



**MASTER 1**  
**Observation de la Terre et Géomatique**

**Travail d'Étude et de Recherche**  
**2022-2023**

**Mémoire de recherche**

**GUILLOT Romain**

---

Sujet du TER : Analyse de la phénologie des arbres urbains à partir d'images satellites à haute résolution spatiale (Sentinel-2, Planet)

Encadrante(s) : Anne PUISSANT

Clément BRESSANT

Romain WENGER

Référent : Pierre-Alexis HERRAULT

Laboratoire Image, Ville, Environnement  
UMR7362 CNRS-Unistra  
3 rue de l'Argonne F-67000 Strasbourg

## **Remerciements**

Je voudrais remercier tous les encadrants et professeurs qui ont contribué à la réalisation et l'amélioration de ce mémoire.

Un immense merci à Clément Bressant, pour son aide et le temps passé au cours des dernières semaines. Sa connaissance du sujet et ses conseils m'ont permis de m'aiguiller au sein des traitements et pistes de recherches qu'il a été possible de mener.

Enfin j'aimerais remercier chaleureusement mon entourage familiale pour la relecture et les conseils apportés à la rédaction finale de ce rendu.

## Résumé

L'étude de la phénologie des arbres urbains s'inscrit dans l'objectif de pouvoir apporter des connaissances supplémentaires sur le cycle de développement des arbres. Ces derniers sont essentiels pour l'amélioration des conditions du milieu urbain et de sa population. Cette étude s'est fondée sur l'analyse des métriques phénologiques à partir de séries d'images temporelles très hautes résolutions (Planet et Sentinel-2) à l'échelle de l'Eurométropole de Strasbourg en 2022. Leurs fortes divergences dans leurs caractéristiques spatiales ou temporelles se sont retrancrites par des comportements différents pour les métriques phénologiques étudiées.

La série temporelle Planet à 3 m de résolution a été choisie pour une analyse spécifique des 5 essences les plus représentées dans la zone étudiée. Leurs comportements saisonniers ont pu être mis en parallèle avec la forme de gestion mise en place pour ces essences. Les arbres à ports architecturés ont pu montrer quelques jours de retard face au développement des arbres non gérés. L'étude spatialisée des métriques a montré également un comportement dépendant de la distance au centre urbain étudié. L'analyse de la morphologie urbaine par LCZ n'a pas été concluante et nous ne pouvons pas associer ce facteur comme influençant la dynamique de développement des arbres strasbourgeois.

Mots-clés : Arbres urbains, Phénologie, Séries temporelles, Planet, Sentinel-2, Très haute résolution

## Abstract

The study of urban tree phenology is intended to provide additional knowledge on the development of trees cycle. These trees are essential for improving the conditions of the urban environment and its communities. This study is based on the analysis of phenological metrics from very high-resolution time series images (Planet and Sentinel-2) at the scale of the Strasbourg Urban Area in 2022. Their marked divergence in spatial and temporal characteristics has resulted in different behaviors for the phenological metrics studied.

The Planet time series at 4m resolution was chosen for a specific analysis of the 5 most represented tree species in the study area. Their seasonal behavior could be compared with the form of management implemented for these species. Trees with an architectural form of port were able to show a few days' delay compared with the development of unmanaged trees. The spatialized study of the metrics also showed a pattern depending on distance from the urban center studied. Analysis of urban morphology by LCZ was non-conclusive and we cannot associate this factor as influencing the dynamics of tree development season in Strasbourg.

Keywords: Urban trees, Phenology, Time series, Planet, Sentinel-2, Very high resolution

## Table des matières

<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>2</b>
<b>RESUME .....</b>	<b>3</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>3</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>7</b>
<b>CHAPITRE 1 : ÉTAT DE L'ART .....</b>	<b>9</b>
I- INFLUENCE DU MILIEU URBAIN SUR LA VEGETATION DANS UN CONTEXTE DE RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE .....	9
1.1 <i>Modification des conditions de l'atmosphère en ville</i> .....	9
1.2 <i>Les sources de stress des arbres au sein de la ville</i> .....	10
1.3 <i>Les services écosystémiques rendus au milieu urbain</i> .....	11
II- L'IMPACT DE LA TRES HAUTE RESOLUTION SUR L'ANALYSE PHENOLOGIQUE DE LA VEGETATION : UNE EVALUATION DE LA QUALITE DE RECONSTRUCTION .....	11
2.1 <i>La difficulté de la télédétection dans la précision des résultats en milieu urbain</i> .....	11
2.2 <i>L'utilisation de la télédétection pour la cartographie et les mesures phénologiques dans le milieu forestier</i> .....	12
2.3 <i>L'avantage de la très haute résolution pour la qualité de reconstruction d'indices spectraux</i> .....	12
III- CARACTERISATION DE LA PHENOLOGIE A TRAVERS UN SUIVI TEMPOREL DE LA VEGETATION .....	13
3.1 <i>L'usage d'indices de végétation dérivé d'images satellites pour déterminer la phénologie</i> .....	13
3.2 <i>Le suivi de la phénologie à l'échelle interannuelle</i> .....	13
3.3 <i>Un enjeu pour la gestion du patrimoine végétale</i> .....	14
<b>CHAPITRE 2 : ZONE D'ETUDE ET DONNEES UTILISEES.....</b>	<b>15</b>
I- PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE .....	15
II- PRESENTATION DES DONNEES .....	16
2.1 <i>Les données d'arbres de l'Eurométropole de Strasbourg</i> .....	16
2.2 <i>Les images issues de la mission Sentinel-2</i> .....	18
2.3 <i>Les images Planet Scope</i> .....	20
2.4 <i>Le produit Copernicus pour la phénologie et la productivité de la végétation à l'échelle annuelle</i> .....	21
2.5 <i>Local Climate Zone (LCZ) par méthode MAUCE</i> .....	22
<b>CHAPITRE 3 : METHODOLOGIE .....</b>	<b>23</b>
I- DEFINITION DES METRIQUES PHENOLOGIQUES .....	23
II- METHODOLOGIE GENERALE.....	24
2.1 <i>Préparation des données</i> .....	24
2.2 <i>Détermination des métriques phénologiques</i> .....	26
2.3 <i>Axe de recherches</i> .....	28
<b>CHAPITRE 4 : RESULTATS ET INTERPRETATION .....</b>	<b>31</b>
<b>AXE DE RECHERCHE N°1 : ANALYSE DE LA DISSIMILARITE DES METRIQUES PHENOLOGIQUES EXTRAITES PAR DIFFERENTES DONNEES SATELLITAIRES A CAPTEURS OPTIQUES .....</b>	<b>31</b>
I- COMPORTEMENT DES METRIQUES PHENOLOGIQUES ENTRE LES DEUX SERIES TEMPORELLES ET LE PRODUIT ANNUEL COPERNICUS DE PHENOLOGIE .....	31
1.1 <i>Analyse statistique pour chacune des métriques phénologiques</i> .....	31
1.2 <i>Analyse de la distribution des métriques phénologiques</i> .....	32
1.3 <i>Mise en perspective du produit Copernicus</i> .....	33
II- ANALYSE DE LA VARIATION DES METRIQUES PHENOLOGIQUES ENTRE LES SERIES TEMPORELLES SENTINEL ET PLANET .....	35
2.1 <i>Comparaison statistique pour chacune des métriques phénologiques</i> .....	35
2.2 <i>Représentation de manière spatialisé des différences phénologiques entre les deux séries temporelles</i> .....	36
2.3 <i>Exploration des relations entre les métriques des séries temporelles Sentinel et Planet</i> .....	38
<b>AXE DE RECHERCHE N°2 : ÉTUDE DES METRIQUES PHENOLOGIQUES SELON LES CARACTERISTIQUES SPECIFIQUES ET DE GESTION DES ARBRES .....</b>	<b>40</b>

I- COMPARAISON DES METRIQUES PHENOLOGIQUES ENTRE LES SERIES TEMPORELLES ASSOCIEES AUX ESSENCES MAJORITAIRES.....	40
1.1 <i>Étude des variations entre les séries Planet et Sentinel</i> .....	40
1.2 <i>Représentation de la distribution pour quelques essences</i> .....	43
II- INFLUENCE DE LA GESTION ARBOREE SUR LES METRIQUES PHENOLOGIQUES PAR L'ETUDE DU TYPE DE PORT DES ARBRES : ETUDE COMPARATIVE DE 5 ESSENCES .....	45
<b>AXE DE RECHERCHE N°3 : ÉTUDE DE LA VARIABILITE SPATIALES DES METRIQUES PHENOLOGIQUES SELON LA MORPHOLOGIE URBAINE ET DU GRADIENT URBAIN.....</b>	<b>49</b>
I- L'USAGE DES LOCAL CLIMATE ZONES (LCZ) PAR METHODE MAPUCE POUR LA CARACTERISATION DE LA MORPHOLOGIE URBAINE .....	51
1.1 <i>Distribution statistique des LCZ</i> .....	52
II- EXPLORATION DE LA DISTRIBUTION SPATIALE DES METRIQUES PAR UN GRADIENT URBAIN .....	55
2.1 <i>Analyse visuelle</i> .....	56
2.2 <i>Analyse statistique</i> .....	57
<b>DISCUSSION .....</b>	<b>60</b>
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>62</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>63</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE ET SITOGRAPHIE.....</b>	<b>68</b>

## Table des figures

FIGURE 1 : PRINCIPAUX FACTEURS DE STRESS POUR LES ARBRES URBAINS VENANT DES ACTIVITES HUMAINES. ISSU DE L'ARTICLE CZAJA, 2020.....	10
FIGURE 2 : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE A DIFFERENTES ECHELLES .....	15
FIGURE 3 : REPRESENTATION DES ARBRES CLASSES ICI PAR ESSENCES AUTOURS DE LA FACULTE DE GEOGRAPHIE - STRASBOURG .....	16
FIGURE 4 : DESCRIPTION DES DONNEES UTILISEES POUR LES DONNEES D'ARBRES DE L'EMS.....	17
FIGURE 5 : DISTRIBUTION DES PRINCIPALES ESSENCES AU SEINS DE L'EUROMETROPOLE DE STRASBOURG .....	17
FIGURE 6 : BANDES SPECTRALES CAPTURES PAR LE CAPTEUR MSI DES SATELLITES DE LA MISSION SENTINEL-2 (ISSU DE TACONET, P., 2019) .....	18
FIGURE 7 : REPRESENTATION DE LA TUILE 32 UMU CORRESPONDANT A NOTRE ZONE D'ETUDE.....	19
FIGURE 8 : DATES D'ACQUISITIONS DES IMAGES CONSTITUANTS LES SERIES TEMPORELLES.....	19
FIGURE 9 : VARIATION DES AZIMUTS ET ANGLES DE VUES DES SATELLITES DE LA CONSTELLATION PLANET POUR 2022 .....	20
FIGURE 10 : ENSEMBLE DES PRODUITS DISPONIBLES DU PRODUIT COPERNICUS. ISSU DU MANUEL UTILISATEUR, COPERNICUS LAND MONITORING SERVICE (2021) .....	21
FIGURE 11 : CLASSIFICATION DES LOCAL CLIMATES ZONES (LCZ) PAR METHODE MAPUCE APPLIQUE SUR L'EUROMETROPOLE DE STRASBOURG. ISSU DE DUPRE, L. (2022).....	22
FIGURE 12 : SCHEMA DE TRAITEMENT N°1 (PREPARATION DES DONNEES) .....	24
FIGURE 13 : SCHEMA DE TRAITEMENT N°2 (DEFINITION DES METRIQUES PHENOLOGIQUES).....	26
FIGURE 14 : FIGURES EXPLOITEES DANS LES AXES DE RECHERCHES .....	29
FIGURE 15 : COMPARAISON STATISTIQUES POUR CHACUNE DES METRIQUES ET SOURCES A NOTRE DISPOSITION.....	31
FIGURE 16 : REPRESENTATION DU NOMBRE D'ARBRES EN FONCTION DES METRIQUES PHENOLOGIQUES POUR CHAQUE SOURCE D'ACQUISITIONS .....	32
FIGURE 17 : REPRESENTATION SOUS FORME DE COURBES DE DENSITE POUR CHACUNE DES METRIQUES PHENOLOGIQUES .....	33
FIGURE 18 : VARIATION DES DATES DU DEBUT DE SAISON POUR UN ECHANTILLON DE PIXEL DANS LE CENTRE DE STRASBOURG.....	34
FIGURE 19 : STATISTIQUES POUR CHACUNE DES METRIQUES ETUDES .....	35
FIGURE 20 : CARTES MONTRANT LES DIFFERENCES DES METRIQUES PHENOLOGIQUES ENTRE PLANET ET SENTINEL.....	37
FIGURE 21 : REGRESSIONS LINEAIRES ENTRE PLANET ET SENTINEL.....	39
FIGURE 22 : VARIATIONS DES METRIQUES PHENOLOGIQUES POUR LES ESSENCES DES DEUX SERIES TEMPORELLES .....	40
FIGURE 23 : COMPARAISON STATISTIQUE POUR LES DEUX SERIES TEMPORELLES.....	41
FIGURE 24 : DISTRIBUTION DES 5 ESSENCES MAJORITAIRES POUR CHAQUE METRIQUE .....	43
FIGURE 25 : DIAGRAMME EN VIOLON DU DEBUT DE SAISON .....	46
FIGURE 26 : DIFFERENCES ENTRE LES DEUX TYPES DE PORTS POUR CHACUNE DES METRIQUES .....	46
FIGURE 27 : DIAGRAMME EN VIOLON DU PIC DE SAISON.....	47
FIGURE 28 : DIAGRAMME EN VIOLON DE LA FIN DE SAISON .....	47
FIGURE 29 : CARTE DU DEBUT DE SAISON .....	50
FIGURE 30 : DIAGRAMME EN BOITE DU DEBUT DE SAISON .....	52
FIGURE 31 : DIAGRAMME EN BOITE DU PIC DE SAISON.....	53
FIGURE 32 : DIAGRAMME EN BOITE DE LA FIN DE SAISON .....	54
FIGURE 33 : EXEMPLE DU GRADIENT URBAIN POUR L'ERABLE SYCOMORE .....	56
FIGURE 34 : COMPARAISON STATISTIQUE DES METRIQUES EN FONCTION DU GRADIENT URBAIN.....	57
FIGURE 35 : GRAPHIQUES EN LIGNE DU GRADIENT URBAIN .....	58
FIGURE 36 : ETUDE DE CAS DU GRADIENT URBAIN - LCZ .....	59
FIGURE 37 : HISTOGRAMME DE LA SERIE SENTINEL ET PLANET .....	63
FIGURE 38 : COURBE DE DENSITE DE LA SERIE SENTINEL ET PLANET .....	63
FIGURE 39 : VARIATIONS DES METRIQUES PHENOLOGIQUES POUR LES ESSENCES DES DEUX SERIES TEMPORELLES (VERSION AGRANDIE) .....	64
FIGURE 40 : CARTE DU PIC DE SAISON.....	65
FIGURE 41 : CARTE DE LA FIN DE SAISON .....	66
FIGURE 42 : GRADIENT URBAIN POUR TOUTES LES ESSENCES ET METRIQUES .....	67

## Introduction générale

Les arbres font partie du paysage commun des villes et occupent une place de choix dans les milieux urbains car ces derniers offrent une diversité d'espèces et de formes paysagères. Les arbres offrent de nombreux bénéfices pour leur environnement, définis comme des services écosystémiques (*Livesley, S.J., 2016*). Ils contribuent par exemple à la réduction de la pollution urbaine, permettent de garder des espèces animales en ville ou encore d'offrir des espaces de détentes et de loisirs aux citadins (*Czaja, M., 2020*).

Face aux conditions particulières du milieu urbain, de nombreuses contraintes affectent les arbres. Il peut s'agir de températures plus élevées, de la mauvaise qualité de l'air, de l'apport plus difficile en eau ou encore du phénomène d'îlots de chaleur urbain. Ces conditions sont d'autant plus un défi pour les espèces arborées que le changement climatique vient amplifier ces conditions existantes (*Ren, Q., 2018 ; Wohlfahrt, G., 2019*). Plus de la moitié de la population mondiale vit en ville, et cette proportion est en constante augmentation (*Dye, C., 2008*). Les arbres sont plus que jamais une ressource nécessaire pour les citoyens (parcs, lieux de promenades ou de jeux) mais également l'environnement (diminution de la température de l'air, captures de molécules polluantes ...).

La gestion et le suivi de ce patrimoine arboré s'avère nécessaire, et cela se retrançrit par des opérations régulières de taillages, de la sélection des essences à planter et d'autres opérations permettant d'atteindre les objectifs des gestionnaires en charge. Face au réchauffement climatique, ces objectifs peuvent varier entre villes, et l'augmentation de la végétation en ville est une possibilité que la ville de Strasbourg réalise avec le plan Canopée.

La végétation représente ainsi une forte préoccupation pour les services de gestions, à la fois sur le plan humain que financier. Les dépenses relatives aux espaces verts pour l'Eurométropole de Strasbourg représentent un budget alloué de 1.4 millions d'euros pour l'année 2023 (*Eurométropole de Strasbourg, 2023*).

Les villes réalisent des suivis de ce patrimoine arboré sur le terrain, par le support de bases de données, ces dernières peuvent être plus ou moins complètes. Il peut s'agir de l'essence, de la hauteur, du diamètre du tronc ou de la couronne par exemple. De nombreuses villes ont des informations de ce type à disposition pour le suivi et la gestion des arbres, tel que Strasbourg, Paris, Montréal ou Washington. La tâche peut être longue et demander beaucoup de ressources pour des grandes villes. Dans ce contexte l'utilisation d'images très hautes résolutions est une méthode de plus en plus utilisée pour obtenir des informations précises sur la végétation.

Grâce à une résolution spatiale améliorée, cette technologie permet une distinction plus fine des objets composant le milieu urbain (*Puissant, A., 2002*). En parallèle de la résolution spatiale, la résolution temporelle des images est un atout supplémentaire pour l'obtention d'images plus fréquentes (*Pu, R., 2018*). Les images satellites donnent accès à de nombreuses informations qui peuvent fournir une quantité importante de données et à des applications différentes (agriculture, hydrologie, topographie ...). La phénologie peut ainsi être reconstruite à partir de ces informations extraites par les images satellites. La phénologie correspond à « l'étude des événements biologiques cycliques », correspondant aux comportements saisonniers des êtres vivants face aux variations saisonniers de l'environnement (*Vilhar, 2013*).

Dans le cadre de notre étude, nous avons à disposition des images optiques à très hautes résolutions, provenant des satellites Sentinel-2 et Planet pour l'année 2022. Ces images à hautes résolutions spatiales et temporelles permettent l'obtention d'images à respectivement 10 m et 4m de résolution. L'acquisition peut se faire tous les 5 jours pour Sentinel-2 voir quotidiennement pour les images Planet. Face au recours à des images optiques, l'acquisition des images sera freinée par la présence des nuages au-dessus de notre d'étude, et ainsi les séries temporelles formées ne sont pas aussi fournies que l'ensemble des données qu'il est possible d'acquérir.

