

## Rapport de recherche

### Transport sédimentaire dans le Vallon de Nant, Alpes vaudoises

Gilles Antoniazza et Stuart Lane



Photo : Gilles Antoniazza

### Points-clés :

- Le charriage de sédiments par les rivières, notamment en montagne, représente un enjeu certain pour les populations et activités économiques qui vivent le long de leur cours (p. ex. dangers naturels, production hydroélectrique, projets de renaturation).
- Paradoxalement, la communauté scientifique reste imprécise dans ces prédictions du charriage, notamment par le manque de séries temporelles de charriage fiables.
- De récentes innovations technologiques ont finalement permis d'obtenir des séries de données précises du transport sédimentaires dans les cours d'eau de montagne, et le Vallon de Nant, dans les Alpes vaudoises (Suisse), a été équipée d'une station de mesure de cette nouvelle génération.
- Une première analyse du charriage sur une série temporelle de cinq ans a permis, après avoir calibré avec succès les capteurs à l'aide de prélèvements au moyen d'une corbeille sédimentaire, d'estimer les masses annuelles de matériel grossier exportées depuis le Vallon de Nant.
- Une analyse complémentaire du débit d'eau et de données météorologiques a par ailleurs permis d'identifier la contribution de différents processus hydrologiques (événements pluvieux, fonte des neige, événements pluvieux à différentes intensités de fonte) par rapport au budget sédimentaire annuel.
- Ces résultats aident à comprendre dans quelles circonstances de gros événements de charriage sont produits, et à potentiellement mieux prédire leur occurrence.
- Il est également attendu que les processus hydrologiques à l'origine du charriage évoluent dans un contexte de changement climatique. Si on entend parfois que le charriage augmentera probablement avec la magnitude-fréquence des événements pluvieux, nous soulignons dans ce rapport l'importance d'intégrer à la fois les changements dans l'hydrologie des bassins versants de montagne, et dans leur disponibilité sédimentaire, dans les prédictions qui sont faites.
- En particulier, nous relevons comme facteurs d'importance en plus de l'augmentation de la fréquence-magnitude des précipitations : (1) la co-occurrence d'événements pluvieux dans des bassins versants où la fonte est avancée mais où une grande quantité de neige subsiste encore ; (2) l'augmentation des précipitations et débits hivernaux dans des bassins versants où l'étendue et l'épaisseur du manteau neigeux sont importants ; (3) l'augmentation du charriage au printemps et la diminution en été suite au déplacement de la saison de fonte ; (4) la diminution de la contribution au charriage de la fonte avec la diminution des chutes de neige ; (5) l'occurrence d'événements pluvieux en été et en automne dans des bassins versants où la saturation des sols avec la fonte de neige est moindre.

## Pourquoi sommes-nous intéressés au transport sédimentaire ?

Lorsque les rivières entrent en crue, à la suite de précipitations et/ou de la fonte de la neige et des glaciers, des importants volumes d'eau transitent dans les cours d'eau sur un cours laps de temps. Pendant ces événements, l'énergie de l'eau dévalant les montagnes est telle qu'elle parvient également à importer avec elle du matériel sédimentaire (p. ex. des limons, des sables, des graviers, des galets, des blocs) provenant du lit et des berges. La rivière érode. Plus bas en aval, lorsque la rivière n'a plus la capacité de transporter le matériel qu'elle a érodé, à cause d'une diminution de la pente et de la vitesse par exemple, ou d'une augmentation dans la largeur du chenal (i.e. énergie dispersée sur une plus grande surface), la rivière dépose le matériel qu'elle charriaît.

L'érosion, le transport et le dépôt de matériel sédimentaire par les rivières influence les activités humaines qui se développent à proximité de leur cours. L'érosion peut provoquer la déstabilisation des berges et des infrastructures qui s'y trouvent, ou l'affouillement de constructions présentes dans le lit (p. ex. pilier de pont). Le dépôt peut favoriser, à travers l'élévation du niveau du lit, le débordement des eaux. Ainsi, le transport sédimentaire a généré en moyenne 125 millions de CHF par an de dégâts en Suisse sur les quarante dernières années, dont une majorité prend place dans les environnements de montagne (Badoux et al., 2014). Les coûts de dégâts incluent notamment les dommages au bâti, aux voies de communication et aux terres touchées par les événements de crue (p. ex. terres agricoles, parcelles de forêt).

Le transport sédimentaire dans les rivières de montagne représente également un enjeu majeur pour l'avenir de la production hydroélectrique en Suisse. Au jour d'aujourd'hui, environ 60 % de notre consommation d'électricité provient de la force hydraulique, dont une part substantielle des grands barrages alpins (environ 60 %). La part de l'hydroélectricité dans la production globale devrait même augmenter à 70 % suite à l'acceptation par le peuple suisse de la Nouvelle Loi sur l'Energie 2050. Dans le même temps, les rivières alpines charrient de grande quantités de matériel sédimentaire, notamment depuis les bassins glaciaires qui fondent rapidement. En conséquence, les lacs d'accumulation d'eau en amont des barrages se remplissent de matériaux, et leur capacité de production d'électricité diminue.

Les grands travaux de correction des cours d'eau qui ont pris place au cours de 19<sup>ème</sup> et 20<sup>ème</sup> siècles en Suisse ont cherché à diminuer le risque d'érosion et de débordement des rivières. Si elles sont régulièrement parvenues à diminuer la fréquence des débordements petits et moyens, elles sont restées impuissantes face aux événements de grande ampleur, en témoignent par exemple les dégâts occasionnés par les crues d'octobre 2000 en Valais (670 millions de CHF de dégâts). Par ailleurs, en donnant une illusion de sécurité à toute épreuve, l'endiguement des rivières a encouragé l'implantation de la population à proximité directe des cours d'eau, augmentant largement les coûts des dégâts lorsque la rivière finit tout de même par déborder. De plus, en canalisant, corrigeant, bétonnant les rivières, les ingénieurs de la correction des cours d'eau ont transformées les rivières en véritables déserts écologiques. Les populations d'insectes, de poissons et de batraciens liées au cours d'eau se sont effondrées.

Face à l'augmentation du risque de dégâts importants en cas de débordement, et de la dévalorisation de la qualité écologique des cours d'eau suisses, le Conseil fédéral a complètement changé de stratégie. Aujourd'hui, on met en place des politiques de revitalisation des cours d'eau, qui ont le double objectif d'être plus à même de contenir les crues de toute ampleur et de diminuer les coûts que les inondations génèrent, tout en augmentant la valeur écologique et récréative des rivières (en aménagement des chemins le long de tronçons revitalisés par exemple, qui sont plus charmants que les bétonnés le long des canaux de la plaine du Rhône). Souvent, cette politique de revitalisation requiert de redonner davantage d'espace à la rivière où cela est possible, en élargissant son lit. On doit alors « sacrifier » des terrains au profit de la rivière, mais le jeu en vaut la chandelle puisque le reste des terrains devient mieux protégé, et la rivière redevient un paradis écologique et récréatif. Dans ces projets de revitalisation, le régime de charriage (i.e. comment la rivière érode, transporte et dépose le matériel sédimentaire) est important afin de dimensionner correctement les différents travaux (p. ex. la largeur du lit de la rivière), et de favoriser l'équilibre écologique des rivières (i.e. les truites ont par exemple besoin de matériel grossier pour pouvoir frayer, donc il faut s'assurer que la rivière n'érode pas trop souvent les particules grossières, ni qu'elle ne colmate le lit par le dépôt de particules fines).

