

CERTIFICAT COMPLEMENTAIRE EN GEOMATIQUE

**La télédétection, outil d'étude des dynamiques de sécheresse :
Une analyse temporelle de 1984 à 2018 en Suisse**



© Jörg Hammer, à Einsiedeln



© Heidi von Allmen, à Landschlacht



© Esther Scheidegger, à Birne

Mémoire de certificat

Alexandrine Massot

Directeur de mémoire : Grégory Giuliani

Décembre 2020

Résumé

Les changements climatiques amènent une nouvelle problématique dans le château d'eau helvétique : celle de la sécheresse. La Suisse a en effet connu plusieurs vagues de sécheresses ces dernières années, impactant fortement l'environnement et l'économie locale. Le principal outil utilisé pour détecter ces événements climatiques est la surveillance météorologique, mais cette méthode ne permet pas d'avoir un couvert spatial suffisant et les variations régionales étant particulièrement importantes dans les régions montagneuses, il est nécessaire de développer des technologies d'observation. Ainsi, la télédétection peut être une bonne alternative pour présenter des variations spatiales et temporelles. Au travers de cette recherche, nous avons tester l'utilisation du NDWI, le « Normalized Difference Water Index », comme indicateur des sécheresses afin d'analyser les tendances au niveau national, cantonal et à l'échelle des zones biogéographiques suisses. Les résultats présentent de fortes disparités régionales dans l'évolution de l'humidité de la végétation ainsi qu'une accentuation générale du phénomène de sécheresse dans toute la Suisse. En effet, toutes les saisons connaissent une baisse du niveau d'eau contenue dans la végétation, mais les régions sont impactées de manière hétérogène et les régions alpines sont les plus affectées par cette diminution. Ainsi, notre analyse permet d'avoir un couvert spatial des tendances de sécheresses au niveau suisse, mais elle ne se penche que sur des événements passés ; de futures recherches devraient se concentrer sur le développement d'un outil de prévention des sécheresses, lesquelles risquent d'être plus intenses et plus fréquents à l'avenir.

Table des matières

1. INTRODUCTION	6
2. CONTEXTUALISATION.....	7
2.1. LA SÉCHERESSE : DÉFINITIONS ET IMPACTS	7
2.2. LE CAS DE LA SUISSE, « CHÂTEAU D'EAU DE L'EUROPE ».....	8
2.3. LE MONITORING DE LA SÉCHERESSE	10
2.4. QUESTIONS DE RECHERCHE ET HYPOTHÈSES	13
3. DONNÉES ET MÉTHODES.....	13
3.1. OUTILS DE TÉLÉDÉTECTION	13
3.1.1. <i>La télédétection et les satellites Landsat</i>	13
3.1.2. « <i>Normalized Difference Water Index</i> » (NDWI)	15
3.1.3. <i>Statistiques zonales</i>	17
3.1.4. <i>Calculatrice Raster</i>	18
3.2. DONNÉES ET TRAITEMENTS EFFECTUÉS.....	18
4. RÉSULTATS.....	20
4.1. RÉSULTATS DES STATISTIQUES ZONALES	20
4.2. ANOMALIES DU NDWI	27
4.3. TESTS STATISTIQUES DES RELATIONS NDWI-PRÉCIPITATION/TEMPÉRATURE.....	28
5. DISCUSSION ET CONCLUSION	30
5.1. LIMITES DE LA RECHERCHE.....	30
5.2. IMPACTS DE L'ÉTUDE	33
6. BIBLIOGRAPHIE	35
7. ANNEXES.....	37

Table des figures

Figure 1 : Les différents types de sécheresse et leur apparition temporelle (Horion et al., 2012)..	7
Figure 2 : La division de la Suisse en zones biogéographiques (Gonseth et al., 2001)	8
Figure 3 : Température annuelle moyenne en Suisse (OFS, 2020, URL : https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/statistiques/catalogues-banques-donnees/graphiques.assetdetail.12027679.html)	9
Figure 4 : Organismes suisses collectant des variables environnementales utiles à l'analyse des sécheresses (Acácio et al., 2013)..	12
Figure 5 : Description des bandes pour les satellites Landsat 5 et Landsat 8	14
Figure 6 : Classification du NDWI par Gulácsi and Kovács (2015)	16
Figure 7 : Classification des valeurs d'anomalies du NDWI (EDO - European Drought Observatory, 2011)	16
Figure 8 Rasters des NDWI annuels. De gauche à droite : 1984, 1997 et 2018.....	18
Figure 9 Couches vectorielles contenant (de gauche à droite) les frontières nationales, cantonales et biorégionales.....	19
Figure 10 : Moyenne annuelle du NDWI en Suisse.....	20
Figure 11 : Moyennes des statistiques zonales annuelles en fonction des différentes échelles pour les 10 premières années (1984 – 1994) et les 10 dernières (2008 – 2018) et calcul du pourcentage du NDWI en fonction de ces deux périodes selon la manière suivante :	21
Figure 12 : Evolution du NDWI par biorégions. Résultats des statistiques zonales annuelles.....	22
Figure 13 : Évolution du NDWI saisonnier dans toute la Suisse. Les classes figurant à gauche en violet correspondent aux classes établies par (Gulácsi & Kovács, 2015)	23
Figure 14 : Évolution temporelle du NDWI par saison de 1985 à 2000.	25
Figure 15 : Évolution temporelle du NDWI de 2001 à 2018.....	26
Figure 16 : : Anomalie du NDWI pour 2003 et 2018 par rapport à l'année de référence 2014.	27
Figure 17 Résultats des corrélations entre NDWI et Précipitations (a), NDWI et température moyenne (b). Corrélogramme (c) représentant la matrice de corrélations entre l'ensemble des mesures météorologiques (précipitations moyennes, température minimum, température maximum, et température moyenne, ainsi que le NDWI. La grandeur du cercle montre la significativité de la relation - plus le cercle est grand, plus la relation est significative – tandis que l'intensité de la couleur montre la force de la relation – plus la couleur est intense, plus la relation est importante (r^2 proche de 1). Enfin un rond rouge montre une corrélation négative et un rond bleu une corrélation positive.....	28
Figure 18 Corrélogramme des matrices de corrélations pour le jura (a), les alpes est (b), les alpes nord (c), le plateau (d), les alpes ouest (e) et les alpes sud (f) avec les données de NDWI,	

température moyenne et précipitations moyenne. La grandeur du cercle montre la significativité de la relation - plus le cercle est grand, plus la relation est significative – tandis que l'intensité de la couleur montre la force de la relation – plus la couleur est intense, plus la relation est importante (r^2 proche de 1). Enfin un rond rouge montre une corrélation négative et un rond bleu une corrélation positive.....29

Figure 19 Écart de température à la moyenne de 1961-1990 pour chaque année depuis 1864 en Suisse. Les années en dessous de la moyenne sont représentées en bleu et celles au-dessus en rouge.

Source :

MétéoSuisse

(URL :

<https://www.meteosuisse.admin.ch/home/climat/changement-climatique-suisse.html>).....32

1. Introduction

La sécheresse est une problématique de plus en plus d'actualité avec le réchauffement climatique qui commence à toucher les pays du nord, à priori moins affectés, tels que la Suisse. En effet, la Suisse, Château d'Eau de l'Europe, est sujette depuis quelques années à des périodes de sécheresse, comme la canicule de l'été 2003. La Suisse stocke environ 6% de l'eau douce disponible en Europe, grâce à ses glaciers, lacs et nappes phréatiques. Elle contribue à l'alimentation de plusieurs grands fleuves européens tels que le Rhin, le Rhône, le Pô et l'Inn. Cependant, les températures se réchauffant, les ressources en eau diminuent ce qui a des conséquences importantes sur la végétation, mais aussi sur l'économie du pays. De nombreux indices comme des périodes prolongées de canicule, couplées d'un déficit en précipitations, indique que la Suisse peut également souffrir de sécheresse et les ressources en eau peuvent en être grandement affectées (Reynard, 2013). En effet, des sécheresses périodiques comme celle de l'été 2003, diminuent de manière conséquentes les revenus liés à la gestion de l'eau, de l'agriculture, du tourisme, des forêts.

Le monitoring des sécheresses s'est généralement basé sur des observations météorologiques. Ces observations ne tiennent pas compte du couvert spatial permettant de localiser les sécheresses et d'identifier les zones particulièrement touchées. Les images satellites fournissent ainsi les informations géographiques manquantes et les indices de végétation satellitaire permettent de détecter des phénomènes de stress hydrique et de sécheresse, ainsi que leur impact sur la végétation (Karamihalaki et al., 2016). L'indice d'humidité de la végétation, le « Normalized Difference Water Index » (NDWI), qui mesure la teneur en eau contenue dans la végétation, permet d'évaluer la quantité d'eau d'une région. Elle est une bonne méthode pour l'évaluation des ressources en eau (Amalo et al., 2018).

Au cours de ce travail, nous allons donc nous focaliser sur le NDWI, et analyser les tendances de sécheresses en Suisse grâce à cet indicateur. Nous nous pencherons sur trois échelles d'analyse : (1) nationale, (2) cantonale et (3) régionale pour effectuer des analyses temporelles de 1984 à 2018.

2. Contextualisation

2.1. La sécheresse : définitions et impacts

La sécheresse est définie comme une catastrophe naturelle ayant des impacts potentiellement dangereux et affectant la sphère économique, sociale ou environnementale. Elle peut impacter des territoires immenses pendant plusieurs mois voire plusieurs années (Jeyaseelan, 2003; Zappa et al., 2014). La quantité des précipitations ne détermine pas l'occurrence des sécheresses ; elles peuvent survenir tant dans des régions arides que dans des régions où les précipitations sont abondantes. La sécheresse est une condition qui dépend des moyennes établies sur le long-terme, c'est-à-dire, basées sur l'équilibre entre les précipitations et l'évapotranspiration dans une zone définie. Elle est, contrairement à l'aridité, un phénomène anormal par rapport aux conditions climatiques usuelles. Il existe trois types de sécheresses communément admises qui apparaissent de manière successive dans le temps (Figure 1)(Horion et al., 2012):

1. **La sécheresse météorologique**, définie comme un déficit des précipitations au sein d'une région et d'une période de temps définie et par rapport à des moyennes habituelles.
2. **La sécheresse hydrologique**, définie comme la réduction de débit des cours d'eau et du niveau des lacs et réservoirs.
3. **La sécheresse agricole**, définie comme la réduction des quantités d'eau sur les surfaces agricoles

Les impacts de ces périodes de sécheresses dépendent de la durée de l'aléa, de son intensité, de sa couverture spatiale, de la vulnérabilité socio-économique et environnementale des régions touchées (Horion et al., 2012) ainsi que de la demande en eau des activités humaines et de la végétation (Wilhite & Glantz, 1985). Les impacts doivent être perçus comme des phénomènes dynamiques, qui résultent des interactions entre l'offre et la demande en eau (Wilhite & Glantz, 1985).

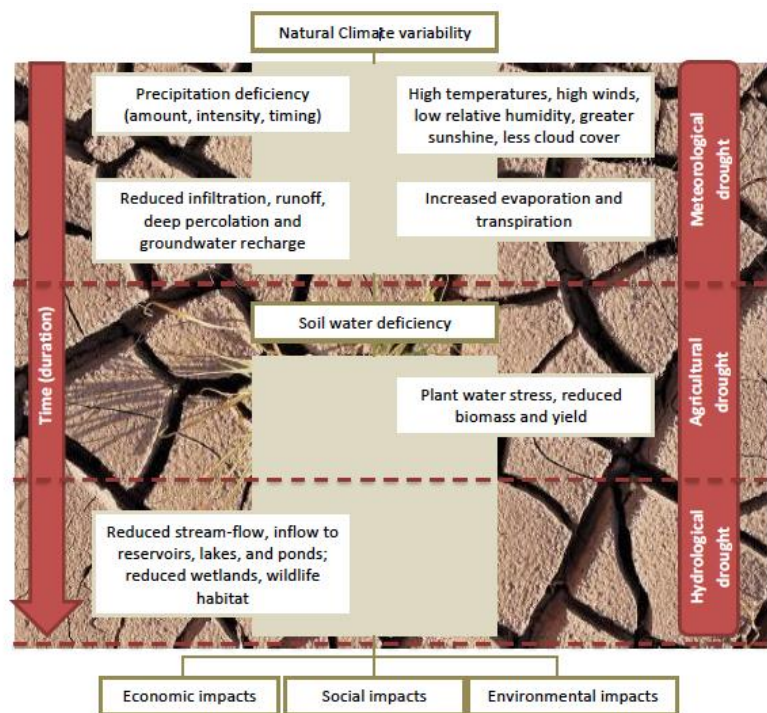


Figure 1 : Les différents types de sécheresse et leur apparition temporelle (Horion et al., 2012).

La définition de la sécheresse n'est donc pas universelle ; elle s'adapte aux différents environnements. Elle se définit notamment par les impacts sur la végétation et les populations (Wilhite & Glantz, 1985).

Pour notre étude, nous allons considérer la sécheresse en tant que condition résultant d'un manque de précipitation, de températures excessivement élevées par rapport à la normale et résultant dans une diminution de la teneur en eau contenue dans la végétation.

2.2. Le cas de la Suisse, « Château d'eau de l'Europe »

Avec ses 1500 lacs et ses nombreuses sources d'eau, dont celles des quatre fleuves majeurs d'Europe, la Suisse est considérée comme le château d'eau de l'Europe. Elle possède trois régions principales qui sont le Jura, le Plateau et les Alpes, représentant respectivement 10, 30 et 60% du territoire. Les Alpes peuvent être subdivisées en quatre régions : les alpes nord, les alpes sud, les alpes orientales et les alpes occidentales. Ainsi, ce découpage forme les six zones biorégionales de Suisse (Gonseth et al., 2001).

