

Caractériser l'évolution de l'enneigement dans les Vosges à partir de données satellitaires

Pierre MARCOU*

Le projet NEVE Vosges, mené par le laboratoire LOTERR de l'Université de Lorraine, étudie l'impact du déclin de l'enneigement sur les écoulements d'eau dans le massif des Vosges. Il combine des mesures traditionnelles, des observations satellitaires et des initiatives participatives pour pallier le manque de données fiables. Cette analyse, utilisant la télédétection et la participation citoyenne, vise à améliorer la gestion des ressources en eau face au changement climatique. Ce texte présente la méthode et les résultats de mon stage de recherche au sein de l'équipe Eaux & Milieux du LOTERR (Marcou, 2024).

Conséquences du changement climatique dans les Vosges

Depuis plusieurs années, l'est de la France fait face à des sécheresses récurrentes, tant météorologiques qu'hydrologiques. L'épisode de 2022 a particulièrement touché le bassin Rhin-Meuse, avec des conséquences notables en juillet et août. Les communes ont dû prendre des mesures pour faire face aux difficultés d'approvisionnement en eau. Les cours d'eau du Massif des Vosges ont été gravement affectés, soulignant la vulnérabilité de cette région.

Les Hautes-Vosges ont vu leurs débits d'étiage diminuer significativement ces dernières années. Les causes incluent des facteurs naturels (changement des précipitations, augmentation de l'évapotranspiration) et anthropiques (prélèvements). Le changement climatique est un facteur majeur, augmentant les températures et réduisant la durée et l'épaisseur du manteau neigeux. La réduction de l'enneigement modifie le cycle de l'eau, car la neige s'accumule et fond progressive-

ment, contrairement aux précipitations liquides qui alimentent immédiatement les cours d'eau.

Les études dans les Alpes montrent que l'enneigement influence la recharge des aquifères, particulièrement dans les zones karstiques, mais ce processus reste complexe et peu compris. Dans les Vosges, le lien entre enneigement et eau souterraine n'a pas encore été exploré en détail. Le changement climatique, en modifiant l'enneigement, pourrait avoir des impacts significatifs sur la ressource en eau de la région.

Mesures de terrain et participation citoyenne

Météo-France constitue une des principales sources de données d'observation pour étudier les phénomènes climatiques et météorologiques en France. Grâce à son réseau dense couvrant l'ensemble du territoire national, il est possible de surveiller à long terme l'évolution de divers paramètres, tels que la température et la pluviométrie, parfois l'enneigement. Cependant, ce réseau de

* Pierre MARCOU, étudiant en M2 REGA, Université de Lorraine.

stations présente plusieurs limites, notamment en raison de la faible disponibilité spatiale et temporelle de ces données. La faible densité du réseau d'observation nivométrique ne permet pas d'estimer précisément l'enneigement à l'échelle du massif.

Un projet de sciences participatives¹ a ainsi été initié afin de densifier les observations de la neige dans le massif. Ce projet repose sur la collaboration entre Niv'OSE² et des observateurs bénévoles formés par l'association pour garantir la fiabilité des relevés. L'association Niv'OSE a mené des campagnes de mesures de terrain durant les saisons hivernales 2023-2024 et 2024-2025, en collaboration avec le LOTERR, pour suivre l'évolution de l'enneigement dans le massif des Vosges. Les observations de Niv'OSE, initialement lancées par P.-M. David au chalet universitaire Le Chitelet, consistent à mesurer l'épaisseur du manteau neigeux, les températures par couches, la résistance à l'enfoncement, les types et dimensions des grains, ainsi que la dureté et l'humidité de la neige (Fig. 1). Ces données, archivées par l'association, constituent une chronique précieuse de l'enneigement sur le versant lorrain.



