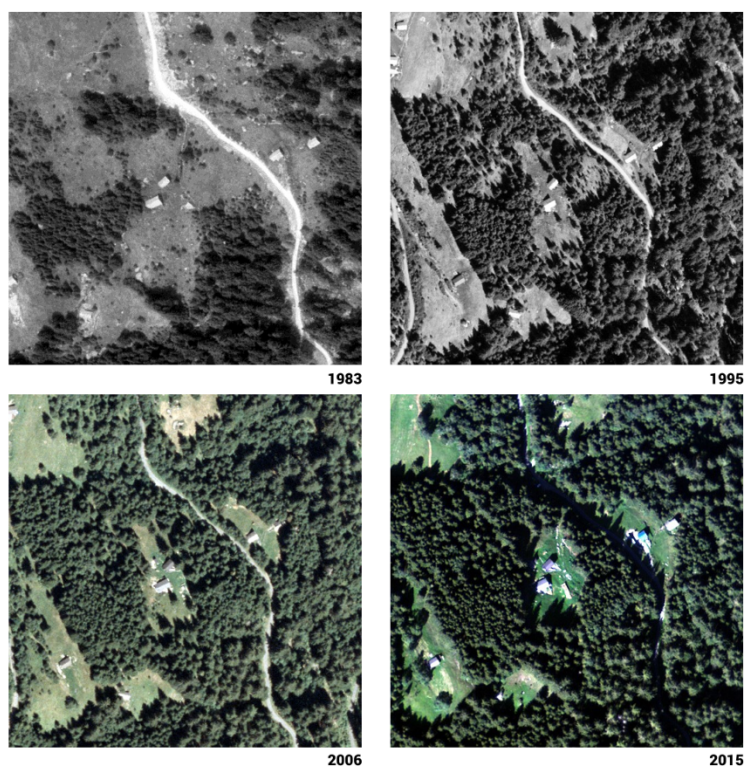


L'évolution du couvert végétal montagneux suisse - Analyse d'une période de 35 ans (1984-2018) à partir du NDVI



© Landeskarte, Luftbilder/ Carte nationale, images aériennes: swisstopo
Bildauswahl/ Choix des images: BFS, Arealstatistik/OFS, Statistique de la superficie 2020

Figure 1 : Avancée de la forêt sur les terres agricoles à Calanca (Grisons). Source : OFS, 2020

Mémoire du Certificat complémentaire en géomatique

Présenté par **BAUCHOT Lauranne**
Avril 2022

Sous la direction de

Giuliani Gregory – Enseignant UNIGE et Responsable de l'unité « Digital Earth » GRID-Genève
Guigoz Yaniss – Enseignant UNIGE et Spécialiste SIG GRID-Genève

Résumé

Les zones de montagne fournissent la moitié de la population mondiale en eau douce, dont de nombreux services essentiels à la vie humaine découlent. Toutefois, elles constituent des écosystèmes hautement vulnérables face au réchauffement climatique en cours, laissant planer la menace d'un accroissement des risques naturels liés à l'eau. Une végétation montagnaise en bonne santé permet à la fois de prévenir et d'atténuer les effets des aléas climatiques susceptibles de se produire. L'Indice du couvert végétal montagnais (ICVM), créé dans le cadre de l'Objectif de développement durable (ODD) 15, cherche à évaluer le pourcentage de la couverture végétale dans les zones de montagne à l'échelle de chaque pays. Le présent travail de mémoire a été réalisé dans le but de produire l'ICVM annuel de la Suisse entre 1984 et 2018, à partir de la moyenne annuelle de l'Indice de végétation par différence normalisée (NDVI). Les valeurs du NDVI annuel supérieures à 0.5 ont été utilisées dans le logiciel ArcGIS pour indiquer la proportion de la surface couverte par une végétation dense et en bonne santé par rapport à la surface montagnaise totale. D'autres statistiques spatiales ont également été produites pour affiner l'analyse. Nos résultats, à l'échelle suisse, à l'échelle biogéographique, et à l'échelle de chacun des six rangs d'altitude étudiés, montrent une forte croissance générale de la vigueur végétale sur la période étudiée, en particulier entre 1000 et 1500m d'altitude. Il a également été possible de constater des pixels de hausse spatialement situés pouvant représenter la progression en altitude de la limite supérieure de la végétation, ainsi que le processus de reforestation à la suite du phénomène de déprise agricole. Toutefois, des comparaisons avec les statistiques officielles nationales, et avec les résultats de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), montrent des incohérences et une sous-estimation générale de l'ICVM produit. La méthodologie présentée ici ne peut donc être recommandée qu'en complément d'autres méthodes plus précises pour produire l'indicateur. Elle reste tout de même un outil simple, facilement reproductible et accessible qui permet d'obtenir des informations quant à la vigueur et la santé végétale générale de manière plus régulière, sur de plus longues périodes et avec une meilleure résolution que les cartes de couverture du sol officielles.

Table des matières

Résumé	2
1. Introduction	4
1.1 Les données géospatiales, les ODD et l'indicateur 15.4.2.....	4
1.2 Contexte climatique actuel et futur des zones montagneuses.....	4
2. Données et méthodologie	6
2.1 L'ICVM présenté par la FAO	6
2.2 Description et source des données.....	7
2.3 Description du terrain d'étude.....	9
2.4 Traitements géomatiques et graphiques	9
3. Présentation des résultats et interprétation	13
3.1 Couverture montagneuse de la Suisse par zone Kapos	13
3.2 Cartographie de l'évolution du NDVI et de l'ICVM.....	14
3.3 Résultats graphiques et comparaisons	18
3.4 Synthèse, limites et améliorations possibles	25
4. Conclusion.....	26
Bibliographie	28
Annexe	30

1. Introduction

1.1 Les données géospatiales, les ODD et l'indicateur 15.4.2

Ces dernières décennies, la Terre a été confrontée à des changements de plus en plus rapides et importants de son environnement, principalement dus aux activités anthropiques, qui entraînent un risque croissant de dépasser certains seuils écologiques de non-retour (Nativi et al., 2020). Certains des 17 Objectifs de développement durable (ODD) adoptés en 2015 par l'Organisation des Nations Unies (ONU) concernent directement la minimisation des conséquences négatives et l'amélioration de la situation liées à ces évolutions. L'Observation de la Terre, notamment via l'analyse des données géospatiales générées par les satellites, peut constituer un outil important dans le suivi et la compréhension de l'état des écosystèmes, l'information aux autorités gouvernementales et le processus d'aide à la décision. La télédétection permet en effet d'observer les évolutions terrestres à une échelle globale et de manière continue, contrairement aux données *in-situ* récoltées sur le terrain (Giuliani et al., 2017). Les méthodes utilisées dans le cadre de la télédétection sont généralement bien documentées. Ce sont donc des outils facilement reproductibles et accessibles, capables d'offrir une vision croisée avec les statistiques nationales et les relevés *in-situ* (Giuliani et al., 2017 ; Honeck et al., 2018). De ce fait, l'intégration des informations géospatiales dans les indicateurs des ODD définis en 2017 semble promettre un suivi global fréquent et transparent, apte à couvrir plusieurs décennies de la situation liée à chaque cible à atteindre.

Dans ce travail, nous nous intéresserons à l'ODD 15 qui concerne la préservation et la restauration des écosystèmes terrestres, incluant la gestion durable des forêts ainsi que la lutte contre la désertification, la dégradation des terres et l'appauvrissement de la biodiversité. Nous nous concentrerons en particulier sur l'indicateur 15.4.2, qui est l'indice de couvert végétal montagneux, lié à la cible à atteindre 15.4. Cette dernière veut que d'ici 2030, la préservation des écosystèmes montagnards et de leur biodiversité soit assurée afin de mieux tirer parti de leurs bienfaits essentiels pour le développement durable (FAO, 2020). L'indice du couvert végétal montagneux (ICVM) mesure, au regard de cette cible, l'étendue et les variations de la superficie couverte par la végétation - comprenant ici forêts, arbres, arbustes, cultures ou prairies - dans les régions de montagne, pour différents rangs d'altitude. Cet indice a donc pour but d'évaluer l'état de conservation des écosystèmes montagnards et leur évolution (FAO, 2020).

Selon le site de la FAO (2021), en Europe, ce sont 69% des surfaces de montagne qui sont couvertes par de la végétation, tandis que les zones montagneuses de la Suisse étaient couvertes par 82% de végétation en 2018. L'indice mesuré à l'échelle mondiale a déjà permis d'indiquer qu'il existe une rétraction de la végétation des zones montagneuses depuis 2010 (De Simone et al., 2021). A notre connaissance, l'ICVM à l'échelle nationale de la Suisse n'a pas encore été produit de manière annuelle et n'a pas du tout été calculé avant 2000. Dans le cadre de ce mémoire de géomatique, l'ICVM de la Suisse sera donc mesuré chaque année de 1984 à 2018 afin de connaître l'évolution de la proportion de la surface de végétation dense et saine dans les zones de montagne suisses. Cette opération sera réalisée majoritairement avec le logiciel ArcGIS, en définissant les zones vertes saines à l'aide d'une valeur seuil appliquée au *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) annuel moyen de la Suisse, dont les données, produites grâce aux satellites Landsat 5 et Landsat 8, sont issues du Swiss Data Cube (Italiano, Chatenoux, Poussin & Giuliani, 2020). Ainsi, à la place de définir les surfaces végétalisées grâce aux classes de couverture du sol du Groupe d'Experts International sur le climat (GIEC), comme le préconise la FAO (2020), nous utilisons ici le NDVI à une résolution de 30 mètres à l'échelle nationale et à l'échelle des zones biogéographiques de la Suisse. A notre connaissance, seuls les auteurs Bian, Li, Lei, Zhang et Nan (2020) ont actuellement utilisé une méthodologie semblable, s'appuyant sur le NDVI, pour produire l'ICVM mondial d'une année spécifique.

1.2 Contexte climatique actuel et futur des zones montagneuses

Les zones de montagne représentent 22% de la surface terrestre et abritent plus de 85% des espèces d'amphibiens, d'oiseaux et de mammifères, tout en hébergeant 915 millions de personnes (FAO, 2021). Elles fournissent par ailleurs des ressources essentielles, telles que de l'eau douce à la moitié de la population mondiale, et sont ainsi considérées comme les châteaux d'eau du monde (Kohler, Wehrli & Jurek, 2014). Il semble ainsi primordial de suivre leur évolution car elles constituent aussi l'un des écosystèmes les plus vulnérables face au changement climatique mondial en cours (FAO, 2021 ; Kohler et al., 2014). Bien que les zones de montagne à l'échelle globale ne semblent pas démontrer un réchauffement uniforme plus prononcé que les régions de plaine, les Alpes européennes sont concernées par un réchauffement de 0.12 à 0.20°C par décennie, ce qui constitue trois fois la moyenne globale (Kohler et al., 2014).

Quant au territoire de la Suisse, pays alpin, celui-ci est particulièrement touché par le réchauffement climatique avec une augmentation des températures de plus de 2 degrés depuis 1864 (MeteoSuisse, 2022), surpassant ainsi largement la moyenne mondiale qui se situe à environ +1 degré (Kohler et al., 2014). Les précipitations du pays ont aussi changé, avec une augmentation générale ces 150 dernières années en hiver, mais moins de neige qu'auparavant surtout en basse altitude. Les fortes précipitations ont augmenté avec une fréquence et une intensité (sommés journalières) plus importantes (MeteoSuisse, 2022) ; il y a aussi moins de jours de gel, et plus de nuits et de jours tropicaux. Ces évolutions vont probablement se poursuivre dans le futur, en sus d'étés plus secs (MeteoSuisse, 2022). En outre, d'ici 2060, selon le NCCS, il est attendu une augmentation plus importante des températures en été dans les zones alpines de la Suisse que dans les zones de plaine, peu importe le scénario climatique envisagé (voir RCP 2.6 et RCP 8.5 de la figure 2) (Fischer & Strassmann, 2018).

Température

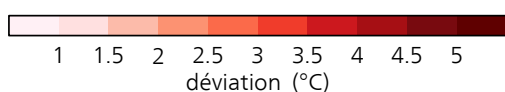
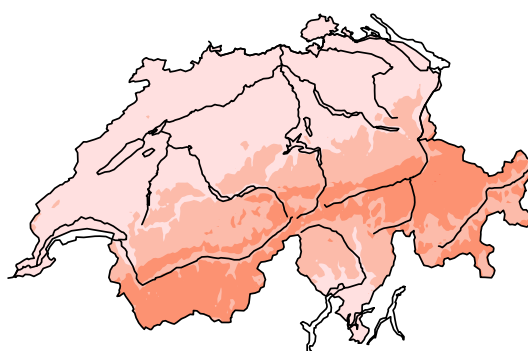
déviations de la période standard 1981-2010

2060

été

estimation moyenne

RCP2.6



© scénarios climatiques CH2018

Température

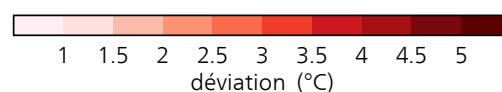
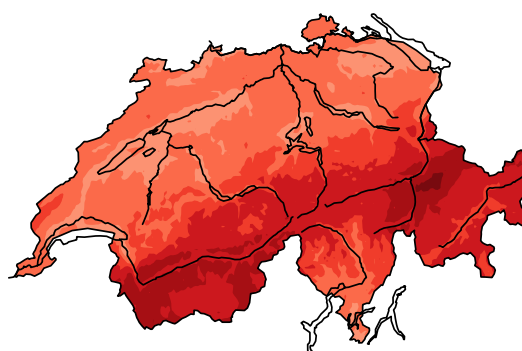
déviations de la période standard 1981-2010

2060

été

estimation moyenne

RCP8.5



© scénarios climatiques CH2018

Figure 2 : Scénario climatique RCP2.6 et RCP8.5 de la Suisse à l'horizon 2060 par rapport à la période standard 1981-2010. Source : NCCS, 2018

En conséquence, ces phénomènes laissent craindre une augmentation importante des risques naturels, ainsi que des impacts sur l'eau potable, sur la génération d'énergie hydroélectrique et sur l'agriculture (Kohler et al., 2014). En effet, du fait de la capacité des zones montagneuses à fournir de l'eau douce, elles permettent ainsi d'abreuver les populations, de les nourrir, mais aussi de les fournir en énergie grâce aux installations hydroélectriques. Elles sont par ailleurs une destination touristique d'importance, contribuent à l'identité d'un pays ou d'une région, fournissent des matériaux bruts, et abritent une biodiversité riche. Les zones de montagne offrent donc des services écosystémiques très importants à une échelle globale (Kohler et al., 2014). Du fait de leur vulnérabilité, les fluctuations climatiques, mais aussi la perte de la couverture glaciaire et de la biodiversité des montagnes, menacent alors directement l'approvisionnement en eau, en énergie et en nourriture, en plus du tourisme hivernal. Le témoin le plus marquant de ces changements à venir constitue la fonte des glaciers : selon le meilleur et le pire scénario climatique envisagés par le GIEC, les glaciers des Alpes perdront entre 75% et 100% de leur volume d'ici 2100. Avec ces transformations climatiques, il faut prévoir en somme une augmentation des aléas naturels dus aux fortes précipitations, à la fonte des neiges, des glaciers et du pergélisol, ainsi qu'à la hausse de la limite pluie-neige. Cela laisse craindre un accroissement des glissements de terrain, des avalanches, des coulées de boue, des laves torrentielles, des inondations et des sécheresses (Kohler et al., 2014). Par leur topographie et leur connexion avec les différents états de l'eau, les montagnes sont des paysages actifs, dont le degré d'activité semble démultiplié par le réchauffement climatique.

Face à ces risques de plus en plus accrus, des stratégies d'adaptation doivent être implémentées pour parer à la vulnérabilité des populations. L'un des moyens préventifs les plus économiques et multifonctionnels est la protection par une couverture végétale saine. En effet, le couvert végétal préserve la capacité de l'écosystème à maintenir les sols, à empêcher les glissements de terrain et les inondations en aval (FAO, 2020). En Suisse, ce sont les forêts qui sont notamment considérées très efficaces à cette fin, du fait de leur capacité de stabilisation des sols, d'absorption de l'eau, de lutte contre l'érosion et d'obstacle aux chutes de pierre ou de neige. Le projet SilvaProtect-CH de l'Office fédéral de l'environnement (Office fédéral de l'environnement (OFEV), 2016) a démontré que près de la moitié des

forêts en Suisse sont des forêts protectrices qui préservent les zones habitées, les voies de communication et les industries des dangers naturels. La loi fédérale sur les forêts exige que les cantons leur garantissent alors des soins minimaux (WSL, 2014). En outre, depuis 1876, l'autorité fédérale a ordonné l'interdiction de défrichement, et le reboisement des forêts en montagne (OFS, 2021). Car ce sont les forêts des zones alpines de la Suisse qui assurent le plus ce rôle protecteur, avec par exemple 87% de la forêt dans le canton du Valais qui est considérée comme protectrice (figure 3). En plus de cette fonction protectrice, la forêt permet aussi de retenir l'eau et de la purifier, de lutter contre les sécheresses, de fournir du bois, et d'offrir des opportunités de récréation (Honeck et al., 2018). Ces fonctions peuvent être retrouvées à différents degrés pour tout type de couverture végétale saine (FAO, 2020).

Toutefois, en sus des risques dus au réchauffement climatique, les activités anthropiques ont grandement modifié les paysages naturels et leurs écosystèmes (Huang et al., 2017). En plus de l'avancée des infrastructures, le pays est par ailleurs majoritairement couvert d'espèces arborées peu résilientes face au réchauffement en cours, tel que l'épicéa ou le hêtre par exemple (WSL, 2017). De ce fait, la fonctionnalité de l'infrastructure écologique n'est pas à considérer comme acquise, la capacité des écosystèmes à maintenir leurs fonctions premières étant alors menacée. La Suisse étant un pays couvert en grande partie par des montagnes, celle-ci est-elle alors en mesure de trouver la résilience nécessaire pour s'adapter aux enjeux à venir ? La végétation et la montagne offrant toutes deux des services écosystémiques essentiels au bien-être humain, il convient d'évaluer l'état et l'évolution de la végétation en zone montagneuse. La surveillance de l'ICVM dans le temps peut ainsi fournir des informations sur la santé générale de l'écosystème montagnard et ses changements. Cette évaluation à long terme permet de contribuer à contrôler la capacité de la montagne à prodiguer ses bienfaits durablement, tout en restant une zone sécurisée.



Figure 3 : Proportion de forêts protectrices dans les cantons. Source : OFEV, cité par WSL, 2014

2. Données et méthodologie

2.1 L'ICVM présenté par la FAO

Comme mentionné précédemment, « l'ICVM est défini comme le pourcentage de couvert végétal par rapport à la surface totale de la région montagneuse d'un pays déterminé et pour une année de référence déterminée » (métadonnées de la FAO, 2020, p.1). Celui-ci se calcule donc comme suit :

$$\text{ICVM} = \frac{\text{Superficie du couvert végétal montagneux}}{\text{Superficie totale de la montagne}} \text{ exprimées en pourcentage}$$

Selon la méthodologie de l'ICVM fournie par la FAO (2020), l'Indice de couvert végétal montagneux se base sur le croisement de deux couches d'informations descriptives :

- Une couche descriptive des montagnes fondée sur la définition de la montagne du PNUE-WCMC, suivant elle-même celle proposée par Kapos, Rhind, Edward, Prince & Ravillous (2000). Cette description présente les montagnes en 6 catégories selon l'altitude, la pente et la variation de l'élévation locale (appelée LER dans ce travail en référence au terme anglais *Local Elevation Range*) (figure 4) ; en complément de la figure 4, la FAO ajoute que la classe 0 est celle qui est définie pour représenter les zones non montagneuses. En effet, selon la

FAO (2020), la différenciation en fonction de l'élévation est importante pour comprendre les changements qui se manifestent en raison de l'influence de la pente, de l'aspect et de l'altitude de la zone montagneuse. Ces différentes classes seront nommées *zones Kapos* dans la suite de ce travail.

Classe de montagne	Description
1	Élévation > 4500 mètres
2	Élévation > 3500-4500 mètres
3	Élévation > 2500-3500 mètres
4	Élévation > 1500-2500 mètres et pente > 2
5	Élévation 1000–1500 mètres et pente > 5 ou variation d'élévation locale (RET avec un rayon de 7 kilomètres) > 300 mètres
6	Élévation 300–1000 mètres et variation d'élévation locale (rayon de 7 kilomètres) > 300 mètres

Figure 4 : les 6 catégories de montagne selon Kapos et al., 2000. Source : FAO, 2020

- Une couche descriptive de la végétation établissant les zones vertes, qui incluent la végétation naturelle et anthropique (prairies, arbres, arbustes, cultures, forêts et boisements) et les zones non vertes (terres dénudées, eau, neige et glace, zones urbaines). La FAO indique que ces cartes de végétation peuvent être issues de différentes sources, mais celles à privilégier sont celles issues de la télédétection. Pour l'instant, la FAO utilise les séries chronologiques de la couverture du sol produites par l'Agence spatiale européenne (ESA) dans le cadre de l'Initiative sur le changement climatique, et reclassifie les nombreuses classes en 6 classes, définies par le GIEC, qui représentent les catégories de couverture terrestre (Forêt / Prairie / Terre cultivée / Zone humide / Etablissements / Autres terres). Finalement, celles-ci sont classées en catégories binaires (zones vertes et zones non vertes). Ces couches de couverture du sol sont disponibles à une résolution de 300 mètres de 1992 à 2018. Chaque pixel du fichier raster est attribué à une seule catégorie de couverture terrestre, dont on peut ensuite faire la somme pour obtenir les superficies des catégories binaires, qu'on divisera par le nombre de pixels de montagne, comme suit :

$$ICVM = \frac{\text{Nombre de pixels de montagne classés comme VERTS}}{\text{Nombre total de pixels de montagne}} \times 100$$

Dans le cadre de ce travail, la méthodologie proposée par la FAO (2020) pour mesurer l'ICVM a été partiellement modifiée. Les adaptations réalisées, les sources des données et la méthodologie appliquée sont détaillées ci-après.

2.2 Description et source des données

2.2.1 Provenance des données géospatiales et différence avec la FAO

La couche descriptive des montagnes, réalisée sur la base de Kapos et al. (2000), provient du site internet du Réseau scientifique pour la région montagneuse du Caucase (2017) qui l'a elle-même téléchargée de l'Université Ilias de Berne. Cette couche, d'une résolution de 230 mètres, utilise la même classification Kapos de l'élévation que la FAO (2020), mais possède une classe supplémentaire, la classe 7, qui répertorie les bassins ou plateaux isolés de moins de 25km².

La couche descriptive de la végétation utilisée dans ce travail n'est pas une couche de couverture terrestre similaire à celle produite par l'ESA, contrairement aux préconisations de la FAO. En effet, à la différence de celle de l'ESA qui présente une série de cartes annuelles aux multiples classes établies, il a été décidé d'utiliser une couche préexistante provenant du Swiss Data Cube, qui indique les valeurs du NDVI annuel moyen de la Suisse, basé sur les 12 mois de chaque année, pour chaque pixel de 1984 à 2018. Cette couche de calcul du NDVI, produite par Italiano, Chatenoux, Poussin et Giuliani (2020) est issue des images des satellites Landsat 5 et Landsat 8, qui étaient également préalablement disponibles sur le Swiss Data Cube. A partir de ces données, dans ce travail, nous avons ensuite pu définir les catégories binaires des zones de végétation saine et dense ainsi que des zones dépourvues de végétation de ce type, grâce à une valeur seuil appliquée au NDVI pour chaque année observée. Cette étape sera explicitée plus en détails dans la partie suivante.