Ainsi, on voit que le transport sédimentaire influence de nombreuses activités qui se développent le long des cours d'eau. Il influe sur leur débordement, qui représente un risque humain et financier conséquent. Il affecte la production hydroélectrique. Il importe également pour les projets de revitalisation de rivière. Ces éléments sont d'autant plus critiques qu'ils pourraient évoluer dans un contexte de changement climatique. On a donc grandement besoin de prédictions du transport sédimentaire qui soit fiables, afin de pouvoir cohabiter de la meilleure des manières possibles avec les cours d'eau, que les coûts des dégâts qu'ils génèrent soient maîtrisés, que l'on puisse optimiser la production hydroélectrique, que la valeur écologique et récréative des rivières augmente, et ce même dans un contexte de changements climatiques. Malgré toutes ces bonnes raisons, la communauté scientifique reste relativement mauvaise à prédire le transport sédimentaire dans les cours d'eau, et les meilleures estimations ont toujours au minimum un ordre de magnitude d'erreur (facteur 10), ce qui risque tour à tour de surestimer ou de sous-estimer les mesures prises afin d'inclure au mieux le charriage dans des projets de protection contre les crues, de revitalisation, ou d'optimisation de la production hydroélectrique.

### **Pourquoi sommes-nous aussi mauvais à prédire le transport sédimentaire ?**

Malgré plusieurs siècles de recherche sur le transport sédimentaire, nous restons donc relativement mauvais à le prédire de manière fiable. A quoi cela est-il dû ?

D'abord au fait que le processus en lui-même est physiquement complexe. Le lit des cours d'eau est irrégulier, formant des champs de turbulence qui tantôt diffusent l'énergie, tantôt la concentrent. Le lit est constitué de particules ayant des tailles différentes, qui interagissent entre elles, les grosses particules pouvant protéger les plus petites, ou les grosses particules pouvant présenter une plus grande surface d'exposition face au courant. Parfois, les particules s'imbriquent entre elles, formant une résistance supérieure aux forces d'entrainement, jusqu'à un point critique à partir duquel une grande partie du lit se met en mouvement. Cette combinaison de facteurs, qui interagissent les uns avec les autres et sont en perpétuel changement, fait qu'il est extrêmement difficile, pour un débit

d'eau donné, de prédire la masse de charriage qui va être mise en mouvement. A cette échelle de complexité s'ajoute des débits variables, des changements dans la fourniture sédimentaire depuis l'amont, des berges mobiles qui changent au cours du temps, des effets de résistance liée à la végétation riveraine, par exemple. En d'autres termes, un cauchemar pour les physiciens, qui continuent à se casser les dents sur ce problème, et ne parviennent à fournir que des prédictions qui restent approximatives.

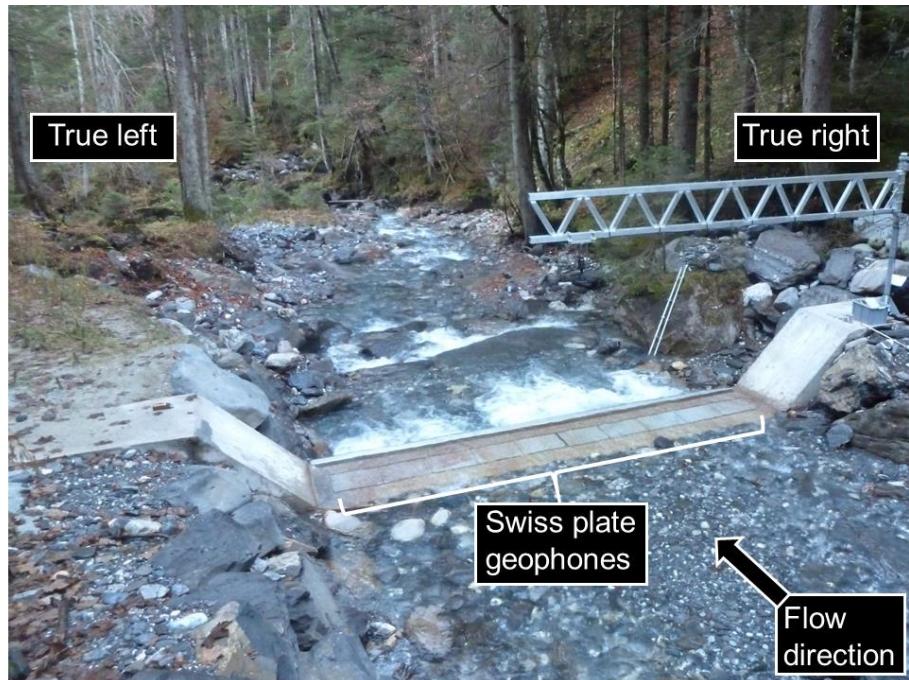
Un autre facteur qui a grandement limité les progrès dans la discipline a été l'absence pendant longtemps de moyen de mesure fiable du transport sédimentaire dans les cours d'eau. Les premiers prélèvements ont été effectués à la main, à l'aide de récipients (p. ex. bidon, corbeille, filet), où le transport sédimentaire était échantillonné pendant une durée donnée à même la rivière. Le problème avec ces échantillonnages est qu'ils ne couvrent souvent pas toute la largeur de la rivière, ils sont limités dans le temps, et ils sont impraticables pendant les forts débits, qui sont précisément les périodes qui sont les plus intéressantes. Plus tard, on a mesuré le taux de remplissage de réservoirs (p. ex. dépotoirs sédimentaires) afin d'estimer la livraison sédimentaire au cours d'une période donnée, séparée par deux mesures du taux de remplissage du réservoir. Si cette approche permet d'avoir une bonne estimation du volume de matériel transporté au cours de cette période, la construction de réservoirs est coûteuse et la mesure de leur taux de remplissage chronophage, ce qui fait que ces jeux de données ont souvent une faible résolution temporelle (pour chaque événement majeur dans le meilleur des cas, le plus souvent des volumes annuels uniquement).

Heureusement pour la discipline, des progrès majeurs ont récemment été effectués grâce au déploiement de capteurs mesurant indirectement le transport sédimentaire, et ce de manière continue. Pour le transport en suspension (particules fines transportées dans la colonne d'eau), il a été démontré que des capteurs de turbidité de l'eau sont à même de mesurer la charge transportée en suspension. Pour le transport de fond, ou charriage (particules grossières qui rebondissent, glissent et roulement à la surface du lit), il a été démontré que des capteurs acoustiques permettent donner une estimation indirecte de la charge en transport. Ces approches sont révolutionnaires dans la mesure où la recherche commence enfin à avoir à disposition des séries temporelles continues de transport sédimentaire dans des rivières ayant des dispositions différentes (p. ex. rivières de plaine ou de montagne, rivières glaciaires, petites et grandes rivières), et l'espoir est grand que ces séries de mesure puissent enfin nous aider à fournir des meilleures prédictions du transport sédimentaire dans un futur proche.

### **La station de mesure du Vallon de Nant**

En 2014, une station de mesure hydrologique et du transport sédimentaire a été ainsi construite sur le cours de l'Avançon de Nant au niveau de Pont de Nant, fruit d'une collaboration entre l'Université de Lausanne, l'Institut fédéral suisse de recherche en environnement WSL, et l'ETH Zürich (Fig. 1). La station mesure en continu le débit d'eau à l'aide d'un radar mesurant la hauteur d'eau (au bout du bras métallique), qui est transformée en débit d'eau par une relation de calibration qui a été construite entre le débit et la hauteur d'eau. Une sonde de turbidité a été installée afin de mesurer le transport en suspension. De plus, des capteurs pour mesurer le charriage sédimentaire (particules grossières, typiquement  $> 1 \text{ cm}$ ) ont également été installés. Les capteurs du charriage

