau
- Pente du cône de déjection
- Indice de Melton
- Indice géologique

La delimitation des zones de production sont basées sur une BD SIG (BD Forêt v2®)

Torrent la Ravoire



Torrent la Maladière



Délimitation des zones d'érosion dans les bassins versants

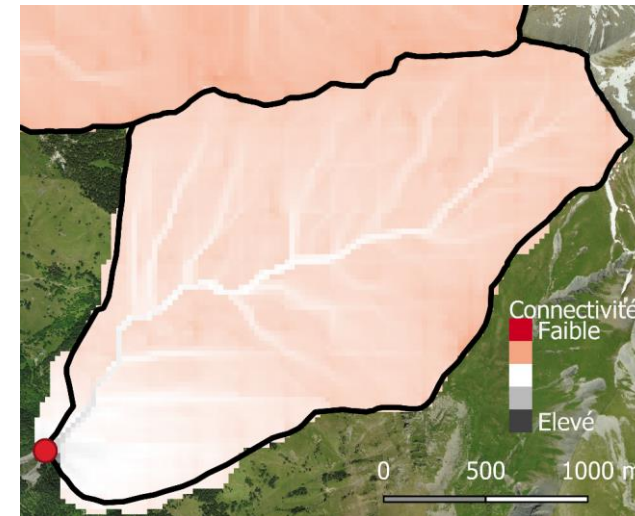
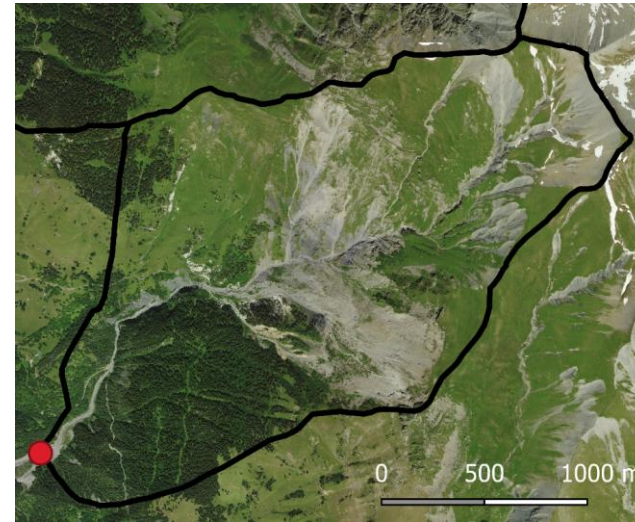
➤ Descriptions de caractéristiques géomorphologiques des bassins versants

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

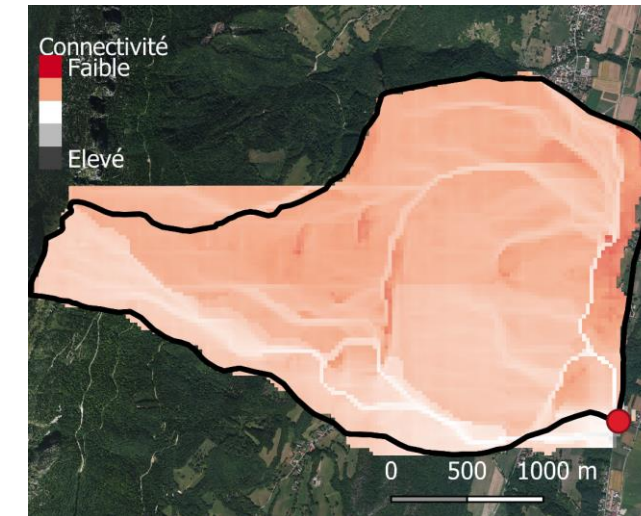
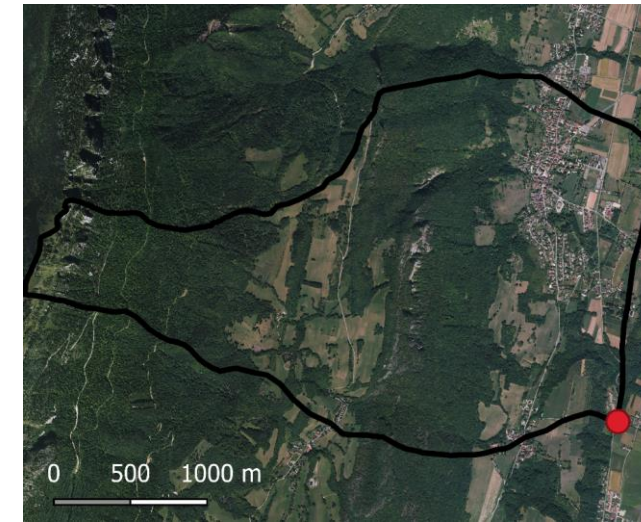
- Taux de zones de production sédimentaire dans le bassin versant
- **Index de connectivité sédimentaire**
- Pente du cours d'eau
- Pente du cône de déjection
- Indice de Melton
- Indice géologique

L'indice de connectivité sédimentaire a été calculé avec le logiciel SedInConnect

Torrent la Ravoire



Torrent la Maladière



*Index de connectivité sédimentaire de Cavalli et al. 2013 Geomorphology
(estimé via le logiciel SedInConnect, Crema & Cavalli. 2018, Computers & Geosciences)*

