



**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**

FACULTÉ DES SCIENCES
DE LA SOCIÉTÉ

Certificat Complémentaire en Géomatique

Suivi chronologique du niveau des lacs par télédétection satellitaire grâce à la plateforme Google Earth Engine : Le cas du Lac des Brenets (NE)

Mémoire présenté par Angélique Falatakis

Sous la supervision du Dr. Gregory Giuliani

Session de Juin 2024



Table des matières

Introduction	3
Etat de la recherche	4
Situation du Lac des Brenets	5
Méthodologie	6
Données satellitaires.....	11
Codes	12
Script Landsat 7 :	12
Script Sentinel-2	18
Script de comparaison.....	18
Légende	20
Résultats et discussion	20
Implications pour la commune.....	25
Limites de l'étude	25
Conclusion	26
Synthèse	26
Perspectives	26
Images.....	28
GIF.....	28
Water Mask	28
Bibliographie.....	30

Tables des illustrations

Figure 1 Situation du lac et parcours du Doubs qui alimente le Lac des Brenets.....	5
Figure 2 Formation du Lac des Brenets.....	6
Figure 3 Polygone de la zone d'étude	8
Figure 4 Exemple du nombre d'images pour l'été 2000, L7	13
Figure 5 Couche RGB de la zone d'intérêt.....	13
Figure 6 Water mask MNDWI vs NDWI.....	14
Figure 7 Chart de l'indice MNDWI pour l'été 2000	15
Figure 8 Série temporelle du MNDWI sur L7 de 2000 à 2023	15
Figure 9 Surface en eau sur le lac à la date de l'image la moins nuageuse (2000-06-09)	16
Figure 10 Comparaison des surfaces d'eau de 2021 et 2022	16
Figure 11 Comparaison entre pixels aux abords/au centre.....	17
Figure 12 Chart pluriannuel du MNDWI, restreint sur les mois d'été - Landsat 7.....	18
Figure 13 Comparaison des images de l'été 2021 et de l'été 2022 en composition colorée 'fausses couleurs'	19
Figure 14 Comparaison des images été 2021/été 2022 avec l'indice NDWI	19
Figure 15 Légende de l'interface.....	20
Figure 16 Graphique de l'évolution du débit du Doubs et niveau d'eau - 2022/2024	21
Figure 17 Tableaux des débits mensuels - 2021/2022	22
Figure 18 Image satellitaire du 25 septembre 2018 - vraies couleurs.....	23
Figure 19 Relevés des moyennes de débit journalier du Doubs pour l'année 2018	23
Figure 20 Graphique du MNDWI de l'été 2018, détail de la valeur pour le 25 septembre	24
Figure 21 Relevés de pluviométrie de la station de Noiraigue pour l'année 2018.....	24

Introduction

Situé à la frontière entre la France et la Suisse dans le canton de Neuchâtel, le Lac des Brenets est un site naturel riche en biodiversité. Son attrait pour la région est important car il a un rôle touristique tout comme économique pour l'approvisionnement en eau qui en font un élément essentiel du tissu social. Cependant, la récente augmentation des températures et les canicules à répétition de ces dernières années ont engendré des sécheresses importantes, mettant en lumière la fragilité de l'écosystème environnant et l'urgence d'une surveillance continue.

Sa superficie, d'environ 80ha, varie car son niveau baisse fortement lors des grandes périodes de canicule, la stabilité de l'écosystème et de l'activité économique qui en dépend en est ainsi fortement impactée. En effet, le Lac des Brenets est une destination prisée par les visiteurs adeptes de paysages naturels préservés, d'activités nautiques ou de randonnées autour du lac, qui contribuent significativement à l'économie. Toutefois, une fluctuation excessive du niveau du lac peut avoir des répercussions sur ces activités et sur les entreprises locales. À titre d'exemple, la navigation a été restreinte puis supprimée en 2018, 2020, 2022 et 2023 à cause du niveau de l'eau. En cause : les failles géologiques karstiques dans le fond du lac qui laissent infiltrer l'eau ; un dépôt important de sédiments venant du Doubs mais encore, et surtout, des précipitations trop faibles et une sécheresse récurrente.

Dans une région peu habituée aux changements climatiques extrêmes d'une année à l'autre, les infrastructures d'approvisionnement, de déplacement ou de production sont parfois peu adaptées, et des solutions doivent être élaborées plus ou moins rapidement afin d'éviter des déséquilibres trop importants et des effets négatifs sur la région. Les méthodes habituelles de suivi étant limitées par leur coût et leur portée géographique, l'utilisation de la télédétection par satellite offre une alternative intéressante.

Dans ce contexte, ce travail aura pour objectif de développer un système de surveillance efficace et un suivi du niveau de l'eau en utilisant des outils d'analyse géospatiale. Les années où l'absence de précipitation excède un seuil minimal seront ici déterminées et analysées à l'aide de la télédétection satellitaire, par la création et l'utilisation d'un script en langage Javascript.

Pour ce faire, nous ferons appel à la télédétection et aux outils développés pour l'observation de la Terre tels que la plateforme Google Earth Engine, qui est un outil de traitement en ligne, délivrant un catalogue d'images satellitaires et une vaste gamme de données pour des analyses à l'échelle planétaire. Les images vont jusqu'à une résolution de 10m par pixel pour le satellite Sentinel 2 du programme européen Copernicus, et 30m pour le programme Landsat 7. En combinant ces données avec des indices d'imagerie satellitaire et de télédétection, nous pourrons créer un filtre sur le Lac des Brenets, qui permettra un suivi précis du niveau d'eau, offrant des informations cruciales à fournir aux autorités locales pour la gestion durable de l'écosystème, l'anticipation et la création de solutions adaptées. À défaut de pouvoir augmenter les précipitations, une solution technique peut être mise en place par les autorités pour anticiper l'arrêt de la navigation, comme le colmatage des failles ou le retrait des dépôts sédimentaires.

La préservation du Lac des Brenets nécessite donc une approche multifactorielle, alliant surveillance environnementale, données scientifiques et actions concrètes de préservation. Grâce à la plateforme de Google Earth Engine et à un script adapté, nous serons en mesure de contribuer à la protection de ce patrimoine naturel, assurant ainsi sa sauvegarde.

Etat de la recherche

Il existe de nombreuses recherches antérieures sur le suivi des niveaux d'eau à l'aide de la télédétection, en particulier avec les données Sentinel-2 et Landsat. J'en mentionnerai ici quelques unes utilisant les indices NDWI (Normalized Difference Water Index) et le MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index), en les résumant et en rapprochant leur pertinence par rapport à cette étude.

La principale étude, de laquelle est tiré ce projet de recherche sur le Lac des Brenets, est l'article publié en 2015, « Water Observations from space : mapping surface water from 25 years of Landsat imagery across Australia », de N. Mueller et al¹, dans la revue *Remote Sensing of Environment*. Il s'agit ici d'un programme de suivi des inondations et des variations du niveau de l'eau en Australie, suite à de graves inondations en 2011. Le gouvernement a en effet cherché à améliorer l'accès aux informations concernant les inondations ainsi qu'à la cartographie des surfaces d'eau sur tout le continent, grâce à un algorithme de détection de l'eau, basé sur une classification *Decision tree* et sur les archives de l'imagerie satellitaire du programme Landsat. Le résultat est un produit qui fournit une vision du comportement des eaux de surface sur le continent à travers le temps.

Une seconde étude intéressante a été publiée dans *Geocarto International*² et évalue l'utilisation du NDWI et MNDWI pour la détermination des surfaces d'eau en intégrant un modèle d'élévation digitale (DEM). Il y est souligné que l'indice NDWI mélange les surfaces d'eau et la végétation et qu'il en résulte parfois des valeurs négatives, alors que la précision de l'indice MNDWI atteint 96.9% des surfaces d'eau extraites. L'étude suggère donc que l'indice MNDWI, combiné à un DEM peut être utilisé avec plus d'exactitude pour distinguer les surfaces d'eau des zones de végétations et de bâti. Cette distinction nous intéresse car notre zone d'étude est entourée de forêts.

Un autre article intéressant et utilisant cette fois-ci la plateforme Google Earth Engine, est un article publié en 2022 dans la revue *Frontiers in Marine Science* : « Automatic mapping and monitoring of marine water quality parameters in Hong Kong using Sentinel-2 image time-series and Google Earth Engine cloud computing » par Kwong, I. et al³. L'étude utilise ici la capacité de requête et les images pré-traitées de Sentinel-2 pour vérifier leur acuité par rapport aux mesures sur site, ainsi que la visualisation des résultats en utilisant des cartes, des graphiques de séries temporelles et une application dans l'interface de la plateforme. L'avantage de cette application est qu'elle permet aux utilisateurs novices d'explorer et d'analyser les tendances du niveau de l'eau. C'est ce que nous allons tenter de recréer également ici.

Ensuite, un article publié dans le *Journal of Hydroinformatics* en 2023, « Quality monitoring of inland water bodies using Google Earth Engine », par Sherjah J. et al. traite d'un algorithme utilisant la *Bottom of Atmosphere Reflectance* sur les bandes B3 et B4 grâce à l'indice de Trophic State Index (TSI). La capacité de la plateforme à détecter les changements de l'eau rapidement est démontrée en exposant les variations temporelles et spatiales sur un lac indien de 2016 à 2021⁴.

¹ Mueller, N. et al. "Water observations from space: Mapping surface water from 25 years of Landsat imagery across Australia." *Remote Sensing of Environment*, 174, 341–352

² <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10106049.2014.965757>

³ <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2022.871470/full>

⁴ <https://iwaponline.com/jh/article/25/2/432/92983/Quality-monitoring-of-inland-water-bodies-using>

Enfin, un récent article de 2023 publié dans la revue *Environment sciences proceedings* développe une application pour cartographier les eaux intérieures en Turquie en utilisant le nouvel indice du Multi-Band Water Index (MBWI) sur Sentinel-2. Les résultats ont démontré que la plateforme est très performante pour manipuler de très grandes quantités de données satellitaires en même temps et peut extraire les surfaces en eau de manière très précise à l'échelle nationale. Cette étude montre que la plateforme et les résultats sont tout à fait appropriés et performants pour des applications dans des cadres administratifs qui requièrent des informations à jour et en temps réel, pouvant être utilisées pour des analyses spatiotemporelles. C'est précisément ce qui nous intéresse également dans notre étude⁵.

Situation du Lac des Brenets

Le Lac des Brenets est à cheval entre la Suisse et la France et est alimenté par la rivière du Doubs, qui parcourt les régions de Pontarlier, Les Brenets, La Chaux-de-Fonds, Montbéliard, puis effectue une boucle jusqu'à Besançon et Châlon-sur-Saône.

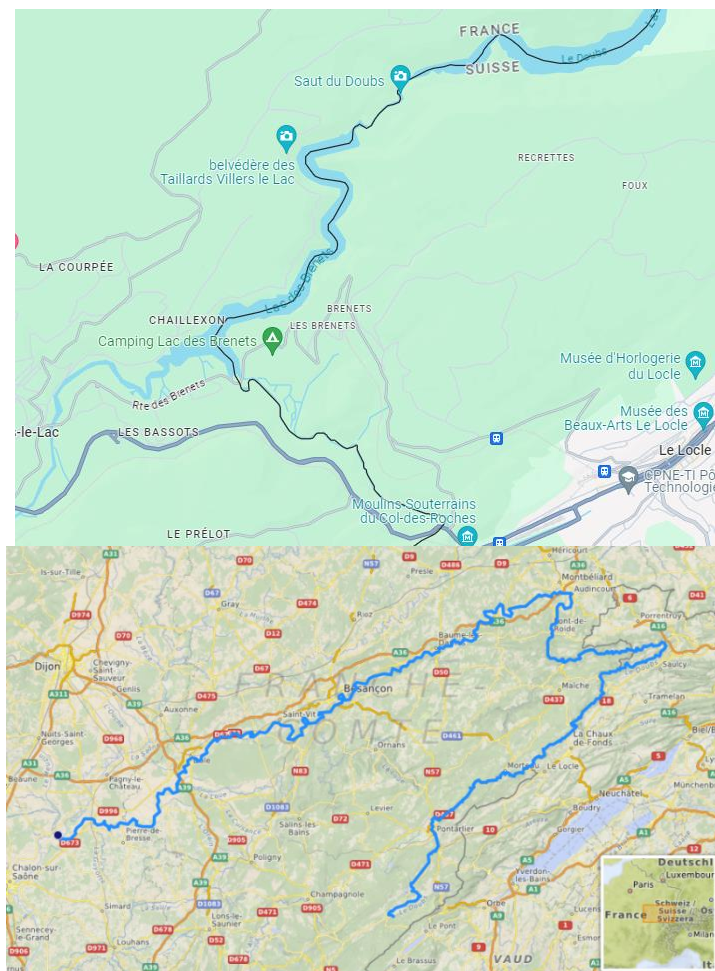


Figure 1 Situation du lac et parcours du Doubs qui alimente le Lac des Brenets⁶

Il a été formé par un éboulement d'une partie de la montagne il y a environ 15'000 ans. Cet affaissement a provoqué un barrage naturel où les limons et sédiments amenés par le cours d'eau en

⁵ <https://www.mdpi.com/2673-4931/25/1/52>

⁶ [https://fr.wikipedia.org/wiki/Doubs_\(rivi%C3%A8re\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Doubs_(rivi%C3%A8re))

amont, le Doubs, sont venus s'accumuler. Cet affaissement est probablement dû à un séisme ou à l'érosion du calcaire par l'eau de pluie : les roches du versant de la montagne se fragilisent et cela crée un glissement de terrain (Figure 2)⁷.

