



Benedikt Vogel, sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN)

Projet de recherche des universités de Zurich, Berne, Grenoble et Graz

Une meilleure prévision des crues exceptionnelles

Résumé

La production d'électricité grâce à l'énergie hydraulique, de manière sûre et fiable, nécessite une connaissance aussi précise que possible des niveaux des cours d'eau. Une équipe de recherche des universités de Zurich, Berne, Grenoble et Graz, soutenue par les offices fédéraux de l'énergie et de l'environnement (OFEN, OFEV), a mis au point une nouvelle méthode permettant d'évaluer de manière encore plus fiable que jusqu'à présent la menace que représentent les crues rares mais importantes le long des cours d'eau suisses. Les résultats contribuent au dimensionnement des installations de protection contre les crues, mais aussi au contrôle de la sécurité des barrages.

Zusammenfassung

Damit Strom aus Wasserkraft sicher und verlässlich erzeugt werden kann, muss man die Wasserpegel der Flüsse möglichst gut kennen. Ein Forschungsteam der Universitäten Zürich, Bern, Grenoble und Graz hat mit Unterstützung der Bundesämter für Energie und Umwelt (BFE, BAFU) eine neue Methode entwickelt, um die Bedrohung durch seltene, aber grosse Hochwasser entlang der Schweizer Flüsse noch zuverlässiger als bisher abschätzen zu können. Die Ergebnisse helfen bei der Dimensionierung von Hochwasserschutzanlagen, aber auch bei der Sicherheitsüberprüfung von Stauanlagen.

À l'échelle mondiale, les crues sont pratiquement monnaie courante. Elles font souvent un grand nombre de victimes, comme les inondations survenues à Sumatra en novembre 2025, qui ont causé plus de 700 morts, ou les fortes pluies qui se sont abattues sur certaines régions du Pakistan en juillet 2022 en emportant la vie de plusieurs centaines de personnes. La Suisse connaît elle aussi la puissance destructrice de l'eau. En juin 2024, des inondations dans l'espace alpin ont causé au moins huit morts. Les années 2013, 2007, 2005 ou 1999 sont associées à de grandes crues qui ont touché, au moins en partie, la Suisse et qui ont fait des victimes ainsi que d'importants dégâts matériels. Le souvenir des inondations remonte à loin : par exemple, en juin 1910, une crue en Suisse et en Autriche faisait 27 morts rien que sur le Plateau et, en septembre 1868, des pluies torrentielles ôtaient la vie à 51 personnes.

Estimation du risque maximal

Dans les régions où les êtres humains ont les moyens nécessaires, ils se protègent contre les inondations. Les infrastructures telles

que les ponts et les ouvrages hydrauliques comme des barrages sont conçus pour résister à des débits importants. Les digues et les zones de rétention permettent de maîtriser les cours d'eau afin de limiter les dommages. Les zones exposées aux dangers sont protégées par des mesures d'aménagement du territoire, sur la base de cartes de dangers.

« Pour pouvoir prendre ces mesures, il est nécessaire d'estimer aussi précisément que possible les débits de pointe prévisibles dans les cours d'eau suisses lors de grands épisodes de crue », déclare Daniel Viviroli, hydrologue à l'Université de Zurich. « Cela vaut en particulier pour des événements qui, par exemple, ne sont statistiquement prévus qu'une fois tous les cent ans (crue centennale) ou tous les mille ans (crue millénale). » Pour pouvoir estimer plus précisément l'ampleur de tels événements, Viviroli a développé, dans le cadre du projet « Crues extrêmes en Suisse » (abrégé : EXCH), une nouvelle méthode avec d'autres chercheurs des universités de Zurich, Berne, Grenoble et Graz. L'étude s'appuie sur un projet portant sur une question similaire au sujet de l'Aar (EXAR).