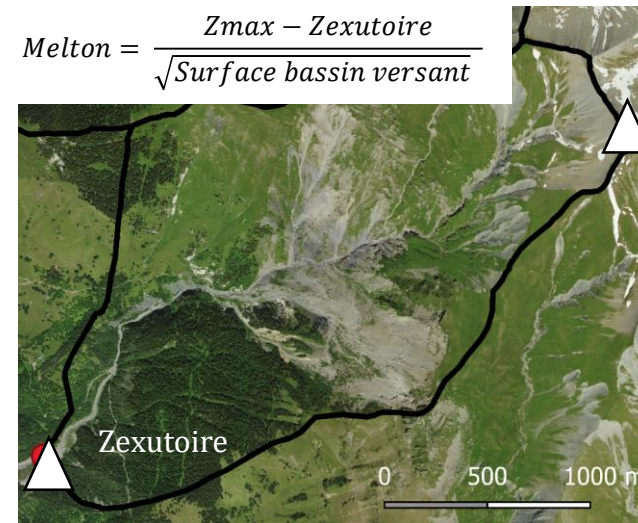
➤ Descriptions de caractéristiques géomorphologiques des bassins versants

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

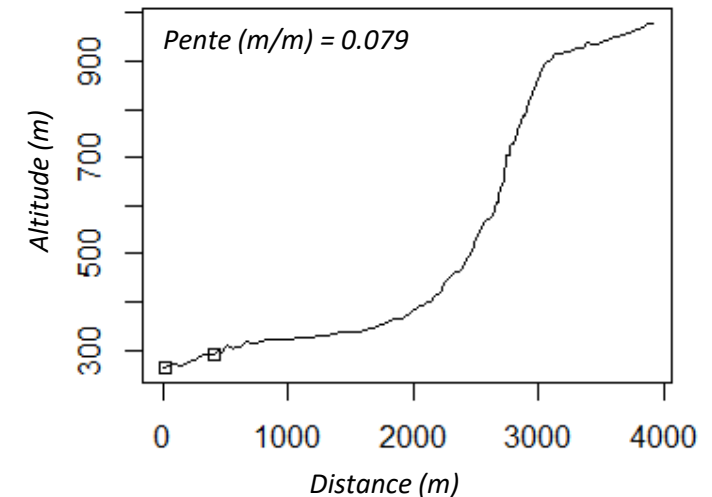
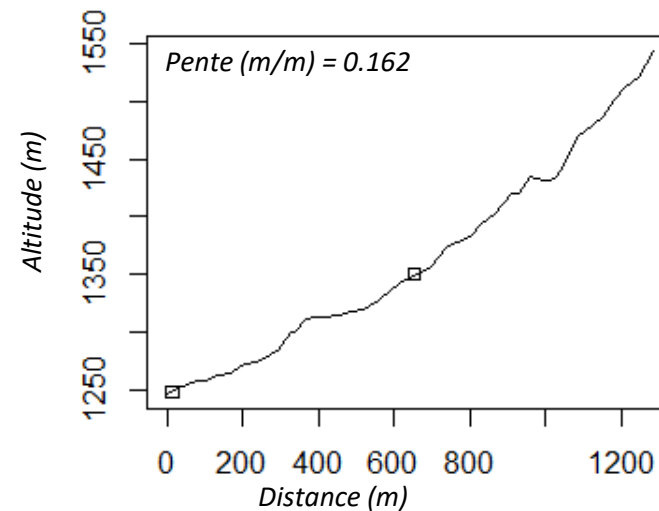
- Taux de zones de production sédimentaire dans le bassin versant
- Index de connectivité sédimentaire
- **Pente du cours d'eau**
- **Pente du cône de déjection**
- **Indice de Melton**
- Indice géologique

Torrent la Ravoire

$$\text{Melton} = \frac{Z_{\text{max}} - Z_{\text{exutoire}}}{\sqrt{\text{Surface bassin versant}}}$$



Torrent la Maladière



Pente du cours d'eau au droit de la plage de dépôt

➤ Typologie des phénomènes torrentiels

Classification de la littérature

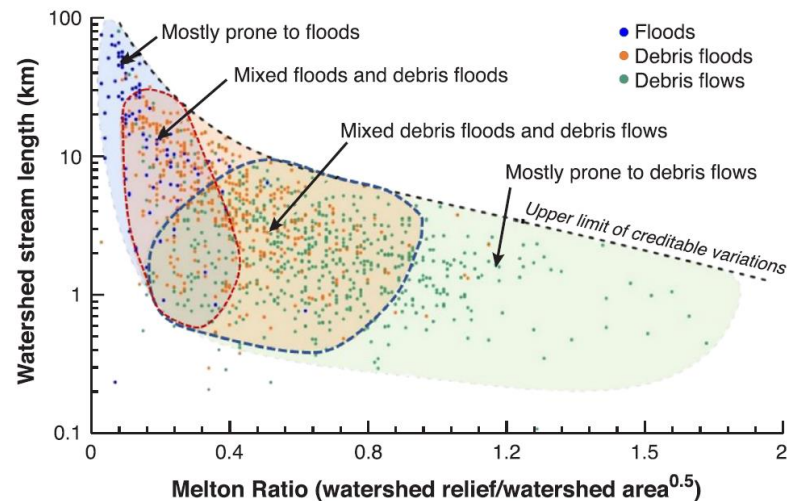
Analyse cartographique:

L_{CE} : Longueur du drain principal (IGN BD Topo®)