Figure 1 : Sondage nivométrique du 25 avril 2024. Source : Niv'OSE

Suivi de l'enneigement à partir des données satellitaires

Pour estimer l'équivalent en eau du manteau neigeux (SWE) dans une zone, il est essentiel de connaître la surface enneigée, l'épaisseur et la masse volumique de la neige. La télédétection satellitaire, utilisant une large gamme du spectre électromagnétique, permet de caractériser ces surfaces. L'indice NDSI (Normalized Difference Snow Index), basé sur les longueurs d'onde verte (510 – 560 nm) et proche infrarouge (0,7 - 1,6 μm), est

couramment utilisé pour suivre l'évolution de la surface enneigée et la durée de l'enneigement.

Cependant, dans les Vosges, l'utilisation des produits satellitaires est limitée par la présence fréquente de nuages. Entre 2002 et 2024, environ 50% des produits MODIS (NDSI) avaient plus de 50% de pixels nuageux. Pour pallier ce problème, une méthode inspirée des travaux de Da Ronco *et al.* (2014) a été appliquée, d'abord au bassin versant de la Moselle à Fresse-sur-Moselle (71 km²), puis à l'ensemble du Massif des Vosges.

Cette méthode en cinq étapes utilise la haute résolution temporelle des satellites MODIS pour éliminer et réattribuer des valeurs aux pixels obscurcis par les nuages. L'algorithme, développé en langage R, commence par fusionner les images journalières Terra (MOD) et Aqua (MYD), permettant de remplacer les pixels nuageux par des valeurs d'autres images du même jour. Ensuite, pour chaque jour étudié, l'algorithme réanalyse les images des pixels nuageux en recherchant leurs valeurs sur une fenêtre temporelle de deux jours avant et après.

La troisième étape intègre l'altitude et l'orientation des pixels pour distinguer la neige du sol. Une « ligne de neige régionale » (μs) est définie pour attribuer des valeurs de neige ou de sol en fonction de l'altitude et de l'orientation, en traitant uniquement les images avec un minimum de 5% de pixels enneigés et un maximum de 50% de pixels nuageux. Un modèle numérique de terrain (MNT) des Vosges, créé à partir des données de l'IGN, détermine l'altitude et l'orientation de chaque pixel. Les orientations sont classées en nord (N), sud (S), est (E) et ouest (W). Les valeurs d'altitude minimale et maximale de chaque pixel sont calculées et fusionnées dans un fichier CSV joint à une couche Shapefile.

La quatrième étape consiste à remplacer les pixels de neige par des valeurs comprises entre 0 et 100, en recherchant les valeurs dans les six jours précédents. Si aucune valeur n'est trouvée, le pixel reste inchangé. La cinquième étape, simplifiée par rapport aux travaux initiaux, divise l'année en deux périodes : hivernale (01-10 au 15-05) et estivale (16-05 au 30-09). En été, les pixels nuageux et enneigés sont reclassés en pixels de terre, tandis qu'en hiver, les pixels nuageux sont marqués comme « Non Acquis ».

Après traitement, la surface du manteau neigeux est déterminée quotidiennement en convertissant la valeur NDSI de chaque pixel en Snow Fraction Cover (SFC) via l'équation : $\text{SFC} = -0.001 + 1.45 * (\text{NDSI}/100)$. Connaissant la surface des pixels MODIS (410*360 soit environ 15 ha), il est possible d'estimer la surface journalière du manteau neigeux.

¹ <https://factuel.univ-lorraine.fr/node/26395>

² <https://nivose-vosges.org>

Premiers résultats

L'algorithme visant à supprimer les pixels de nuages dans les images MODIS a montré des résultats prometteurs. Une analyse de plus de 8 000 images journalières de 2002 à 2024 révèle une réduction des images avec au moins 50% de pixels de nuages, passant de 53% à 6%. En moyenne, le nombre de pixels de nuages a diminué de 49%, avec une médiane de 46%. En hiver (octobre à mai), le nombre de pixels enneigés a augmenté de 12% en moyenne. Par exemple, durant l'hiver 2005-2006, le nombre de pixels de neige a augmenté de 28% (Fig. 2).

