

MODÉLISATION DE LA PHÉNOLOGIE DES VÉGÉTAUX SUR TIMESAT À PARTIR DE SÉRIES TEMPORELLES D'IMAGES SATELLITES

LUCAS ALLEMANN

JANVIER 2023

FACULTÉ DES SCIENCES DE LA SOCIÉTÉ

CERTIFICAT COMPLÉMENTAIRE EN GÉOMATIQUE

DIRECTEUR : GREGORY GIULIANI



**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**

Table des matières

I.	Introduction	4
II.	Concepts théoriques.....	5
	a) Phénologie	5
	b) Indice de végétation standardisé.....	6
III.	Méthodologie	8
	a) Téléchargement des données.....	9
	b) Préparation des données.....	11
	c) Réglages dans TIMESAT	12
	TSM_GUI.....	13
	TSM_settings	18
	TSM_process.....	19
	TSM_printseason	19
	TSF_seas2img.....	19
IV.	Résultats.....	19
V.	Discussion	23
	a) Perspectives.....	23
	b) Limites.....	24
VI.	Conclusion	25
VII.	Bibliographie	26
VIII.	Annexes	28

Figure 1 - Illustration NDVI.....	7
Figure 2 - Schéma de la démarche appliquée dans cette étude	8
Figure 3 - Tableau des caractéristiques des bandes utilisées	10
Figure 4 – Photo satellite du 29.10.	11
Figure 5 – Série temporelle de 5 ans..	12
Figure 6 – Fenêtre TSM_GUI pour charger les données.	13
Figure 7 - Image NDVI avec le périmètre	14
Figure 8 - Localisation du périmètre d'étude.....	14
Figure 9 - Données NDVI brutes importées dans TSM_GUI.....	15
Figure 10 – Données NDVI traitées dans TSM_GUI	16
Figure 11 – Quelques indicateurs phénologiques générés dans TIMESAT.....	18
Figure 12 – Tableau de données produit dans TSM_printseason.....	20
Figure 13 - Représentation du début de la saison avec TSM_seas2img avec illustration des ‘nodata’ .	21
Figure 14 - Tableau de comparaison de 3 milieux écologiques distincts	22

Résumé

Les observations de la phénologie des plantes fournissent de nombreuses informations sur les conséquences du dérèglement climatique sur leurs cycles naturelles. Pour couvrir des échelles nationales, continentales voir mondiales et avoir une meilleure compréhension de ces changements qui représentent l’un des défis majeurs du 21^{ème} siècle, cette discipline s’effectue sur la base d’images satellites. La démarche décrite dans ce présent rapport utilise les données acquises par les satellites Sentinel-2 du programme européen Copernicus. Elles ont ensuite été traitées sur un logiciel d’informations géographiques pour être analysées et visualisées dans le logiciel TIMESAT. L’objectif de cette étude est de poser les jalons pour la réalisation d’un modèle d’analyse et de suivi des changements phénologiques d’un territoire donné, mesurable avec des indicateurs saisonniers. Un pareil modèle permettrait d’avoir une idée claire des stades d’évolution du monde végétale, ses changements à travers le temps et les conséquences à long-terme du dérèglement climatique. Ce travail met également en lumière sa faisabilité et sa pertinence mais aussi les limites et les perspectives de cette méthode.

I. Introduction

La perpétuelle quête d'équilibre au sein de la nature est un phénomène passionnant. Chaque individu, de chaque espèce, de chaque embranchement, de chaque règne dépend d'innombrables facteurs écologiques nécessaires à sa survie. On distingue deux catégories de ces facteurs environnementaux ; les facteurs abiotiques ou physiques comme la température, l'humidité, les précipitations, le sol et les facteurs biotiques qui représentent toutes les interactions biologiques possibles (symbiose, compétition, prédation, mutualisme, etc.) entre les êtres vivants. La compréhension de ces facteurs et de leur interaction est cruciale pour la survie des espèces vivantes.

Le réchauffement climatique est un phénomène qui a un impact indéniable et prévisible sur les facteurs abiotiques, mais il est bien plus complexe d'anticiper les réactions en chaîne qu'il provoque sur les facteurs biotiques. Les changements dans les facteurs abiotiques peuvent avoir des répercussions sur les populations d'espèces, les relations écologiques et les écosystèmes. C'est pourquoi il est important de continuer à étudier ces interactions pour mieux comprendre les conséquences potentielles du réchauffement climatique et aider à protéger les espèces et les écosystèmes menacés.

Chez les plantes, le climat influence de manière directe leur phénologie à travers des processus fondamentaux comme la photosynthèse, l'absorption de CO₂ ou la transpiration (Helman, 2018). L'avancement du début, le retardement de la fin et l'allongement global de la période de croissance figurent parmi les indicateurs phénologiques qui se sont vus modifiés par le changement climatique en Europe ces dernières décennies. Ce sont des indicateurs tangibles, calculables et comparables qui permettent de mesurer l'ampleur des changements dans la végétation liés aux activités humaines, notamment les émissions de carbone. Comme les interactions biotiques sont le propre d'un écosystème, lorsque les plantes sont amenées à modifier leur cycle de vie, ce sont toutes les espèces qui en dépendent directement ou indirectement qui se retrouvent perturbées (Misra et al., 2020). Ainsi, les recherches en phénologie servent de support pour diverses études biologiques sur les impacts que ces changements peuvent induire sur les écosystèmes.

L'objectif de cette étude est de poser les jalons pour mettre en place un modèle d'analyse et de suivi des changements phénologiques d'un territoire donné, mesurable avec des indicateurs. Dans une perspective de développement futur, ce modèle souhaite rendre compte des changements phénologiques dans une dimension temporelle, en enregistrant l'évolution des indicateurs depuis 1970, et dans une dimension spatiale, en couvrant l'ensemble du territoire suisse. Un pareil modèle permettrait d'avoir une idée claire des stades d'évolution du monde végétale, ses changements à travers le temps et les conséquences à long-terme du dérèglement climatique.

Il s'agit ici d'une recherche exploratoire réalisée à partir d'images satellites sur une surface de moyenne taille afin d'étudier la pertinence et la faisabilité de mettre en place le modèle discuté plus haut. Concrètement dans ce travail, nous allons réaliser une modélisation de la phénologie sur une surface de 10'000 m², détailler sa mise en place et enfin interpréter et comparer les paramètres saisonniers de 3 milieux écologiques distincts, à savoir une forêt de moyenne altitude, un bois de basse altitude et une exploitation agricole pour voir comment ceux-ci diffèrent et ainsi nous permettant ainsi de tester le degré de précision du modèle.

La démarche décrite dans ce présent rapport utilise les données en libre accès acquises par les satellites Sentinel-2 du programme européen Copernicus. Elles ont ensuite été traitées sur un logiciel d'informations géographiques pour être analysées et visualisées dans le logiciel TIMESAT, conçu spécifiquement pour la recherche sur la phénologie de la surface terrestre.

II. Concepts théoriques

a) Phénologie

La phénologie des plantes est le champ d'étude qui s'intéresse au cycle biologique et aux phases de développements saisonniers de la feuillaison à la chute des feuilles en passant par la floraison, la fructification et le jaunissement automnal. Cette discipline permet d'établir un certain nombre d'indicateurs et de paramètres dans les cycles saisonniers de la végétation, tels que le début de la saison (SOS), la fin de la saison (EOS), l'amplitude, le point de bascule (POS) ou encore la durée de la saison (LOS). Ces métriques sont essentielles dans le suivi de l'évolution de la végétation et pour les analyses comparatives à travers le temps, notamment en vue du changement climatique.

Il existe la phénologie au sol ou *ground phenology*, qui représente des observations de terrain et la phénologie de la surface terrestre ou *land surface phenology*, qui sont les études de phénologie réalisées sur la base d'imageries satellites. Chacune des approches comporte son lot d'avantages et d'inconvénients que nous allons brièvement aborder.

La phénologie au sol est la méthode la plus ancienne et on peut retrouver des recherches en Europe remontant au début du 20^{ème} siècle. Elle permet de récolter des observations à une échelle de temps quotidienne et à une échelle bien plus précise, rendant ainsi possible la distinction entre les différentes espèces végétales. Cependant, cette méthode présente également des inconvénients, tels que l'exigence de temps et de moyens considérables pour la répétition des observations de terrain, l'impossibilité de couvrir des échelles régionales ou mondiale, et l'incapacité d'identifier les changements phénologiques au niveau des communautés (Rodriguez-Galiano et al., 2015).

La phénologie de la surface terrestre est effectuée sur l'utilisation d'images satellites pour collecter des données. Cette méthode présente des avantages notables par rapport à la phénologie au sol, tels que la capacité à étudier des phénomènes à des échelles régionales, nationales ou même continentales, ce qui est absolument inconcevable dans la première méthode (Misra et al., 2020). En outre, l'accès à des bases de données d'images satellites de plus en plus accessibles et à des méthodes de traitement de plus en plus avancées a considérablement accru les recherches sur la phénologie de la surface terrestre ces dernières années (Garonna et al., 2016). Cependant, il convient de noter que la résolution temporelle et spatiale peut être limitée en fonction du satellite choisi. Il est donc important de prendre en compte ces limites dans le choix des données. Aussi, il est également important de souligner que la phénologie de la surface terrestre ne peut pas identifier les changements phénologiques au niveau des individus.

L'étude de la phénologie de la végétation depuis l'espace repose sur deux hypothèses fondamentales. La première hypothèse pose que les données optiques modélisent correctement les propriétés biophysiques de la végétation. Cette hypothèse n'est malheureusement pas parfaitement satisfaite ; les indices de végétation populaires ne répondent pas uniquement aux variations de la végétation mais sont également tous deux très sensibles aux variations atmosphériques induites par la neige ou l'humidité (Eklundh & Jönsson, 2015). De plus, les estimations peuvent inclure des biais provenant de multiples sources, comme le bruit dans les données des capteurs satellites, les erreurs dans les méthodes de traitement, les modifications des pratiques agricoles, la supplantation d'une espèce par une autre ou encore les perturbations humaines telles que l'urbanisation (White et al., 2005). Ces influences entraînent une ambiguïté dans l'interprétation du signal, ce qui affecte la valeur de l'information et notre capacité à interpréter les données de saisonnalité extraites.