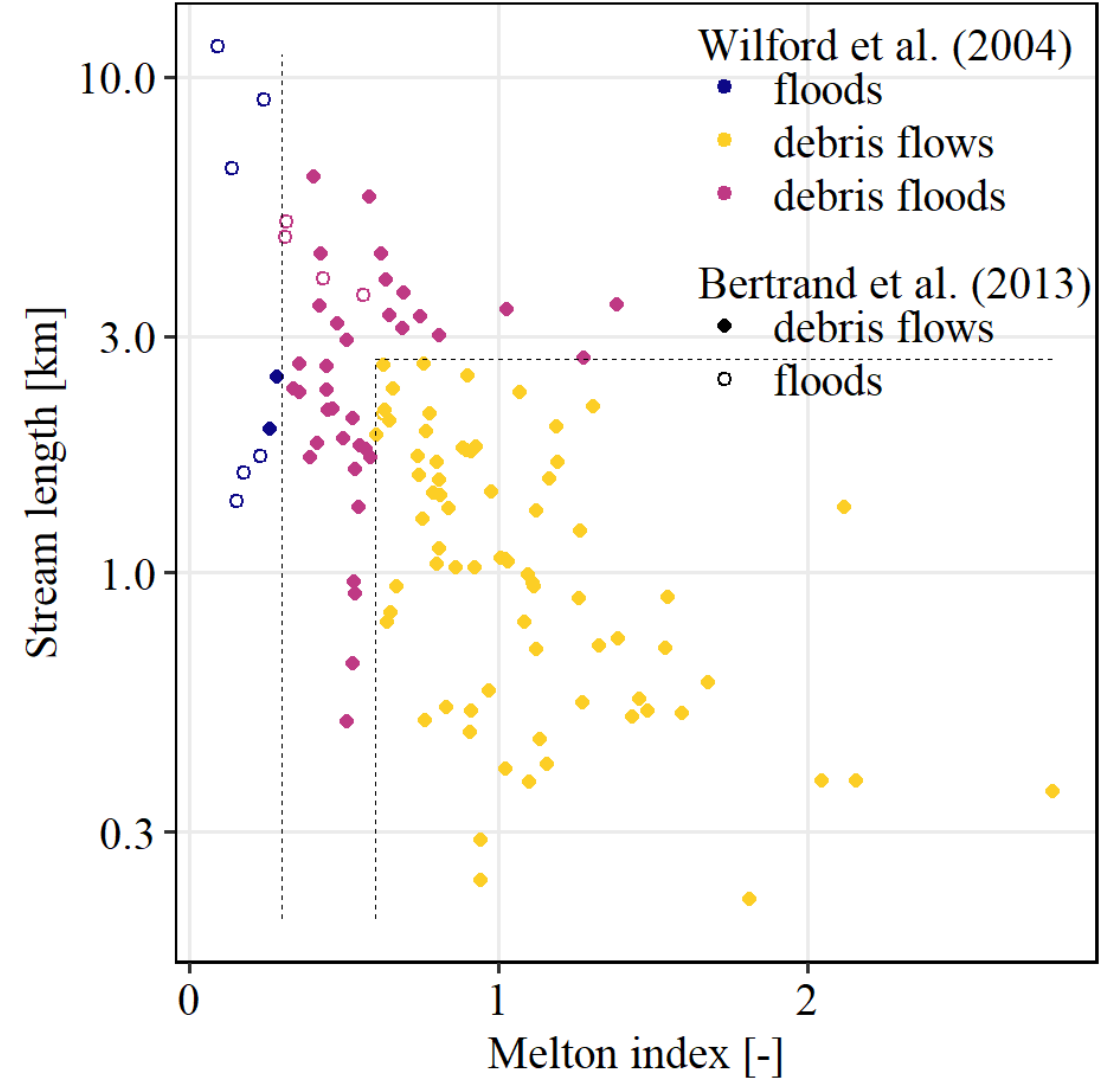
S_C : pente du chenal à l'exutoire du bassin versant (sur le cône de déjection)

M: indice de Melton $M = \frac{Z_{max} - Z_{exutoire}}{\sqrt{\text{Surface bassin versant}}}$

Selon *Bertrand et al. (2013, Natural Hazards)*,
sur les torrents à charriage en général $S < 1,26 M^{-0,85}$



Church & Jakob (2020, Water Ressource Research)



➤ Analyses statistiques multivariées

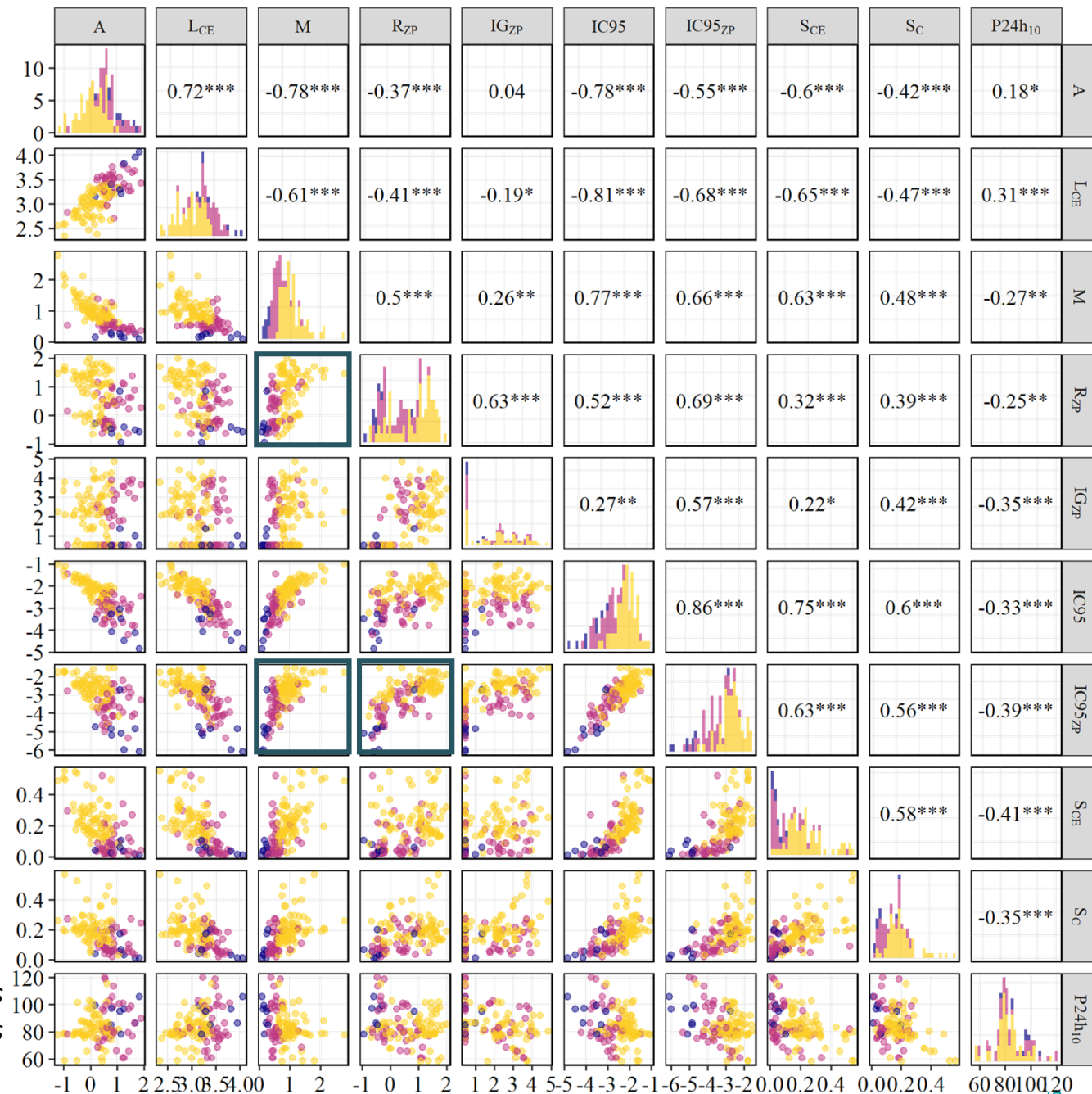
- Analyse les relations entre les volumes et les caractéristiques géomorphologiques et hydro-climatiques