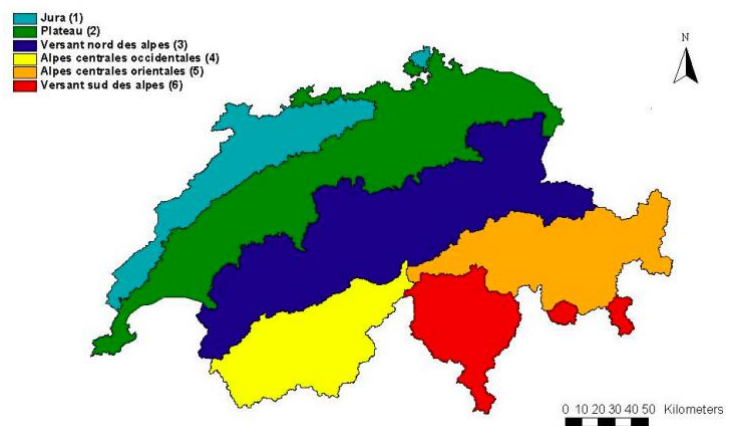


Figure 2 : La division de la Suisse en zones biogéographiques (Gonseth et al., 2001)

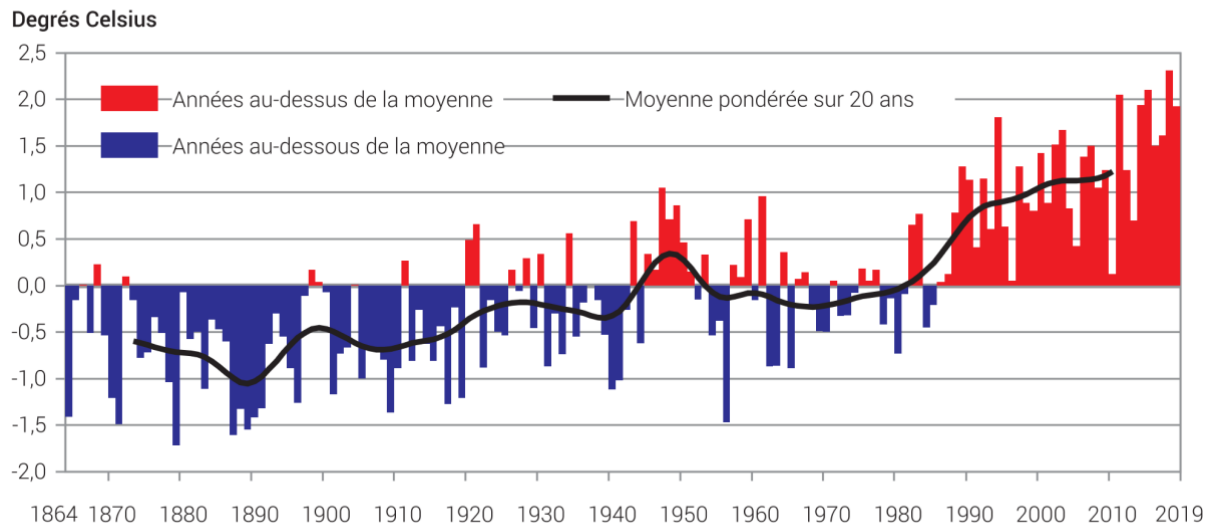
De plus, la Suisse est administrativement divisée en 26 cantons. 7,5% du territoire est occupé par les surfaces d'habitat, d'infrastructure, d'approvisionnement, d'évacuation, les espaces verts et les lieux de détente, tandis que les surfaces agricoles occupent 35,9% du territoire et les forêts 31,3% (DFAE, 2017).

La température ne cesse d'augmenter et des records sont atteints chaque année (Figure 3). Les températures moyennes annuelles ont progressé de 1,8°C dans tout le pays depuis 1864, soit deux fois plus que la moyenne mondiale reportée par le GIEC de 0.85°C (Leuch et al., 2017). En Suisse, il existe des vagues de sécheresse à la fois estivales et hivernales. Plusieurs vagues de chaleur, engendrant des sécheresses ont marqué la Suisse et toute l'Europe: une importante vague en 1976, en 2003, en 2009, au printemps 2011, en 2015 et en 2018 (Seneviratne et al., 2013; Zappa

et al., 2014). Les vagues les plus intenses ont été celle de 2003, 2015 et 2018, avec un manque important dans les précipitations pendant la période de végétation (Brunner et al., 2019). En 2003 par exemple, une vague de chaleur couplée d'un manque de précipitations a enclenché une sécheresse importante sur toute l'Europe, affectant également la Suisse (Horion et al., 2005).

Température annuelle moyenne en Suisse

Écart par rapport à la moyenne (1961–1990)



Source: MétéoSuisse

© OFS 2020

Figure 3 : Température annuelle moyenne en Suisse (OFS, 2020, URL :

<https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/statistiques/catalogues-banques-donnees/graphiques.assetdetail.12027679.html>)

La Suisse ayant un climat humide, beaucoup d'activités économiques et sociétales sont basées sur l'abondance hydrique, qui la caractérise (ex. énergie hydraulique, tourisme) (Acácio et al., 2013). De plus, les régions montagneuses qui constituent principalement le pays, sont aussi les régions les plus touchées par les processus naturels. En effet, la topographie, la pente et l'altitude transforme souvent les variations climatiques en aléas, lesquels représentent alors des risques pour les populations, souvent situées en aval (Reynard, 2009). De nombreuses conséquences régionales résultent de ces vagues de sécheresse, telles que le dessèchement du sol, la baisse du niveau des nappes phréatiques, la baisse du niveau ou l'assèchement de certains cours d'eau, la fonte importante des glaciers, augmentant le niveau des rivières alpines (WSL, 2013). La diminution de la quantité d'eau disponible a des conséquences sur les forêts en limitant la croissance des arbres à basse altitude, ce qui entrainerait sur le long terme une réduction des volumes de bois. En Suisse, la sécheresse a un impact très important sur les forêts. Une sécheresse

de quelques jours suffit à augmenter le risque des feux de forêts (Zappa et al., 2014), d'où l'importance d'un monitoring zonal de la végétation pour prévenir ces risques.

La sécheresse de 2003 a particulièrement affecté les ressources en eau et a montré la vulnérabilité de certaines régions, notamment la Gruyère, qui est généralement réputée riche en eau. Elles sont une menace importante quant à l'économie du pays, en diminuant les rendements de l'économie forestière, de la gestion des eaux, ou du tourisme hivernal. De plus, le stress hydrique cause une augmentation des maladies forestières, et fragilise les forêts face au risque des incendies, lesquels diminuent considérablement les rendements liés au bois forestier. La forêt valaisanne, au-dessus de Loèche a souffert d'un incendie de forêt ravageant plus de 300 hectares, faisant de cet incendie le plus important en Valais depuis les cent dernières années. Les forêts constituent une protection face aux aléas naturels et la résultante de la fragilisation des forêts a des conséquences au niveau des dangers naturels (WSL, 2013).

Enfin la sécheresse en Suisse, n'est pas qu'un problème estival et les retombées économiques sont importante en hiver également, comme l'a montré l'hiver de 2010/2011. En effet, l'assèchement des zones de montagnes comprend également la réduction des ressources hydriques hivernales, c'est-à-dire, la cryosphère. D'une part, les périodes de sécheresses provoquent la fonte des glaciers et du pergélisol, et d'autre part, le manque de précipitation affecte également les quantités de neige en hiver. La neige est une ressource pour la Suisse, d'un point de vue économique en hiver pour les stations de ski et le tourisme qui y est lié, et d'un point de vue énergétique et hydraulique en été lorsqu'elle fond et approvisionne les nappes phréatiques, torrents et autres cours d'eau (Reynard, 2009). Une étude du WSL à Davos montre qu'un déficit de neige en hiver a causé une perte de revenu de 10% au niveau régional. Cette même année, suivant l'hiver sec de 2010/2011, la production énergétique hydraulique a connu une baisse de rendement de 15 à 20% en Argovie (WSL, 2013).

2.3. Le monitoring de la sécheresse

L'utilisation des satellites dans l'identification des sécheresses permet d'éviter de nombreux obstacles que l'acquisition des données météorologiques soulève. Plusieurs indices ont été développés pour le monitoring des sécheresses et sont répertoriées sur le site de l'Organisation Mondiale de Météorologie (OMM), sur la page de l'IDMP (Integrated Drought Management

Programme)¹. L'un des principaux, retrouvé dans de nombreuses études et également utilisé en Suisse, est le SPI (Standardized Precipitation Index). Cet indice calcule la déviation, ou les anomalies, des précipitations par rapport à une moyenne calculée sur une longue période de référence. Un indice négatif indique donc un déficit des précipitations par rapport à la médiane à long terme et inversement, un indice positif indique un excédent dans les précipitations. Deux autres indices sont également utilisés pour le monitoring de la sécheresse : le FAPAR (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation) et le NDWI (Normalized Difference Water Index). Le FAPAR est utilisé comme indicateur du stress hydrique, car celui-ci affecte la végétation et sa façon d'intercepter le rayonnement solaire, tandis que le NDWI indique la teneur en eau de la végétation et est ainsi également un indicateur du stress hydrique.

La sécheresse en Suisse est détectable par plusieurs indicateurs tels que : la température, qui augmente l'évaporation de l'eau, les précipitations, le débit des rivières, les niveaux d'eau souterraines et des lacs, l'humidité du sol, la couverture neigeuse, ainsi que le niveau de sécheresse des forêts (Zappa et al., 2014). Elle est l'événement climatique le plus dévastateur, et souvent le moins reconnu, ce qui crée un manque dans la recherche et la prévention (Horion et al., 2012). Étant un phénomène relativement récent en Suisse (depuis les dernières décennies) et n'impactant actuellement pas le territoire de manière drastique, les techniques de contrôle et d'évaluation des sécheresses restent relativement faibles. L'organisme principal se chargeant de cela au niveau national est l'Office Fédéral de la Climatologie et de la Météorologie (MétéoSuisse), qui recense les variables météorologiques suisses. L'OFEV (l'Office Fédéral de l'Environnement) s'occupe quant à lui des variables hydrologiques tandis que le WSL (Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research), relève différentes variables environnementales telles que la couverture neigeuse (Acácio et al., 2013).

Une plateforme expérimentale a été lancée en 2013, suite à une sécheresse importante, www.drought.ch, où il est possible d'obtenir des informations en temps réel quant au niveau de sécheresse sur toute la Suisse. Cette plateforme internet est un prototype visant à transmettre des observations en direct pour des utilisateurs publics. Les indicateurs suivants ont été considérés comme pertinents pour la détermination de cas de sécheresses : l'humidité du sol, l'humidité du couvert forestier, le débit des rivières, les nappes phréatiques, le niveau des plans d'eau (lacs, rivières), la température de l'eau, l'évapotranspiration, l'humidité de l'air, la température

¹ <https://www.droughtmanagement.info/indices/>

atmosphérique, les précipitations, la vitesse du vent, la profondeur de la neige et le couvert de la neige. (Acácio et al., 2013).

Data category	Authority in charge	Frequency of data collection	Means for data exchange
Meteorological observations and related products.	Federal Office of Meteorology and Climatology (MeteoSwiss)	Hourly to annual	Several means of data exchange, depending on legislation and institution policy (mostly without charge for research, public use)
Hydrological variables	Federal office of the Environment (FOEN)	Hourly to annual	Several means of data exchange, depending on legislation and institution policy (normally without charge)
Some environmental variables (snow depth, -cover, -water equivalent; forest soil pressure; discharge, groundwater at some stations)	Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL)	Hourly to annual	Several means of data exchange, depending on legislation and institution policy (upon request, normally without charge)
Soil Moisture	Swiss Soil Moisture Experiment (SwissSMEX) that is hosted by the ETH in Zürich	Hourly to monthly	Data available upon request

Figure 4 : Organismes suisses collectant des variables environnementales utiles à l'analyse des sécheresses (Acácio et al., 2013).

Le tableau ci-dessus (Figure 4) résume les différents organismes suisses s'occupant de la collection des variables environnementales utilisés comme indicateur de la sécheresse (Acácio et al., 2013).

Malgré les efforts mis en place et les organismes recensant les variations environnementales en Suisse, de nombreuses études présentent la nécessité d'une analyse régionale afin de pouvoir adapter les politiques cantonales et régionales (Acácio et al., 2013). En effet, la Suisse est géographiquement divisée en six régions fondamentalement différentes au niveau topographique et dont l'occupation du sol varie également. Il serait donc intéressant de se pencher sur la manière dont ces régions sont impactées séparément par les épisodes de sécheresse. De plus, les recherches soulèvent la nécessité d'une analyse non seulement météorologique, mais également spatiale. En effet, la télédétection permet d'obtenir et de distribuer des informations sur de larges zones rapidement grâce aux images satellites. Elle constitue ainsi une méthode efficace et économique pour les programmes d'observation des sécheresses. Les données de télédétection fournissent des mesures spatiales régulièrement mises à jour (Horion et al., 2012). La combinaison de données satellitaires sous forme de cartes et de données tabulaires fournit une

nouvelle perception dans la représentation des données environnementales et a un potentiel important d'identification, de surveillance et d'évaluation des risques liés aux sécheresses (Jeyaseelan, 2003).

2.4. Questions de recherche

Les épisodes de sécheresse sont de plus en plus fréquents en Suisse et font dorénavant partie de l'agenda politique. Cependant, étant un phénomène relativement lent, il est possible de les prévoir et d'en effectuer un suivi afin de mieux prévenir ces événements (Zappa et al., 2014). De plus, de nombreuses études relèvent l'importance d'une surveillance des sécheresses afin d'adapter les mesures politiques aux futurs aléas climatiques. En effet, les effets régionaux doivent être définis ainsi que leurs conséquences sur les ressources en eau notamment, afin de mieux prévenir les périodes de sécheresses (Reynard, 2009).

Au travers de ce travail, nous allons donc tenter de montrer visuellement les tendances des sécheresses en Suisse. Nous allons pour ce faire utiliser un indicateur de la teneur en eau contenue dans la végétation, le NDWI (Normalized Difference Water Index). Nous tenterons de répondre aux questions de recherche suivante :

- Peut-on observer une accentuation de la sécheresse en Suisse depuis 1984 ?
- Quelles sont les tendances à l'échelle nationale, cantonale et biogéographiques ?
- En quoi les outils géomatiques permettent-ils une identification tendancielle des risques ?

Nous effectuerons donc dans un premier temps des statistiques zonales à plusieurs échelles afin de rendre compte des divergences, et nous allons tester nos variables statistiquement afin de vérifier la robustesse de notre analyse.

3. Données et méthodes

3.1. Outils de télédétection

3.1.1. La télédétection et les satellites Landsat

La télédétection est une méthode d'acquisition d'informations sur des objets situés à distance, c'est-à-dire, sans contact entre l'instrument de mesure utilisé et l'objet d'analyse. Grâce à la répétition d'acquisition des données, la télédétection permet une analyse temporelle, c'est-à-dire, l'étude d'un phénomène sur un site donné à des jours ou des époques différentes. Une nouvelle discipline est donc née de cette méthode : la télédétection du changement, qui consiste en

l'identification d'un changement d'état d'un objet, d'un lieu ou d'un phénomène grâce à son observation dans le temps. Ainsi, la télédétection du changement permet le suivi de l'évolution de la surface terrestre et l'analyse des phénomènes dynamique (Mas, 2000).

La télédétection utilise les propriétés du rayonnement électromagnétique et grâce aux différentes bandes multispectrales des satellites, il est possible de déterminer la couverture terrestre. Le rayonnement électromagnétique est une forme de propagation de l'énergie et existe pour une large gamme de fréquences ou de longueurs d'ondes, lesquelles constituent le spectre électromagnétique. Ces rayonnements constituent des bandes qui sont alors capturées par l'imagerie satellite et redistribuée sous trois canaux : rouge, vert et bleu (Kergomard, 1990).