A travers le calcul de plusieurs métriques phénologiques, nous analyserons la phénologie des arbres sous plusieurs formes, à la fois spatialisées ou statistiques. Il sera intéressant d'étudier la dynamique annuelle des arbres en prenant appui sur l'analyse de plusieurs essences, de la morphologie urbaine par l'utilisation des Local Climate Zones (LCZ) ou encore d'un gradient urbain.

**Par l'utilisation d'images optiques très hautes résolution (THR), y a-t-il une variabilité phénologique des arbres urbains résultant de l'analyse spécifique et spatiale de métriques phénologiques ? Le cas de l'Eurométropole de Strasbourg.**

**Axe de recherches :**

- [1] Analyse de la dissimilarité des métriques phénologiques extraites par différentes données satellitaires à capteurs optiques
- [2] Étude des métriques phénologiques selon les caractéristiques spécifiques et de gestion des arbres
- [3] Étude de la variabilité spatiale des métriques phénologiques selon la morphologie urbaine et du gradient urbain

# Chapitre 1 : État de l'art

## I- Influence du milieu urbain sur la végétation dans un contexte de réchauffement climatique

Le réchauffement climatique et ses conséquences se ressentent aujourd’hui de différentes manières. Il s’agit d’un phénomène touchant la terre dans son ensemble et ces principales causes peuvent être attribuées au rejet de polluants atmosphériques notamment des gaz à effets de serre (GES) (*Kumar, 2021, IPCC, 2023*). Ces conséquences sur l’environnement sont par exemple l’augmentation du niveau de la mer, de l’érosion des zones côtières ou l’augmentation de la température moyenne.

### 1.1 Modification des conditions de l’atmosphère en ville

Le milieu urbain se différentie d’autres espaces tel que les espaces ruraux car les conditions qui s’y développent sont particulières à la ville et à ses caractéristiques (climat, nature du sol ou activités ...). Il s’agit d’un écosystème à part entière lié à l’activité de l’homme.

La ville se distingue notamment des zones rurales par des conditions climatiques modifiées : une température de l’air plus importante ou une pollution atmosphérique également plus élevée. La proportion de surfaces végétalisées dans la ville est présente dans une plus faible proportion par rapport à ces espaces « plus naturels ». Ces conditions sont affectées par de multiples effets, notamment par des surfaces fortement artificialisées (*Climatologie urbaine, P. Kastendeuch*) ou un phénomène d’urbanisation.

En effet, l’urbanisation augmente et concentre les sources d’émissions de pollution atmosphériques (*Le Mentec, S., 2022*). Les polluants tels que l’ozone ( $O_3$ ), les particules polluantes (PM) ou le dioxyde d’azote ( $NO_2$ ) sont affectés par les vagues de chaleurs (*WHO, 2010 ; Le Mentec, S., 2022*). Face à l’étude de plusieurs gradients ville/campagne, les effets d’urbanisation et de températures plus élevées ont pu être démontrés sur la végétation (*Han, G, 2013*).

Présent dans de nombreuses villes dans le monde et à des échelles variées, le phénomène d’îlot de chaleur (ICU) concerne des élévations localisées et épisodiques de températures au sein d’une agglomération. Ces élévations de température sont engendrées par la ville elle-même, et sont dues à différents phénomènes tels que la situation géographique, climatique, les saisons mais surtout les caractéristiques propres de la ville (morphologies, activités, matériaux etc..).

Le phénomène d’îlot de chaleur urbain est fortement lié au confort thermique et aujourd’hui bien étudié par son fort impact sur la qualité de vie des populations vivant en ville (*Le Mentec, S., 2022*). Cette notion peut être définie par « les conditions environnementales du milieu qui procurent une satisfaction thermique dépendant des activités des sujets et de leurs niveaux vestimentaires » (*Nikolopoulou, M.-H, 2001*).

Le rapport de *P. Kastendeuch (2020)* permet d’apprécier l’évolution de cette notion sur notre zone d’étude, Strasbourg. Les données récoltées sur la période 1990-2018 ont permis de réaliser, à moyen terme, des estimations indiquant une augmentation des chaleurs extrêmes en parallèle d’une sensation de confort thermique qui augmente (sensation plus chaude). Cette notion peut être mise en perspective avec l’augmentation générale de la température de l’air lié au réchauffement climatique.

L'augmentation de la température dans ce contexte est parfois compliquée à démontrer en fonction de la zone d'étude (Wohlfahrt, G., 2019 ; Galán Díaz, J., 2023) mais que pour certaines zones urbaines tel que Rennes, les ICU avaient un impact significatif sur la modification de la phénologie des plantes (Quénol, H., 2010).

## 1.2 Les sources de stress des arbres au sein de la ville

Les surfaces artificialisées représentent une part importante du sol urbain. En plus de l'impact sur le climat, ces surfaces ont un effet néfaste sur le cycle de l'eau. Étant imperméables, ces surfaces ne permettent pas à l'eau de s'infiltrer dans la partie inférieure du sol. L'eau de pluie va être contrainte de ruisseler vers les canalisations prévues dans l'aménagement des villes. La compaction des sols liée aux constructions et aux trafics routiers entre autres est une causalité supplémentaire de la mortalité pouvant apparaître chez les espèces arborées, liée à la difficulté de l'eau et aux racines de circuler dans le sol. (Czaja, M., 2020).

Ces surfaces imperméables (routes et parkings entre autres) ont la capacité de rétention importante de chaleur, en lien avec leur fort albédo. Cela renforce le phénomène de sécheresse au niveau du sol. Au niveau de l'air de surface, la pollution et la température relativement élevée sont deux sources supplémentaires de perturbations. Peu mise en avant, la pollution lumineuse artificielle participe à ces sources de stress (Riley, C. B., 2017).

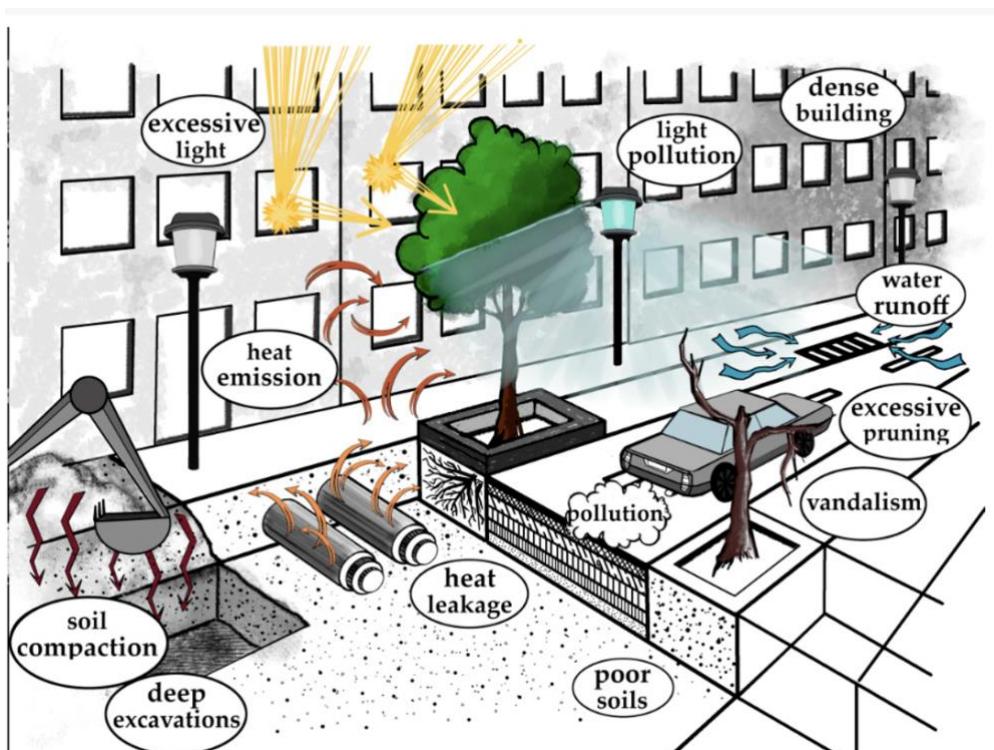


Figure 1 : Principaux facteurs de stress pour les arbres urbains venant des activités humaines. Issu de l'article Czaja, 2020

### 1.3 Les services écosystémiques rendus au milieu urbain

Les arbres contribuent à l'amélioration de la qualité de vie ainsi que sur la santé humaine. Plusieurs études ont mis en avant la réduction de stress, d'une humeur plus positive, et d'autres effets plus spécifiques sur la santé. Ils favorisent l'activité physique et permettent d'offrir des espaces de loisirs et de détentes (*Livesley, S.J., 2016* ; *Czaja, M., 2020* ; *Tzoulas, K., 2007*).

Plusieurs autres bénéfices peuvent encore être attribués aux arbres. La variation des couleurs des feuilles et de la forme des arbres durant les saisons de l'année affectent l'esthétique du paysage urbain. En parallèle, le bruit des feuilles, les sensations de calme (des parcs par exemple) sont plus de l'ordre culturel.

Le bénéfice est également présent pour la régulation de l'environnement urbain. Dans les parcs, la transpiration des arbres peut permettre à la température de l'air d'être réduite jusqu'à 4°C en fonction de leurs tailles, du climat etc... L'ombrage et le captage du rayonnement solaire permet de réduire les températures de surfaces. Le captage des polluants de l'air et de la filtration de l'air fait partie des nombreux avantages des arbres (*Czaja, M., 2020*).

Ces derniers permettent la réduction de l'îlot de chaleur urbain par l'ombrage ou la température de l'air. Cela contribue à créer des environnements urbains plus frais et plus confortables. Enfin, les arbres urbains sont un lieu pour la biodiversité en fournissant des habitats pour une variété d'espèces animales et végétales, contribuant à la conservation d'individus en milieu urbain (*Livesley, S.J., 2016* ; *Tzoulas, K., 2007*).

## II- L'impact de la très haute résolution sur l'analyse phénologique de la végétation : une évaluation de la qualité de reconstruction

### 2.1 La difficulté de la télédétection dans la précision des résultats en milieu urbain

Le milieu urbain a la particularité d'avoir de nombreuses surfaces (routes, bâtiments, végétation, rivières) aux propriétés différentes comme la couleur, la rugosité ou le type de matériaux qui les composent. La taille des objets en plus de l'hétérogénéité des surfaces est une difficulté supplémentaire pour les images satellites à retranscrire l'information de manière précise. Cela est notamment vrai pour les satellites à moyenne résolution, ou les images produites sont constituées de pixels aux dimensions trop importantes pour enregistrer les éléments du paysage urbain (*Wang, H., 2021*). Depuis l'arrivée des satellites très hautes résolutions, ces images permettent d'avoir une information à l'échelle du pixel qui correspond mieux aux objets constitutifs de l'environnement urbain.

Plusieurs facteurs peuvent influencer la précision de l'information enregistrée, comme les conditions atmosphériques ou la dissimilarité de la réponse spectrale (*Vrieling, A., 2017*).

Les études effectuées sur la ville de Tampa en Floride (*Pu, R., 2012*) ont mis en avant l'importance de la résolution spatiale et des caractéristiques spectrales dans l'obtention de résultats précis de classification de la végétation. Les images WorldView-2 avec leurs résolutions spatiales plus élevées et des bandes spectrales supplémentaires offre une précision supérieure dans la classification de la végétation urbaine face aux images IKONOS.

## 2.2 L'utilisation de la télédétection pour la cartographie et les mesures phénologiques dans le milieu forestier

Plusieurs études se sont focalisées sur les milieux forestiers. L'étude de Xu, K. (2021) a permis spécifiquement la comparaison de satellites sur la classification d'espèces forestières. Les résultats ont ainsi montré que l'utilisation des satellites Gaofen-2 et Sentinel-2 (respectivement 4 et 10 m de résolutions) ont été plus efficaces qu'avec des satellites à moyennes résolutions (Gaofen-1 et Landsat-8) à 16 et 30 mètres de résolution.

Les chablis sont des arbres tombés aux sols par la suite d'un déracinement. Leurs détections peuvent être efficaces à la fois pour Sentinel-2 et Planet, bien que ces derniers n'aient pas la même résolution spatiale. Cependant, la meilleure résolution des images Planet a été mise en avant dans la capacité à détecter leurs démarcations au sein de la forêt (Delponte, M., 2020).

Les résultats de l'étude de la forêt urbaine dans la région de Tokyo (Kokubu, Y., 2020) viennent également étayer ces constatations. La cartographie de la surface foliaire a révélé des variations significatives, jusqu'à deux à six fois supérieures, lors de l'utilisation d'images Worldview2-3 par rapport à une seule image Landsat, soulignant la grande variabilité des résultats possibles. Ainsi, il est crucial de prendre en compte la résolution spatiale lors de l'analyse des études utilisant des données à résolution moyenne, telles que l'étude de Sommeechai, M., (2018) sur la forêt urbaine de Bangkok avec des images à 30 mètres de résolution.

## 2.3 L'avantage de la très haute résolution pour la qualité de reconstruction d'indices spectraux

La résolution spatiale fait référence à la taille des pixels dans une image, et une résolution plus élevée permet une représentation plus détaillée du paysage. La résolution temporelle quant à elle correspond à la fréquence à laquelle un satellite revisite une même zone pour capturer des images.

Ces deux aspects sont nécessaires à prendre en considération lorsque l'on veut étudier la phénologie. En effet, les arbres sont des petits éléments au sein de la ville (comparés aux bâtiments par exemple) et il est nécessaire d'avoir de petits pixels si l'on souhaite que l'information renvoyée par l'arbre soit correctement interprétée au niveau de l'image. Les arbres peuvent également avoir des changements dans leurs comportements qui peuvent être rapides, et l'usage d'images à des dates très rapprochées permet de mieux suivre ces variations au cours de l'année.

Pu, R., (2018) a évalué le potentiel des images Pléiades prises à différentes périodes saisonnières pour la classification des essences d'arbres pour le milieu urbain. L'utilisation de plusieurs images prises à différentes dates (formant une série temporelle) a permis d'améliorer la précision de la classification effectuée par rapport à l'utilisation d'une seule image à une date précise.

Évoqué précédemment avec l'étude de Xu, k. (2021) le comparatif sur l'efficacité des satellites a montré le bénéfice de la très haute résolution. Ces différences de résolutions ont eu une incidence sur les valeurs du NDVI moyen calculé. Les auteurs ont pu mettre en avant la taille des pixels comme facteur essentiel, puisque la prise en compte d'une plus petite surface signifie une quantité d'énergie plus faible reçue au niveau du capteur, et une saturation plus vite de la valeur du NDVI.

Les satellites très hautes résolutions sont équipés de capteurs multispectraux leur permettant de capturer des informations dans plusieurs bandes du spectre électromagnétique. Les images acquises peuvent être utilisées dans de nombreuses études, dans le milieu urbain, rural mais également forestier ou côtier. Cette diversité est rendue possible par le calcul d'indicateurs spectraux permettant de faire ressortir une information des images.

### III- Caractérisation de la phénologie à travers un suivi temporel de la végétation

#### 3.1 L'usage d'indices de végétation dérivé d'images satellites pour déterminer la phénologie

L'utilisation d'images satellites et d'indices de végétation est largement répandue dans les études sur la phénologie, comme en témoigne la quasi-totalité des recherches consultées. Le plus répandu est le NDVI (Indice de Végétation par Différence Normalisée), mais d'autres existent tels que l'EVI, le SAVI, le NBR, le NDRE1 ou le GRVI. Ces indices spécifiques à la végétation fournissent des informations plus détaillées, telles que la densité foliaire, la teneur en chlorophylle ou la teneur en eau et sont souvent comparés entre eux (*Granero-Belinchon, C., 2020*).

A travers plusieurs environnements différents au Japon, l'indice vert-rouge (GRVI) a fait l'objet d'une comparaison avec le NDVI (*Motohka, T., 2010*). L'indice du GRVI s'est avéré être plus efficace dans trois des quatre milieux étudiés. Malgré l'usage du NDVI comme indice de "référence", il est parfois pertinent d'utiliser d'autres indices spécifiques aux objectifs de l'étude et du milieu.

#### 3.2 Le suivi de la phénologie à l'échelle interannuelle

Étudier la végétation sur plusieurs années peut être difficile lorsque le suivi s'effectue par des relevés sur le terrain. L'avantage des données satellitaires est de pouvoir obtenir de l'information sur l'état de la végétation plus facilement. En fonction de la plage temporelle que l'on souhaite étudier, le nombre d'images peut être relativement important. Cela semble nécessaire si l'on veut distinguer des changements au niveau de la végétation et de pouvoir les mettre en perspective à de possibles facteurs influençant leur comportement.

L'étude de *Liang, S. (2016)* avait pour objectif de mesurer l'effet de l'urbanisation sur les métriques phénologiques étudiées sur une période de 10 ans (2000-2009). Leurs résultats ont mis en avant par exemple un avancement du début de saison, mais pas de tendance qui se dessinait d'une année à l'autre.

De nombreuses études se sont basées sur les images MODIS pour leurs avantages à avoir une résolution temporelle élevée et d'une donnée disponible gratuitement. La résolution spatiale moyenne de ces images reste un facteur limitant pour l'utilisation de ces images (*Liang, S., 2016*). Depuis 2016, les images Sentinel-2 sont disponibles gratuitement et ont considérablement augmenté le nombre d'études utilisant ce capteur comme en témoigne certaines de ces études ci-dessous.

Des études plus récentes, comme celles de *Parece, T. (2018)*, *Galán Díaz, J. (2023)*, *Ren, Q. (2018)* et *Hu, P. (2021)* ont également étudiées la végétation sur plusieurs années à travers divers satellites dont les résolutions spatiales étaient inférieures à celles de MODIS. Ces études ont pu relever la présence de variations entre les métriques phénologiques (pour les débuts de

saison principalement) des différentes années prises en considération, respectivement (15, 5, 15 et 20 ans).

### 3.3 Un enjeu pour la gestion du patrimoine végétale

Les évènements saisonniers qu'il est possible d'observer avec le recours de la télédétection sont les éléments centraux d'analyses de la phénologie. Un aspect important de la phénologie des arbres a été mis en évidence à Washington (*Fang, F. 2020*), où la variabilité des métriques phénologiques était quatre fois plus importante en fonction des essences qu'en fonction de la localisation des arbres. Cette constatation, valable sur une période de trois ans (2018 à 2020), souligne l'importance du choix des essences lors de la planification ou le réaménagement d'un espace urbain (*Alonzo, M., 2022*).