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

- Analyse de volume spécifique à la taille du bassin versant (effet de taille)
- Utilisation des techniques *random forests* (forêts aléatoires) et de régressions
- Sélection des variables les plus pertinentes
- Développement des modèles prédictifs
- Test et évaluation de la performances des modèles

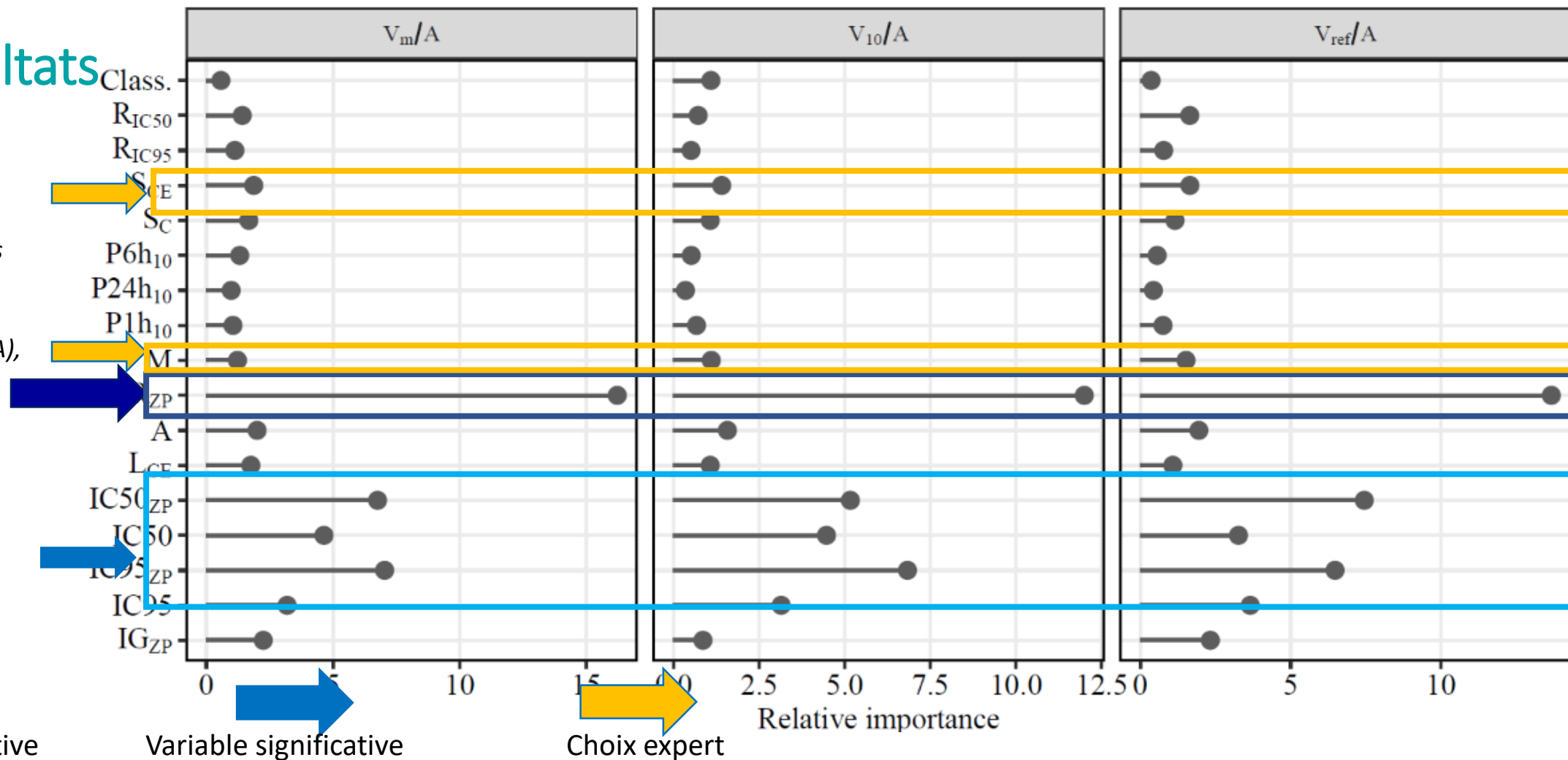
Matrice de diagramme de dispersion par paires, distributions et coefficients de corrélation de Pearson pour les principales variables explicatives

INRAE



➤ Résultats

Importance relative des variables pour la production moyenne annuelle spécifique (V_m/A), le volume spécifique décennal (V_{10}/A) et le volume de référence spécifique (V_{ref}/A).