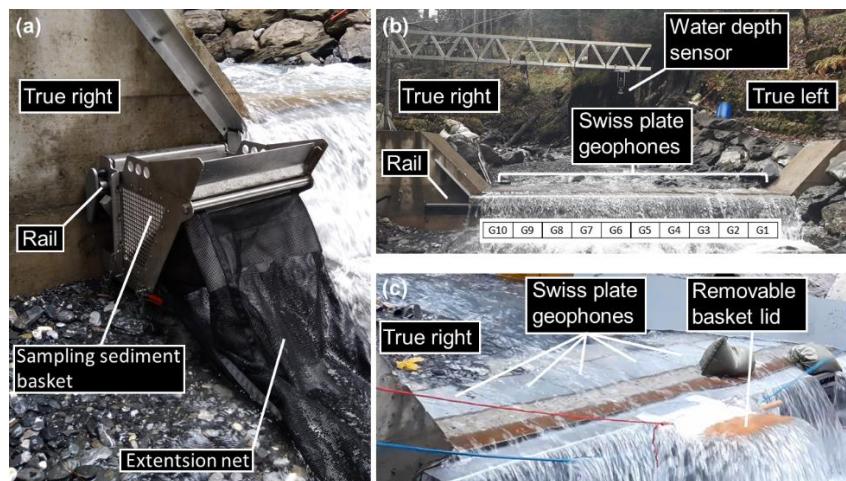
sont composés d'une série de plaques d'acières contiguës qui couvrent la largeur de la rivière, imbriquées dans un seuil de béton au niveau du lit de la rivière. Sous chacune de ces plaques, un géophone est monté et mesure la vibration des plaques à une résolution de 10 kHz. Lorsque des particules sédimentaires rebondissent, roulent ou glissent sur l'une des plaques, la plaque se met à vibrer et le géophone mesure l'amplitude de cette vibration, qui est estimée proportionnelle à la quantité de matériel charrié.



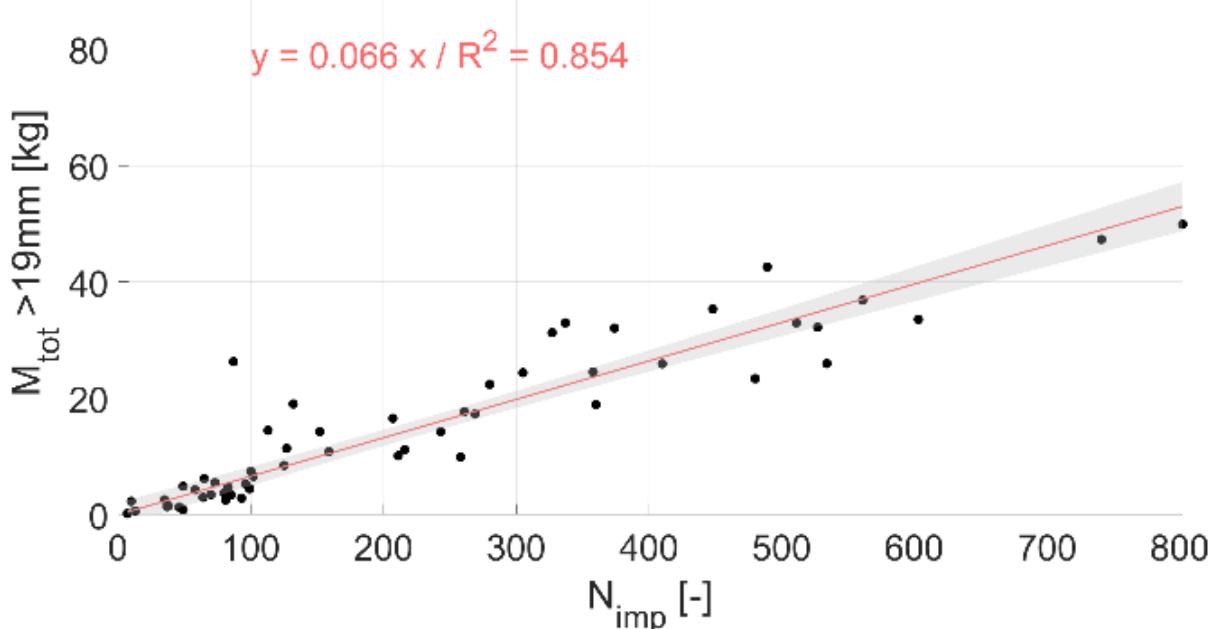
**Fig. 1 :** La station de mesure du Vallon de Nant. Un radar, positionné au bout du bras métallique, mesure continuellement la hauteur d'eau, de laquelle est déduite le débit par une relation de calibration. Une sonde de turbidité, placée dans les tuyaux métalliques en rive droite, permet de mesurer indirectement la charge en suspension. Dix plaques métalliques sous lesquelles sont placées des géophones permettent finalement de mesurer le transport par charriage sur toute la largeur de la rivière.

Afin de transformer l'amplitude de vibration des plaques d'acier en une masse réelle de charriage, une calibration des capteurs est nécessaire. La calibration a été réalisée en utilisant une corbeille sédimentaire mobile montée sur un rail qui peut être déplacée le long du seuil en béton de la station (Fig. 2). La corbeille présente la même largeur qu'une plaque d'acier. Durant un événement de charriage, la corbeille est placée précisément en aval d'une plaque à l'aide d'un système de cordes et de poulies, et toutes les particules qui impactent une plaque visée pour la calibration sont collectées par la corbeille sédimentaire. On peut ainsi établir une relation de calibration systématique entre le signal enregistré par les géophones et la masse/taille des particules qui ont produit ce signal. Des échantillonnages du charriage ont ainsi été réalisés au cours des saisons de fonte 2019 et 2020, avec des débits sédimentaires variables, afin de construire une relation de calibration. L'analyse montre que le signal enregistré par les géophones augmente selon une loi puissance avec la masse de charriage (Fig. 3). Grâce à cette relation de calibration, il est donc désormais possible de transformer avec confiance le signal enregistré par les géophones en une masse de charriage transporté sur toute la série temporelle de mesure.

Des données de ce type sont encore extrêmement rares, et seules 20-30 rivières dans le monde ont pu être équipées avec un système d'une telle performance.



**Fig. 2 :** Corbeille mobile utilisée pour la calibration des capteurs de chargement. Un couvercle amovible est placé sur la corbeille pour éviter que des particules ne soient collectées pendant son positionnement (effectué à l'aide des deux cordes bleues). Au début de l'échantillonnage, le couvercle est retiré à l'aide de la corde rouge et les particules qui impactent la plaque visée pour la calibration sont collectées par la corbeille placée directement à l'aval. Lorsque la corbeille est jugée suffisamment pleine, elle est rapidement ramenée à l'aide des cordes bleues.



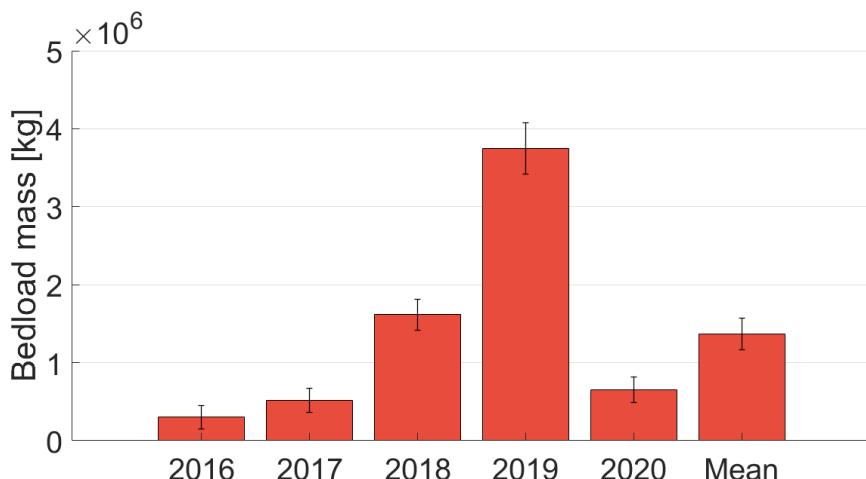
**Fig. 3 :** Relation de calibration des capteurs de chargement au Vallon de Nant. Chaque point est un échantillon collecté avec la corbeille. Nimp sur l'axe des X correspond au nombre d'impulsions mesurées par un géophone donné, Mtot sur l'axe des Y correspond à la masse sédimentaire associée collectée.