De plus, il est important d'appréhender l'idée que chaque essences et arbres ont des dynamiques différentes. Cela se précise par un comportement saisonnier particulier, et qu'il est parfois nécessaire d'effectuer un taillage de cette essence quelques jours avant une autre, alors que ces dernières se trouvent à proximité. Ce caractère unique se manifeste également dans la réaction de ces derniers aux perturbations subis. Les charmes et les tilleuls sont par exemple plus sensibles à la restriction d'eau face à un phénomène de sécheresse, au contraire de l'érable (*Stratopoulos, L. M. F. 2019*).

Cet état de l'art sur le domaine de la phénologie arboré par usage de la télédétection a été important pour comprendre les bénéfices des arbres, tout comme les facteurs influençant leurs dynamiques saisonnières. La diversité des satellites et des images acquises ont montré une grande influence sur la caractérisation des métriques phénologiques étudiées, mettant en avant le bénéfice de la très haute résolution pour le milieu urbain.

Par la suite, nous allons confirmer ces propos sur la très haute résolution tout en appliquant une combinaison de données et une méthodologie pour l'étude de la phénologie des arbres urbains qui ont été peu évoqués ici.

## Chapitre 2 : Zone d'étude et données utilisées

### I- Présentation de la zone d'étude

L'Eurométropole de Strasbourg (EMS) est située dans le nord-est de la France, avec comme ville principale, Strasbourg. Cette dernière compte 287 228 habitants, représentant 56,8% de la population totale de l'Eurométropole. L'EMS compte un total de 33 communes pour une population de 505 272 habitants en 2019 (*Insee, 2023*).

Frontière naturelle, le Rhin délimite l'Eurométropole de l'Allemagne côté est. L'Eurométropole s'inscrit pleinement dans le territoire européen par la présence du parlement et du conseil de l'Europe.

L'Eurométropole est marquée également par un paysage diversifié qui mêle plusieurs types de zones urbaines, constituée d'habitats résidentielles et de zones commerciales et industrielles. On trouve malgré tous des espaces de cultures principalement dans la partie ouest de l'Eurométropole ainsi que des espaces naturels tel que de la forêt ou des plans d'eau.

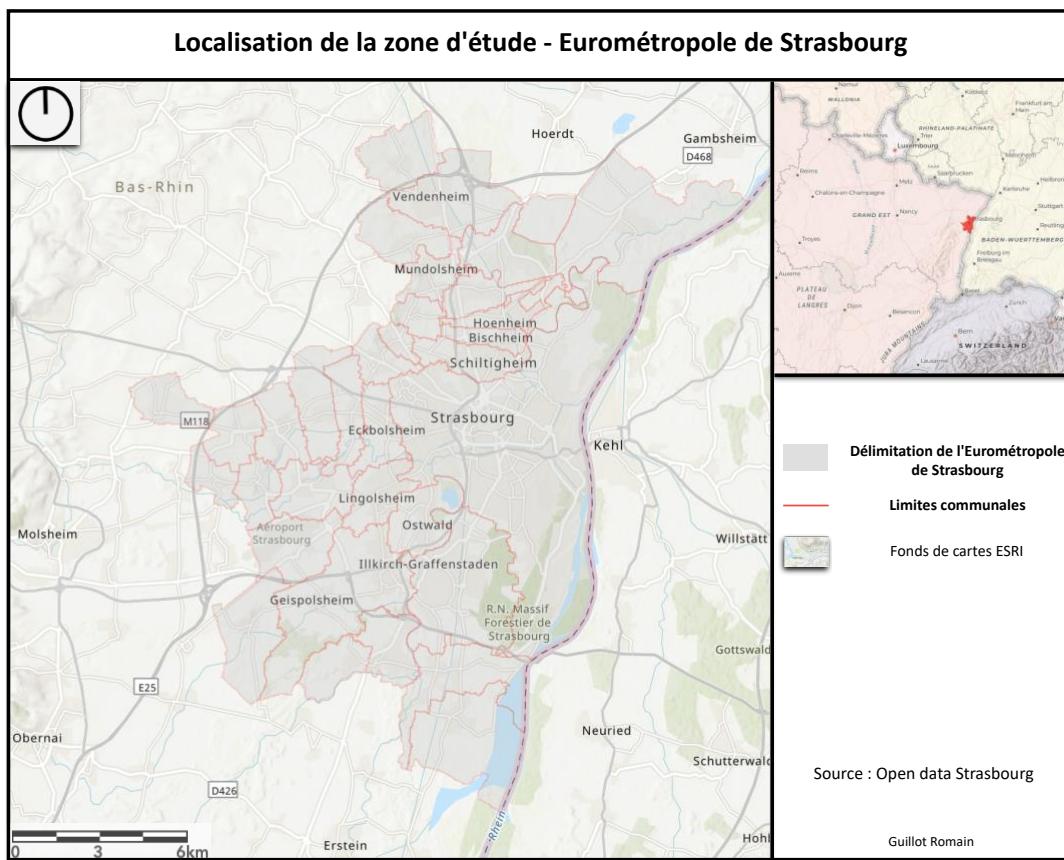


Figure 2 : Présentation de la zone d'étude à différentes échelles

## II- Présentation des données

### 2.1 Les données d'arbres de l'Eurométropole de Strasbourg

Les arbres présents au sein de l'Eurométropole sont issus du répertorage des arbres par les services publics et inclus dans une base de données. Ces données sont en partie disponibles sur l'Open Data de l'Eurométropole de Strasbourg. La version que nous utilisons, datant de mars 2022, contient les données de 83 670 arbres, accompagnée de 22 attributs permettant une description détaillée pour chacun des arbres tels que :

- Les identifiants uniques et identifiants de points-verts / groupe
- Leur nom latin mais également en français et codifié
- L'organisme de collecte et l'année de leur implantation (date précise ou sous forme de fourchette temporelle).
- Les types de surfaces aux pieds des arbres, le type de gestion (lié à leurs architectures), la hauteur et diamètres de certaines caractéristiques physiques tel que le tronc ou la couronne.

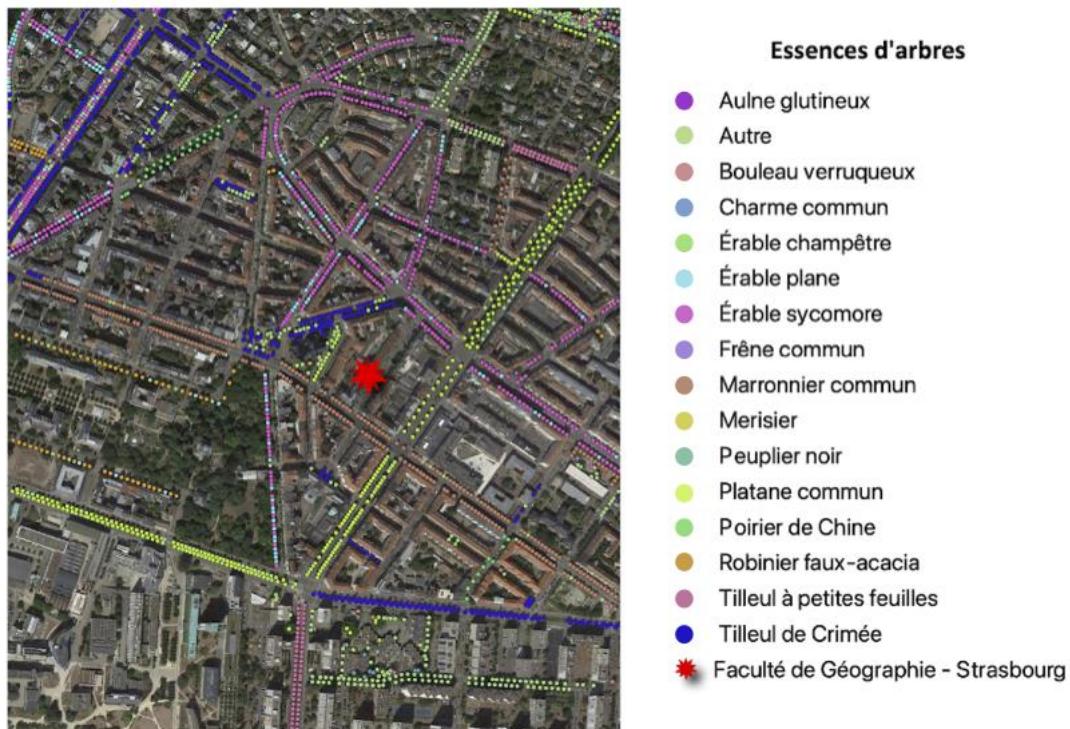


Figure 3 : Représentation des arbres classés ici par essences autours de la faculté de géographie - Strasbourg

Les 15 essences les plus représentées (en nombres d'individus) ont été recensées, et les autres essences ont été classifiées dans la catégorie 'Autre'. Le choix de ne travailler que sur ces 15 principales essences a été double : La proportion de ces essences représente une bonne partie des arbres présents dans la zone d'étude et que leurs nombres à étudier restent cohérents et pas trop diversifiés. Enfin il s'agit également de ne pas trop complexifier les analyses futures.

Dans le cadre de ce mémoire, nous serons amenés à travailler avec les informations suivantes :

Colonnes	Descriptions
Fid	Identifiant unique attribué à chaque arbre
gw_arbre_e	Description concernant l'architecture de l'arbre (types de ports)
esse_comm	Nom des essences par leurs noms communs en français
code_esse	Code associé aux différentes essences
code_port	Code associé aux types de ports
diam_couro	Informations en mètre sur le diamètre de couronne (Emprise au sol lié aux branches et feuilles de l'arbre).

Figure 4 : Description des données utilisées pour les données d'arbres de l'EMS

Les arbres présents dans l'EMS sont situés dans le domaine public et ainsi hors de zones non prises en compte tel que les propriétés privées, à la fois résidentielles ou commerciales ainsi que les zones institutionnelles comme les écoles ou les facultés. De plus, les arbres qui relèvent de la compétence communale (hors Strasbourg) ne sont pas inclus, valable également pour les grands massifs boisés (*Open Data, 2023*).

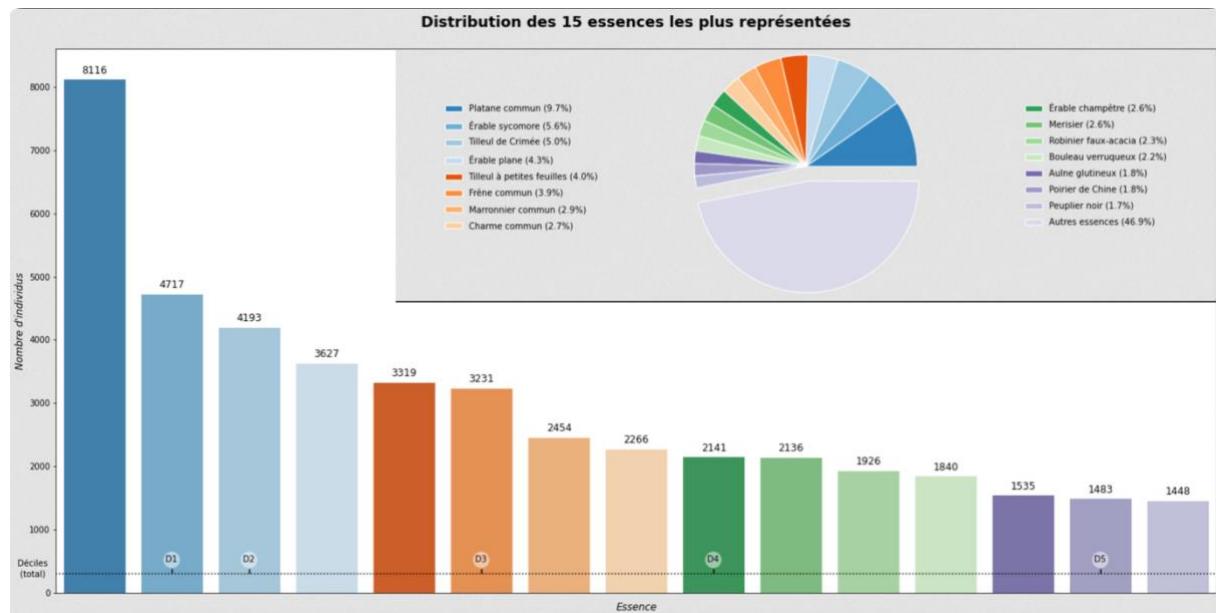


Figure 5 : Distribution des principales essences au sein de l'Eurométropole de Strasbourg

## 2.2 Les images issues de la mission Sentinel-2

Les satellites de la mission Sentinel-2 (2A et 2B) produisent des images pour le programme Copernicus de l'Agence spatiale européenne (ESA, 2023). Ces satellites sont placés sur une même orbite polaire mais avec une phase variant de 180° l'un par rapport à l'autre.

Ayant une fauché de 290 km, la combinaison des deux satellites permet une revisite tous les 5 jours d'une même surface. Ces images fournissent une couverture globale de la Terre avec une résolution spatiale élevée grâce au capteur MSI (instrument multispectrale) (ESA, 2023). Ce capteur permet la prise d'informations dans 13 bandes spectrales ayant diverses résolutions, représentées ci-dessous :

Sentinel-2 Bands	Central Wavelength (μm)	Resolution (m)
Band 1 - Coastal aerosol	0.443	60
Band 2 - Blue	0.490	10
Band 3 - Green	0.560	10
Band 4 - Red	0.665	10
Band 5 - Vegetation Red Edge	0.705	20
Band 6 - Vegetation Red Edge	0.740	20
Band 7 - Vegetation Red Edge	0.783	20
Band 8 - NIR	0.842	10
Band 8A - Vegetation Red Edge	0.865	20
Band 9 - Water vapour	0.945	60
Band 10 - SWIR - Cirrus	1.375	60
Band 11 - SWIR	1.610	20
Band 12 - SWIR	2.190	20

Figure 6 : Bandes spectrales capturés par le capteur MSI des satellites de la mission Sentinel-2 (Issu de Taconet, P., 2019)

- Les trois bandes bleu, vert et rouge à 10 mètres de résolution permettent la représentation de la surface avec une colorimétrie correspondant au spectre lumineux du visible.
- Les bandes rouges et du proche infrarouge à 20 mètres de résolution (exception bande 8 du NIR) permettent d'obtenir des informations sur la végétation, et utilisées pour calculer des indicateurs (NDVI en autres) pour obtenir des informations spécifiques.
- Les 3 bandes spectrales à une résolution de 60 mètres sont spécifiques pour la correction liée aux effets d'aérosols (bande 1), de la vapeur d'eau (bande 9) et des nuages (bande 10).

Dans ce dossier, les images Sentinel ont déjà subi les traitements nécessaires. Téléchargées sur le portail Copernicus, les images ont été cooregistrées. Cette étape est mise en place par une chaîne de traitement utilisée pour réduire la superposition de certains pixels entre les images. Ce traitement a été réalisé par la chaîne de traitement co\_regis (a2S, 2023).

En effet des corrections systématiques peuvent être effectuées pour les satellites en peignes où il y a un léger décalage le long de la trajectoire des satellites. Les traitements incluent l'utilisation d'une bibliothèque stéréo-photogrammétrique open source (Mic Mac) pour la réalisation des cartes de mouvements. Il est également utilisé un masque (F-mask) pour la détection de nuages, de neige et de surfaces en eau. L'ensemble de ces traitements permettent

donc aux images d'être bien recalées et ainsi être utilisables dans des traitements futurs notamment dans la détection de changements incluant l'usage de séries temporelles (*Stumpf, A., 2018*).

Les images de la série temporelle utilisées correspondent à la tuile 32 UMU. Ces dernières sont en unité métriques, en coordonnées UTM locale (EPSG : 32633 - WGS 84 / UTM zone 32N).

Notre zone d'étude se situe dans le coin nord-ouest de la tuile 32 UMU (encadré en noir).



Figure 7 : Représentation de la tuile 32 UMU correspondant à notre zone d'étude

### Séries temporelles Sentinel // Planet

Face à la résolution temporelle des images et des dates d'acquisitions différentes, nous obtenons un nombre différent d'images pour chacune des séries temporelles au cours de l'année 2022. Les images ont toutes été sélectionnées en première approche lorsque ces dernières couvraient la zone d'étude, ainsi qu'un pourcentage de nuages inférieur à 50%.

Chacune des images ont ensuite été inspectées pour vérifier si la zone d'étude n'était pas couverte par quelconques nuages. Les images sélectionnées pour la construction des deux séries temporelles sont les suivantes :

Dates d'acquisitions des images pour l'année 2022					
	Nombre d'images	Janvier - Mars	Avril - Juin	Juillet - Septembre	Octobre - Décembre
<b>Sentinel</b>	22	13/02 23/02 28/02 05/03 10/03 20/03 25/03	04/05 09/05 14/05 13/06 18/06 23/06	03/07 08/07 13/07 28/07 07/08 12/08 22/08 01/09 21/09	/
<b>Planet</b>	55	12/01 19/01 09/02 07/03 08/03 11/03 21/03 22/03 23/03 28/03	17/04 18/04 19/04 22/04 28/04 15/05 18/05 30/05 10/06 15/06 17/06 18/06 21/06	05/07 13/07 15/07 17/07 18/07 03/08 04/08 06-13/08 15/08 21-23/08 04-05/09 21-23/09	05/10 09-10/10 17/10 22/10 27/10 23/11 31/12

Figure 8 : Dates d'acquisitions des images constitutives des séries temporelles

Face aux différences du nombre d'images et de leurs plages temporelles au cours de cette année 2022, la très haute résolution marque un avantage supplémentaire. En effet, avec une résolution spatiale et temporelle supérieure des satellites Planet, il est possible d'acquérir des images supplémentaires et de réduire l'impact des nuages sur les images disponibles.

Malgré les 5 jours de revisite de la mission Sentinel-2, de nombreuses images sont manquantes notamment en octobre et décembre pour obtenir une série temporelle complète.

## 2.3 Les images Planet Scope

Les images Planet sont obtenues par une constellation d'environ 130 satellites en orbites autour de la terre sur une orbite solaire synchrone, permettant l'acquisition d'images de manière quotidienne. D'une résolution de 3 à 4 mètres, ces images acquièrent de l'information dans plusieurs bandes spectrales (*Planet*, 2023).

- Les instruments PS.2 et PS2.SD enregistrent de l'information dans 4 bandes spectrales (Bleu, vert, rouge, PIR)
- L'instrument PSB.SD possède 8 bandes spectrales allant de la bande Costal Blue (431nm) au NIR (885 nm)

Visible par le graphique suivant, le passage des satellites de la constellation Planet est marqué par des variations des azimuts au cours d'une année. Visible pour l'année 2022, les valeurs varient entre 100° et 275°, et plusieurs satellites ont des azimuts autour de 175° entre juin et septembre. A droite, on remarque que les angles de vues sont également variables au cours du temps et aussi diversifiés.