La **proportion de zones de production** de sédiments R_{ZP} est la **variable la plus importante** pour prédire les volumes de production.

Dans une moindre mesure, des variables telles que la valeur du quantile 95% de l'indice de connectivité ou la pente du cours d'eau sont des variables importantes.

En fonction de l'importance des variables, plusieurs formulations de modèles simples (monovariés, bivariés ou à trois paramètres) ont été proposées.

➤ Résultats

Modèle	Paramètres
7	R_{ZP} & $IC95_{ZP}$ & A
6	R_{ZP} & S_{CE} & A
5	R_{ZP} & S_{CE}
4	R_{ZP} & $IC95_{ZP}$
3	R_{ZP} & M
2	R_{ZP} & A
1	R_{ZP}

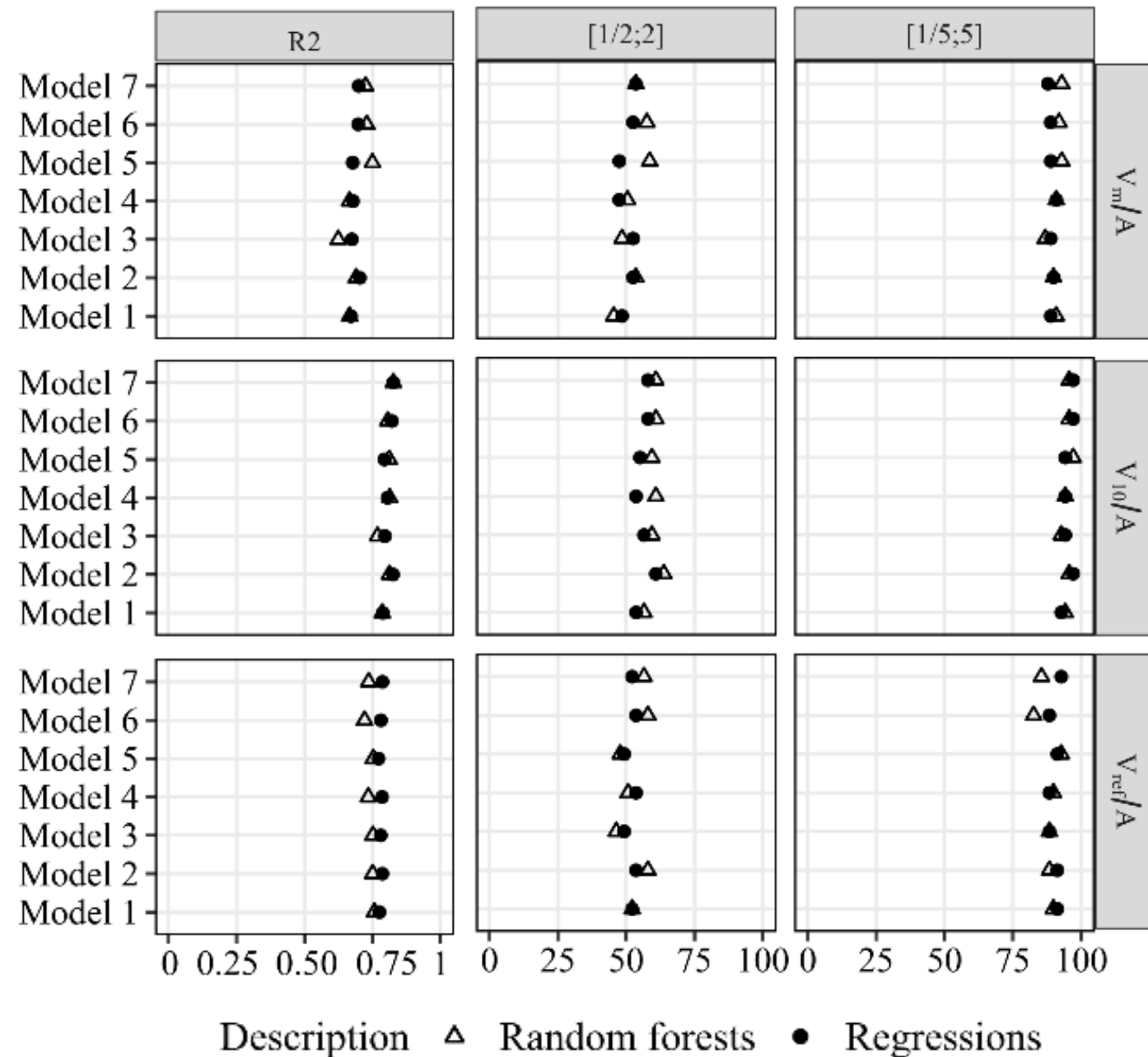
$R^2 \approx 0.8 \forall$ modèles

Random forests et regressions ont des performances comparables

Les modèles multi-varies n'ont pas des performances significativement meilleurs que les modèles simples

$\pm 30\%$ des valeurs dans $[2/3; 3/2]$ fois la valeur prédite

$\pm 50\%$ des valeurs dans $[1/2; 2]$ fois la valeur prédite



➤ Résultats

Formulations de modèle de prédiction de V_{10} et de V_{ref} (volume spécifique) pour les modèles de régressions:

$$V_{10}/A = 168 \cdot R_{ZP}^{0.88}$$

$$V_{10}/A = 274 \cdot R_{ZP}^{0.75} \cdot A^{-0.28}$$

$$V_{10}/A = 125 \cdot R_{ZP}^{0.81} \cdot 10^{0.2 \cdot M}$$

$$\left(V_{10}/A = 830 \cdot R_{ZP}^{0.70} \cdot 10^{0.18 \cdot IC95_{ZP}} \right)$$