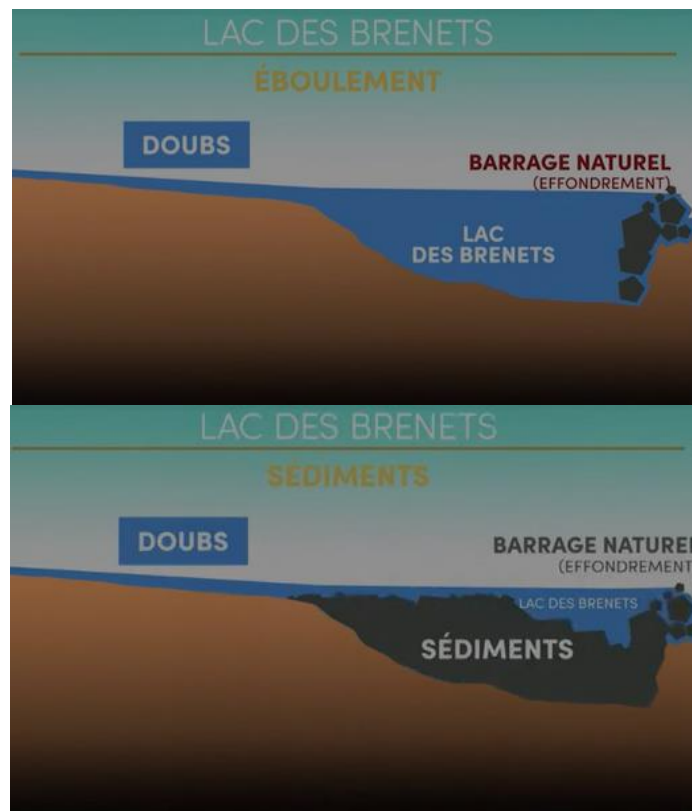


Figure 2 Formation du Lac des Brenets

Le lac mesurait 20 km de longueur lors de sa création mais les sédiments charriés par le cours d'eau ont laissé place à un lac résiduel qui est aujourd'hui six fois moins long et est malheureusement voué à disparaître d'ici 1000 ans si aucune mesure de préservation n'est prise.

Ainsi, lors de la sécheresse de 2018, ce lac avait déjà perdu 14m de profondeur. De plus, les fortes pluies soudaines de l'été, entre les périodes de chaleur, amènent de très grandes quantités de sédiments en un temps relativement court. Ceux-ci s'accumulent et n'ont pas le temps d'être transportés plus loin par le courant avant une prochaine phase importante d'évaporation due à la canicule. Sur le côté français du lac, une quarantaine de communes avaient dû être alimentées en eau par des camions citernes en 2018⁸.

Méthodologie

Pour étudier l'évolution du niveau de l'eau du Lac des Brenets sur une période donnée, nous allons faire appel à la télédétection satellitaire. Le principe de la télédétection repose sur l'acquisition d'informations et de données sur la surface terrestre à l'aide des satellites. Elle se base sur l'analyse de ces images, qui sont envoyées et reçues par ces satellites dans différentes longueurs d'ondes, correspondant aux divers spectres du visible, du panchromatique et de l'infrarouge. Ces images sont ensuite utilisées pour des études sur les changements climatiques, la cartographie, la couverture et

⁷ <https://www.rts.ch/info/regions/neuchatel/13101160-dans-1000-ans-le-lac-des-brenets-ne-sera-plus-quun-beau-souvenir.html>

⁸ <https://www.illustrer.ch/magazine/passe-doubs>

l'utilisation du sol, l'évaluation des dommages après un événement climatique, les températures terrestres, l'agriculture, la géologie, l'archéologie, la formation et l'éducation etc...

Il existe plusieurs logiciels et plateformes permettant le traitement de ces données et images en grande quantité en même temps. Pour analyser et traiter ces images, nous allons ici utiliser la plateforme en ligne Google Earth Engine. Il s'agit d'une plateforme lancée en 2010 et basée sur le cloud qui permet de visionner des images géospatiales avec un accès à un vaste éventail d'ensembles de données mondiales ou régionales, qui sont téléchargeables dans un catalogue de données mis à disposition par les différents programmes satellitaires de télédétection et d'observation de la Terre. Elle permet ainsi de cartographier des tendances, détecter des changements à grande et petite échelle, et de quantifier des différences sur la surface de la Terre. Elle utilise et propose des applications de programmation Python et Javascript pour effectuer des requêtes aux différents serveurs et fournisseurs de données et intègre une interface utilisateur simple pour visualiser des images ou des résultats graphiques.

Grâce aux fonctionnalités de Google Earth Engine, les graphiques créés peuvent au besoin être exportés sous forme de fichier Excel .csv, de fichier SVG (graphique vectoriel) ou d'image PNG afin d'être facilement exploitable par la suite selon les nécessités de chacun.

Sur cette plateforme, nous allons faire appel à différents indices et aux données satellitaires des programmes d'observation de la Terre de Sentinel-2 et de Landsat 7. Nous avons choisi ces deux satellites pour la disponibilité des données sur la période chronologique qui nous intéresse et pour leur résolution intéressante. Nous allons ici exposer les différentes bandes et longueurs d'ondes respectives de ces deux satellites afin de comparer et d'expliquer notre choix pour la détection des surfaces d'eau (Tableau 1 et Tableau 2).

Bandes	Résolution	Longueurs d'ondes Landsat 7
1	30m	441/514 Blue
2	30m	519/601 Green
3	30m	631/692 Red
4	30m	772/898 NIR
5	30m	1547/1749 SWIR 1
6	60m	10.31/12.36
7	30m	2064/2345 SWIR 2
8	15m	0.515/0.896

Tableau 1 Bandes, résolution des images et longueurs d'ondes - Landsat 7

Bandes	Résolution	Longueurs d'ondes Sentinel-2
1	60m	0.429-0.457 Aerosols
2	10m	0.451-0.539 Blue
3	10m	0.538-0.585 Green
4	10m	0.641-0.689 Red
5	20m	0.695-0.715 Red edge
6	20m	0.731-0.749 Red edge
7	20m	0.769-0.797 Red edge
8	10m	0.784-0.900 NIR
9	60m	0.935-0.955 Water Vapour
10	60m	1.365-1.385 SWIR Cirrus
11	20m	1.565-1.655 SWIR 1
12	20m	2.100-2.280 SWIR 2

Tableau 2 Bandes, résolution des images et longueurs d'ondes - Sentinel 2

Selon le tableau ci-dessous du pourcentage de réflectance dans chaque longueur d'onde, les longueurs d'ondes où se reflètent le plus les entités hydrographiques se situent entre 0.5 et 0.6 μm , dans le spectre du visible, plus précisément sur la bande verte (Tableau 3). Ce qui correspond pour nos deux satellites choisis, à la bande 2 de Landsat 7 et à la bande 3 de Sentinel-2.

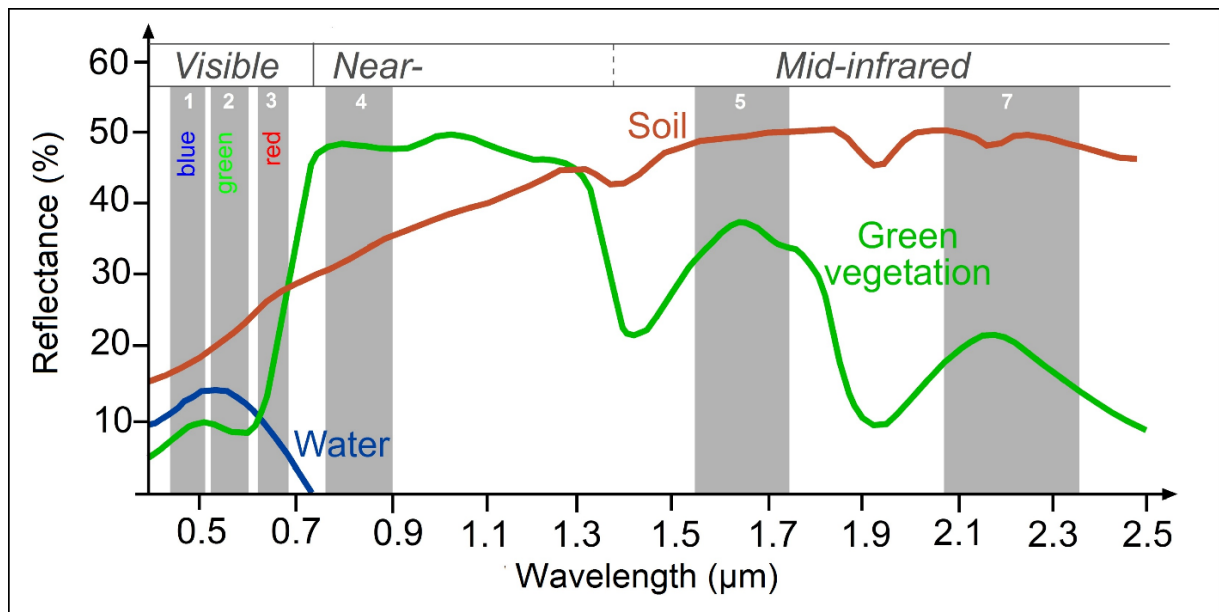


Tableau 3 Réflectance et longueurs d'ondes des différents types de surface terrestre

Nous allons maintenant détailler les étapes nécessaires à la création d'un script pour la surveillance du niveau de l'eau, afin de tenter de répondre à notre problématique énoncée. Tout d'abord, nous allons créer un polygone autour du Lac des Brenets afin de déterminer la zone d'étude (Figure 3). Cette étape est importante car elle permet de focaliser l'analyse sur une zone précise en excluant des régions non-pertinentes pour la recherche, tout en réduisant la puissance de calcul nécessaire pour notre étude. Ceci créera notre couche numéro un dans l'interface utilisateur.



Figure 3 Polygone de la zone d'étude

Ensuite, il nous faut définir une aire temporelle : afin d'avoir une période d'étude assez représentative, mais aussi de s'assurer d'une bonne qualité de données, nous allons nous intéresser aux vingt-trois dernières années. Pour ce faire, deux sources majeures de données satellitaires ont été privilégiées. Ainsi, le dataset de données de base comportera les images issues du satellite

Landsat 7 dès l'année 2000 jusqu'en 2016 et nous ferons ensuite appel au satellite Sentinel-2 qui a une résolution plus grande. Par son lancement le 23 juin 2015, le satellite Sentinel-2 ne couvre de ce fait pas toute la période de l'été, celle qui nous intéresse ici, et nous avons constaté également des soucis de géoréférencement pour les premières images prises après son lancement. Il a ainsi été décidé d'y faire appel qu'à partir de 2016. En revanche, il a une fréquence d'images plus rapide, avantageuse pour la surveillance de changements environnementaux.

Le choix de la période temporelle partant des années 2000 se justifie tout d'abord par une augmentation des données disponibles dès cette période, due aux différents lancements de satellites, et à la diffusion simplifiée, généralisée et moins coûteuse des informations. De même, la forte augmentation des températures et la récurrence accrue des vagues de chaleur dépassant les valeurs précédemment enregistrées est le pendant d'une accélération de la mondialisation, des échanges d'informations et commerciaux due à l'entrée dans le 21^{ème} siècle. C'est également le début des grands rapports sur le climat, alertant sur le réchauffement climatique, les changements environnementaux, les gaz à effet de serre, l'augmentation des événements climatiques extrêmes et la diminution des ressources en eau.