## Analyse du charriage au Vallon de Nant

Les premières analyses du transport sédimentaire au Vallon de Nant se sont focalisées sur le charriage. Si l'analyse du transport en suspension est également importante quant au budget sédimentaire total, et sera investiguée dans un futur proche, le transport en suspension tend à être distribué sur un plus grand nombre de jour par rapport au charriage qui est concentré sur un nombre plus restreint d'événements de crue. Ainsi, le charriage tend à être plus important quant aux changements morphologiques majeurs et aux débordements de cours d'eau, c'est pourquoi il a été l'objet des premières analyses effectuées.

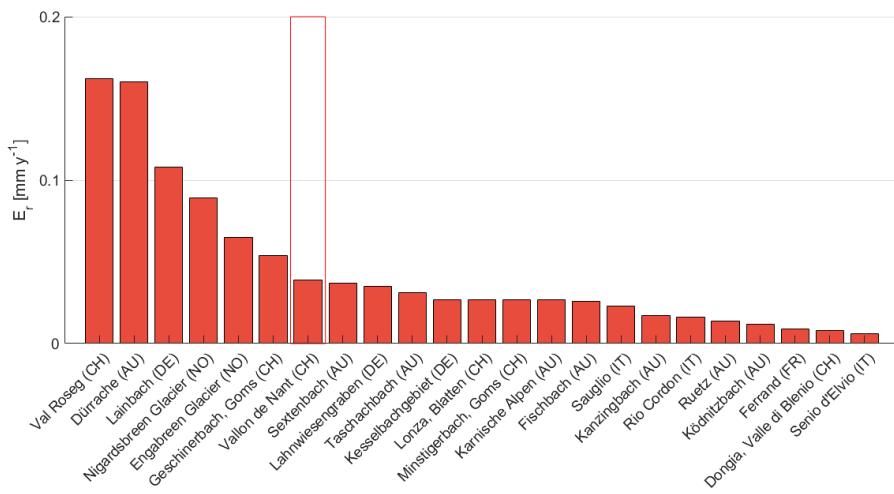
Les premières analyses du charriage au Vallon de Nant se sont focalisées sur la période 2016-2020. D'abord, les budgets annuels ont été calculés (Fig. 4a). En moyenne, ~1.5 million de kilo de particules sont transportées chaque année sur la série de mesure, mais avec de larges variations interannuelles, avec les années 2016 et 2017 qui ont vu moins de 500'000 kilos de particules chacune charriées, tandis que les années 2018 et 2019 ont enregistré près de 2 et 4 millions de kilos de matériel charriés, respectivement.

(a)



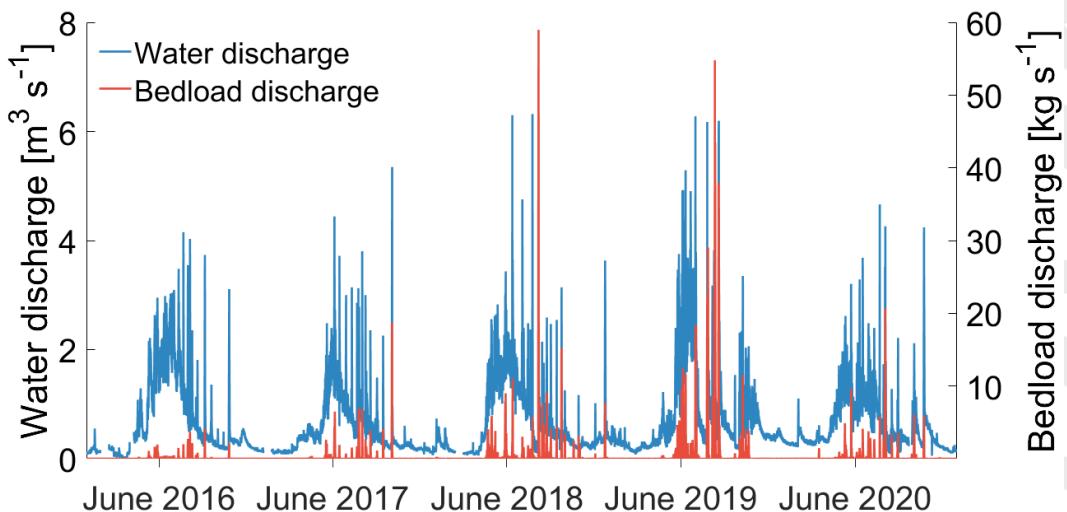
**Fig. 4 :** Masse annuelle charriée au Vallon de Nant sur la période 2016-2020.

Pour comparaison avec d'autres cours d'eau similaires au Vallon de Nant (petits cours d'eau alpins) où les données annuelles de charriage sont disponibles (le plus souvent via la mesure du taux de remplissage de réservoirs), on voit que le Vallon de Nant semble relativement actif. Le charriage est responsable d'une érosion de 0.05 mm par année sur les 13.4 km<sup>2</sup> qu'occupent le Vallon de Nant, ce qui représente des valeurs plus hautes que dans certains bassins avec des plus gros glaciers comme la Lonza en Valais, le Ruetz et le Fischbach en Autriche, ou le Val Roseg dans les Grisons.



**Fig. 5 :** Comparaison des taux d'érosion du Vallon de Nant avec d'autres bassins versants alpins, calculés sur la base de la masse de matériel exportée rapportée à la surface du bassin versant.

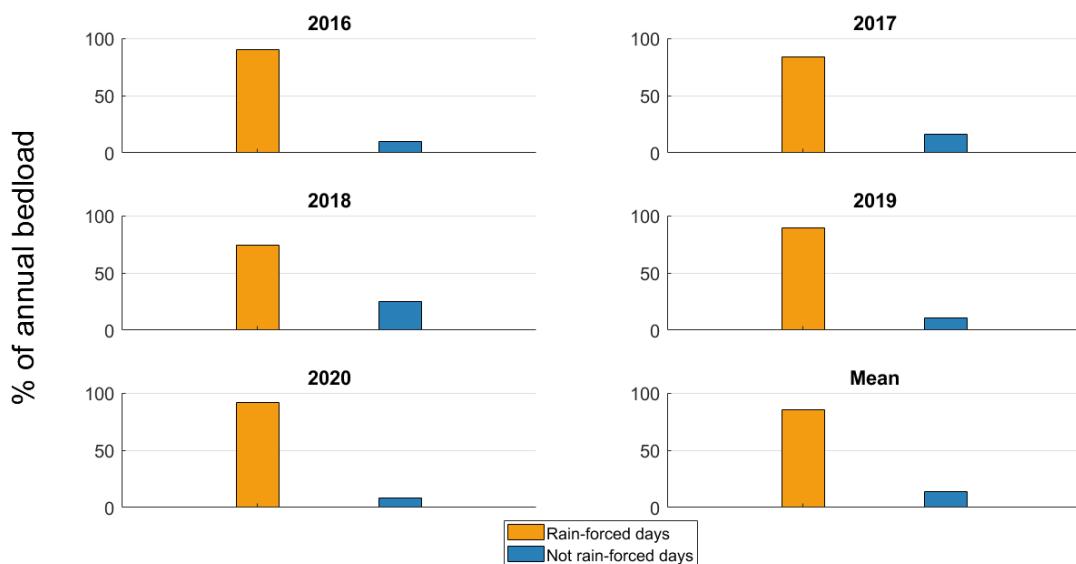
Si on regarde la distribution du débit d'eau (en bleu dans la Fig. 6) et du débit de charriage (en rouge dans la Fig. 6) au cours de la série d'observation, on voit que l'hydrologie du Vallon de Nant est typique d'un bassin versant alpin où la variation du débit d'eau est dominée par la fonte de la neige. Pendant l'hiver, le débit d'eau est à son minimum, et augmente progressivement à partir du mois d'avril. Il atteint son maximum pendant la période mai-juin, puis diminue progressivement au cours de l'été à mesure que les volumes de neige dans le bassin versant diminuent. La contribution de fonte provenant du Glacier des Martinets est à présent relativement modeste, au vu de sa taille et de son taux d'ensevelissement sous la rocallie. Le débit d'eau continue à diminuer sur la fin de l'été et au cours de l'automne à mesure que le signal de fonte s'amoindrit. Ces tendances générales sont régulièrement interrompues par des événements pluvieux qui génèrent de brèves et parfois intenses augmentation du débit d'eau, notamment à partir du mois de juin. Le débit de charriage tend à globalement suivre les variations du débit d'eau, avec peu d'activité au cours de l'hiver, et une activité plus marquée pendant la saison de fonte et les événements pluvieux.