Pentes douteuses

~~$$V_{10}/A = 110 \cdot R_{ZP}^{0.81} \cdot 10^{0.6 \sqrt{S_{CE}}}$$~~

Pentes douteuses

~~$$V_{10}/A = 309 \cdot R_{ZP}^{0.75} \cdot A^{-0.29} \cdot 10^{-0.13 \sqrt{S_{CE}}}$$~~

$$\left(V_{10}/A = 592 \cdot R_{ZP}^{0.68} \cdot 10^{0.1 \cdot IC95_{ZP}} \cdot A^{-0.23} \right)$$

$$V_{ref}/A = 475 \cdot R_{ZP}^{0.94}$$

$$V_{ref}/A = 661 \cdot R_{ZP}^{0.85} \cdot A^{-0.18}$$

$$V_{ref}/A = 363 \cdot R_{ZP}^{0.87} \cdot 10^{0.19 \cdot M}$$

$$\left(V_{ref}/A = 1982 \cdot R_{ZP}^{0.77} \cdot 10^{0.16 \cdot IC95_{ZP}} \right)$$

~~$$V_{ref}/A = 373 \cdot R_{ZP}^{0.90} \cdot 10^{0.35 \sqrt{S_{CE}}}$$~~

~~$$V_{ref}/A = 779 \cdot R_{ZP}^{0.85} \cdot 10^{-0.17 \sqrt{S_{CE}}} \cdot A^{-0.21}$$~~

$$\left(V_{ref}/A = 1630 \cdot R_{ZP}^{0.76} \cdot 10^{0.1 \cdot IC95_{ZP}} \cdot A^{-0.13} \right)$$

R_{ZP} Proportion de zones de production dans le bassin versant [%]

A Superficie du bassin versant [km²]

M Indice de Melton [-]

$IC95_{ZP}$ Indice de connectivité au quantile 95 dans les zones de production [-]

S_{CE} Pente du cours d'eau droit de l'exutoire du bassin versant [m/m]

➤ Resultats

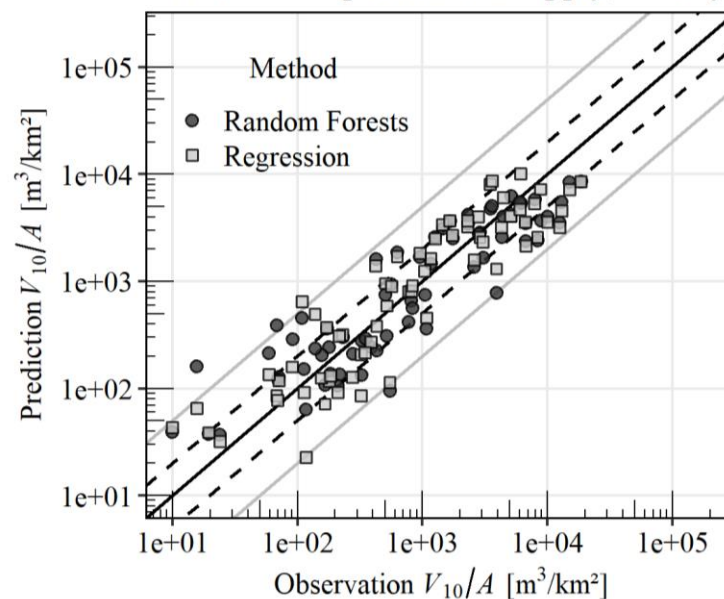
Exemples pour les équations ci-dessous

$$V_{10}/A = 274 \cdot R_{ZP}^{0.75} \cdot A^{-0.28}$$

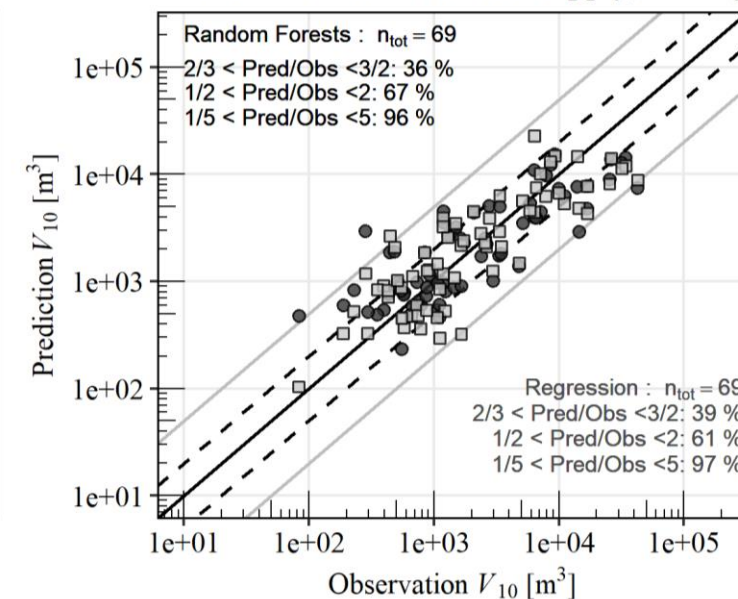
$$V_{ref}/A = 661 \cdot R_{ZP}^{0.85} \cdot A^{-0.18}$$

L'analyse de la performance des modèles a montré qu'environ 50% des prédictions sont dans la gamme [1/2 ; 2]. Cela montre que ces modèles fournissent un ordre de grandeur et non une valeur précise du volume sédimentaire.