En ce qui concerne l'indice utilisé, nous allons ici travailler avec deux indices principaux. Il s'agit tout d'abord du NDWI (Normalized Difference Water Index), développé par McFeeters en 1996⁹ qui se calcule ainsi :

$$\text{NDWI} = (\text{Green} - \text{NIR}) / (\text{Green} + \text{NIR}).$$

Il combine la bande spectrale du vert visible, sensible à l'eau, et celle du proche infrarouge et permet de détecter des changements subtils du niveau ou de la teneur en eau des bassins. La bande verte intensifie la réflexion des surfaces d'eau, alors que la bande infrarouge augmente celle de la végétation terrestre et des surfaces au sol. Dans cet indice, les valeurs au-dessus de 0.5 résultant de l'équation correspondront aux surfaces d'eau, alors que les valeurs négatives ou jusqu'à 0.5 identifieront du sol¹⁰.

Valeurs indiquées	Interprétation
0.2 – 1	Surface de l'eau
0.0 – 0.2	Haute humidité
-0.3 – 0.0	Sécheresse modérée, surfaces non aqueuses
-1 – -0.03	Sécheresse, surfaces non-aqueuses

Pour les données Landsat 7, il s'agira de calculer en combinant la bande 2 à 0.52 µm et la bande 4 à 0.77 µm, et pour le satellite Sentinel-2, les bandes à utiliser seront la B3 à 560 nm et la B8 à 843 nm.

⁹ McFEETERS, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432.

¹⁰ [https://eos.com/fr/make-an-analysis/ndwi/#:~:text=NDWI%20\(indice%20d'eau%20par,propos%C3%A9%20par%20McFeeters%20en%201996.](https://eos.com/fr/make-an-analysis/ndwi/#:~:text=NDWI%20(indice%20d'eau%20par,propos%C3%A9%20par%20McFeeters%20en%201996.)

Nous utiliserons également l'indice modifié de l'eau par différence normalisée MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index), développé par H. Xu et al. en 2006¹¹, qui utilise la bande spectrale verte et la bande infrarouge à ondes courtes :

$$\text{MNDWI} = (\text{Green} - \text{SWIR}) / (\text{Green} + \text{SWIR})$$

Il privilégie l'utilisation de l'infrarouge à ondes courtes plutôt que le proche infrarouge pour améliorer la détection de l'eau et réduire les interférences entre les surfaces hydrographiques ouvertes et les zones bâties, souvent confondues ou corrélées à de la végétation ou du bâti dans d'autres indices, dans les environnements où les terres et l'eau sont proches, comme autour d'un lac¹².

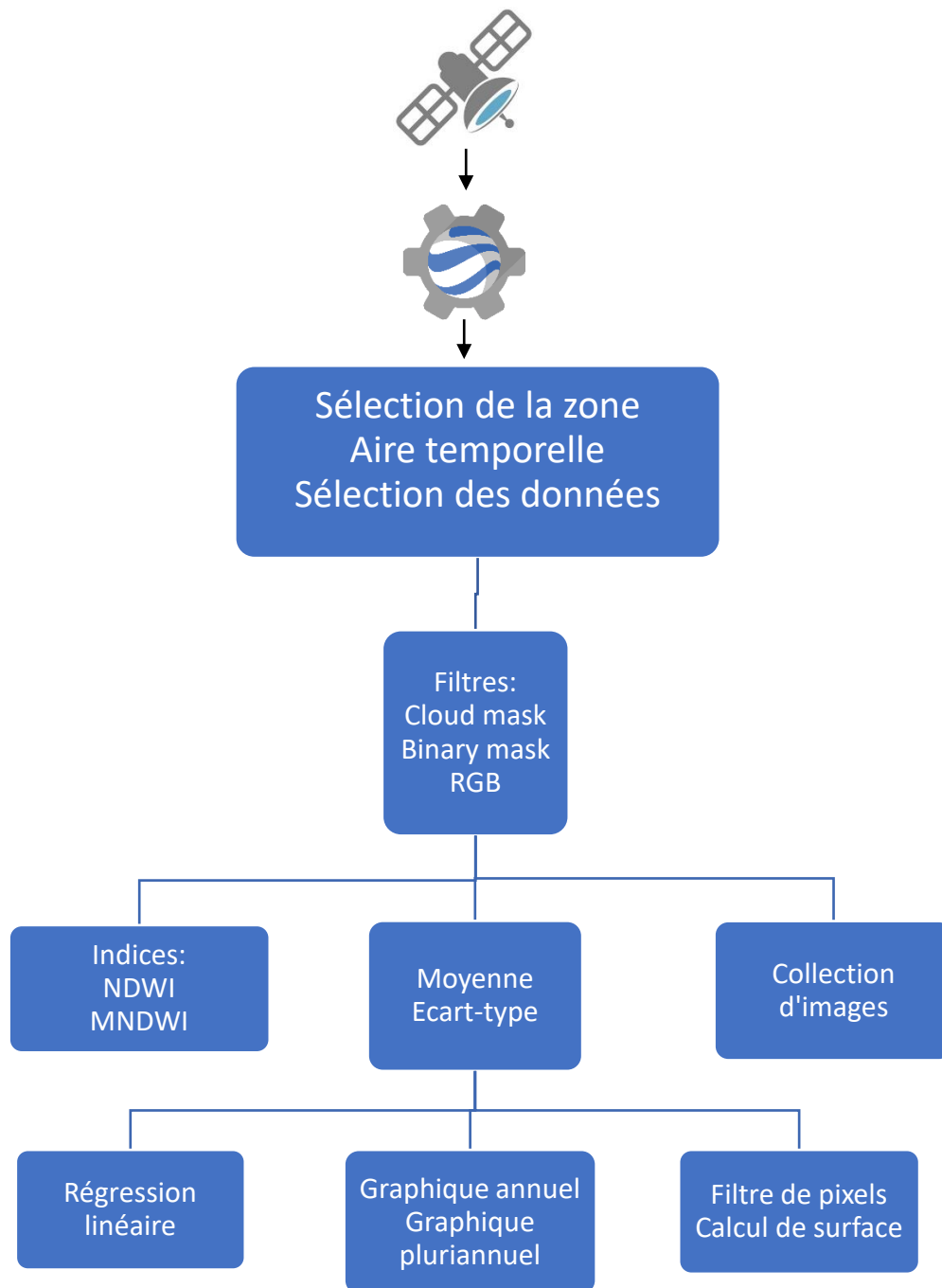
Pour cette étude, les indices seront appliqués sur la période de début juin à fin septembre. Ces dates ont été choisies pour correspondre à une période où la température journalière est assez importante et où les précipitations sont réduites, impliquant une évaporation conséquente et une sécheresse potentielle : après les Saints de glace, jusqu'à un retour des températures plus fraîches en octobre.

Cette approche détaillée assurera des résultats fiables et précis, indispensables pour déterminer l'évolution du niveau de l'eau et pour aider à prendre des décisions informées en matière de gestion environnementale et de conservation du tissu socio-économique de la région.

Ainsi, la démarche utilisée pour cette étude pourra s'illustrer selon le schéma suivant :

¹¹ Xu, H. "Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery." *International Journal of Remote Sensing*, 27, n° 14, 3025-3033

¹² <https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/latest/help/data/imagery/indices-gallery.htm>



Données satellitaires

Le programme Landsat est un programme d'observation de la Terre lancé en 1960 par la NASA. Landsat 7, le satellite que nous utiliserons ici, a été lancé en 1999 et offre donc une couverture temporelle importante malgré sa résolution de 30m, légèrement inférieure à celle de Sentinel-2. Le satellite a une orbite de 16 jours, nous aurons donc environ deux images par mois sur notre période de traitement.

Les données utilisées sont la collection d'images satellitaires de Landsat 7 de 2000 à 2016 « LANDSAT/LE07/C02/T1_TOA ». Cependant, les données présentent des défauts de projection et les images sont entravées de bandes sans informations. En effet, en 2003 le Scan Line Corrector est tombé en panne, les données ont donc des lacunes dans le balayage des images mais elles sont toutefois utilisables car elles maintiennent les corrections radiométriques et géométriques. L'USGS a en effet par la suite développé des produits de corrections qui utilisent les données récoltées par l'ETM+ dans plusieurs autres images pour fournir une couverture complète du sol¹³. Ainsi, des fichiers des *gap mask* pour ces bandes sans informations sont inclus dans chaque produit de Landsat 7 Level 1¹⁴. Les images du satellite Landsat 5 avaient été envisagées pour obtenir des valeurs pour les années avant 2000, mais le téléchargement de la collection d'images sur la plateforme ne fonctionnait pas avec le masque sur les pixels d'eau. De même, la collection de *Surface Reflectance* du satellite MODIS semblait intéressante, mais sa résolution de 500m la rendait peu pertinente sur une petite étendue d'eau. La collection utilisée est la Collection 2, Tier 1 Top of Atmosphere Reflectance. La collection 1 n'étant plus en service dès juillet 2024, la 2 a donc été privilégiée. Elle présente des améliorations sur les algorithmes de traitements, l'accès aux données et les possibilités de distribution spatiale¹⁵. La collection de *Surface Reflectance* a été testée mais les résultats ne sont pas probants et le filtre de nuage n'était pas efficace pour distinguer les nuages de la surface du lac¹⁶.

La deuxième collection de données utilisée dès 2016 est tirée du satellite Sentinel-2. Le programme Sentinel est développé conjointement entre l'Agence Spatiale Européenne et le programme Copernicus d'observation de la Terre de la Commission Européenne. Les données de ce satellite contiennent 13 bandes spectrales représentant la réflectance au sommet de l'atmosphère (*Top of Atmosphere, TOA*), à une échelle de 10000m. La collection utilisée est la « COPERNICUS/S2 »¹⁷ qui a une résolution de 10m sur les bandes qui nous intéressent et une orbite de cinq jours, ce qui nous donne une fréquence et une précision des informations très importante.

Enfin, nous tenterons de mettre les résultats des analyses géospatiales en lien avec les données hydrologiques des précipitations disponibles sur le site de l'Office Fédéral de l'Environnement (OFEV). Ceci afin de confirmer si le script est fonctionnel et si les informations qui en ressortent correspondent à la réalité et peuvent être utilisées auprès des autorités.

Codes

Script Landsat 7 :

Script L-7 : <https://code.earthengine.google.com/df4c9aa317ebc4c8ae27b0ee0797fc71>

La première étape consiste à créer une couche avec la définition de l'aire géographique et temporelle. Comme mentionné, nous avons défini un polygone rectangulaire autour du Lac des Brenets dans le canton de Neuchâtel, sans tenir compte des frontières politiques avec la France. Le script est ensuite paramétré pour zoomer sur la zone d'intérêt une fois celui-ci lancé. La période temporelle quant à elle s'étale sur les 23 dernières années, à partir de l'été de l'année 2000, ce qui nous laisse un intervalle de temps assez intéressant pour identifier des points critiques et tenter de répondre à la problématique. Les paramètres sont donc réglés pour prendre les images de l'été d'une année

¹³ <https://www.usgs.gov/faqs/what-landsat-7-etm-slc-data>

¹⁴ <https://www.usgs.gov/faqs/what-are-landsat-7-slc-gap-mask-files>

¹⁵ https://developers.google.com/earth-engine/landsat_c1_to_c2

¹⁶ <https://briques-de-geomatique.readthedocs.io/fr/latest/teledu-theorie-missions-donnees.html#niveau-l2-reflectances-de-surface>

¹⁷ https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2

donnée : '2000 - 06 - 01' / '2000 - 09 - 30'. Afin d'être sûr d'avoir assez d'images pour l'analyse, le script imprime dans la console le nombre d'images répertoriées pour la période et la zone d'intérêt (Figure 4).

```
Nombre d'images =                               JSON
14
```

Figure 4 Exemple du nombre d'images pour l'été 2000, L7

Il est ensuite nécessaire de faire appel à une collection d'images traitées pour les nuages. En effet, les images de la collection L-7/CO2/T1 ne sont donc pas traitées pour les nuages. Pour la collection d'images Landsat, une collection d'images traitées pour exclure les pixels de nuages existe sous le nom de CLOUD_COVER_LAND. Celle-ci possède en effet une bande de *Quality Assessment bits* qui indique quels pixels peuvent être affectés par une couverture nuageuse, ce qui implique que les pixels de cirrus et nuages ne seront pas considérés et importés.