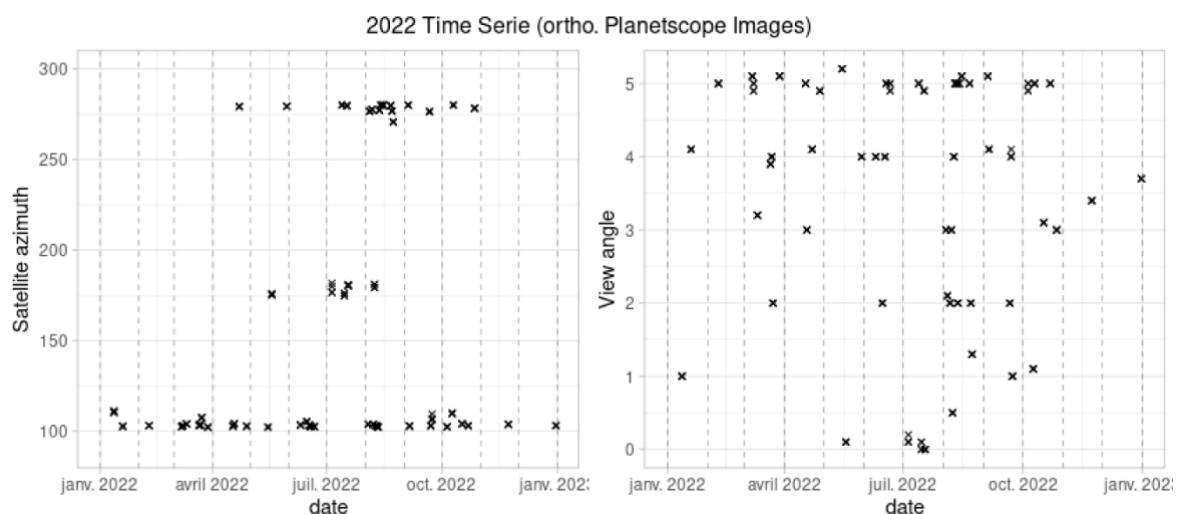


Figure 9 : Variation des azimuts et angles de vues des satellites de la constellation Planet pour 2022

Évoquée précédemment, cette série temporelle est constituée d'un nombre important d'images, et s'échelonnent sur l'ensemble de l'année. Au contraire des images Sentinel, l'étape de coregistration n'a pas été effectuée. Face aux nombreux satellites ayant des trajectoires et des angles d'observations différentes, plusieurs images peuvent être disponibles sur une même zone et pour une même date. Les images ont été regroupées en une seule image pour chacune des dates d'acquisitions avant le calcul du NDVI.

Ces deux séries font preuve d'une grande hétérogénéité à travers plusieurs caractéristiques. En plus des dates d'acquisitions différentes, la résolution spatiale est bien différente entre les deux satellites. Les différentes bandes spectrales enregistrent l'information allant de 10 m à 60 m pour Sentinel-2 au cours du satellite Planet avec des résolutions de 3 à 4 m.

Ces deux satellites utilisent des capteurs multispectraux. Néanmoins les longueurs d'ondes utilisées par certaines bandes peuvent varier entre capteurs (Bande rouge : 590 – 670 nm (Sentinel-2 ; 650 – 682 nm pour Planet) (*Planet Developper*, 2023)). Il est également possible que certaines bandes soient présentes uniquement pour certains satellites (Ex : la bande Yellow des satellites Planet n'est pas présente pour Sentinel-2).

## 2.4 Le produit Copernicus pour la phénologie et la productivité de la végétation à l'échelle annuelle

Ce produit satellitaire délivre pour l'Europe de l'Ouest des images satellites contenant des informations sur la productivité de la végétation ainsi que de la phénologie pour chacun des pixels de l'image, et cela pour une année. D'une résolution spatiale de 10 mètres, ce produit développé par le programme Copernicus se base sur les satellites sentinel-2. Ces images sont téléchargeables sur la plateforme Wekeo, depuis 2017.

Capturées par les même satellites de la plateforme Sentinel-2, trois images de la tuile 32 UMU ont été téléchargées pour l'année 2022. Chacune des images contient les informations des métriques phénologiques étudiées dans ce dossier ; le début de saison, le pic de croissance et la fin de saison sous forme de date (ou Day of year (DOY)).

Néanmoins ce produit Copernicus permet d'obtenir des informations plus variées tel que les métriques citées sous forme de valeur, mais également des informations tels que la longueur de saison, la productivité ou encore la pente de verdissement de la végétation ou de sénescence. Deux saisons sont disponibles (saison 1 et 2), la saison 2 étant généralement plus courte que la première et contenant moins d'informations. La première saison a été choisie pour les trois métriques phénologiques téléchargées. Issu du document technique du produit, l'ensemble des produits disponibles sont présentés ci-dessous.

File_ID	File_ID description	Unit
SOSD	Day of start-of-season	day-of-year
EOSD	Day of end-of-season	
MAXD	Day of maximum-of-season	
SOSV	Vegetation index value at SOSD	PPI
EOSV	Vegetation index value at EOSD	
MINV	Average vegetation index value of minima on left and right sides of each season	
MAXV	Vegetation index value at MAXD	
AMPL	Season amplitude (MAXV – MINV)	
LENGTH	Length of Season (number of days between start and end)	day
LSLOPE	Slope of the green-up period	PPI × day <sup>-1</sup>
RSLOPE	Slope of the green-down period	
SPROD	Seasonal productivity. The growing season integral computed as the sum of all daily values between SOSD and EOSD minus their base level value.	PPI × day
TPROD	Total productivity. The growing season integral computed as sum of all daily values.	

Figure 10 : Ensemble des produits disponibles du produit Copernicus. Issu du manuel utilisateur, Copernicus Land Monitoring Service (2021)

Pour obtenir les dates de métriques phénologiques, le produit de phénologie Copernicus utilise une méthode de seuillage basée sur des courbes de croissance de référence. Des séries temporelles d'indices de végétation sont générées pour chaque pixel, puis comparées à d'autres sources tel que des observations in situ ou le recours à des réseaux tel que PhenoCam (Tian, F. 2021).

## 2.5 Local Climate Zone (LCZ) par méthode MApUCE

Les “Local Climate Zones” permettent une classification des zones urbaines en fonction de leurs morphologies et du microclimat. Cette donnée nous sera essentielle pour comprendre les variations des métriques phénologiques étudiées à travers une dynamique spatiale du tissu urbain.

De nombreux facteurs rentrent en jeu et sont utilisés pour catégoriser le tissu urbain ; il s’agit de la densité des bâtiments, de leurs hauteurs, de la proportion d’espaces verts ou encore de la surface réfléchissante des matériaux entre autres.

Plusieurs méthodes sont aujourd’hui disponibles comme la méthode MApUCE (Modélisation Appliquée et droit de l’Urbanisme : Climat urbain et Energie) utilisée ou WUDAPT et CEREMA. Ces trois métriques font l’objet d’une étude permettant de montrer une comparaison des résultats de classifications sur trois villes d’études, à savoir Metz, Nancy et Strasbourg.

L’approche choisie prend en considération trois échelles de découpages urbains en prenant en compte : le bâtiment, le bloc (groupe de bâtiments contigus), les unités spatiales de références avec le calcul de près de 100 indicateurs (*Dupre, L. 2022*).

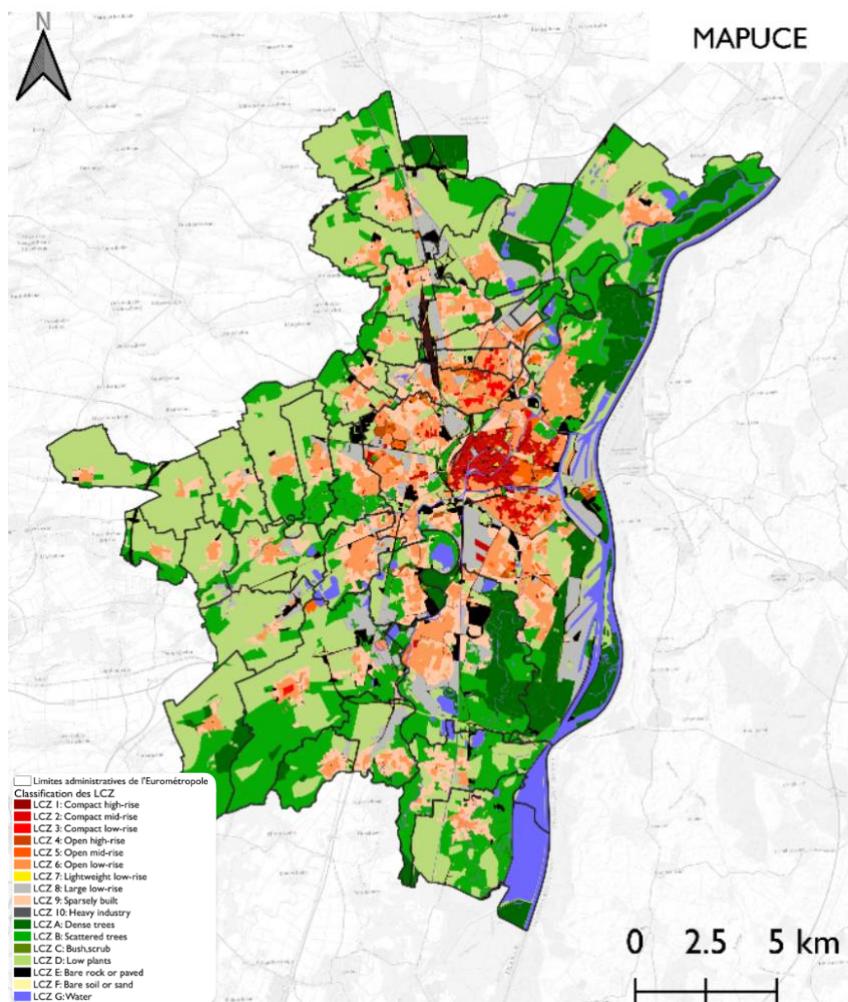


Figure 11 : Classification des Local Climate Zones (LCZ) par méthode MApUCE appliquée sur l’Eurométropole de Strasbourg. Issu de Dupre, L. (2022)

## Chapitre 3 : Méthodologie

### I- Définition des métriques phénologiques

Les **métriques phénologiques** sont des mesures utilisées pour étudier et quantifier les variations dans les étapes clés des cycles de vie des organismes, comme les arbres. Elles permettent de caractériser les phénomènes tels que la floraison, la feuillaison, la maturation des fruits à travers le « calendrier des événements biologiques répétés » (Tian, F. 2021).

Voici les métriques que nous allons traiter dans les traitements de ce dossier :

- Date de **début de saison** phénologique (SOS) : Il s'agit de la date à laquelle l'arbre commence sa première phase de développement de l'année, pouvant être associé pour l'arbre à la feuillaison. A partir des valeurs de NDVI, des courbes lissées et interpolées sont obtenues servant de base aux calculs des métriques phénologiques. Ces dernières sont calculées à partir d'une amplitude particulière par rapport à la courbe, pouvant être variables selon les études. Ces amplitudes seront définies par la suite.
- Date du **pic de saison** (Peak) : En fonction des essences d'arbres, cette période de développement maximale peut être différente en fonction d'un pic de feuillaison, de floraison, de fructification. A travers le recours à la télédétection, cette métrique est déterminée par la valeur maximale de la courbe ou cette modélisation se base sur les images satellites enregistrant les valeurs de NDVI les plus élevées.
- Date de la **fin de saison** (EOS) : Cette métrique représente la période où l'arbre achève sa dernière phase active de croissance et entre dans une phase de repos ou de sénescence.

## II- Méthodologie générale

De nombreux traitements ont été réalisés pour préparer les données et faciliter la création de cartes et de graphiques afin d'analyser la dynamique des arbres dans notre zone d'étude. La préparation des données est une étape cruciale qui comprend le tri, la vérification et la sélection des variables à partir des données brutes.

Une fois les données prêtes à être utilisées, une chaîne de traitement est mise en place pour générer une ou plusieurs sorties, tels que des cartes ou des graphiques. Dans ce projet, les traitements ont permis de calculer différentes métriques phénologiques, qui ont ensuite été utilisées pour une analyse approfondie de la phénologie des arbres sous différents angles, tels que l'approche spécifique ou spatiale.

### 2.1 Préparation des données

Les quelques étapes pour la préparation des données ont pu être réalisées et schématisées de la façon suivante :

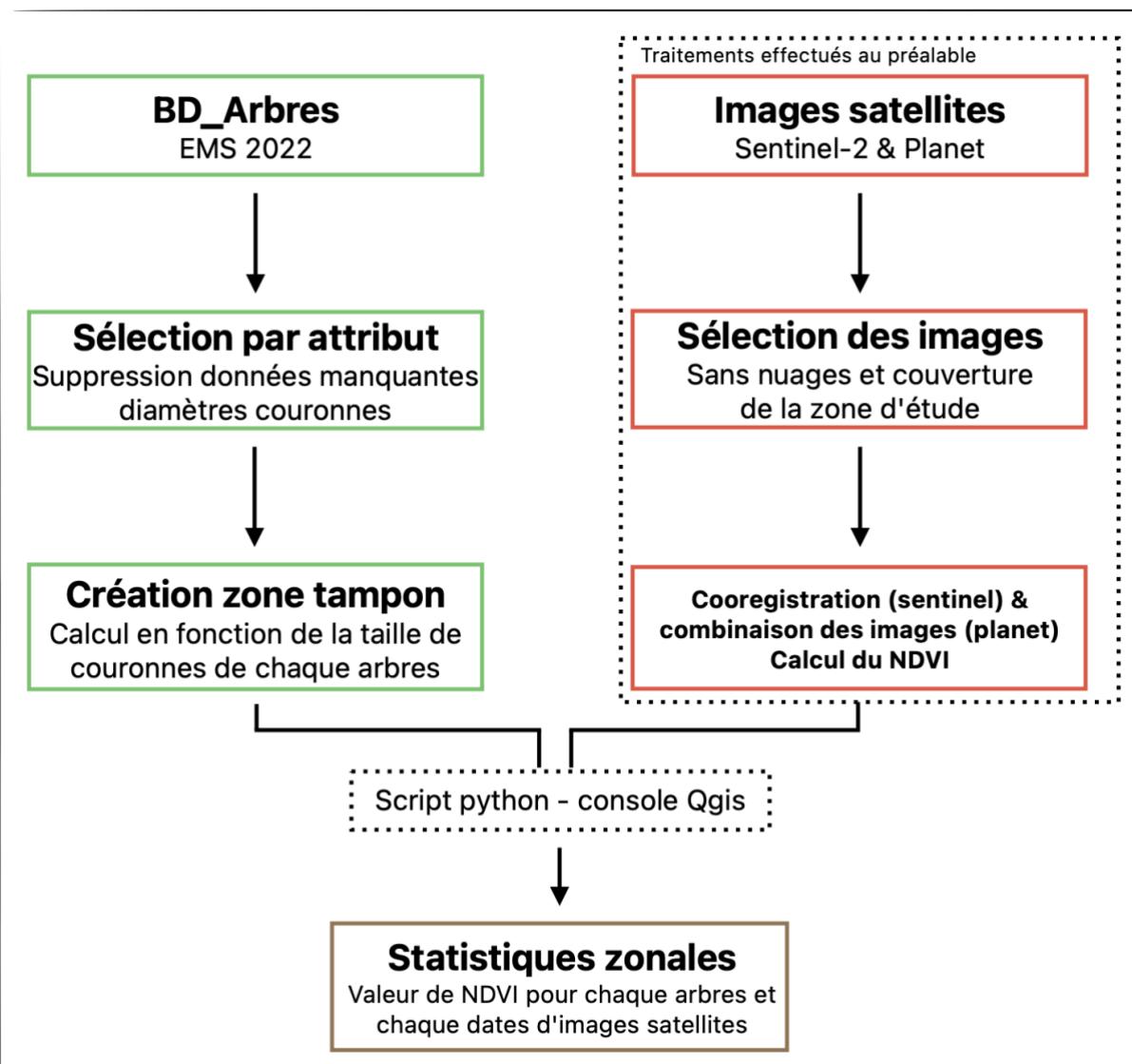


Figure 12 : Schéma de traitement n°1 (Préparation des données)

## Les images satellites

Évoquées dans la partie présentation des données, les images satellites constituant les séries temporelles ont été sélectionnées pour être dépourvues de nuages sur l'ensemble de la zone d'étude. Pour Sentinel-2, les images ont été cooregistrées et pour Planet, les images d'une même date (lié au passage de plusieurs satellites à des trajectoires différentes) ont dû être mosaïquées pour n'obtenir qu'une image calibrée. Le calcul du NDVI a ensuite pu être réalisé pour chacune des images des deux séries temporelles.

## La base de données des arbres de l'Eurométropole

En parallèle, le fichier vectoriel contenant la base de données d'arbres à l'échelle de l'Eurométropole de Strasbourg a été nettoyé. Dans la colonne attributaire 'Error', les lignes contenant 'Error' ont été supprimées. Ces lignes correspondent à des arbres n'étant plus en accord à la situation lors de la précédente version de la base de données arbre. Il peut s'agir d'arbres morts ou élagués entre temps au sein de la zone d'étude.

Une sélection attributaire a ensuite été opérée pour enlever les arbres ne contenant pas de données sur leurs diamètres de couronne. En effet, cette étape a été nécessaire puisque la création de la zone tampon pour chaque arbre est en fonction de ce paramètre.

L'objectif ici est donc de pouvoir obtenir une surface correspondant à l'emprise foliaire de chaque arbre à partir d'une donnée ponctuelle. Cette emprise va être le support pour l'obtention des valeurs de NDVI issu des différentes images satellites.

Ayant un grand nombre d'images (77), la réalisation du traitement de statistique zonale peut s'avérer très long, et cela même en paramétrant un processus de traitement par lot. Un script python a été exécuté directement dans la console de Qgis (import des images au préalable) pour obtenir une valeur de NDVI pour chaque arbre et pour chaque date d'acquisition. La zone tampon créé en fonction des couronnes pour chaque arbre pouvait néanmoins être chevauchée par plusieurs pixels des images satellites. La valeur de NDVI choisie pour chaque emprise a été la valeur médiane des pixels.

Plusieurs choix étaient possibles comme la valeur moyenne ou maximale du NDVI. La valeur médiane a été sélectionnée car cette dernière et contrairement à la moyenne, permet de limiter l'impact de valeurs extrêmes dans le résultat pour chacune des zones tampons. Les données des diamètres de couronnes ne peuvent pas toujours être justes et en concordance parfaite avec l'emprise de l'arbre ; il se peut ainsi que des pixels contenant le NDVI autre que la végétation soit ainsi associée dans ces couronnes. La médiane permet ainsi de limiter ces effets sur le résultat du NDVI.

A ce stade nous obtenons un fichier Shapefile contenant environ 73 000 arbres (lignes) et 102 colonnes contenant les informations et les valeurs de NDVI pour chaque dates d'acquisition des séries temporelles.