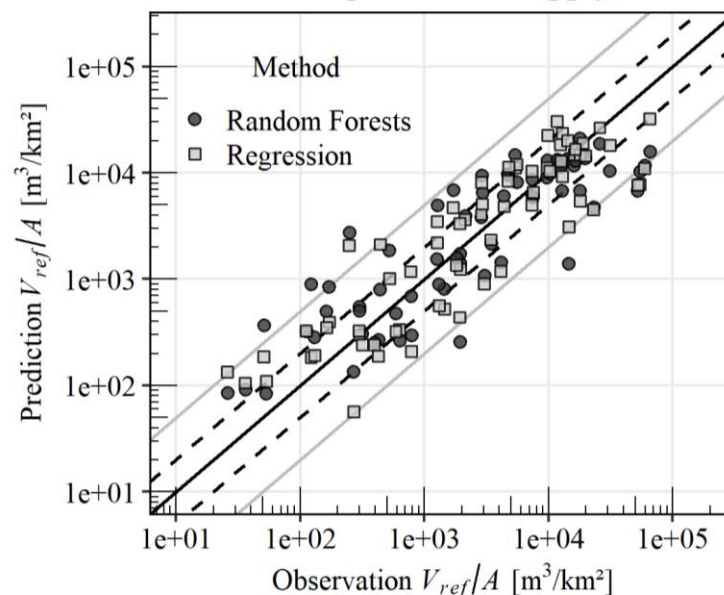
Models #2 - Specific sed. supply, T=10 yr



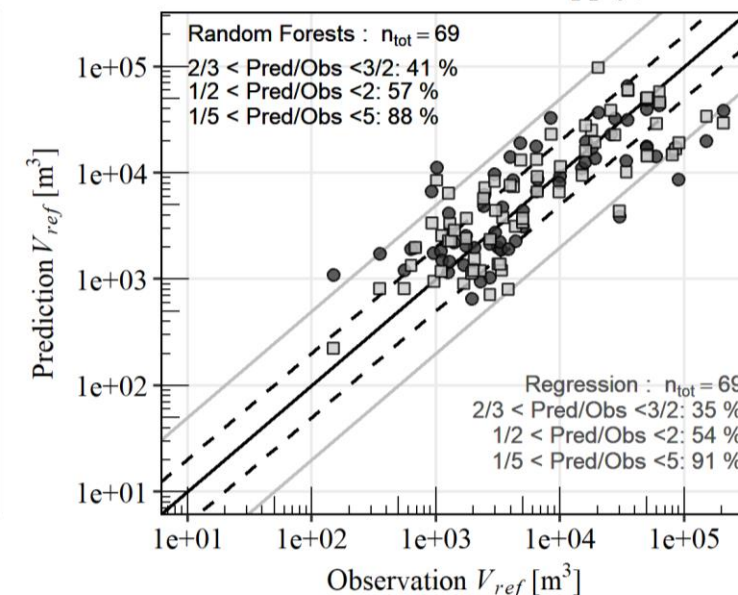
Models #2 - Absolute sed. supply, T=10 yr



Models #2 - Specific sed. supply, ref. evt.



Models #2 - Absolute sed. supply, ref. evt.