En plus de ces couches citées par la FAO, nous avons également eu besoin d'une couche de la surface de la Suisse pour délimiter le périmètre d'étude, et d'une couche déclinant les 6 régions biogéographiques de la Suisse, créée par l'OFEV (2011). En effet, afin de bien comprendre les variations de l'ICVM et les stratégies éventuelles à implémenter, le fait de porter l'analyse au niveau infranational est nécessaire (Bian et al., 2020).

2.2.2 L'utilisation du NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

L'indice différentiel normalisé de végétation - l'acronyme NDVI utilisé généralement est issu de l'anglais : Normalized Difference Vegetation Index - permet de fournir des indications sur la vigueur de croissance de la végétation en relatant son « intensité de vert ». L'indice permet donc d'évaluer l'activité photosynthétique, qui est elle-même liée à la masse de végétation et à son état de santé (Meneses-Tovar, 2011 ; Pettorelli et al., 2005). Il se calcule à l'aide d'une formule simple qui combine les bandes rouges et proche infrarouge des images. De ce fait, le NDVI est facilement utilisable et offre des résultats satisfaisants lorsqu'il est comparé à d'autres indices de masse végétale par exemple (Meneses-Tovar, 2011 ; Verhoeven & Dedoussi, 2022). Cet indice se révélerait d'une efficacité particulière lorsqu'il s'agit de classifier les couvertures du sol des types de végétation et déterminer le pourcentage de végétation et ses changements au fil du temps (Pettorelli, 2013, cité dans Italiano, 2020, non publié). En effet, les différences de valeurs du NDVI traduisent les réponses spectrales des différents objets (Huang et al., 2021).

Concrètement, les valeurs du NDVI se situent entre -1 et 1. Les valeurs négatives représentent les éléments non végétaux, comme les surfaces d'eau. Les valeurs proches de 0 (-0.1 à 0.1) représentent en général le sol nu, les roches, la neige ou les revêtements urbains. Les valeurs positives basses (de 0.2 à 0.4 environ) représentent la végétation de faible densité (cultures, prairies et arbustes inclus), tandis que les valeurs s'approchant de 1 représentent les forêts tempérées ou tropicales (GitHub, 2020). Dans ce travail, le NDVI ayant été généré avec une moyenne annuelle de tous les mois de l'année, et pas seulement de la période de croissance (voir Italiano et al., 2020), les valeurs de plus de 0.5 sont généralement en mesure de représenter la végétation ayant une activité photosynthétique assez importante, incluant en général les prairies et les boisements qui peuvent avoir des valeurs similaires si elles sont saines (Giuliani, communication personnelle, 2021 ; Huang et al., 2021). Les cultures sont en revanche le plus souvent exclues avec ce seuil (Giuliani, communication personnelle, 2021). En effet, les champs représentant souvent des monocultures, ceux-ci ont souvent une vigueur végétale moins importante et donc un NDVI plus bas que 0.5. En conséquence, on suppose que les services écosystémiques de protection notamment sont diminués pour cette classe de couverture par rapport aux autres types de végétation plus vigoureux. Ce choix d'exclusion a priori des cultures diffère donc également de la méthodologie proposée par la FAO.

Ainsi, la couche descriptive de la végétation choisie présente à notre sens trois avantages par rapport aux couches de couvertures terrestres déjà définies et fournies par l'ESA. Tout d'abord, celle choisie dans ce travail a été générée annuellement dès 1984 jusqu'à 2018, là où celle de l'ESA est disponible annuellement seulement de 1992 à 2018. En outre, un ICVM fondé sur le NDVI permet de s'affranchir de la cartographie officielle nationale, qui reste une option alternative à celles de l'ESA (FAO, 2020) ; celle de l'Office fédéral de la statistique (OFS) de la Suisse par exemple est publiée tous les 6 à 12 ans (OFS, 2021). Une plus longue série temporelle suivie de manière plus régulière comme celle que peut offrir le NDVI permet à la place d'analyser les variations annuelles et de suivre leur évolution de manière plus exacte afin d'observer la tendance sur une plus longue période. La couche de la végétation du NDVI moyen permet aussi d'accéder à une résolution plus précise, avec un pixel couvrant 30 mètres, contrairement à celle de l'ESA qui a une résolution de 300 mètres. Une résolution de 30 mètres permet ainsi de mieux distinguer les différentes couvertures du sol relatives à la distribution et l'hétérogénéité spatiale de chaque pays (Bian et al., 2020), ce qui s'avère très utile dans le cas de la Suisse qui est un petit pays d'une grande hétérogénéité. Finalement, le fait de se fonder sur une valeur seuil du NDVI moyen, produit sur la base d'un calcul de bandes spectrales issues d'un satellite à la fois (Landsat 5 ou 8), plutôt que de produire une carte de couverture du sol combinant plusieurs satellites comme c'est le cas pour les cartes de couverture terrestre de l'ESA, ou d'interpréter visuellement chaque image à une résolution de 100 mètres comme c'est le cas pour les cartes de l'Office fédéral de la Statistique (OFS) (2021), présente une plus grande facilité d'application et donc une meilleure accessibilité et reproductibilité (Honeck et al., 2018 ; Huang et al., 2017). En effet, ces techniques coûteuses et chronophages présentent un manque de praticité pour un usage généralisé (Petrou et al., 2015, cité dans Italiano, 2020, non publié). Le NDVI comme base de l'ICVM permet donc d'offrir une plus grande capacité d'action aux organisations ou aux personnes souhaitant calculer l'indice. En somme, avec une méthodologie axée sur le NDVI, le suivi temporel peut ainsi se réaliser de manière plus régulière sur

une plus longue période, avec une meilleure résolution que les autres méthodes proposées par la FAO, en plus d'offrir une facilité d'application non négligeable.

2.3 Description du terrain d'étude

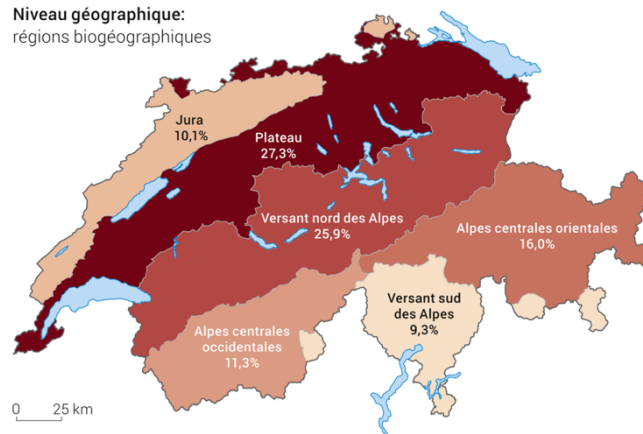
La Suisse est un petit pays situé vers le centre occidental de l'Europe, d'une superficie de 41'291 km². Du fait de sa topographie comprenant à la fois une zone relativement plate, et des zones de moyenne à haute montagne, la Suisse comprend une grande diversité d'espaces naturels pour sa taille. Le pays peut ainsi être subdivisé en six régions biogéographiques qui présentent une certaine unité en termes de topographie, de climat, de nature du sol, ainsi qu'en termes de faune et de flore. Il existe aussi des différences importantes de couverture et d'utilisation du sol selon ce découpage (OFS, 2021). Le Plateau, étant la région la moins élevée en altitude, recense par exemple la majorité des activités humaines.

La carte de l'OFS (figure 5) présente ce découpage et la part de superficie attribuée à chaque région. Ce sont ainsi le Plateau (27%) et le Versant Nord des Alpes (26%) qui occupent la plus grande partie du territoire.

Régions biogéographiques en part de superficie, en 2018

G 3

Niveau géographique:
régions biogéographiques



Source: OFEV 2020

© OFS 2021

Figure 5 : Régions biogéographiques de la Suisse. Source : OFS 2021

2.4 Traitements géomatiques et graphiques

2.4.1 Prétraitement des couches

Pour résumer, dans ce travail, 4 groupes de couches ont été utilisées :

- la couche *Kapos* représentant les 7 zones de montagne Kapos – à noter que la zone 1 n'est pas répertoriée en Suisse, et que la zone 0 représente les zones non montagneuses
- la couche *ch_border* représentant les frontières de la Suisse
- les couches annuelles *NDVI_*année** de 1984 à 2018, excepté celle de l'année 2012 qui a été écartée en raison d'une panne du satellite Landsat 7 (Italiano et al., 2020). Celles-ci se trouvent à l'échelle de la Suisse, mais le NDVI des cours d'eau principaux et des lacs a été préalablement retiré.
- la couche *bioregion* représentant les 6 régions biogéographiques de la Suisse

Dans un premier temps, les 4 couches utilisées dans ce travail ont été re-projetées dans l'application ArcMap dans la même projection avec l'outil Project si la couche était un vecteur ou Project Raster en cas de raster. Nous avons tout d'abord utilisé la projection GCS_WSG_1984 pour des raisons pratiques car les couches annuelles du NDVI et la couche des zones Kapos avaient déjà cette projection. Cependant, dans un deuxième temps, il a été constaté que cette projection modifiait les surfaces des outputs, il a donc été décidé d'utiliser la nouvelle projection de la Suisse, soit CH1903 / LV95+.

Ensuite, la couche *Kapos* étant initialement à une échelle mondiale, l'outil Clip a été utilisé avec comme étendue la couche *ch_border*. La couche en format raster a été conservée, puis une autre version a été créée en format polygone pour permettre aux 2 outils principaux de ce travail de fonctionner correctement.

2.4.2 Outils principaux utilisés

Pour permettre de calculer l'ICVM, l'outil principal que nous avons choisi d'utiliser dans ce travail est *Tabulate Intersection*. En effet, cet outil a la capacité d'afficher à la fois les surfaces de chaque classe dans l'unité choisie (km² dans ce travail), mais il permet surtout d'indiquer les pourcentages de surface de chaque sous-catégorie sélectionnée.

Ainsi, pour chaque année observée (soit 1 année = 1 output), l'outil permet d'indiquer pour chaque zone Kapos et pour chaque région biogéographique, le pourcentage de surface de végétation dense et saine et le pourcentage de surface qui en est dépourvu. Pour utiliser *Tabulate Intersection*, il est nécessaire de choisir au préalable une valeur seuil du NDVI permettant d'indiquer quelle est la vigueur nécessaire du NDVI qui permet l'appartenance à la catégorie de végétation saine et dense. Cela s'est réalisé avec l'outil *Reclassify* qui a permis d'attribuer à chaque pixel la catégorie binaire de couverture du sol à laquelle il appartenait. La valeur fixée dans ce travail est une valeur annuelle moyenne du NDVI de 0.5, comme nous l'avons vu précédemment, en référence à ce qui est cité généralement dans la communauté scientifique.

Le deuxième outil principal utilisé dans le cadre de ce travail est *Zonal statistics*. Cet outil a permis d'obtenir des statistiques annuelles du NDVI telles que la moyenne, la médiane, le minimum et maximum, l'écart type et la variance à l'échelle nationale, ainsi que pour chaque zone Kapos, puis pour chaque région biogéographique. Cela a permis de compléter l'ICVM et la part végétale de chaque échelle considérée.

2.4.3 Modelbuilder

Avec un volume si conséquent de données à analyser, l'application Modelbuilder du logiciel ArcGIS a été d'une grande utilité. Cette dernière a permis de créer des modèles concaténant des séquences d'outils de géotraitement, en injectant l'output d'un outil dans un autre outil. De cette manière, toutes les années du NDVI ont pu automatiquement subir le même processus de traitement, incluant les outils principaux cités dans la section précédente ainsi que leurs prétraitements et post-traitements.

De manière générale, la création d'un modèle consiste à créer un dossier dans lequel tous les fichiers raster ou vecteur sont contenus, puis de le mettre en entrée d'un *Itérateur* qui permet de répéter en boucle une séquence d'outils pour chacun des fichiers du dossier. A chaque étape du processus, les fichiers en sortie d'un outil doivent alors être appelés « *%Nom donné au fichier de base de l'itérateur%* » pour leur permettre de passer à travers toutes les étapes de l'itération en gardant leur identité propre (en l'occurrence l'année du NDVI). Lorsque le type de fichier est modifié, par exemple, lorsque l'on souhaite passer d'un fichier .tif à un fichier .dbf, il a été en outre nécessaire d'ajouter un outil propre à l'itération appelé *Parse Path* qui permet d'attribuer un nouveau nom sans l'extension du type de fichier venant s'ajouter au nouveau nom en sortie. La valeur en sortie de cet outil a dû ensuite être injectée dans l'outil qui cherche à convertir le type de fichier.

Par ailleurs, les deux outils principaux utilisés permettant de créer des tableaux en sortie, l'outil de ModelBuilder nommé *Collect Values* apposé en sortie du modèle, et auquel on ajoute un paramétrage, a permis de garder en mémoire tous les tableaux en sortie au même endroit. Le modèle devient alors un sous-modèle, qui peut être inséré dans un modèle principal. Il suffit ensuite d'utiliser l'outil *Append* dans ce dernier, ce qui permet de créer un seul fichier .dbf par exemple avec tous les tableaux annuels réunis pour chaque étendue sélectionnée.

2.4.3.1 Modèles Tabulate Intersection

Le premier modèle réalisé dans ModelBuilder (fig.8) a permis d'utiliser l'outil *Tabulate Intersection* pour chaque année du NDVI afin de définir le pourcentage de végétation saine par zone Kapos à l'échelle nationale. Pour ce faire, après avoir inséré le répertoire des années NDVI à disposition, l'outil *Reclassify* a tout d'abord été utilisé, permettant ainsi de déterminer 2 classes (Végétation dense et saine vs. Pas de végétation ou végétation non dense) à partir de la valeur seuil de 0.5 du NDVI. Il était ensuite nécessaire de convertir de raster en vecteur les 2 fichiers en entrée de l'outil *Tabulate Intersection*. Le fichier des zones Kapos étant invariable, celui-ci a été converti manuellement et inséré en entrée sans changement pour chaque année. La conversion du fichier NDVI en shapefile a pour sa part été automatisée, comme on le voit dans le modèle présenté ci-après. La table sortante est NDVI*année*.dbf. Pour cette partie, aucun sous-modèle n'a été créé, une table combinant les années ayant ensuite été réalisée manuellement dans Excel.

Le deuxième modèle (fig.7) a permis d'utiliser l'outil *Tabulate Intersection* pour chaque année disponible du NDVI par région biogéographique et par zone Kapos pour permettre de connaître les évolutions de la couverture végétale dense et saine à une échelle plus fine. Pour ce faire, le répertoire contenant les années du NDVI déjà reclassifiées et

converties en polygones avec le modèle précédent a été inséré dans ce nouveau modèle. Chaque région biogéographique a ensuite été ajoutée manuellement l'une après l'autre sous forme de shapefile, convertie au préalable dans un autre petit modèle non présenté dans ce rapport (dans l'exemple, c'est *alpwest_kap.shp* qui est ajoutée). Finalement, ce modèle étant un sous-modèle du modèle principal permettant d'assembler les différents tableaux de chaque année, il a été nécessaire pour des questions de lisibilité d'ajouter un champ à chaque tableau nommé en fonction de l'année de référence avant de collecter les différentes valeurs qui ont ensuite été insérées dans le modèle principal (fig.6).

Afin d'obtenir les pourcentages de surface avec une végétation dense et saine (NDVI > 0.5) uniquement pour les zones de montagne, les zones Kapos considérées comme telles (zones 2, 3, 4, 5, 6) ont été assemblées dans la table attributaire du shapefile de la Suisse, et de chaque région biogéographique avec l'outil *Merge*. Des modèles principaux et des sous-modèles utilisant *Tabulate Intersection* ont été à nouveau utilisés avec les vecteurs NDVI déjà reclassifiés qui ont été projetés dans la nouvelle projection. Cela a permis de mettre en lumière l'ICVM annuel de la Suisse et de chaque région biogéographique basé sur le NDVI. Il est à noter que les figures de ces modèles ne sont pas présentées ci-après car ceux-ci sont très ressemblants de ceux cités précédemment déjà exposés ci-dessous.

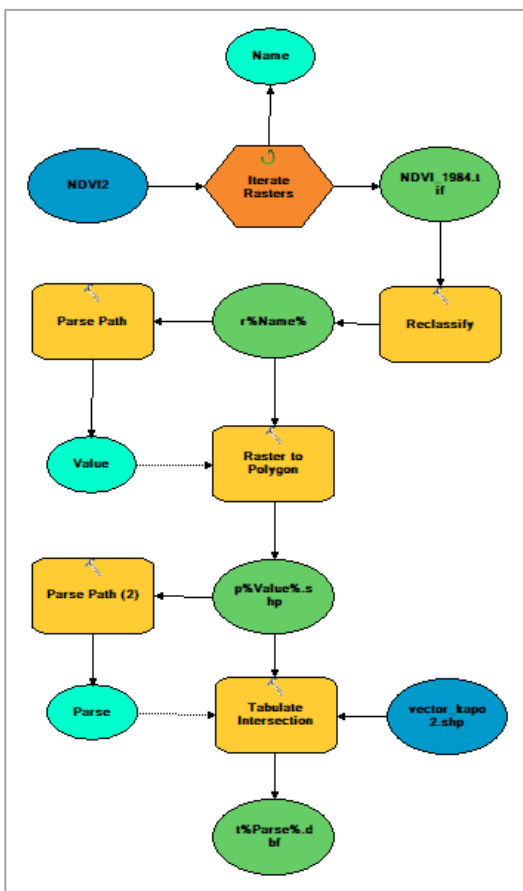


Figure 7 : Le modèle Tabulate Intersection à l'échelle nationale par zone Kapos

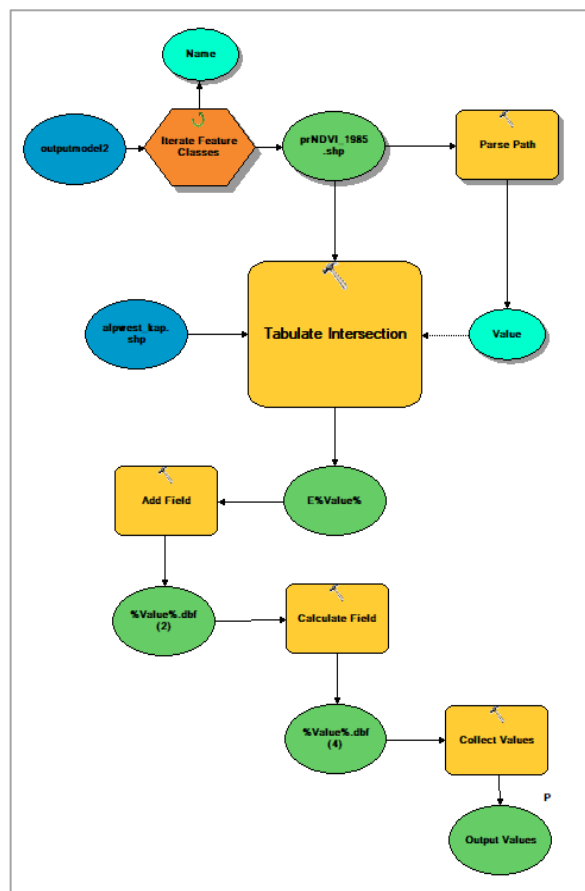


Figure 6 : Le sous-modèle Tabulate Intersection à l'échelle biogéographique (exemple avec les Alpes de l'Ouest)

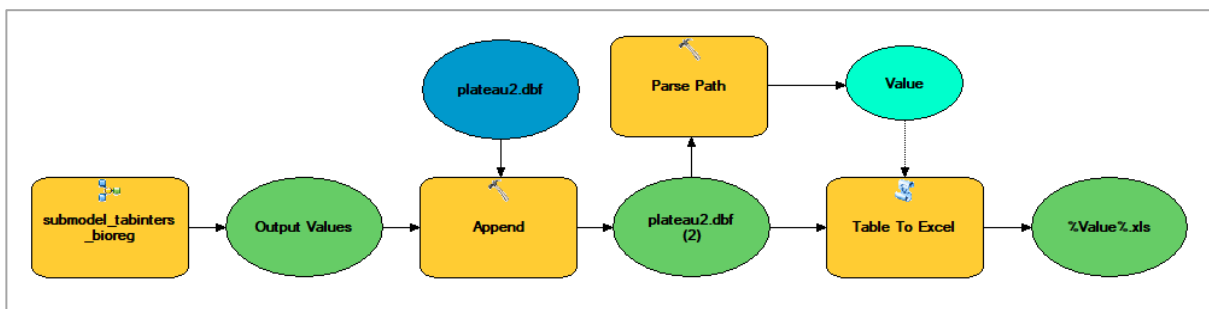


Figure 8 : Le modèle principal Tabulate Intersection à l'échelle biogéographique (exemple avec la région du Plateau)

2.4.3.2 Modèles Zonal Statistics as table

Afin d'obtenir les différentes statistiques spatiales du NDVI par zone Kapos à l'échelle nationale (fig.9), puis à l'échelle des régions biogéographiques (fig.10), deux modèles (qui constituent en réalité des sous-modèles comme vu dans l'exemple précédent) ont été créés avec comme outil central *Zonal Statistics as Table*. Conformément à la page dédiée à cette procédure (ESRI, 2021), si l'on veut obtenir tous les types de statistiques disponibles grâce à cet outil (Minimum, Maximum, Plage, Moyenne, Ecart type, Somme, Variété, Majorité, Minorité et Médiane), il est nécessaire d'avoir des nombres entiers en entrée, ce qui n'est pas le cas du NDVI qui possède des valeurs à virgule entre -1 et 1. La première étape de prétraitement visible à la figure 9 consistait à multiplier les rasters du NDVI par 1'000'000 grâce à l'outil *Raster Calculator*. Il a ensuite fallu convertir les rasters de virgule flottante en rasters d'entiers à l'aide de l'outil *Int* avant de procéder à la génération de la table statistique avec l'outil qui y est dédié. Le modèle permettant de générer des statistiques par région biogéographique (fig.10), possède déjà comme répertoire les valeurs du NDVI multipliées et converties, ce qui minimise les traitements à opérer. Il suffit ensuite de les découper avec l'outil *Clip* à l'échelle de chaque région biogéographique, puis d'injecter les zones Kapos de la région en question dans l'outil *Zonal Statistics as Table*. Les dernières étapes visibles dans les deux modèles consistent à récolter les valeurs pour créer un tableau final rassemblant toutes les années et à en faciliter la lecture. Finalement, les valeurs initiales du NDVI sont retrouvées lorsque l'on divise par 1'000'000 les chiffres des colonnes appropriées dans un logiciel tableur comme Microsoft Excel.