## 2.2 Détermination des métriques phénologiques

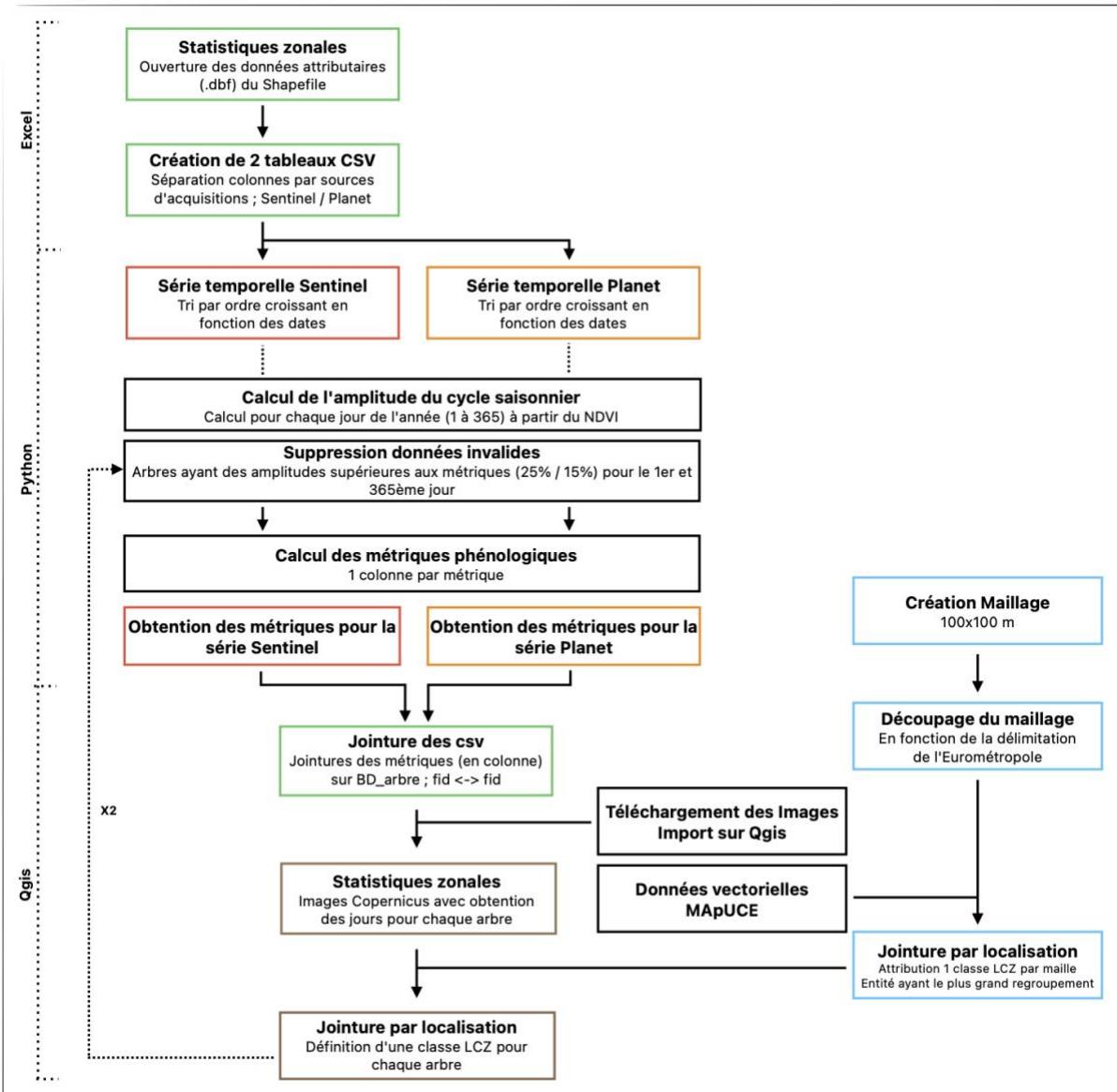


Figure 13 : Schéma de traitement n°2 (Définition des métriques phénologiques)

Une fois les statistiques zonales effectuées, les données ont été séparées pour obtenir des informations spécifiques de phénologie sur nos deux séries temporelles et de pouvoir les mettre en comparaison l'une à l'autre. A partir du fichier .dbf correspondant à la table attributaire du fichier Shapefile, ce tableau a été converti vers un fichier .csv. Les données Sentinel et Planet ont été séparées dans deux fichiers .csv différents pour le bon déroulement des traitements qui vont suivre.

### Division des traitements pour les deux séries temporelles

Comme le montre le schéma ci-dessus, la séparation des séries temporelles s'est conclue sur Excel et les traitements suivants ont été réalisés via le langage de programmation python. Pour chaque série, les colonnes ont été renommées (manuellement) puis triées par ordre croissant de manière automatisée. Nos deux séries sont prêtes pour le calcul des métriques phénologiques.

## Définition des métriques phénologiques

Pour chacune des deux séries, nous utilisons un script python permettant d'obtenir l'amplitude saisonnière sous la forme de valeurs comprises entre 0 et 1 correspondant au cycle saisonnier. Ces valeurs sont obtenues pour tous les jours de l'année (1 à 365) à partir du NDVI. La normalisation de ces valeurs de NDVI permet de pouvoir mettre en comparaison des séries temporelles différentes, comme c'est le cas ici.

Le script python permettant la réalisation de cette étape est composé de plusieurs fonctions tels que l'interpolation, le lissage et la normalisation des données pour les séries temporelles. Des échantillons temporels sont générés en fonction d'une date de début, d'une date de fin et d'un intervalle de jours puis normalisés. Le tableau en fonction des DOY (Day of year) va être créé et les valeurs définies sont interpolées via une méthode d'interpolation linéaire. Enfin, la méthode de lissage Savitzky-Golay est appliquée sur les données rééchantillonées pour obtenir des courbes plus régulières et moins sujettes aux fluctuations (bruits des données pouvant apparaître dans les séries).

Nous obtenons donc des amplitudes pour chaque arbre pour l'année 2022. Pour obtenir une valeur pour chaque métrique, nous supprimons les arbres ou l'amplitude au 1<sup>er</sup> jour de l'année est supérieure à 0.25. Nous faisons de même pour le 365<sup>ème</sup> jour où l'amplitude est soit supérieure à 0.25 ou 0.15. L'utilisation des jours de l'année pour les métriques phénologiques permet une simplification de la donnée sous forme de valeurs, toujours dans l'objectif d'effectuer des comparaisons entre métriques. Les dates sont dans un meilleur format lorsqu'il s'agit d'étudier des événements ayant une temporalité telle que la phénologie.

Un second script permet de prendre pour chaque ligne, les valeurs correspondant aux amplitudes sur l'année 2022, et de définir les dates pour les trois métriques. Un nouveau tableau en sortie est créé avec les identifiants uniques (fid) conservés ainsi que trois nouvelles colonnes (métriques). Le début de saison a été défini comme le jour atteignant la valeur 0.25, le pic de saison comme la valeur la plus élevée de la saison et la fin de saison comme la valeur atteignant 0.25 ou 0.15 après le pic de saison.

La réalisation de ces deux scripts a été réalisée quatre fois, avec une amplitude soit de 15% ou de 25% pour la fin de saison et cela pour chacune des séries temporelles. La fin de saison avec une amplitude de 15% a été réalisée pour analyser le produit Copernicus, utilisant également ces amplitudes dans les métriques calculés (partie 1 de l'axe de recherche n°1). Le reste des traitements et analyses se base sur une amplitude de fin de saison à 25%.

## Ajout des images Copernicus et données MApUCE

Pour chacun des fichiers .csv obtenu des séries temporelles, nous joignons ces informations au fichier de la base de données arborée sur Qgis à l'aide de deux jointures attributaires (grâce aux fid). Les jointures se sont faites sur le Shapefile ayant été nettoyé lors de la préparation des données. Elles n'ont pas été réalisées sur les sorties plus récentes puisque nous n'avons plus besoin des zones tampons créées en fonction des diamètres de couronnes, ni des statistiques zonales (plus lourds et plus utile à ce niveau).

L'étape suivante consiste néanmoins à réaliser des statistiques zonales, cette fois-ci pour la donnée Copernicus. Après le téléchargement sur le portal Wekeo, nous importons les images sur Qgis, et réalisons les statistiques zonales (sans le script python car seulement trois images

à traiter). Nous avons donc trois nouvelles colonnes, ou cette fois-ci nous obtenons directement les métriques phénologiques en jours de l'année pour chaque arbre.

Enfin la dernière étape consiste en l'obtention des données de classification des LCZ pour chacun des arbres. Cette donnée est disponible sous la forme d'un fichier Shapefile. Nous devons réaliser plusieurs traitements car ces données ont un découpage à une échelle très fine, celle des rues et bâtiments. Cela pose le problème que certains points (arbres) peuvent intersecter plusieurs LCZ différentes et n'est pas très cohérent pour la prise en compte du microclimat ou ce dernier se dessine généralement à l'échelle des quartiers.

A cette problématique, nous décidons de créer une grille de 100 mètres de côté en fonction de l'emprise des données d'arbres de l'Eurométropole de Strasbourg. Nous effectuons une découpe pour supprimer les zones excédantes de l'emprise créée lors de l'étape précédente. Sur cette grille, nous effectuons une jointure par localisation pour permettre d'obtenir la classe LCZ majoritaire (entité ayant le plus grand regroupement) couvrant chacune des mailles. Une seconde jointure par localisation permet d'associer à chacun des arbres la classe majoritaire de chaque maille.

Nous obtenons donc deux couches Shapefiles finales. Ces couches serviront de base quant aux traitements futurs pour les différents axes de traitements.

## 2.3 Axe de recherches

### Axe de recherche n°1

Avec deux séries temporelles et un produit en support, une comparaison des résultats sur les métriques phénologiques a été réalisée sur ces sources. Le fichier shapefile final (amplitude 25% ; 15%) a été converti en .csv après l'ouverture de la table attributaire (.dbf). Les histogrammes, courbe de densités, statistiques simples (moyenne et écart-type) et régressions linéaires ont été réalisés par des scripts python à la fois pour le traitement et la réalisation des figures<sup>1</sup>.

La comparaison entre nos deux séries temporelles uniquement s'est déroulée avec le fichier Shapefile (amplitude 25% ; 25%) dont les mêmes traitements ont été effectués que dans la partie précédente.

La carte de comparaison entre l'avancement ou le retard de la série Planet par rapport à la série Sentinel a été réalisée sur Qgis. Des nouvelles colonnes ont été créées et ces dernières ont simplement été ajoutées par des valeurs correspondant à la soustraction des valeurs de jour entre Planet – Sentinel pour chaque métrique.

---

<sup>1</sup> Certains graphiques seront présents dans le corps du mémoire, et remis en annexe pour que ces derniers soient plus lisibles.

## Axe de recherche n°2 et n°3

Présenté dans le schéma ci-dessous, de nombreuses figures ont été générées à travers la création de scripts python. Les cartes et quelques traitements de l'axe n°3 ont également été réalisés sur Qgis.

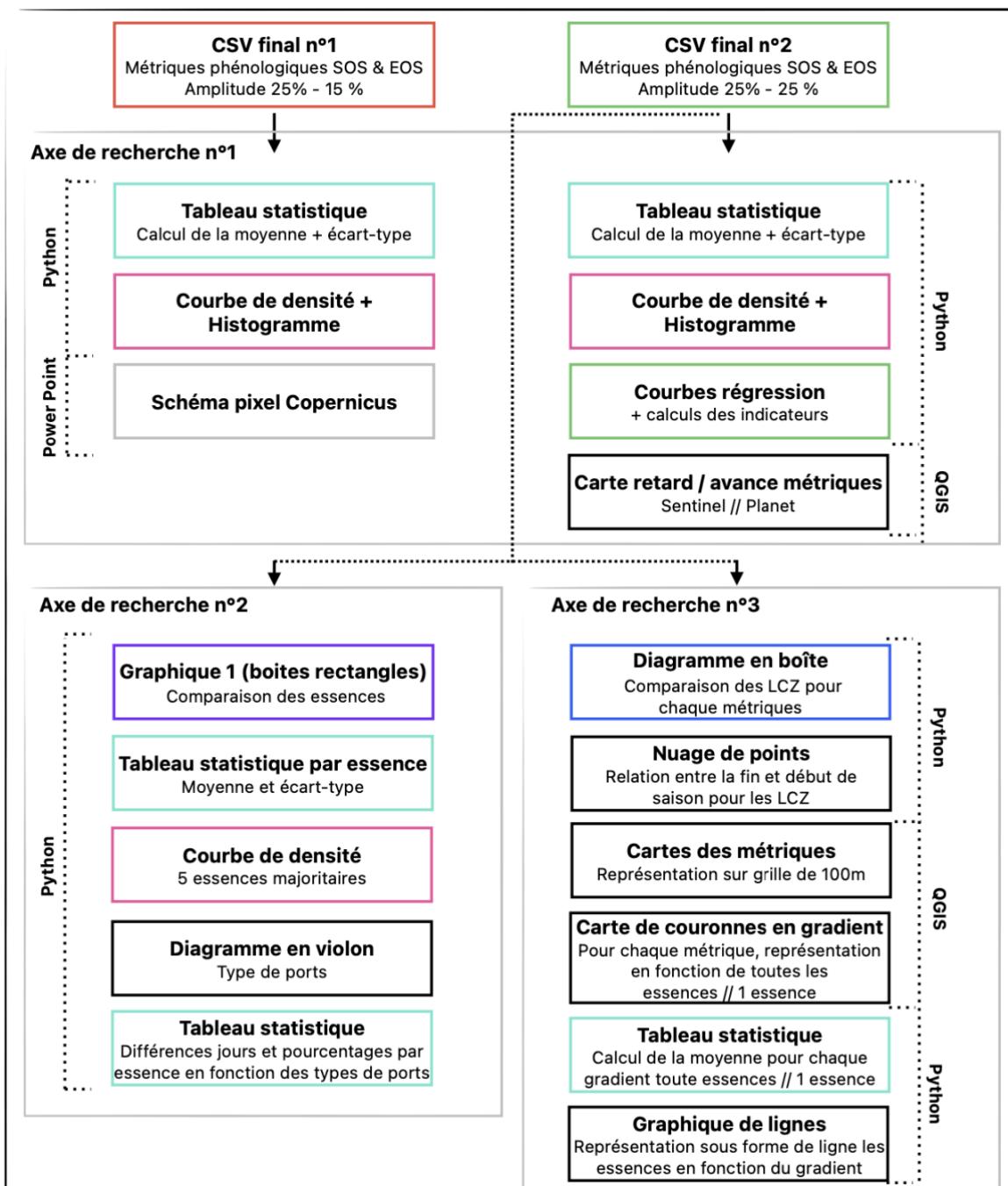


Figure 14 : Figures exploitées dans les axes de recherches

## Création des couronnes formant le gradient urbain

Pour l'analyse des métriques selon un gradient, nous avons créé des couronnes concentriques, ayant une distance égale. Effectué avec l'outil 'Tampon multi-anneaux', 16 couronnes ont été générées avec un intervalle de 500 mètres couvrant ainsi un rayon de 8km depuis un point du centre de Strasbourg. Ce dernier a été défini au niveau de la cathédrale (centré sur le bâtiment) et a été choisi par une analyse visuelle de la zone. Il s'agissait ici de trouver un point de référence se localisant au cœur de la ville ayant une densité la plus élevée du tissu urbain, faisant référence à la classe n°1 (type construit) de la classification par LCZ.

Le rayon depuis ce point pour couvrir l'ensemble de l'Eurométropole à la fois vers le nord et le sud, est de 16 km environ, nos couronnes ne couvrent donc pas l'ensemble du territoire ni tous les points d'arbres disponibles.

Cependant ces quelques points ne représentent qu'une très faible part des arbres de l'Eurométropole et compliquent l'analyse pour une seule essence (car toutes ne sont pas représentées dans les couronnes les plus éloignées). A travers une jointure par localisation (résumé), nous obtenons la date moyenne pour chaque couronne et chaque métrique. Deux comparaisons ont été faites, en prenant en compte les 15 essences majoritaires ou seulement 5 essences (Platane commun, Érable Sycomore, Tilleul de Crimée, Frêne commun et marronnier commun).

## Chapitre 4 : Résultats et interprétation

### Axe de recherche n°1 : Analyse de la dissimilarité des métriques phénologiques extraites par différentes données satellitaires à capteurs optiques

I- Comportement des métriques phénologiques entre les deux séries temporelles et le produit annuel Copernicus de phénologie

#### 1.1 Analyse statistique pour chacune des métriques phénologiques

A partir des traitements successifs mis en œuvre, les données obtenues ont permis de calculer deux indicateurs pour fournir un premier aperçu des variations entre les différentes sources d'acquisition. La moyenne et l'écart-type ont été compilés dans le tableau suivant :

Statistiques en fonction des différents sources d'acquisitions satellitaires

Indicateurs	Sentinel			Planet			Copernicus		
	SOS	Peak	EOS	SOS	Peak	EOS	SOS	Peak	EOS
Moyenne	81.72	162.58	342.15	71.81	177.93	358.8	99.51	159.63	268.7
Ecart-type	21.48	24.47	15.91	20.65	48.27	8.03	13.47	17.18	21.75

Figure 15 : Comparaison statistiques pour chacune des métriques et sources à notre disposition

En étudiant les moyennes, nous pouvons observer des différences significatives dans le début de la saison phénologique entre les différentes sources d'acquisition. Pour la série temporelle Planet, la majorité des arbres montre un début de saison plus précoce (12 mars). Ensuite, la série Sentinel-2 présente un décalage d'environ 10 jours par rapport à Planet, tandis que le produit Copernicus affiche un décalage de 20 jours. Les écarts-types, qui mesurent la variabilité par rapport à la moyenne, révèlent un écart d'environ 20 jours pour les deux séries temporelles, tandis que le produit Copernicus présente un écart de 13 jours par rapport à la moyenne.

En ce qui concerne le pic de saison, nous observons également des différences significatives au début de la saison. Le produit Copernicus présente un pic plus précoce, atteignant son maximum le 160e jour (9 juin). Sentinel-2 affiche un décalage de 2 jours par rapport à Copernicus, tandis que Planet montre un décalage de 15 jours. Il convient de noter que les écarts-types sont relativement élevés par rapport à Sentinel et Copernicus. Ainsi, la variation du pic de saison pour les arbres de l'Eurométropole est de 48 jours en utilisant la série temporelle Planet.

La même tendance se manifeste pour la dernière métrique phénologique, où le produit Copernicus présente des dates de fin de saison plus précoces. La fin de saison survient dès le 25 septembre, alors que la série Sentinel-2 présente un décalage de 73 jours (8 décembre) et Planet affiche une fin de saison le 24 décembre. Les écarts-types restent dans le même ordre de grandeur que les métriques précédentes pour chaque source d'acquisition, à l'exception des images Planet. En effet, après un écart-type d'environ 50 jours pour le pic de saison, la variation de la fin de saison est seulement de 8 jours pour l'ensemble des arbres de l'Eurométropole pris en compte. De plus, la fin de saison survient tardivement pour cette série temporelle, ce qui sera mis en perspective dans la suite de cette partie.