La nouvelle méthode repose sur les précipitations

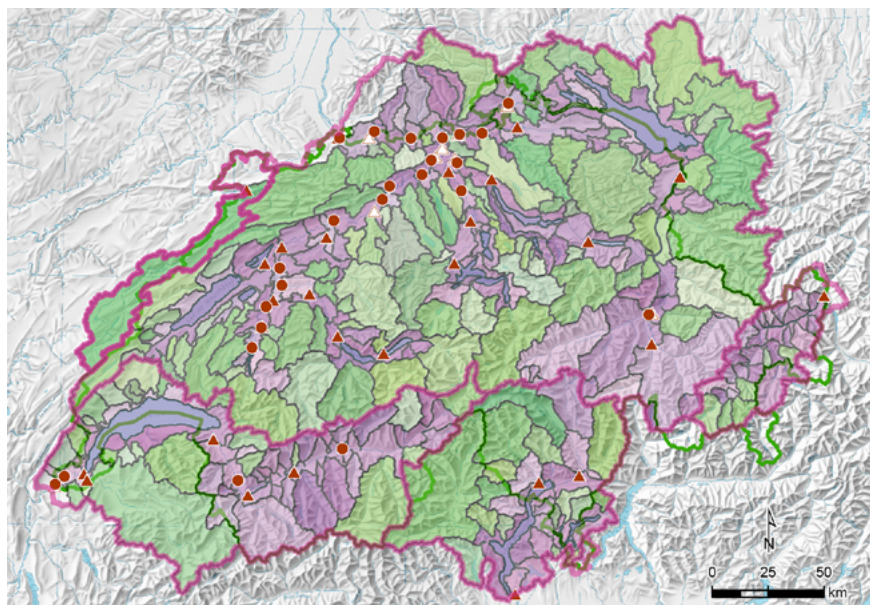
Jusqu'à présent, les épisodes de crue sont généralement estimés sur la base d'analyses des mesures du débit le long des cours d'eau. De telles observations existent depuis environ 60 à 70 ans pour certains endroits, et même depuis plus de 100 ans pour d'autres. Les débits sont mesurés notamment au niveau des stations de mesure de l'OFEV ou des cantons. À partir de ces séries de mesures, il est possible d'estimer, par extrapolation (calculs mathématiques), la fréquence à laquelle on peut s'attendre à des débits exceptionnels ou à des crues importantes. Cette méthode atteint toutefois ses limites lorsqu'il s'agit d'événements de crue très rares, et sa fiabilité est réduite lorsque le tracé des cours d'eau est modifié (comme cela a été le cas lors des deux corrections des eaux du Jura entre 1868-1891 et 1962-1973).

« Pour améliorer encore l'estimation des crues extrêmes, nous avons développé une nouvelle méthodologie qui, en complément de la méthode utilisée jusqu'à présent, permet d'avoir un regard supplémentaire sur les dangers possibles », déclare Viviroli. La nouvelle méthode ne repose pas essentiellement sur la mesure des débits, mais sur des données relatives aux précipitations (pluie, neige) et à la température. Ces données sont générées artificiellement à l'aide d'un générateur météorologique. Elles permettent alors d'estimer le niveau des cours d'eau et ainsi le risque d'inondation sur de très longues périodes (voir encadré 1).

Envisager le pire des scénarios

L'étude a été suivie et soutenue par les offices fédéraux de l'énergie et de l'environnement. Pour ces offices fédéraux, des estimations des crues aussi fiables que possible sont indispensables. « En Suisse, la sécurité des ouvrages d'accumulation revêt une importance centrale. Ils doivent pouvoir résister à des crues extrêmement rares, jusqu'aux pires scénarios imaginables selon l'état actuel des connaissances scientifiques », déclare *Alexandre Pachoud*, expert en sécurité des ouvrages d'accumulation à l'Office fédéral de l'énergie.

Selon *Pachoud*, étant donné que les données hydrologiques historiques relatives aux ouvrages d'accumulation dans les Alpes sont généralement lacunaires, le projet EXCH revêt une grande importance dans la mesure où il permet d'évaluer des scénarios extrêmes jamais observés auparavant. L'expert de l'OFEN



Encadré 1 : Les lignes violettes indiquent les bassins versants du Rhin, du Rhône, du Tessin, du Doubs et de l'Inn. Chaque bassin versant se subdivise en sous-bassins versants. Les repères rouges indiquent les points de sortie pour les ouvrages d'accumulation de l'OFEN (cercles) et les stations de mesure de l'OFEV (triangles). Chacun de ces points de contrôle mesure le débit d'eau provenant du bassin versant correspondant : le plus grand bassin versant correspond au point de mesure de Bâle, avec 35 900 km². Cela représente environ sept huitièmes du territoire suisse et englobe également des régions d'Allemagne, d'Autriche et du Liechtenstein. Le plus petit bassin versant dans la plage de tailles considérée correspond au point de mesure de Weesen sur la Linth, avec 1061 km². Graphique : rapport final EXCH.