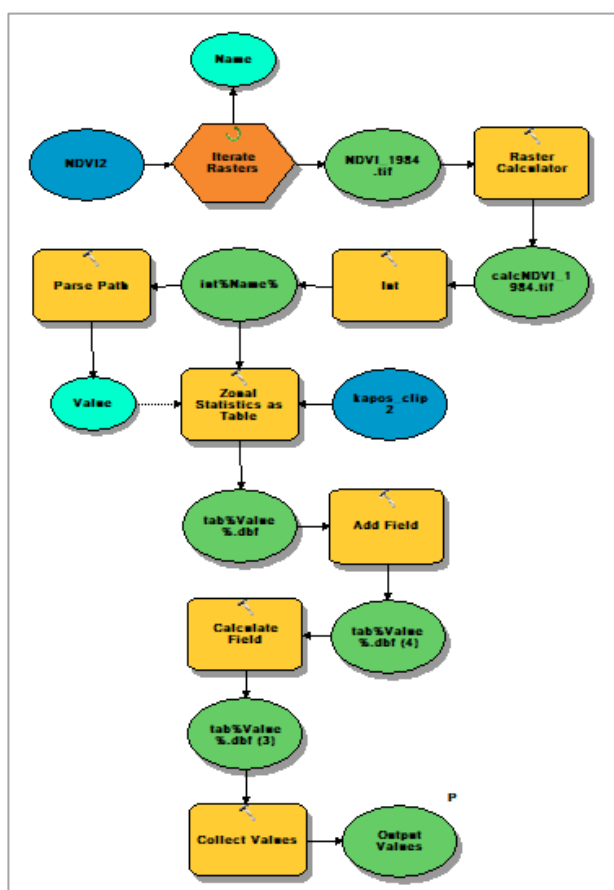


Figure 9 : Modèle du Zonal statistics as Table à l'échelle nationale par zone Kapos

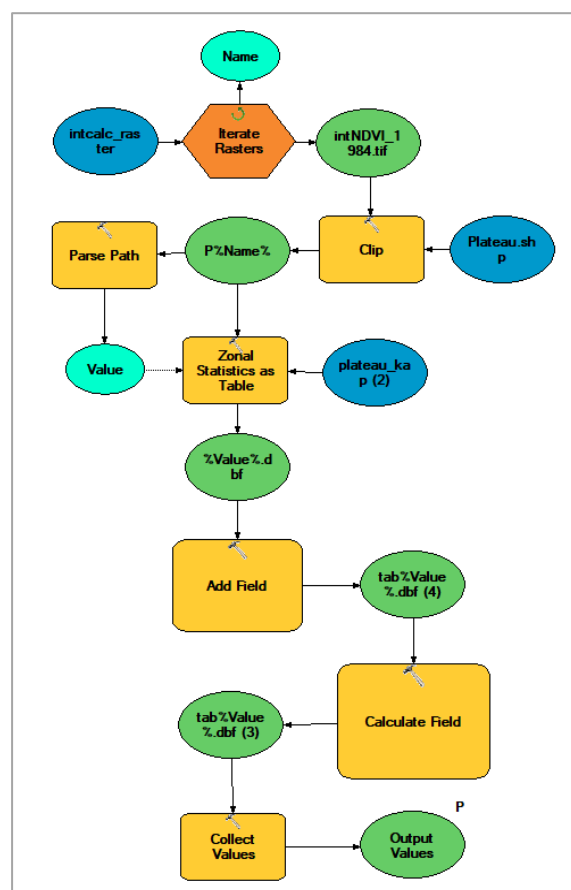


Figure 10 : Modèle du Zonal Statistics as Table à l'échelle biogéographique

2.4.4 Tableaux dynamiques et graphiques

Les tables en sortie des différents modèles ont ensuite été importées dans Microsoft Excel où elles ont été organisées. Des tableaux dynamiques ont été créés avant de procéder à la mise en graphique. Les graphiques créés ont visé à illustrer la plupart des statistiques disponibles, soit la moyenne, la médiane, l'écart-type, les valeurs minimales et maximales du NDVI ainsi que le pourcentage de végétation saine (NDVI > 0.5) par zone Kapos ou par zone montagneuse (zones Kapos 2, 3, 4, 5, 6 réunies), à l'échelle biogéographique, ainsi qu'à l'échelle nationale. Il est à noter que les valeurs illustrées dans les graphiques doivent se comprendre comme statistiques spatiales. En effet, les

valeurs minimales et maximales par exemple représentent les valeurs du NDVI les plus faibles et les plus importantes de tous les pixels présents dans une certaine zone, et non des valeurs les plus basses et les plus élevées trouvées parmi tous les pixels tout au long de l'année. Il faut ainsi garder à l'esprit que toutes les statistiques présentées dans ce travail se fondent sur les valeurs moyennes annuelles du NDVI de chaque pixel qui étaient déjà à disposition.

2.4.5 Cartographies produites

Plusieurs cartes ont été produites pour observer géographiquement l'évolution de la végétation entre la période la plus ancienne à disposition (1984-1988) et la période la plus récente (2014-2018), à une échelle nationale tout comme à une échelle biogéographique. Les comparaisons s'axent sur une moyenne de 5 ans entre les premières valeurs du NDVI disponibles et les dernières valeurs disponibles afin de lisser les pics annuels du NDVI qui sont moins représentatifs des changements de végétation que de la sensibilité de l'indicateur aux conditions météorologiques annuelles comme la température (cf. Honeck et al., 2018).

Ces cartographies ont été créées dans ArcMap grâce à l'outil *Raster Calculator* qui permet d'additionner les années, puis de soustraire les valeurs des rasters des deux périodes pour mettre en lumière leurs différences. Ainsi, les années 1984, 1985, 1986, 1987 et 1988 ont été additionnées, puis divisées par 5, ainsi que les années 2014, 2015, 2016, 2017 et 2018, elles-mêmes divisées par 5. Une première série de quatre cartes présente tout d'abord les résultats de la moyenne du NDVI pour chacune de ces périodes ainsi que les pixels ayant un NDVI > 0.5.

Puis, les années 1984 - 1988 ont finalement été soustraites aux années 2014 - 2018 pour permettre de générer des cartes de différences présentant des variations > 0.1 pour la Suisse entière, puis des variations > 0.4 à l'échelle de chaque région biogéographique. Le seuil de > 0.4 de variation a été choisi car la volonté est de n'observer que les réels changements de couverture du sol, et de viser à exclure les augmentations jusqu'à 0.4 qui seraient relatives à une différence de sensibilité des capteurs Landsat lors de leur transition en 2011 (cf. Italiano, 2020, non publié ; Honeck et al., 2018). De cette manière, elles offrent également la possibilité de représenter géographiquement les zones Kapos concernées par des pixels ayant fortement varié. Finalement, l'outil *Tabulate Intersection* a encore été utilisé pour permettre d'identifier le pourcentage de surface des zones Kapos et des régions biogéographiques concerné par une variation de > 0.4.

3. Présentation des résultats et interprétation

3.1 Couverture montagneuse de la Suisse par zone Kapos

Un calcul de géométrie de la couche Kapos a révélé que la Suisse présente une superficie de 41'312km², ce qui varie d'une vingtaine de km² par rapport à la réalité. Cependant, le changement est minime et reste attribuable à la résolution de pixels de la couche Kapos. Seuls 2048km² appartiennent à la zone Kapos 0, qui correspond à la zone non montagneuse. Si la zone 7 est exclue du fait de sa particularité car n'appartenant à aucune altitude spécifique, cela signifie que la grande majorité du territoire de la Suisse est considéré comme montagneux, avec 39'184 km², soit 95% de sa surface. Le tableau 1 nous renseigne sur la part de surface de chaque zone Kapos, indiquant que la zone Kapos 6 occupe la majorité du territoire (42%), suivie par la zone Kapos 4 (27%).

Tableau 1 : Surface et part occupée par chaque zone Kapos en Suisse

	Surface (km ²)	Pourcentage (%)
Zone Kapos 2 (3500-4500m)	156	0.4
Zone Kapos 3 (2500-3500m)	4'086	9.9
Zone Kapos 4 (1500-2500m & pente > 2 deg)	11'103	26.9
Zone Kapos 5 (1000-1500m & pente > 5deg ou LER>300m)	6'632	16.1
Zone Kapos 6 (300-1000m & LER>300m)	17'207	41.7
Zone Kapos 7 (bassins ou plateaux isolés <25km ²)	80	Exclue du calcul

Zone Kapos 0 (non montagneuse)	2'048	5
Total	41'312	100

La carte de la figure 11 permet de constater que la zone Kapos 6 occupe en effet une large majorité du Plateau et une petite partie du Jura et des vallées alpines (notamment les Alpes du Nord), tandis que la zone Kapos 4 est majoritaire du côté alpin, qui reste néanmoins beaucoup plus hétérogène dans sa constitution en différentes zones Kapos. Les altitudes les plus élevées (zones 2 ou 3) se retrouvent majoritairement du côté des Alpes occidentales et des Alpes orientales. Cette carte offre finalement l'occasion d'observer les différences de zones Kapos de la Suisse selon les régions biogéographiques, notamment la grande division entre la partie Nord-Ouest (Plateau et Jura) et la partie Sud-Est (régions alpines).

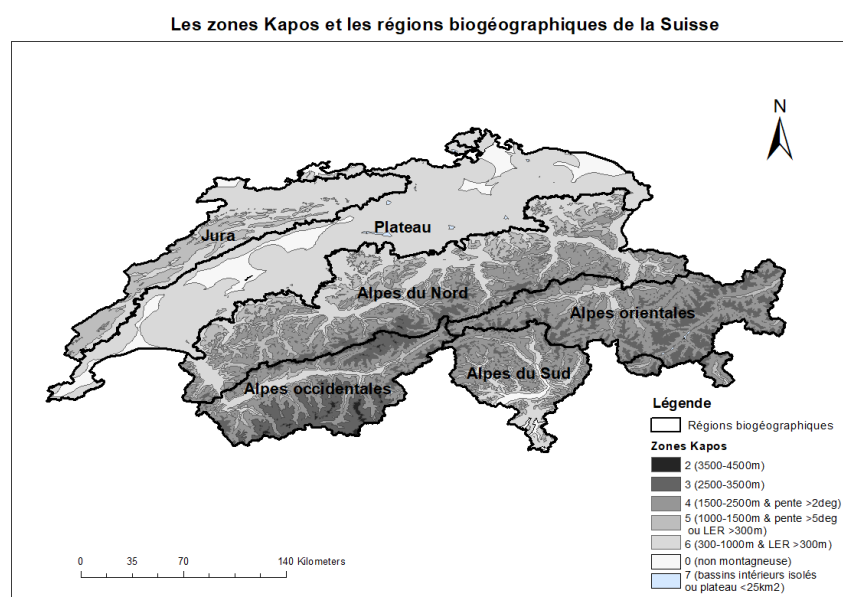


Figure 11 : Les zones Kapos et les régions biogéographiques de la Suisse

3.2 Cartographie de l'évolution du NDVI et de l'ICVM

Les figures 12 et 13 présentent respectivement la moyenne du NDVI de la période la plus ancienne à disposition (1984 – 1988) et celle de la période la plus récente (2014 – 2018). Il est possible de constater que le NDVI est beaucoup plus prononcé pour la période 2014 - 2018 que pour la période 1984 – 1988, en particulier pour les valeurs les plus élevées des zones de basse altitude. Bien qu'il soit délicat de le constater à cette échelle, les zones urbaines semblent également plus délimitées pour la période 2014- 2018 (par exemple Zürich ou Lausanne), le contraste étant plus saisissant entre les zones probablement forestières et l'urbain ainsi que les champs agricoles. Les vallées alpines en particulier ont aussi un NDVI plus élevé, et le Plateau ainsi que le Jura enregistrent une homogénéisation de leur couleur verte plus foncée. Cela se confirme avec les cartes des figures 14 et 15 qui présentent les pixels avec un NDVI > 0.5, soit une végétation que nous qualifions de dense et saine. Pour la période 2014-2018, la couleur verte s'intensifie et s'homogénéise sur la partie Nord-Ouest de la Suisse, tandis qu'elle progresse en dessinant plus clairement les vallées alpines dans la partie Sud-Est.

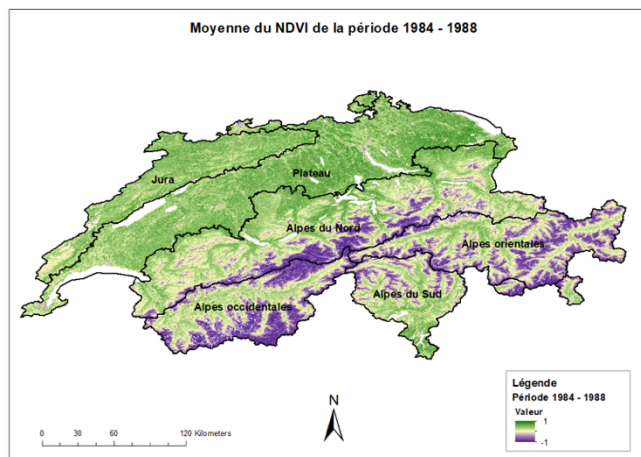


Figure 12 : Moyenne du NDVI de la période 1984 - 1988

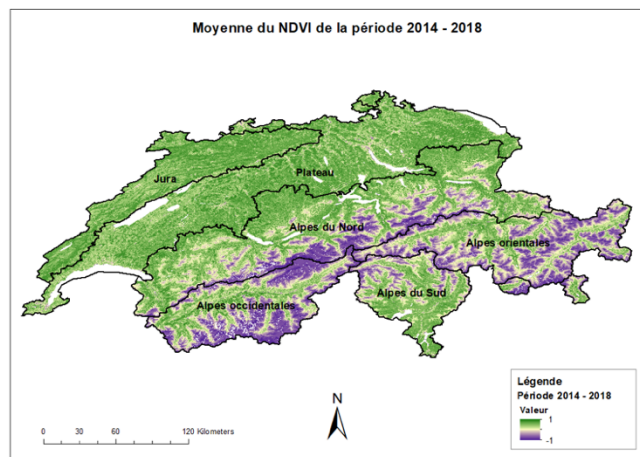


Figure 13 : Moyenne du NDVI de la période 2014-2018

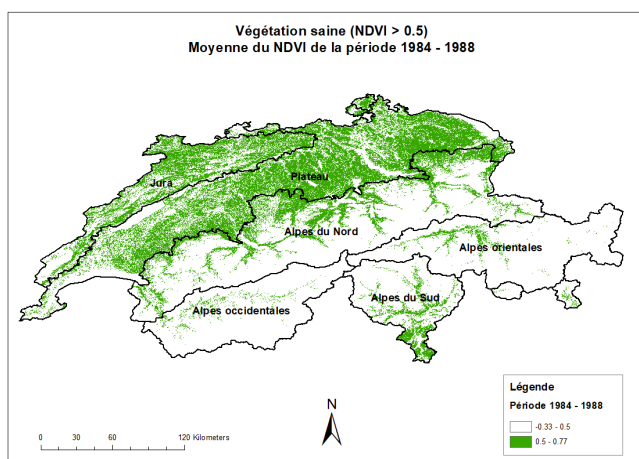


Figure 15 : Végétation saine (NDVI > 0.5) de la période 1984 - 1988

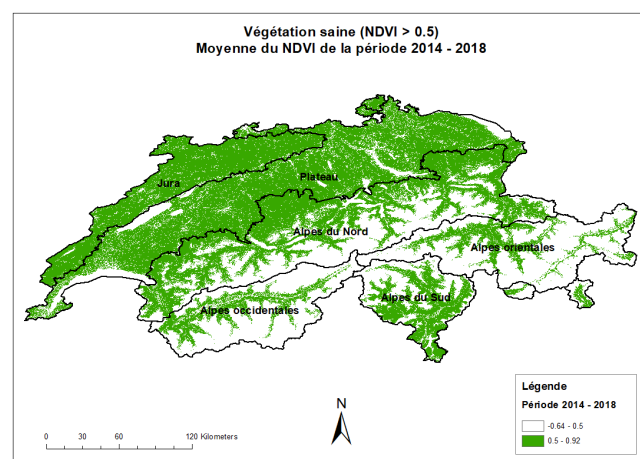


Figure 14 : Végétation saine (NDVI > 0.5) de la période 2014 - 2018

La figure 16 relate la variation des valeurs du NDVI entre la moyenne de la période 2014-2018 et la moyenne de la période 1984-1988. On peut constater que le NDVI a augmenté principalement de 0.1 à 0.4 points sur l'ensemble des basses altitudes comme le Plateau et le Jura, tandis que les Alpes enregistrent une augmentation plus nuancée. En effet, les zones alpines montrent peu d'évolution, hormis les vallées de faible altitude démontrant un NDVI plus élevé (0.1 – 0.4), ainsi que la région des Alpes du Sud principalement couverte par la couleur vert clair. Quelques pixels violets semblent être apparus principalement dans les zones de haute altitude démontrant une perte du NDVI. Cela relate probablement les valeurs minimales qui descendent que nous pourrions observer par la suite sur les graphiques ; cette diminution du NDVI pourrait être due en partie à la perte de la surface des glaciers au profit de la formation de nouveaux lacs ou cours d'eau glaciaires (comme l'étude de Mölg et al., 2021 l'atteste), le NDVI de l'eau étant généralement plus bas que le NDVI de la neige/glace. En revanche, il n'est pas possible de constater à cette échelle de perte notable du NDVI sur le Plateau, aux abords des villes ou des zones urbaines, qui devraient pourtant démontrer l'urbanisation grandissante de ces dernières décennies.

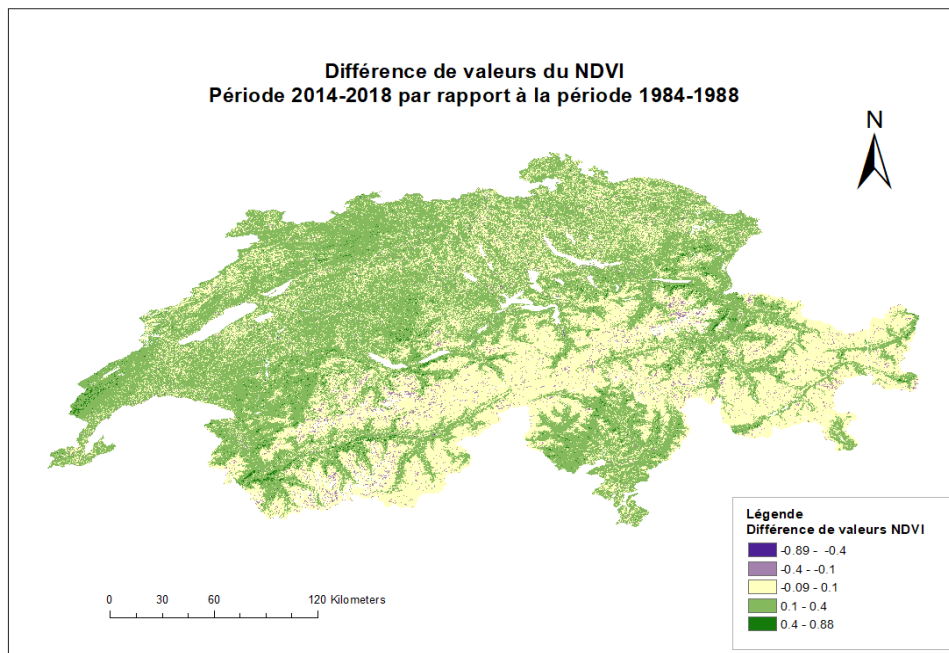


Figure 16 : Variation des valeurs du NDVI entre la période 2014-2018 et la période 1984-1988

Alors que la carte de la figure 16 propose une visualisation des variations de faible envergure (de + ou - 0.1 à 0.4) ainsi que des variations importantes (> + ou - 0.4) à l'échelle nationale, les cartes suivantes, à l'échelle biogéographique, permettent de constater uniquement les variations importantes (> + ou - 0.4). Ainsi, à la figure 18, on constate que la région biogéographique du Jura enregistre une forte hausse du NDVI (>0.4 d'augmentation) concentrée sur sa partie Sud-Ouest, en particulier dans la zone Kapos 5 se situant aux alentours des sommets de la Dôle, du Noirmont et du Mont Tendre. La zone Kapos 6 du Jura connaît quant à elle une augmentation plus parsemée dans la partie Nord-Est de la région biogéographique, ainsi que sur certaines parties de la zone Kapos 5 à proximité. En ce qui concerne le Plateau (fig.17), aucune hausse ou baisse d'importance du NDVI n'est visible, les seuls pixels verts et violets étant grandement dispersés.

La région biogéographique des Alpes du Nord (fig.22) présente quant à elle par endroits une forte agrégation de la hausse du NDVI, en particulier sur la zone Kapos 5, ou à la limite entre la zone Kapos 4 et 5, soit vers 1500m d'altitude. Cette augmentation est également présente par endroits à la limite entre la zone 4 et 5 dans les Alpes orientales, de manière toutefois moins prononcée que les autres régions des Alpes (fig.20). On retrouve cette hausse très marquée localement entre les frontières des zones 4,5 et 6 sur le flanc sud de la Vallée du Rhône de la région des Alpes occidentales, vers le Bas-Valais et le Valais central (fig.19). Des patches de forte hausse du NDVI sont visibles également plus éloignés sur la zone 4. Finalement, les Alpes du Sud présentent la même hausse à la limite entre les zones 4 et 5, avec une extension à noter sur la zone Kapos 4 dans la partie centrale du Nord par exemple, autour du Gothard (fig.21).

En définitive, les augmentations particulièrement importantes du NDVI qu'on observera sur les graphiques pour la zone 5 ont pu être mises en avant cartographiquement. Moins de 0.7% de chaque zone Kapos est concerné par une variation de plus de 0.4, à l'exception de la zone Kapos 5 qui démontre une variation de plus de +0.4 de NDVI sur 3.2% de sa surface entre les deux périodes concernées. Quant aux régions biogéographiques, elles démontrent toutes un changement d'environ 1% de leur surface (jusqu'à 1.4 pour les Alpes du Nord) avec une variation de +0.4 de NDVI. Au total, ce sont 355km² de surface ayant vu leur NDVI augmenter de plus de 0.4 entre les deux périodes, mais seulement 11 km² concernés par une baisse du NDVI de plus de 0.4.