La couverture neigeuse la plus importante se situe entre décembre et février, avec des surfaces enneigées variant entre 1 200 et 3 600 ha (20 à 50% du bassin versant de la Moselle à Fresse-sur-Moselle, Fig. 3). En comparant les périodes 2002-2013 et 2013-2024, on observe une diminution des surfaces enneigées, les valeurs médianes maximales passant de 5 000 ha (70% du bassin versant) à environ 3 500 ha (49%) (Fig. 4).

La durée d'enneigement a également diminué, passant de 186 jours par hiver avant 2006 à 176 jours après. Les tests statistiques de Mann-Kendall et de Pettitt confirment cette tendance, avec un point de bascule entre les hivers 2005-2006 et 2006-2007.

L'analyse de la répartition des jours d'enneigement montre une augmentation des jours avec des surfaces enneigées inférieures à 25% après 2006, et une diminu-

tion des jours avec des surfaces enneigées supérieures à 50%. Ces résultats corroborent les études antérieures de Marty (2008), Klein *et al.* (2016), et Fettweis *et al.* (2023), qui soulignent une réduction significative de la durée et de l'épaisseur de l'enneigement en raison du changement climatique.

Critiques et perspectives

L'utilisation des données satellitaires pour le suivi de l'évolution de l'enneigement présente plusieurs défis. Les produits neige basés sur l'indice NDSI montrent des biais significatifs. Un des principaux problèmes est la confusion entre les surfaces enneigées et les nuages de haute altitude constitués de cristaux de glace. Ces nuages réfléchissent les rayons du soleil dans les longueurs d'onde du spectre visible et proche infrarouge de manière similaire aux surfaces enneigées, ce qui peut entraîner une surestimation de la surface enneigée.

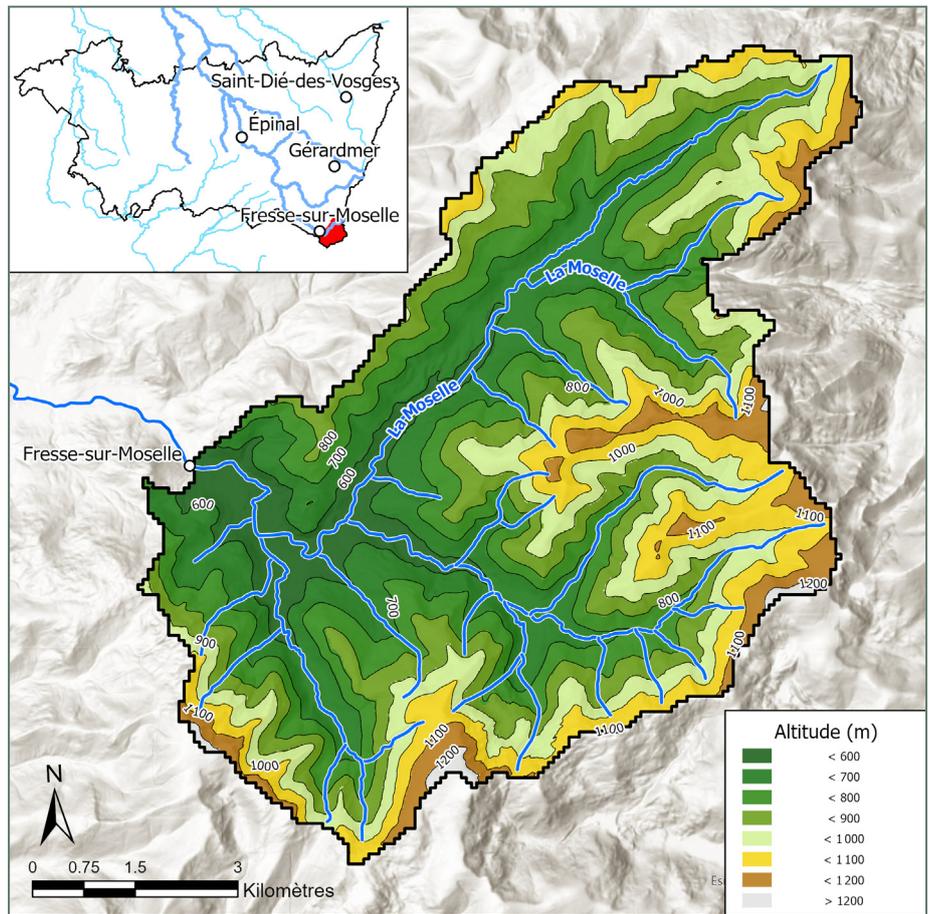


Figure 3 : Localisation et orohydrographie du bassin versant de la Moselle à Fresse-sur-Moselle