Il faut ensuite créer une couche de visualisation de notre zone d'intérêt en vraies couleurs, afin de confirmer différentes informations sur l'image réelle, telles que la présence de nuage ou de végétation environnante (Figure 5). Pour le satellite Landsat 7, les bandes utilisées pour la composition colorée RGB sont la B3, la B2 et la B1.



Figure 5 Couche RGB de la zone d'intérêt

C'est à ce moment que l'on introduit l'indice MNDWI qui utilise la combinaison de bandes :

$$\text{MNDWI} : (\text{Green} - \text{SWIR}) / (\text{Green} + \text{SWIR})$$

Pour Landsat 7, les bandes correspondantes sont la B2 et la B5. Ainsi, le résultat de cet indice distingue plus précisément la zone d'eau que l'indice NDWI. Une comparaison avec l'indice NDWI a été faite afin de vérifier son efficacité (Figure 6).

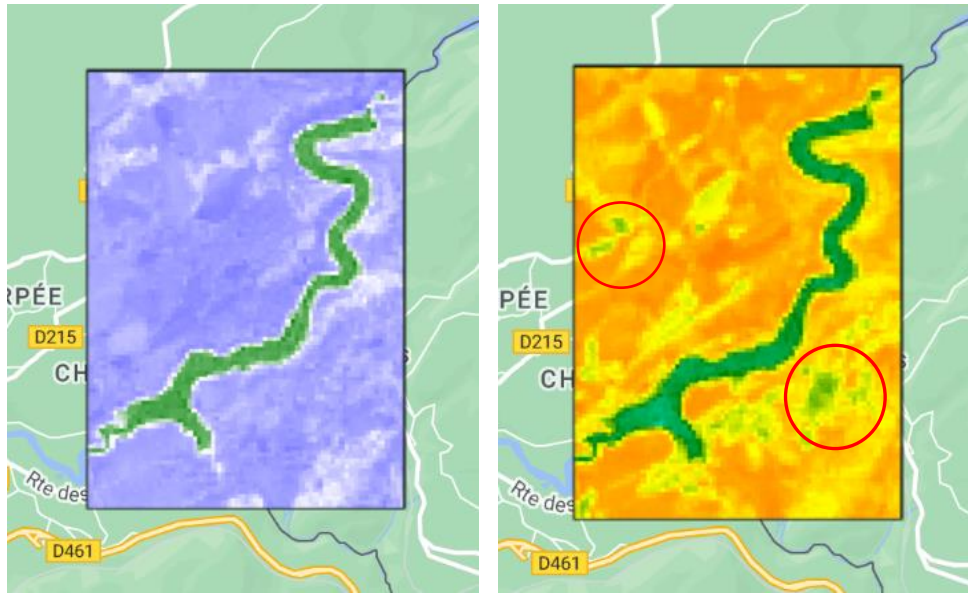


Figure 6 Water mask MNDWI vs NDWI

Il apparaît ici de manière nette que le NDWI a inclus des pixels de végétation et/ou nuages dans son analyse (entourés en rouge), qui n'apparaissent pas sur l'analyse du MNDWI. Comme indiqué dans la légende des valeurs du NDWI en bas à droite de la carte, le vert foncé représente des pixels « en eau ». Ceci confirme le meilleur ratio du MNDWI pour la distinction de surfaces hydrographiques.

Nous pouvons ensuite tenter de créer des graphiques avec ces données pour en évaluer la tendance générale. Avant de pouvoir établir ces graphiques, il faut procéder à un calcul de la moyenne du MNDWI ainsi qu'à l'écart-type entre les valeurs du résultat de l'indice. Le calcul de la moyenne pour un pixel donné nous donne une idée de la valeur moyenne de la présence d'eau sur une période considérée et aide à identifier une tendance générale de cette présence d'eau au fil du temps. L'écart-type, quant-à-lui, mesure la dispersion des valeurs du MNDWI autour de cette moyenne calculée. Un écart-type élevé peut indiquer une grande variabilité de présence d'eau sur un pixel pour une période donnée et aider à repérer des événements inhabituels ou significatifs.

Ensuite, il faut convertir les images obtenues en une collection d'images que le graphique pourra utiliser pour dessiner la tendance. En effet, la fonction de création d'une série temporelle *timeSeries* ne peut s'appliquer à des images individuelles et a besoin d'une collection d'images sur laquelle s'appliquer, sinon un message d'erreur récurrent s'affiche. Enfin, il est nécessaire de procéder à une régression linéaire afin d'ajuster une ligne passant par les données calculées par l'indice afin d'estimer la variabilité de la présence d'eau et d'en tirer une tendance : augmentation, diminution ou stabilité pour un pixel sur la période considérée. En effet, la régression linéaire est une méthode de modélisation de la relation entre une variable dépendante, celle que l'on essaie de déterminer, et une variable indépendante : en l'occurrence notre variable dépendante sera le niveau de l'eau et la variable indépendante sera le temps. Elle est essentielle dans un contexte d'analyse de séries temporelles.

Avec ces éléments, il est possible de créer une partie de script qui génère un chart de l'indice MNDWI pour une seule année (Figure 7).

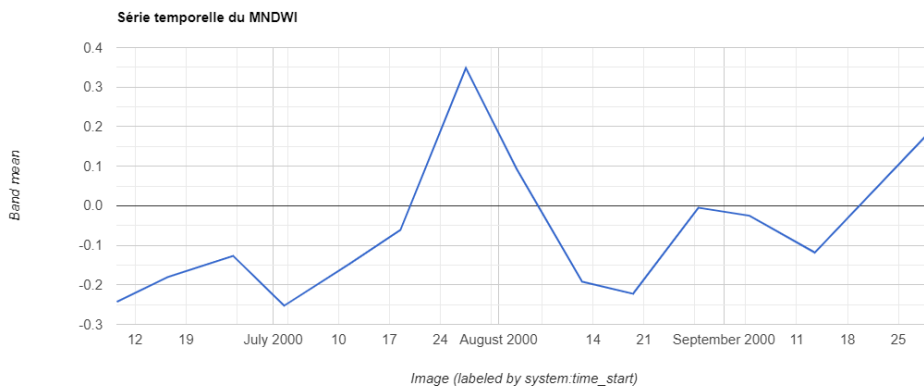


Figure 7 Chart de l'indice MNDWI pour l'été 2000

Nous pouvons ensuite procéder aux mêmes calculs mais sur une période étendue afin d'avoir une idée plus globale de la tendance de présence d'eau dans le Lac des Brenets. Pour ce faire, nous reprenons la même collection de données de Landsat 7, en modifiant uniquement les dates de début et fin d'acquisition : 2000-05-01 ; 2023-09-30.

Ainsi, nous obtenons un graphique avec les valeurs maximales et minimales pour le MNDWI sur les vingt-trois années considérées, que nous pourrons ensuite analyser et comparer par exemple avec les données pluviométriques de l'OFEV dans la région (Figure 8):

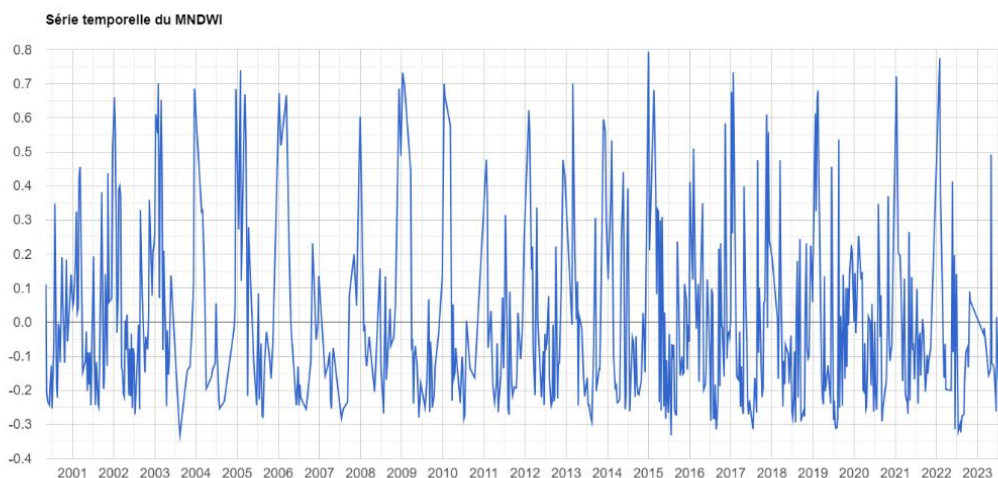


Figure 8 Série temporelle du MNDWI sur L7 de 2000 à 2023

Une fois que les pixels d'eau sont identifiés, nous pouvons procéder au calcul de la surface d'eau totale dans la zone d'intérêt. Cette surface d'eau nous sera utile pour quantifier les fluctuations de niveau de l'aire inondée et les comparer d'années en années. Il nous faut ici créer un masque en deux étapes dont l'objectif principal sera de garder uniquement les pixels d'eau où la valeur de l'indice MNDWI est supérieure ou égale à 0. Tout d'abord, nous créons un masque binaire sur les images créées en MNDWI. La fonction *.gte* (*greater than or equal to*) sera ici utilisée, en fixant le seuil à 0.0. Ce qui signifie que tous les pixels ayant une valeur égale ou supérieure à zéro seront considérés comme équivalents à 1 et correspondant à de l'eau. Cette couche est ajoutée en blanc sur la carte. Il aurait été possible de fixer le seuil légèrement plus haut que 0.0 afin d'exclure le bruit ou les

perturbations sur les images. Cependant, il apparaît essentiel de tester ici la pertinence de l'utilisation de l'indice MNDWI qui est censé précisément réduire ce bruit provoqué par la végétation ou les constructions.

Nous appliquons ensuite un masque pour afficher uniquement les pixels où la valeur est 1 et ignorer les valeurs à 0. Ce second masque est appliqué en bleu et apparaît en dernier dans la liste des couches. Cette méthode de création de masque en deux étapes est fréquemment utilisée pour isoler des spécificités dans une image raster.

Après avoir généré les masques, il est temps de procéder au calcul de la surface en eau. Nous commencerons par établir une image avec la superficie de chaque pixel individuellement grâce à la fonction `ee.Image.pixelArea`. Puis, nous ajoutons la bande des masques créés et nous divisons le tout par 1 million (10^6) pour obtenir la surface en kilomètres carrés, l'unité de base étant le mètre carré pour les données spatiales. Le calcul est ensuite appliqué uniquement à notre zone d'intérêt en appelant la fonction `.reduceRegion`.

Il faut ensuite créer une liste de groupes à partir de ce résultat, qui va agréger les valeurs de pixel équivalentes à 1 dans notre zone d'intérêt, puis extraire de cette liste le premier élément contenant la somme de la superficie des pixels d'eau, le transformer en nombre pour obtenir une valeur pour la surface totale d'eau en kilomètres carrés. Nous imprimons ensuite cette valeur dans la console de droite (Figure 9).

```
Surface d'eau (km2):           JSON
0.5833653727699721
```

Figure 9 Surface en eau sur le lac à la date de l'image la moins nuageuse (2000-06-09)

Ce calcul est essentiel afin de pouvoir concrètement quantifier la tendance et la perte en surface d'eau qui est non seulement visible en images, mais également en chiffres si nous faisons une comparaison entre deux années diamétralement opposées en termes de pluviométrie : 2021 et 2022 (Figure 10). Nous allons présenter plus bas dans les annexes quelques exemples de comparaison en incluant les différences de surface et les images de rendu produit par le filtre MNDWI.

```
Surface d'eau (km2):           JSON    Surface d'eau (km2):           JSON
0.5996228626875347            0.3577418601514941
```

Figure 10 Comparaison des surfaces d'eau de 2021 et 2022

Ici, nous avons choisi d'ajouter une fonction qui permet d'obtenir le graphique de ces valeurs en cliquant sur un pixel donné. Ainsi, il est possible d'obtenir un chart différent pour un pixel en bordure de lac et un pixel au centre du lac afin d'en déduire si le niveau de l'eau a fortement varié pendant ces années.

En effet, si les valeurs du pixel en bordure de lac sont plus fréquemment égales ou en-dessous de zéro en comparaison avec le pixel du centre, il est possible d'en conclure que l'année a été particulièrement sèche et les précipitations rares (Figure 11).