Différence de valeurs du NDVI de la région biogéographique du Jura
Période 2014-2018 par rapport à la période 1984-1988

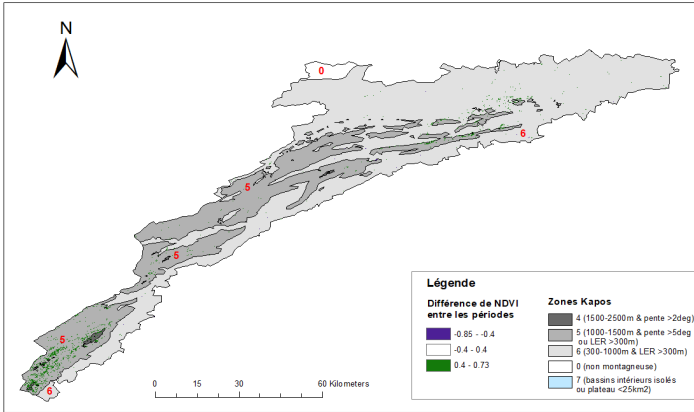


Figure 17 : Variation du NDVI pour la région du Jura entre les périodes 1984 – 88 et 2014 - 2018

Différence du NDVI de la région biogéographique du Plateau
Période 2014-2018 par rapport à la période 1984-1988

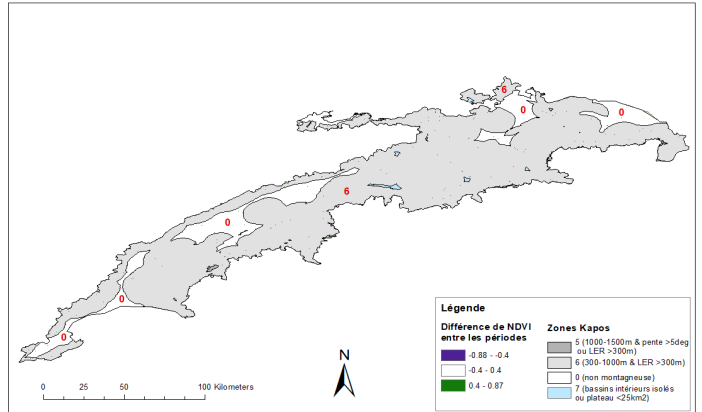


Figure 18 : Variation du NDVI pour la région du Plateau entre les périodes 1984 – 88 et 2014 - 2018

Différence du NDVI de la région biogéographique des Alpes du Nord
Période 2014-2018 par rapport à la période 1984-1988

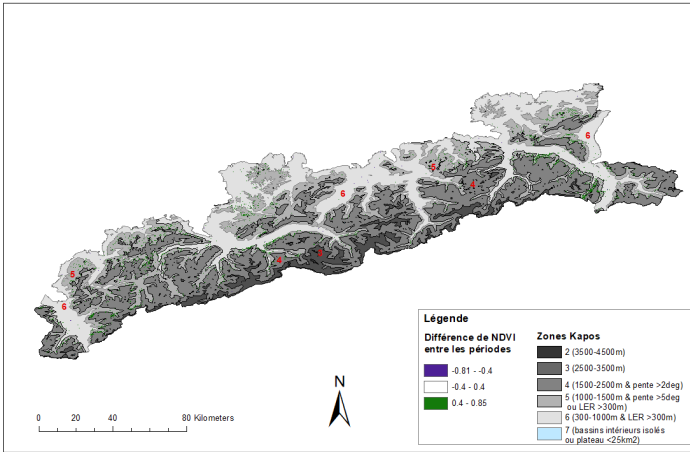


Figure 22 : Variation du NDVI de la région des Alpes occidentales entre les périodes susmentionnées

Différence du NDVI de la région biogéographique des Alpes orientales
Période 2014-2018 par rapport à la période 1984-1988

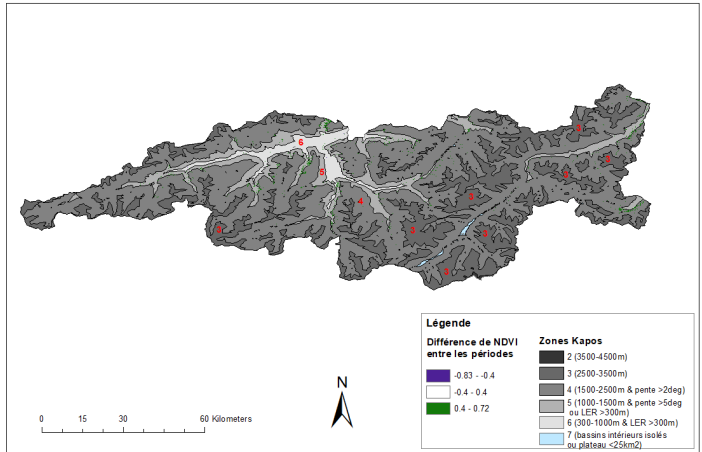


Figure 19 : Variation du NDVI des Alpes orientales

Différence du NDVI de la région biogéographique des Alpes occidentales
Période 2014-2018 par rapport à la période 1984-1988

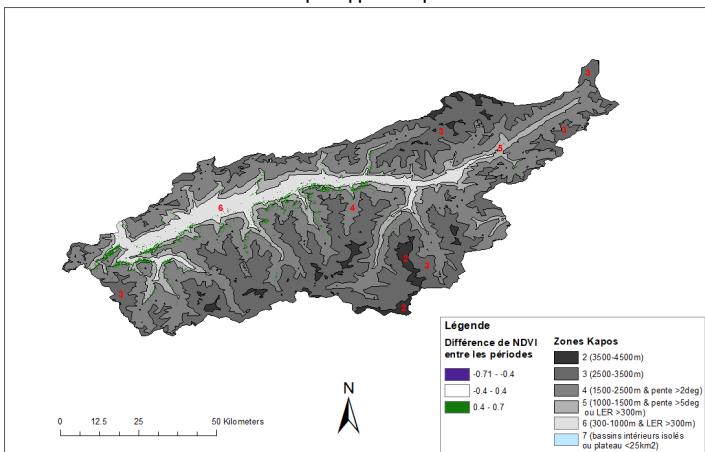


Figure 20 : Variation du NDVI de la région des Alpes du Nord entre les périodes susmentionnées

Différence du NDVI de la région biogéographique des Alpes Sud
Période 2014-2018 par rapport à la période 1984-1988

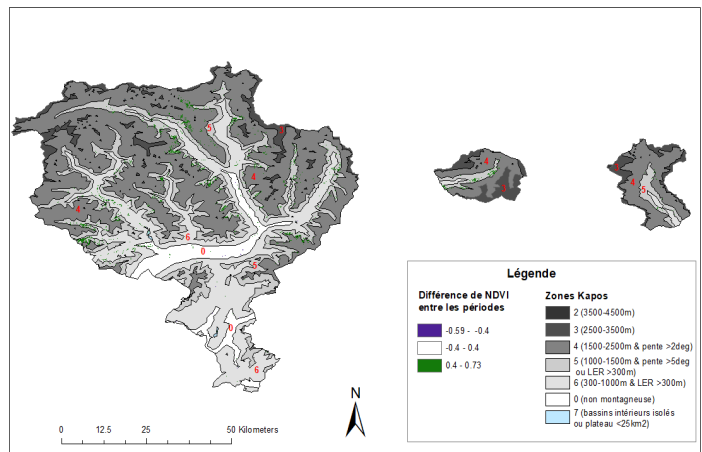


Figure 21 : Variation du NDVI des Alpes du sud entre les périodes susmentionnées

3.3 Résultats graphiques et comparaisons

3.3.1 ICVM de la Suisse

Les résultats graphiques (fig. 24) nous informent que la superficie montagneuse de la Suisse présente une hausse marquée du NDVI durant les 35 ans de la période étudiée. En effet, la surface montagneuse de l'ensemble de la Suisse concernée par un NDVI annuel de plus de 0.5 passe d'environ 20% au début de la période d'observation à près de 60% à la fin. Le R^2 de 0.43 de la droite de régression linéaire démontre une tendance assez bien expliquée par le modèle. Selon notre méthode, l'ICVM de la Suisse a donc plus que doublé en 35 ans. La moyenne annuelle du NDVI de la surface montagneuse est passée d'environ 0.35 à près de 0.5 (fig.23).

Ce premier résultat signifie que la végétation serait plus vigoureuse et en meilleure santé de manière générale qu'il y a 35 ans. Cela vient corroborer les résultats du 4^{ème} Inventaire Forestier National Suisse (IFN 4) de l'institut forestier national réalisé entre 2009 et 2017. En effet, depuis le 1^{er} IFN réalisé entre 1983 et 1985, la surface forestière s'est accrue de 11%, soit 1300km², atteignant 32% de la superficie du pays (Brändli, Abegg & Allgaier Leuch, 2020). Il est à noter que l'OFS (2021) indique pour sa part une augmentation de seulement 5% entre 1985 et 2018, pour la même surface boisée approximative aujourd'hui que l'IFN4 (13'134km²). De plus, l'IFN4 nous informe que le volume de forêt sur pied (arbres vifs) a augmenté de 16%.

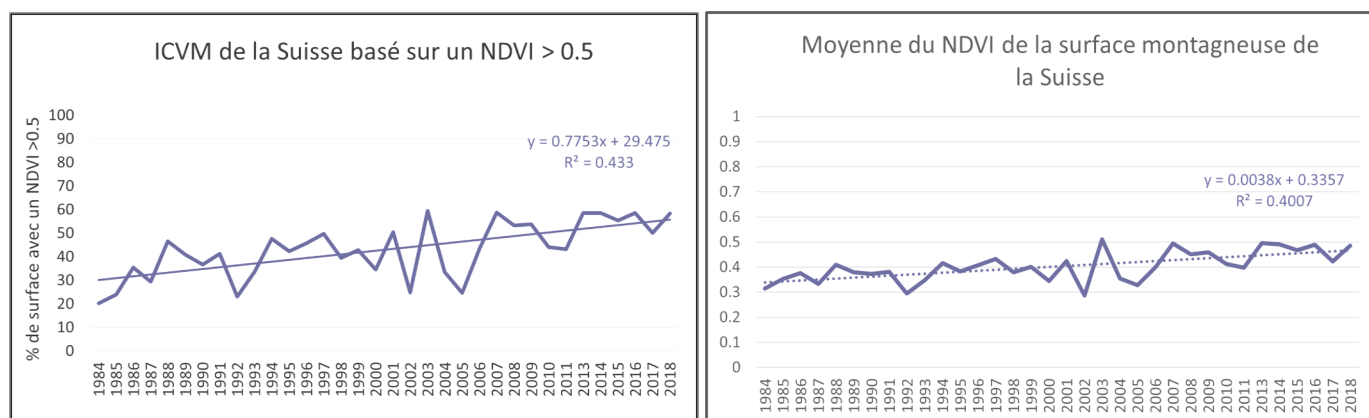


Figure 24 : Part de surface avec un NDVI > 0.5 des zones montagneuses de la Suisse. Figure 23 : Moyenne du NDVI annuel de la surface montagneuse de la Suisse.

Ainsi, l'amplitude de l'évolution positive de la vigueur de la végétation de nos résultats paraît tout de même excessive par rapport à l'OFS ou à l'IFN4, même si la surface concernée n'est pas exactement la même (variation d'environ 5% de surface entre la superficie de la Suisse et celle de la zone montagneuse de la Suisse). En effet, l'indice du couvert végétal montagneux (ICVM) de la Suisse que nous avons produit a montré une augmentation de 144%, passant de 9'391km² de végétation qualifiée de dense et saine en 1985 à 22'912km² en 2018. Or, bien que la Suisse ait connu une certaine reforestation depuis 1985, majoritairement sur d'anciens alpages et terres agricoles, l'évolution n'est pas aussi importante, selon les résultats de l'IFN et de l'OFS. Par ailleurs, d'autres terrains végétalisés ont disparu avec la transformation des pâturages et terres agricoles en surface urbaine imperméabilisée (OFS, 2021), ce qui exclut une augmentation potentiellement liée à l'apparition d'autres surfaces végétalisées.

Le tableau 3 permet de comparer les ICVM précis de nos résultats fondés sur le NDVI, à ceux de la FAO, fondés sur la couverture du sol de l'ESA. Le tableau 2 informe quant à lui sur la part végétale de la superficie totale de la Suisse, calculée en cumulant les parts des surfaces boisées, des surfaces agricoles, et de la végétation improductive établies par l'OFS (2021) lors de chaque statistique de la superficie. Il ne peut alors être directement comparé aux autres car il ne concerne pas la surface montagneuse, mais il reste tout de même intéressant à observer. Il permet déjà de constater que la surface montagneuse de la Suisse contient une proportion plus importante de végétation que celle de la superficie totale de la Suisse.

Alors que nous enregistrons une forte évolution positive générale de l'ICVM, la FAO dénote une légère diminution du couvert végétal montagneux en Suisse entre 2000 et 2018, avec une différence de près de 1.3 points de pourcentage. Cette légère diminution de la part végétale se retrouve également dans la statistique de la superficie totale de la Suisse mais sur une plus longue période (OFS, 2021) : soit une différence de -1.3 de points de pourcentage entre la première statistique de la superficie (1979-1985) et la plus récente (2013-2018).

Par ailleurs, il est possible de voir que l'ensemble de nos résultats fondés sur le NDVI sont sous-estimés ; cela même pour l'époque la plus récente, bien que l'écart entre nos valeurs et celles de la FAO diminue avec le temps. A première vue, cette sous-estimation pourrait être due au fait que nos estimations n'englobent pas nécessairement les terres cultivées comme le fait la FAO, la proportion de sol nu étant plus importante que pour les prairies ou les forêts, et donc leur NDVI plus bas. Cependant, bien que la FAO ne livre pas de pourcentage précis de terres agricoles pour la zone montagneuse de la Suisse, l'OFS (2021) indique que pour la statistique de la superficie 2013-2018, seule 9.4% de la surface de la Suisse est occupé par des terres arables. Cela signifie que même en prenant en considération cette valeur approximative, l'écart entre nos estimations du couvert végétal montagneux et celui de la FAO reste trop important même pour les années les plus récentes.

Tableau 3 : Comparaison des ICVM de nos résultats par rapport à ceux de la FAO

	ICVM selon nos résultats	ICVM selon la FAO
1985	24%	-
1990	37%	-
1995	42%	-
2000	35%	83.14%
2005	25%	-
2010	44%	81.83%
2015	55%	81.78%
2018	58%	81.77%

Tableau 2 : Part végétale de la superficie totale de la Suisse (OFS, 2021)

	Part végétale de la superficie totale
1979-1985	75.4%
1992-1997	74.7%
2004-2009	74.2%
2013-2018	74.1%

3.3.2 Part végétale des zones Kapos

La figure 25 présente l'évolution de la moyenne du NDVI pour chaque zone Kapos de la Suisse. Le tableau 4 permet de détailler pour certaines années les graphiques et permet également de comparer nos résultats à ceux de la FAO.

Les résultats nous indiquent que la Suisse présente une hausse marquée du NDVI durant les 35 ans de la période étudiée sur toutes les zones Kapos jusqu'à une altitude de 2500m (zone Kapos 3), soit toutes les zones se situant jusqu'à la limite supérieure de la végétation arborée située entre 1800 et 2200m d'altitude (OFS, 2021). La figure 25 nous permet de constater que ce sont, dans cet ordre, les zones Kapos 6 (300-1000m & LER > 300m), 0 (non montagneuse) et 5 (1000-1500m & pente > 5 deg ou LER > 300m) qui ont la moyenne spatiale du NDVI la plus élevée. Ce sont également respectivement les zones 5 et 6 qui voient leur moyenne augmenter le plus au fil du temps (R^2 de presque 0.5), avec un gain de 0.15-0.2 points de NDVI sur la période observée. A l'inverse, les zones 2 (3500-4500m) et 3 (2500-3500m) ne présentent pas de changement notable, hormis une légère baisse du NDVI moyen. La zone 4 (1500-2500m & pente > 2 deg) et la zone 7 (bassins intérieurs isolés / plateaux <25km²) montrent quant à elles des valeurs et une augmentation modérée du NDVI par rapport aux autres zones (environ 0.1 sur la période observée avec un R^2 de > 0.2). Globalement, il est possible d'affirmer que le schéma suivi semble être que plus la zone Kapos possède une altitude basse, plus la moyenne du NDVI présente une augmentation importante au cours de la période observée, jusqu'à atteindre la zone Kapos 5 qui connaît le plus fort accroissement de ses valeurs moyennes. La zone Kapos 6, puis la zone 0, présentent en effet une augmentation de moins en moins importante de leur droite de régression linéaire, en comparaison à celle de la zone Kapos 5.

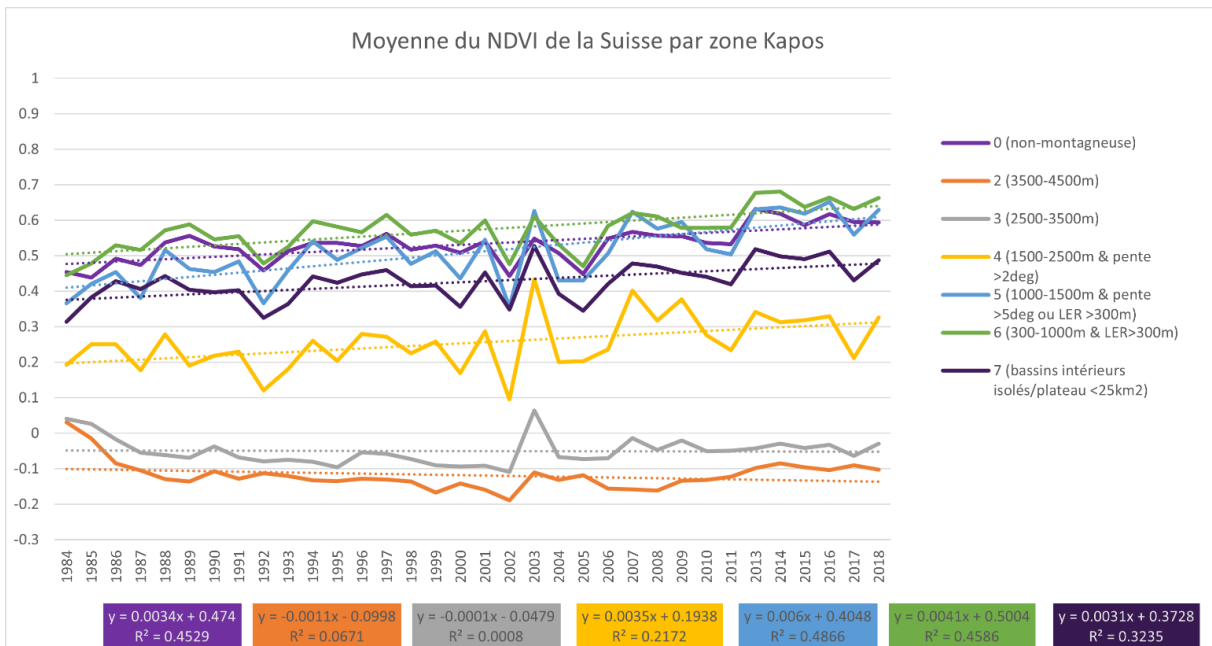


Figure 25 : Moyenne du NDVI des pixels par zone Kapos à l'échelle de la Suisse

Le schéma d'augmentation du NDVI se retrouve également dans le pourcentage de pixels ayant un NDVI de > 0.5 (fig.26), soit une végétation que nous qualifions de dense et saine. Hormis les zones Kapos 2 et 3 quasiment invisibles sur le graphique, et la zone 7 qui est particulière, toutes les autres zones (0, 4, 5 et 6) présentent une augmentation de la surface concernée d'au moins 20 points de pourcentage. La progression la plus spectaculaire est celle de la zone 5 qui passe entre 1985 et 2018 de 22% de sa surface ayant une valeur NDVI > 0.5 à 84% de sa surface ayant cette valeur (R^2 proche de 0.5). Ce sont par ailleurs les zones 6 et 5 qui possèdent le pourcentage le plus important de pixels ayant un NDVI supérieur à 0.5, soit 84% en 2018, tandis que pour comparaison, la zone 0, non montagneuse, ne possède que 60% de ses pixels avec une telle valeur.

En ce qui concerne les valeurs maximales (fig. 27), celles-ci semblent toutes connaître une augmentation, sauf la zone 2 qui voit ses valeurs maximales décroître. Cette augmentation peut être due à une croissance de la végétation et à une différence de sensibilité des capteurs Landsat. Quant aux valeurs minimales, elles connaissent toutes une diminution importante, ce qui pourrait relater la création de nouveaux cours d'eau notifiée par l'OFS (2021) ou une différence de sensibilité des capteurs Landsat. Il est à noter que les autres statistiques présentées graphiquement sont à retrouver en annexe.

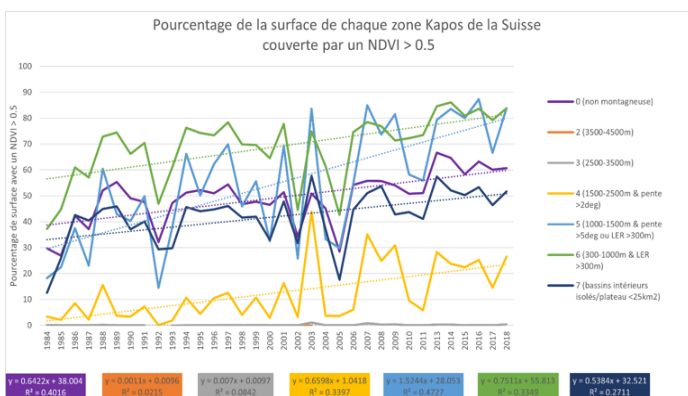


Figure 26 : Pourcentage de pixels ayant un NDVI moyen annuel > 0.5 par zone Kapos à l'échelle de la Suisse

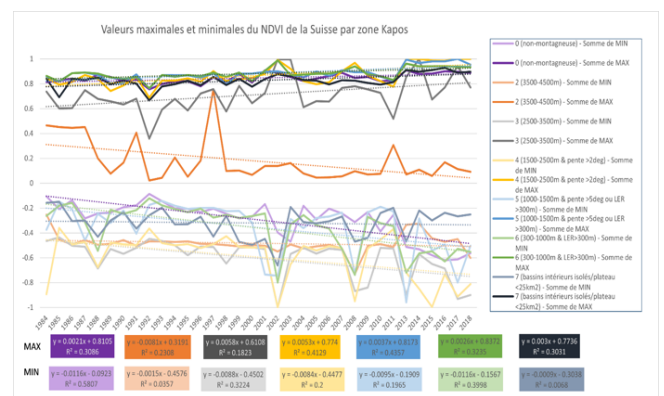


Figure 27 : Valeurs minimales et maximales du NDVI par zone Kapos

Alors que nos résultats montrent une évolution positive forte et assez constante de la part végétale de chaque zone Kapos, même depuis les années 2000, les résultats de la FAO indiquent des parts végétales constantes depuis les années 2000, excepté pour les zones 5 et 6, qui ont perdu respectivement 0.3 et 3.3 points de pourcentage de surface végétale. Cette perte de la part végétale des surfaces des zones Kapos les plus basses démontre probablement

l'avancée des infrastructures et habitations sur le terrain végétalisé, également observée par l'OFS (2021). Nos résultats n'ont pas pu exposer cette diminution.

Ce qui est par ailleurs intéressant lorsque l'on compare les résultats de la FAO et de l'OFS, est que la part végétale des zones de haute altitude ne change pas (FAO, 2021), alors qu'il existe un gain en surface boisée (OFS, 2021). Cela signifie que ce gain se produit sur des zones déjà végétalisées, qui densifient leur végétation, ce que peut aussi traduire l'augmentation du NDVI. En effet, l'OFS (2021) et l'IFN (Brändli, Abegg & Allgaier Leuch, 2020) indiquent pour leur part que plus l'altitude est élevée, plus l'augmentation de la surface boisée a été forte, la limite supérieure des arbres progressant en altitude et les forêts remplaçant petit à petit les alpages. Ainsi, par exemple, entre 1600m et au-delà de 2200m d'altitude (équivalent approximatif de la zone 4), les surfaces boisées auraient gagné 368km² entre 1985 et 2018, tandis qu'entre 1000m et 1600m (équivalent approximatif de la zone 5), il y aurait eu un gain de 210km² (OFS, 2021). C'est probablement l'une des raisons pour lesquelles il est possible de voir dans nos résultats graphiques que la zone 5, et de manière moins prononcée la zone 4, enregistrent de très fortes hausses du NDVI. Cela a pu se vérifier également par les cartographies produites avec une variation >0.4 de NDVI entre la période 1984-1988 et 2014-2018. En effet, celles-ci pourraient bien avoir représenté la progression de la limite supérieure des arbres et l'arborisation des anciennes terres agricoles, avec des patches de forte augmentation présents notamment à la limite entre la zone 5 et la zone 4, s'étendant également dans le territoire interne de cette dernière. En revanche, selon l'OFS (2021), au-dessous de 1000m, ce qui correspond à la zone 6 (ou encore à la zone 0), la surface boisée est restée très stable en 35 ans (gain de 13km²) alors que nous enregistrons la deuxième hausse la plus importante après celle de la zone 5. Toutefois, peu de pixels de forte augmentation (>0.4) sont visibles sur les cartes pour la zone 6, excepté dans le sud de la vallée du Rhône et la partie Nord-Est du Jura. Cette croissance du NDVI représente dès lors potentiellement plutôt une hausse généralisée de la vigueur du patrimoine végétal, ou un biais méthodologique.