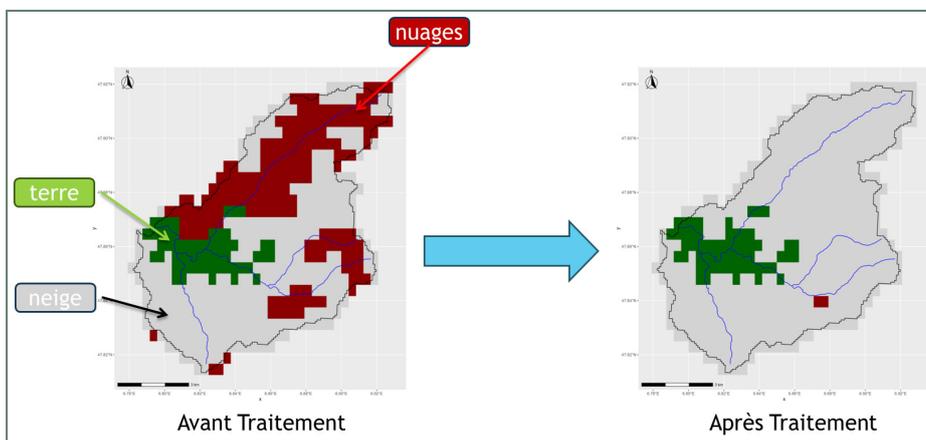


Figure 2 : Exemple d'évolution des images avant et après le traitement (8 janvier 2006)