La deuxième hypothèse est que le signal temporel de la végétation est lisse. La variation saisonnière peut être lente - par exemple comme le cas des forêts de conifères - ou rapide - comme pour les prairies semi-arides - mais elle n'est pas aléatoire (Eklundh & Jönsson, 2015).

L'approche idéale selon Rodriguez et al. serait donc un croisement de ces deux méthodes qui sont en réalité parfaitement complémentaires. La phénologie au sol apporte une meilleure appréhension du terrain permettant ainsi de réduire les biais associés à la méthode par télédétection qui elle va rendre possible l'analyse à grande échelle (Rodriguez-Galiano et al., 2015).

b) Indice de végétation standardisé

Comme mentionné plus haut, dans cette recherche nous allons procéder à une analyse par interprétation d'images satellitaires. Plus précisément, nous allons nous intéresser à l'indice de

végétation standardisé appelé Normalized Difference Vegetation Index (NDVI par la suite). Avant d'aborder ce que représente cet indice et la manière dont on peut l'obtenir, nous allons revoir certains concepts fondamentaux de la télédétection. Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques mesurées en nm émises par le Soleil. Comme n'importe quel corps, les plantes absorbent et réfléchissent le rayonnement solaire dans une certaine plage spectrale en tant que sous-produit de la photosynthèse, ce que l'on désignera comme sa signature spectrale. La chlorophylle présente dans les feuilles va donc intercepter une partie des rayons solaires pour la métaboliser en énergie chimique. Ainsi, les feuilles vertes vont absorber la lumière dans le spectre rouge (avec une absorption maximale proche de 620nm) et vont réfléchir la lumière dans le spectre infrarouge (à partir de 800nm). L'explication biophysique d'un tel comportement est l'utilisation bénéfique de l'énergie du rayonnement solaire dans la plage active dite photosynthétique (400 à 700 nm) pour les réactions photochimiques se produisant dans la cellule de la feuille ; elle va donc l'absorber. A contrario, l'énergie relativement faible du spectre infrarouge est inefficace pour la photosynthèse et contribue à son endommagement ; elle va donc le réfléchir (Helman, 2018). La végétation nous apparaît verte parce qu'elle réfléchit plus le rayonnement dans les longueurs d'onde comprises entre 490 nm et 580 nm, c'est-à-dire dans la partie du spectre correspondant au vert que dans les autres longueurs d'onde du visible.

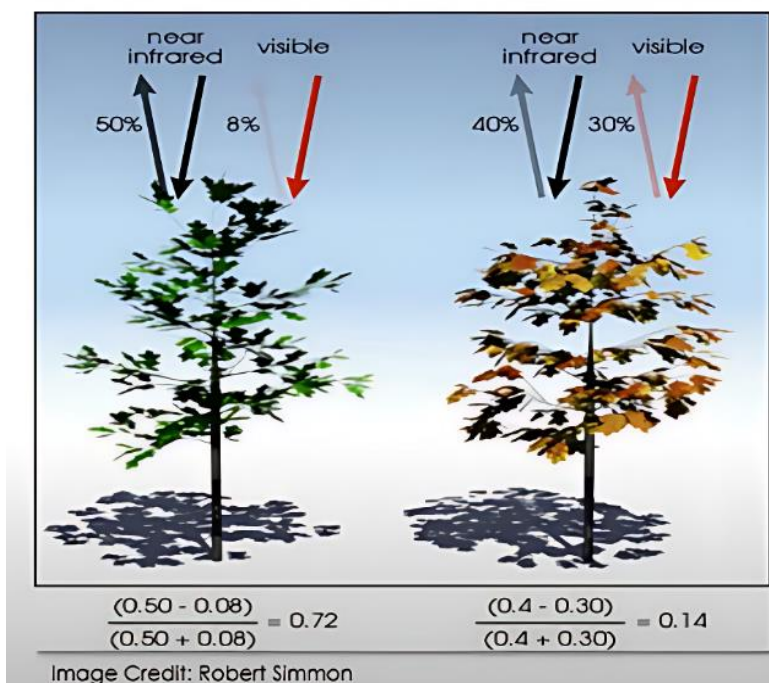


Figure 1 - Illustration NDVI. Cette figure illustre les différents rayons spectraux pris en compte dans le calcul du NDVI et comment interpréter les résultats.

Ce principe peut notamment être mesuré avec la télédétection. En combinant les bandes satellitaires qui nous intéressent (ici la bande rouge et la bande proche infrarouge (PIR)), on peut alors obtenir le NDVI d'une surface indiquant une activité chlorophyllienne (et donc une concentration de végétation). Les résultats normalisés s'étendent de -1 à 1, les résultats dans le négatif indiquent une surface non végétalisée, la valeur 1 symbolise une forte concentration de végétation et/ou une végétation en bonne santé où l'activité chlorophyllienne est maximale. La formule du NDVI est la suivante :

$$\frac{(\text{bande PIR} - \text{bande rouge})}{(\text{bande PIR} + \text{bande rouge})}$$

III. Méthodologie

Maintenant que les principaux éléments théoriques ont été explicités, nous allons à présent aborder les différentes étapes de traitement– du téléchargement des données aux manipulations dans TIMESAT – pour obtenir les paramètres de saisonnalité. La démarche décrite ici suit les étapes suivantes :

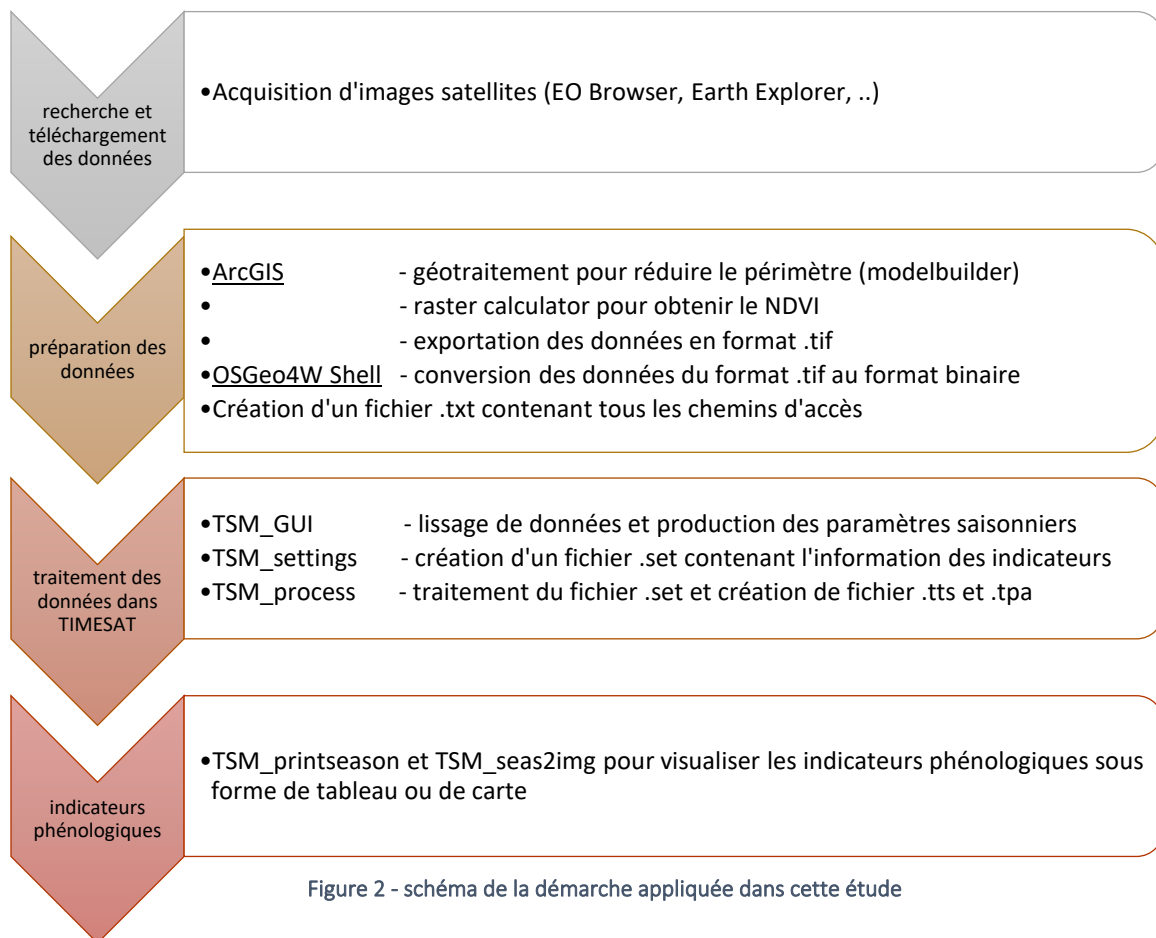


Figure 2 - schéma de la démarche appliquée dans cette étude

Parmi les différentes approches qui existent pour produire des analyses phénologiques, TIMESAT est un programme gratuit permettant de traiter les séries temporelles de données satellitaires à travers plusieurs outils programmés sur Matlab et Fortran. TIMESAT peut donc être utilisé à travers Matlab mais il existe également un logiciel du même nom qui a notamment été exploité dans cette étude.