## 1.2 Analyse de la distribution des métriques phénologiques

### Répartition du nombre d'arbres en fonction des métriques phénologiques et des différentes sources d'images acquises

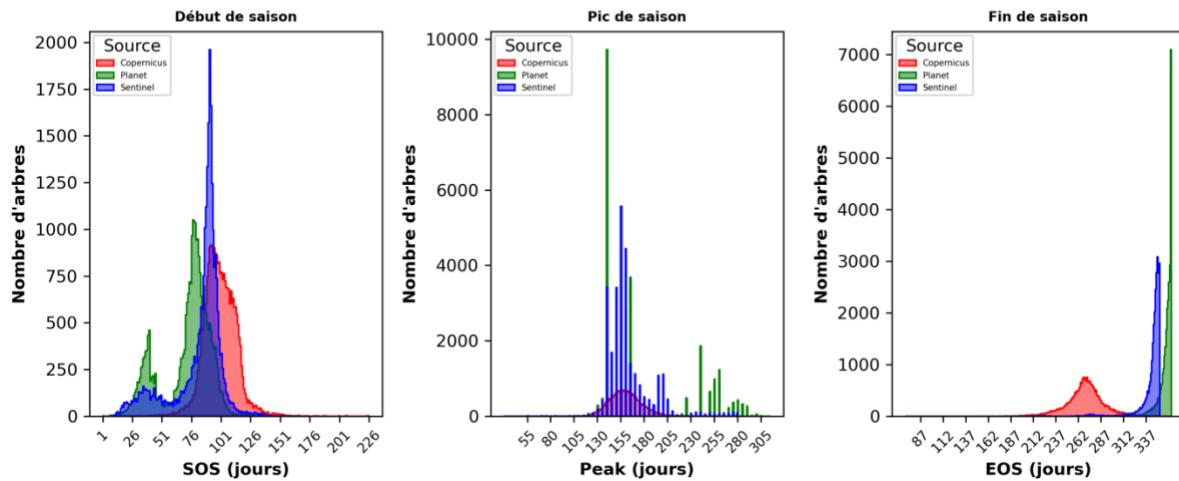


Figure 16 : Représentation du nombre d'arbres en fonction des métriques phénologiques pour chaque source d'acquisitions

Ces histogrammes mettent en évidence la répartition des données en fonction de chaque date des métriques phénologiques, en prenant en compte le nombre d'arbres. Cette analyse porte sur environ 27 500 arbres de l'Eurométropole de Strasbourg.

Avec le premier histogramme, il est facile d'identifier que la série temporelle de Planet présente un nombre plus élevé d'arbres atteignant le début de saison plus tôt, suivi de Sentinel-2. Cela se traduit par une distribution plus étalée en termes de jours pour Planet par rapport aux autres sources d'acquisition.

L'histogramme met également en évidence un premier pic aux alentours du 30e jour pour un groupe restreint d'arbres, suivi d'une augmentation significative du nombre d'arbres atteignant le début de saison environ 50 jours plus tard. De plus, il est intéressant de noter que la série Sentinel-2 présente une distribution plus resserrée en termes de jours.

L'analyse du pic de saison révèle des différences marquées entre les séries temporelles. Pour la série Planet, nous observons une forte concentration des dates de pic de saison sur seulement quelques jours, ce qui se traduit par de larges barres dans l'histogramme. Près de 10 000 arbres atteignent leur pic de saison exactement le même jour (140e jour). Enfin, un nombre significatif d'arbres ont un pic de saison très tardif pour nos deux séries temporelles. Au contraire le produit Copernicus est en avance en comparaison des deux séries temporelles avec une étendue plus importante au niveau des dates atteignant cette métrique phénologique.

### Courbes de densité des métriques phénologiques en fonction des différentes sources d'images acquises

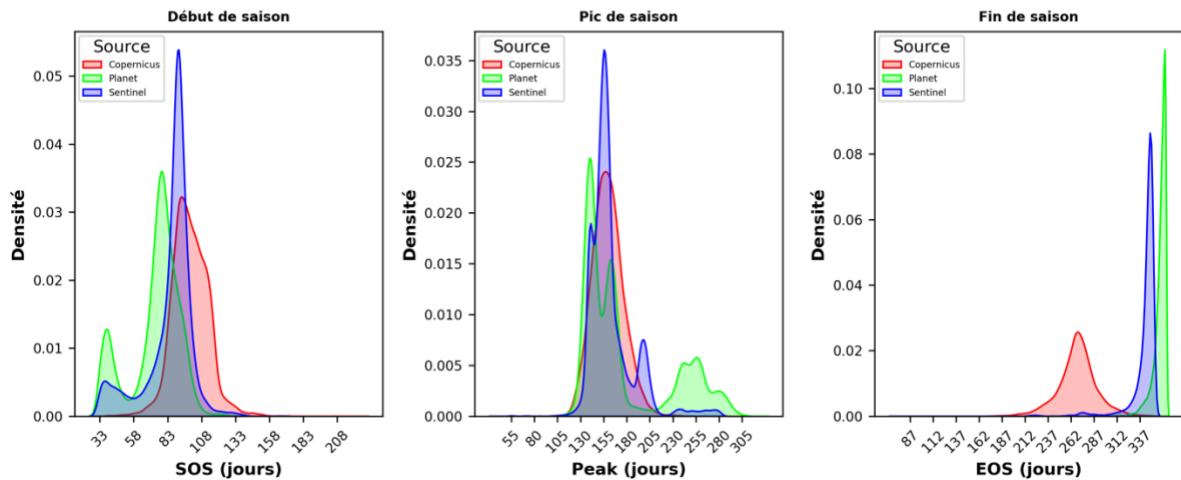


Figure 17 : Représentation sous forme de courbes de densité pour chacune des métriques phénologiques

Les courbes de densité ci-dessus montrent la distribution des métriques phénologiques de manière continue. Il s'agit d'une manière similaire de représentation aux histogrammes mais ces derniers ont une distribution discrète de la donnée. Chaque courbe de densité permet donc de donner une estimation quant à la probabilité que la donnée se trouve sous la courbe représentée. Il est intéressant d'utiliser cette méthode pour les données qui ne représentent pas une continuité sur la variable étudiée, comme c'est le cas ici pour le pic de saison.

Le pic de saison met d'ailleurs en évidence une répartition du pic selon une période temporelle plus étendue que par l'utilisation de l'histogramme ou la majorité des arbres avait un pic de saison intervenant à deux dates spécifiques.

Ces deux représentations nous permettent de conclure que les trois données satellitaires à notre disposition sont bien différentes et qu'il est nécessaire de les étudier plus en détail si l'on réussit à obtenir les résultats les plus cohérents pour les métriques phénologiques au sein de notre zone d'étude.

### 1.3 Mise en perspective du produit Copernicus

Le produit Copernicus s'est avéré être une ressource précieuse dans cette première analyse pour mettre en évidence la diversité des estimations phénologiques des arbres urbains qu'il est possible de récolter à partir d'images satellites. Contrairement aux séries temporelles utilisées dans cette étude, le produit Copernicus ne repose pas sur la même méthodologie et la construction d'une série temporelle. Le cœur de recherche dans ce mémoire concerne les séries temporelles et il n'est donc pas destiné à être utilisé dans les traitements futurs ; il a permis néanmoins de situer les résultats par rapports à nos séries temporelles.

Les données des séries temporelles ont été calculées en utilisant des critères cohérents avec la méthode de calcul des métriques phénologiques du produit Copernicus. Le début de saison a été défini par l'amplitude correspondant à 25% de la courbe de croissance du cycle saisonnier jusqu'au pic, et la fin de saison a été définie comme correspondant à 15% de l'amplitude depuis la base de la courbe de décroissance.

Il est intéressant de remarquer que le produit Copernicus, développé à partir d'images Sentinel-2, présente des différences en termes de résolution spatiale et spectrale par rapport à notre série temporelle Planet. Il est donc logique que les estimations des métriques phénologiques en soit différente.

Il n'est pas surprenant que le produit Copernicus, en utilisant des images du même satellite, se rapproche le plus des résultats obtenus avec la série temporelle Sentinel. Les différences observées peuvent être attribuées à plusieurs facteurs, tels que la qualité des images, la présence de nuages ou des particules atmosphériques pouvant affecter la précision des estimations. L'efficacité des traitements pour effectuer les corrections atmosphériques est également à prendre en compte.

Bien que l'objectif principal des deux approches est d'extraire des métriques phénologiques à partir des séries temporelles d'images, il est important de noter que les méthodes de Copernicus et celles utilisées dans ce mémoire diffèrent.

La méthode mise en place par Copernicus, utilise une fonction modèle double-logistique, et choisie spécifiquement pour « sa robustesse et sa capacité à traiter les lacunes de données, notamment pendant la saison hivernale dans les régions boréales » (Tian, F., 2021). L'utilisation de cette méthode montre bien que les images Sentinel-2 rencontrent une difficulté à suivre la dynamique saisonnière de la végétation par le manque de données (images) à la base de la construction des métriques phénologiques.

En revanche, nous avons opté pour une approche différente en utilisant une interpolation linéaire suivie d'un lissage par la méthode Savitzky-Golay pour traiter les données. L'interpolation linéaire permet aussi de combler les données manquantes, tandis que le lissage rend les données plus uniformes.

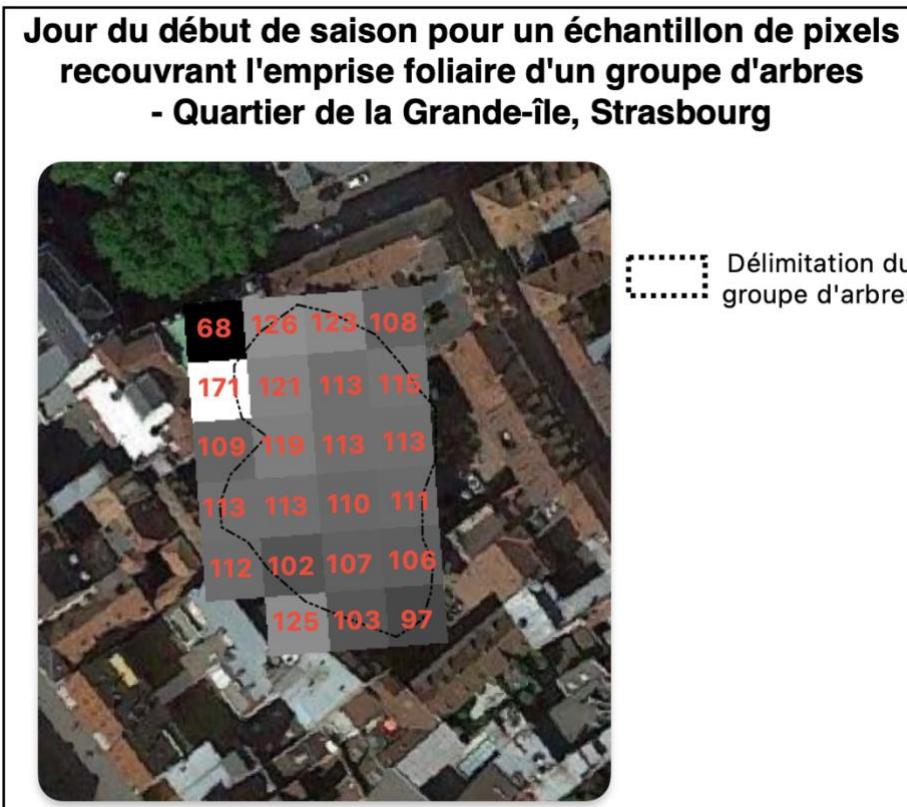


Figure 18 : Variation des dates du début de saison pour un échantillon de pixel dans le centre de Strasbourg

En examinant de près les données raster téléchargées, nous pouvons analyser la distribution du début de saison à l'échelle des pixels dans une zone d'étude spécifique. Nous avons sélectionné un groupe d'arbres formant une couverture foliaire continue dans le centre de Strasbourg. Il est ainsi possible de constater que les valeurs entre les pixels contigus peuvent être très variables, entraînant des différences significatives pour une métrique.

Dans cet exemple, nous observons une différence de 97 jours entre deux pixels adjacents. Ces pixels se situent à la frontière entre la zone de l'arbre et d'autres surfaces adjacentes, tels que des bâtiments. Ces surfaces présentent des propriétés différentes qui peuvent influencer les résultats de la date de saison à l'échelle de la couronne de l'arbre. Malgré tout, des différences d'environ 10 jours sont observables pour les pixels situés plus au centre de la couronne de l'arbre.

Cette situation est observée dans l'ensemble de l'Eurométropole de Strasbourg et souligne les limites du produit dans la production de données phénologiques pour la végétation. Le produit Copernicus fournit des résultats peu concluants pour le milieu urbain, comme le montre les résultats de la comparaison entre les milieux étudiés par l'article décrivant le produit Copernicus (*Feng, T., 2021*).

Nous allons à présent analyser les résultats pour nos deux séries temporelles uniquement, que nous pourrons également confronter avec ceux déjà trouvés dans cette première partie.

## II- Analyse de la variation des métriques phénologiques entre les séries temporelles Sentinel et Planet

### 2.1 Comparaison statistique pour chacune des métriques phénologiques

Les articles étudiés issus de Zhao, C. (2022), Galán Díaz, J. (2023), Hu, P. (2021), Granero-Belinchon, C. (2020) ou encore de Cheng, Y. (2020) montrent des amplitudes différentes dans le calcul des métriques phénologiques variant de 15 à 30%.

En prenant uniquement en compte l'analyse des séries Sentinel et Planet, il a été fait le choix de prendre la métrique fin de saison calculé à 25% de l'amplitude de la courbe de décroissance du cycle saisonnier, même chose pour le début de saison. Dans cette configuration, il nous a été possible de travailler sur une base d'environ 60 000 arbres. Le nombre d'arbres pris en considération est beaucoup plus important puisque moins de données ont dû être supprimées avant la définition des métriques phénologiques (suppression des lignes si les valeurs des amplitudes ne descendent pas en dessous de la valeur nécessaire au calcul de la métrique ; ici 0.25).

Cette nouvelle configuration est visible à travers les statistiques suivantes :

**Statistiques en fonction des différents sources d'acquisitions satellitaires**

Indicateurs	Sentinel			Planet		
	SOS	Peak	EOS	SOS	Peak	EOS
Moyenne	77.16	163.32	323.6	63.45	191.31	352.47
Ecart-type	25.63	29.81	27.78	24.79	58.62	12.83

Figure 19 : Statistiques pour chacune des métriques étudiées

A travers la moyenne, nous retrouvons un début de saison plus précoce pour la série temporelle Planet, d'environ 15 jours sur la série Sentinel. Au contraire, le pic de saison et la fin de saison est plus tardive pour la donnée Planet avec respectivement un retard de 28 jours et 29 jours. Les écarts à la moyenne pour la série temporelle Sentinel-2 montre une stabilité entre les trois métriques pour être entre 26 et 30 jours. Les résultats sont plus mitigés pour Planet avec un pic de saison aux valeurs très disparates ou au contraire une fin de saison plus regroupée autour de la moyenne.

La comparaison avec la première analyse statistique montre que la prise d'un plus grand nombre d'échantillons dans le jeu de donnée se concrétise par un avancement respectif de 3 et 8 jours pour la série Sentinel et Planet pour le début de saison. Le pic de saison est stable pour la donnée Sentinel et un recul de 14 jours pour Planet est observé. Les écarts-types augmentent légèrement. Combiné avec le changement dans le calcul de la métrique de la fin de saison, la série temporelle provoque un avancement de 19 jours pour Sentinel et de 6 jours pour Planet.

Malgré quelques changements, la configuration précédente avec la prise en compte de deux fois moins d'arbres, les résultats indiquent que la quantité de donnée restait suffisante pour l'analyse effectuée.

Une analyse de la distribution a également été effectuée, et disponible en annexe. L'étude de l'histogramme et de la courbe de densité pour chacune des métriques ne montre pas de différences significatives par rapport à la distribution des données dans la partie précédente.

## 2.2 Représentation de manière spatialisé des différences phénologiques entre les deux séries temporelles

A travers la visualisation sous la forme d'une carte, notre objectif est de représenter de manière spatialisée les données entre les deux séries temporelles pour mieux comprendre leurs répartitions.

Pour chaque métrique, deux informations sont exprimées : Premièrement, à l'échelle de chaque arbre, il est indiqué si la série temporelle Sentinel est plus précoce ou tardive sur la série Planet. Il est ainsi possible de repérer d'éventuelles différences spatiales pour certaines zones de l'Eurométropole. Deuxièmement, la dimension temporelle est également disponible, ce qui permet de quantifier ces différences sous la forme de jours entre les séries.

Pour créer cette nouvelle donnée, les dates de chaque métriques de la série temporelle Sentinel-2 ont simplement été soustraites à celles de la série Planet, et les résultats ont été ajoutés dans trois nouvelles colonnes. Ces nouvelles informations ont ensuite été regroupées en 11 classes, qui sont visibles à travers la légende. Les valeurs négatives indiquent donc un avancement de la série Planet par rapport à Sentinel-2, tandis que des valeurs positives indiquent un retard. Les classes ont été définies en fonction d'intervalles souvent associés aux dates, tels que des semaines ou des mois. Les résultats seront analysés sur une plus petite zone de l'Eurométropole, centré sur la ville de Strasbourg.

Le début de saison est marqué par un avancement général de la série Planet notamment dans le nord/nord-ouest de la zone étudiée avec une temporalité relativement importante (30j et plus). Le centre est marqué par un avancement moins marqué (entre 7 et 14j). L'ouest, le sud et une partie à l'est se détachent nettement ou cette fois-ci l'avancement concerne la série Sentinel.