Sensor	Band number	Band name	Wavelength (μm)	Resolution (m)	Band Applications
LANDSAT 5					
TM	1	Visible Blue	0.45 - 0.52	30	Bathymetric mapping, distinguishing soil from vegetation, and deciduous from coniferous vegetation
TM	2	Visible Green	0.52 - 0.60	30	Emphasizes peak vegetation, which is useful for assessing plant vigor
TM	3	Visible Red	0.63 - 0.69	30	Discriminates vegetation slopes
TM	4	NIR	0.76 - 0.90	30	Emphasizes biomass content and shorelines
TM	5	SWIR 1	1.55 - 1.75	30	Discriminates moisture content of soil and vegetation; penetrates thin clouds
TM	6	Thermal	10.40 - 12.50	120	Thermal mapping and estimated soil moisture
TM	7	SWIR 2	2.08 - 2.35	30	Hydrothermally altered rocks associated with mineral deposits
LANDSAT 8					
OLI	1	Coastal	0.43 - 0.45	30	Coastal and aerosol studies
OLI	2	Blue	0.45 - 0.51	30	Bathymetric mapping, distinguishing soil from vegetation, and deciduous from coniferous vegetation
OLI	3	Green	0.53 - 0.59	30	Emphasizes peak vegetation, which is useful for assessing plant vigor
OLI	4	Red	0.63 - 0.67	30	Discriminates vegetation slopes
OLI	5	NIR	0.85 - 0.88	30	Emphasizes biomass content and shorelines
OLI	6	SWIR 1	1.57 - 1.65	30	Discriminates moisture content of soil and vegetation; penetrates thin clouds
OLI	7	SWIR 2	2.11 - 2.29	30	Improved ability to track moisture content of soil and vegetation and thin cloud penetration
OLI	8	Pan	0.50 - 0.68	15	15 meter resolution, sharper image definition
OLI	9	Cirrus	1.36 - 1.38	30	Improved detection of cirrus cloud contamination
TIRS	10	TIRS 1	10.60 - 11.19	30 (100)	100 meter resolution, thermal mapping and estimated soil moisture
TIRS	11	TIRS 2	11.50 - 12.51	30 (100)	100 meter resolution, thermal mapping and estimated soil moisture

Figure 5 : Description des bandes pour les satellites Landsat 5 et Landsat 8

(URL : (Landsat 8) <https://eos.com/landsat-8/>

(Landsat 5) <https://eos.com/landsat-5-tm/>; <https://eos.com/landsat-5-mss/>)

Sentinel et Landsat sont les principaux satellites et

leurs images sont disponibles sur différentes plateformes. Le programme Landsat est le premier programme de reconnaissance spatial civil, lancé par William Pecora, directeur de la US Geological Survey (USGS). Le premier satellite Landsat a été lancé en 1972. Ce satellite a ouvert l'époque de la télédétection moderne. Aujourd'hui les satellites Landsat 7 et 8 assurent une capture d'images satellites en continu. Les capteurs sont constamment développés de même que la résolution spatiale est accrue avec la technologie (Kergomard, 1990). Le satellite Landsat 9 est actuellement en préparation et sera lancé en 2021.

En 1984, le satellite Landsat 5 a été lancé par la NASA et comportait deux instruments : le Multispectral Scanner System (MSS) et le Thematic Mapper (TM). Il obtenait des images d'environ 180 km² et comportait 7 bandes spectrales (Figure 5). Il a été mis hors service en 2013. Le satellite Landsat 8 a été mis en orbite conjointement avec la Nasa et le USGS en 2013. Il possède deux capteurs de plus que les satellites précédents : le « Operational Land Imager » (OLI) et le « Thermal Infrared Sensor » (TIRS) et obtient 740 scènes par jour. La couverture des sols est fournie par ces deux capteurs avec une précision à 15 m (avec la bande panchromatique), à 30 m (avec les bandes visibles, Proche Infrarouge (NIR), Infrarouge courte portée (SWIR1 et SWIR2)], ainsi qu'à 100 m (avec la bande thermique). La Figure 5 ci-dessus décrit les bandes disponibles de Landsat 8².

3.1.2. « Normalized Difference Water Index » (NDWI)

Durant les sécheresses, la végétation est affectée par le manque d'eau. Le NDWI est un indicateur de télédétection qui a été proposé pour l'analyse des sécheresses, car il mesure les molécules d'eau liquides contenues dans la végétation, lesquelles interagissent avec les radiations solaires (Gao, 1996). En effet, le NDWI utilise les canaux NIR (Near Infra-Red) et SWIR (Short Wave Infra Red), qui se trouvent respectivement dans les longueurs d'ondes de 0.86 et 1.24 µm. La capacité d'absorption de l'eau à l'état liquide étant plus importante dans le SWIR que dans le NIR, les parcelles du sol contenant plus d'eau auront des valeurs NDWI plus importantes. A l'inverse, une petite valeur NDWI indique un stress hydrique dans la végétation (EDO - European Drought Observatory, 2011; Jayawardhana & Chathurange, 2020).

Le NDWI est défini selon l'équation suivante :

$$NDWI = \left(\frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \right)$$

Les bandes NIR et SWIR utilisées pour le calcul du NDWI sont respectivement les bandes 4 et 2 pour Landsat 5 et les bandes 5 et 3 pour Landsat 8. Ainsi le NDWI est calculé de la manière suivante pour chaque satellite :

² Plus d'informations sur : <https://eos.com/landsat-8/> (Landsat 8) <https://eos.com/landsat-5-tm/>; <https://eos.com/landsat-5-mss/> (Landsat 5)

Landsat 5, $NDWI = (Band\ 4 - Band\ 2) / (Band\ 4 + Band\ 2)$.
 Landsat 8, $NDWI = (Band\ 5 - Band\ 3) / (Band\ 5 + Band\ 3)$

Les valeurs du NDWI sont obtenues dans un intervalle de -1 à +1, mais la bande SWIR donne des informations sur la contenance en eau des plantes ainsi que l'humidité du sol, ce qui donne l'opportunité de détecter les phénomènes de stress hydrique et de suivre les impacts sur la végétation (Horion et al., 2005).

Les valeurs NDWI peuvent être classées en fonction du degré de sécheresse de la végétation, rendant ainsi les valeurs plus facilement interprétables. Pour ce présent travail, nous utilisons la classification de Gulácsi and Kovács (2015) (Figure 6).

NDWI categories	Description
$0.7 \leq NDWI$	very high moisture content
$0.6 \leq NDWI < 0.7$	high moisture content
$0.5 \leq NDWI < 0.6$	moderate moisture content
$0.4 \leq NDWI < 0.5$	low moisture content
$0.3 \leq NDWI < 0.4$	weak drought
$0.2 \leq NDWI < 0.3$	moderate drought
$0 \leq NDWI < 0.2$	strong drought
$NDWI < 0$	very strong drought

Figure 6 : Classification du NDWI par Gulácsi and Kovács (2015)

Un autre outil utile pour l'analyse des sécheresses est de calculer l'anomalie du NDWI, qui représente les anomalies par rapport à une période de référence. Il permet ainsi de quantifier la déviation de la contenance en eau de la végétation par rapport à une condition considérée comme « normale ».

L'anomalie du NDWI est calculée selon la formule suivante :

$$NDWI\ anomaly_t = \frac{X_t - \bar{X}}{\delta}$$

Où l'anomalie d'une année est calculée par rapport à une année de référence. Ainsi, X_t représente l'année d'étude, \bar{X} l'année de référence et δ représente l'écart-type. L'anomalie est donnée en unités d'écart-type et va généralement de -4 à +4.

La figure ci-contre (Figure 7) montre l'échelle européenne des anomalies. Ainsi, les valeurs en dessous de -1 sont anormalement basses par rapport à l'année de référence tandis que les valeurs au-dessus de +1 sont anormalement élevées par rapport à l'année de référence (EDO - European Drought Observatory, 2011).

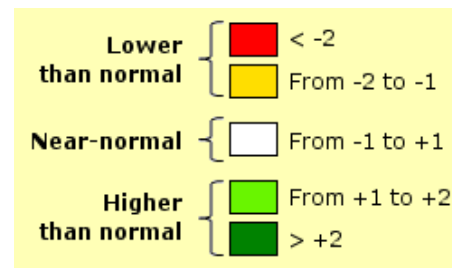


Figure 7 : Classification des valeurs d'anomalies du NDWI (EDO - European Drought Observatory, 2011)

3.1.3. Statistiques zonales

L'outil de statistiques zonale calcule des valeurs d'un raster au sein d'une zone déterminée par une autre couche raster ou vecteur. La zone est définie comme un ensemble de surfaces en entrées qui possèdent la même valeur. Les valeurs en entrées doivent être de même résolution, sinon un ré-échantillonnage interne est effectué.

Nous allons, au cours de ce travail, utiliser cet outil afin d'obtenir, pour la suisse, pour chaque canton ainsi que pour chaque zone biogéographique une valeur statistique du NDWI. Ainsi, les statistiques zonales permettent d'obtenir les valeurs suivantes pour chaque zone³ :

- Minimum : détermine la plus petite valeur parmi toutes les cellules de raster en entrée correspondant à la zone en sortie
- Maximum : détermine la plus grande valeur parmi toutes les cellules de raster en entrée correspondant à la zone en sortie
- Mean : calcule la moyenne des cellules de raster en entrée correspondant à la zone en sortie
- Majority : détermine la valeur qui se produit le plus souvent parmi les valeurs du raster en entrée correspondant à la zone en sortie
- Minority : détermine la valeur qui se produit le plus souvent parmi les valeurs du raster en entrée correspondant à la zone en sortie
- Median : détermine la valeur médiane parmi toutes les cellules de raster en entrée correspondant à la zone en sortie
- Range : calcule l'intervalle entre la plus petite et la plus grande valeur parmi toutes les cellules de raster en entrée correspondant à la zone en sortie
- Std : calcule l'écart-type de toutes les cellules du raster en entrée correspondant à la zone en sortie
- Variety : calcule le nombre de valeurs uniques pour toutes les cellules du raster en entrée correspondant à la zone en sortie

Cet outil est particulièrement utile pour synthétiser l'information d'un raster au sein d'une zone d'étude.

³ Plus d'informations sur : <https://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/zonal-statistics.htm> et https://docs.qgis.org/2.8/en/docs/user_manual/processing_algs/qgis/raster_tools/zonalstatistics.html

3.1.4. Calculatrice Raster

La calculatrice raster est un outil de l'onglet raster permettant d'effectuer des calculs sur des rasters en créant un nouveau raster contenant les résultats du calcul. Ainsi il nous est possible, à partir de données mensuelles de précipitations et de températures, de créer une moyenne sur trois mois afin d'obtenir des valeurs saisonnières.

3.2. Données et traitements effectués

Le logiciel utilisé pour ce présent travail est QGIS 3.10. Les données utilisées sont constituées de deux jeux de données publiés par le Swiss Data Cube, mis en ligne sur la plateforme Yareta⁴. L'un contient les moyennes annuelles du NDWI pour la Suisse, et l'autre les moyennes saisonnières du NDWI pour la Suisse. Ces deux jeux de données sont des séries temporelles issues des satellites Landsat 5 Thematic Mapper (TM) and Landsat 8 Operational Land Imager (OLI). Leur résolution spatiale est de $\sim 0.0014 \text{ km}^2$ (37 x 37 m).

Pour le jeu de donnée saisonnières, les saisons correspondent aux mois suivants :

- Printemps : Mars – Avril – Mai (_MAM)
- Été : Juin – Juillet – Aout (_JJA)
- Automne : Septembre – Octobre – Novembre (_SON)
- Hiver : Décembre – Janvier – Février (_DJF)

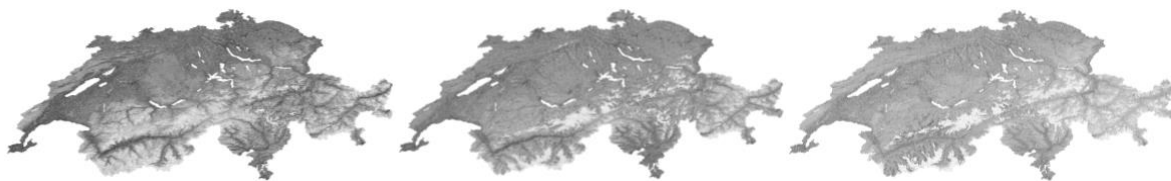


Figure 8 Rasters des NDWI annuels. De gauche à droite : 1984, 1997 et 2018.

⁴ Moyenne saisonnière : <https://yareta.unige.ch/frontend/archive/54a05fb3-014e-45b5-913b-763065616c58>

Moyenne annuelle : <https://yareta.unige.ch/frontend/archive/1009052b-7268-44e8-bca9-624255135464>

De plus, trois couches vectorielles contenant (1) les limites nationales suisse, (2) les limites administratives cantonales et (3) les limites des zones biogéographiques, ont été téléchargées depuis le catalogue [geocat.ch](https://www.geocat.ch)⁵. Nous avons, dans un premier temps changé la projection des couches vectorielles en WSG84, afin qu'elles correspondent à nos couches raster.



Figure 9 Couches vectorielles contenant (de gauche à droite) les frontières nationales, cantonales et biorégionales.

Dans un deuxième temps, l'outil « Statistiques zonales » a été utilisé afin de calculer les moyennes des valeurs raster en fonctions de nos trois couches vectorielles, c'est-à-dire, pour la suisse, par cantons et par zones biogéographiques. Nous obtenons ainsi des moyennes pour chacune des entités de ces couches. Puis, les couches ont été exportées sur Excel pour réaliser une partie du traitement, tels que les tableaux et graphiques. La représentation des données cartographiques s'est faite en changeant la symbologie sur QGIS et avec l'outil de mise en page du logiciel.

Dans un troisième temps, et dans le but de renforcer notre analyse cartographique du NDWI, nous avons choisi d'effectuer une analyse statistique des corrélations entre NDWI et températures/précipitations. Afin d'analyser les liens entre températures, précipitations et valeurs NDWI, nous avons téléchargé les données météorologiques depuis le site WorldClim⁶. Ce site fournit des données à l'échelle mondiale, de 1960 à 2018, à une résolution de $\sim 21 \text{ km}^2$ ($4600 \times 4600 \text{ m}$). Les données sont téléchargées depuis le CRU-TS-4.03, fournies par le Climatic Research Unit, de l'Université de East Anglia. Ainsi, nous avons pu obtenir les données des années 1980 à 2018. Les données étant disponibles par mois, nous avons, dans un premier temps utilisé l'outil calculatrice raster afin d'établir des moyennes par saison. Nous avons ensuite effectué des statistiques zonales par zones biogéographiques, avant d'exporter les tables d'attributs pour créer des tableaux Excel que nous avons ensuite transféré sur RStudio afin d'établir les corrélations. Par

⁵ <https://www.geocat.ch/geonetwork/srv/fre/catalog.search#/home>

⁶ CRU-TS 4.03 (Harris et al., 2014) downscaled with WorldClim 2.1 (Fick and Hijmans, 2017). Données disponibles sur : <https://www.worldclim.org/data/monthlywth.html>

souci de rapidité, nous n'avons pas ré-effectué cette opération pour toute la Suisse, mais avons simplement effectué une moyenne des biorégions pour obtenir nos données suisses.