Tableau 4 : Comparaison entre la part végétale des zones Kapos de nos résultats et celle de la FAO

	Zones Kapos	Part végétale - nos résultats (%)	Part végétale – FAO (%)
1985	2	0	No data
	3	0	
	4	2.1	
	5	22.4	
	6	44.7	
1990	2	0	No data
	3	0	
	4	3.3	
	5	40.2	
	6	66.2	
2000	2	0	0
	3	0	21.9
	4	2.9	87.4
	5	32.5	99.5
	6	64.6	90.3
2010	2	0	0
	3	0	21.9
	4	9.5	87.3
	5	58.2	99.2
	6	72.3	87.2
2015	2	0	0
	3	0	21.9
	4	22.4	87.3
	5	80	99.2
	6	80.9	87
2018	2	0	0
	3	0.4	21.9
	4	26.5	87.3
	5	83.8	99.2
	6	83.8	87

3.3.3 ICVM à l'échelle des régions biogéographiques

Lorsqu'on observe l'ICVM des régions biogéographiques (figure 28), deux d'entre elles se démarquent particulièrement : le Plateau et le Jura. Ces deux régions possèdent entre 80% et plus de 90% de leur surface avec un NDVI > 0.5 en 2018. Par ailleurs, si l'on observe les droites de régression linéaire, toutes les régions biogéographiques présentent une augmentation de leurs pixels avec un NDVI > 0.5 de minimum 15 points de pourcentage entre 1984 et 2018 (R^2 entre 0.2 et 0.4). Les progressions les plus importantes sont celles des Alpes du Sud et du Jura, qui ont vu leur surface concernée par de telles valeurs augmenter d'environ 35 points de pourcentage (R^2 de 0.41 et de 0.34).

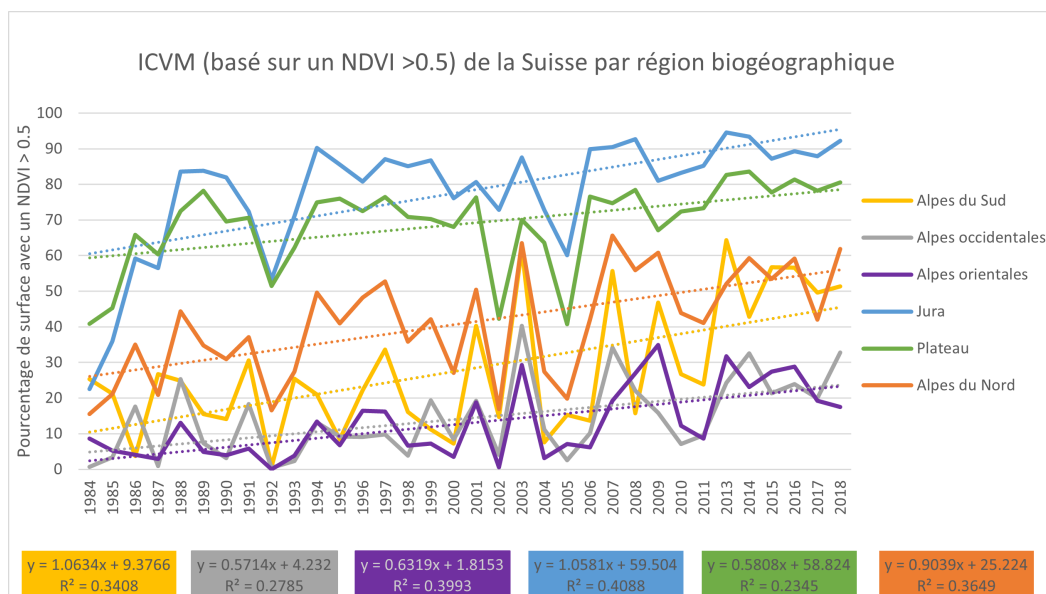


Figure 28 : Pourcentage de surface avec un NDVI > 0.5 pour les surfaces montagneuses de chaque région biogéographique

Les graphiques suivants examinent l'évolution de chaque zone Kapos en fonction de leur région biogéographique. Le Jura se démarque considérablement des autres régions biogéographiques dans la zone Kapos 4, par l'augmentation de sa moyenne environ 3 fois plus importante que les autres régions (fig.31), par ses valeurs initiales déjà plus élevées, et par la part de sa surface avec un NDVI > 0.5 qui passe d'environ 10% à plus de 70% avec toutefois de nombreux effets de seuil à signaler (fig. 30). Pour les autres régions, le pourcentage de surface concernée et son évolution sont assez semblables, passant d'environ 5% à environ 25%, avec une moyenne nationale du NDVI autour de 0.3.

Quant à la zone Kapos 5 (fig. 29), la moyenne du NDVI de toutes les régions augmente assez similairement d'environ 0.2 entre 1984 et 2018 (R^2 de 0.48), ce qui situe la moyenne nationale autour de 0.6 de NDVI en 2018. Le Jura et le Plateau se démarquent légèrement des autres régions biogéographiques, avec des valeurs un peu plus élevées (environ 0.7 de NDVI en 2018), mais elles suivent la même évolution que les autres régions. Lorsqu'on observe cette évolution au regard du pourcentage de la surface concernée par des valeurs du NDVI supérieures à 0.5 (fig. 32), il est possible de constater une augmentation de l'ordre de 50 points de pourcentage à l'échelle nationale (R^2 de 0.47). L'augmentation est donc très importante.

En ce qui concerne la zone Kapos 6, la moyenne du NDVI de toutes les régions augmente de 0.45 à 0.6 (fig. 34). Les valeurs de toutes les régions semblent assez similaires, avec le Jura, le Plateau mais aussi les Alpes du Nord, et plus récemment les Alpes du Sud se situant dans la moyenne des valeurs supérieures. En effet, l'augmentation du NDVI caractérisée par la droite de régression linéaire démontre une pente plus importante dans la région des Alpes du Sud (R^2 de 0.28) et des Alpes orientales (R^2 de 0.24), suivies de près par les Alpes occidentales (R^2 de 0.36). Ces augmentations du NDVI se retrouvent également lorsque l'on observe le pourcentage de surface avec un NDVI > 0.5 (fig.33).

L'altitude des zones Kapos 2 et 3 leur confère un NDVI moyen autour de -0.1 ou de -0.05 évoluant peu, avec peu de différences entre les régions biogéographiques (graphiques détaillés en annexe).

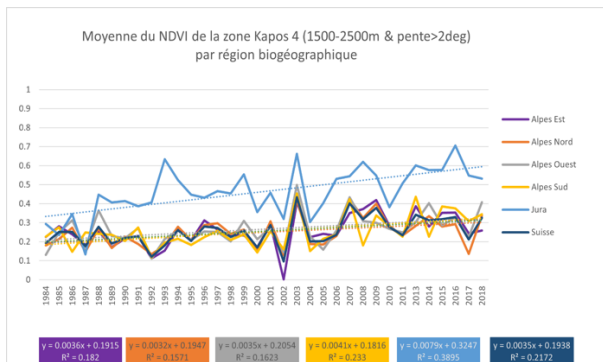


Figure 30 : Moyenne du NDVI de la Zone Kapos 4 par région

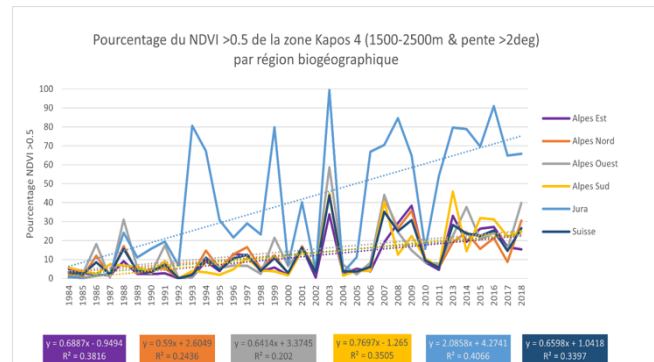


Figure 29 : Pourcentage de la surface de la zone Kapos 4 avec un NDVI > 0.5 par région biogéographique

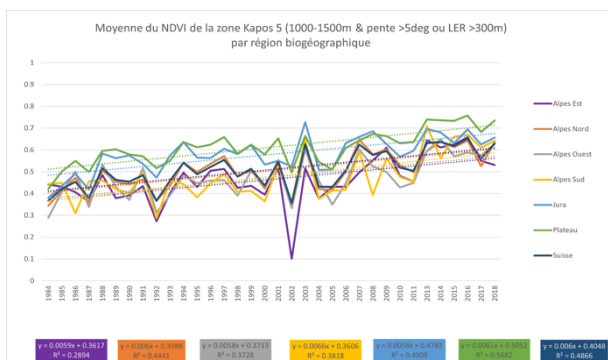


Figure 31 : Moyenne du NDVI de la zone Kapos 5

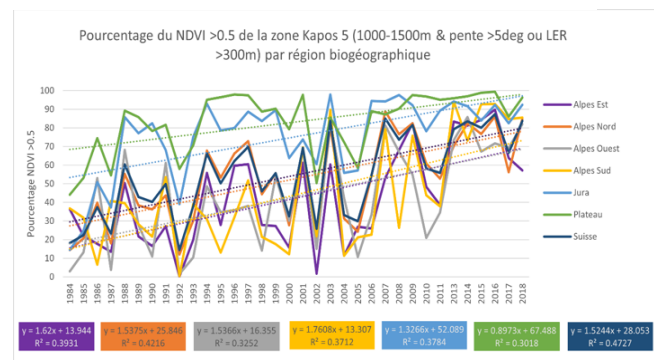


Figure 32 : Pourcentage de la surface de la zone Kapos 5 avec un NDVI > 0.5

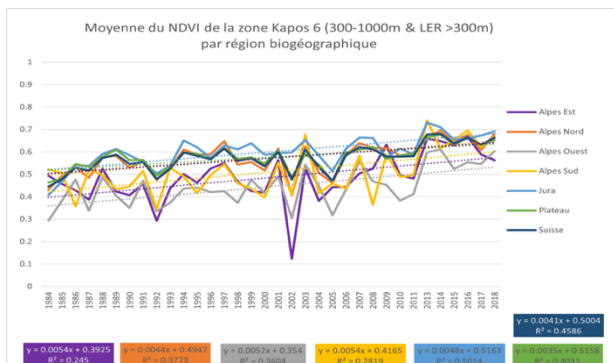


Figure 34 : Moyenne du NDVI de la zone Kapos 6

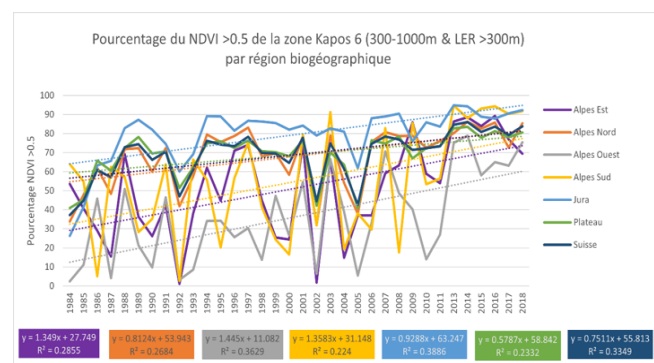


Figure 33 : Pourcentage de la surface de la zone Kapos 6 avec un NDVI > 0.5

Il est à présent possible d'esquisser une comparaison de nos résultats avec les parts de types d'utilisation du sol recensés par l'OFS (2021), lors de sa dernière statistique de la superficie. Cependant, il faut garder à l'esprit que les surfaces ne sont pas similaires, l'ICVM n'incluant un pourcentage que sur la surface montagneuse de chaque région biogéographique, tandis que les calculs de l'OFS concernent l'ensemble de la superficie de chaque région biogéographique.

Entre 1985 et 2018, une progression des surfaces boisées a été enregistrée par l'OFS (2021) en particulier dans les Préalpes et les Alpes. Selon l'OFS (2021), la hausse est très marquée dans la région des Alpes du Sud, vers le Gothard, et dans certaines parties du Bas-Valais. La forte augmentation de la surface couverte par un NDVI > 0.5 que nous constatons dans les Alpes du Sud à la fois graphiquement et cartographiquement retrace ainsi cette reforestation. Nous avons également pu constater ce qui semble être une reforestation sur la carte des Alpes occidentales et des Alpes du Nord qui progressent également assez rapidement sur le graphique. En revanche, on constate sur la figure 35 de l'OFS (2021) que le Plateau et le Jura ne semblent pas avoir particulièrement fait gain de surfaces boisées ; au contraire, ils semblent plutôt avoir enregistré des patches de perte (OFS, 2021). La variation de >0.4 entre les deux

périodes choisies (1984-1988 / 2014-2018) n'a pas permis de relater ces pertes. Leurs surfaces agricoles respectives ayant également diminué, souvent au profit de nouvelles aires urbaines (OFS, 2021), la hausse de la part de surface avec un NDVI > 0.5 que nous enregistrons dans les graphiques, particulièrement forte pour le Jura, est surprenante. Honeck et al. (2018), ont également utilisé le NDVI pour suivre l'évolution de la couverture forestière de la région genevoise et du Jura et mettent également en évidence des problèmes de précision pour le Jura. En effet, après une comparaison visuelle d'images aériennes sur Swisstopo de 1985 et d'images récentes de la zone indiquée avec des patches de forte augmentation du NDVI dans notre figure 18, nous n'avons pas pu observer de reforestation par exemple qui pourrait expliquer cette augmentation.

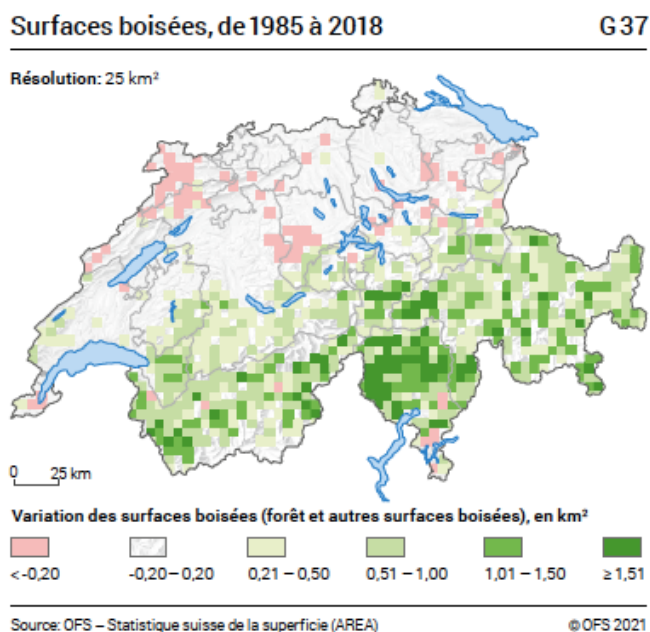


Figure 35 : Variation des surfaces boisées de la Suisse entre 1985 et 2018. Source : OFS, 2021

Sur un autre plan, en 2018, l'OFS (2021) et l'IFN4 (Brändli, Abegg & Allgaier Leuch, 2020) annoncent que les deux zones biogéographiques avec la part la plus importante de surfaces boisées sont le Jura et les Alpes du Sud. Nos résultats de l'ICVM par région biogéographique (fig.28) indiquent effectivement le Jura comme étant la région avec la plus grande part de surface densément végétalisée de Suisse en 2018, soit près de 95% de sa surface possédant un NDVI de plus de 0.5. Cela correspond aux surfaces boisées (48.5%) et aux surfaces agricoles (42.4%) assemblées de la région biogéographique annoncées par l'OFS (2021) dans son atlas statistique. Quant aux Alpes du Sud, en 2018, elles présentaient une part densément végétalisée (NDVI > 0.5) d'environ 50%, soit le même pourcentage que celui indiqué par l'OFS pour leur surface boisée. En revanche, les 12.2% de surfaces agricoles de la région ne sont pas représentées dans l'ICVM basé sur un NDVI > 0.5, bien que 91% des terres agricoles des Alpes du Sud soient des alpages ou pâturages (contre seulement 77% pour le Jura) (OFS, 2021). Si on prend à présent l'exemple du Plateau, celui-ci est composé à 24.4% de surfaces boisées et à 48.5% de surfaces agricoles (OFS, 2021), mais sa surface montagneuse possède un NDVI de plus de 0.5 sur 80% de sa superficie en 2018. Notre ICVM pour cette région pourrait alors surestimer la part saine densément végétalisée.

Dès lors, une hypothèse que l'on pourrait formuler est que la méthode de l'ICVM basé sur un NDVI annuel moyen > 0.5 surestimerait les zones de végétation dense et saine dans les altitudes les plus basses, tandis qu'elle les sous-estimerait pour les altitudes plus élevées. Les variations du NDVI peuvent en effet être attribuées en partie au climat local et aux températures (Honeck et al., 2018 ; Pettorrelli et al., 2005), ce qui pourrait potentiellement appuyer cette hypothèse. Lorsque l'on se fie au NDVI moyen annuel comme c'est le cas dans ce travail, la durée de la période de végétation est plus longue dans certaines régions (MétéoSuisse, 2014), ce qui affecte également les moyennes annuelles du NDVI. Cependant, il convient encore de garder à l'esprit que nos comparaisons avec l'OFS ne sont pas totalement fiables en raison des différentes superficies prises en compte.

3.4 Synthèse, limites et améliorations possibles

Dans le cadre de ce travail, une forte augmentation de la surface concernée par des valeurs supérieures à 0.5 a pu être mise en évidence au cours de la période observée, à toutes les échelles, excepté pour les zones Kapos 2 et 3 qui dépassent l'altitude de la limite supérieure des arbres. D'autres statistiques spatiales, notamment la moyenne, ont permis d'affiner l'analyse et de confirmer la hausse, en écartant les effets de seuil. Parmi nos résultats principaux, il a été observé que l'ICVM national de la Suisse issu de nos estimations était passé de 24% en 1985 à 58% en 2018. Nous avons pu voir que la zone Kapos 5, qui couvre 16% de la superficie du territoire, enregistre la plus forte hausse de toutes les zones de sa moyenne spatiale du NDVI et de la surface couverte par un NDVI > 0.5. La zone Kapos 6, couvrant la majorité du territoire (42%), est celle qui possède la moyenne spatiale annuelle du NDVI la plus élevée, et qui pendant de nombreuses années, a également été celle qui avait la proportion la plus importante de sa surface couverte par un NDVI > 0.5 (à égalité avec la zone Kapos 5 en 2018, avec 84% de leur surface). Selon nos résultats, le Jura est par ailleurs la région biogéographique qui posséderait l'ICVM le plus élevé, équivalent à plus de 90% en 2018, suivi par le Plateau avec 80%. Les régions des Alpes orientales et des Alpes occidentales possèderaient l'ICVM le plus bas (environ 22% en 2018), mais sont également celles qui contiennent les zones Kapos qui ont l'altitude la plus élevée (zones 2 et 3).

Après comparaison avec les résultats donnés par la FAO pour l'ICVM de la Suisse à l'échelle nationale, et pour la part végétale de chaque zone Kapos, nous avons pu constater que nos résultats annuels sont sous-estimés, en particulier pour les années les plus anciennes. Dès lors, une hypothèse expliquant la forte augmentation du NDVI consiste à considérer la différence de sensibilité des capteurs Landsat 5 et Landsat 8 (Honeck et al., 2018), qui peuvent faire varier jusqu'à plus de 0.4 certains secteurs de forêt sans changement de couverture du sol (Italiano, 2020, non publié). Le satellite Landsat 8 serait plus performant pour relater les différentes couvertures du sol (Poursanidis, Chrysoulakis & Mitraka, 2015), tandis que Landsat 5 sous-estimerait le NDVI général, comme cela a pu être constaté par exemple dans le Jura (Honeck et al., 2018 ; Italiano, 2020, non publié). La forte hausse de la part végétale de la surface montagneuse que nous avons pu constater est donc en partie erronée, la FAO dénotant plutôt une perte de 1.3 points de pourcentage de la surface couverte par la végétation depuis les années 2000, située majoritairement sur la zone Kapos 6 ; nous n'avons malheureusement pas pu observer cette diminution ni graphiquement ni spatialement avec le seuil fixé à 0.5 de NDVI, même si nous avons pu constater sur la zone Kapos 6 la plus grande perte de toutes les zones avec la variation >0.4 avec toutefois seulement 10 km² concerné. La perte enregistrée par la FAO relate pourtant l'avancée des infrastructures et des zones d'habitation sur les terres agricoles du Plateau et des vallées, recensée également par l'OFS (2021). En revanche, la zone 6 mise à part, les très fortes hausses de l'ICVM et de la moyenne spatiale que nous avons enregistrées pour les zones Kapos 5 et 4 retracent en partie la reforestation et l'embroussaillage qui se sont manifestés en altitude, à la fois en conséquence du phénomène de déprise agricole dans les alpages, et à la fois en raison de la montée progressive de la limite supérieure des arbres avec le réchauffement climatique (OFS, 2021). De la même façon, l'ICVM des régions biogéographiques basé sur le NDVI a également pu mettre en évidence que la région des Alpes du Sud possédait la plus forte hausse de la vigueur de la végétation, ce qui indique ainsi correctement la région avec le plus fort taux de reforestation entre 1985 et 2018 selon l'OFS (2021) ; le Jura est pour sa part la région avec l'ICVM le plus important, ce qui corrobore le fait que le Jura soit la région biogéographique la plus boisée de Suisse (OFS, 2021). Par ailleurs, le taux de variation cartographié a également permis de situer ces hausses de manière très vraisemblable (excepté pour le Jura), même si la surface totale concernée par la variation est sous-estimée par rapport à la variation relatée par l'OFS ou par l'IFN4 pour la surface forestière. En effet, les zones Kapos 4 et 5 présentent de nombreux pixels de forte augmentation (variation du NDVI > 0.4), en particulier dans les zones des Alpes du Sud, du sud de la vallée du Rhône, et dans les Alpes du Nord, correspondant à ce que l'OFS (2021) annonce dans son rapport sur les régions et les zones avec le plus fort taux de reforestation.

En somme, les ICVM basés sur un seuil de >0.5 de NDVI sont en général sous-estimés, alors que la hausse de la proportion végétale est surestimée par ce même seuil. Quant au seuil de variation >0.4 de NDVI que nous avons utilisé pour la cartographie, visant à exclure les variations dues à la sensibilité différente des deux capteurs Landsat, il sous-estime finalement la reforestation réelle ainsi que la diminution de la végétation, excepté pour certaines zones, comme le Jura, pour laquelle la reforestation est surestimée. En plus de la sensibilité différente des capteurs Landsat, ces imprécisions peuvent être dues également au procédé méthodologique effectué en amont de ce travail qui n'a pas sélectionné les images Landsat les plus qualitatives, soit celles disposant d'un pourcentage minimum de pixels sans couverture nuageuse. L'application de cette méthode permettrait effectivement d'augmenter le NDVI moyen annuel

général, ce qui permettrait de mieux s'aligner avec les résultats de la FAO. Par ailleurs, les zones montagneuses nécessiteraient un calibrage des traitements du NDVI tenant compte de leur topographie particulière pour être en mesure de mieux indiquer leur réelle surface végétale, qui se voit parfois mal estimée avec le NDVI en raison de la pente et de l'ombrage (Honeck et al., 2018). Bian et al. (2020) ont pu par exemple utiliser le NDVI annuel issu du satellite Landsat 8 pour produire l'ICVM au niveau mondial pour l'année 2017 avec un modèle tenant compte de la surface non-planimétrique des montagnes – la surface réelle des montagnes variant jusqu'à 17.7% par rapport à la surface planimétrique généralement utilisée - qui montrait une cohérence de 95% avec les résultats de la FAO. Par ailleurs, bien que la fixation d'un seuil de NDVI reste toujours relativement arbitraire et dépendante de chaque terrain, ces auteurs ont utilisé un seuil de 0.2, qui classerait correctement jusqu'à 90% de la végétation (incluant les cultures) et 99% des surfaces non végétalisées mondiales. L'application de ces traitements et d'un seuil calibré à chaque altitude auraient alors pu éventuellement permettre d'augmenter également l'ICVM basé sur le NDVI dans notre étude.