De nature brouillées, les données brutes doivent passer par un certain nombre d'étapes de traitement pour en dégager un signal compréhensible et interprétable. Ces étapes consistent à supprimer les interférences des nuages et autres valeurs aberrantes en utilisant différents filtres car elles présentent un biais négatif évident. Une fois les données nettoyées, on peut alors appliquer un lissage des données avant d'extraire les métriques phénologiques pour modéliser les dynamiques de la végétation. Comme les indices de végétation sont affectés par une série de paramètres différents, il n'est pas possible d'appliquer un traitement universel ni de définir des seuils généraux pour les métriques phénologiques. Il est nécessaire de procéder au cas par cas et de prendre des choix qui incluront inéluctablement une part de subjectivité. Selon les développeurs du programme, "trying to find common and class specific settings that make the curves fit nicely to the data is more of an art than a science and has to be made with due consideration to the nature of the ground target and type of satellite data used" (Eklundh & Jönsson, 2017). S'il n'existe pas de formule à appliquer ou une méthode plus juste qu'une autre, une étude comparative menée par Hird et McDermid (2009) mettant en avant les avantages et les biais inhérents à chacune des méthodes ainsi que leur significativité servira de référence dans la justification du choix des paramètres. Cette procédure, qui va faire l'objet d'une discussion étape par étape, permet de dégager les indicateurs phénologiques d'une série temporelle puis de les afficher sous forme de cartes.

a) Téléchargement des données

Les premières recherches sur la phénologie de surface terrestre furent réalisées avec des données satellitaires provenant du programme AVHRR lancé en 1978 avec une résolution spatiale de 1'100m et une résolution temporelle bimensuelle puis dans un second temps, les images MODIS avec un temps de revisite de 1 à 2 jours et une résolution spatiale allant de 250m à 1'000m. Ces études ont démontré la pertinence des travaux sur la phénologie de surface terrestre pour le suivi de la dynamique des écosystèmes sur de grands espaces géographiques. Cependant, la résolution spatiale grossière de AVHRR et MODIS limite leur utilité pour les applications qui s'intéressent à des indicateurs phénologiques d'échelles plus fines. Pour remédier à cela, Fisher et Mustard (2007), Elmore et al. (2012), et Melaas et al., 2016, Melaas et al., 2013 (entre autres) ont développé des méthodes basées sur l'imagerie Landsat pour mesurer les paramètres saisonniers à une résolution spatiale de 30m (Bolton

et al., 2020). On observe donc une tendance générale à utiliser des images satellites avec une résolution spatiale toujours plus précise.

A l'aube du lancement des satellites Sentinel-2 du programme européen Copernicus en 2015, Eklundh et Jönsson en parlaient comme d'une perspective prometteuse qui permettra de surveiller la végétation à l'échelle de peuplements forestiers individuels plutôt qu'à l'échelle d'écosystèmes (Eklundh & Jönsson, 2015). En effet, une résolution spatiale de 10m, comme celle des satellites Sentinel-2, permet d'aborder la phénologie selon les milieux spécifiques, contrairement à de nombreux travaux qui ont été menés avec des résolutions spatiales plus grossières mais qui présentent l'avantage de couvrir l'ensemble de la Terre (voir Bolton et al., 2020; Eklundh & Jönsson, 2004; Garonna et al., 2014, 2016; Helman, 2018; Tan et al., 2011; White et al., 2005). Le choix de la résolution doit donc s'effectuer en tenant compte du degré de précision du phénomène étudié et de la couverture spatiale de l'étude.

Pour cette recherche les données Sentinel-2 ont été utilisées. Avec des images d'un temps de revisite de 5 jours et une résolution spatiale de 10m, ces données offrent une capacité d'observation de la végétation depuis l'espace sans précédent (Bolton et al., 2020 ; Misra et al., 2020). Tant pour la question de la résolution temporelle que spatiale, les données Sentinel-2 sont dessus de celles de Landsat, qui a également été envisagé pour cette étude. L'avantage principal des données Landsat réside probablement dans un volume de données plus léger, ce qui est un bon compromis entre précision et couverture. Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques des bandes utilisées.

Sentinel-2 Bands	Central Wavelength (µm)	Resolution (m)
Band 4 – Red	0.665	10
Band 8 – NIR	0.842	10

Figure 3 - tableau des caractéristiques des bandes utilisées

Le seuil de couverture nuageuse a été fixé à 20% afin que le calcul de l'indice NDVI puisse être effectué, réduisant à 44 le nombre d'images disponibles pour la tuile retenue incluant le canton de Genève. Il convient de rappeler que l'été de cette même année a été particulièrement couvert avec un taux de précipitation exceptionnelle. Si la grande majorité de ces 44 images est de qualité, cela n'a toutefois pas empêché certaines images d'être dégagées à l'exception du périmètre d'intérêt, à savoir le canton de Genève et le pays de Gex, comme le témoigne la figure 4 ci-contre. Cela se traduira comme une nuisance et impliquera une légère incidence sur les résultats, bien qu'elles puissent être corrigées.

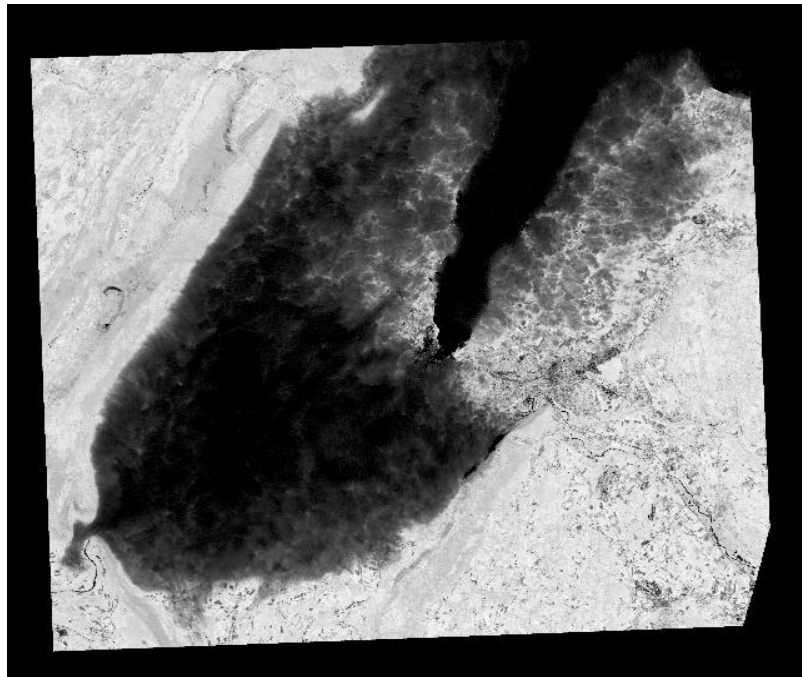


Figure 4 – Photo satellite du 29.10. Exemple d'image où la couverture nuageuse de la tuile est <20% mais concentrée sur le périmètre d'intérêt, à savoir le canton de Genève et le Pays de Gex.

b) Préparation des données

Les tuiles sélectionnées ont dans un premier temps été traitées sur ArcGIS afin de réduire le périmètre du raster sur le canton de Genève et le Pays de Gex. Cette étape est indispensable car elle permet de réduire considérablement le volume des données et facilitera ainsi chacune des prochaines étapes du processus. Un *modelbuilder* a donc été réalisé sur ArcGIS afin d'automatiser cette étape sur chacun des rasters.

La seconde étape a été de calculer le NDVI des rasters à l'aide de l'outil *raster calculator*. Comme mentionné dans la section correspondante, celui s'obtient avec les bandes rouges et proche infrarouge de chacun des rasters. Ici, le processus a été effectué manuellement mais il est certain qu'une automatisation peut également être programmée en cas de volume de données plus conséquent.

Une fois le NDVI de chaque raster obtenu, on peut alors exporter ces données en format .tif et en 32 bit float. Le format d'extraction est très important sans quoi l'image ne pourra pas être lue par TIMESAT. On va ensuite pouvoir utiliser le logiciel OSGeo4W Shell pour convertir ces données .tif en format

binaire. Pour se faire, il convient de naviguer jusqu'au dossier contenant les images et d'utiliser la commande suivante :

```
for %N in (*.tif) DO gdal_translate -of ENVI %N Convert\%~nN.img
```

Ensuite, il va falloir modifier le chemin d'accès pour chaque image pour que TIMESAT ait correctement accès aux données. En cas de volume données important, il est judicieux d'utiliser la fonction rechercher et remplacer d'un logiciel comme Microsoft Excel pour automatiser la manipulation. Les chemins d'accès pour chaque image peuvent alors être répliqués dans un document .txt avec pour en-tête le nombre d'images total. TIMESAT ne peut lire les données d'une seule année car généralement le début et la fin de saison de la série temporelle sont fractionnés comme le démontre la figure 5 ci-dessous.

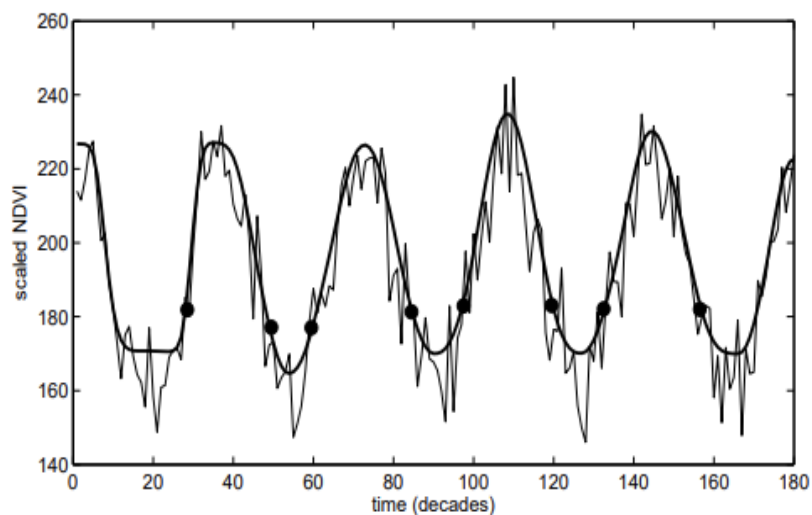


Figure 5 – série temporelle de 5 ans. Pour seulement 4 des 5 années, des paramètres saisonniers représentés par des points ont pu être produits, la cinquième étant fractionnée d'une part et d'autre.