4. Résultats

4.1. Résultats des statistiques zonales

Après avoir effectué des statistiques zonales avec les moyennes annuelles du NDWI, nous obtenons des résultats à l'échelle nationale, cantonale et au niveau des zones biogéographiques.

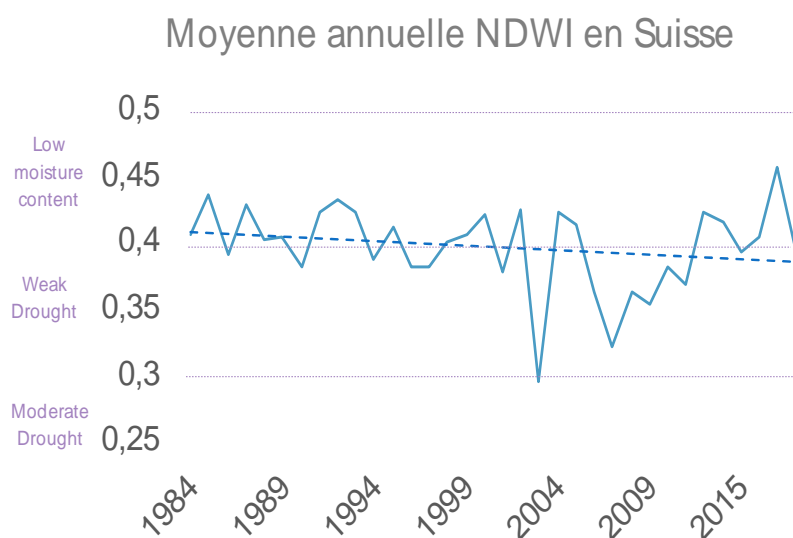


Figure 10 : Moyenne annuelle du NDWI en Suisse

L'échelle nationale permet de voir une tendance de baisse du NDWI (Figure 10). De plus, les moyennes annuelles rendent compte des épisodes de sécheresse importants, comme en témoigne les chutes drastiques en 2003 et en 2007. Au contraire, les années 2013 et 2017 présentent une hausse du NDWI à l'encontre de cette tendance de baisse qui rehausse la tendance générale du graphique. Selon la classification établie par Gulácsi and Kovács (2015), les valeurs du NDWI passent d'une faible humidité à une légère sécheresse entre le début de notre étude, en 1984, et la fin, en 2018.

A l'échelle cantonale, les tendances annuelles présentent des résultats très différents (Figure 11). Certains cantons sont touchés par une baisse du NDWI comme l'Argovie, Fribourg, Glaris, Nidwald, Obwald, Schaffhouse, le Tessin, la Thurgovie et Vaud. D'autres présentent des changements relativement faibles et deux cantons montrent une augmentation des valeurs du NDWI : Zoug et Appenzell Rhodes-Extérieures.

Enfin, l'échelle des zones biogéographiques montre une tendance généralisée de baisse du NDWI. En effet, les moyennes des dix premières années versus les moyennes des dix dernières années de notre étude montrent une diminution du NDWI de -1,13% à -3,47%. La région la plus touchée est celle du sud des Alpes (Figure 11 et 12).

Le tableau ci-contre (Figure 11) présente les moyennes des cinq premières années ainsi que de cinq dernières années et leur différence. Ainsi, il est possible de quantifier le NDWI en calculant le pourcentage d'augmentation ou de diminution de celui-ci. Les moyennes annuelles montrent une diminution du NDWI de 4,46 % dans les Alpes sud, de 1,78% dans les alpes occidentales et de 0,15% dans les alpes du nord. En revanche, les moyennes annuelles du NDWI augmentent de 0,7 % dans le Jura, de 2,73% dans le sud des Alpes et de 1,44 % dans le plateau.

Echelle	Nom	Moy. 1984-1994	Moy. 2008-2018	% NDWI
Nationale	Suisse	0,41	0,39	-1,5996
Cantonale	Appenzell Rhodes-Extérieures	0,39	0,40	1,05
	Appenzell Rhodes-Intérieures	0,30	0,29	-0,66
	Argovie	0,19	0,15	-3,29
	Bâle-Campagne	0,31	0,30	-1,14
	Bâle-Ville	0,17	0,13	-4,03
	Berne	0,34	0,33	-1,27
	Fribourg	0,29	0,27	-2,33
	Genève	0,21	0,21	-0,36
	Glaris	0,51	0,47	-3,75
	Grisons	0,49	0,47	-2,20
	Jura	0,34	0,32	-1,16
	Lucerne	0,36	0,36	-0,06
	Neuchâtel	0,36	0,35	-0,79
	Nidwald	0,43	0,40	-3,22
	Obwald	0,49	0,46	-3,41
	Saint-Gall	0,37	0,36	-0,96
	Schaffhouse	0,29	0,27	-1,57
	Schwytz	0,44	0,42	-2,47
	Soleure	0,31	0,30	-0,80
	Tessin	0,37	0,33	-3,64
Thurgovie	0,26	0,23	-3,32	
Uri	0,55	0,52	-2,89	
Valais	0,50	0,49	-1,25	
Vaud	0,29	0,27	-2,07	
Zoug	0,34	0,34	0,39	
Zurich	0,28	0,27	-0,95	
Biorégionale	Jura	0,34	0,33	-1,13
	Versant sud des Alpes	0,39	0,35	-3,47
	Versant Nord des Alpes	0,47	0,44	-2,43
	Alpes centrales occidentales	0,51	0,50	-1,14
	Plateau	0,29	0,28	-1,16
Alpes centrales orientales	0,51	0,49	-1,95	

Figure 11 : Moyennes des statistiques zonales annuelles en fonction des différentes échelles pour les 10 premières années (1984 – 1994) et les 10 dernières (2008 – 2018) et calcul du pourcentage du NDWI en fonction de ces deux périodes selon la manière suivante :
 $(\text{Moyenne } 1984 - 1994) - (\text{Moyenne } 2008 - 2018) * 100$

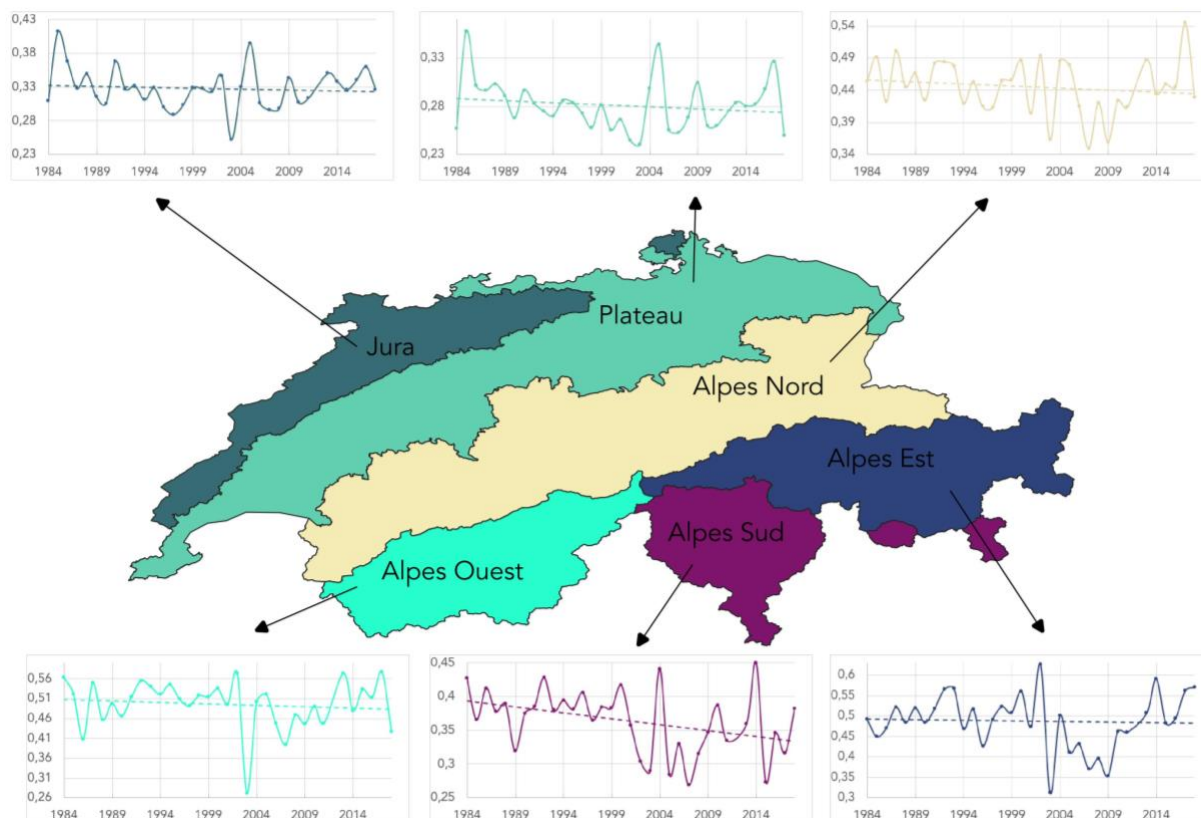


Figure 12 : Evolution du NDWI par biorégions. Résultats des statistiques zonales annuelles.

La figure ci-dessus (Figure 12) présente les six biorégions suisses ainsi que les graphiques correspondant de l'évolution du NDWI de 1984 à 2018. Cette figure permet de visualiser les tendances au niveau des biorégions et d'identifier les années les plus marquantes pour celles-ci. En effet, au niveau des zones biogéographiques, le NDWI n'est pas le même. Par exemple, une baisse très importante du NDWI est visible en 2015 dans le sud des alpes, alors que le NDWI présente une légère augmentation durant la même année dans les alpes occidentales et nord.

Une étude plus approfondie du NDWI saisonnier paraît donc essentiel pour mieux comprendre les effets variations climatiques au niveau de la végétation. La figure ci-dessous (Figure 13) présente le NDWI de 1984 à 2018 au niveau suisse par saison. En bleu foncé est représenté les mois de décembre, janvier, février ; en gris les mois de mars, avril et mai, en jaune les mois de juin, juillet, août et en bleu clair, septembre, octobre et novembre. Les mois de décembre, janvier et février, soit la période hivernale se situe dans la catégorie « low moisture content », mais possèdent de très grandes disparités en fonction des années. Au printemps, les valeurs de NDWI avaient tendance à se trouver dans la catégorie « low moisture content » dans les années 80-90 et se situent actuellement dans la catégorie « weak drought ». Les saisons estivale et automnale suivent la même tendance, et se situent dans la catégorie « moderate drought ». Les variations

estivales (en jaunes) semblent moins importantes que pour les autres saisons. Ce graphique permet notamment de pondérer la sécheresse de 2003 en la remettant en perspective avec les autres saisons et années. Un pic particulièrement important témoigne d'une baisse de NDWI conséquente durant les mois de septembre-octobre-novembre de l'année 2000, de même pour l'hiver et le printemps 2001. Le record du NDWI le plus bas pour la Suisse a donc été atteint en automne 2001, avec une valeur de 0,11 plaçant ces mois dans une sécheresse forte à très forte.

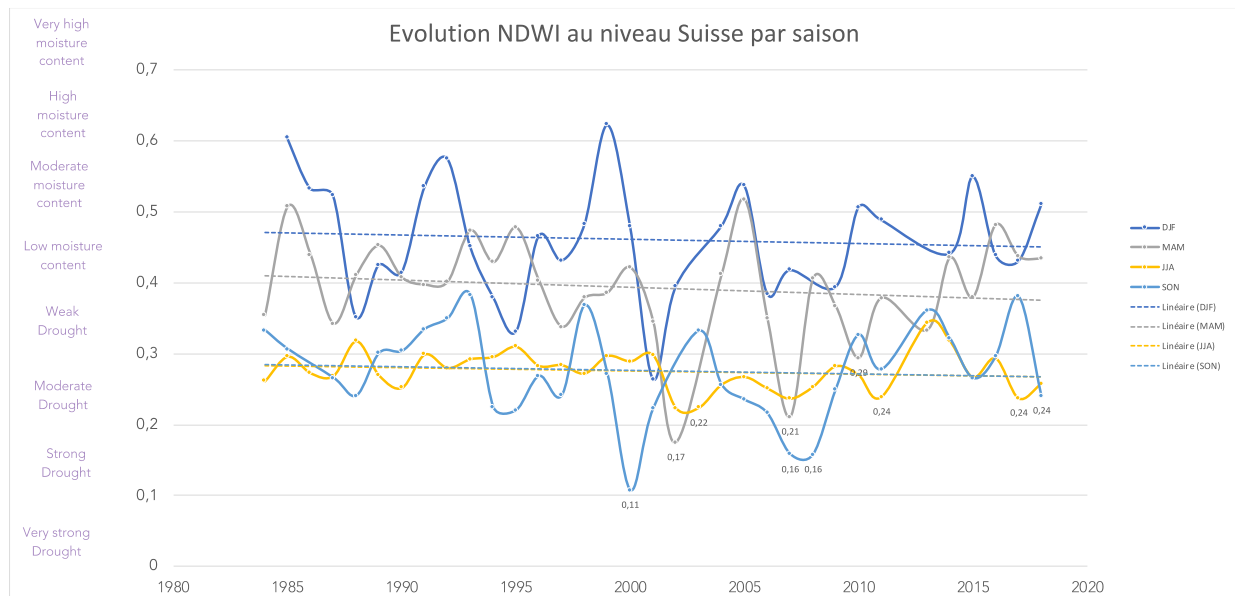


Figure 13 : Évolution du NDWI saisonnier dans toute la Suisse. Les classes figurant à gauche en violet correspondent aux classes établies par (Gulácsi & Kovács, 2015)

Il nous a donc semblé intéressant de se pencher sur les zones biogéographiques par saison et nous avons proposé plusieurs représentations de séries temporelles (Annexe 2 et 3). Nous avons toutefois retenue une image contenant les cartes de 1985 à 2018 pour chaque saison (Figure 14 et 15). Ainsi, les comparaisons temporelles sont plus faciles. Les années 1985 et 1986 présentent un NDWI haut (situé entre 0.57 et 0.47) en hiver ainsi qu'au printemps et un NDWI situé entre 0.28 et 0.31 en été et en novembre (Annexe 3).

On peut percevoir une évolution temporelle, qui n'affecte pas uniquement les mois de juin, juillet et août. En effet, les changements dans la teneur en eau de la végétation sont percevables sur toute l'année. En 1985 et 1986, toutes les zones biogéographiques sont bleu turquoise (NDWI ~0,7), tandis qu'on voit nettement une divergence en à partir de 1988 sur les Plateau et le Jura (NDWI~0,2). Les dernières années, de 2015 à 2018, présente une homogénéisation dans les tons (entre 0,4 et 0,6) avec une divergence moins marquée par région, mais les tons rejoignent le bleu-vert, indiquant un NDWI plus faible que celui des années 1985-1986, dans chaque région.