**Comparaison de l'avancement ou du retard des métriques phénologiques des images Planet par rapport aux images Sentinel-2 pour chaque arbre durant la saison 2022 - Zoom sur le centre de Strasbourg**

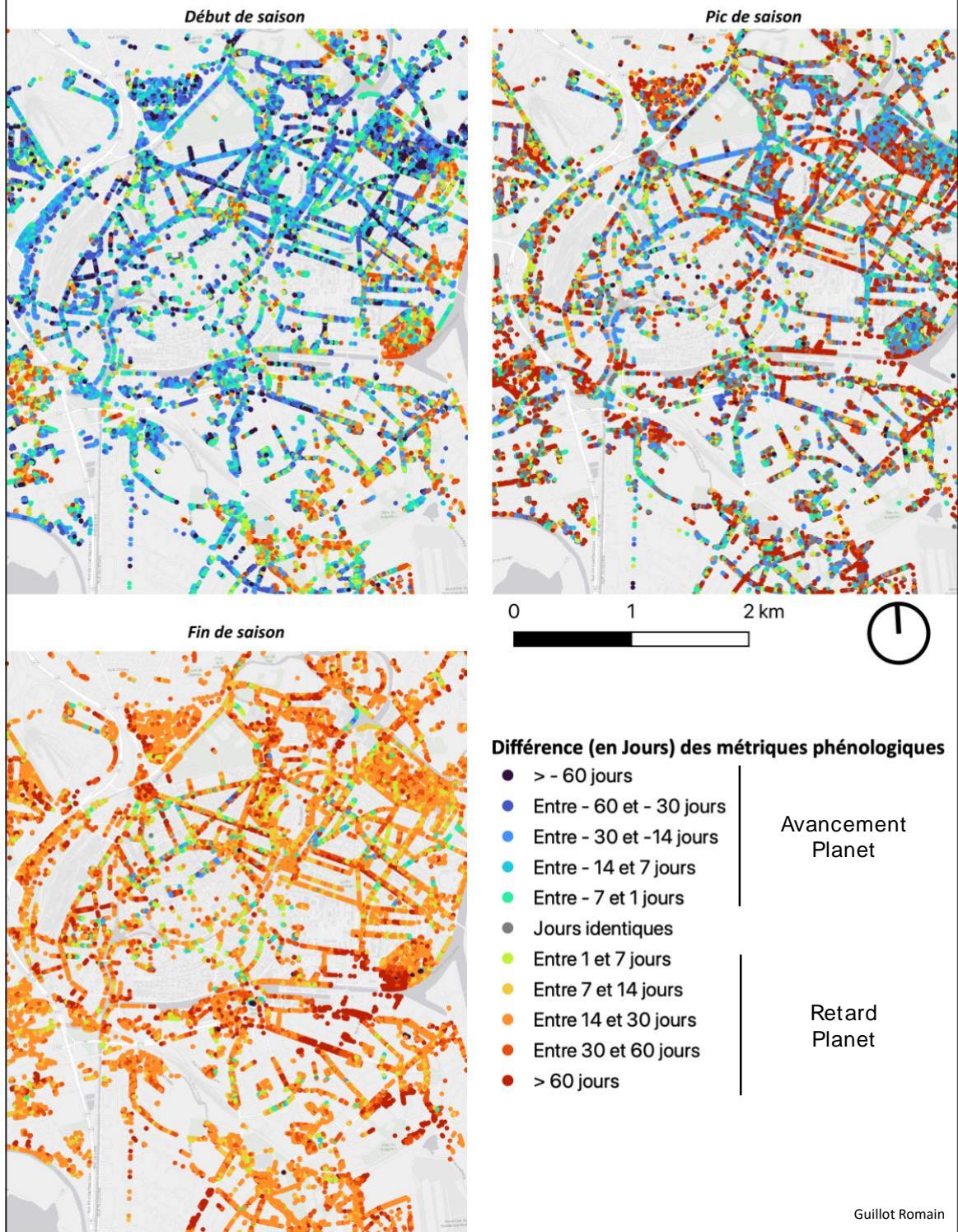


Figure 20 : Cartes montrant les différences des métriques phénologiques entre Planet et Sentinel

Le pic de saison est marqué par une situation très hétérogène ou peu de schémas spatiaux se distinguent. Le pic est plus précoce pour la série temporelle avec une majorité à plus de 60 jours d'écart, mais ou de manière très localisée, le phénomène inverse se présente.

Pour la fin de saison, seulement quelques arbres ont un petit retard sur Sentinel (centre-ville), et le reste de la ville est marqué par un retard compris entre 14 à plus de 60j de la part de la série Planet. Quelques rues et l'ouest de la zone d'étude (parc de la citadelle) se distinguent par un regroupement plus localisé de valeurs élevées.

Face à ces résultats, les séries semblent être distinctes pour chacune des métriques étudiées. Le recours à un nombre différents d'images et à travers des satellites aux caractéristiques différentes ne peuvent être que des facteurs affectant ces variations observées. L'acquisition des images entre les deux séries se font par des angles différents, une résolution spatiale et temporelle différente.

Nous allons retranscrire cette approche visuel sous forme statistique en étudiant spécifiquement la relation entre les deux séries temporelles.

## 2.3 Exploration des relations entre les métriques des séries temporelles Sentinel et Planet

### La régression linéaire : définition des indicateurs utilisés

L'équation générale est très souvent obtenue en parallèle de la droite de régression lorsque l'on souhaite analyser les résultats et celle-ci permet d'indiquer plusieurs paramètres. L'équation prend généralement la forme suivante (*Guyader, A. (2011) ; Foucart, T. (2006)*) :

$$Y_i = B_1 * X_1 + \varepsilon$$

Où **Y** correspond à la variable expliquée ;

**X** étant le coefficient directeur de la droite de régression ;

**B** défini comme la variable dépendante utilisée ;

**ε** (ou *e*) est la valeur résiduelle moyenne entre un point de la variable expliquée et dépendante

Plusieurs indicateurs ont été calculés pour obtenir des informations notamment quantitatives et plus détaillée entre la relation des deux séries temporelles :

- Le **RMSE** (Root Mean Square Error) mesure l'écart moyen entre les valeurs de métrique phénologique de nos données entre Sentinel et Planet ou Sentinel est la variable expliquée et Planet la variable explicative.
- Le **R<sup>2</sup>** (coefficient de détermination) mesure la proportion de la variance totale du jeu de donnée qui est expliquée par le modèle de régression.
- La **P-value** est utilisée pour représenter la significativité ou non de notre modèle de régression et peut être définie par plusieurs intervalles de confiance. Plus la valeur est proche de 0, plus les résultats sont significatifs.

En analysant la P-value (égale à 0), nous pouvons conclure que les résultats sont significatifs pour les trois régressions linéaires réalisées. Cependant, les coefficients de détermination R<sup>2</sup> (respectivement 0.09 ; 0.11 ; 0.1) indiquent que les deux séries temporelles ne sont pas corrélées et qu'une série temporelle ne permet pas de prédire les métriques pour l'autre série temporelle.

Les équations de régression linéaire montrent que les variables S2 (pour le début, le pic et la fin de saison) n'expliquent qu'une faible relation de la variable Planet. Avec des valeurs de RMSE élevées notamment pour le pic de saison, il est suggéré une moins bonne précision du modèle dans la prédiction de cette métrique phénologique par les séries temporelles. Tous les indicateurs s'accordent donc à dire que les séries sont significativement différentes.

Par l'étude de l'axe suivant, nous devrions obtenir des résultats également différents en étudiant les métriques par essences pour chaque série temporelle. Ce sera l'occasion de comprendre si certaines essences peuvent avoir des comportements différents et les identifier.

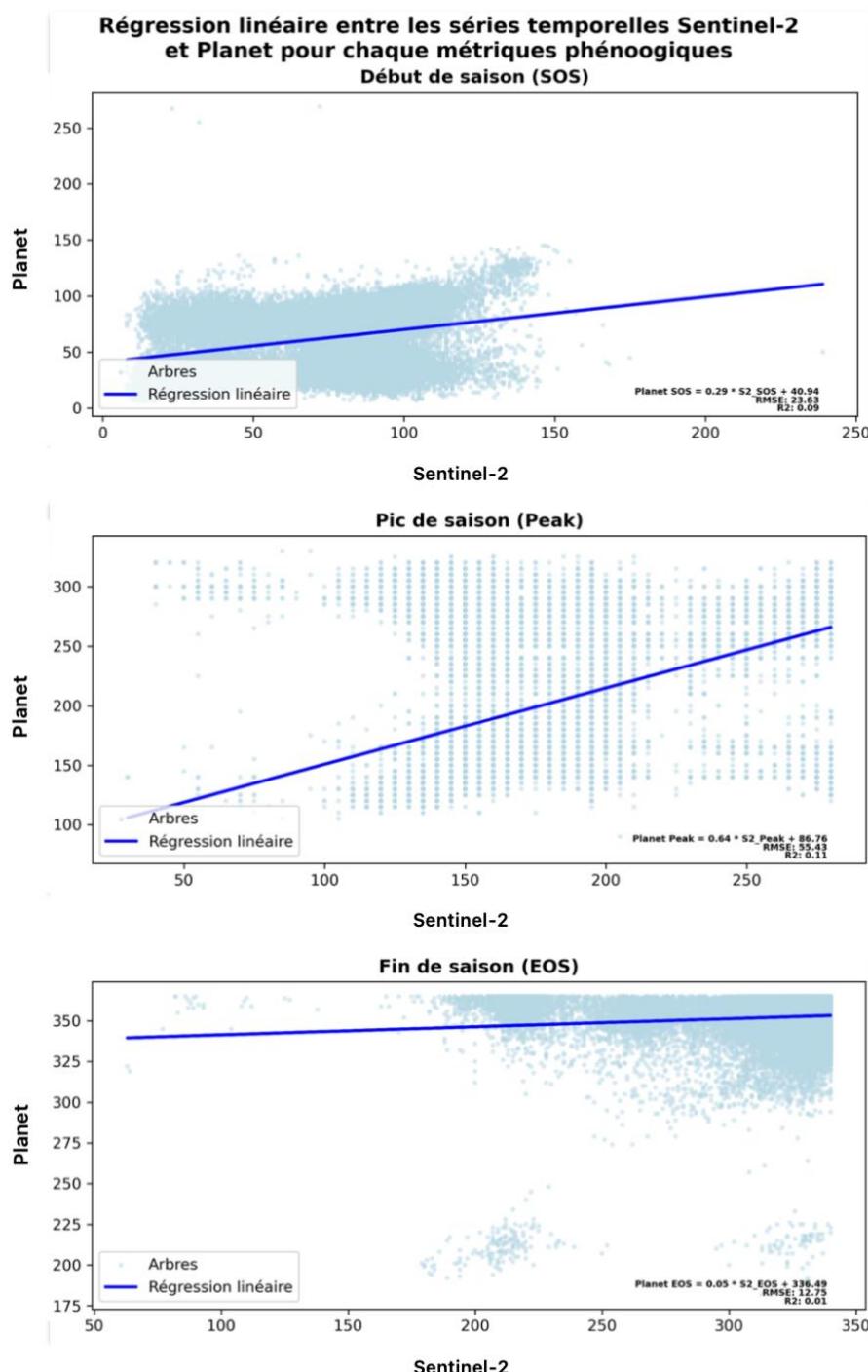


Figure 21 : Régressions linéaires entre Planet et Sentinel

## Axe de recherche n°2 : Étude des métriques phénologiques selon les caractéristiques spécifiques et de gestion des arbres

### I- Comparaison des métriques phénologiques entre les séries temporelles associées aux essences majoritaires

#### 1.1 Étude des variations entre les séries Planet et Sentinel

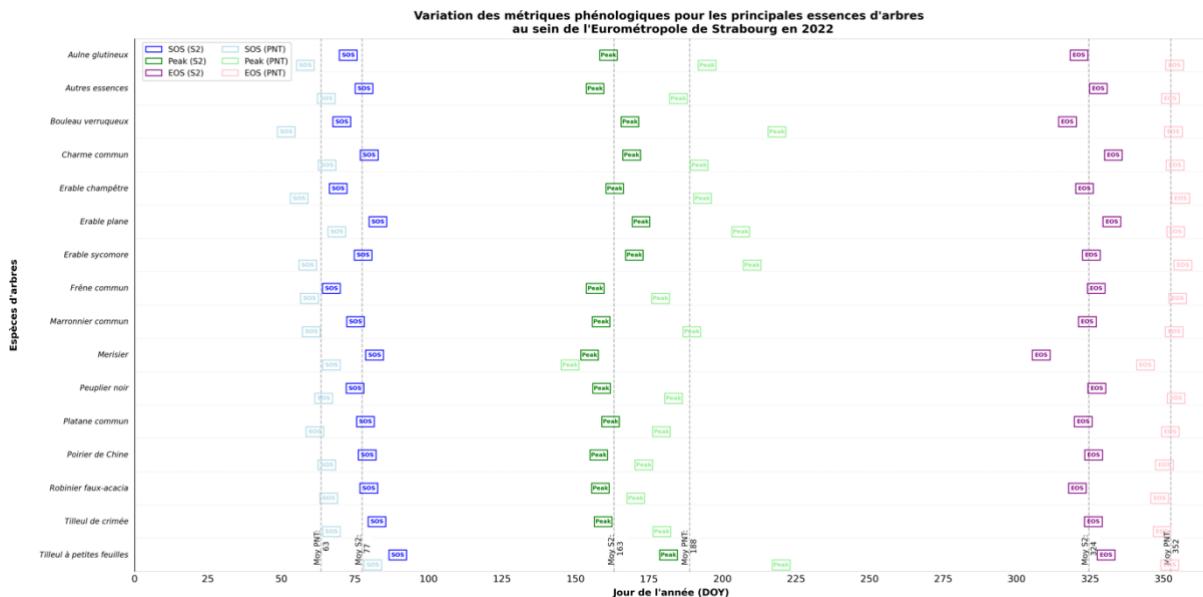


Figure 22 : Variations des métriques phénologiques pour les essences des deux séries temporelles

Ce graphique, généré à l'aide d'un script Python, permet d'obtenir une vue d'ensemble de la distribution des trois métriques phénologiques en fonction des 15 essences majoritaires pour nos deux séries temporelles. Les teintes les plus foncées correspondent à la série Sentinel, tandis que les teintes plus claires représentent la série Planet (schéma disponible en annexe). Les traits en pointillés indiquent les moyennes des métriques pour les deux séries.

En examinant la distribution générale de chaque métrique, nous retrouvons les phénomènes précédemment observés. Pour le début de la saison, la majorité des essences suivent un écart similaire entre les deux séries, à l'exception du bouleau où le début de saison est plus précoce. Pour le frêne commun, l'écart entre Sentinel et Planet est très faible, tandis que pour l'essence du tilleul à petite feuille, la métrique pour Planet intervient très tard.

Le pic de saison est marqué par plus de variabilité, notamment pour la première moitié du graphique, de l'aulne glutineux au merisier. Cette essence possède un comportement particulier puisqu'elle présente un début de saison tardif (supérieur à la moyenne), mais présente le pic de saison le plus précoce de toutes les essences étudiées (de 30 jusqu'à 50 jours avant d'autres essences). Le tilleul à petites feuilles possède également un pic de saison tardif, notamment pour la série Planet. On observe le même phénomène pour les érables planes et sycomores, ainsi que pour le bouleau verruqueux.

La fin de la saison est plus “ordonnée” autour des moyennes des séries temporelles, seul le mérisier sort du lot avec quelques jours d'avances.

Il est intéressant de pouvoir avoir une vue globale sur l'année en regardant quelles essences gardent la même tendance (retard/avancement) par rapport à la moyenne, et cela à travers les trois métriques. Le constat est assez divergent, puisque les essences se regroupent de manière équilibrée entre les deux situations :

- Essences avec un retard/avancement constant sur les moyennes (7) : Aulne glutineux, Charme commun, Érable champêtre, Érable plane, Érable sycomore, Marronnier commun, Tilleul à petites feuilles
- Essences avec un retard/avancement variant sur les moyennes (8) : Bouleau verruqueux, Frêne commun, Merisier, Peuplier noir, Platane commun, Poirier de Chine, Robinier faux-acacia, Tilleul de Crimée

Ces groupes sont donc équilibrés et c'est souvent le pic de saison, avec sa grande variabilité, qui détermine cette classification. À noter que des essences proches, telles que les trois essences d'érables, ont la même tendance. En revanche, ce n'est pas le cas des tilleuls, qui semblent donc plus éloignés en termes de caractéristiques saisonnières et de comportements.

Le tableau suivant permet d'ajouter une information plus précise pour les moyennes et écarts-types de chaque essence que l'on vient de décrire :

Essences	SOS <sub>sentinel</sub>		Peak <sub>sentinel</sub>		EOS <sub>sentinel</sub>		SOS <sub>planet</sub>		Peak <sub>planet</sub>		EOS <sub>planet</sub>	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
Aulne glutineux	79.9	21.4	169.1	24.6	332.9	13.4	65.5	20.0	192.1	50.1	353.9	8.3
Autres essences	72.7	27.5	161.2	30.5	321.2	32.1	58.2	25.2	194.8	61.7	353.7	14.0
Bouleau verruqueux	69.3	27.1	163.3	36.1	323.1	31.4	56.0	22.0	193.2	65.1	355.8	9.5
Charme commun	75.2	24.2	158.7	31.5	324.1	28.5	60.2	22.2	189.5	61.5	353.6	10.7
Érable champêtre	67.0	27.4	156.7	23.2	327.1	23.0	59.5	24.6	178.9	55.8	354.8	10.9
Érable plane	79.2	21.7	157.9	23.4	326.2	24.2	65.5	21.1	173.2	50.3	350.3	13.6
Érable sycomore	82.5	21.4	159.4	23.1	326.1	22.7	67.0	23.0	179.4	50.6	349.5	13.9
Frêne commun	75.1	22.5	158.9	21.4	327.3	21.8	64.4	21.5	183.3	52.2	354.2	8.7
Marronnier commun	77.8	25.8	170.0	33.9	325.4	28.4	58.9	24.2	210.1	61.5	356.6	7.8
Merisier	81.7	18.2	154.8	13.4	308.4	24.9	67.0	18.8	148.2	23.6	343.8	17.7
Peuplier noir	78.1	20.0	156.7	30.6	327.8	25.0	65.3	18.7	185.0	60.8	352.3	6.6
Platane commun	89.6	24.2	181.7	31.7	330.4	19.2	81.1	24.8	220.0	52.0	352.1	8.4
Poirier de Chine	70.5	28.4	168.5	35.2	317.3	32.2	51.6	25.1	218.5	64.6	353.3	11.5
Robinier faux-acacia	82.8	24.1	172.3	32.4	332.4	15.1	68.8	23.5	206.2	54.1	354.1	8.6
Tilleul de crimée	79.7	21.6	158.5	25.5	320.6	25.2	66.1	21.9	170.5	48.0	348.6	13.5
Tilleul à petites feuilles	78.6	21.5	161.9	29.9	322.6	26.5	61.4	22.6	179.3	53.1	352.3	13.1

Figure 23 : Comparaison statistique pour les deux séries temporelles

Les variations autour de la moyenne pour la série temporelle Sentinel restent équilibrées, avec des écarts-types de 20 à 25 jours pour les trois métriques phénologiques. C'est également le cas pour le début de saison de la série Planet. En revanche, les deux autres métriques ont des écarts-types de 50 à 60 jours pour le pic de saison et de 10 jours pour la fin de saison.

Certaines essences, telles que le bouleau verruqueux, l'éryable plane et l'éryable sycomore, ont un début de saison assez précoce et un pic de saison très tardif, ce qui indique que leur croissance saisonnière est beaucoup plus longue que leur période de déclin saisonnier. Le phénomène inverse est observable pour le mérisier.