Le logiciel nécessite par conséquent une série temporelle de trois ans au minimum pour produire les paramètres d'analyse saisonniers (Eklundh & Jönsson, 2017). Pour ce cas d'étude qui comporte des données uniquement relatives à l'année 2021, il a donc fallu tripler les chemins d'accès pour laisser supposer qu'il s'agit d'une série temporelle de trois ans et que le logiciel puisse traiter convenablement une année complète.

c) Réglages dans TIMESAT

Une fois les données préparées, nous pouvons alors les ouvrir avec le programme TIMESAT pour obtenir les paramètres saisonniers et les courbes annuelles qui sont de précieux indicateurs pour l'analyse phénologique. Dans cette section, nous allons aborder étape par étape les différents éléments de

configuration nécessaires pour obtenir ces informations sur la base des données présentées plus haut puis nous verrons dans le prochain chapitre les résultats de cette marche à suivre.

TSM_GUI

Nous allons dans un premier temps procéder avec l'outil TIMESAT Graphical User Interface (TSM_GUI). Ce programme permet de visualiser les données sous forme de série temporelle, de générer un modèle de lissage des données et d'interagir avec différents réglages afin produire des paramètres saisonniers le plus fidèle possible par rapport aux données. Le succès de cette étape dépend en grande partie des données et de la nature des nuisances dans celles-ci (Eklundh & Jönsson, 2017), ce qui ne repose pas entre les mains du chercheur. Aussi, il convient de souligner encore une fois les propos de Eklundh et Jönsson, deux des développeurs du logiciel : « This manual work is more of an art than a science » (ibid, 2017). Cela signifie d'une part que chaque analyse doit être réalisée au cas par cas et qu'on ne peut élaborer une recette magique (science) pour traiter correctement les données et d'autre part qu'on ne peut pas automatiser cette démarche car c'est à l'utilisateur de trouver la bonne combinaison (manual work).

Ceci étant dit, les données peuvent être chargées avec Ctrl + L. Voici comment remplir la fenêtre qui s'ouvre :

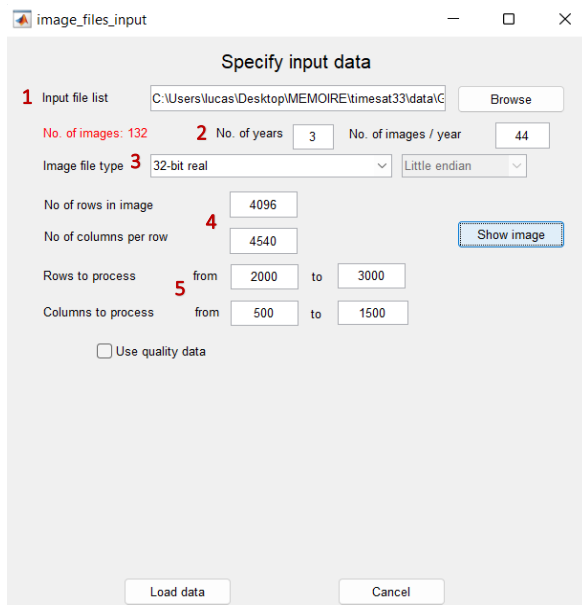


Figure 6 – fenêtre TSM_GUI pour charger les données.

1. Connecter le fichier .txt créé précédemment contenant le chemin d'accès pour chaque image.
2. Indiquer le nombre d'année, le nombre d'image par an est alors automatiquement rempli.
3. Spécifier le format de l'image.
4. Renseigner les dimensions de l'image – le fichier HDR généré lors de la transformation en format binaire contient cette information.
5. Choisir un périmètre sur la base des pixels de l'image.

Pour la réalisation de cette étude, un périmètre de 1'000 par 1'000 pixels de 10m a été défini, ce qui correspond à une surface de 10'000m². Rappelons que cette résolution spatiale de 10m est très élevée, ce qui permettra une représentation fine et détaillée des différents milieux écologiques. En revanche,

10'000m² est le maximum de la couverture spatiale qui a pu être obtenu lors des différentes manipulations dans cette étude. Nous reviendrons sur ce point plus en détail dans le chapitre Discussion.

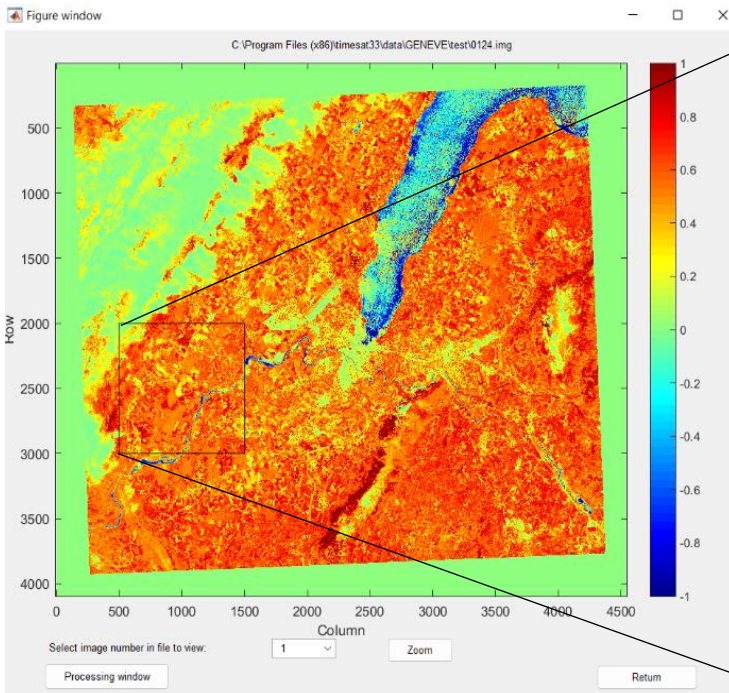


Figure 8 – Image NDVI avec le périmètre d'étude dans TSM_GUI



Figure 7 – Localisation du périmètre d'étude

L'image satellite affichée sur la figure 7 est la première de la série temporelle, elle date du 24 janvier 2021. Les couleurs sont définies selon l'indice NDVI ce qui témoigne d'une couverture du sol globalement végétale avec une teinte orange dominante. Réagissant différemment aux bandes sélectionnées, l'agglomération urbaine ainsi que les nuages au nord-ouest figurent en vert et l'eau, qui absorbe fortement les rayons de lumière rouge, en bleu. Enfin, les axes X et Y indiquent les pixels de l'image. Le carré représente la délimitation du périmètre définitif de ce travail.

Situé entre la France et la Suisse, ce périmètre se compose de grands espaces boisés de faible altitude (1) – environ 500 mètres –, de nombreuses exploitations agricoles de différentes cultures (2) ainsi que des forêts de moyenne altitude (3) – environ 1'100 mètres – notamment celles du Jura (voir figure 6). La diversité de ces milieux écologiques devrait se manifester par des variations dans leur phénologie et feront l'objet d'une discussion approfondie dans la section des résultats afin de rendre compte la précision du modèle. Il convient de souligner que ce choix du périmètre d'étude est subjectif, car il est le fruit d'une décision personnelle et qu'il a été orienté par des considérations spécifiques à la recherche. Cette étude aurait pu être menée sur d'autres espaces et les résultats obtenus auraient été différents en raison de la spécificité du terrain d'étude choisi. Néanmoins, ce qui nous intéresse ici est davantage le processus pour parvenir à générer les paramètres saisonniers que l'interprétation et la

justesse de ces-derniers. La démarche décrite dans ce rapport se veut répliquable sur n'importe quel autre terrain.

Une fois que le cadrage est réalisé, on peut alors importer les données et commencer à effectuer les manipulations pour lisser les données. Voici à quoi ressemblent les données NDVI brutes une fois chargées :

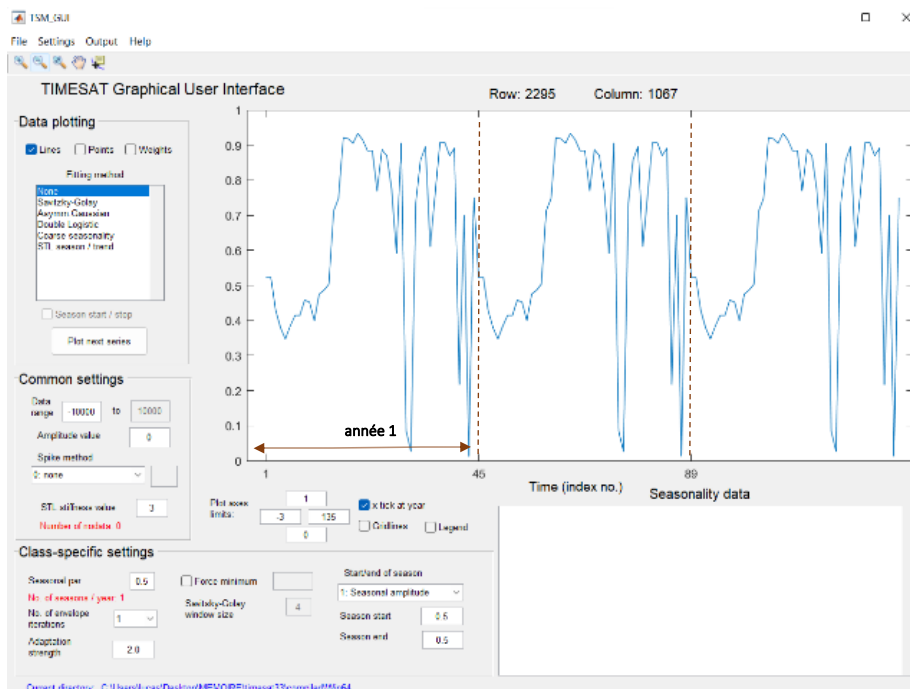


Figure 9 - données NDVI brutes importées dans TSM_GUI

Ces données représentent l'évolution du NDVI pour un pixel choisi - celui de la ligne 2295 et colonne 1067 - dans un intervalle de temps déterminé – ici l'année 2021 dupliquée trois fois. L'étendue des données de ce pixel est de zéro à un, ce qui est inclut dans la plage d'étendue de l'indice NDVI. Sans surprise, on observe de nombreuses nuisances dans les données, ceci étant dû aux observations contenant la présence de nuage. On remarque tout de même une fonction gaussienne qui représente l'évolution attendue du NDVI sur une année, à savoir la phase de floraison qui correspond à l'augmentation du NDVI, un plateau qui représente la période estivale où l'activité chlorophyllienne est maximale et enfin le jaunissement des feuilles symbolisé par le déclin de la courbe. On remarque également que l'année au centre semble la plus fiable et la plus linéaire. En effet, elle n'est pas scindée au début comme c'est le cas pour la première année ou à la fin comme on observe pour la troisième année.