fait référence à un rapport technique récent de la Commission internationale des grands barrages (Paris). Il y est indiqué que l'objectif de la méthode utilisée dans EXCH est de « reproduire Mère Nature », afin de s'assurer qu'aucune situation, aussi improbable soit-

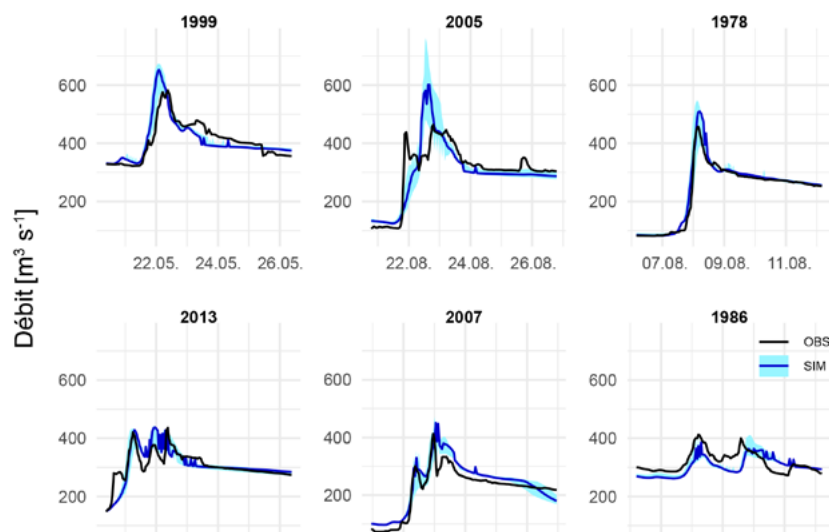
elle, ne soit négligée. Concrètement, cela signifie que les spécialistes en ingénierie hydraulique modélisent, sur la base des scénarios EXCH, le comportement des ouvrages d'accumulation et de leurs structures hydrauliques, afin de démontrer que ces instal-

lations peuvent évacuer les crues sans compromettre leur sécurité.

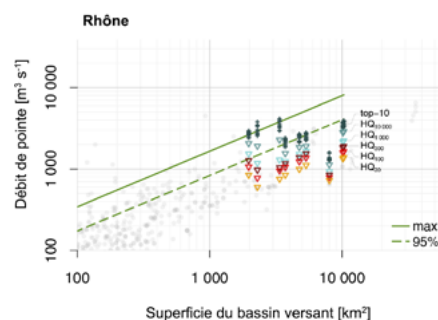
Du point de vue de l'Office fédéral de l'environnement, cette nouvelle étude présente également un intérêt pratique. Seule la connaissance des niveaux d'eau potentiels permet de construire des ouvrages de protection efficaces le long des cours d'eau afin de protéger les personnes, les animaux et les bâtiments, explique *Emmanuel Brocard*, hydrologue à l'OFEV. Les résultats de cette nouvelle étude peuvent être pris en compte aussi bien dans le travail des bureaux d'études que dans les activités des autorités. Elles constituent par exemple une base précieuse pour la révision périodique des cartes des risques d'inondation par les communes.

Changement climatique exclu

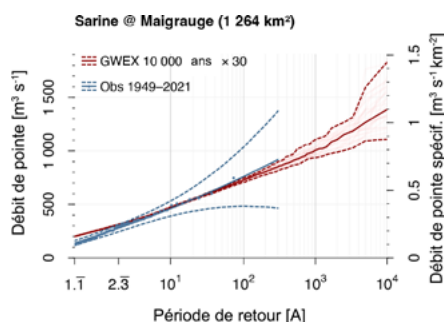
La nouvelle étude ne répond pas à une question importante qui se pose dans le contexte