La saison printanière (mars-avril-mai) présente une divergence importante entre d'une part, le Plateau et le Jura, et d'autre part, les Alpes. Le Plateau et le Jura ont un NDWI se situant autour de 0.3 tandis que les Alpes autour de 0.6-0.7 (en 1985). Les variations d'une année à l'autre sont importantes, ce qui rend l'identification d'une tendance générale difficile. Les années particulièrement marquées par un réchauffement à cette saison sont 2001, 2002 et 2007. Durant ces années, on peut observer une homogénéisation du NDWI à l'échelle nationale, notamment en 2007, où le NDWI se situe autour de 0.3 pour toutes les régions. Ainsi, les Alpes connaissent une baisse du NDWI bien plus importante en cas de sécheresse. Les Alpes du sud se démarquent également du reste des Alpes, avec un NDWI plus faible de manière générale que les Alpes Nord, Est et Ouest. En effet, il s'agit souvent de la région la plus touchée par une baisse de NDWI, comme en 2002, 2005, 2006, 2008, 2013, 2015, 2018. Au printemps 2015, le NDWI des Alpes du Sud (NDWI=0.25) a rejoint les valeurs du Plateau et du Jura (NDWI=0.25), tandis que les Alpes orientales, occidentales et nord ont un NDWI se situant entre 0.44 et 0.59.

La saison estivale n'est pas la plus marquée par une baisse du NDWI, mais les épisodes de sécheresses sont importants. Étant une saison avec un NDWI plutôt bas initialement, le changement est moins visible sur ces cartes. Cela dit, les valeurs se situent en 1984 dans un intervalle entre 0.22 et 0.35 et passent en 2018 entre 0.18 et 0.30. Durant cette saison, la région la plus touchée est les Alpes orientales. En effet, sur les 34 années d'études elle atteint le NDWI minimum 25 fois parmi les zones biogéographiques.

En automne, la baisse du NDWI touche la plupart des zones biogéographiques. Il est difficile d'établir une tendance générale pour chaque zone biogéographique, car le NDWI varie d'une année à l'autre. En 2000, toutes les zones connaissent une baisse importante du NDWI, avec des valeurs se situant entre 0.02 (dans le Jura) et 0.15 (dans les Alpes Sud) ; en 2007 la zone principalement touchée a été les Alpes occidentales (NDWI = 0.09) ; tandis que l'année suivante, c'est le sud des Alpes qui a connu une sécheresse très importante avec une valeur du NDWI atteignant 0.03.

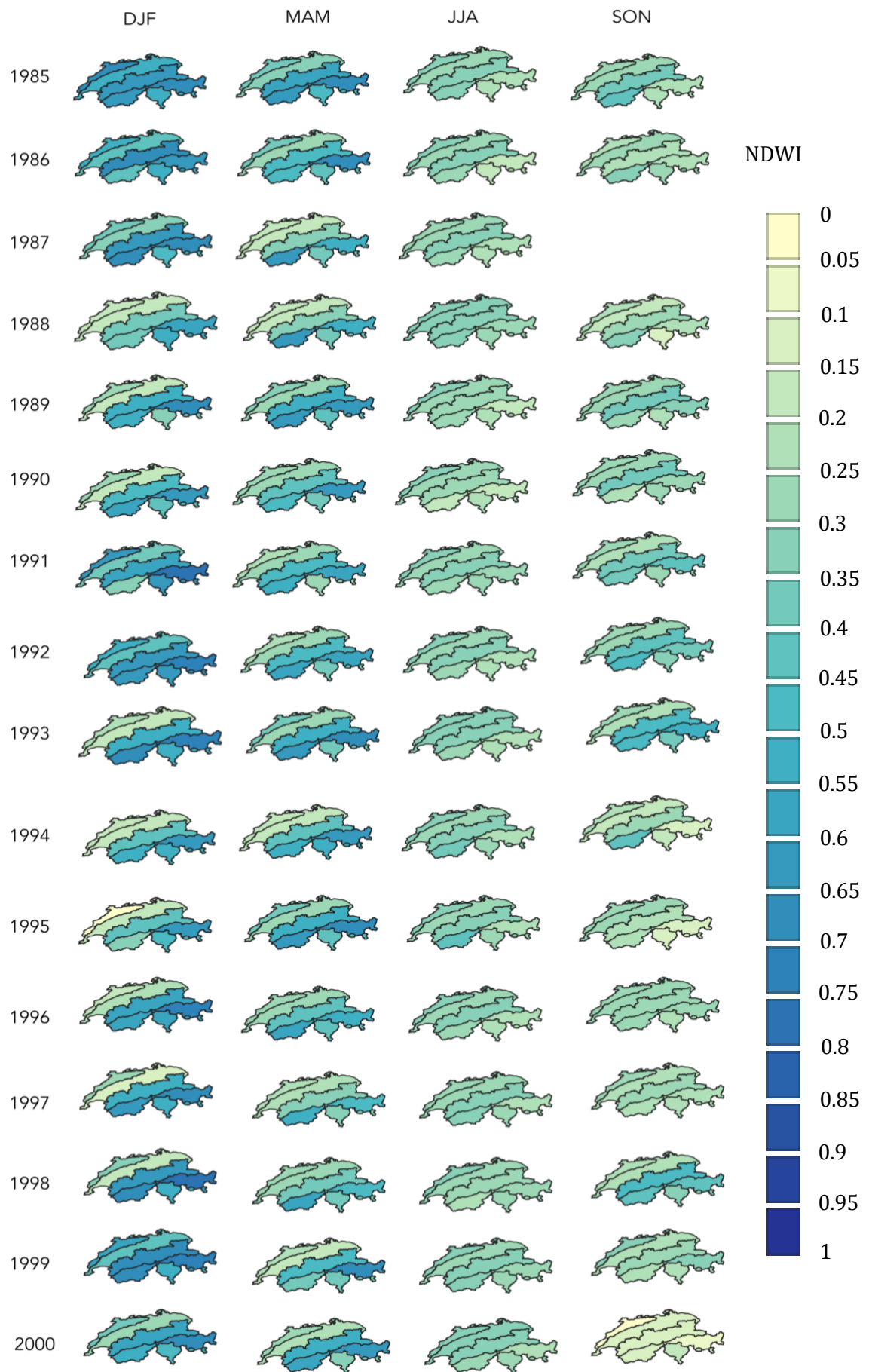


Figure 14 : Évolution temporelle du NDWI par saison de 1985 à 2000.

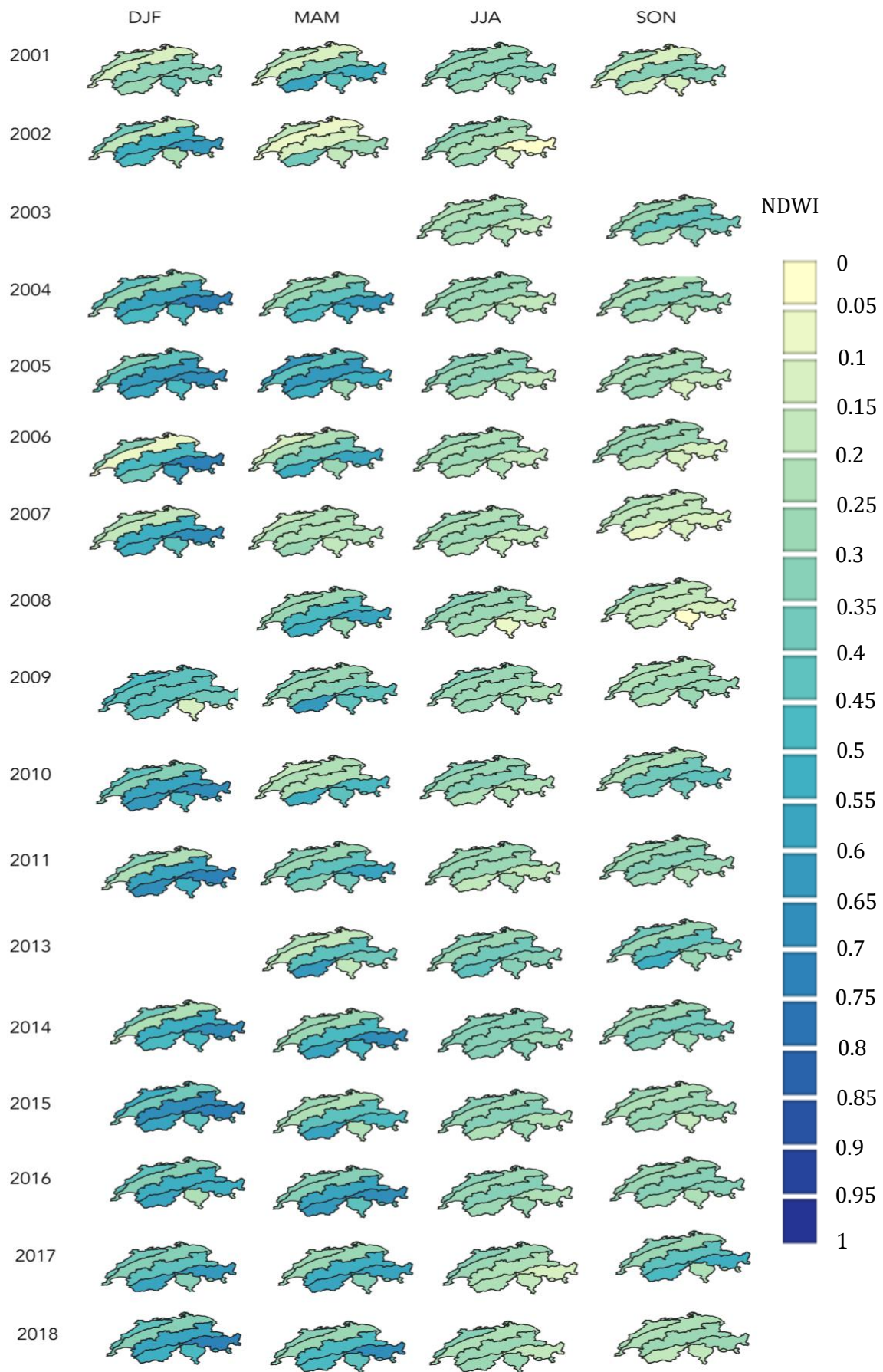


Figure 15 : Évolution temporelle du NDWI de 2001 à 2018.

4.2. Anomalies du NDWI

Dans un deuxième temps, nous avons également calculé les anomalies pour les années 2003 et 2018 par rapport à l'année 2014, qui est une année relativement « normale », c'est-à-dire que la valeur moyenne du NDWI annuelle en 2014 est de 0,41 tandis que la moyenne annuelle du NDWI pour toute la période étudiée est de 0,40. Ainsi, l'année 2014 a été prise comme année de référence pour le calcul des anomalies de ces deux années particulièrement chaudes en termes de températures atmosphériques. La saison automnale a été plus impactée que la saison estivale, et présente plus de variations régionales avec certaines zones dont l'anomalie est positive, c'est-à-dire que le NDWI a augmenté, et d'autres où le NDWI est « anormalement plus bas ». Les anomalies sont particulièrement importantes dans les Alpes (Figure 16).

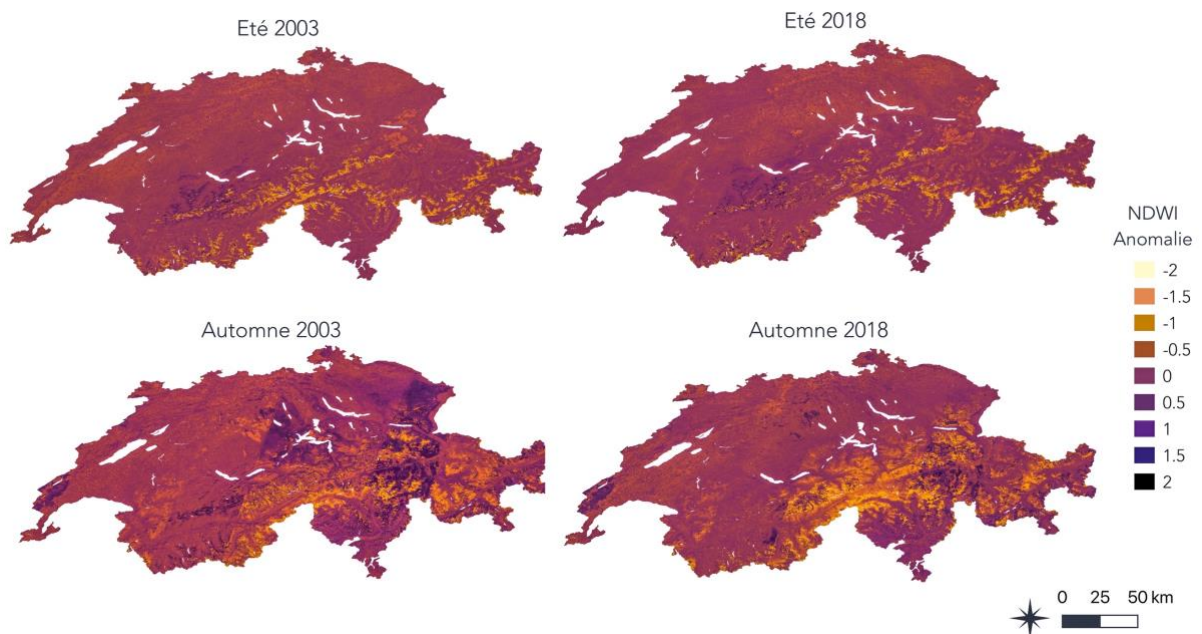


Figure 16 : : Anomalie du NDWI pour 2003 et 2018 par rapport à l'année de référence 2014.

4.3. Tests statistiques des relations NDWI-précipitation/température

Enfin, afin de tester la robustesse de nos données et analyses, nous avons testé la relation entre NDWI et précipitation/température sur le territoire suisse. En effet, cette relation est importante, car nous souhaitons avoir un indicateur témoignant de la sécheresse, qui est une résultante d'un manque de précipitations et d'une augmentation de la température. Ainsi, nous avons testé cette relation au niveau suisse et biorégional.