A présent, la figure 10 ci-dessous présente les modifications et réglages apportés afin d'obtenir un lissage et une interprétation des données, ainsi que les paramètres saisonniers. Nous allons donc passer

en revue les différentes étapes du processus ainsi que les choix qui ont été pris pour obtenir ces informations phénologiques.

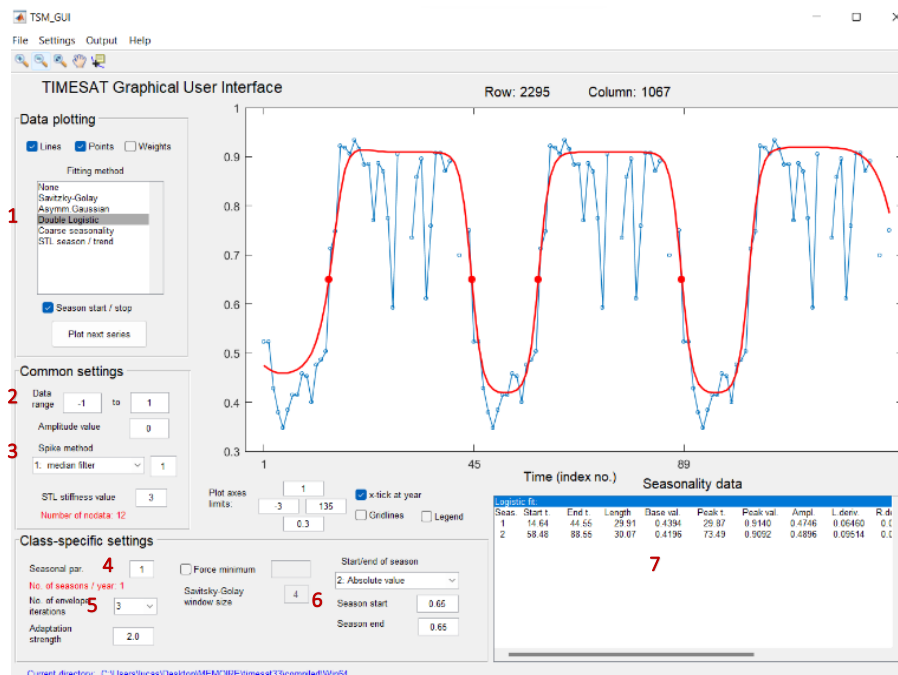


Figure 10 – données NDVI traitées dans TSM_GUI

1. Choix de la méthode de lissage. Comme nous l'avons dans l'approche de la phénologie de la surface terrestre, l'analyse de séries temporelles sur la base d'images satellites implique inéluctablement du bruit dans les données. Les nuages, les aérosols, la poussière et autres conditions atmosphériques figurent parmi les causes, ce phénomène s'observe sur la figure 9. Il existe une multitude de méthodes de traitement pour tenter de réduire au maximum la nuisance du bruit des données et le biais associé sans pour autant modifier l'essence du phénomène mesuré. Ainsi, le traitement implique une suppression de la variation à courte fréquence à l'aide de moyennes, de médianes ou de lisseurs (Eklundh & Jönsson, 2002).

Une étude comparative et détaillée de six différentes méthodes a été réalisée par McDermid et Hird, où l'on retrouve notamment les méthodes *Asymmetric Gaussian* (Jönsson and Eklundh, 2002), *Double Logistic* (Beck et al. 2006) et *Savitzky-Golay* (Chen et al. 2004) qui comptent parmi les plus efficaces et les plus accessibles, les trois sont disponibles sur TIMESAT. Selon les mots des auteurs, les deux premières sont des *function-fitting algorithms* et la troisième une *filtering technique for evaluation* (Hird & McDermid, 2009). Nous n'allons ici pas rentrer dans des détails de calcul technique pour chacune de ces méthodes, néanmoins ceux-ci peuvent être consultés dans les annexes.

Dans leur recherche, Hird et McDermid concluent que les meilleures performances sont obtenues avec les *function-fitting algorithms*. En effet, autant la méthode *Assymetric Gaussian* que *Double Logistic* semblent tenir le mieux compte des variations saisonnières, limiter l'impact du bruit dans les données et fixer des seuils hivernaux minimaux cohérents. Il est à noter que ces deux méthodes sont très similaires dans leur formule. Enfin, la méthode *Savitzky-Golay* s'est révélée quelque peu problématique dans le traitement de données avec du bruit, bien qu'elle présente l'avantage de tenir compte des changements saisonniers rapides (Hird & McDermid, 2009).

Bien que les résultats étaient pratiquement identiques pour les deux *function-fitting algorithms*, j'ai retenu la méthode *Double Logistic* qui semblaient tenir légèrement mieux compte de l'enveloppe supérieur de la courbe NDVI.

2. Etendue des valeurs. Cette option est fixée de -1 à 1 afin de tenir compte de l'ensemble des valeurs NDVI.

3. Choix de la méthode spike. Ce paramètre permet de supprimer les valeurs aberrantes sur la base d'un filtre médian (l'autre méthode proposée n'ayant aucun effet sur les données). La valeur spike consiste ensuite à appliquer ce filtre de manière plus ou moins stricte par rapport aux écarts à la médiane. Ici, ce sont douze données qui ont été supprimées – soit quatre sur une année – et qui étaient certainement biaisées par la présence de nuage ou encore les conditions atmosphériques.

4. Paramètre de saisonnalité. Une valeur proche de un impliquera de considérer une saison par an, comme c'est le cas pour le climat continental en Suisse. Une valeur proche de zéro permettra prendre en compte deux saisons par année, ce qui coïncide aux climats tropicaux.

5. No. of envelope iterations and force adaptation. En spécifiant un pour le nombre d'ajustements de l'enveloppe, il n'y a qu'un seul ajustement aux données et aucune adaptation à l'enveloppe. En spécifiant deux ou trois, il y a, respectivement, un et deux ajustements supplémentaires, forçant la fonction ajustée vers l'enveloppe supérieure, c'est-à-dire le plateau estival. En réalité ces réglages n'ont pas grande incidence sur les résultats.

6. Choix de la définition début et fin de la saison. Ce paramètre permet de choisir une manière de déterminer les seuils des indices de début et fin de la saison. Pour cette recherche, deux méthodes ont été retenues, basées soit sur une perception absolue ou relative de la phénologie. Dans le premier cas, nous pouvons décider des valeurs NDVI qui, une fois franchies, signifient que la saison débute. Dans le deuxième, il s'agit de fixer ce seuil en fonction de l'amplitude de la courbe. Etant donné que ce modèle se veut comparable sur plusieurs années, il est plus judicieux de fixer les seuils de façon absolue. En

effet, pour comparer le début de la saison de l'année 1975 à l'année 2020, il faut que l'on sache à quel moment de l'année le seuil NDVI a été franchi. Si l'on se base sur un seuil relatif à l'amplitude, cette comparaison n'a plus lieu d'être. Ici, le seuil a été défini arbitrairement à 0,65 impliquant que la saison débute lorsque l'indice NDVI se situe au-dessus de cette valeur, puis se termine lorsqu'il se situe en dessous.

7. Résultats. Fruits du traitement de données, cette fenêtre dévoile les résultats également appelés paramètres saisonniers ou encore indicateurs phénologiques. Toutefois, ces résultats nécessitent d'être encore traités par un certain nombre d'outils afin d'en dégager une analyse spatiale et temporelle. Ces derniers sont illustrés sur la figure 11 ci-dessous. On retrouve ainsi :

a : début de la saison

b : fin de la saison

c : durée de la saison

d : valeur de base

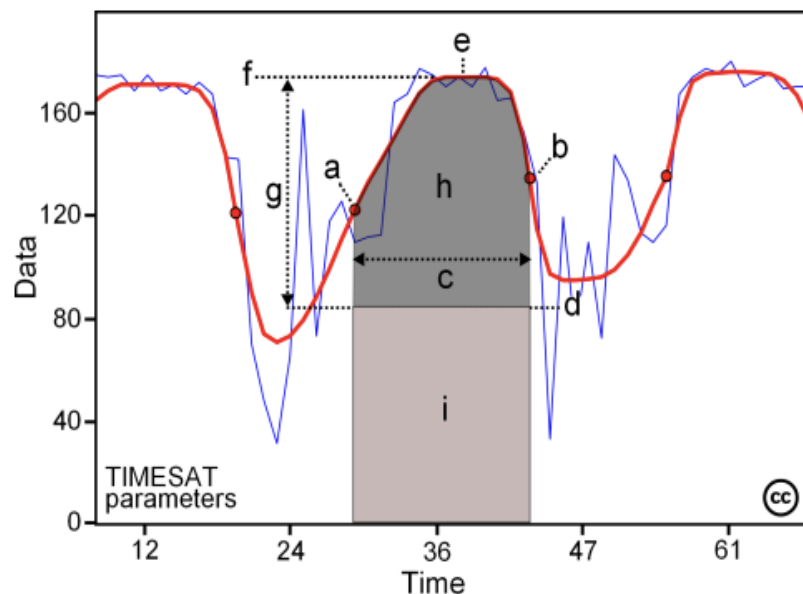
e : milieu de la saison

f : valeur maximale

g : amplitude

h : petite valeur intégrée

i : grande valeur intégrée



Parmi cette liste, certains paramètres ont une plus grande importance que d'autres, notamment le début de la saison, la fin de la saison et la durée de la saison, qui sont les indicateurs principaux faisant l'objet de discussion dans la littérature scientifique. En effet, on y trouve souvent des productions cartographiques et analyses sur la base de ces critères.