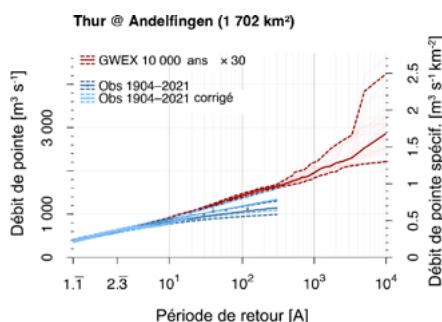
Séries chronologiques des débits de la Limmat (« courbes de débit ») lors des six plus grandes crues mesurées à Zurich. Les simulations effectuées dans le cadre du projet de recherche (lignes bleues, bandes bleues représentant l'incertitude) correspondent bien aux observations (lignes noires). Graphique : rapport final EXCH/révisé D. Viviroli.



Les débits d'un cours d'eau dépendent de la taille du bassin versant considéré, mais aussi de sa topographie et d'autres facteurs. Le graphique illustre les débits de pointe attendus à long terme dans des bassins versants de tailles variées du Rhône. Les événements suivants sont illustrés : le « Top 10 » correspond aux 10 plus grands débits simulés, tandis que HQ₃₀ à HQ_{10 000} représentent des crues issues des simulations, avec des périodes de retour de 30 à 10 000 ans. Pour situer les valeurs simulées du Rhône dans un contexte national, le graphique (points gris) présente les débits de pointe les plus élevés observés dans tous les bassins mesurés en Suisse, ainsi que l'enveloppe (lignes vertes) résumant les valeurs limites (max. : toutes les données ; 95% : 95% des données). Le graphique illustre que les simulations effectuées pour les bassins versants du Rhône s'accordent bien avec les observations nationales des crues. Graphique : rapport final EXCH/révisé D. Viviroli.



La « courbe de dépassement » montre les débits auxquels on peut s'attendre lors de crues rares et très rares, ici illustrée pour la Sarine à Maigrange, au sud de la ville de Fribourg. Dans cet exemple, la simulation sur 300 000 ans (rouge) correspond très bien aux observations des années 1949 à 2021 (bleu). Les valeurs simulées reposent sur l'ensemble de la chaîne de modélisation, comprenant le générateur météorologique, le modèle hydrologique et le routage hydrologique. Les simulations sur 300 000 ans sont réparties en 30 blocs de 10 000 ans chacun. Graphique : rapport final EXCH/révisé D. Viviroli.



Courbe de dépassement, présentée ici pour la Thur à Andelfingen (ZH). Contrairement à l'exemple de la Sarine (voir graphique 05), on observe ici un écart entre la simulation et les observations. Une des raisons est que les observations ne prennent en compte que le niveau d'eau de la rivière, et non l'eau qui, lors de certains événements de crue, est sortie de son lit. Après correction et ajout de l'eau « manquante » les valeurs observées se rapprochent des valeurs issues des simulations. Graphique : rapport final EXCH/révisé D. Viviroli.

Encadré 1 : Estimation des crues à partir des données pluviométriques issues du générateur météorologique aléatoire

Afin d'évaluer les crues futures, le projet EXCH utilise essentiellement les données relatives aux précipitations et aux températures. Les scientifiques procèdent méthodiquement en trois étapes :

Étape 1 : tout commence avec un générateur météorologique. Celui-ci s'appuie sur des données météorologiques réelles du passé (mesurées par plusieurs centaines de stations météorologiques sélectionnées en Suisse et dans les pays voisins) et génère à partir de celles-ci et à l'aide de méthodes statistiques, de façon aléatoire, de nouvelles données sur les précipitations et les températures pour l'ensemble de la Suisse. Dans le cadre du projet EXCH, des valeurs horaires de précipitations et de température ont ainsi été générées pour toutes les stations météorologiques sélectionnées, et ce pour une très longue période synthétique de 300 000 ans. Par synthétique, on entend ici que les données du générateur météorologique ne documentent pas les événements météorologiques des 300 000 dernières années et ne constituent pas non plus des prévisions pour les 300 000 prochaines années. Elles indiquent plutôt les quantités de précipitations auxquelles on peut s'attendre lors d'événements extrêmement rares, sur la base du climat actuel. Lors de tels événements extrêmes, les grandes quantités d'eau dans une rivière sont principalement dues à des précipitations exceptionnellement intenses. D'autres facteurs défavorables, tels que la fonte des neiges, peuvent influencer le débit, mais ils sont surtout significatifs en cas de crues relativement fréquentes.