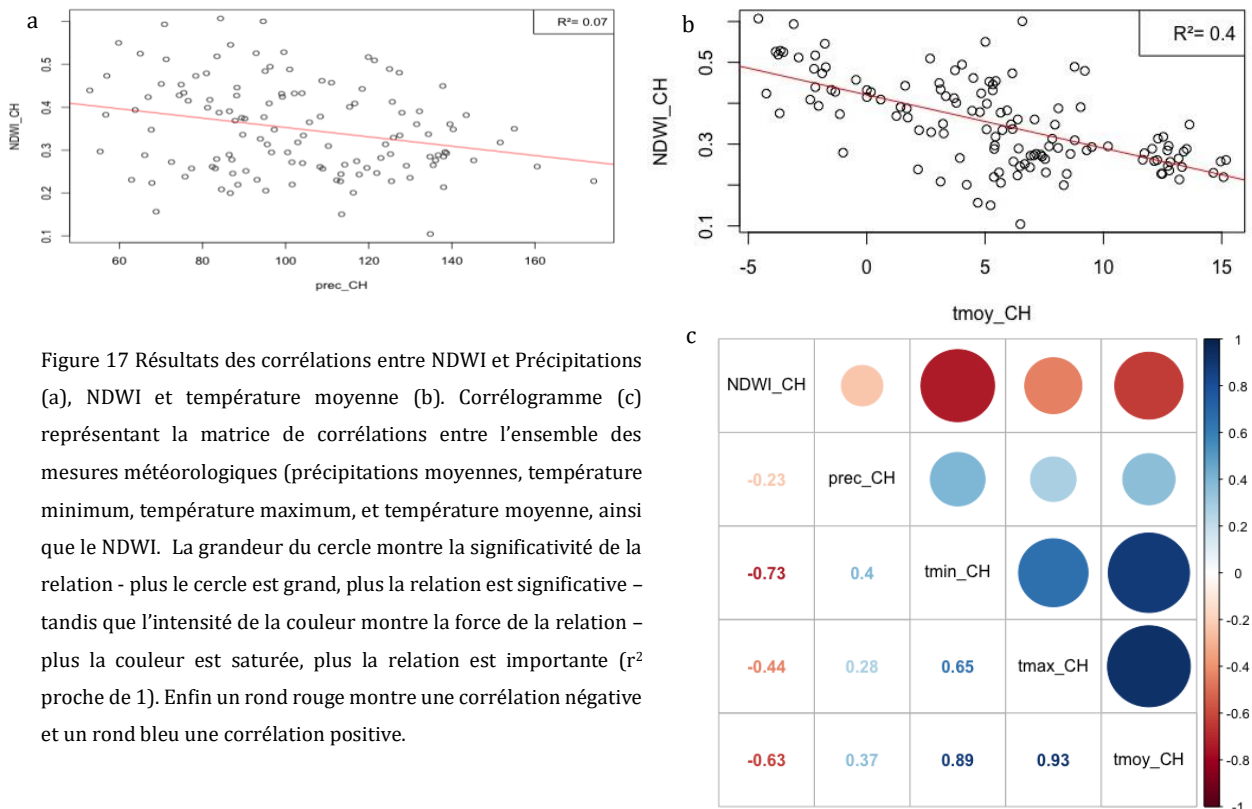


Figure 17 Résultats des corrélations entre NDWI et Précipitations (a), NDWI et température moyenne (b). Corrélogramme (c) représentant la matrice de corrélations entre l'ensemble des mesures météorologiques (précipitations moyennes, température minimum, température maximum, et température moyenne, ainsi que le NDWI). La grandeur du cercle montre la significativité de la relation - plus le cercle est grand, plus la relation est significative - tandis que l'intensité de la couleur montre la force de la relation - plus la couleur est saturée, plus la relation est importante (r^2 proche de 1). Enfin un rond rouge montre une corrélation négative et un rond bleu une corrélation positive.

Nos résultats présentent une corrélation négative faible entre les précipitations et le NDWI ($r^2=-0,23$) pour l'ensemble de la Suisse. Une augmentation des précipitations induirait donc une diminution du NDWI, ce qui est paradoxal. La température minimum est en revanche très fortement corrélée avec le NDWI (-0,73), et la température moyenne présente également une corrélation négative importante avec le NDWI (-0,63). Ainsi, plus les températures augmentent, plus le NDWI baisse.

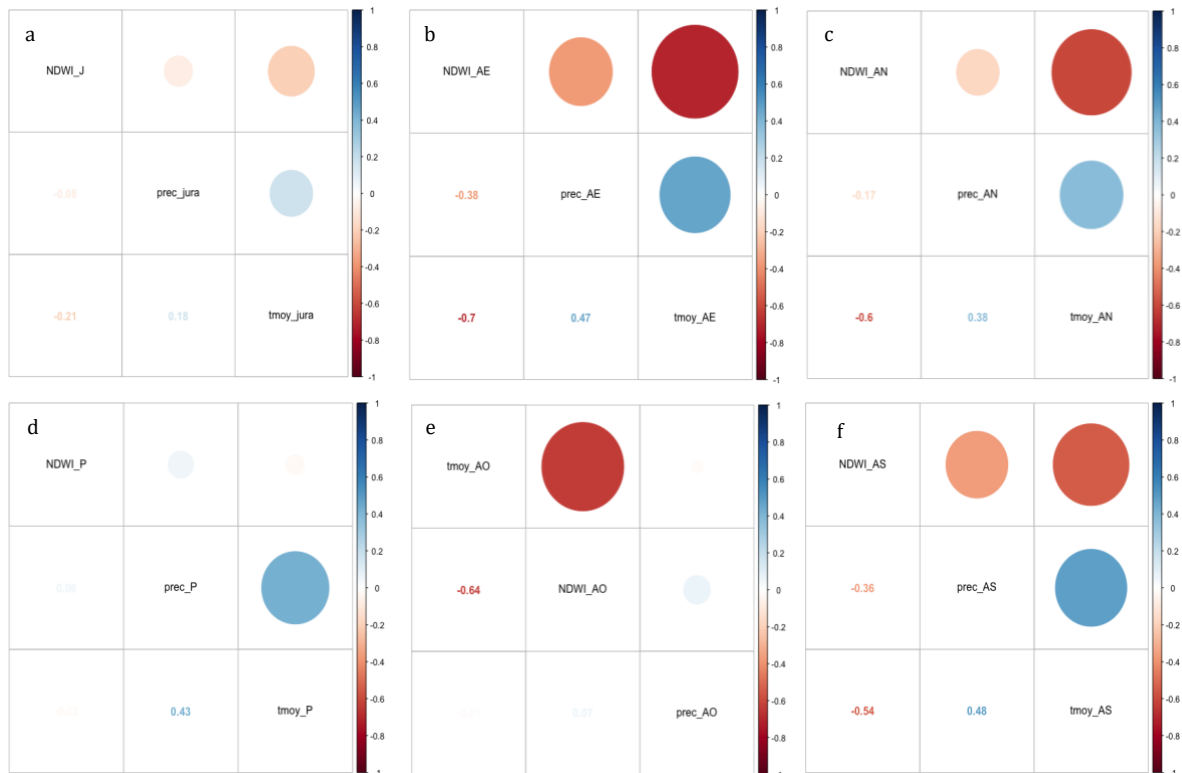


Figure 18 Corrélrogramme des matrices de corrélations pour le jura (a), les alpes est (b), les alpes nord (c), le plateau (d), les alpes ouest (e) et les alpes sud (f) avec les données de NDWI, température moyenne et précipitations moyenne. La grandeur du cercle montre la significativité de la relation - plus le cercle est grand, plus la relation est significative - tandis que l'intensité de la couleur montre la force de la relation - plus la couleur est intense, plus la relation est importante (r^2 proche de 1). Enfin un rond rouge montre une corrélation négative et un rond bleu une corrélation positive.

A l'échelle des zones biogéographiques, de fortes divergences sont observables. Les précipitations sont corrélées négativement pour toutes les régions, sauf le plateau. Le plateau et le jura montrent des corrélations non significatives avec les précipitations (respectivement $r^2=0,06$ et $-0,08$) tout comme la température moyenne (respectivement $r^2=-0,03$ et $-0,21$). En revanche, les régions alpines présentent des corrélations négatives bien plus importantes avec la température moyenne. Le NDWI des alpes orientales est le plus corrélé avec la température moyenne ($r^2=-0,7$) suivi par le NDWI des alpes occidentales ($r^2=0,64$).

5. Discussion et conclusion

Notre étude présente de grandes disparités au niveau de l'évolution du NDWI sur le territoire suisse de 1984 à 2018. Les statistiques zonales effectuées indiquent une baisse qui est particulièrement visible au niveau des zones biogéographiques pour les moyennes annuelles. En effet, les moyennes annuelles présentent une baisse pour toutes les régions biogéographiques, tandis que les moyennes saisonnières permettent de pondérer ces résultats et d'avoir un aperçu plus détaillé de chaque saison, lesquelles montrent une hétérogénéité qui n'est pas visible avec les moyennes annuelles. Les résultats des statistiques zonales pour les moyennes saisonnières par zones biogéographiques mettent en avant l'importance d'une étude au cas par cas, car les disparités régionales et saisonnières sont importantes.

Un autre point intéressant de notre recherche est l'étude des anomalies de NDWI. En effet, il semblerait que les anomalies soient plus fortes, indiquant une sécheresse plus intense dans les Alpes en Automne 2018 qu'en été ou en automne 2003. En effet, Schuldt et al. (2020) démontrent que la sécheresse de 2018 était plus extrême et intense que celle de 2003 et que ses impacts climatiques ont été sans précédent. De nombreux arbres sont morts après cette sécheresse, dont les températures ont augmenté de 3.3 °C, notamment dans le Jura, comme en témoigne les articles du Temps⁷ et du 24 heures⁸. Le bois sec a représenté 100 000 m³ dans toute la Suisse à la suite de la sécheresse et la région de l'Ajoie (Jura) a été particulièrement touchée, avec 1500 hectares affectés. Le phénomène a frappé l'ensemble du nord-ouest de la Suisse, mais le Jura a été le canton le plus marqué.

5.1. Limites de la recherche

Comme l'ont montré de nombreuses études précédentes (Gao, 1996; Gulácsi & Kovács, 2015; Horion et al., 2005; Jayawardhana & Chathurange, 2020), le NDWI est un très bon indicateur de la sécheresse. Cependant, certaines limites peuvent survenir quant à l'utilisation de cet outil. D'une part, la couverture neigeuse n'est pas prise en compte dans le calcul et un NDWI supérieur à 0.5 montre probablement de la neige et non une teneur en eau particulièrement importante dans la végétation. D'autre part, une baisse des valeurs du NDWI ne s'explique pas uniquement par une sécheresse ou un stress hydrique, mais peut également résulter d'un changement dans la

⁷ <https://www.letemps.ch/suisse/jura-situation-catastrophe-forestiere>

⁸ <https://www.24heures.ch/suisse/forets-suisse-victimes-secheresse/story/27293539>

couverture du sol, de maladies, de feux de forêts, etc. Ainsi, il est nécessaire de combiner cet indicateur avec des données sur les précipitations afin de déterminer l'occurrence d'une sécheresse (EDO - European Drought Observatory, 2011). Enfin, le NDWI est un indicateur du stress hydrique dans la végétation, et non un indicateur de sécheresse. Un autre indicateur, le « Normalized Difference Drought Index » (NDDI) a été introduit, combinant ainsi le NDVI et le NDWI pour mesurer la sécheresse. Cependant, cet indicateur n'a pas un seuil de sécheresse mondial (Jayawardhana & Chathuranga, 2020) et n'est d'ailleurs pas recensé au sein de l'IDMP.

Par ailleurs, notre étude porte sur 34 années, de 1984 à 2018 (sauf 2012), ce qui est à la fois une période relativement longue et relativement courte. En effet, les effets visibles sur une série temporelle seraient plus impressionnants avec un jeu de données plus important, et donc, sur une période de temps d'autant plus longue. Le réchauffement climatique n'étant pas un phénomène récent, il est percevable sur le long terme, comme en témoigne l'étude de Rebetez (1999). Son analyse montre que déjà durant tout le 20^{ème} siècle, la Suisse a connu des épisodes de sécheresse, notamment dans les années 1940 et après 1981 et que ces épisodes de sécheresses augmentaient en intensité et en fréquence. Ainsi, notre jeu de données s'inscrit dans les années postérieures, connaissant déjà un réchauffement et donc une baisse probable du NDWI par rapport au début du 20^{ème} siècle. La figure (Figure 19) ci-dessous présente une série temporelle établie par MétéoSuisse des déviations de températures par rapport à la moyenne de 1961-1990. Cette figure confirme notre hypothèse précédente et montre clairement un réchauffement depuis les années 1980. Depuis 2014, les températures n'ont cessé d'augmenter. Les températures de l'année 2003 - année considérée comme ayant connu la vague de chaleur la plus importante de ces dernières décennies - se sont bien normalisées.

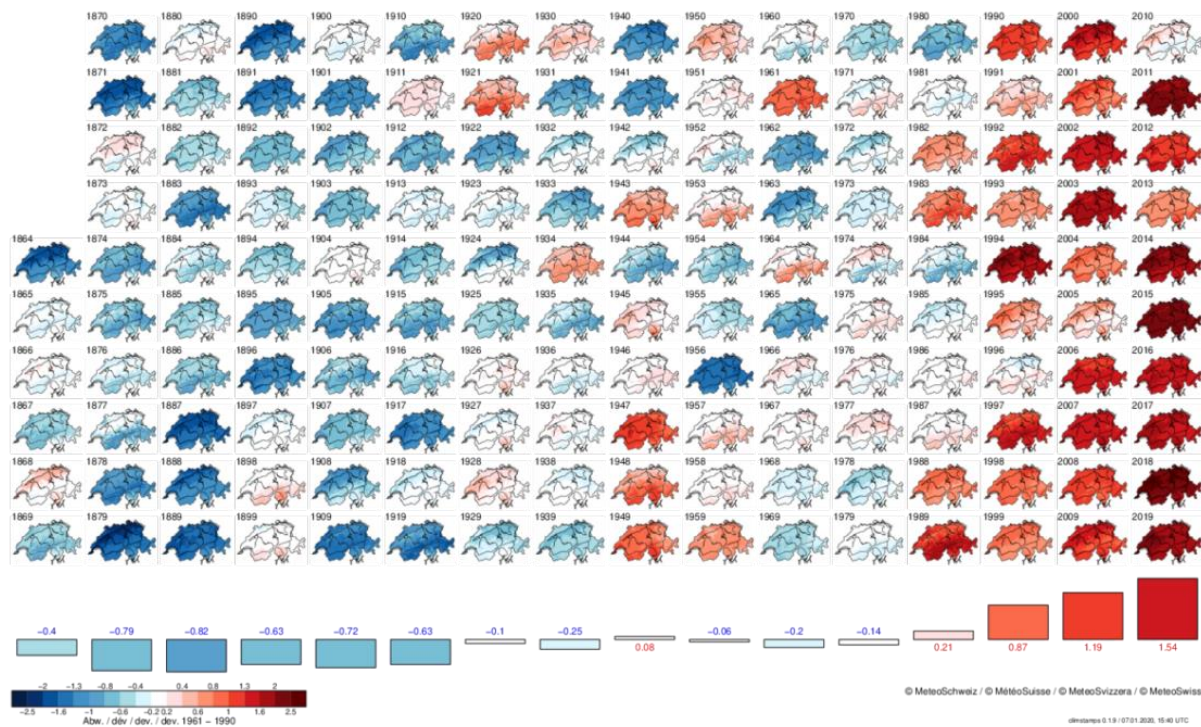


Figure 19 Écart de température à la moyenne de 1961-1990 pour chaque année depuis 1864 en Suisse. Les années en dessous de la moyenne sont représentées en bleu et celles au-dessus en rouge. Source : MétéoSuisse (URL : <https://www.meteosuisse.admin.ch/home/climat/changement-climatique-suisse.html>)

Il est donc intéressant de remettre en perspective notre étude. D'une part, les changements annuels suisses peuvent ne pas paraître drastiques par rapport à certains épisodes de sécheresse connus (2003, 2018) et d'autre part, les changements ne représentent qu'un laps de temps relativement faible et une analyse sur un plus long terme témoignerait d'anomalies d'autant plus importantes et alarmantes. Ainsi, la durée de notre série temporelle s'inscrivant dans un temps court, il est important de mettre en avant le fait que la baisse du NDWI présentée ici est une résultante des 34 dernières années. Les tendances constatées sur ces 34 dernières années sont donc importantes à l'échelle humaine. Nous pouvons nous poser la question : qu'en sera-t-il en 2050, en 2100 ?