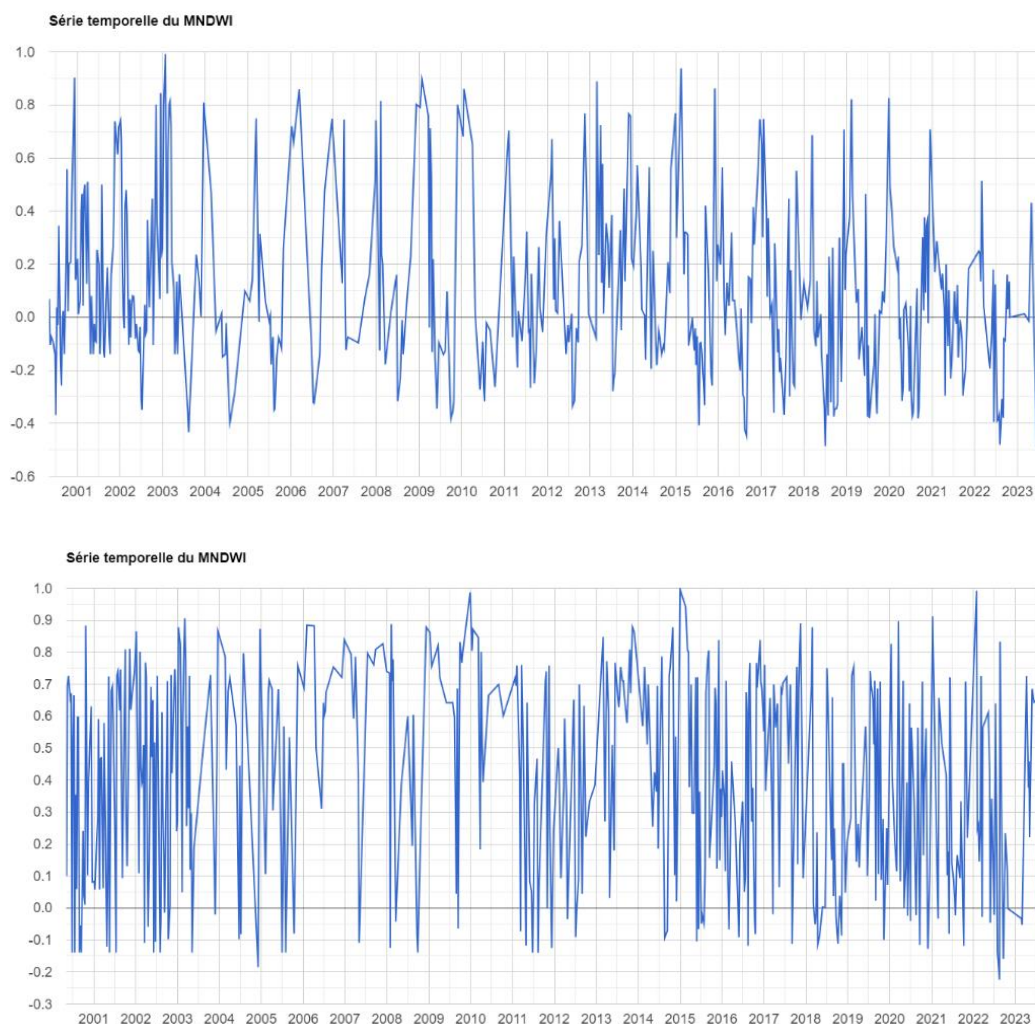


Figure 11 Comparaison entre pixels aux abords/au centre

Ici, le tableau supérieur montre le graphique d'un point en bordure de la zone d'eau : nous y distinguons nettement des valeurs extrêmes se détachent en juillet 2018, août 2022 et août 2023 à -0.489, années déjà identifiées comme étant des années de sécheresse critique.

En revanche, le deuxième tableau représente le chart d'un pixel en plein centre du lac. Nous y remarquons que les valeurs descendent difficilement en-dessous de 0.2, on peut en déduire que le niveau au centre du lac a rarement baissé au point d'avoir des pixels sans eau, à l'exception du 16 août 2022 avec une valeur de -0.224. Cette année a en effet été l'une des années où la navigation a dû être interdite sur le lac en raison du manque d'eau¹⁸.

Il est ici possible de créer ce même graphique avec les valeurs de notre indice uniquement sur les mois d'été. Une partie de code a été incluse et peut être lancée ou désactivée grâce à la fonction de « mise en commentaire » : `//`. Cette partie utilise le filtre `.calendarRange('month')` pour sélectionner les images prises entre les mois de juin et septembre afin d'avoir une idée de la tendance pluriannuelle des valeurs, sans tenir compte des valeurs extrêmes constituées par les mois d'hiver qui

¹⁸ <https://www.rts.ch/play/tv/19h30/video/lac-des-brenets-ne-fin-de-la-navigation--dernier-embarquement-avant-larret-provisoire-des-croisieres-?urn=urn:rts:video:13244191>

pourraient venir fausser les résultats (Figure 12). Les sauts entre valeurs correspondent aux écarts entre le mois de septembre d'une année et le mois de juin de l'année suivante.

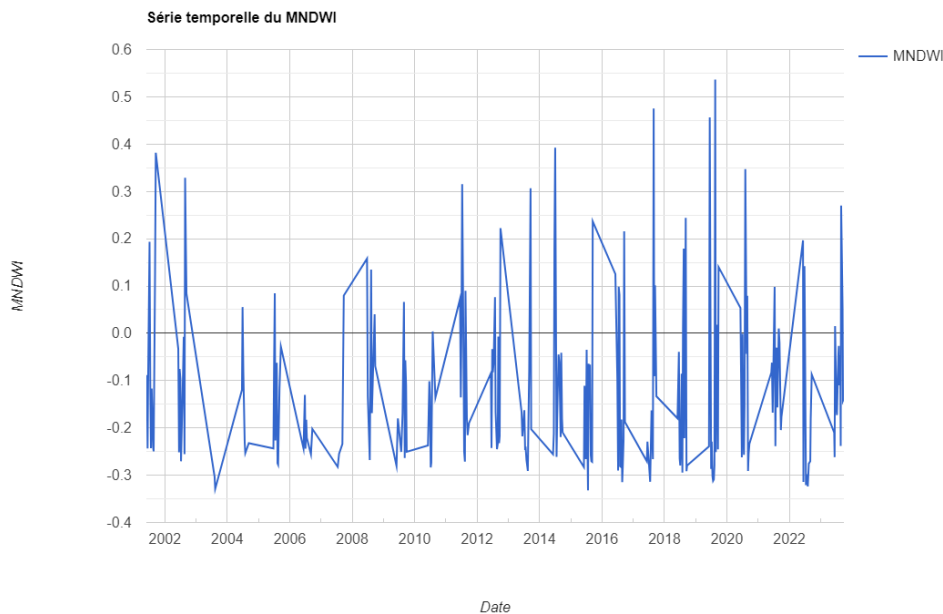


Figure 12 Chart pluriannuel du MNDWI, restreint sur les mois d'été - Landsat 7

L'utilisation d'une technique d'interpolation (*gap filling*) ou de lissage des valeurs a été envisagée mais n'a pas paru pertinente pour cette étude. Il aurait en effet été possible d'utiliser les valeurs du MNDWI calculées sur les images de Sentinel-2, prises à des intervalles rapprochés et à une résolution haute, pour extrapoler les valeurs des images de Landsat 7 aux dates où les images sont manquantes ou de moins bonne qualité. Cependant, nous recherchions à obtenir les vraies valeurs de l'indice signalant la présence d'eau, sans chercher à estimer des valeurs potentiellement erronées pour les périodes ou dates manquantes. L'objectif étant de créer un outil de suivi qui indique une tendance générale afin de remédier à la situation à l'avenir.

Script Sentinel-2

Script S-2: <https://code.earthengine.google.com/fe9ef67a841f36152969cf2040874bd1>

Afin de pouvoir analyser les valeurs de manière plus précise grâce à une résolution plus grande, il est fait appel dans un second temps à la collection de données du satellite Sentinel-2 qui offre une résolution jusqu'à 10m pour les bandes qui nous intéressent¹⁹. Ainsi, le script se présente de manière relativement similaire à celui proposé pour Landsat 7, à la différence que nous allons adapter la collection de données téléchargée, le nom des bandes pour la couche RGB, les bandes auxquelles il est fait appel pour le calcul du MNDWI et celles pour calculer le NDWI. Ainsi, la composition colorée RGB se déclinera en B4, B3 et B2 ; la bande infrarouge moyen utilisée pour le MNDWI sera la 11, ce qui nous donne l'utilisation de la bande B3 et B11 pour le MNDWI et le NDWI se calculera avec les bandes B3 et B8.

Script de comparaison

Script : <https://code.earthengine.google.com/2ac6ab38ac82ebda47e6540122e9a291>

¹⁹ <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2/data-products>

Une fois que ces indices ont été calculés, il est à présent possible de créer une partie de script qui permet de comparer les images pour chaque année. En reprenant la dernière collection d'images de Sentinel 2 par exemple, nous allons appliquer à nouveau un filtre pour les nuages sous forme d'un masque pour les bits 10 et 11 représentant les nuages, tels que les cirrus, tout en fixant le seuil à zéro afin d'être sûr d'avoir une bonne représentation de la zone d'intérêt sans nuages.

Ensuite, nous sélectionnons les images en filtrant par date et par indice grâce à la fonction *getMontly* puis nous appliquons les paramètres de clip sur l'aire d'intérêt et ceux liés à la visualisation recherchée.

Ainsi, les images qui en résultent démontrent qu'il est possible de distinguer nettement la différence en alternant les compositions colorées, les indices ou les dates dans le menu déroulant (Figure 13). Nous constatons par exemple une très nette différence entre le niveau du lac en 2021 et celui de l'année 2022, où il n'y a quasiment plus d'eau à l'extrémité sud-ouest du lac (ici entouré en jaune sur l'image).



Figure 13 Comparaison des images de l'été 2021 et de l'été 2022 en composition colorée 'fausses couleurs'

Il est également intéressant de mettre côte à côte les images des indices NDWI, toujours dans l'objectif de pouvoir prouver la baisse significative du niveau du lac. Il est aisé de constater à nouveau une différence dans les valeurs qui ressortent de l'analyse et de l'application des filtres à l'extrémité du lac (Figure 14).

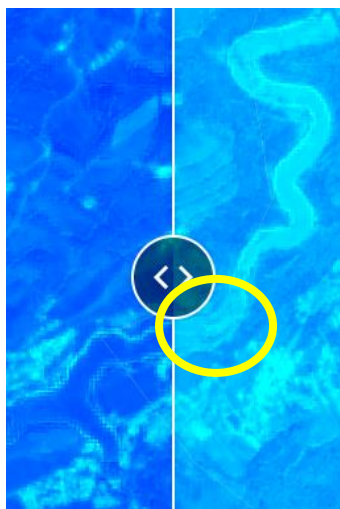


Figure 14 Comparaison des images été 2021/été 2022 avec l'indice NDWI

Légende

Une fois que ces trois scripts différents sont effectués, il nous faut créer les parties de code pour ajouter la légende pour plus de lisibilité. Il nous faut donc un titre détaillant ce qui est visible dans l'interface, en lui donnant la taille et le nom désiré, un menu déroulant présentant les différentes couches qui doivent apparaître avec leurs paramètres réglables, des outils de zoom et de sélection si besoin et une échelle des valeurs et nuances de couleurs utilisées pour illustrer l'indice NDWI. Enfin, l'UI app qui générera le graphique en fonction du clic de l'utilisateur, aux dimensions et à l'emplacement souhaité (Figure 15).