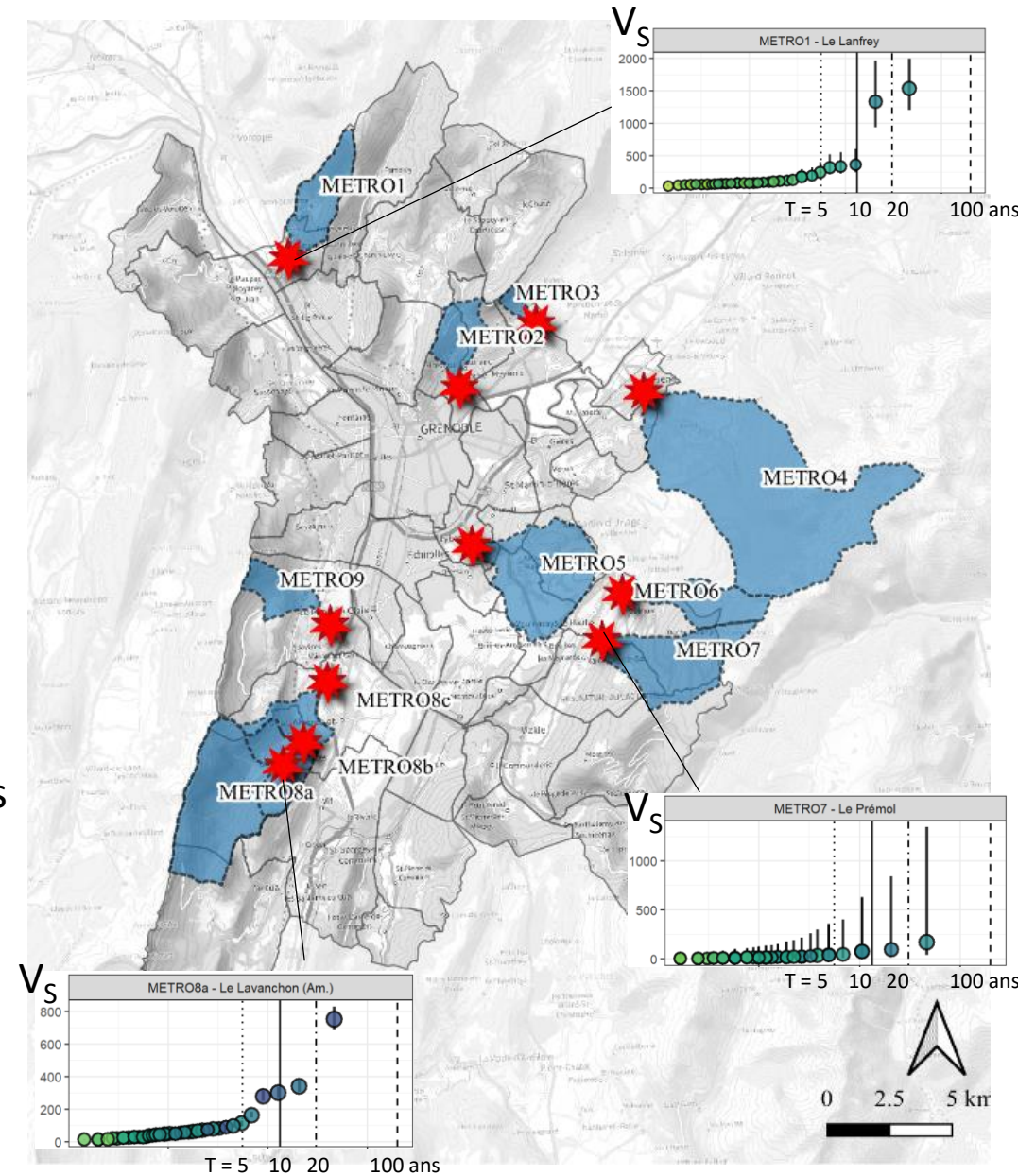
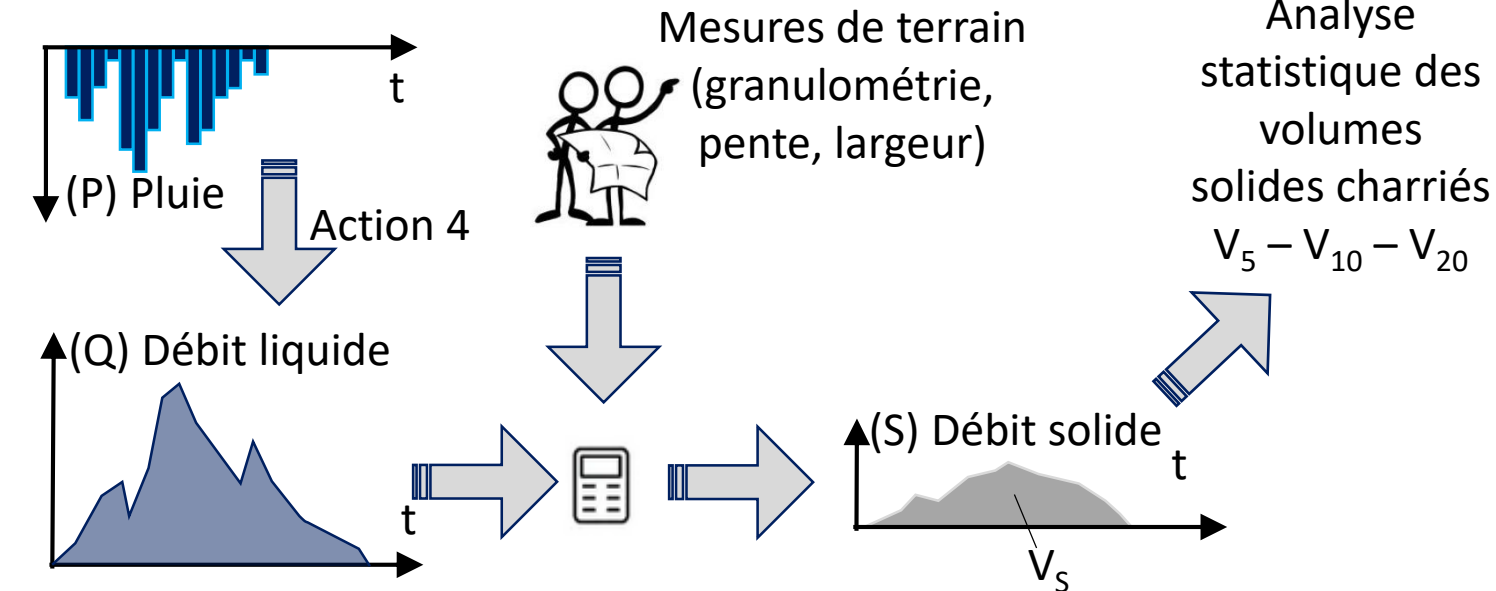
➤ Application aux bassins versant METRO

Estimation complémentaire par calcul de transport par charriage

Estimations via les méthodes empiriques existantes et nouvelles

Croisement avec une approche hydrologique et hydraulique utilisant les hydrogrammes de l'Action 4 et des formules de transports sélectionnées selon la morphologie du torrent

Comparaison avec les données existantes



➤ Conclusion

- Analyse des données de production sédimentaire d'une centaine de bassins versants torrentiels des Alpes du Nord
- Développement de modèles de prédiction de volume de production moyen annuel, décennaux et de référence
- Les modèles de prédiction des fréquence d'occurrence d'évènements torrentiels ont des résultats décevants
- Ces modèles sont basés sur des indicateurs géomorphologiques relativement simples à caractériser. Ils sont donc rapides et faciles à utiliser.
- Les analyses statistiques montrent que pour la prédiction de la production sédimentaire spécifique:
 - La proportion de la surface de production de sédiments dans les bassins versants est le principal paramètre,
 - Les indices de connectivité sédimentaires sont les paramètres secondaires→ Ceci souligne l'importance de considérer la disponibilité des sédiments dans les bassins versants.
 - La pluie (1h, 6h, 24h) est une variable statistiquement moins significatives que de nombreux paramètres morphologiques tertiaires (géologie, Melton, pentes, superficie du bassin versant , longueur du chenal)
- Malgré les incertitudes liées à la durée limitée des observations et à la parcimonie des approches utilisées, les modèles de prédiction des volumes sédimentaires testés sur une sélection de torrents situés autour de la région grenobloise fournissent des résultats dont les ordres de grandeur semblent satisfaisants.
- Ces modèles complètent les approches existantes et peuvent être utiles pour évaluer les sédiments dans les bassins versants non équipés de bassins de rétention des sédiments.



INRAE

➤ Merci de votre attention

Et merci encore aux pourvoyeurs de données