**Fig. 6 :** Variation du débit d'eau (en bleu) et du débit de charriage (en rouge) au cours des cinq années d'observation.

On voit donc que les augmentations du niveau d'eau qui génèrent du charriage peuvent avoir différentes origines. Il peut s'agir d'événements pluvieux, il peut s'agir de fonte, ou il peut également s'agir d'événements pluvieux dans un bassin versant où la quantité de neige est encore importante, générant des événements de « pluie sur neige » qui sont connus pour produire de grosses augmentations du débit d'eau. La question est de savoir : quelle proportion du charriage est due à quel événement hydrologique ? Cette question revêt de l'importance afin d'être à même de mieux prédire le charriage auquel on peut s'attendre en fonction de l'état hydrologique d'un bassin versant (p. exemple : quantité de neige restante). Elle est doublement importante dans la mesure où il est attendu que l'hydrologie des bassins versants alpins (quantité de neige, période de fonte, distribution et magnitude des précipitations) évolue avec les changements climatiques. Il est donc critique de comprendre quels événements hydrologiques produisent du charriage, afin de savoir comment ils pourraient évoluer dans un contexte de changement climatique.

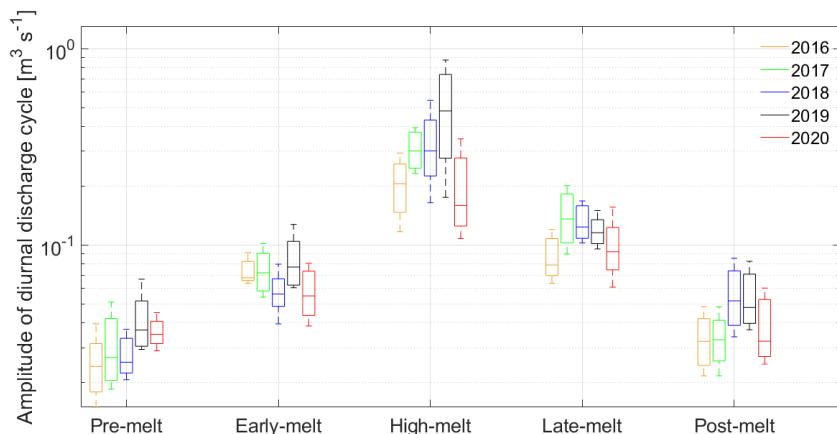
Dans un premier temps, nous avons donc effectué une analyse du débit d'eau, afin de séparer les jours où le débit d'eau est influencé par des événements pluvieux, des jours où il ne l'est pas (et où les variations sont donc davantage liées à la fonte, notamment). Pour ce faire, nous avons utilisé des données de Météosuisse, qui fournit des données locales de température et de précipitation sur toutes la Suisse en interpolant les valeurs mesurées sur son dense réseau de stations météorologiques. En comparant la quantité de précipitations journalières mesurées, la température (pour faire la différence entre la pluie et les chutes de neige) et la réponse du débit d'eau journalier, nous avons pu classer chacun des 1827 débits journaliers entre le 1<sup>er</sup> janvier 2016 et le 31 décembre 2020 dans les deux catégories : « influencé par un événement pluvieux » ou « non influencé par un événement pluvieux ». Ce faisant, il a été possible de calculer la quantité de charriage associée à ces deux catégories (Fig. 7).



**Fig. 7 :** Répartition du charriage entre les jours influencés par des événements pluvieux (en orange) et les jours non-influencés par des événements pluvieux (donc plutôt un signal lié fonte, en bleu).

On voit que les jours influencés par des événements pluvieux tendent à représenter une majorité du charriage annuel (86 % en moyenne), contre 14 % en moyenne pour les jours

non-influencés par des événements pluvieux (notamment le signal lié à la fonte). Il y a néanmoins des années (p. ex. 2018) où la proportion n'est pas aussi déséquilibrée (75% / 25%).



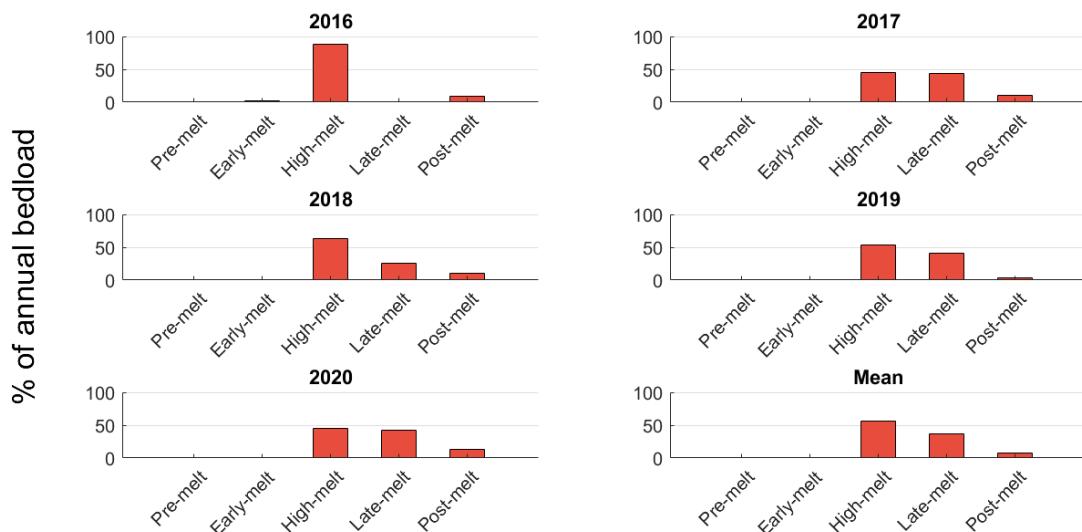
**Fig. 8 :** Distribution de l'amplitude des débits journaliers par année et par période de la saison de fonte. Chaque « boîte à moustache » (= pictogramme sur le graphique) représente la distribution de l'amplitude des débits journaliers pour cette période. La barre centrale est la médiane de la distribution et les bras traitillés représentent le 10 % et le 90 % des données. En d'autres termes, 80 % des valeurs d'amplitude de débit journalier d'une catégorie donnée sont contenues dans la boîte à moustache, et les 20 % restant ont des valeurs d'amplitude de débit journalier en dehors de cette fourchette.

Dans un deuxième temps, nous avons affiné la classification en regardant l'amplitude du débit journalier des jours non-influencés par des événements pluvieux, dans l'idée de pouvoir identifier plusieurs phases dans la saison de fonte avec des intensités différentes. Sur la base de ce critère, cinq périodes distinctes ont pu être identifiées – la pré-fonte (Pre-melt), la fonte précoce (Early-melt), la haute fonte (High-melt), la fonte tardive (Late-melt) et la post-fonte (Post-melt). Ces périodes, bien que leur étendue exacte change d'une année à l'autre, étaient systématiquement identifiable au travers des cinq ans observations, et présentaient des variations de débit journalier comprises dans une même fourchette de valeurs. La Fig. 8 présente pour les différentes années la plage de débit comprise dans chacune des périodes de la saison de fonte. Le Tableau 1 présente les dates de début et de fin, et l'amplitude des débits journaliers, pour chaque année et chacune des périodes de la saison de fonte.