Ensuite, l'un des problèmes soulevés par de nombreux auteurs est que l'analyse des sécheresses étudie un phénomène passé. L'imagerie satellite ne peut prédire, c'est pourquoi il serait intéressant, sur la base des résultats de notre étude, d'établir un modèle prédictif du NDWI à l'échelle suisse, en tenant en compte des variables pluviométriques et de température. Les données météorologiques pouvant, en revanche, être établies plusieurs jours à l'avance, il serait donc possible de déterminer des sécheresses et de les prévenir, afin d'en éviter les dégâts.

De plus, l'échelle de classification utilisée est celle de Gulácsi and Kovács (2015), d'une étude réalisée en Hongrie. Elle est très utile pour la vulgarisation des valeurs de NDWI et serait particulièrement avantageuse pour des décisions politiques, car elle permet de mieux interpréter les situations alarmantes de sécheresse par rapport à un niveau « habituel » de sécheresse (en été notamment). Toutefois, il faudrait calculer une telle échelle au niveau suisse pour qu'elle soit réellement utilisable. Celle-ci est montrée à titre indicatif, mais on ne peut considérer une classification hongroise pour qualifier l'état de sécheresse au niveau suisse.

Enfin, les analyses statistiques visant la vérification des liens entre NDWI et température/précipitations présentent des résultats étonnants. En effet, nous aurions pu nous attendre à une relation importante entre NDWI et précipitations, ce qui n'est pas le cas, tandis que la température corrèle de manière significative et importante avec le NDWI, tant au niveau national que biorégional. Deux possibilités peuvent expliquer ce phénomène :

- (1) La méthode utilisée n'est pas exactement la même pour les précipitations que pour la température. Pour les précipitations, l'outil calculatrice raster a été effectué au préalable de l'outil statistique zonale, afin d'établir des moyennes saisonnières pour les précipitations avant de calculer la moyenne des précipitations par biorégion. Pour les températures, le jeu de données étant bien plus important, car contenant les températures minimum et maximum, nous avons préféré établir les statistiques zonales pour chaque raster par biorégion avant d'exporter les tables d'attributs sur Excel afin d'effectuer les calculs (les moyennes par saison ainsi que la température moyenne). Il serait donc intéressant d'effectuer ces calculs avec la même méthode afin de pouvoir mieux comparer les résultats.
- (2) Les données du NDWI proviennent du Swiss Data Cube et ont une résolution de ~ 0.0014 km² (37 x 37 m), tandis que les données météorologiques provenant de WorldClim ont une résolution de ~ 21 km² (4600 x 4600 m). Cette différence peut influencer les résultats, car le degré de précision n'est pas identique. Il serait donc pertinent d'effectuer cette même analyse avec des données de même résolution, provenant de MétéoSuisse par exemple.

5.2. Impacts de l'étude

Nous avons donc pu mettre en avant, grâce à cette étude, les effets de la sécheresse sur l'humidité de la végétation. Nous avons vu, d'une part, qu'il y a bien un phénomène de sécheresse s'accroissant en Suisse, résultant notamment dans une homogénéisation de l'humidité de la

végétation. La période estivale et la période automnale semblent être les plus touchées par les sécheresses. Cependant, les températures se réchauffant en hiver, la saison connaît de fortes précipitations plutôt que des chutes de neige caractéristiques de cette saison, ce qui affecte particulièrement l'économie alpine. D'autre part, nous avons pu constater que l'humidité de la végétation semble être plus affectée par une augmentation des températures que par une diminution des précipitations. Enfin, les régions les plus touchées par des épisodes de sécheresse sont les régions alpines, en particulier les alpes sud et est. Ce constat peut être particulièrement utile à la prévention des sécheresses. En effet, il serait intéressant de prévoir des scénarios du NDWI en fonction des scénarios d'augmentation des températures prévus par le GIEC. Ces prévisions seraient par exemple utiles au développement agricole, au développement des stations de ski dans les régions alpines, et de manière plus générale, du tourisme.

Ces phénomènes déjà visibles aujourd'hui, comme le montre notre étude, seront amplifiés à l'avenir. Le magazine « l'environnement » de l'OFEV, consacre d'ailleurs son dernier numéro à la problématique de la sécheresse en Suisse et présente son scénario pour le château d'eau helvétique, établi par le projet Hydro-CH2018⁹. Leurs conclusions s'accordent à nos constats : les précipitations ne seront pas réduites, mais la répartition saisonnière va varier : les pluies seront beaucoup plus faibles en été et plus abondantes en hiver. Selon leurs scénarios, les régions alpines seront les plus impactées et subiront une forte modification du paysage. Les périodes d'étiage seront plus fréquentes et plus intenses. Cependant, les nappes phréatiques ne seront pas ou peu impactées par les épisodes de sécheresse, qui affectent principalement les eaux de surfaces et les glaciers. Ainsi, les différences régionales vont être d'autant plus marquées. Les écosystèmes aquatiques vont être particulièrement affectés par l'augmentation des températures, tout comme le domaine agricole, qui devra probablement s'adapter rapidement à ces changements (OFEV, 2020). De futures études devraient donc se pencher sur, d'une part, la mise en place d'un système d'observation et de prévention des épisodes de sécheresses, et d'autre part, les possibilités d'adaptation régionale.

⁹ Projet mené conjointement par MétéoSuisse et L'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich (EPFZ), dont les résultats seront disponibles dès le printemps 2021.
(URL : <https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/le-nccs/themes-prioritaires/cycle-hydrologique/hydro-ch2018-forschungsprojekte.html#-662213224>)

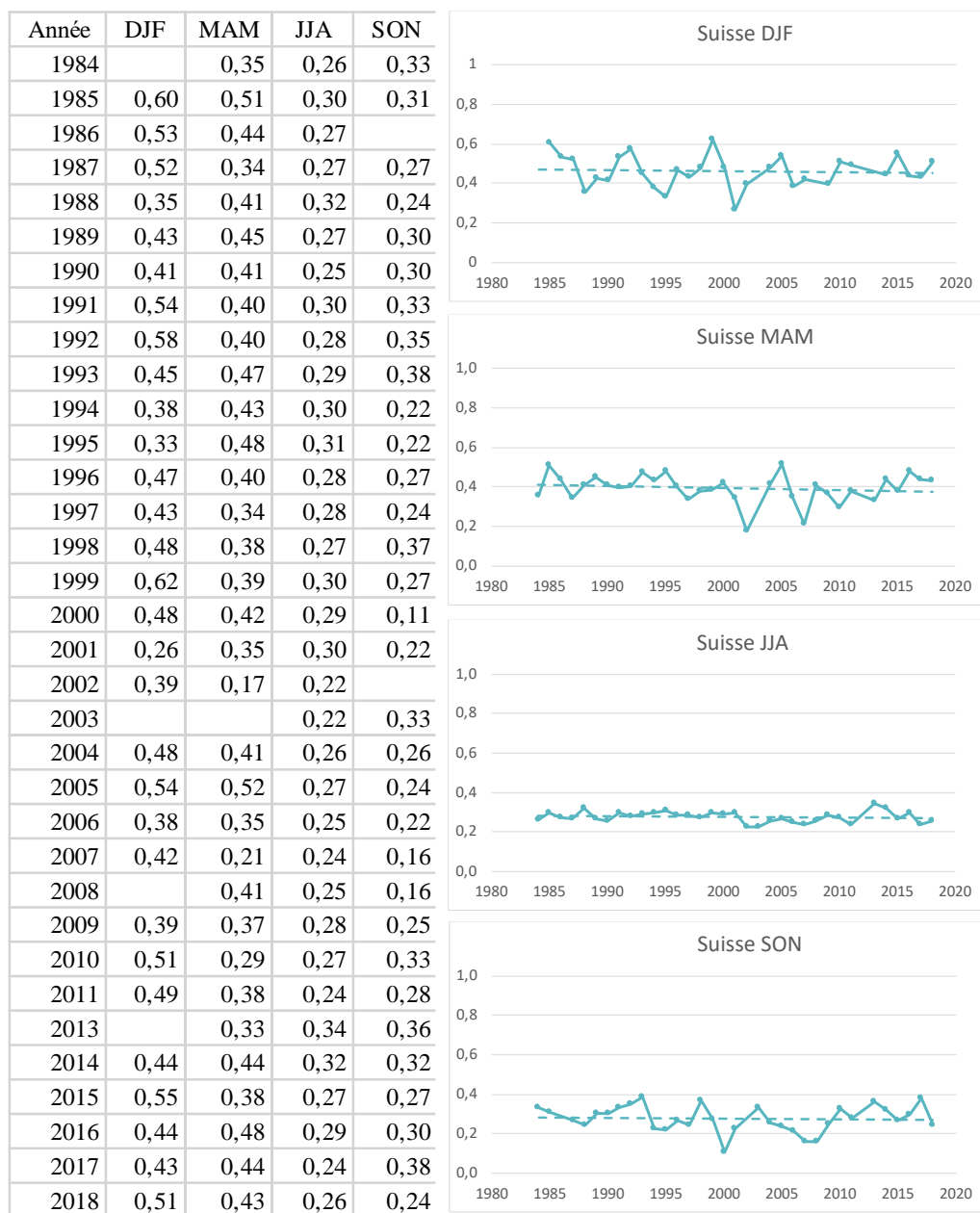
6. Bibliographie

- Acácio, V., Andreu, J., Assimacopoulos, D., Bifulco, C., di Carli, A., Dias, S., . . . Seidl, I. (2013). Review of current drought monitoring systems and identification of (further) monitoring requirements. *DROUGHT-R&SPI Technical Report*, 6.
- Amalo, L. F., Ma'Rufah, U., & Permatasari, P. A. (2018). *Monitoring 2015 drought in West Java using Normalized Difference Water Index (NDWI)*. Paper presented at the IOP Conference Series Earth and Environmental Science.
- Brunner, M. I., Liechti, K., & Zappa, M. (2019). Extremeness of recent drought events in Switzerland: dependence on variable and return period choice. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(10), 2311-2323.
- DFAE. (2017). Géographie - Faits et chiffres. *Découvrir La Suisse*. Retrieved from <https://www.eda.admin.ch/aboutswitzerland/fr/home/umwelt/geografie/geografie---fakten-und-zahlen.html>
- EDO - European Drought Observatory. (2011). NDWI: Normalized Difference Water Index. *DESERT Action - LMNH Unit, PRODUCT FACTSHEET : NDWI - EUROPE (1)*, 6.
- Gao, B.-C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing of environment*, 58(3), 257-266.
- Gonseth, Y., Wohlgemuth, T., Sansonnens, B., & Buttler, A. (2001). Les régions biogéographiques de la Suisse—Explications et division standard. *Cahier de l'environnement*, 137, 1-48.
- Gulácsi, A., & Kovács, F. (2015). Drought monitoring with spectral indices calculated from MODIS satellite images in Hungary. *Journal of Environmental Geography*, 8(3-4), 11-20.
- Horion, S., Carrão, H., Singleton, A., Barbosa, P., & Vogt, J. (2012). JRC experience on the development of Drought Information Systems. *Europe, Africa and Latin America. EUR*, 25235.
- Horion, S., Eerens, H., Tychon, B., & Ozer, P. (2005). *Monitoring of the 2003 summer drought in Belgium with the NDWI applied on spot-vegetation data*. Paper presented at the Proceedings of the 2nd international vegetation user conference. 1998-2004: 6 years of operational activities.
- Jayawardhana, W., & Chathurange, V. (2020). Investigate the sensitivity of the satellite-based agricultural drought indices to monitor the drought condition of paddy and introduction to enhanced multi-temporal agricultural drought indices. *J Remote Sens GIS*, 9, 271.
- Jeyaseelan, A. T. (2003). Droughts & floods assessment and monitoring using remote sensing and GIS. In *Satellite remote sensing and GIS applications in agricultural meteorology* (Vol. 291): World Meteorol. Org. Dehra Dun, India Geneva, Switz.