Toutefois, malgré les imprécisions évidentes, nos résultats restent à interpréter au regard de la vigueur de la végétation, le NDVI étant très sensible et corrélé aux facteurs climatiques (Petrorrelli et al., 2005). Cela signifierait qu'il n'y a pas nécessairement une augmentation si conséquente que constaté de la surface végétale, mais que la végétation présente de manière globale une activité photosynthétique plus importante, et donc une potentielle meilleure santé générale. Le gain plus prononcé de volume de la forêt que de la surface forestière relevé par l'IFN4 (Brändli, Abegg & Allgair Leuch, 2020) vient soutenir partiellement cette hypothèse. Finalement, en sus de ces facteurs, la hausse du NDVI moyen annuel peut également être liée en partie à un allongement de la période de croissance des végétaux (Rome, Bigot & Louis, 2012). En effet, dans leur rapport sur les changements climatiques suisses, Fischer et Strassmann (2018) indique que la période de végétation dure de 2 à 4 semaines de plus aujourd'hui que dans les années 1960. Cela expliquerait également l'ICVM constamment plus élevé trouvé dans les zones Kapos les plus basses en altitude. C'est pourquoi certains auteurs utilisent parfois les valeurs maximales temporelles de chaque pixel sur une année pour classer les zones végétalisées et non végétalisées (Jia et al., 2014 ; Huang et al., 2017), permettant ainsi de s'affranchir de ces changements phénologiques pour classer la couverture du sol.

4. Conclusion

Lors de ce travail, nous avons utilisé une méthodologie simple et facilement répliquable pour produire l'ICVM annuel de la Suisse sur une période de 35 ans en s'appuyant sur le NDVI moyen annuel. L'objectif était ainsi qu'elle puisse être éventuellement accessible à une plus large population de manière plus régulière que les cartes de couverture du sol, préconisées par la FAO, mises à disposition par des experts tous les 5 à 12 ans, ou disponibles annuellement que dès 1992 avec une résolution moindre. Cette méthodologie a permis en effet de donner certaines indications spatiales valables quant aux zones Kapos et aux régions biogéographiques concernées par une plus forte hausse de leur végétation. Cependant, le seuil du NDVI sélectionné, la durée différente de la période de végétation selon l'altitude influençant le NDVI, les prétraitements des images satellitaires, le manque de considération de la nature topographique dans les traitements géomatiques, ou encore la différence de sensibilité des capteurs Landsat 5 et 8, n'ont pas permis d'indiquer un ICVM fiable à toutes les échelles étudiées. Notre méthode en tant que telle reste dès lors intéressante pour observer la vigueur et la santé végétale annuelle sur des périodes plus régulières et plus anciennes que celles mises à disposition par les organes officiels avec les couvertures du sol, mais ne peut être recommandée qu'en complément d'une méthode plus élaborée pour retracer l'ICVM à l'échelle que l'on souhaite étudier.

Dans cette étude, le NDVI obtenu a toutefois été assez sensible pour permettre de montrer un signal de recolonisation végétale en altitude et une meilleure vigueur générale sur la période 1984-2018, même s'il n'a pas été assez performant pour indiquer le recul de la végétation agricole au profit de surfaces imperméabilisées dans les zones les plus basses, comme a pu le montrer l'ICVM de la FAO. Nos résultats montrent que malgré la diminution globale de la surface végétale montagneuse de la Suisse depuis les années 2000 (FAO, 2021), et l'assèchement général de la végétation suisse en 35 ans (Poussin et al., 2021), l'activité photosynthétique de la végétation des montagnes semble augmenter malgré tout. Dans le cadre de la cible de l'objectif de développement durable concerné (15.4), cette information se montre rassurante si elle s'avère juste, car la hausse de la vigueur végétale pourrait compenser partiellement les pertes végétales enregistrées. Toutefois, notamment en vue de la menace de disparition des espèces arborées les plus fréquentes dans certaines régions d'ici 2060 en raison du réchauffement climatique, un suivi

multidimensionnel régulier de la végétation, incluant les outils de télédétection, y compris l'étude du NDVI, s'impose dès lors de manière régulière à l'échelle de la Suisse. Le pays, majoritairement considéré comme montagneux, nécessitera une attention particulière du fait de sa vulnérabilité accrue. La hausse très importante des températures en altitude en particulier engendrera effectivement des défis majeurs qui se doivent d'être relevés avec un écosystème végétal en bonne santé.

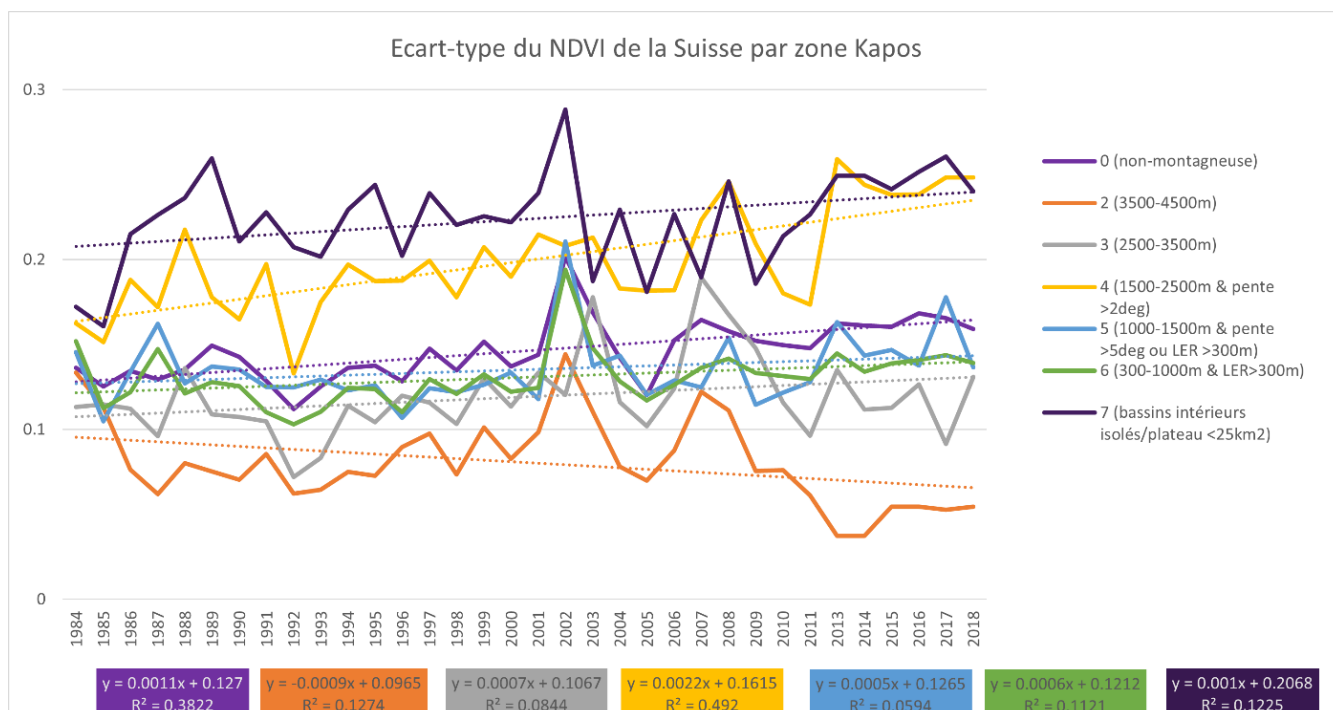
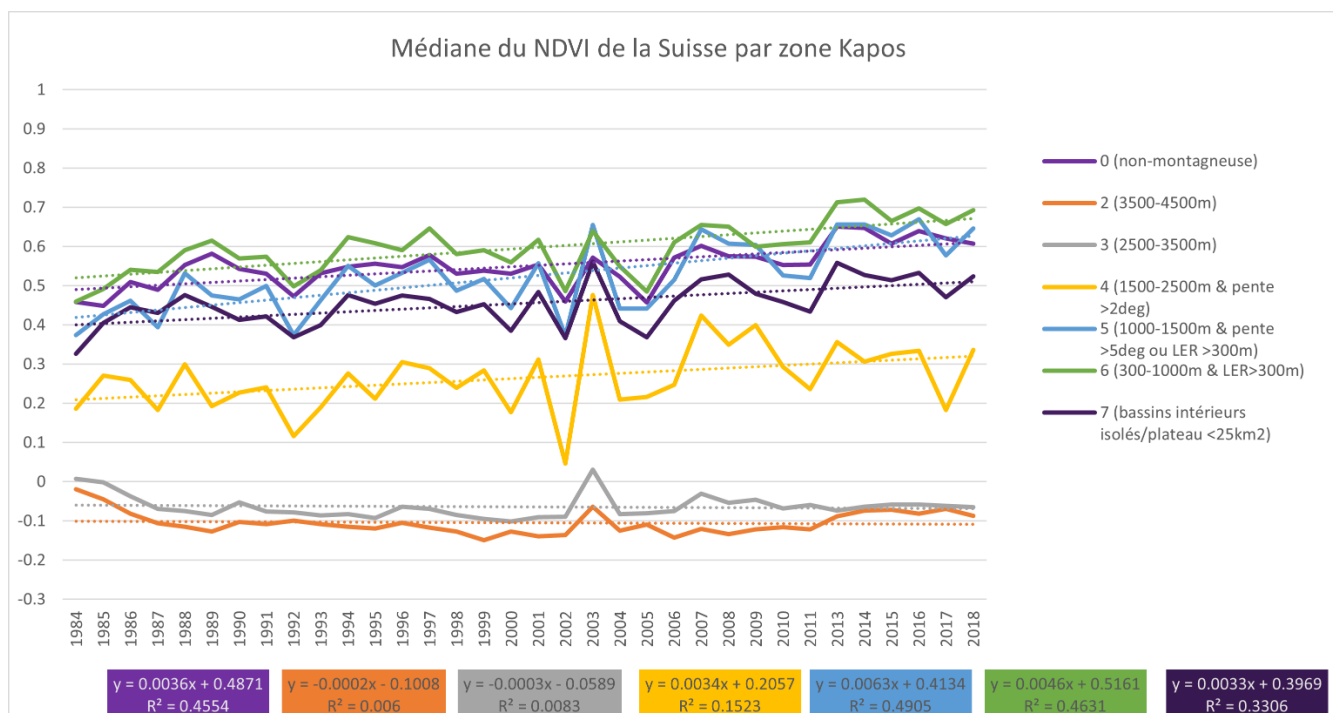
Bibliographie

- Bian, J., Li, A., Lei, G., Zhang, Z., & Nan, X. (2020). Global high-resolution mountain green cover index mapping based on Landsat images and Google Earth Engine. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 162, 63-76. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.02.011>
- Brändli, U., Abegg, M., & Allgaier Leuch, B. (2020). *Inventaire forestier national suisse. Résultats du quatrième inventaire 2009-2017*. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL). <https://doi.org/10.16904/ENVIDAT.147>
- De Simone, L., Navarro, D., Gennari, P., Pekkarinen, A., & de Lamo, J. (2021). Using Standardized Time Series Land Cover Maps to Monitor the SDG Indicator “Mountain Green Cover Index” and Assess Its Sensitivity to Vegetation Dynamics. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(7), 427. <https://doi.org/10.3390/ijgi10070427>
- Fischer, A. & Strassmann, K. (2018). *Scénarios climatiques pour la Suisse : CH2018*. National Centre for Climate Service (NCSS).
- Github. (2020). *Landsat NDVI*. Retrouvé à : <https://github.com/sentinel-hub/custom-scripts/tree/master/landsat-8/ndvi>
- Giuliani, G., Dao, H., De Bono, A., Chatenoux, B., Allenbach, K., De Laborie, P., Rodila, D., Alexandris, N., & Peduzzi, P. (2017). Live Monitoring of Earth Surface (LiMES) : A framework for monitoring environmental changes from Earth Observations. *Remote Sensing of Environment*, 202, 222-233. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.040>
- Honeck, E., Castello, R., Chatenoux, B., Richard, J.-P., Lehmann, A., & Giuliani, G. (2018). From a Vegetation Index to a Sustainable Development Goal Indicator : Forest Trend Monitoring Using Three Decades of Earth Observations across Switzerland. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(12), 455. <https://doi.org/10.3390/ijgi7120455>
- Huang, H., Chen, Y., Clinton, N., Wang, J., Wang, X., Liu, C., Gong, P., Yang, J., Bai, Y., Zheng, Y., & Zhu, Z. (2017). Mapping major land cover dynamics in Beijing using all Landsat images in Google Earth Engine. *Remote Sensing of Environment*, 202, 166-176. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.02.021>
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32(1), 1-6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
- Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL). 2014. *La moitié des forêts suisses sont des forêts protectrices*. Retrouvé à : <https://www.waldwissen.net/fr/habitat-forestier/fonction-de-protection/forets-protectrices-en-suisse>
- Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL). 2017. *Changements climatiques : le sapin supplante l'épicéa et le hêtre*. Retrouvé à : <https://www.wsl.ch/fr/news/2017/08/changements-climatiques-le-sapin-supplante-lepicea-et-le-hetre.html>
- Italiano, J., Chatenoux, B., Poussin, C. & Giuliani, G. (2020). Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) - Annual Mean – Switzerland. Retrouvé à : <https://yareta.unige.ch/#/home/detail/b6022b1c-1c59-4fc7-8a76-1b68c3c07dc7>
- Jia, K., Liang, S., Wei, X., Yao, Y., Su, Y., Jiang, B., & Wang, X. (2014). Land Cover Classification of Landsat Data with Phenological Features Extracted from Time Series MODIS NDVI Data. *Remote Sensing*, 6(11), 11518-11532. <https://doi.org/10.3390/rs6111518>
- Kohler, T., Wehrli, A., & Jurek, M. (Éds.). (2014). *Mountains and climate change : A global concern*. Centre for Development and Environment [u.a.].
- Meneses-Tovar, C. L. (2011). L'indice différentiel normalisé de végétation comme indicateur de la dégradation. *Unasylva*, 62(238), 8. <https://www.fao.org/3/i2560e/i2560e07.pdf>
- Mölg, N., Huggel, C., Herold, T., Storck, F., Allen, S., Haeberli, W., Schaub, Y., & Odermatt, D. (2021). Inventory and evolution of glacial lakes since the Little Ice Age : Lessons from the case of Switzerland. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46(13), 2551-2564. <https://doi.org/10.1002/esp.5193>

- Nativi, S., Santoro, M., Giuliani, G., & Mazzetti, P. (2020). Towards a knowledge base to support global change policy goals. *International Journal of Digital Earth*, 13(2), 188-216. <https://doi.org/10.1080/17538947.2018.1559367>
- Office fédérale de l'environnement (OFEV). (2011). *Régions biogéographiques de Suisse*. Retrouvé à : https://files.be.ch/bve/agi/geoportal/geo/lpi/BIOGREG_2008_01_LANG_FR.PDF
- Office fédéral de l'environnement (OFEV). (2016). *Silvprotect-CH*. Retrouvé à : <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/dangers-naturels/info-specialistes/donnees-de-base-et-utilisation-du-territoire/donnees-de-base-sur-les-dangers/silvprotect-ch.html>
- Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse. (2022). *Changement climatique Suisse*. Retrouvé à : <https://www.meteosuisse.admin.ch/home/climat/changement-climatique-suisse.html>
- Office fédéral de la statistique (OFS). (2021). *Géodonnées en résolution à l'hectare pour la statistique de la superficie selon la nomenclature 2004*. Retrouvé à : <https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/services/geostat/geodonnees-statistique-federale/sol-utilisation-couverture/statistique-suisse-superficie.html>
- Office fédéral de la statistique (OFS). (2021). *L'utilisation du sol en Suisse*. Retrouvé à : <https://dam-api.bfs.admin.ch/hub/api/dam/assets/19365052/master>
- Office fédéral de la statistique (OFS). (2021). *Utilisation et couverture du sol*. Retrouvé à : <https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/statistiques/espace-environnement/utilisation-couverture-sol.html>
- Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). (2020). *Indicateur 15.4.2 : Indice de couvert végétal montagneux*. Retrouvé à : <https://www.fao.org/sustainable-development-goals/indicators/1542/fr/>
- Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). (2021). *Mountain Green Cover Index*. Retrouvé à : <https://www.fao.org/sustainable-development-goals/indicators/1542/fr/>
- Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J.-M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. Chr. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9), 503-510. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>
- Poursanidis, D., Chrysoulakis, N., & Mitraka, Z. (2015). Landsat 8 vs. Landsat 5 : A comparison based on urban and peri-urban land cover mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 35, 259-269. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.09.010>
- Poussin, C., Massot, A., Ginzler, C., Weber, D., Chatenoux, B., Lacroix, P., Piller, T., Nguyen, L., & Giuliani, G. (2021). Drying conditions in Switzerland – indication from a 35-year Landsat time-series analysis of vegetation water content estimates to support SDGs. *Big Earth Data*, 5(4), 445-475. <https://doi.org/10.1080/20964471.2021.1974681>
- Rome, S., & Bigot, S. (2012). *Analyse de la variabilité bioclimatique des forêts du Vercors (Préalpes françaises du Nord) à partir des données NDVI de SPOT-VGT (1998-2009)*. 11(3), 18.
- Scientific Network for the Caucasian Mountain Region. (2017). *Mountain coverages based on Kapos et al., 2000*. Retrouvé à : https://sustainable-caucasus.unepgrid.ch/layers/geonode:k1_kapos
- Verhoeven, V. B., & Dedoussi, I. C. (2022). Annual satellite-based NDVI-derived land cover of Europe for 2001–2019. *Journal of Environmental Management*, 302, 113917. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113917>

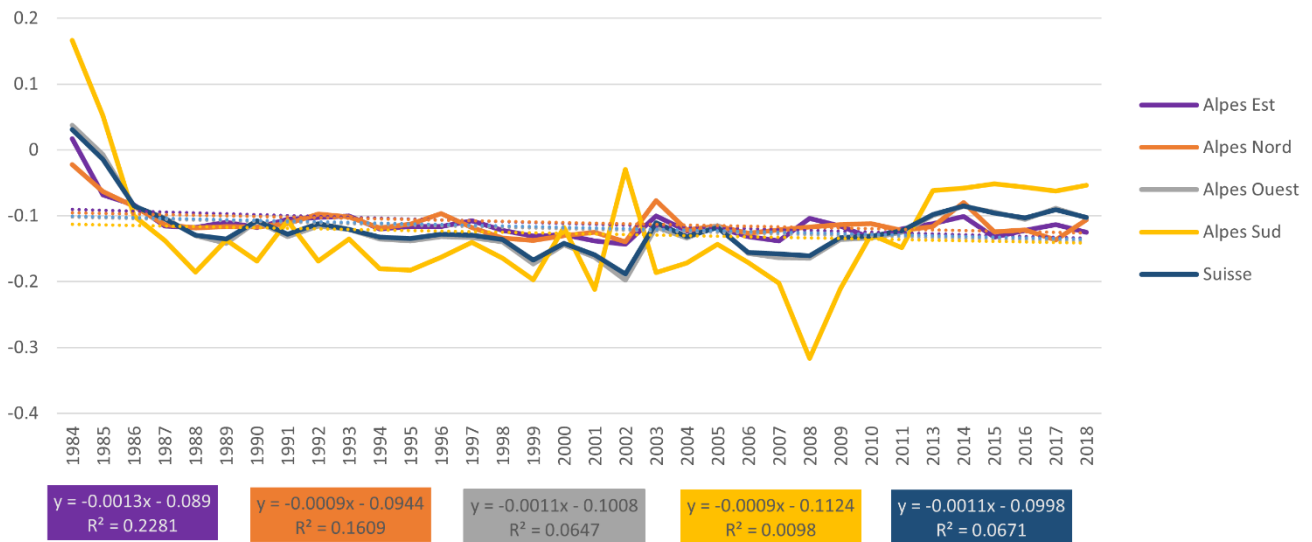
Annexe - Graphiques complémentaires de l'évolution du NDVI par zone Kapos et par région biogéographique

SUISSE

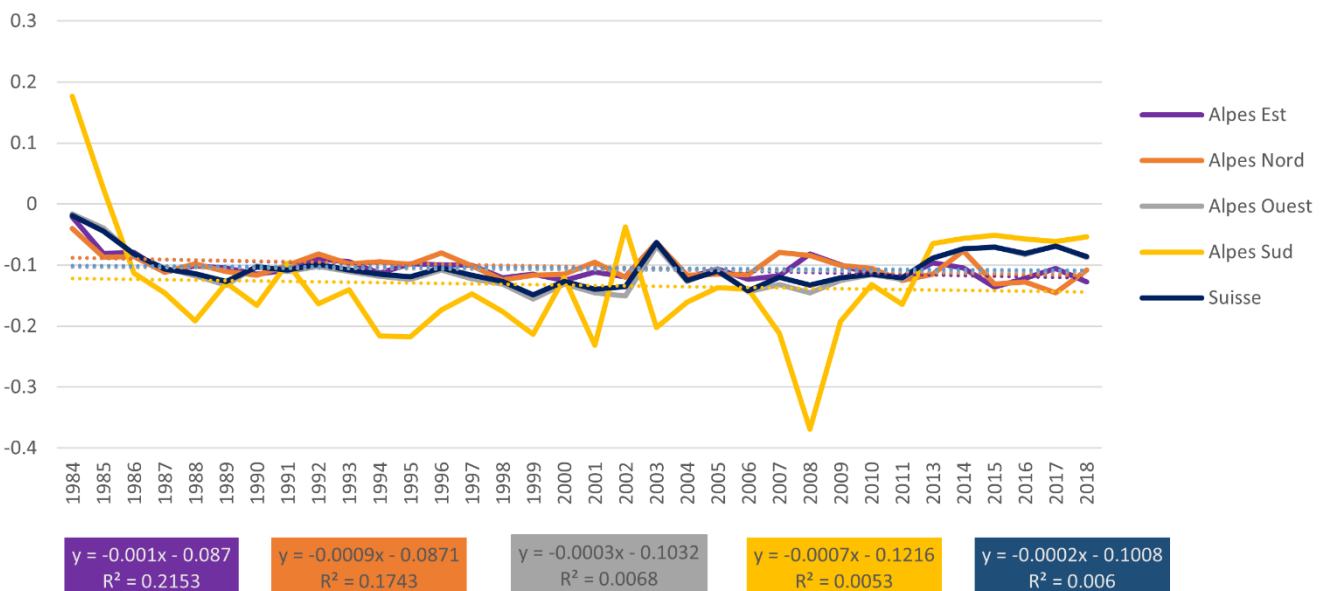


ZONE KAPOUS 2

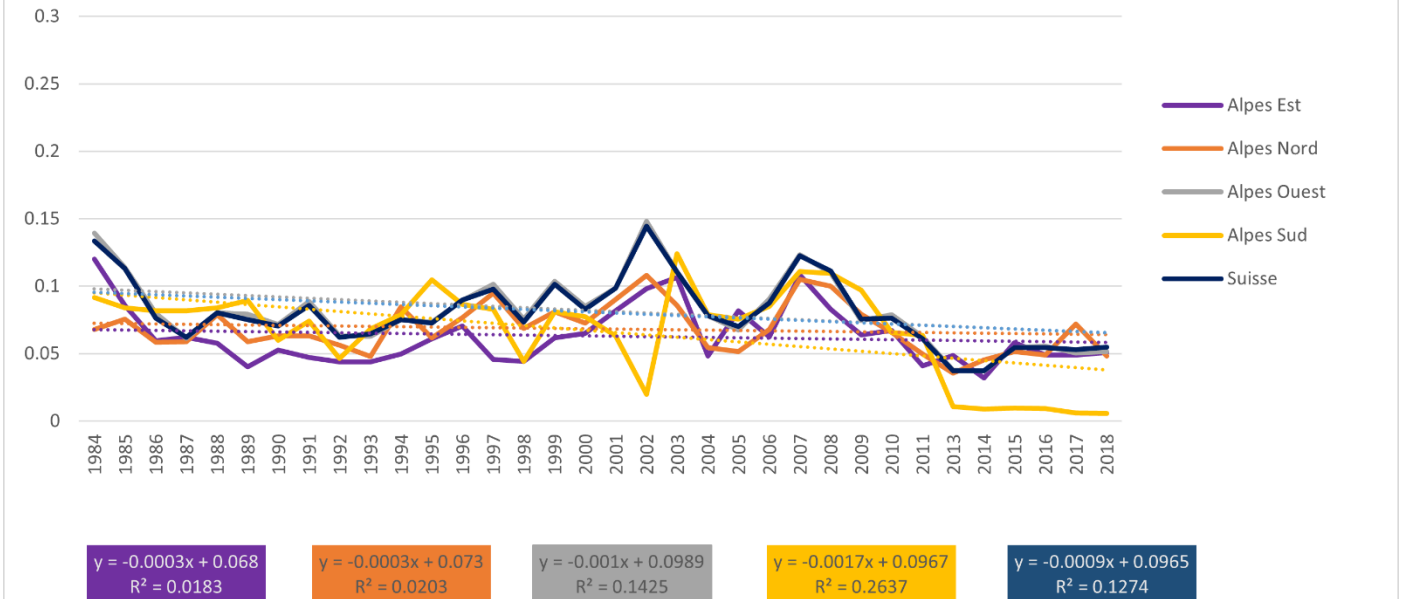
Moyenne du NDVI de la zone Kapos 2 (3500-4500m) par région biogéographique