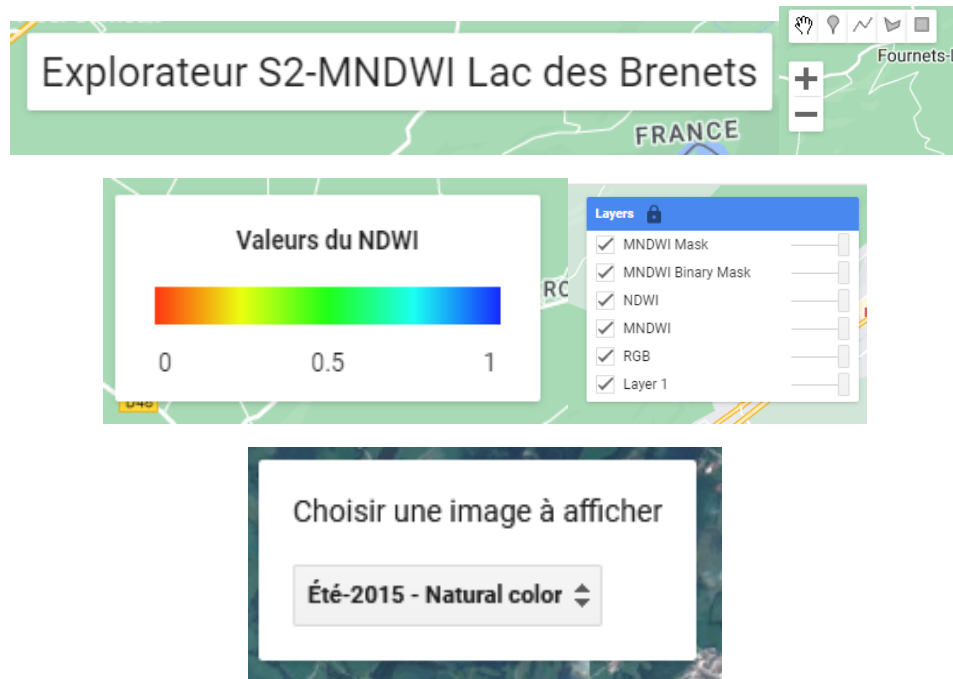


Figure 15 Légende de l'interface

Résultats et discussion

Il est temps maintenant de vérifier grâce aux données hydrologiques et aux mesures de l'Office Fédéral de l'Environnement (OFEV) si les résultats des analyses sont cohérents. Pour ce faire, nous allons consulter les courbes de valeurs mensuelles et annuelles, ainsi que les moyennes présentées sur leur site.

À titre d'exemple, il est possible de modifier les paramètres de la date dans l'un de nos scripts pour sélectionner un jour qui servira d'exemple, puis de le mettre en parallèle avec les données pluviométriques de l'OFEV. Il faut cependant garder à l'esprit qu'il peut exister un léger décalage entre les valeurs mesurées pour un jour précis par l'OFEV et les valeurs du NDWI et MNDWI mesurées par les graphiques. Ceci est dû au fait que les images ne sont pas prises tous les jours mais à un intervalle de cinq jours pour Sentinel 2 et 16 jours pour Landsat 7. Ainsi, l'augmentation d'une valeur NDWI ou MNDWI se verra seulement quelques jours après la date où il aura effectivement plu.

Le site de l'OFEV présente par exemple un graphique comparatif du débit du Doubs à la sortie du Lac des Brenets avec une année à sélectionner dans un menu déroulant et la comparaison avec le niveau d'eau de l'année actuelle à la même date (Figure 16)²⁰.

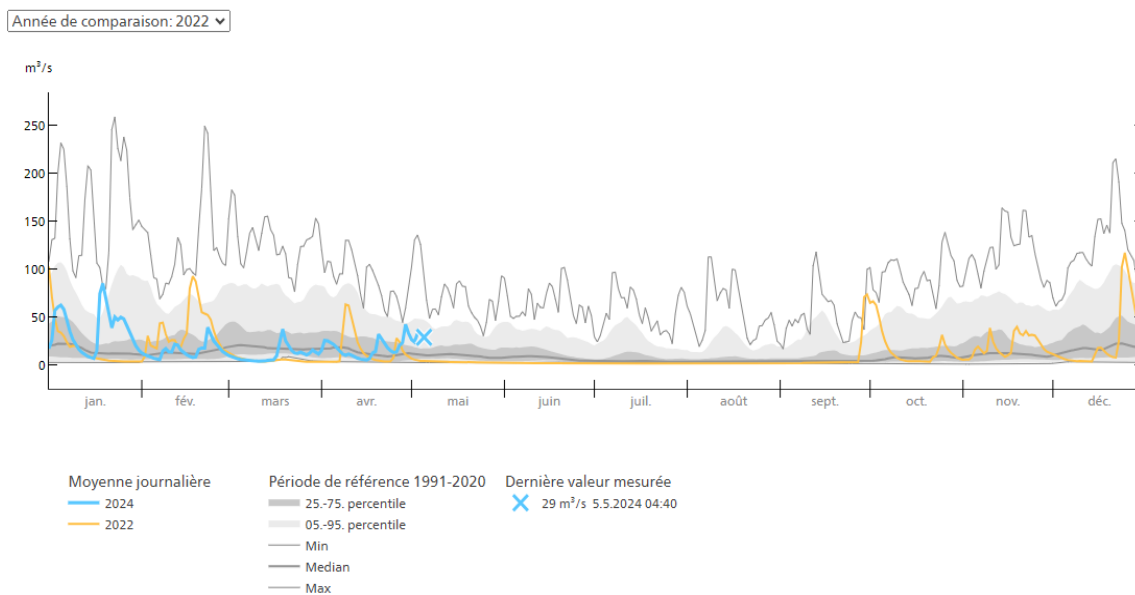


Figure 16 Graphique de l'évolution du débit du Doubs et niveau d'eau - 2022/2024

Il est également possible de comparer les moyennes mensuelles (Figure 17). Ainsi, nous pouvons constater que les valeurs mesurées pour l'année 2021 ont dépassé le maximum atteint sur la période de référence mentionnée, entre 1991 et 2020. À l'inverse, les valeurs mesurées pour 2022 sont même en-dessous des minima enregistrés, ce qui illustre de manière évidente une année de forte sécheresse dont l'impact s'est fait ressentir sur l'environnement et le tourisme. En effet, la navigation avait dû être arrêtée à plusieurs reprises sur le lac, notamment en 2018, 2020 et 2022, ce qui a eu des conséquences économiques pour la Compagnie de Navigation du Lac des Brenets, tout en ayant également eu d'importantes répercussions sur le reste du tissu social de la région²¹.

²⁰ <https://www.hydrodaten.admin.ch/fr/seen-und-fluesse/stationen-und-daten/2247#waterlevel-annual>

²¹ <https://www.rts.ch/info/regions/neuchatel/13242758-faute-deau-la-navigation-a-deja-du-etre-suspendue-sur-le-lac-des-brenets.html>

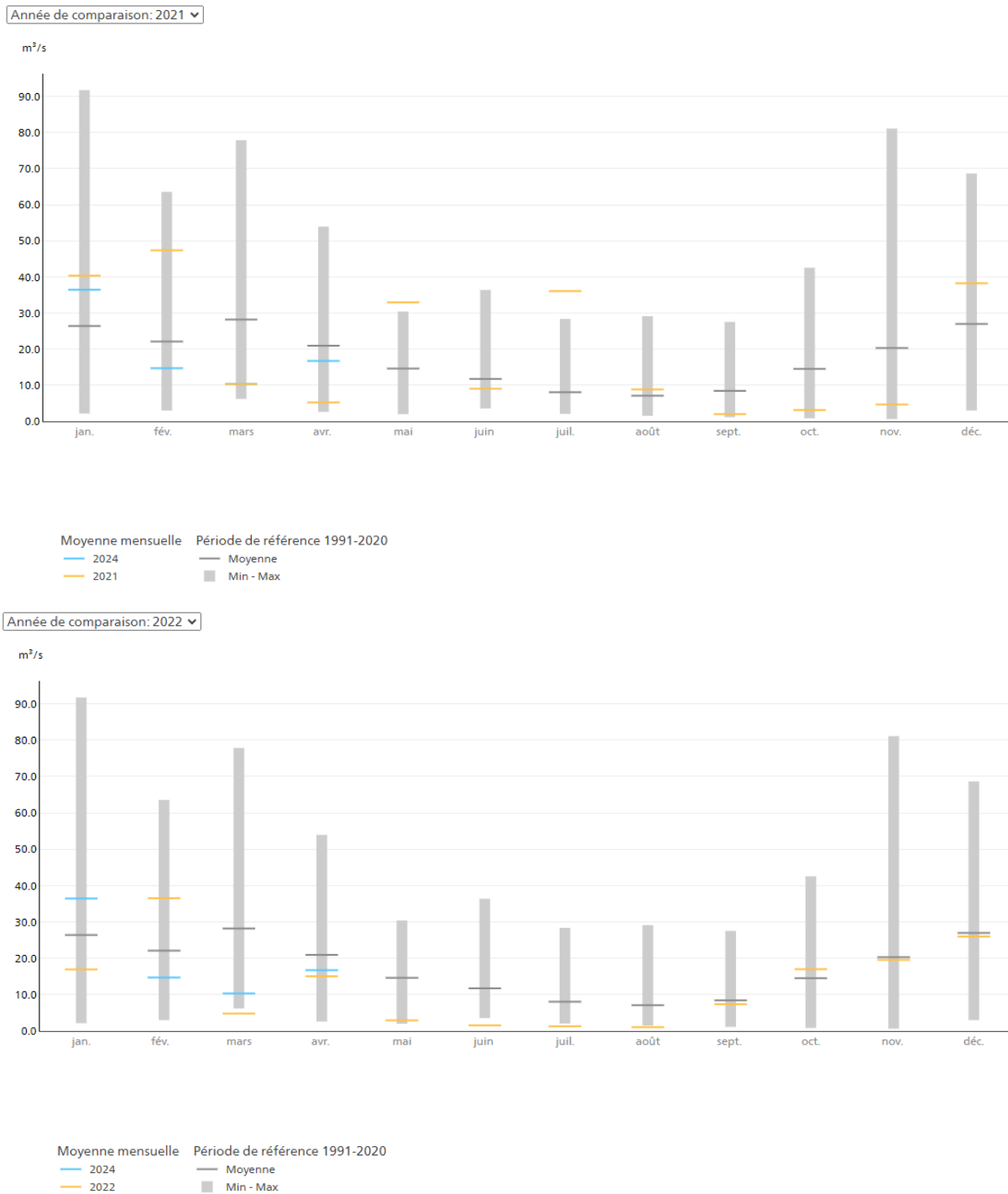


Figure 17 Tableaux des débits mensuels - 2021/2022

Nous pouvons également consulter les documents disponibles sur le site de l’OFEV concernant les valeurs de débit mesurées pour une date sélectionnée, et la comparer avec les images satellitaires et les valeurs ressorties du graphe du MNDWI. Par exemple, prenons l’été 2018 : l’image la moins nuageuse qu’a sélectionné le filtre de nuages date du 25 septembre (Figure 18). Ensuite, nous cherchons la valeur de cette date dans le tableau croisé du débit sur le site de l’OFEV pour 2018 : 1.20 m³/s (Figure 19). Puis, nous interrogeons le graphique des valeurs du MNDWI pour le 25 septembre 2018 : -0.291, ce qui est en effet parmi les valeurs les plus basses du graphique obtenu pour 2018 (Figure 20).

Enfin, les mesures de précipitations pour les jours autour du 25 septembre indiquent 0.0 ml de pluie, avec une petite exception le dimanche 23 septembre, ce qui explique probablement la légère remontée de la courbe MNDWI entre le 22 et le 25 (Figure 21)²².