TSM_settings

Lorsque les résultats obtenus semblent satisfaisants et correspondre au jeu de données initial, on peut alors les exporter dans TSM_settings. TSM_settings est un outil permettant de créer et de gérer les fichiers de configuration de TIMESAT. Les fichiers en sortie possèdent l'extension .set et sont utilisés pour stocker les paramètres qui affecteront la façon dont TSM_process traite les données en saisonnalité ou en données lissées. Les données sont alors automatiquement chargées selon les

préférences choisies dans TSM_GUI, il est cependant important de veiller à ce que les données en sortie contiennent la saisonnalité, les données lissées et les valeurs originales.

TSM_process

Les fichiers avec l'extension .set créés précédemment peuvent à présent être lus par TSM_process. TSM_process est le module central de TIMESAT, il est utilisé pour traiter des images complètes ou des collections de séries temporelles ASCII, pour générer des fichiers de saisonnalité et/ou des données lissées. La durée du traitement varie en fonction de l'étendue spatiale sélectionnée dans les étapes antérieures. Les fichiers de sortie porteront soit l'extension .tpa ; ces fichiers binaires contiennent les paramètres TIMESAT, soit l'extension .tts ; ces fichiers contiennent la valeur ajustée des données. Ces fichiers permettront dans la prochaine étape la production de documents comme des cartes ou des tableaux.

TSM_printseason

TSM_printseason est un outil qui permet de visualiser sous forme de tableau les indicateurs phénologiques contenues dans le fichier .tpa pour chaque pixel. En réalité, l'information est la même que celle produite par TSM_GUI dans la fenêtre des résultats, la différence réside dans le fait que dans TSM_printseason, les indicateurs sont affichés pour l'ensemble des pixels et pas seulement pour un pixel comme c'est le cas dans l'étape précédente.

TSF_seas2img

L'utilisation de cet outil permet de produire une cartographie des différents paramètres saisonniers comme le début, la fin ou la durée de la saison. Pour se faire, il suffit de remplir les champs qui s'affichent successivement ; indiquer d'abord le paramètre saisonnier que l'on souhaite traiter, ensuite les bornes de la série temporelle – dans notre cas une année est composée de quarante-quatre observations, nous allons sélectionner la deuxième année (car considérée comme plus fiable) avec les observations qui s'étendent de 45 à 88, et enfin le format d'image en sortie – ici 32bit.

IV. Résultats

Dans cette section, nous allons aborder les résultats dans un premier temps dans une approche globale, puis nous nous attarderons sur le cas de 3 milieux spécifiques - à savoir une forêt de moyenne altitude, un bois de basse altitude et une exploitation agricole. Nous allons pouvoir comparer différents cycles et ainsi tester le degré de précision de la phénologie de la surface terrestre avec une résolution spatiale de 10m.

La réalisation des étapes discutées dans la section précédente nous a donc permis d'obtenir les indicateurs phénologiques du périmètre d'étude. Avec TSM_printseason, on les visualise sous la forme d'un tableau comme suit :

Row	Col.	Seas.	Beg. t.	End t.	Length	Baseval.	Max t.	Max val.	Ampl.	L-der.	R-der.	L-integ.	S-integ.	Start val.	End val.
2001	500	1	17.05	42.39	25.33	0.2097	29.94	0.6868	0.4771	0.05832	0.09269	17.27	11.60	0.4474	0.4491
2001	500	2	61.38	86.39	25.01	0.2113	73.88	0.6864	0.4751	0.09192	0.09275	17.25	11.54	0.4489	0.4488
2001	501	1	17.72	42.11	24.39	0.3325	29.93	0.6912	0.3587	0.06425	0.06991	17.53	8.549	0.5146	0.5091
2001	501	2	61.66	86.11	24.45	0.3270	73.91	0.6912	0.3642	0.06893	0.06991	17.52	8.687	0.5091	0.5091
2001	502	1	17.10	42.26	25.17	0.2591	29.91	0.7135	0.4544	0.05463	0.08744	17.99	11.00	0.4858	0.4869
2001	502	2	61.49	86.27	24.77	0.2601	73.86	0.7131	0.4530	0.08951	0.08749	17.95	10.93	0.4866	0.4866
2001	503	1	17.35	42.29	24.94	0.2098	29.84	0.7203	0.5105	0.07229	0.09469	17.95	12.29	0.4676	0.4625
2001	503	2	61.33	86.29	24.96	0.2047	73.75	0.7198	0.5151	0.09732	0.09475	17.96	12.44	0.4622	0.4623
2001	504	1	17.34	42.24	24.90	0.2132	29.81	0.7191	0.5059	0.07115	0.09328	17.91	12.16	0.4688	0.4635
2001	504	2	61.33	86.24	24.91	0.2078	73.73	0.7184	0.5106	0.09632	0.09336	17.92	12.31	0.4631	0.4631
2001	505	1	17.40	42.14	24.74	0.2372	29.76	0.7129	0.4758	0.08156	0.09216	17.87	11.46	0.4770	0.4731
2001	505	2	61.38	86.14	24.76	0.2333	73.75	0.7129	0.4796	0.09273	0.09216	17.85	11.55	0.4731	0.4731
2001	506	1	17.48	42.14	24.66	0.2557	29.80	0.7166	0.4609	0.07888	0.08911	17.98	11.07	0.4878	0.4845
2001	506	2	61.48	86.14	24.66	0.2523	73.80	0.7166	0.4642	0.09067	0.08911	17.96	11.15	0.4845	0.4845
2001	507	1	17.60	42.07	24.46	0.2664	29.82	0.7263	0.4599	0.07874	0.08924	18.19	10.99	0.5004	0.4923
2001	507	2	61.53	86.07	24.53	0.2583	73.78	0.7263	0.4680	0.09181	0.08924	18.17	11.20	0.4923	0.4923
2001	508	1	17.61	42.04	24.43	0.2715	29.82	0.7294	0.4579	0.07786	0.08872	18.26	10.93	0.5047	0.4963
2001	508	2	61.54	86.04	24.50	0.2632	73.78	0.7294	0.4663	0.09084	0.08872	18.25	11.15	0.4963	0.4963
2001	509	1	17.52	42.27	24.75	0.2663	29.89	0.7299	0.4636	0.08039	0.09045	18.37	11.18	0.5001	0.4961
2001	509	2	61.51	86.27	24.77	0.2623	73.88	0.7299	0.4677	0.09177	0.09045	18.35	11.27	0.4961	0.4961
2001	510	1	17.54	42.11	24.57	0.2696	29.81	0.7219	0.4523	0.07825	0.08745	18.12	10.84	0.4982	0.4933
2001	510	2	61.52	86.11	24.59	0.2646	73.80	0.7219	0.4573	0.08952	0.08745	18.10	10.96	0.4933	0.4933
2001	511	1	17.50	42.01	24.51	0.2716	29.75	0.7141	0.4425	0.07599	0.08555	17.92	10.59	0.4950	0.4907

Figure 12 – tableau de données produit dans TSM_printseason

Pour chaque pixel, correspondant à un milieu écologique spécifique, voici l'ensemble des paramètres saisonniers calculés par TIMESAT. Pour rappel, le seuil de début et fin de saison a été délimité à un NDVI de 0.65. Prenons la 1^{ère} ligne du tableau, le pixel de la ligne 2001 et de la colonne 500 qui correspond à la forêt du Jura. Le début de saison (Beg. t.) est indiqué par la valeur 17.05, cela signifie que l'indice NDVI de ce pixel dépasse le seuil de 0.65 juste après la 17^{ème} observation, ce qui équivaut au 29 mai. Le NDVI de ce pixel va ensuite rester au-dessus du seuil jusqu'à l'observation 42, qui représente le 24 octobre, marquant ainsi la fin de la saison (End t.). La durée de la saison aura donc duré 25 observations... mais comment interpréter cette information ? Si chaque observation équivaut à un intervalle de temps régulier - par exemple 4 jours – on conviendra aisément que la durée de la saison correspond à 100 jours. Pour autant, lors du téléchargement des données, les images avec une faible couverture nuageuse ont été priorisées afin de réduire le bruit des données mais entraînant par conséquent des écarts de temps irréguliers. De ce fait, il ne sera pas possible d'interpréter convenablement cet indicateur phénologique sans se référer aux images satellites initiales.

Le présent tableau expose les résultats obtenus sous forme numérique, permettant ainsi d'obtenir une information précise relative aux paramètres saisonniers pour la zone d'étude. Cependant, il convient de noter que l'interprétation de ces données peut s'avérer complexe et ne donne pas une vision globale du phénomène étudié. En d'autres termes, cette méthode de visualisation offre l'avantage d'une précision élevée tant en ce qui concerne la valeur des résultats obtenus qu'au niveau de l'espace étudié, mais il peut être difficile d'en tirer des conclusions pertinentes. Il est donc important de considérer que ces données sont particulièrement utiles pour la communauté scientifique qui cherche à mesurer un

phénomène spécifique et à obtenir des données précises, mais elles ne sont pas destinées à un public large. C'est précisément l'opposé du résultat que l'on obtient avec TSM_seas2img, ce que nous allons à présent constater.