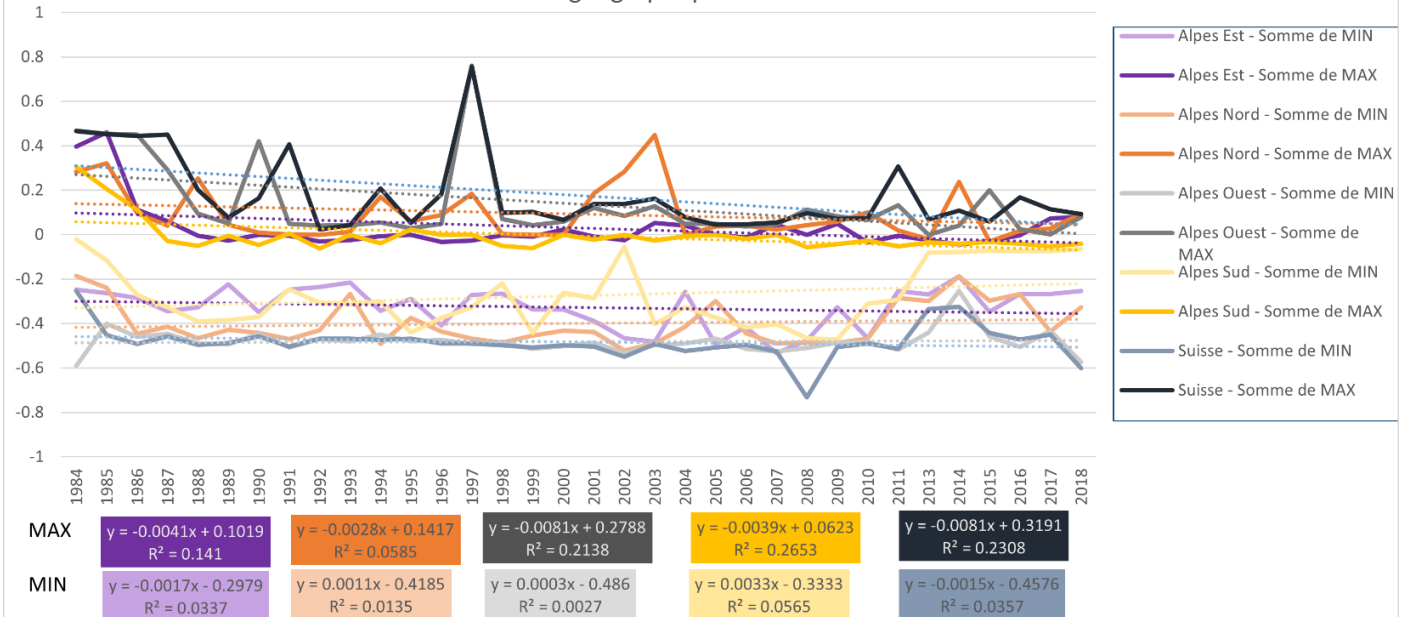
Médiane du NDVI de la zone Kapos 2 (3500-4500m) par région biogéographique



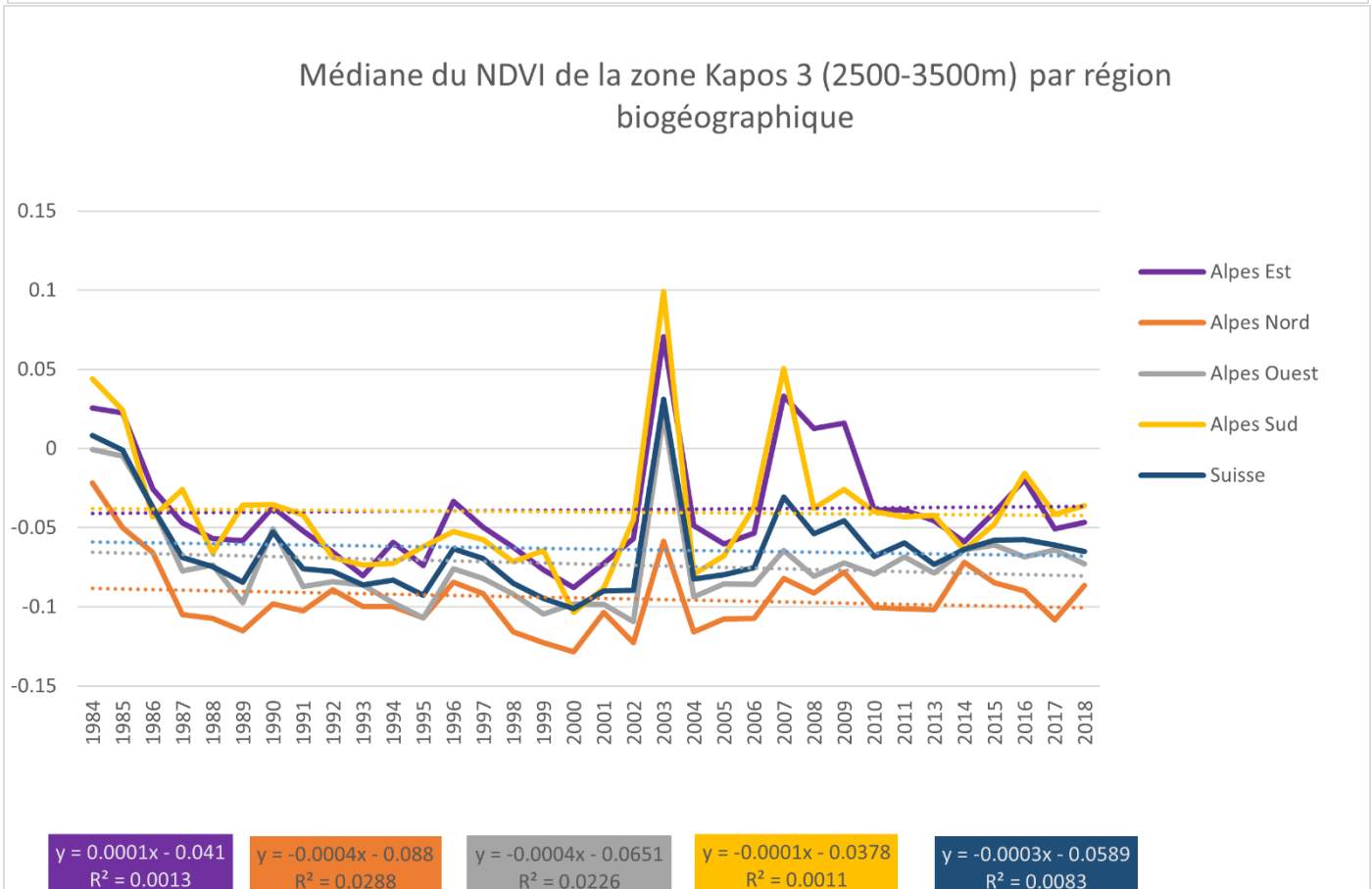
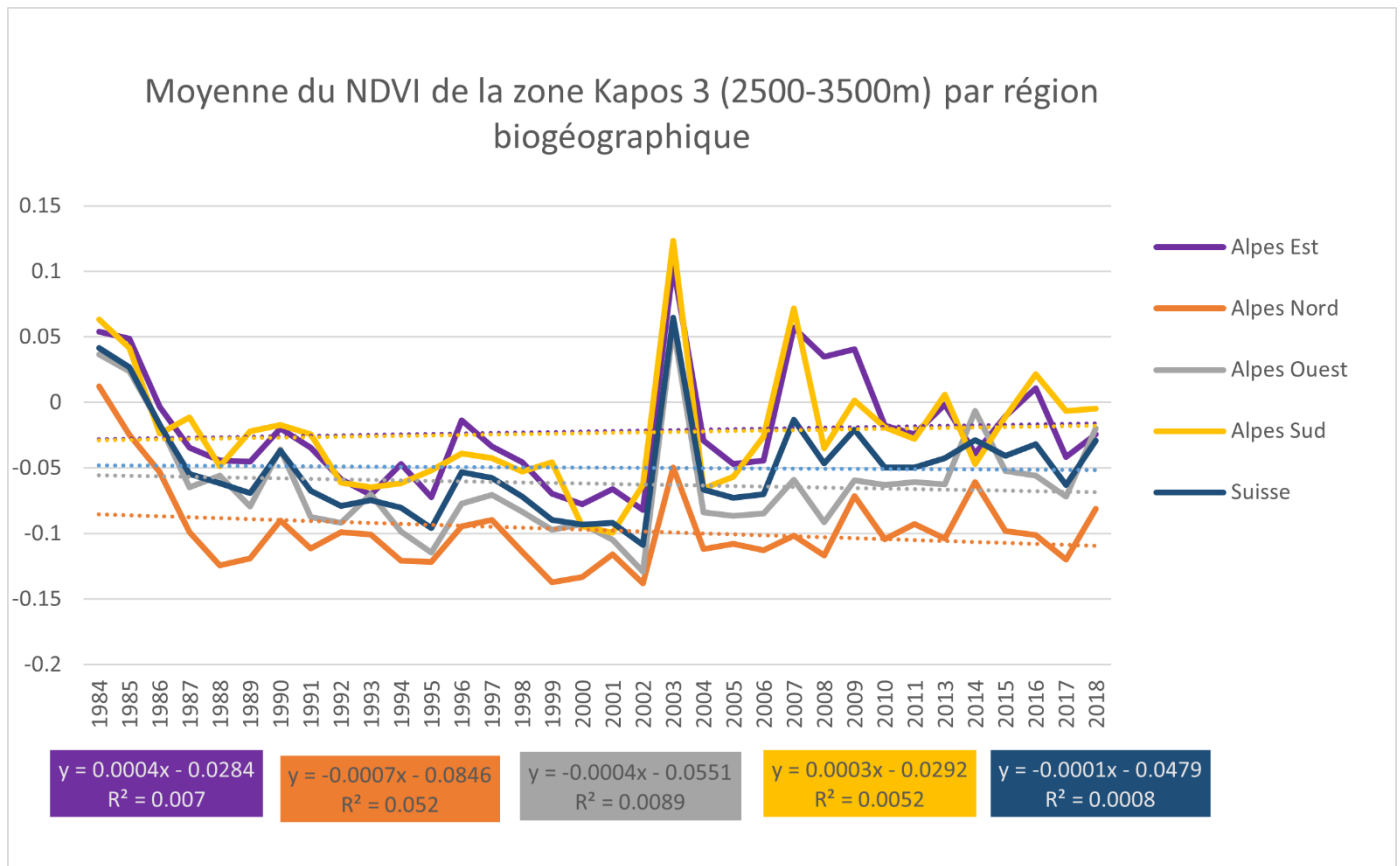
Ecart-type du NDVI de la zone Kapos 2 (3500-4500m) par région biogéographique

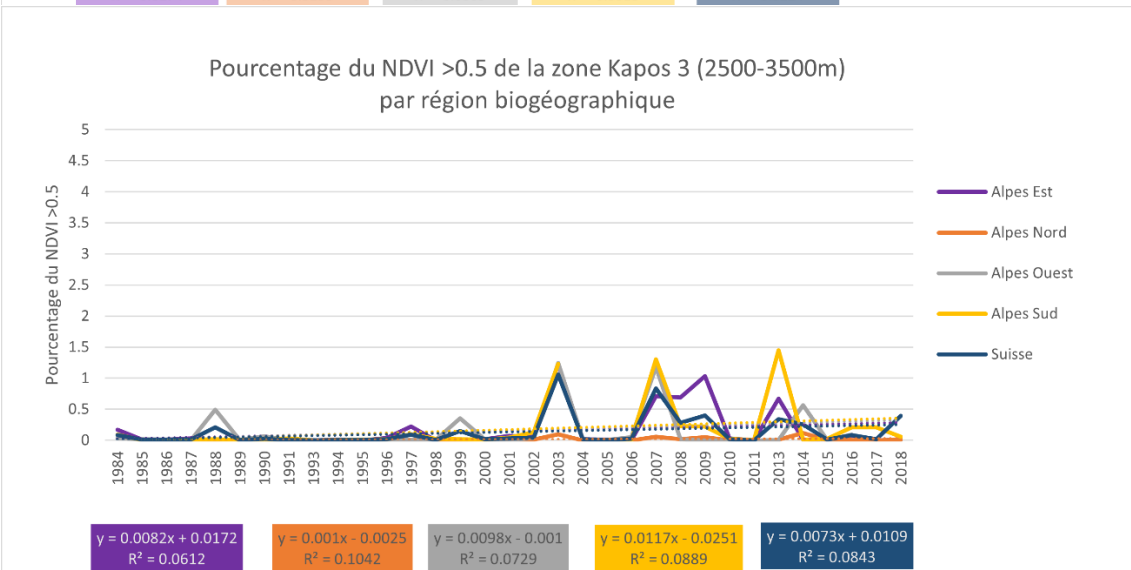
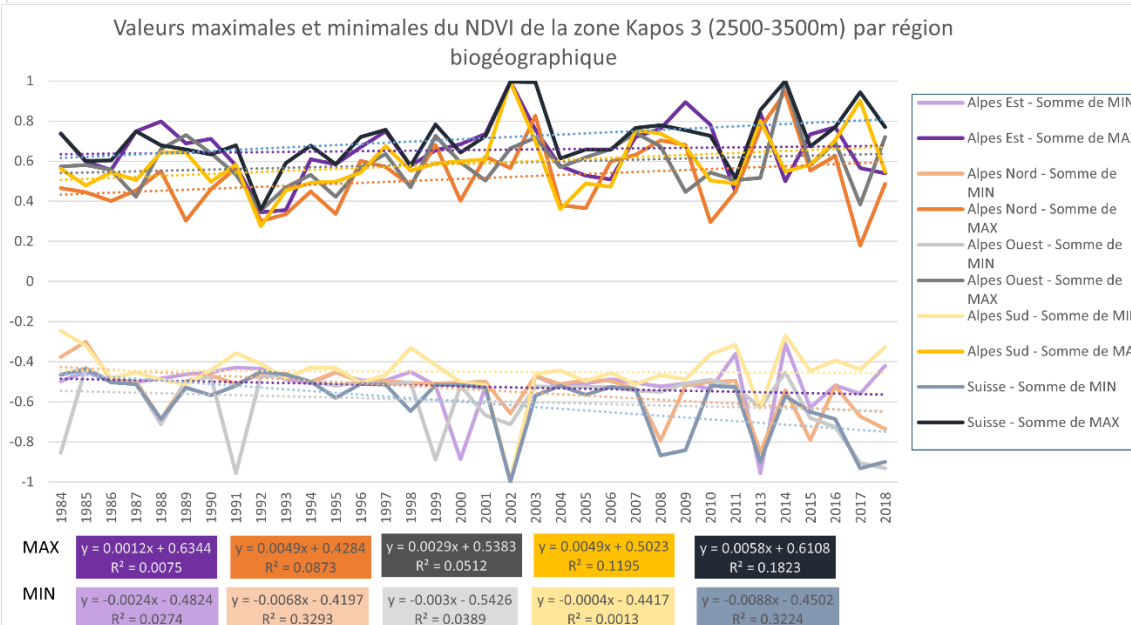
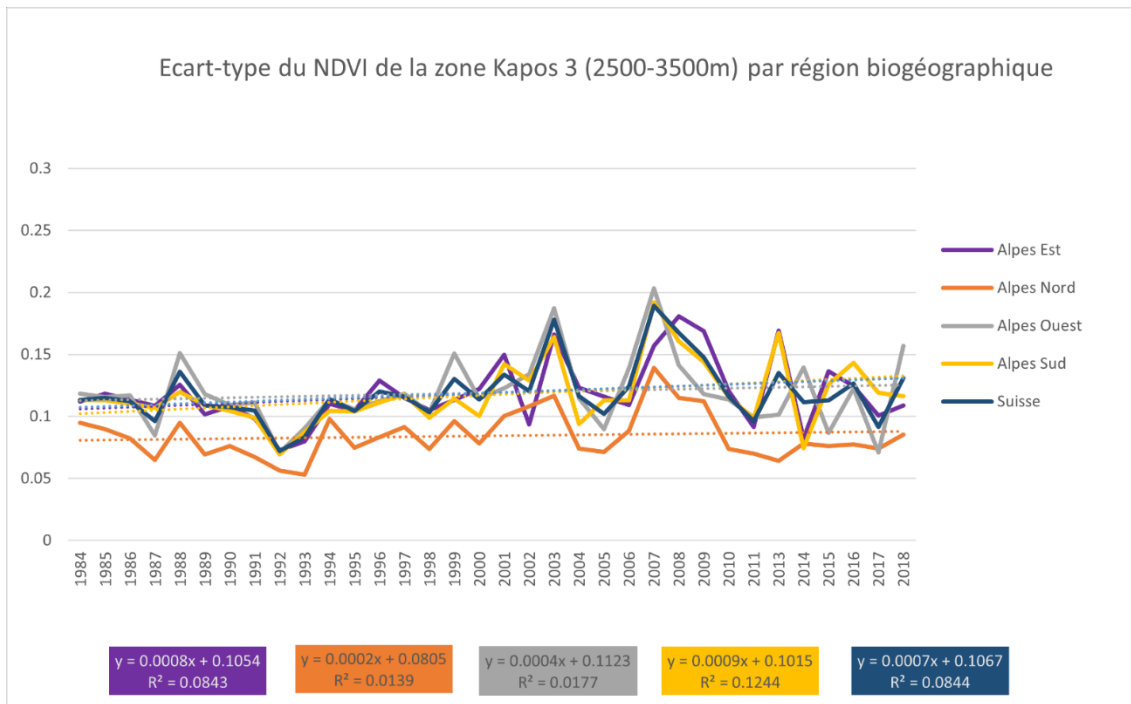


Valeurs maximales et minimales du NDVI de la zone Kapos 2 (3500-4500m) par région biogéographique