Malgré quelques variations interannuelles, on peut voir que la saison de pré-fonte (Pre-melt) s'étend du 1<sup>er</sup> janvier à début avril environ, au moment où la fonte débute gentiment. La saison de fonte précoce (Early-melt) s'étend ensuite, selon l'année, de mi-avril à mi-mai, puis vient la saison de haute fonte, dont l'étendue est relativement variable en fonction de l'année (de fin juin à début août). La période de fonte tardive (Late-melt) s'étend ensuite typiquement jusqu'à fin août, début septembre, puis vient la période de post-fonte (Post-melt) qui s'étend jusqu'à la fin de l'année. Ce deuxième niveau de classification permet ainsi de quantifier la proportion du charriage annuel transporté au cours de chacune des différentes périodes de la saison de fonte (incluant également les jours influencés par les événements pluvieux, Fig. 9).

**Tableau 1 :** Dates de début et de fin de chacune des périodes de la saison de fonte, ainsi que la valeur médiane de l'amplitude du débit journalier.

		Pre-melt	Early-melt	High-melt	Late-melt	Post-melt
		50 <sup>th</sup> [25 <sup>th</sup> , 75 <sup>th</sup> ]				
<b>2016</b>	Dates	Jan. 1 <sup>st</sup> – Apr. 10 <sup>th</sup>	Apr. 11 <sup>th</sup> – May 5 <sup>th</sup>	May 6 <sup>th</sup> – Aug. 11 <sup>th</sup>	Aug. 12 <sup>th</sup> – Aug. 28 <sup>th</sup>	Aug. 29 <sup>th</sup> – Dec. 31 <sup>th</sup>
	Amp. [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	<b>0.02</b> [0.02, 0.03]	<b>0.07</b> [0.07, 0.08]	<b>0.21</b> [0.16, 0.25]	<b>0.08</b> [0.07, 0.1]	<b>0.03</b> [0.03, 0.04]
<b>2017</b>	Dates	Jan. 1 <sup>st</sup> – Apr. 2 <sup>nd</sup>	Apr. 3 <sup>rd</sup> – May 13 <sup>th</sup>	May 14 <sup>th</sup> – Jun. 21 <sup>th</sup>	Jun. 20 <sup>th</sup> – Sep. 4 <sup>th</sup>	Sep. 5 <sup>th</sup> – Dec. 31 <sup>th</sup>
	Amp. [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	<b>0.03</b> [0.02, 0.04]	<b>0.07</b> [0.06, 0.09]	<b>0.3</b> [0.25, 0.37]	<b>0.14</b> [0.1, 0.18]	<b>0.03</b> [0.03, 0.04]
<b>2018</b>	Dates	Jan. 1 <sup>st</sup> – Apr. 7 <sup>th</sup>	Apr. 8 <sup>th</sup> – Apr. 16 <sup>th</sup>	Apr. 17 <sup>th</sup> – Jun. 24 <sup>th</sup>	Jun. 25 <sup>th</sup> – Sep. 4 <sup>th</sup>	Sep. 5 <sup>th</sup> – Dec. 31 <sup>th</sup>
	Amp. [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	<b>0.03</b> [0.02, 0.03]	<b>0.06</b> [0.05, 0.06]	<b>0.3</b> [0.24, 0.4]	<b>0.12</b> [0.1, 0.16]	<b>0.05</b> [0.04, 0.07]
<b>2019</b>	Dates	Jan. 1 <sup>st</sup> – Apr. 4 <sup>th</sup>	Apr. 5 <sup>th</sup> – May. 15 <sup>th</sup>	May. 16 <sup>th</sup> – Jul. 8 <sup>th</sup>	Jul. 9 <sup>th</sup> – Aug. 29 <sup>th</sup>	Aug. 30 <sup>th</sup> – Dec. 31 <sup>th</sup>
	Amp. [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	<b>0.04</b> [0.03, 0.05]	<b>0.08</b> [0.06, 0.1]	<b>0.48</b> [0.31, 0.69]	<b>0.12</b> [0.1, 0.13]	<b>0.05</b> [0.04, 0.07]
<b>2020</b>	Dates	Jan. 1 <sup>st</sup> – Apr. 4 <sup>rd</sup>	Apr. 5 <sup>th</sup> – Apr. 9 <sup>th</sup>	Apr. 10 <sup>th</sup> – Jul. 20 <sup>th</sup>	Jul. 21 <sup>th</sup> – Sep. 5 <sup>th</sup>	Sep. 6 <sup>th</sup> – Dec. 31 <sup>th</sup>
	Amp. [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	<b>0.04</b> [0.03, 0.04]	<b>0.06</b> [0.05, 0.07]	<b>0.16</b> [0.13, 0.25]	<b>0.09</b> [0.08, 0.11]	<b>0.03</b> [0.03, 0.05]

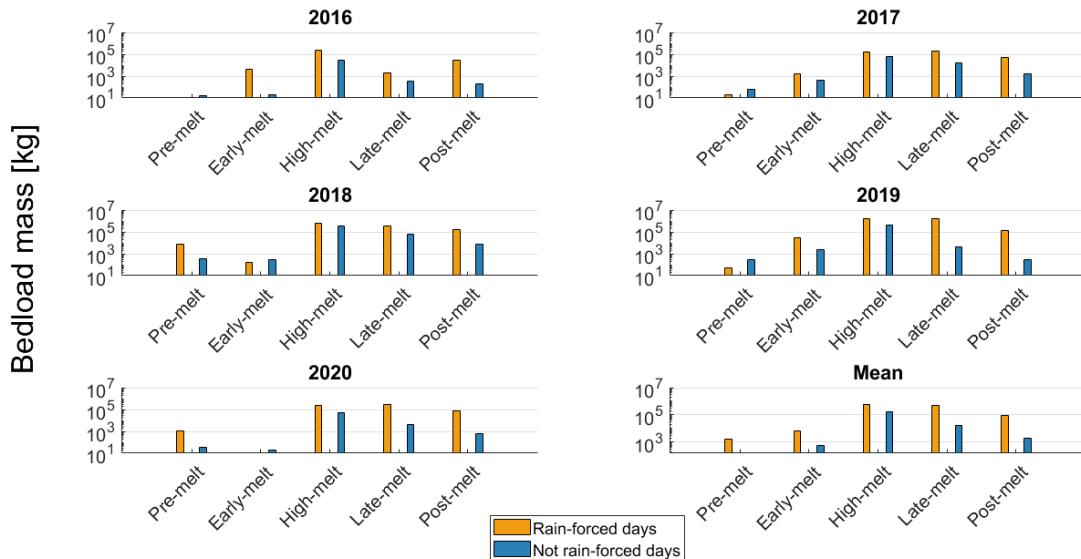


**Fig. 9 :** Répartition du charriage entre les cinq périodes de la saison de fonte qui ont été identifiées sur la base de l'amplitude du débit journalier liée à la fonte.

On constate que la pré-fonte (Pre-melt) et la fonte précoce (Early-melt) enregistrent une proportion négligeable du charriage annuel (~1 %), tandis que la haute fonte (High-melt), la fonte tardive (Late-melt) et la post-fonte (Post-melt) se partagent l'entier de la mise. La haute fonte (High-melt) représente le plus souvent la plus grosse proportion (59 % du charriage annuel en moyenne), suivie par la fonte tardive (Late-melt ; 31 % du charriage annuel en moyenne) et la post-fonte (Post-melt ; 9 % du charriage annuel en moyenne), avec là-aussi des variations interannuelles importantes. En 2016 par exemple, la période de haute fonte (High-melt) représente ~90 % du charriage annuel tandis que la période de fonte tardive (Late-melt) représente une proportion négligeable du budget annuel, alors qu'en 2020, les périodes de fonte haute et tardive (High-melt et Late-melt) se partagent le charriage annuel proche d'une balance de 50-50 %.