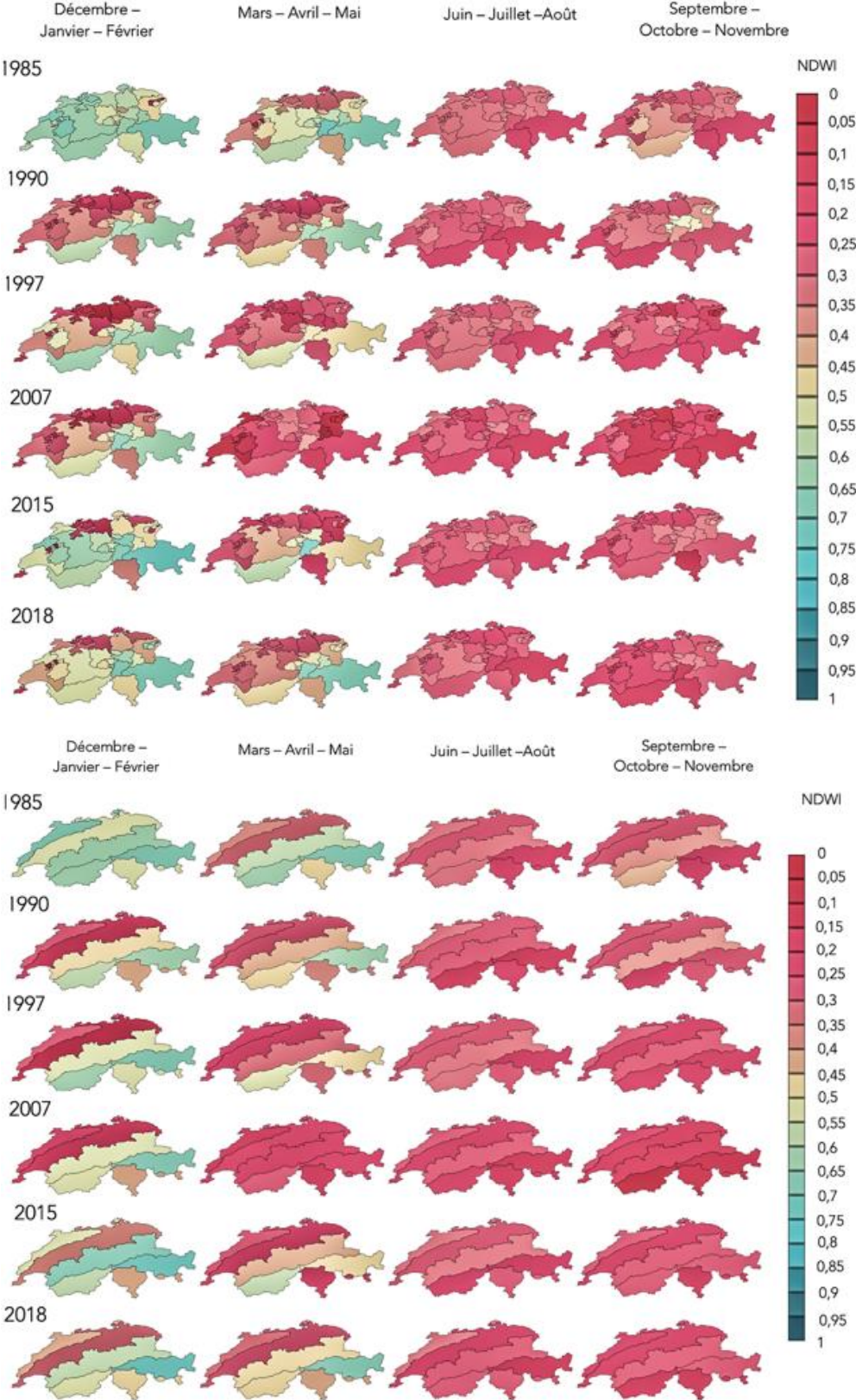
- Karamihalaki, M., Stagakis, S., Sykioti, O., Kyparissis, A., & Parcharidis, I. (2016). *Monitoring drought effects on mediteranean conifer forests using SPOT-vegetation NDVI and NDWI Timeseries*. Paper presented at the Living Planet Symposium, Proceedings of the conference held.
- Kergomard, C. (1990). La télédétection aérospatiale: une introduction. *Cours de télédétection, Ecole Normale Supérieure Paris*.
- Leuch, B. A., Streit, K., & Bang, P. (2017). *La forêt suisse face aux changements climatiques: quelles évolutions attendre?* : Institut fédéral de recherches WSL.
- Mas, J. (2000). Une revue des méthodes et des techniques de télédétection du changement. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 26(4), 349-362.
- OFEV. (2020). La Suisse bientôt à court d'eau? L'impact des changements climatiques sur notre gestion de l'or bleu. *l'environnement*, 4, 1-63.
- Rebetez, M. (1999). Twentieth century trends in droughts in southern Switzerland. *Geophysical Research Letters*, 26(6), 755-758.
- Reynard, E. (2009). Le réchauffement climatique et ses effets dans les régions de montagne. *Cahiers de l'ASPAN Suisse Occidentale*, 27(3), 4-6.
- Reynard, E. (2013). Les enjeux liés au "château d'eau" suisse. *Denaris*, 3, 38-39.
- Schuldt, B., Buras, A., Arend, M., Vitasse, Y., Beierkuhnlein, C., Damm, A., . . . Hajek, P. (2020). A first assessment of the impact of the extreme 2018 summer drought on Central European forests. *Basic and Applied Ecology*.
- Seneviratne, S. I., Orth, R., Weiler, M., Jörg-Hess, S., & Sylvania, K. (2013). Trockenheit in der Schweiz: Ergebnisse des NFP-61 Projekts Drought-CH. *Aqua & Gas*, 93(9), 38-47.
- Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. *Water international*, 10(3), 111-120.
- WSL. (2013). Sécheresse dans le château d'eau helvétique? *Magazine du WSL Diagonale*, 2, 1-42.
- Zappa, M., Bernhard, L., Spirig, C., Pfändler, M., Stahl, K., Kruse, S., . . . Stähli, M. (2014). A prototype platform for water resources monitoring and early recognition of critical droughts in Switzerland. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 364, 492-498.

7. Annexes

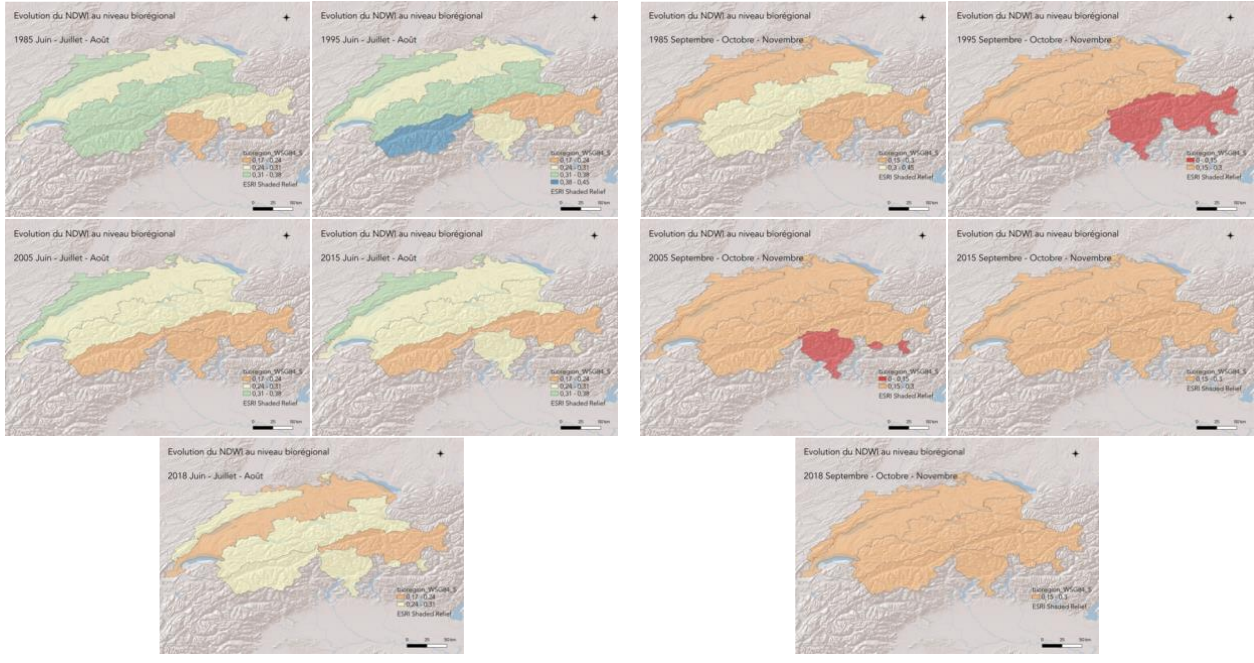
Annexe 1 : Résultats des moyennes de NDWI saisonnière à l'échelle suisse.



Annexe 2 : Résultats des statistiques zonales du NDWI à l'échelle cantonale (haut) et biorégionale (bas) par saison.



Annexe 3: Evolution du NDWI à l'échelle des zones biogéographiques. A gauche, les résultats pour la saison estivale et à droite pour la saison automnale. Le tableau présente tous les résultats de 1984 à 2018 par biorégions et par saisons.



Année	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2013	2014	2015	2016	2017	2018		
Décembre - Janvier - Février																																				
Jura		0,66	0,51	0,37	0,18	0,28	0,29	0,61	0,53	0,21	0,19	0,04	0,19	0,26	0,32	0,58	0,37	0,23	0,37			0,40	0,32	0,33	0,24		0,47	0,41	0,35		0,36	0,50	0,42	0,38	0,41	
Versant sud des Alpes		0,54	0,55	0,47	0,51	0,33	0,42	0,61	0,64	0,52	0,53	0,48	0,56	0,50	0,52	0,52	0,50	0,38	0,24			0,46	0,50	0,56	0,42		0,11	0,50	0,52		0,50	0,44	0,24	0,33	0,50	
Versant Nord des Alpes		0,63	0,65	0,64	0,39	0,55	0,49	0,58	0,63	0,53	0,42	0,41	0,59	0,54	0,60	0,67	0,60	0,30	0,52			0,59	0,65	0,47	0,52		0,40	0,59	0,56		0,53	0,66	0,53	0,44	0,58	
Alpes occidentales		0,61	0,44	0,67	0,39	0,53	0,57	0,33	0,65	0,65	0,54	0,30	0,56	0,62	0,66	0,66	0,55	0,27	0,45			0,47	0,60	0,59	0,55		0,45	0,63	0,68		0,46	0,57	0,56	0,57	0,55	
Plateau		0,54	0,40	0,32	0,17	0,19	0,18	0,38	0,40	0,18	0,15	0,16	0,24	0,14	0,17	0,44	0,26	0,15	0,18			0,29	0,41	0,06	0,19		0,43	0,30	0,23		0,22	0,39	0,30	0,32	0,35	
Alpes orientales		0,68	0,62	0,69	0,59	0,69	0,65	0,78	0,72	0,75	0,61	0,63	0,70	0,65	0,75	0,72	0,66	0,35	0,60			0,70	0,67	0,74	0,65		0,39	0,68	0,74		0,68	0,73	0,54	0,61	0,71	
Mars - Avril - Mai																																				
Jura		0,29	0,36	0,40	0,16	0,33	0,31	0,27	0,22	0,24	0,38	0,29	0,38	0,30	0,22	0,26	0,23	0,26	0,24	0,19			0,28	0,62	0,13	0,15	0,25	0,31	0,17	0,31	0,21	0,29	0,25	0,31	0,28	0,35
Versant sud des Alpes		0,27	0,46	0,42	0,39	0,36	0,43	0,40	0,27	0,38	0,37	0,45	0,44	0,42	0,30	0,37	0,39	0,34	0,44	0,18			0,53	0,25	0,26	0,16	0,29	0,45	0,41	0,39	0,16	0,45	0,24	0,40	0,32	0,42
Versant Nord des Alpes		0,44	0,60	0,49	0,35	0,47	0,50	0,43	0,49	0,45	0,55	0,46	0,54	0,43	0,35	0,38	0,48	0,52	0,34	0,15			0,41	0,64	0,37	0,21	0,50	0,31	0,21	0,43	0,42	0,47	0,44	0,58	0,53	0,47
Alpes occidentales		0,62	0,60	0,46	0,61	0,39	0,61	0,49	0,52	0,57	0,60	0,56	0,61	0,55	0,51	0,56	0,40	0,58	0,59	0,37			0,48	0,50	0,52	0,27	0,54	0,62	0,51	0,33	0,61	0,56	0,59	0,60	0,58	0,47
Plateau		0,13	0,34	0,28	0,18	0,27	0,29	0,27	0,27	0,26	0,29	0,28	0,29	0,28	0,23	0,29	0,18	0,23	0,14	0,06			0,28	0,44	0,24	0,22	0,26	0,26	0,20	0,25	0,19	0,25	0,25	0,30	0,29	0,26
Alpes orientales		0,45	0,69	0,65	0,50	0,65	0,62	0,64	0,56	0,56	0,68	0,62	0,68	0,51	0,48	0,49	0,66	0,61	0,53	0,26			0,62	0,52	0,57	0,22	0,57	0,44	0,46	0,59	0,38	0,70	0,49	0,68	0,58	0,70
Juin - Juillet - Août																																				
Jura		0,25	0,32	0,32	0,26	0,33	0,31	0,30	0,32	0,32	0,34	0,32	0,32	0,27	0,31	0,32	0,34	0,32	0,33	0,24	0,28	0,32	0,29	0,26	0,32	0,31	0,31	0,27	0,34	0,35	0,31	0,31	0,33	0,30	0,30	
Versant sud des Alpes		0,35	0,23	0,18	0,24	0,28	0,22	0,22	0,27	0,24	0,24	0,26	0,26	0,25	0,25	0,25	0,26	0,25	0,27	0,14	0,23	0,22	0,23	0,22	0,20	0,09	0,28	0,25	0,20	0,32	0,31	0,26	0,28	0,19	0,26	
Versant Nord des Alpes		0,22	0,33	0,31	0,30	0,34	0,29	0,29	0,33	0,31	0,32	0,32	0,34	0,31	0,32	0,30	0,33	0,31	0,32	0,24	0,26	0,28	0,30	0,29	0,28	0,30	0,30	0,28	0,37	0,33	0,30	0,33	0,24	0,30		
Alpes occidentales		0,33	0,31	0,26	0,29	0,32	0,28	0,20	0,30	0,28	0,30	0,36	0,42	0,27	0,30	0,23	0,31	0,30	0,27	0,25	0,20	0,21	0,21	0,23	0,22	0,23	0,28	0,24	0,17	0,44	0,31	0,22	0,28	0,21	0,27	
Plateau		0,24	0,29	0,30	0,27	0,31	0,30	0,27	0,29	0,28	0,31	0,27	0,28	0,29	0,28	0,25	0,28	0,21	0,28	0,21	0,29	0,29	0,25	0,24	0,28	0,28	0,27	0,26	0,29	0,31	0,27	0,29	0,29	0,29	0,23	
Alpes orientales		0,28	0,25	0,19	0,20	0,29	0,16	0,18	0,27	0,22	0,21	0,23	0,24	0,21	0,22	0,28	0,27	0,20	0,31	0,04	0,17	0,20	0,19	0,18	0,16	0,19	0,24	0,22	0,17	0,32	0,29	0,21	0,25	0,12	0,18	
Septembre - Octobre - Novembre																																				
Jura		0,29	0,27		0,25	0,23	0,29	0,29	0,29	0,26	0,28	0,20	0,25	0,27	0,27	0,22	0,33	0,02	0,29			0,27	0,26	0,26	0,28	0,24	0,26	0,24	0,29	0,29	0,35	0,27	0,26	0,29	0,34	0,24
Versant sud des Alpes		0,34	0,22		0,29	0,11	0,21	0,27	0,30	0,31	0,37	0,16	0,15	0,23	0,22	0,34	0,20	0,15	0,15			0,31	0,21	0,14	0,12	0,14	0,03	0,29	0,36	0,23	0,28	0,26	0,16	0,25	0,23	0,19
Versant Nord des Alpes		0,40	0,37		0,25	0,30	0,36	0,38	0,39	0,41	0,45	0,27	0,23	0,29	0,26	0,48	0,29	0,12	0,31			0,41	0,32	0,28	0,26	0,16	0,16	0,27	0,35	0,31	0,42	0,37	0,29	0,33	0,43	0,27
Alpes occidentales		0,45	0,42		0,35	0,34	0,29	0,24	0,36	0,49	0,45	0,43	0,20	0,26	0,21	0,44	0,20	0,12	0,13			0,24	0,20	0,27	0,18	0,09	0,16	0,23	0,37	0,28	0,52	0,31	0,29	0,28	0,47	0,16
Plateau		0,26	0,28		0,27	0,20	0,27	0,28	0,25	0,27	0,24	0,16	0,26	0,26	0,23	0,24	0,25	0,12	0,11			0,29	0,23	0,23	0,26	0,17	0,18	0,23	0,23	0,26	0,28	0,28	0,25	0,27	0,28	0,23
Alpes orientales		0,28	0,22		0,24	0,21	0,32	0,28	0,43	0,36	0,53	0,15	0,15	0,27	0,25	0,45	0,32	0,10	0,34			0,40	0,25	0,17	0,10	0,13	0,11	0,25	0,41	0,26	0,31	0,38	0,29	0,32	0,52	0,29