Figure 18 Image satellitaire du 25 septembre 2018 - vraies couleurs

Abfluss Débit Portata		Doubs - Sortie du lac des Brenets												2247		
Koordinaten Coordonnées Coordinate		Höhe Altitude Altitudine			Fläche Surface Superficie			Mittlere Höhe Altitude moyenne Altitudine media			Vergletscherung Extension glacière Ghiacciaio					
		2544560 / 1214880			750 m ü.M. / m s.m.			867 km²			977 m ü.M. / m s.m.			0 %		
		Jan./Jann. Genn.	Feb./Févr. Febbr.	März/Mars Marzo	April/Avril Aprile	Mai/Mai Maggio	Juni/Juin Giugno	Juli/Juillet Luglio	Aug./Août Agosto	Sept./Sept. Sett.	Okt./Oct. Ott.	Nov./Nov. Nov.	Dez./Déc. Dic.			
2018	1	105	34.1	5.41	54.0 +	4.36	22.7	2.84	1.98 +	1.56 +	1.12 +	0.64	1.10	1		
	2	104	33.1	5.10	44.5	4.05	17.2	2.79	1.94	1.55	1.12	0.63	1.33	2		
	3	102	27.7	4.91	38.7	3.73	13.6	2.83	1.90	1.53	1.11	0.62	2.36	3		
	4	145	22.4	4.57	35.2	3.42	10.9	3.29	1.86	1.52	1.10	0.62	29.1	4		
	5	224	16.0	6.11	47.4	3.19	12.7	3.41 +	1.84	1.50	1.09	0.61	21.5	5		
Tagesmittel	6	209	15.2	11.1	45.0	3.04	39.0	3.30	1.82	1.48	1.08	0.60	20.1	6		
	7	157	13.1	15.9	37.6	2.97	44.9	3.16	1.78	1.47	1.06	0.59	25.9	7		
Moyenne journalière	8	109	11.3	14.7	30.5	2.94	34.9	3.01	1.75	1.46	1.00	0.59	30.8	8		
	9	75.9	9.79	15.0	25.5	2.92	33.7	2.92	1.72	1.45	0.96	0.60	53.8	9		
	10	53.8	8.67	22.2	22.2	2.91	27.0	2.85	1.70	1.43	0.94	0.60	90.3	10		
Media giornaliera	11	39.8	7.84	33.0	19.4	2.90	26.6	2.78	1.67	1.42	0.92	0.60	86.7	11		
	12	30.5	6.50	38.4	16.6	2.87	42.9	2.72	1.65	1.40	0.90	0.59	67.5	12		
	13	23.6	8.27	59.2	14.4	2.95	58.2 +	2.65	1.82	1.38	0.88	0.60	45.6	13		
	14	18.8	7.37	63.9	12.5	4.87	42.8	2.59	1.63	1.36	0.86	0.60	28.0	14		
	15	15.4	7.63	58.6	11.3	13.3	25.3	2.54	1.66	1.35	0.84	0.60	18.2	15		
m³/s	16	17.5	54.2	49.3	10.8	19.9	17.5	2.52	1.66	1.33	0.82	0.60	15.8	16		
	17	44.5	71.7	39.6	10.2	23.9 +	13.3	2.48	1.64	1.31	0.80	0.59	19.1	17		
	18	41.4	84.0 +	36.8	9.60	18.6	10.4	2.43	1.62	1.29	0.78	0.59	17.0	18		
	19	73.6	70.9	29.8	9.10	15.7	8.53	2.38	1.60	1.27	0.76	0.59	14.5	19		
	20	71.3	51.3	22.3	8.79	15.3	7.13	2.34	1.58	1.25	0.74	0.59	16.3	20		
	21	100	33.1	16.8	8.54	14.2	6.03	2.38	1.55	1.24	0.73	0.58	23.2	21		
	22	168	22.4	13.7	8.24	13.6	5.12	2.37	1.53	1.22	0.71	0.57	74.5	22		
	23	248	16.4 +	11.7	7.87	17.9	4.40	2.34	1.56	1.21	0.70	0.57	68.8	23		
	24	194	13.0	10.7	7.61	17.3	3.95	2.30	1.59	1.21	0.68	0.63	95.1	24		
	25	135	10.4	9.86	7.16	13.3	3.65	2.26	1.59	1.20	0.67	0.70	112	25		
+ Maximum Massimo	26	91.6	8.48	9.18	6.49	10.1	3.39	2.22	1.59	1.19	0.65	0.76	84.2	26		
	27	89.7	8.82	8.84	5.85	7.82	3.18	2.16	1.58	1.17	0.64	0.82	59.9	27		
- Minimum Minimo	28	58.1	5.92 -	19.9	5.33	8.74	3.01	2.14	1.57	1.16	0.64	0.87	39.2	28		
	29	47.8	67.8 +	4.76	4.76	9.39	2.95	2.10	1.55	1.15	0.65	0.92	26.1	29		
	30	36.2	63.2	4.44 -	4.44 -	12.1	2.90 -	2.08	1.56	1.14 -	0.65	0.97 +	18.5	30		
	31	30.6	63.2	14.1	14.1	14.1	2.02 -	2.02 -	1.56	1.14 -	0.64	0.97 +	13.5	31		
Monatsmittel Moyenne mensuelle Media mensile		91.7 +	24.3	26.8	19.0	9.43	18.3	2.59	1.67	1.34	0.84	0.65 -	39.4	m³/s		
Maximum/Massimo Spitze/Pointe/Punta Datum/Date/Data		258 + 23	86.3 18	73.8 29	59.3 1	25.3 17	63.9 13	3.50 4	2.00 1	1.57 1	1.34 7	1.00 - 30	125 24	m³/s		
Jahresmittel/Moyenne annuelle/Media annua		19.7 m³/s														

Figure 19 Relevés des moyennes de débit journalier du Doubs pour l'année 2018

²²https://www.vhne.ch/xt_vh_718536/station_view.php?cfg=display_VH_PLUVIO&measurement_set_id=114&ck3_page_reloaded=1

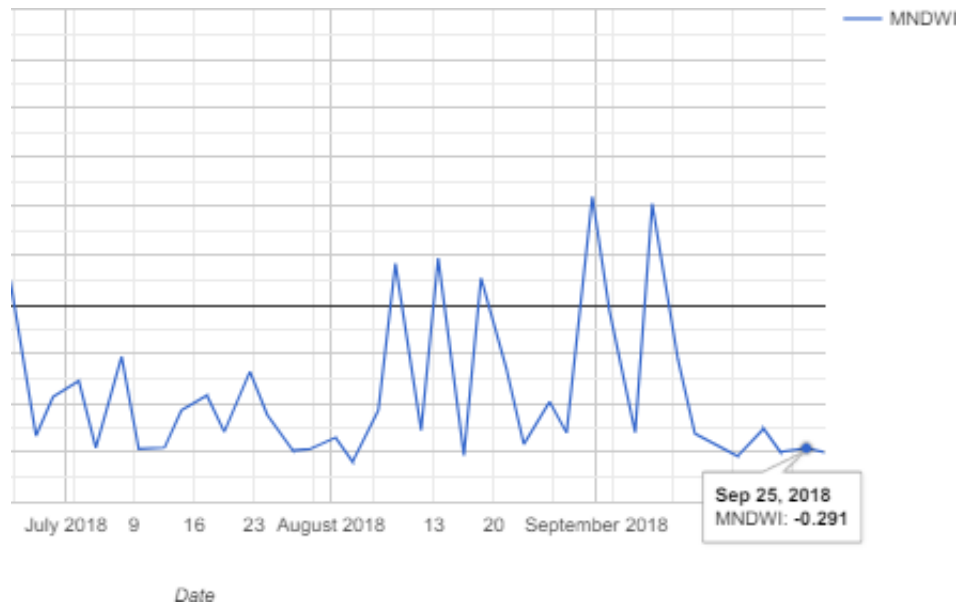


Figure 20 Graphique du MNDWI de l'été 2018, détail de la valeur pour le 25 septembre

Pluviométrie		Station : Noiraigue											Code : NOI	
		Coordonnées : 545'696/200'777												
		Altitude : 728.7 [m.s.m]												
2018		Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	
1	14.6	15.4 +	0	10.8 +	0.2	0	0	0	0	0	6.0 +	0	0.2	1
2	6.0	1.8	6.2	0	0	0	17.0 +	0	0	0	0	0	35.8	2
3	6.6	0.4	4.8	0	1.8	0.2	13.4	0	0	0	0	0	32.8	3
4	6.6	0	11.4	7.6	0	0.2	0	14.6	0	0	0	0	2.2	4
5	5.2	1.0	0	2.0	0	0.2	1.0	0	0	0	0	0	0	5
6	3.0	0	0.8	0	0	0.6	4.2	0	5.4	0	0	0	2.8	6
7	2.4	0.2	7.2	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0	8.2	7
8	1.8	0.4	0.4	0	0	0.2	0	0.2	0	0	0	0	8.6	8
9	0.8	0	0	0	9.4	0.6	0	0.2	0	0	0	0	38.8 +	9
10	1.2	0.8	7.0	6.4	4.4	25.8	0	0	0	0	0	0	13.2	10
11	5.8	5.2	8.8	0	0	0.4	0	0	0	0	0	0	2.4	11
12	0	0	14.8	0	9.0	38.6 +	0	0	14.8 +	0	0	0	0	12
13	0	0	18.8	0	2.4	0.4	0	7.6	0.2	0	0	0	0	13
14	0	0	1.0	0	4.2	0.4	0	0.2	0	0	0	0	0	14
15	4.2	9.4	4.8	0	18.6	0.2	9.4	0.2	0	0	0	0	0	15
16	14.2	7.4	1.2	0	9.6	0.2	0.2	0.2	0	0	0	0	9.4	16
17	6.4	10.2	7.2	0	0	0.6	0	0	0	0	0	0	1.0	17
18	20.8	0	1.4	0	0	0	0	0	6.0	0	0	0	0	18
19	8.4	0	3.6	0	0	1.6	0	0	0	0	0	0	10.4	19
20	14.4	0	0	0	0	0.2	15.0	0	0	0	0	0	0.8	20
+ Maximum														
21	22.0	0	0	0	0	0	4.6	0	0.4	0	0	0	29.2	21
22	42.6 +	0	0	0	1.8	0	0	0	0.2	0	0	0	6.8	22
23	0.6 +	0	1.0	0.8	7.4	0	0	0	0	0	0	0	8.2	23
24	0.4	0	0	0	0	0	1.0	3.8	0	0	0	0	15.0	24
25	0	0	1.2	0	0	0	0	3.6	0	0	0	0	0.2	25
26	15.4	0	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26
27	2.8	0	6.4	0	1.8	0	0	0	0	0	0	0	0	27
28	0	0	29.8 +	1.8	0	0	9.8	0	0	0	0	0	0.2	28
29	0	0	2.6	0.2	7.0	0	0	0	0	0	0	0	0	29
30	0	0	14.0	3.0	5.0	0	0	0.6	0.4	0	0.2 +	0	0.4	30
31	2.2	0	3.6	0	24.8 +	0	0	0.8	0	0	0	0	0	31
Somme mensuelle	208.4	52.2	157.6	32.6	107.4	70.6	75.6	47.0	36.8	6.0	0.2	224.6 +	mm	
Somme annuelle	1019.0 mm													

Figure 21 Relevés de pluviométrie de la station de Noiraigue pour l'année 2018

Selon le bulletin climatologique de l'été 2018, émis par MétéoSuisse, les précipitations ont été extrêmement faibles dans de nombreuses régions suisses dès le mois de juillet. La baisse pluviométrique et le manque d'eau provoqué par l'évapotranspiration due à la chaleur ont été plus importants dans la partie orientale du Plateau et les précipitations n'ont atteint que 30% au maximum de la norme habituelle entre 1981 et 2020. Le rapport relève également que seuls les étés

2015 et 2003 avaient enregistré un écart à cette norme plus élevé. Les valeurs sont revenues à la normale en août avec une pluviométrie ayant atteint les 80% de la norme en Suisse Romande. Cependant, le mois d'août 2018 reste tout de même le deuxième mois le plus sec depuis 100 ans²³.

Implications pour la commune

Dans un article publié dans « La Nature », une revue scientifique du XXème siècle, écrit par l'hydrogéologue Eugène Fournier, il est fait mention d'une vague de chaleur et d'une sécheresse extrême dans le Jura en 1906. M. Fournier y décrit alors une faille dans le lit du Doubs « à 200 mètres en amont d'Arçon, elle mesurait 3 mètres de long sur un mètre de profondeur et une largeur variant entre 20 et 50 centimètres », ce qui ajoute une cause de pertes d'eau. Celle-ci fut ensuite rebouchée rapidement sur plus d'un mètre de profondeur²⁴.

De nombreuses failles karstiques se trouvent en effet dans le lit du Doubs en amont du lac. Il s'en crée parfois pendant les périodes de sécheresse mais elles sont partiellement rebouchées afin d'éviter de trop grandes pertes de débit. La pratique du remplissage des failles était répandue à l'époque pour tenter de pallier au manque d'eau car cette rivière était notamment un outil de travail pour les usines aux alentours du Doubs. Depuis les années 1970, le Doubs est aussi canalisé et dévié dans certaines zones afin de limiter les pertes de débit dans les zones principales de perte dans le cours d'eau en aval. Il y a donc deux facteurs : les sécheresses exceptionnelles dues au réchauffement climatique et les failles karstiques dues à la nature calcaire et poreuse du sous-sol du bassin du Doubs.

La problématique n'est donc pas nouvelle : cependant, les moyens à disposition, dont les coûts relativement bas et l'utilisation aisée sont reconnus, ont depuis bien évolué et doivent être mis à profit.

Limites de l'étude

Nous avons donc énuméré ici les possibilités de création de script, de téléchargement de données en grande quantité et à moindre coût. Cependant, il est important de mentionner aussi que la plateforme, tout comme les données satellitaires importées, ont leurs limites et leurs problèmes techniques.