Les deux catégories extraites des données (jours de pluie vs jours sans pluie ; périodes de la saison de fonte avec des intensités différentes) peuvent être combinées afin d'affiner notre compréhension des événements qui produisent du charriage au Vallon de Nant (Fig. 10). On voit que systématiquement, ce sont les jours de pluie pendant la période de haute fonte (High-melt) et de fonte tardive (Late-melt) qui produisent les plus grandes quantités de charriage (77% du charriage annual en moyenne). A cette période, la partie aval du Vallon de Nant est libérée des neiges, tandis qu'il en reste encore des paquets dans le haut du bassin versant. La neige comme le sol sont saturés en eau, et ne peuvent jouer leur rôle d'éponge. Lorsqu'il se met à pleuvoir, davantage de neige fond rapidement et le ruissellement de surface commence immédiatement comme il ne peut être absorbé nulle part. Cela se traduit par une montée directe et rapide du débit d'eau, qui a la capacité de transporter beaucoup de matériel. C'est donc la co-occurrence d'événements pluvieux dans un système où le signal de fonte est fort (grande variation des débits journaliers, sol saturé en eau, partie aval du bassin libéré des neiges mais gros stocks restant dans les parties plus élevées) qui produisent la part la plus significative du charriage annuel. Les événements de pluie ayant lieu dans la période post-fonte (Post-melt) sont également à même de transporter une quantité substantielle de matériel (7% du charriage annuel en moyenne). L'humidité du sol diminuant à mesure que le signal de fonte s'amoindrit, il faut à cette période que l'intensité de la pluie soit suffisante pour saturer le sol et se traduire dans une hausse rapide du débit.

Les jours sans pluie des périodes de haute fonte (High-melt) et de fonte tardive (Late-melt) sont également responsables du charriage d'une quantité certaine de matériel (~14% du charriage annuel), même si les jours avec pluies dominent largement le signal (86% du charriage annuel en moyenne). En comparaison, peu de charriage a lieu pendant les périodes de pré-fonte (Pre-melt) et de fonte précoce (Early-melt), que ce soit pendant les jours avec ou sans pluie. A cette période, le manteau neigeux étant étendu et épais, les éventuelles pluies sont facilement absorbées par la neige et/ou le sol, dont le taux de saturation est encore faible, et ne génère ainsi pas de réponse significative du débit d'eau de la rivière.



**Fig. 10 :** Répartition du charriage entre les jours influencés par des événements pluvieux (en orange) et les jours non-influencés par des événements pluvieux (en bleu), pour les cinq périodes de la saison de fonte (pré-fonte, fonte précoce, fonte haute, fonte tardive, post-fonte) présentant des intensités différentes.

En résumé, c'est la co-occurrence d'événements pluvieux dans un système où le signal de fonte est fort qui produit la part la plus importante du charriage annuel. Les événements pluvieux au cours de la fin de l'été et de l'automne (Post-melt) apportent également une contribution substantielle, mais il faut que l'intensité de la pluie soit suffisante pour excéder la capacité d'absorption du sol. Les jours sans pluie de la haute fonte (High-melt) et de la fonte tardive (Late-melt) jouent également un rôle important, au contraire de la pré-fonte (Pre-melt) et de la fonte précoce (Early-melt) qui jouent un rôle négligeable.

Dans quelle mesure les résultats obtenus au Vallon de Nant sont-ils représentatifs des autres bassins versants alpins ? Evidemment, davantage de jeux de données seraient nécessaires sur d'autres sites afin de vérifier que les tendances observées au Vallon de Nant sont généralisables à un nombre plus grand de bassins versants. On peut néanmoins supposer que cette co-occurrence d'événements pluvieux dans un bassin versant où le signal de fonte est fort est probablement un élément qui régulièrement produit de gros événements de charriages dans beaucoup de systèmes alpins. On imagine également que les événements de pluies intenses de la fin de l'été et de l'automne ont une importance dans beaucoup de système, alors que peu de charriage prend place au cours de l'hiver et du printemps. Même si des différences de proportion entre les différents types d'événements hydrologiques sont tout à fait possibles entre différents bassins versants, on s'attend à ce que les grandes tendances de charriage observées au Vallon de Nant ne soient pas exceptionnelles et se retrouvent dans d'autres systèmes.

Dès lors, comment l'hydrologie du Vallon de Nant, et des autres bassins versants alpins, va-t-elle évoluer dans un contexte de changement climatique ? Sur la base des résultats présentés ci-dessus, comment le charriage pourrait-il évoluer dans un contexte de changements climatiques dans ces bassins versants alpins ?

## Hydrologie et charriage dans les bassins versants de montagne : quelle(s) évolution(s) possible(s) dans un contexte de changements climatiques ?

On lit régulièrement dans la presse, de même que dans des publications scientifiques, que l'on peut s'attendre à une augmentation du charriage dans les bassins versants de montagne dans un contexte de changement climatique. Cette observation est principalement basée sur le fait que les modèles climatiques prédisent une augmentation de la magnitude et de la fréquence des précipitations. Si les résultats de cette recherche, et d'autres travaux complémentaires, ne peuvent ni confirmer ni infirmer complètement cette assertion, elle peut néanmoins être discutée à la lumière de certains éléments qui n'ont peut-être pas encore été suffisamment pris en compte pour formuler ces prédictions. Tout d'abord, que prédisent les modèles climatiques dans un bassin versant comme le Vallon de Nant, situé sur la façade nord-ouest des Alpes, avec une hydrologie dominée par la fonte de neige ?

Selon un scénario d'émissions de gaz à effet de serre modéré (i.e. RCP4.5), il est prévu que les températures moyennes annuelles augmentent de +2.3°C en hiver, +1.9°C au printemps, +2.9°C en été et +2.4°C en automne d'ici à 2085. Par ailleurs, les modèles prédisent que la quantité moyenne de précipitations dans cette région des Alpes vont rester plus ou moins stables avec les changements climatiques, mais leur distribution au cours de l'année va être modifiée, avec d'avantage de précipitations au cours de l'hiver (+10 %), des précipitations égales au printemps, et moins de précipitations au cours de l'été (-10 %) et de l'automne (-5 %). Il est également prévu que l'intensité des précipitations extrêmes poursuive son augmentation actuelle, et ce à toutes les saisons, avec une augmentation prévue dans la magnitude de + 20 %. Concernant la neige, il est attendu que les chutes de neiges diminuent de 5-10 % en hiver, 20-40 % au printemps et 20-40% en automne.

Ainsi on s'attend à ce que la limite du manteau neigeux s'élève de 300-600 mètres d'altitude dans cette région jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle. Il n'est pas prévu que l'augmentation des précipitations hivernales soient à même de compenser les grandes pertes de volume neigeux liées à l'augmentation des températures, sauf à des altitudes très hautes (> ~3000 mètres). Moins de précipitations vont donc être stockées sous forme de neige, la formation d'un manteau neigeux continu va prendre place plus tard dans l'année, le maximum du manteau neigeux va bouger de mars vers février, et la saison de fonte aura lieu plus tôt dans l'année et sera plus courte. Cette réduction des volumes de neiges affectera surtout les altitudes jusqu'à environ 2000 mètres. Des hivers neigeux auront toujours lieu dans un contexte de changement climatique, mais leur fréquence va diminuer de 1 fois tous les 8 ans, à 1 fois tous les 30 ans. Le régime des eaux souterraines va également être affecté par les changements climatiques, avec une augmentation de la recharge des nappes en hiver et au printemps, et une diminution en été et en automne.

En conséquence de ces changements, il est attendu que nombre de bassins versants alpins comme le Vallon de Nant évolue d'un régime hydrologique (= variation des débits au cours de l'année) dominé par la fonte de neige, comme c'est le cas aujourd'hui, vers un régime hydrologique davantage dominé par les événements pluvieux. Il est ainsi prévu que les débits hivernaux augmentent significativement (+80 à 100 %), que les débits printaniers

augmentent modérément (+20 à 40 %), que les débits estivaux diminuent significativement (-40 à 60 %), et que les débits automnaux diminuent modérément (-20 à 40 %), même si les débits moyens annuels devraient rester relativement stables, ou décroître légèrement (jusqu'à -20 %). Il est également possible que les événements de crue des rivières alpines augmentent en fréquence et en magnitude, mais leur prévision est rendue complexe par le nombre de variables interconnectées qui seront affectées par les changements climatiques (notamment la fréquence-magnitude des précipitations, les volumes de neige, le timing des précipitations et de la fonte, la recharge des nappes, l'évapotranspiration des eaux par la végétation).