Étape 2 : un modèle hydrologique éprouvé permet de convertir les valeurs de précipitations et de température générées par le générateur météorologique en volumes d'écoulement d'eau (en tenant compte, par exemple, de l'évaporation, de l'infiltration, de la fonte des neiges et d'autres facteurs). Cette conversion est réalisée pour 330 bassins versants partiels qui couvrent l'ensemble du territoire suisse. Le résultat indique les débits pouvant être atteints dans ces bassins versants partiels sur une période synthétique de 300 000 ans.

Étape 3 : les résultats des simulations hydrologiques dans tous les bassins versants partiels sont ensuite regroupés afin de déterminer le débit des grands cours d'eau. Il tient compte de la manière dont les débits varient en fonction d'autres facteurs, tels que les lacs qui retiennent l'eau ou les vallées et les rives temporairement inondées en cas de crue, réduisant ainsi les débits de pointe. Dans le cadre du projet EXCH, les débits ont ainsi été calculés pour 60 sites fluviaux dont les bassins versants sont de tailles différentes. Les données montrent par exemple la quantité d'eau qui s'écoule du lac des Quatre-Cantons près de Lucerne, avec une résolution horaire sur une période synthétique de 300 000 ans.

des inondations, à savoir si ces événements deviendront plus fréquents et plus dangereux avec le changement climatique. « Nous avons délibérément choisi de ne pas examiner cet aspect, car cela aurait dépassé le cadre de l'étude », explique *Daniel Viviroli*. Dans leur approche méthodologique, les scientifiques ont délibérément exclu le changement climatique : les données de température ont été ainsi corrigées et ajustées au niveau actuel, de sorte que les résultats ne contiennent pas de tendances à long terme et reflètent toujours les conditions présentes.

« Notre étude fournit une nouvelle base pour l'évaluation des risques, mais si nous voulons obtenir une vue d'ensemble pour le futur, l'influence du changement climatique doit également être prise en considération », explique *Viviroli*. L'ampleur de cette influence fait l'objet de recherches. Ainsi, au cours des dernières décennies, on a observé une augmentation significative des précipitations intenses due au changement climatique. Cependant, comme le souligne *Viviroli*, il est difficile de déterminer dans quelle mesure ces changements ont contribué ou contribueront à l'aggravation des

Encadré 2 : Crue centennale

Une « crue centennale » est une grande crue qui peut se produire chaque année avec une probabilité de 1 sur 100. Pour déterminer une crue centennale, les hydrologues se basent sur le débit d'eau (en mètres cubes par seconde) mesuré en un point de référence donné – et non sur la surface de la zone inondée ni sur l'ampleur des dégâts. Dans le projet EXCH, l'accent portait sur des événements de crue encore plus rares – et donc plus intenses – que les crues centennales, par exemple des crues tricennales, des crues millénaires ou encore des crues de période de retour de l'ordre de 10 000 ans.

inondations : « De nombreux facteurs influencent les crues. En fonction des conditions préalables et des caractéristiques du territoire, elles peuvent réagir de manière plus ou moins forte à l'augmentation des précipitations intenses. Les données disponibles sont encore trop limitées pour permettre une estimation précise des conséquences du changement climatique sur les événements de crue. »

Définition du niveau de protection

L'étude ne permet pas non plus de répondre à la question de savoir comment la population réagirait face à la situation de danger décrite ni quel niveau de protection elle souhaiterait atteindre. Il s'agit d'une décision sociale et ainsi d'une question qui doit être tranchée dans le cadre du débat politique. 🌱

Remarques

- Le rapport du projet « Extreme Floods in Switzerland – Hydrological scenarios for large catchments » est disponible sur : <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=58830>.
- *Amin Askarinejad* (amin.askarinejad@bfe.admin.ch), directeur du programme de recherche Sécurité des barrages, communique des informations sur ce projet.
- Vous trouverez plus d'articles spécialisés concernant les projets pilotes, de démonstration et les projets phares dans le domaine de l'énergie hydraulique sur www.bfe.admin.ch/ec-hydro.