Par exemple, nous avons vu que la collection d'images de Landsat 5 ne fonctionnait pas avec l'utilisation désirée et les parties de scripts du masque sur les pixels d'eau. Une solution a donc été envisagée en utilisant la collection d'images de Landsat 7, nous restreignant à une aire temporelle dès les années 2000. De même, nous avons mentionné que le satellite Landsat 7 avait eu une panne de Scan Line Corrector en 2003 qui a affecté les vraies valeurs acquises par le détecteur tout en étant compensées par un produit créé par l'USGS qui interpole les données. Nous avons également mentionné que certaines collections satellitaires n'avaient pas une résolution assez grande pour être utilisables dans notre cas. Aussi, la collection de données de Sentinel-2 a montré un souci de géoréférencement des images retranscrites et téléchargeables.

Enfin, certaines collections d'images, lorsqu'elles sont requises sur des aires temporelles très importantes, ne sont pas prises en charges par l'outil Google Earth Engine et des messages d'erreurs apparaissent²⁵. Il faut ainsi diviser les zones d'intérêts ou l'aire temporelle afin d'obtenir des résultats.

²³ https://www.meteosuisse.admin.ch/dam/jcr:9450007f-00e3-4510-8c5c-c2c07077e9ac/2018_JJA_f.pdf

²⁴ E. Fournier, *La sécheresse dans le Jura en 1906*, In : « La Nature » n°1782, 1907, p. 119

²⁵ Gorelick, N., et al. *Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone*, In: Remote Sensing of Environment, article sous presse

Conclusion

Synthèse

Dans ce travail, nous avons ainsi réussi à identifier un indice efficace pour détecter les fluctuations extrêmes du niveau du Lac des Brenets dans le canton de Neuchâtel. Il a été possible de générer plusieurs graphiques grâce à des scripts avec une interface utilisateur simple mais explicite afin de pouvoir exposer la situation aux autorités communales et leur permettre de prendre des décisions éclairées en matière de protection environnementale et de préservation du tissu économique.

Les fortes vagues de chaleur et l'accélération de leur récurrence ces dernières années ont été nettement identifiées sur les images satellites, que ce soit en images en vraies couleurs, en compositions colorées ou grâce aux graphiques des indices NDWI ou MNDWI de détection de l'eau.

L'utilisation de la plateforme de Google Earth Engine a montré son efficacité mais également ses limites pour certains aspects, tout comme la pertinence de certains jeux de données tels que les images de Landsat 5 qui ne sont pas utilisables pour certaines années, le problème des jeux de données de Landsat 7 qui présentent un souci au niveau de la superposition lors de l'acquisition des images, ainsi que le problème de géoréférencement des images de Sentinel 2 lors de l'année de son lancement.

Les résultats obtenus et présentés ont été tout de même éloquentes et vérifiés en parallèle avec les données de l'Office Fédéral de l'Environnement et ils démontrent l'adaptabilité et la maniabilité de l'outil, tout comme des jeux de données, pour pouvoir montrer l'impact des changements climatiques sur l'environnement.

Ainsi, il a été possible de trouver un algorithme qui recherche les données, calcule dans un temps raisonnable les requêtes effectuées, et s'actualise facilement lors de l'apport de nouvelles données.

Notre modèle est de plus capable de détecter les variations d'eau intermittentes (sécheresse, inondations) sur plusieurs zones et années, et sur un laps de temps relativement court grâce à la collection d'images du satellite Sentinel 2 qui récolte des données tous les 5 jours. Il est de plus compréhensible par le public et assez précis pour une application scientifique.

Perspectives

Le directeur de l'Institut suisse de spéléologie et de karstologie (ISSKA), M. Pierre-Yves Jeannin, interrogé sur la question des failles karstiques et des sécheresses récurrentes, préconise d'identifier précisément les sources de toutes les eaux souterraines et d'étudier leur utilisation afin d'en réduire les pertes. De plus, il est selon lui essentiel d'évaluer l'étanchéité des réseaux d'eau, de rationner l'utilisation des ressources et de restaurer les surfaces humides de la région, vitales pour la région²⁶.

Selon M. Nicolas Joss, chargé d'affaires chez Forêt Neuchâtel, une des solutions à long terme serait de changer les essences d'arbres présentes autour du lac, comme le hêtre ou le sapin blanc, par des essences comme le chêne, bien plus résistantes aux fortes vagues de chaleur. En effet, les bûcherons de cette association de propriétaires forestiers doivent régulièrement couper des arbres morts ou devenus trop secs par le manque de précipitations et pour des raisons de sécurité afin de pallier au

²⁶ <https://www.illustre.ch/magazine/passe-doubs>

risque de chute sur les promeneurs. Cependant, ce bois perd de sa valeur sur le marché s'il est trop sec et coupé trop tard, ceci implique donc une conséquence économique pour le secteur forestier²⁷.

Une partie du tronçon du Doubs a déjà été partiellement traité autour d'Arçon en 2018 grâce à la pose de géomembranes pour éviter le passage de l'eau dans les failles. Il s'agit là d'une des premières mesures dont l'efficacité va être évaluée sur le long terme, mais qui montre la volonté de la collectivité à investir face à l'urgence de la situation²⁸ et qui pourra être améliorée et pérennisée à l'avenir.

La commune est ainsi en mesure d'utiliser les outils et informations présentés ici pour la planification environnementale et la gestion des ressources en eau. Il s'agit maintenant de convaincre les autorités qu'avant de pouvoir résoudre les problèmes climatiques à grande échelle, il y a des plus petites actions qui peuvent être effectuées, comme le colmatage des failles karstiques présentes dans les fonds du lac et des cours d'eau alentours, ainsi que le désenvasage du lac, dont le fond a nettement monté dû à l'apport régulier et abondant de sédiments limoneux provenant du Doubs en amont du lac. Les graphiques et images créés par les résultats des scripts peuvent servir aux autorités locales dans la gestion des ressources en eau et la planification environnementale, ainsi que pour appuyer leur demande.

En effet, les récents plans pour le climat, adoptés par la Confédération et avec l'appui de l'Office Fédéral de l'Environnement, octroient de nombreuses formes de soutiens financiers et logistiques aux cantons afin de mettre en place des mesures de sauvegarde du patrimoine naturel. Il est donc tout à fait envisageable de préparer un projet en évaluant les besoins matériels, logistiques, et personnels à présenter afin d'obtenir le soutien de la Confédération.

²⁷ <https://www.rts.ch/info/regions/neuchatel/11594902-la-succession-detes-secs-qui-touche-larc-jurassien-depuis-2015-inquiete.html>

²⁸ <https://france3-regions.blog.francetvinfo.fr/vallee-de-la-loue/2018/08/28/assechement-du-doubs-une-histoire-connue-davance.html>

Images

GIF

Le Gif n'a pas fonctionné sur la plateforme Google Earth Engine, en voici une autre version :

https://www.canva.com/design/DAGGQzXEDMQ/JTXpAFVbWfpYYOc_bIIrdg/view?utm_content=DAGGQzXEDMQ&utm_campaign=share_your_design&utm_medium=link&utm_source=shareyourdesignpanel

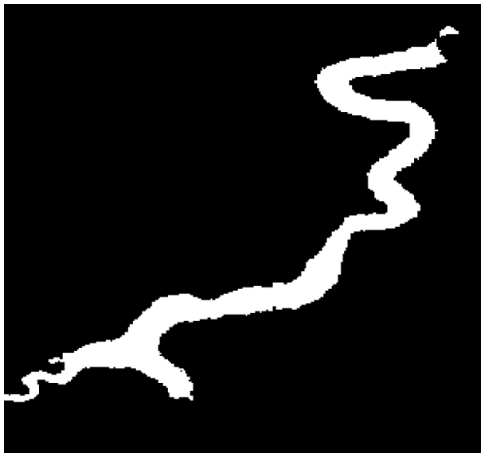
Water Mask

Quelques images à titre de comparaison :

Juillet 2018

Number of images = 24	JSON	Number of images = 20	JSON
Sentinel image taken at = ▶ Date (2018-07-09 10:34:18)	JSON JSON	Least cloudy image taken at = ▶ Date (2018-09-25 10:41:19)	JSON JSON
Water area (km2): 0.5344720309041027	JSON	Water area (km2): 0.28962328273019594	JSON

Septembre 2018



Juillet 2021

Number of images = 24	JSON	Number of images = 24	JSON
Least cloudy image taken at = Date (2021-07-23 10:37:52)	JSON JSON	Least cloudy image taken at = Date (2022-07-11 10:47:53)	JSON JSON
Water area (km2): 0.533926380620292	JSON	Water area (km2): 0.2963839716568017	JSON

Juillet 2022



Bibliographie

Articles:

Mc Feeters, S. K., "The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features", *International Journal of Remote Sensing*, 17 No. 7, 1996, 1425–1432.

Xu, H. "Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery" *International Journal of Remote Sensing* 27, No. 14, 2006, 3025-3033.

Mueller, N., Lewis, A., Roberts, D., Ring, S., Melrose, R., Sixsmith, J., Lymburner, L., McIntyre, A., Tan, P., Curnow, S., & Ip, A. (2016). "Water observations from space: Mapping surface water from 25 years of Landsat imagery across Australia." *Remote Sensing of Environment*, No. 174, 2016, 341–352. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.003>

Kwong, I., Wong, F., Fung, T., "Automatic Mapping and Monitoring of Marine Water Quality Parameters in Hong Kong Using Sentinel-2 Image Time-Series and Google Earth Engine Cloud Computing". *Frontiers in Marine Sciences*, Volume 9, 2022.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2022.871470>

Sherjah P. Y., Sajikumar N., Nowshaja P. T., "Quality monitoring of inland water bodies using Google Earth Engine", *Journal of Hydroinformatics*, 25, 2, 2023, 432–450.
<https://doi.org/10.2166/hydro.2023.137>

Atay, M., Kaplan, G., "Large-Scale Mapping of Inland Waters with Google Earth Engine Using Remote Sensing", *Environmental Sciences Proceedings*, vol. 25 Issue 1, 2023, 52.
<https://doi.org/10.3390/ECWS-7-14171>

Singh, K., Sahoo, S., Setia, R., Prasad, A., Pateriya, B., "Evaluation of NDWI and MNDWI for assessment of waterlogging by integrating digital elevation model and groundwater level", *Taylor & Francis, Geocarto International*, 30(6), 2015, 650-661
<https://doi.org/10.1080/10106049.2014.965757>

Gorelick, N., et al. "Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone", *Remote Sensing of Environments*, 2016, article sous presse

Sites internet, consultés en dernier le 30.05.2024:

[https://eos.com/fr/make-an-analysis/ndwi/#:~:text=NDWI%20\(indice%20d'eau%20par,propos%C3%A9%20par%20McFeeters%20en%201996](https://eos.com/fr/make-an-analysis/ndwi/#:~:text=NDWI%20(indice%20d'eau%20par,propos%C3%A9%20par%20McFeeters%20en%201996)

<https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/latest/help/data/imagery/indices-gallery.htm>

https://developers.google.com/earth-engine/landsat_c1_to_c2

<https://brignes-de-geomatique.readthedocs.io/fr/latest/teledetection-missions-donnees.html#niveau-l2-reflectances-de-surface>

<https://www.hydrodaten.admin.ch/fr/seen-und-fluesse/stationen-und-daten/2247#waterlevel-annual>

https://fr.wikipedia.org/wiki/Lac_des_Brenets

2018 : <https://www.rts.ch/play/tv/19h30/video/le-lac-des-brenets-ne-est-durement-frappe-par-une-secheresse-intense-?urn=urn:rts:video:9863010>

2022: <https://www.rts.ch/info/regions/neuchatel/13192553-le-lac-des-brenets-ne-est-a-nouveau-victime-dun-assechement-rapide.html>

<https://www.rts.ch/info/regions/neuchatel/13101160-dans-1000-ans-le-lac-des-brenets-ne-sera-plus-quun-beau-souvenir.html>

<https://www.rts.ch/play/tv/12h45/video/apres-les-secheresses-estivales-le-lac-des-brenets-ne-se-remplit-au-printemps-et-attire-les-touristes?urn=urn:rts:video:14819141>

<https://www.rts.ch/play/tv/19h30/video/lac-des-brenets-ne-fin-de-la-navigation--dernier-embarquement-avant-larret-provisoire-des-croisieres-?urn=urn:rts:video:13244191>

<https://france3-regions.blog.francetvinfo.fr/vallee-de-la-loue/2018/08/28/assechement-du-doubs-une-histoire-connue-davance.html>

<https://www.illustre.ch/magazine/passe-doubs>

https://www.meteosuisse.admin.ch/dam/jcr:9450007f-00e3-4510-8c5c-c2c07077e9ac/2018_JJA_f.pdf