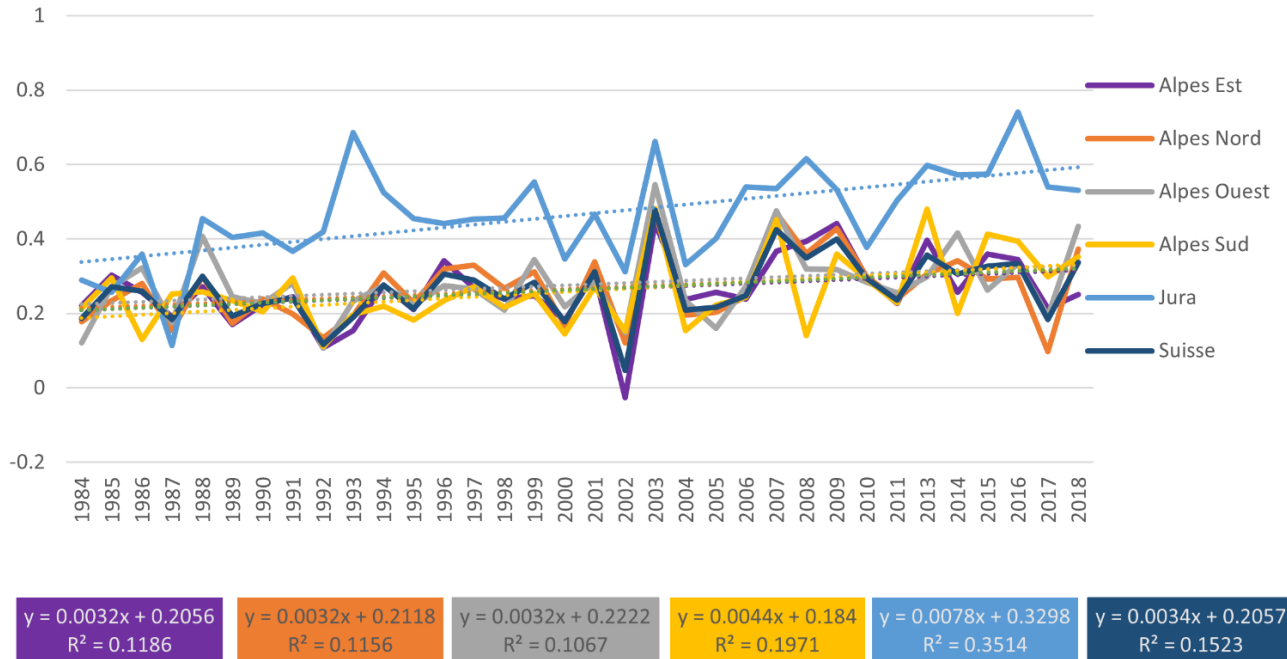
ZONE KAPO3 3



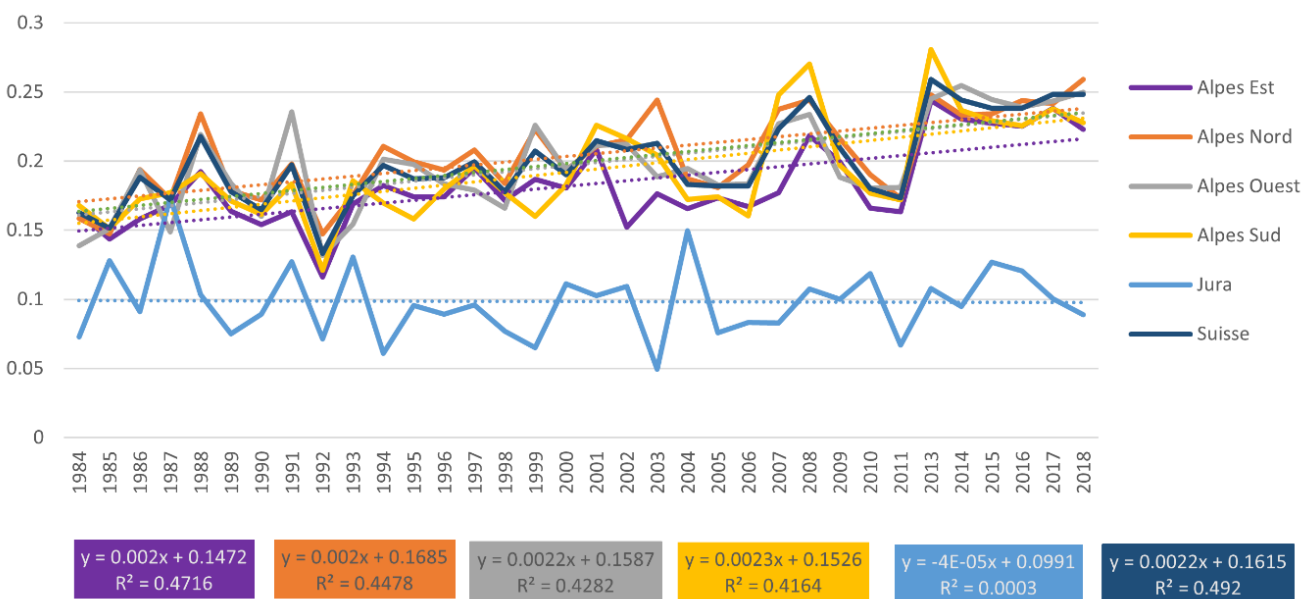


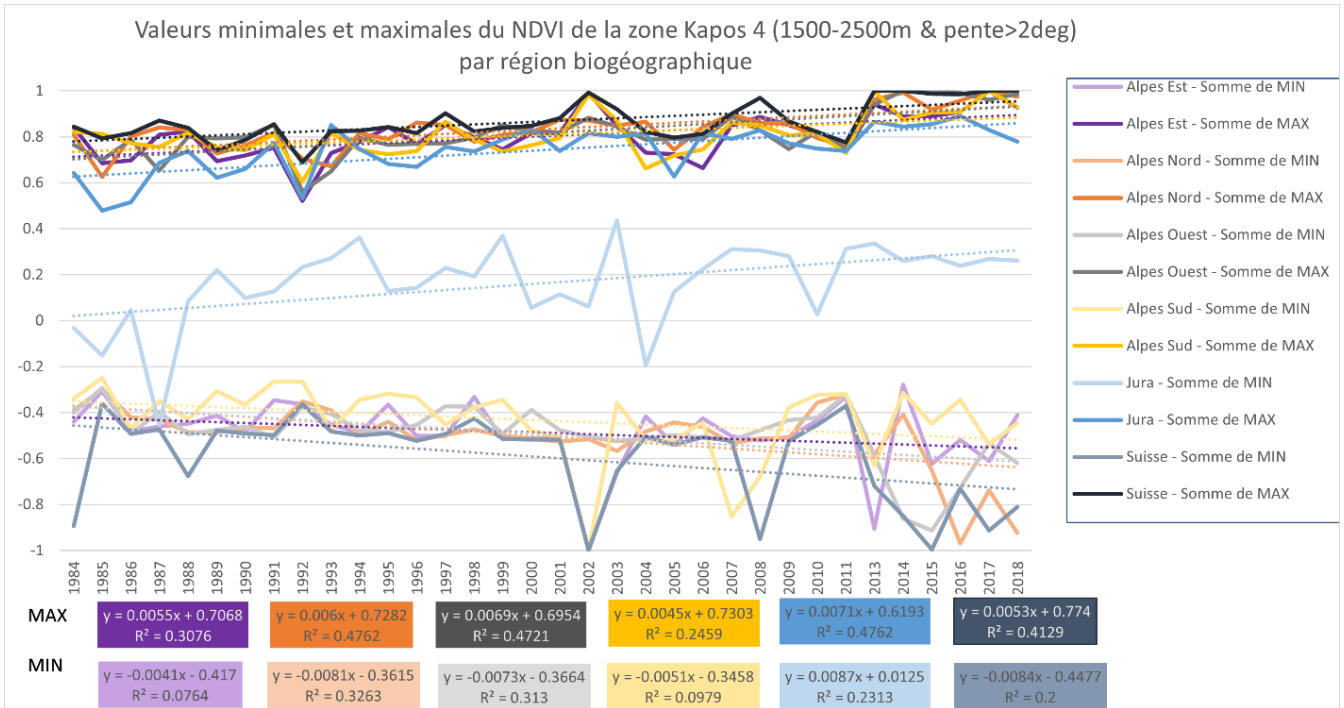
ZONE KAPOUS 4

Médiane du NDVI de la zone Kapos 4 (1500-2500m & pente>2deg)
par région biogéographique

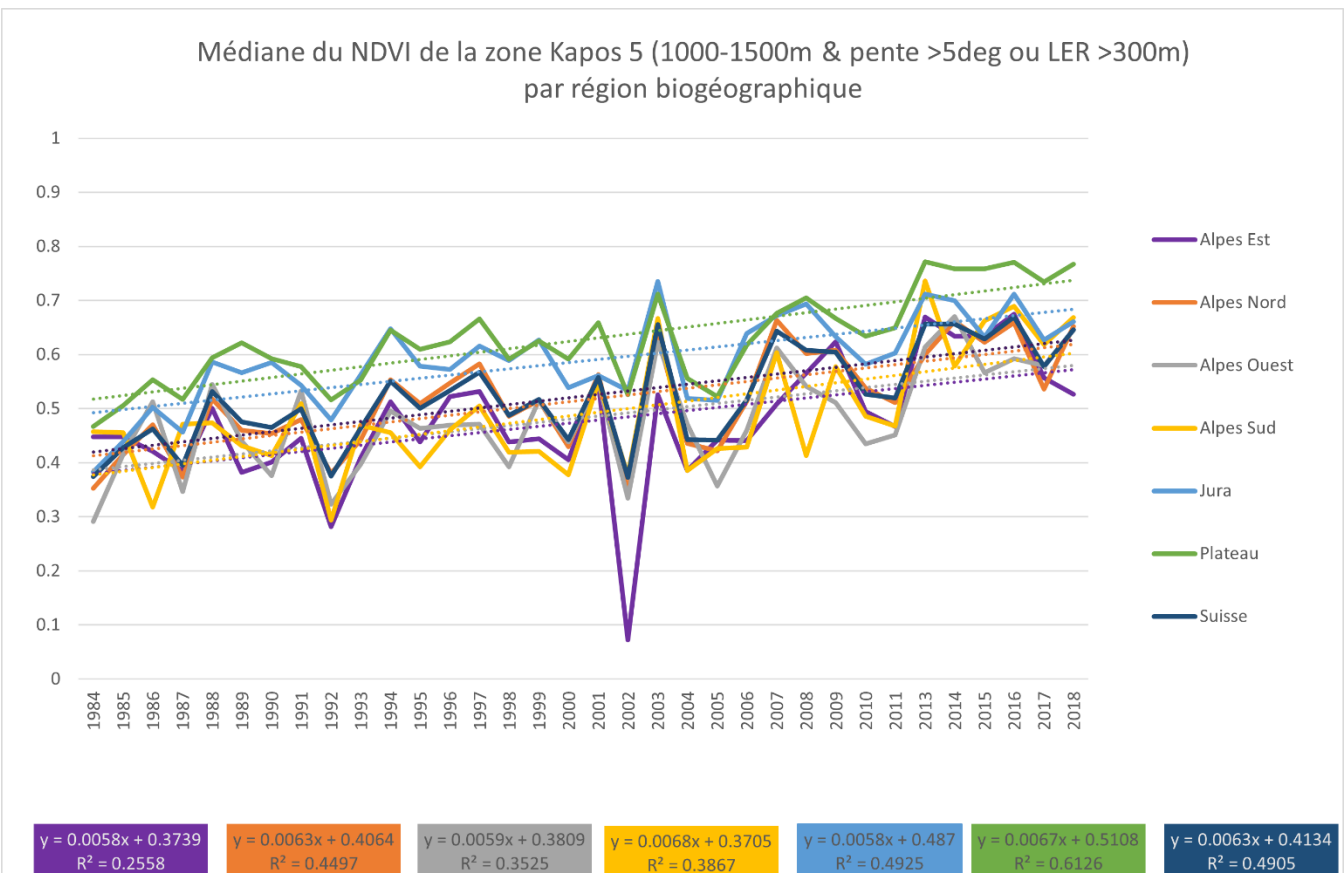


Ecart-Type du NDVI de la zone Kapos 4 (1500-2500m & pente>2deg)
par région biogéographique

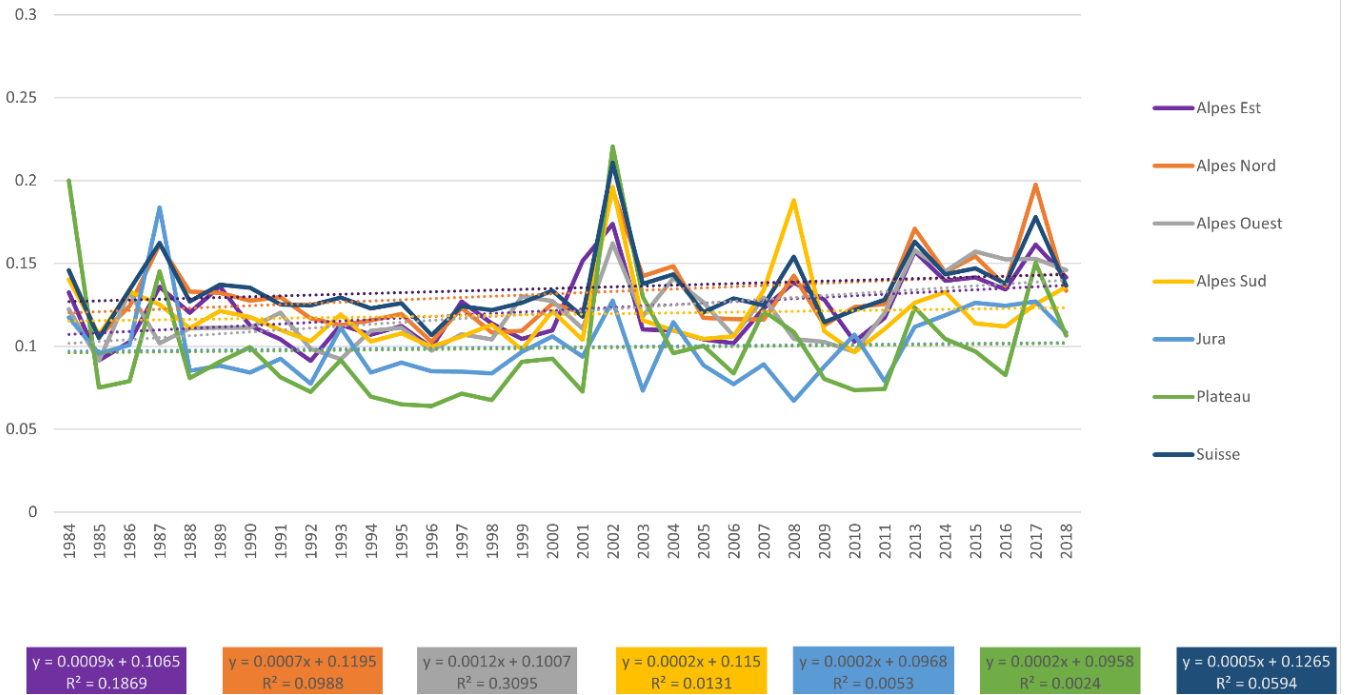




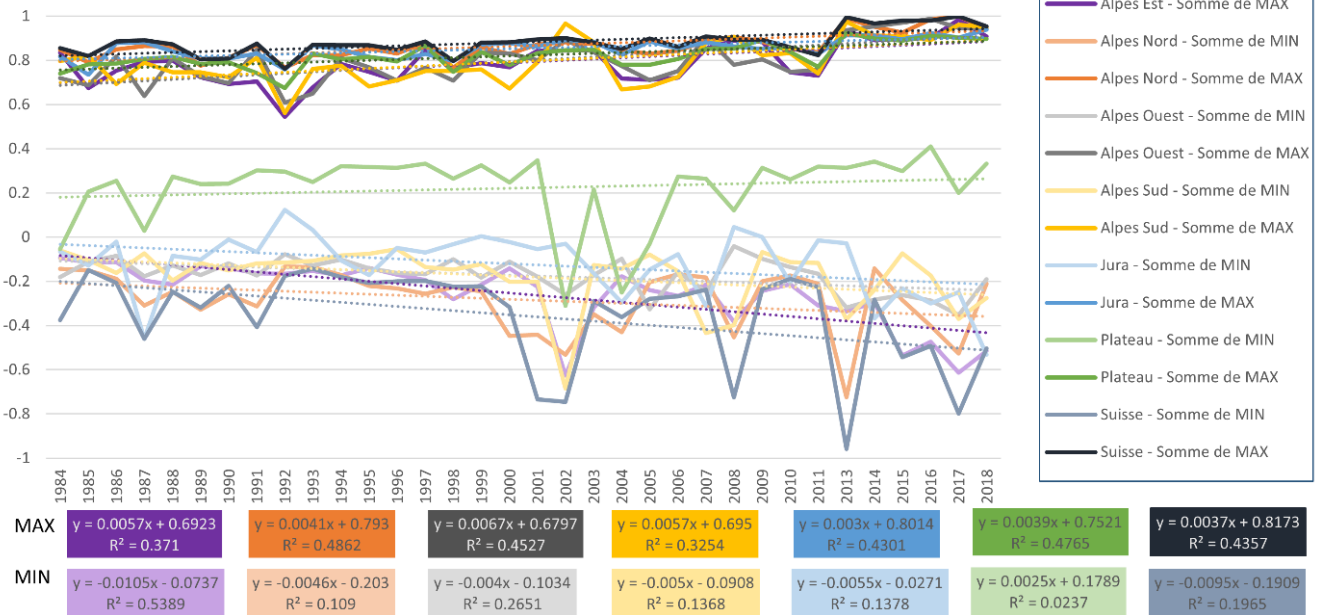
ZONE KAPO5



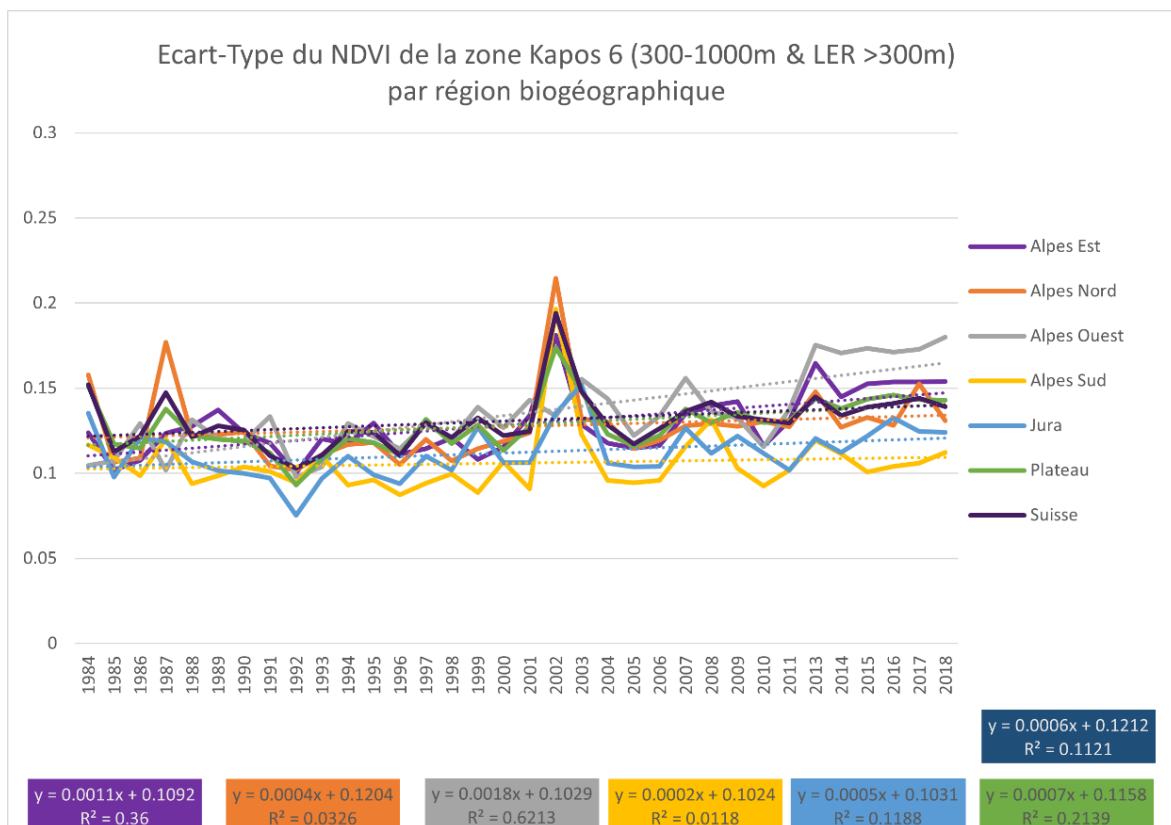
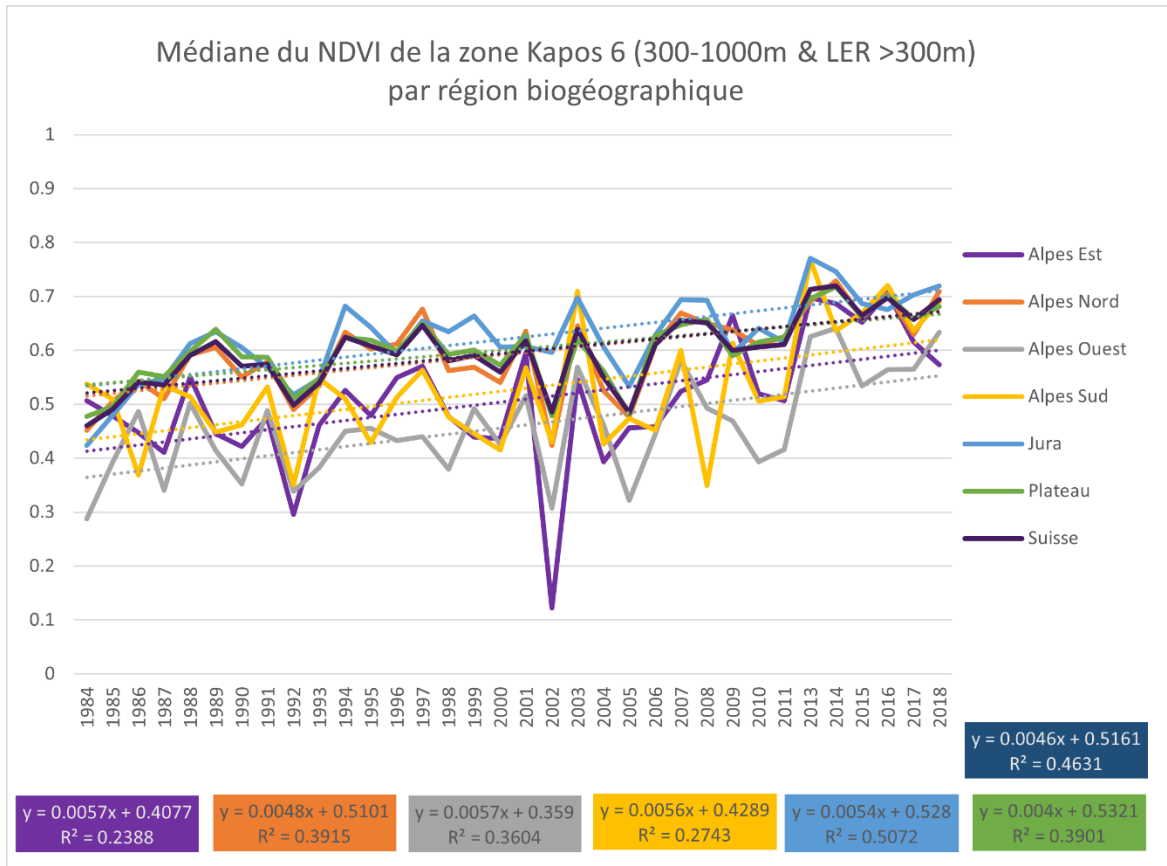
Ecart-Type du NDVI de la zone Kapos 5 (1000-1500m & pente >5deg ou LER >300m)
par région biogéographique

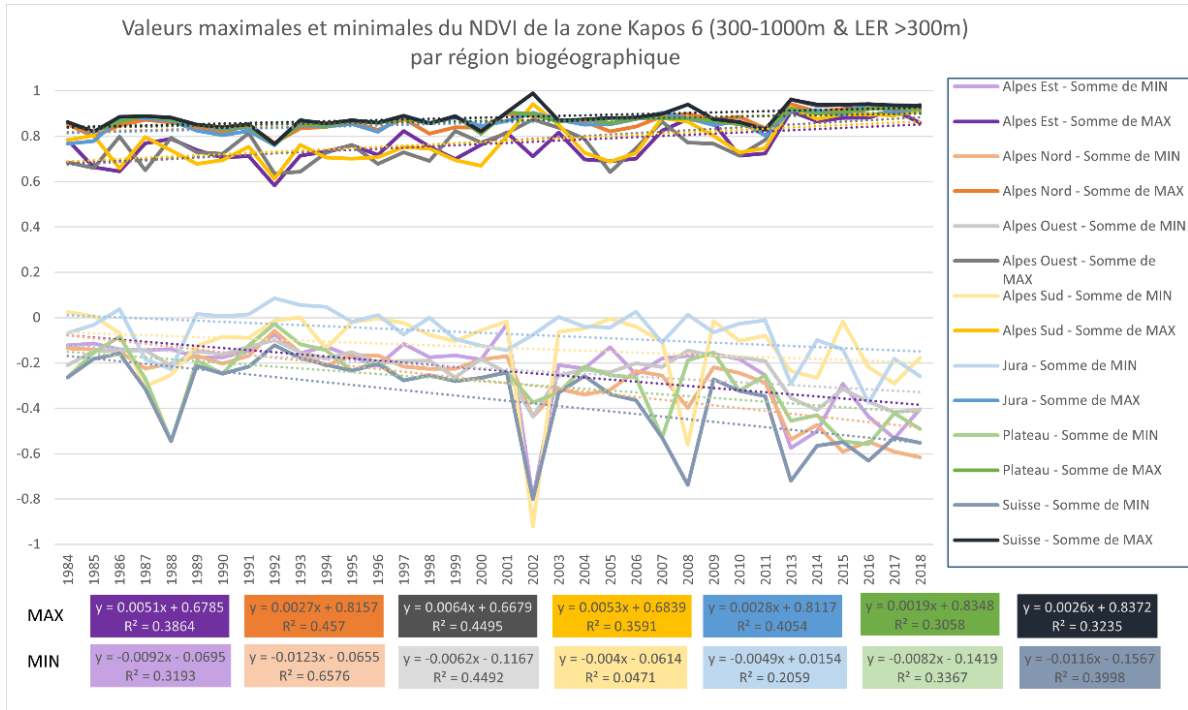


Valeurs minimales et maximales du NDVI par région biogéographique
de la zone Kapos 5 (1000-1500m & pente >5deg ou LER >300m)



ZONE KAPOUS 6





ZONE KAPO 7