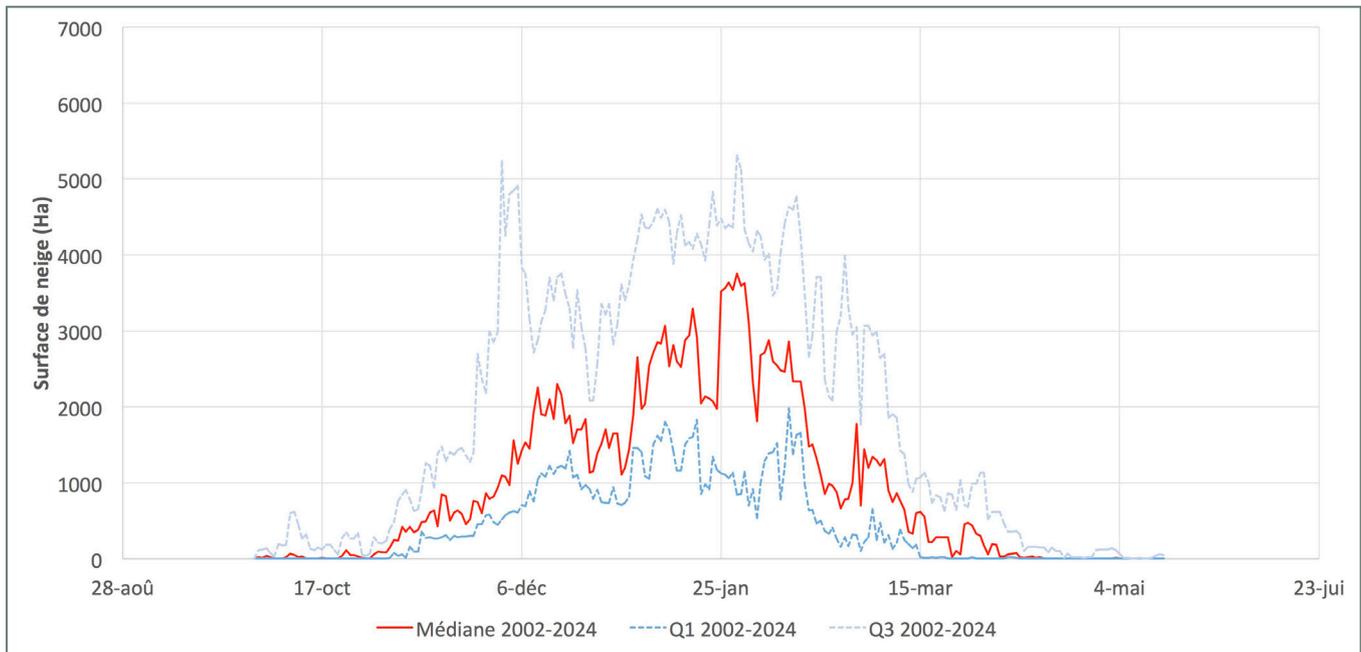


Figure 4 : Surface médiane de neige sur le bassin versant de la Moselle à Fresse-sur-Moselle sur la période 2022-2024

Pour pallier ce problème, il est recommandé d'utiliser des données d'observation au sol telles que la température, la pluviométrie et des observations directes de la neige ou de l'épaisseur du manteau neigeux.

Pour déterminer l'évolution de la ressource en eau sous forme de neige tout au long de l'hiver, il est essentiel de disposer de paramètres tels que la surface enneigée, l'épaisseur et la masse volumique du manteau neigeux. Si des mesures d'épaisseur sont disponibles, la densité est rarement consignée, rendant le calcul de l'équivalent en eau (SWE) hasardeux.

L'estimation de ce dernier peut être réalisée de différentes manières. Ainsi le modèle Δ SNOW, basé sur une approche multicouche semi-empirique, utilise les hauteurs de neige et simule le SWE à l'échelle locale sans nécessiter de forçage météorologique.

Pour améliorer la précision des estimations de la ressource en eau disponible sous forme de neige, il est nécessaire de développer des modèles plus sophistiqués et d'augmenter la densité des observations au sol. La combinaison des données satellitaires avec des relevés de terrain issues des campagnes d'observation participatives contribue à cet objectif.

Le développement des projets de sciences participatives pourrait également jouer un rôle clé en impliquant davantage de citoyens dans la collecte de données. Cette approche participative favorise non seulement une meilleure compréhension des phénomènes locaux, mais aussi une sensibilisation accrue des populations aux enjeux du changement climatique et de la gestion de l'eau.

En outre, l'utilisation de nouvelles technologies, telles que les drones et les capteurs de nouvelle génération,

offre des perspectives prometteuses pour affiner la surveillance de l'enneigement et de la ressource en eau. Ces outils permettent des mesures plus précises et une couverture spatiale et temporelle plus étendue, complétant ainsi les données obtenues par télédétection et les observations traditionnelles. En conclusion, face aux défis posés par le changement climatique, il est impératif de renforcer les capacités de surveillance et de modélisation de l'enneigement.

Bibliographie

- DA RONCO, P., & DE MICHELE, C. (2014). Cloud obstruction and snow cover in Alpine areas from MODIS products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(11), 4579–4600. <https://doi.org/10.5194/hess-18-4579-2014>
- FETTWEIS, X., AMBROISE, B., DAVID, P.-M., GHILAIN, N., PAUL, P., & WUEST, C. (2023). Current evolution (1960-2021) of the snow cover in the French Vosges massif with the help of the regional climate MAR model. *Bulletin de La Société Géographique de Liège*, 19–41. <https://doi.org/10.25518/0770-7576.7049>
- KLEIN, G., VITASSE, Y., RIXEN, C., MARTY, C., & REBETZ, M. (2016). Shorter snow cover duration since 1970 in the Swiss Alps due to earlier snowmelt more than to later snow onset. *Climatic Change*, 139(3–4), 637–649. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1806-y>
- MARTY, C. (2008). Regime shift of snow days in Switzerland. *Geophysical Research Letters*, 35(12). <https://doi.org/10.1029/2008GL033998>