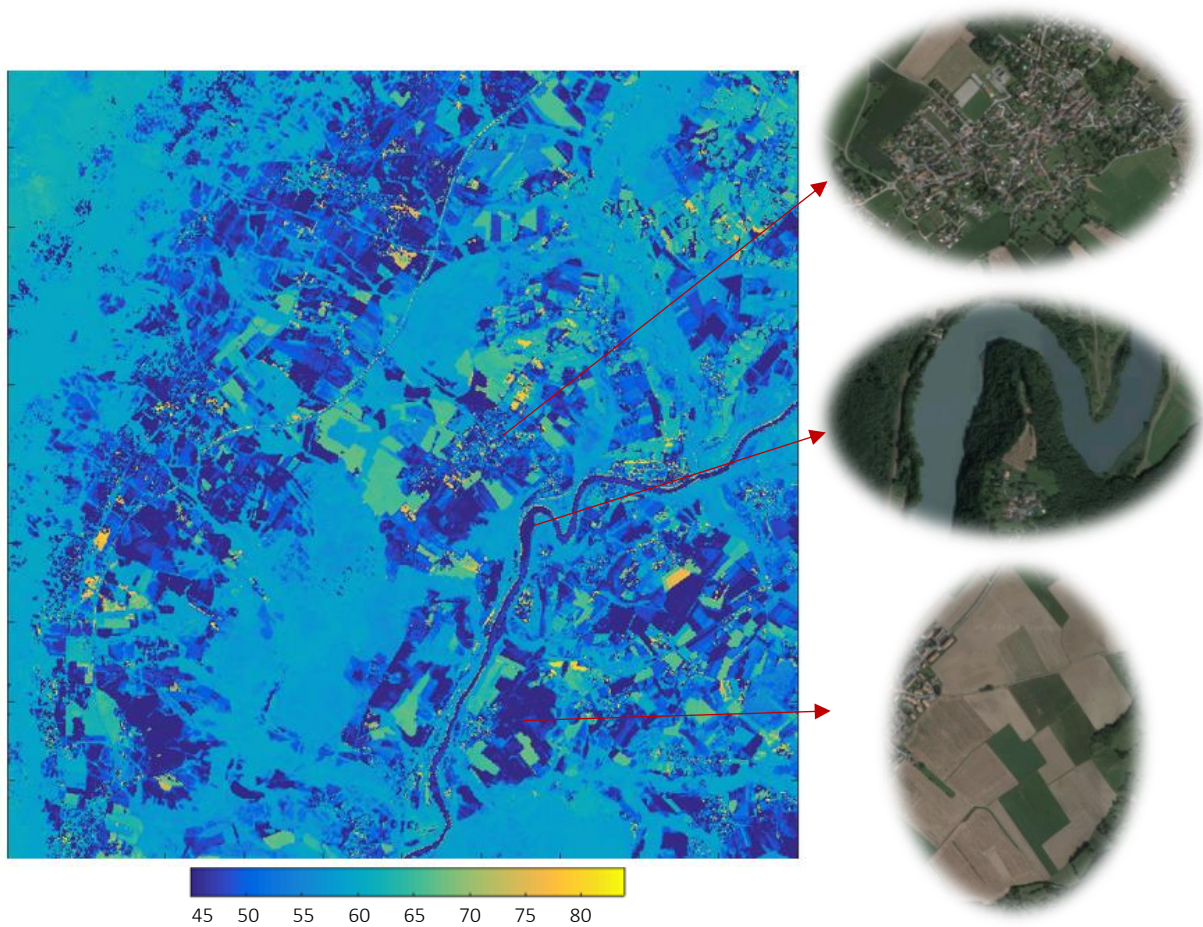


Figure 13 - représentation du début de la saison avec TSM_seas2img avec illustration des 'nodata'

Ici, nous avons donc l'entièreté du périmètre affiché selon la valeur du début de la saison. Comme nous travaillons avec les données de la 2^{ème} année, les valeurs s'étendent par conséquent de 45 (correspondant à la 1^{ère} image de la série temporelle, le 24 janvier) à 88 (dernière image, le 5 novembre). Les zones qui n'atteignent jamais le NDVI apparaissent en bleu foncé, cela correspond aux surfaces non végétalisées comme le Rhône, certaines cultures où le sol est laissé à nu ou encore les surfaces bâties comme illustré sur la figure 13. Cette visualisation offre une vue d'ensemble des différents indicateurs phénologiques et nous permet de relever les différences selon la couverture du sol. Comme nous l'avons relevé précédemment, ce document est un bon moyen de communiquer les tendances de la végétation selon le milieu et illustrer ses propos, cependant il ne permet pas de mesurer avec précision le phénomène. Il est important de souligner que les fonctions TSM_printseason et TSM_seas2img sont totalement complémentaires et toutes deux nécessaire pour obtenir une compréhension globale du sujet.

A présent, nous allons nous pencher sur 3 milieux écologiques différents et comparer les indicateurs phénologiques afin de vérifier la précision des résultats. Pour ce faire, nous avons sélectionné trois sites distincts : un espace forestier à feuilles caduques situé à une altitude de 500m dans la commune de Péron en France, un champ agricole adjacent, et une forêt à feuilles caduques située dans les montagnes du Jura à une altitude de 1'100m. Les résultats obtenus seront utilisés pour évaluer la précision des méthodes utilisées dans l'étude de la phénologie. Les forêts à feuilles caduques, également connues sous le nom de forêts caducifoliées sont très communes dans les régions du monde soumises à de grandes variations climatique au cours de l'année comme en Europe de l'Ouest. Ces forêts se caractérisent par le fait que les arbres perdent leurs feuilles à chaque automne, avant de les renouveler au printemps suivant. Les forêts caducifoliées sont dominées par des espèces d'arbres tels que le chêne, le hêtre, l'érable et le frêne, qui sont communs dans les régions tempérées de l'hémisphère Nord.

	Début de la saison	Fin de la saison	Durée de la saison
Forêt basse altitude			
Row 2570	58.46	82.21	23.75
Column 920	≈ 17 avril	≈ 1 octobre	≈ 167 jours
Champ agricole			
Row 2300	61.11	69.88	8.776
Column 1145	≈ 29 mai	≈ 11 août	≈ 74 jours
Forêt moyenne altitude			
Row 2200	60.29	71	10.72
Column 615	≈ 24 avril	≈ 15 août	≈ 113 jours

Figure 14 – tableau de comparaison des paramètres de saisonnalité de 3 milieux écologiques distincts

Pour rappel, les données utilisées pour produire ces résultats proviennent de la 2^{ème} année car elles sont considérées comme plus intègres. Il convient donc de soustraire de 44 les valeurs du tableau pour retrouver l'image satellite initiale et ainsi identifier la date indiquée.

Ces résultats semblent à première abord convaincants car ils correspondent à ce que l'on peut s'imaginer de la phénologie de ces différents milieux. L'espace boisé de basse altitude débute la saison aux alentours du 17 avril, celui de moyenne altitude autour du 24 avril et la surface agricole autour du 29 mai. Il peut paraître surprenant qu'il se passe plus d'un mois de différence entre l'observation 60 et 61, ceci est dû à la présence de nuage sur chaque image satellite dans cet intervalle. On observe une saison passablement plus longue en basse altitude qu'en moyenne altitude, ceci s'explique par la

pression atmosphérique : en basse altitude, la pression est plus élevée et donc par conséquent la température l'est aussi, favorisant le développement des arbres. Concernant la phénologie des surfaces agricoles, la plupart des indicateurs affichaient des données aberrantes avec de très faible variation du NDVI dans les courbes phénologique. Cela dépend en grande partie de la culture en question et de la manière d'entretenir la surface comme on a pu le constater sur la figure 12 où les différentes cultures réagissent très différent au NDVI. Néanmoins, le programme TIMESAT a déjà fait ses preuves dans des études de la phénologie des cultures agricoles (voir Jayawardhana & Chathurange, 2016; Zhang et al., 2019)

Pour conclure, les données Sentinel-2 utilisées dans cette étude permettent d'atteindre des niveaux de précision tout à fait satisfaisants, offrant la possibilité de distinguer différentes parcelles et proposer des analyses de terrain ciblées comme nous l'avons vu plus haut. Néanmoins, il reste nécessaire de comparer ces données avec des spécialistes du domaine afin de vérifier leur justesse.

V. Discussion

a) Perspectives

Cette étude est une recherche exploratoire afin de tester la faisabilité et la pertinence de mettre en place un système d'observation des changements phénologiques à l'échelle nationale depuis le début de la télédétection par imagerie satellite dans les années 1970. La phénologie de la surface terrestre est un excellent outil qui offre des possibilités d'observation de la végétation à des échelles spatiales jusqu'alors inimaginable. Combiné avec des bases de données satellitaires toujours plus performantes, une accessibilité accrue à ces dernières et des méthodes de calcul en constante amélioration, le potentiel de la discipline est énorme, bien que peu exploité en l'état.

Un modèle de suivi des indicateurs phénologiques à travers le temps permettrait de mesurer concrètement les conséquences à long terme du changement climatique sur la végétation et servirait de support pour des études écologiques dans différents domaines. Comme nous l'avons vu dans les résultats, le niveau de précision est suffisant pour proposer des analyses ciblées en fonction des caractéristiques du terrain d'étude, élargissant alors l'interprétation des réactions végétales selon le milieu ; surveillance des tendances phénologiques entre la plaine et les régions de montagne, augmentation de l'altitude maximale où poussent les arbres, gestion des cultures, etc.

Toutefois, l'intention de mettre en place un pareil modèle nécessite le croisement des connaissances et la géomatique doit nécessairement aller de pair avec les champs disciplinaires qui s'intéressent à ces phénomènes afin établir une méthodologie appropriée et des résultats fiables. C'est un point qui

manque dans la littérature actuelle selon moi, les études en phénologie de la surface terrestre gagneraient à être croisée par différentes disciplines et revues par des experts en écologie afin d'évaluer la précision.

b) Limites

Bien que les résultats présentés ci-dessus semblent globalement satisfaisant, ils ont en réalité une très faible significativité. D'une part car l'un des indicateurs principaux – la durée de la saison – ne peut être interprété convenablement à cause de la fréquence irrégulière des images. En effet, lors du téléchargement des données, l'emphasis a été mise sur des images sans couverture nuageuse. La couverture nuageuse implique certes des nuisances et par conséquent un biais dans les analyses mais celles-ci peuvent être compensées par les méthodes de lissage présentées et ne représentent finalement pas un véritable problème. Il est donc plus important de prioriser un intervalle de temps régulier plutôt que la présence ou non de nuages afin d'avoir une meilleure compréhension des résultats par la suite. Soulignons à nouveau que la qualité des données à disposition ne dépend pas du chercheur et qu'elles jouent un rôle fondamental pour son étude. Ici, elles sont de bonne qualité n'étant pas affectées par les aérosols, la poussière et autres conditions atmosphériques. Des données de mauvaise qualité traitées à la perfection ne fourniront jamais un résultat satisfaisant.