Comment le charriage pourrait-il évoluer avec les modifications que les changements climatiques vont apporter à l'hydrologie des bassins versants de montagne comme le Vallon de Nant ? D'abord, la contribution liée au signal de fonte seul (sans événements pluvieux), important notamment pendant la haute fonte (High-melt) et la fonte tardive (Late-melt) va probablement diminuer avec les volumes de neige annuels. La période de fonte va par ailleurs se déplacer au cours de l'année, et durer moins longtemps. Dans ces circonstances, il est attendu que la quantité de matériel charriée au printemps augmente, tandis que celle transportée en été diminue. Une question centrale dans ce contexte sera de savoir dans quelle mesure la co-occurrence entre des événements pluvieux estivaux dans un bassin versant où la quantité de neige est toujours importante alors que la fonte est bien entamée aura toujours lieu dans un contexte de changements climatiques, ou si un déphasage de ces deux processus hydrologiques pourrait également voir le jour. Dans le deuxième cas, une diminution dans la contribution au charriage annuel, aujourd'hui importante, des événements pluvieux prenant place au cours de l'été, est possible dans le futur.

Une autre question centrale concerne l'augmentation prédictive dans les précipitations et les débits hivernaux. Si la contribution au charriage annuel de l'hiver va probablement augmenter avec les changements climatiques, reste à déterminer la magnitude de cette augmentation. Puisque les événements pluvieux vont avoir lieu au sein de bassins versants où la couverture neigeuse est étendue et épaisse, et le niveau des nappes souterraines à un niveau de saturation incomplet, il est possible que la réponse du débit et du charriage pourrait être en partie filtrée, comme on peut le voir aujourd'hui pour les événements pluvieux prenant place aux cours des périodes de pré-fonte (Pre-melt) et de fonte précoce (Early-melt).

Une dernière question centrale à résoudre concerne l'augmentation de la magnitude-fréquence des précipitations, notamment au cours de l'hiver et de l'automne. Si les données du Vallon de Nant ont montré que d'importantes quantités de matériaux peuvent être charriées au cours de ces événements, ils pourraient avoir lieu dans le futur dans des bassins versants pour le taux de saturation du sol dû à la fonte est plus bas, et où la réponse du débit d'eau pourrait ne pas être systématiquement aussi forte. Il est donc d'importance cruciale de quantifier dans quelle mesure l'augmentation dans la magnitude-fréquence des événements pluvieux à toutes les saisons va affecter le charriage annuel, et dans quelle mesure elle sera à même de compenser, ou même dépasser, des réductions possibles du charriage à d'autres saisons.

Les estimations de l'évolution du charriage dans un contexte de changements climatiques devra également inclure les modifications dans la disponibilité sédimentaire au sein des bassins versants de montagne. Il est également attendu que cette disponibilité sédimentaire évolue avec les changements climatiques, mais le signe de ce changement (augmentation ou diminution) reste incertain. D'un côté, il est prévu que la dégradation du permafrost augmente la fourniture sédimentaire depuis les parois et pentes rocheuses, et le retrait des glaciers va mettre à jour de larges volumes de matériel instables et facilement re-mobilisables. De même, l'augmentation de la fréquence-magnitude des événements pluvieux pourrait augmenter la fréquence-magnitude des laves torrentielles et des glissements de terrain, formant d'importantes sources sédimentaires pour le charriage des cours d'eau. D'un autre côté, il a aussi été démontré que dans certains cas, l'effet des changements climatiques pourrait également réduire la production sédimentaire et des processus associés (p. ex. laves torrentielles), par des boucles de rétroaction négative comme une diminution des cycles de gel-dégel. De la même manière, la stabilisation progressive du matériel glaciaire issu de la dernière phase majeure d'avancée des glaciers (Le Petit Age Glaciaire, 1350-1850), et la déconnexion avec certaines sources sédimentaires, pourraient également conduire à une diminution de la livraison sédimentaire vers les cours d'eau. Dans ce contexte, une incertitude majeure subsiste quant à savoir si la connectivité sédimentaire des bassins versants alpins pourrait être durablement améliorée par l'augmentation dans la magnitude-fréquence des événements pluvieux et des crues.

## Conclusion

Le charriage de sédiments par les rivières, notamment en montagne, représente un enjeu certain pour les populations et activités économiques qui vivent le long de leur cours. Il affecte notamment les risques d'érosion et de débordements des cours d'eau, la production hydroélectrique et les projets de renaturation. Paradoxalement, la communauté scientifique reste imprécise dans ses prédictions du charriage, notamment par le manque de séries temporelles de charriage fiables mesurées dans des rivières naturelles. De récentes innovations technologiques ont finalement permis d'obtenir des séries de données précises du transport sédimentaires dans les cours d'eau de montagne, et le Vallon de Nant, dans les Alpes vaudoises (Suisse), a été équipée d'une station de mesure de cette nouvelle génération.

Une première analyse du charriage sur une série temporelle de cinq ans a permis, après avoir calibré avec succès les capteurs à l'aide de prélèvements au moyen d'une corbeille sédimentaire mobile, d'estimer les masses annuelles de matériel grossier exportées depuis le Vallon de Nant. Une analyse complémentaire du débit d'eau et de données météorologiques a par ailleurs permis d'identifier la contribution de différents processus hydrologiques (événements pluvieux, fonte des neige, événements pluvieux à différentes intensités de fonte) par rapport au budget sédimentaire annuel. Ces résultats aident à comprendre dans quelles circonstances de gros événements de charriage sont produits, et à potentiellement mieux prédire leur occurrence. S'il est nécessaire d'obtenir des séries de mesure dans davantage de bassins versants alpins pour couvrir la variabilité des processus, il est attendu que les grandes tendances observables pour le Vallon de Nant ne soient pas uniques, mais comparables avec d'autres systèmes alpins.

Il est également attendu que les processus hydrologiques à l'origine du charriage évoluent dans un contexte de changement climatique. Si on entend parfois que le charriage augmentera probablement avec la magnitude-fréquence des événements pluvieux, nous soulignons dans ce rapport l'importance d'intégrer à la fois les changements dans l'hydrologie des bassins versants de montagne, et dans leur disponibilité sédimentaire, dans les prédictions qui sont faites. En particulier, nous relevons comme facteurs d'importance en plus de l'augmentation de la fréquence-magnitude des précipitations : (1) la co-occurrence d'événements pluvieux dans des bassins versants où la fonte est avancée mais où une grande quantité de neige subsiste encore ; (2) l'augmentation des précipitations et débits hivernaux dans des bassins versants où l'étendue et l'épaisseur du manteau neigeux sont importants ; (3) l'augmentation du charriage au printemps et la diminution en été suite au déplacement de la saison de fonte ; (4) la diminution de la contribution au charriage de la fonte avec la diminution des chutes de neige ; (5) l'occurrence d'événements pluvieux en été et en automne dans des bassins versants où la saturation des sols avec la fonte de neige est moindre.

### Remerciements

Le Conseil de coordination du Vallon de Nant est remercié pour son soutien dans ce projet de recherche. L'équipe de l'Auberge du Pont de Nant est également grandement remerciée pour son accueil toujours impeccable, pour son hospitalité inconditionnelle (même quand l'établissement était fermé), et pour sa cuisine revigorante qui était toujours grandement appréciée à la fin de journées de terrain. François Bonnet, Valentin Quartenoud et Sylvain Bernard sont aussi grandement remerciés pour leur aide et pour les discussions intéressantes menées sur la dynamique du Vallon de Nant.