D'autre part, lors du traitement des données, des choix parfois très subjectifs s'imposent au chercheur, comme le devoir de fixer le seuil qui marquera le début et la fin de la saison. Il n'existe pas de consensus sur le calcul de ces variables en télédétection ce qui peut engendrer des résultats aléatoires et défailants. Il est donc recommandé d'avoir une certaine connaissance de l'objet d'étude et du terrain afin de pouvoir exploiter cet outil à sa juste valeur sans quoi, le suivi des paramètres saisonniers par la télédétection peut également mener à de fausses interprétations de la réalité. Par exemple l'expansion d'une espèce végétale ou l'introduction d'une nouvelle espèce au détriment des espèces végétales indigènes présentes dans un périmètre donné se mesurerait par un changement de phénologie dans le signal (comme l'avancement du début de la saison) alors qu'il indiquerait en fait un changement dans la composition des espèces végétales dans la zone observée (Helman, 2018).

Venons-en à présent aux limites par rapport à l'objet initial de ce travail, à savoir répliquer cette méthode sur des échelles spatiales et temporelles de bien plus grande envergure. Ce que relève ce rapport, c'est qu'il est difficile d'imaginer une automatisation de la démarche étant donné que les réglages dans TIMESAT doivent être réalisés consciencieusement par le chercheur selon le terrain et les données. Les différents milieux végétaux ne répondent pas de la même manière à l'indice de calcul NDVI et on ne peut, par conséquent, pas traiter les traiter pareillement. En effet, il a été démontré que le

NDVI était fortement corrélé à la verdure et à la biomasse de la végétation, cependant il réussit mal à identifier les éléments qui ne forment pas la canopée, telles que les fleurs, qui sont pour la plupart non vertes (Misra et al., 2020).

De plus, le volume des données Sentinel-2 est relativement conséquent et semble difficilement applicable à des échelles régionales ou nationales. Pour cette étude, il a fallu pas moins de 10h pour que TSF_process puisse traiter l'ensemble des données d'un périmètre de 10'000m². Probablement que des données moins lourdes et de plus grandes résolutions comme celles de Landsat représenteraient un bon compromis, toujours est-il que sa résolution temporelle de 16 jours pose d'autres limites, notamment dans le fait d'avoir un suivi représentatif des changements saisonniers. Ainsi, c'est au chercheur de fixer des priorités selon la nature de l'étude entre grande résolution spatiale, temps de revisite fréquent ou vaste couverture spatiale, l'amenant à se tourner vers une source de données ou une autre.. en espérant que dans un avenir proche des satellites en accès libre proposeront des données combinant tous ces critères à la fois.

VI. Conclusion

TIMESAT, qui est un logiciel *relativement* user friendly ainsi que la phénologie de la surface terrestre s'inscrivent tous deux dans le mouvement de l'open data. Dans le cas de l'analyse phénologique de la végétation, l'accès aux données à grande échelle permet de mieux comprendre les cycles de croissance des plantes et de mieux comprendre les impacts du changement climatique sur la biodiversité offrant de vastes perspectives d'analyses spatiales à de grandes échelles tant pour la communauté scientifique que civile.

Rappelons que l'expertise de personnes qualifiées dans ce domaine est une condition sine qua non de la production de résultats fiables. Une analyse incorrecte des données peut entraîner des conclusions erronées et des décisions inappropriées. N'ayant aucune prétention d'incarner cette forme de légitimité, l'intérêt de cette recherche n'est pas dans la pertinence des résultats mais bien dans le processus pour y arriver. La finalité de cette étude consistait à élaborer une technique pour surveiller les cycles phénologiques de la végétation et à produire des indicateurs saisonniers pour l'évaluer sur une année et une zone spécifique, et cet objectif a été accompli. Cependant, cette recherche soulève plusieurs limites pour en faire un modèle à l'échelle du pays sur les 50 dernières années, telles que la question de la résolution spatiale, le temps de traitement, le volume des bases de données ou encore l'automatisation de la démarche. Il est donc important de continuer à explorer ces limites et de développer des méthodes pour les surmonter afin de pouvoir utiliser cette technique de manière plus efficace et à une plus grande échelle.

VII. Bibliographie

- Bolton, D. K., Gray, J. M., Melaas, E. K., Moon, M., Eklundh, L., & Friedl, M. A. (2020). Continental-scale land surface phenology from harmonized Landsat 8 and Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing of Environment*, 240, 111685. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111685>
- Eklundh, L., & Jönsson, P. (2002). Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(8), 1824-1832. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.802519>
- Eklundh, L., & Jönsson, P. (2004). TIMESAT—a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers & Geosciences*, 30(8), 833-845. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.05.006>
- Eklundh, L., & Jönsson, P. (2015). TIMESAT: A Software Package for Time-Series Processing and Assessment of Vegetation Dynamics. In C. Kuenzer, S. Dech, & W. Wagner (Éds.), *Remote Sensing Time Series : Revealing Land Surface Dynamics* (p. 141-158). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-15967-6_7
- Eklundh, L., & Jönsson, P. (2017). *TIMESAT 3.3 with seasonal trend decomposition and parallel processing, Software Manual*.
- Garonna, I., de Jong, R., de Wit, A. J. W., Mùcher, C. A., Schmid, B., & Schaepman, M. E. (2014). Strong contribution of autumn phenology to changes in satellite-derived growing season length estimates across Europe (1982–2011). *Global Change Biology*, 20(11), 3457-3470. <https://doi.org/10.1111/gcb.12625>
- Garonna, I., de Jong, R., & Schaepman, M. E. (2016). Variability and evolution of global land surface phenology over the past three decades (1982–2012). *Global Change Biology*, 22(4), 1456-1468. <https://doi.org/10.1111/gcb.13168>
- Helman, D. (2018). Land surface phenology : What do we really 'see' from space? *Science of The Total Environment*, 618, 665-673. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.237>

- Hird, J. N., & McDermid, G. J. (2009). Noise reduction of NDVI time series : An empirical comparison of selected techniques. *Remote Sensing of Environment*, 113(1), 248-258.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.09.003>
- Jayawardhana, W. G. N. N., & Chathurange, V. M. I. (2016). Extraction of Agricultural Phenological Parameters of Sri Lanka Using MODIS, NDVI Time Series Data. *Procedia Food Science*, 6, 235-241. <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2016.02.027>
- Misra, G., Cawkwell, F., & Wingler, A. (2020). Status of Phenological Research Using Sentinel-2 Data : A Review. *Remote Sensing*, 12(17), Art. 17. <https://doi.org/10.3390/rs12172760>
- Rodriguez-Galiano, V. F., Dash, J., & Atkinson, P. M. (2015). Intercomparison of satellite sensor land surface phenology and ground phenology in Europe. *Geophysical Research Letters*, 42(7), 2253-2260. <https://doi.org/10.1002/2015GL063586>
- Tan, B., Morisette, J. T., Wolfe, R. E., Gao, F., Ederer, G. A., Nightingale, J., & Pedelty, J. A. (2011). An Enhanced TIMESAT Algorithm for Estimating Vegetation Phenology Metrics From MODIS Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 4(2), 361-371. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2010.2075916>
- White, M. A., Hoffman, F., Hargrove, W. W., & Nemani, R. R. (2005). A global framework for monitoring phenological responses to climate change. *Geophysical Research Letters*, 32(4).
<https://doi.org/10.1029/2004GL021961>
- Zhang, X., Liu, L., & Henebry, G. M. (2019). Impacts of land cover and land use change on long-term trend of land surface phenology : A case study in agricultural ecosystems. *Environmental Research Letters*, 14(4), 044020. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab04d2>

VIII. Annexes

Asymmetric Gaussians

In this case the basis function

$$g(t; x_1, x_2, \dots, x_5) = \begin{cases} \exp \left[- \left(\frac{t - x_1}{x_2} \right)^{x_3} \right] & \text{if } t > x_1 \\ \exp \left[- \left(\frac{x_1 - t}{x_4} \right)^{x_5} \right] & \text{if } t < x_1 \end{cases} \quad (7)$$

is a Gaussian type of function. For this function x_1 determines the position of the maximum or minimum with respect to the independent time variable t , while x_2 and x_3 determine the width and flatness (kurtosis) of the right function half. Similarly, x_4 and x_5 determine the width and flatness of the left half. The effects of varying the parameters x_2, \dots, x_5 are shown in Figure 9.

Double logistic functions

Here the basis function

$$g(t; x_1, \dots, x_4) = \frac{1}{1 + \exp \left(\frac{x_1 - t}{x_2} \right)} - \frac{1}{1 + \exp \left(\frac{x_3 - t}{x_4} \right)} \quad (8)$$

is a double logistic function. x_1 determines the position of the left inflection point while x_2 gives the rate of change. Similarly x_3 determines the position of the right inflection point while x_4 gives the rate of change at this point. Also for this function the parameters are restricted in range to ensure a smooth shape.

3.6 Adaptive Savitzky-Golay filtering

One way of smoothing data and suppressing disturbances is to use a filter, and replace each data value y_i , $i = 1, \dots, N$ by a linear combination of nearby values in a window

$$\sum_{j=-n}^n c_j y_{i+j}. \quad (5)$$

In the simplest case, referred to as a moving average, the weights are $c_j = 1/(2n + 1)$, and the data value y_i is replaced by the average of the values in the window. The moving average method preserves the area and mean position of a seasonal peak, but alters both the width and height. The latter properties can be preserved by approximating the underlying data value, not by the average in the window, but with the value obtained from a least-squares fit to a polynomial. For each data value y_i , $i = 1, 2, \dots, N$ we fit a quadratic polynomial $f(t) = c_1 + c_2 t + c_3 t^2$ to all $2n + 1$ points in the moving window and replace the value y_i with the value of the polynomial at position t_i . The procedure above is commonly referred to as a Savitzky-Golay filter (Press *et al.* 1994). To account for the negatively biased noise, the fitting is done in multiple steps as described in the previous section. The result is a smoothed curve adapted to the upper envelope of the values in the time-series.