A travers l'étude des essences pour les deux séries, nous pouvons faire le résumé suivant :

- Le début est similaire dans sa distribution par essences et proche en termes de jours.
- Le pic de saison est différent lié à une grande variabilité des essences pour la série Planet
- La fin de saison est marquée par une distribution plus variable pour Sentinel mais surtout plus tôt que Planet

Les différences observées peuvent être attribuées à l'acquisition d'images et aux caractéristiques propres à chaque satellite. Les images de Planet sont beaucoup plus nombreuses et offrent une couverture plus étendue de l'année 2022 (de mi-janvier à fin décembre) par rapport à Sentinel (de mi-février à fin septembre).

Par conséquent, la série temporelle de Sentinel-2 ne couvre pas la période de dormance des arbres et présente moins de chance de couvrir les variations saisonnières durant la saison. Les images tardives de fin d'année (notamment celle du 23 novembre et du 31 décembre) dans la série temporelle de Planet peuvent expliquer le décalage "tardif" de la fin de saison par rapport à Sentinel-2. En effet, nous avons réalisé un test en excluant ces deux dernières images, ce qui a conduit à une fin de saison plus précoce dans l'année (environ 15 jours).

Cet effet est lié à la façon dont nous avons défini les amplitudes saisonnières dans notre premier script Python, en prenant en compte que les 365 jours de l'année 2022. En incluant les premiers jours de l'année 2023, les valeurs d'amplitudes auraient été modifiées pour s'adapter à cette nouvelle échelle, pouvant dans notre étude, avancer la fin de saison.

Malgré la résolution temporelle élevée des satellites de la constellation Sentinel-2, la présence de nuages est la principale raison du manque d'images pour l'année 2022. Le plus grand nombre de satellites de la constellation Planet permet de réduire cet impact limitant de l'acquisition d'images optiques.

La résolution spatiale des images est un facteur essentiel, en particulier dans le cadre d'une étude en milieu urbain. La résolution de 3 mètres des images de Planet permet de mieux distinguer les variations des surfaces au sein du paysage urbain, ce qui affecte la quantité d'information reçue par le capteur du satellite. Les valeurs de NDVI calculés pour chaque pixels ainsi que la définition des métriques en seront dépendantes. La résolution spatiale de 10 mètres de Sentinel-2 entraîne un décalage plus tardif du début de saison en raison du paysage urbain pris en compte en plus des arbres comme les bâtiments, routes mais aussi pelouses (lié à leurs réflectances spectrales différentes). Ce phénomène est particulièrement vrai pour les arbres ou groupes d'arbres isolés entre des surfaces non végétalisées.

Face aux éléments évoqués, et en voulant entre autres étudier les métriques phénologiques en prenant en compte la meilleure résolution disponible, la série temporelle Planet sera utilisée pour les traitements et analyses qui vont suivre.

Nous avons pu mettre en avant la dynamique générale des essences à travers l'année 2022, mais il convient de comprendre plus en détail comment les essences se distribuent pour chacune des métriques phénologiques. Pour cela une sélection de quelques essences a été réalisée.

## 1.2 Représentation de la distribution pour quelques essences

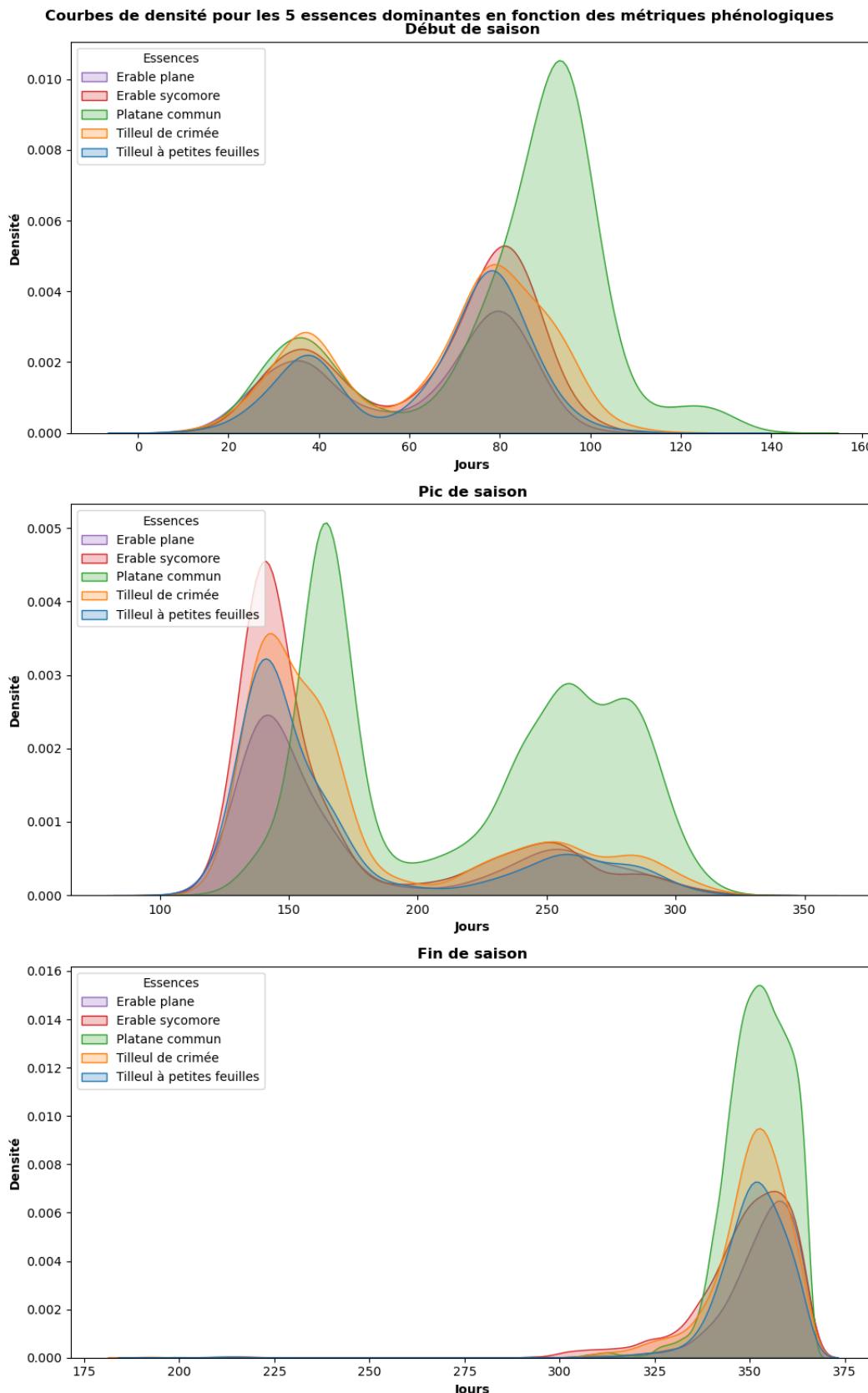


Figure 24 : Distribution des 5 essences majoritaires pour chaque métriques

Les courbes de densités des cinq essences majeures permettent de comprendre une grande partie de la distribution des arbres dans notre zone d'étude. En effet, les essences ont été choisies par leurs nombres d'arbres les représentants. Au début de la saison, on observe un premier pic où les essences commencent leurs développements plus ou moins en même temps (35<sup>ème</sup> jour). Un deuxième pic plus important est présent vers le 80<sup>ème</sup> jour (21 mars), à l'exception du Platane commun qui présente un décalage d'environ quinze jours.

Les deux essences d'érables et de tilleuls atteignent leur pic de saison vers le 150<sup>ème</sup> jour (30 mai), et il est remarquable de trouver des différences de densité entre ces essences. Le tilleul de Crimée présente un pic plus étalé dans le temps, d'environ 5 à 10 jours supplémentaires. Le platane commun suit la même logique que précédemment, avec un décalage dans le temps d'environ 30 jours par rapport aux autres essences. Un pic important est observé pour le platane, tandis que les autres essences présentent un pic plus faible, environ 100 jours après le premier pic. Ce deuxième pic important pour le platane s'explique par le fait que le premier pic est légèrement plus élevé que pour les autres essences, alors qu'il y a le double d'arbres de cette essence par rapport à l'érable sycomore et au tilleul de Crimée au premier pic.

En fin de saison, on observe une distribution plus homogène avec une moyenne autour du 355ème jour, et même quelques jours plus tard pour les deux essences d'érables.

La distribution de ces essences soulève la question des causes possibles de la formation de ces deux pics, qui correspondent à une séparation des individus, à un début de saison et pic saisonnier clairement différenciés. Il est possible que ce phénomène soit lié à des facteurs environnementaux spécifiques (comme la typologie du sol, les températures, les précipitations, etc.) ou à des pratiques de gestion des arbres et de leurs architectures. Il s'agit d'ailleurs du prochain critère à l'étude.

## II- Influence de la gestion arborée sur les métriques phénologiques par l'étude du type de port des arbres : étude comparative de 5 essences

La gestion des arbres se concrétise par des opérations de surveillances, de taillages et même de recherche (sélection des essences en fonction de leurs caractéristiques et du lieu en question par exemple) pour permettre aux individus de pouvoir être en bonne santé et continuer à produire les effets (services écosystémiques) bénéfiques des arbres sur le milieu urbain. Cela a pour objectif de réaménager ou de planifier l'aménagement d'un espace en prenant en compte le réchauffement climatique et les effets sur les essences (Alonzo, M. 2023). La gestion du patrimoine arboré comprend également l'étape de l'inventaire des ressources (Miller, R., 2015).

Plusieurs raisons peuvent contraindre la taille des arbres, telles que la prévention à des blessures causées par la chute d'arbres, synonyme de danger pour les personnes et de dégradations pour les infrastructures. Elle peut également réduire l'impact des pollens et autres allergènes, contrôler les parasites ou minimiser les désagréments liés à la chute de fruits ou de feuilles.

La gestion des arbres implique donc un entretien continu qui vise à intégrer les arbres dans leur environnement pour profiter de leurs services, tout en évitant certains inconvénients. Il existe une grande diversité de tailles d'arbres et d'architectures générales qui est possible de leur attribuer. Dans l'Eurométropole de Strasbourg, 7 types d'architectures différentes sont utilisées pour les arbres :

- Architecturé tête de chat
- Architecturé rideau
- Architecturé micro-tête
- Architecturé têtard
- Architecturé sélection de réitération
- Architecturé totem
- Architecturé autre

Les ports architecturés peuvent être définis comme une « taille répétée et prédéterminée tout au long de la croissance et de la formation de l'arbre », avec des critères esthétiques comme contrôle. Il existe également des arbres en reconversion, qui consiste à ne plus tailler l'arbre et à le laisser évoluer naturellement. L'arbre devient progressivement un port libre. Aucune opération de taillages n'est réalisée pour les ports libres à l'exception de quelques branches indésirables pouvant être enlevées, et le bois mort est ramassé (*codage de la base de données arborée*, 2022).

Pour étudier l'impact d'une méthode de gestion sur les métriques phénologiques, nous examinerons deux types d'architectures (libres et architecturées) et analyserons la distribution des métriques pour 5 espèces d'arbres. Toutes les catégories d'architectures mentionnées précédemment ont été regroupées pour faciliter l'analyse des résultats.

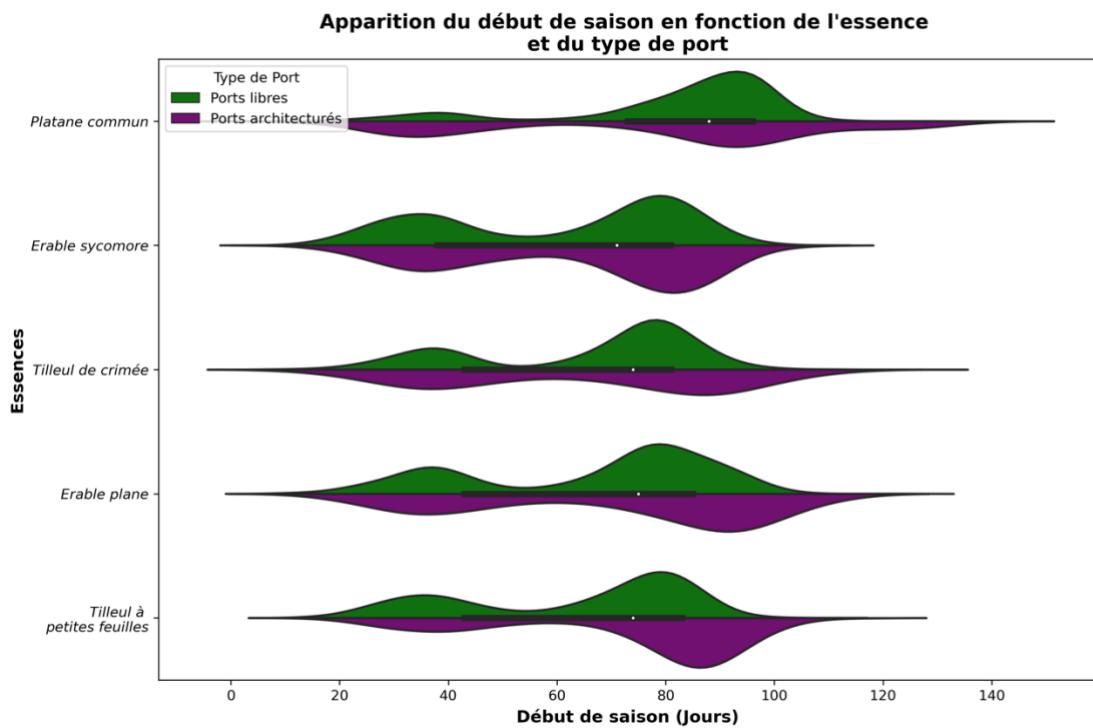


Figure 25 : Diagramme en violon du début de saison

Ce premier diagramme en violon met en évidence la distribution des cinq essences les plus courantes en fonction du début de saison. Comme mentionné précédemment, nous observons un début de saison pour une première vague d'individus, suivi du reste quelques jours plus tard. Nous remarquons que les arbres à port libre ont un début de saison plus précoce que ceux avec un port architecturé. Le premier pic est également caractérisé par une proportion plus élevée d'arbres à port libre. Cette tendance est observée pour les deux essences d'érable et de tilleul. En revanche, la dynamique est inversée pour le platane commun, où la situation semble différente par rapport aux quatre autres essences. Cela peut être dû à un équilibre plus important du nombre d'individus entre les deux types de ports, en faveur du port libre (63%), au contraire des autres essences ou ce ratio est moins équilibré.

Malgré tout, pour ces cinq essences, on observe que les derniers arbres à atteindre le début de la saison sont ceux avec un port architecturé, et que ce type de port à un début de saison plus étalé dans le temps.

Le graphique ci-dessous permet d'analyser la différence temporelle entre ces types de ports en comparant les moyennes de chaque essence pour chaque métrique.

Essences	Métriques phénologiques (en Jours) Ports libres - Ports architecturés			Gestion en fonction du type de ports Nombre d'arbres (en %)	
	Début de saison	Pic de saison	Fin de saison	Gestion (Ports architecturés)	Non gestion (Ports libres)
Platane commun	4.60	-24.04	-1.80	0.37	0.63
Erable sycomore	-4.91	-27.88	3.16	0.18	0.82
Tilleul de crimée	-11.16	-27.40	5.2	0.28	0.72
Erable plane	-0.01	-42.23	0.12	0.11	0.89
Tilleul à petite feuille	-3.97	-7.40	0.26	0.26	0.74

Figure 26 : Différences entre les deux types de ports pour chacune des métriques

Les situations en vert mettent en évidence que le port libre intervient plus tard que le port architecturé, tandis que les situations en rouge montrent l'inverse, où le port libre est en avance sur les ports architecturés.

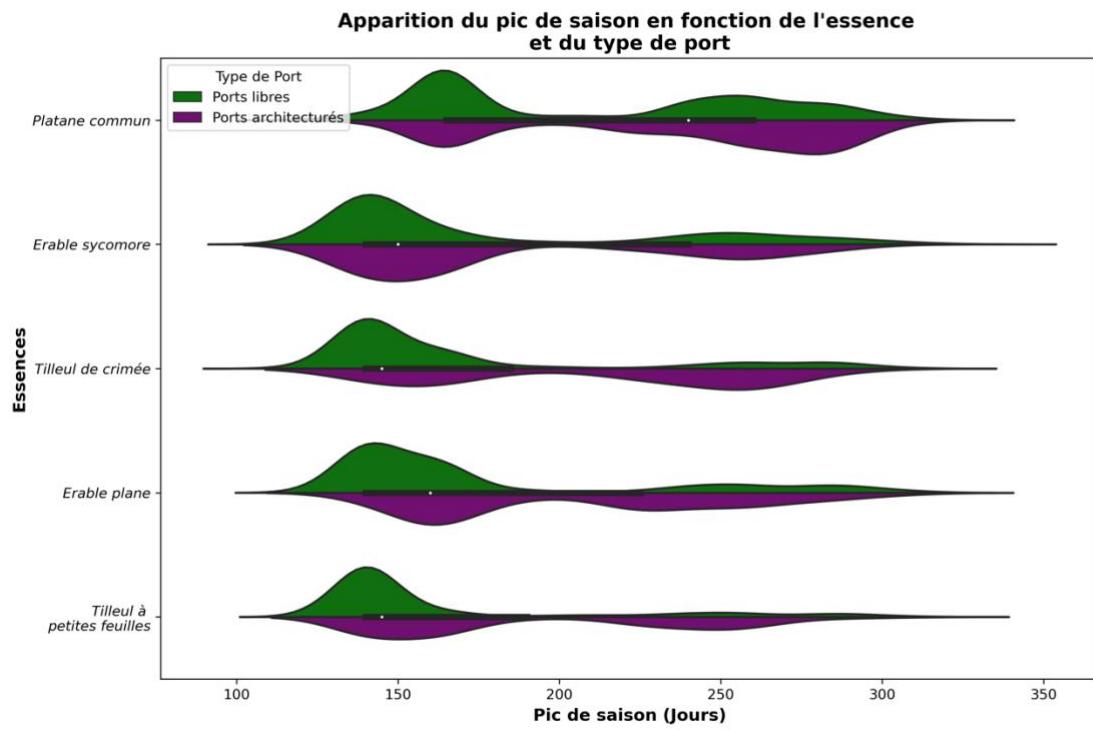


Figure 27 : Diagramme en violon du pic de saison

L'étude du pic de saison permet également d'observer une distribution intéressante des essences. Le pic de saison est caractérisé par une avancée des arbres à port libre, et ceux-ci sont majoritairement présents lors du premier pic. En revanche, les arbres à port architecturé se répartissent sur une plus longue période avec deux pics relativement distincts. Avec les données présentées précédemment dans le tableau, il est effectivement observé une différence significative en termes de jours entre les deux types de port. Les arbres en port libre peuvent avoir jusqu'à 42 jours d'avance sur le pic de saison pour l'érable plane.

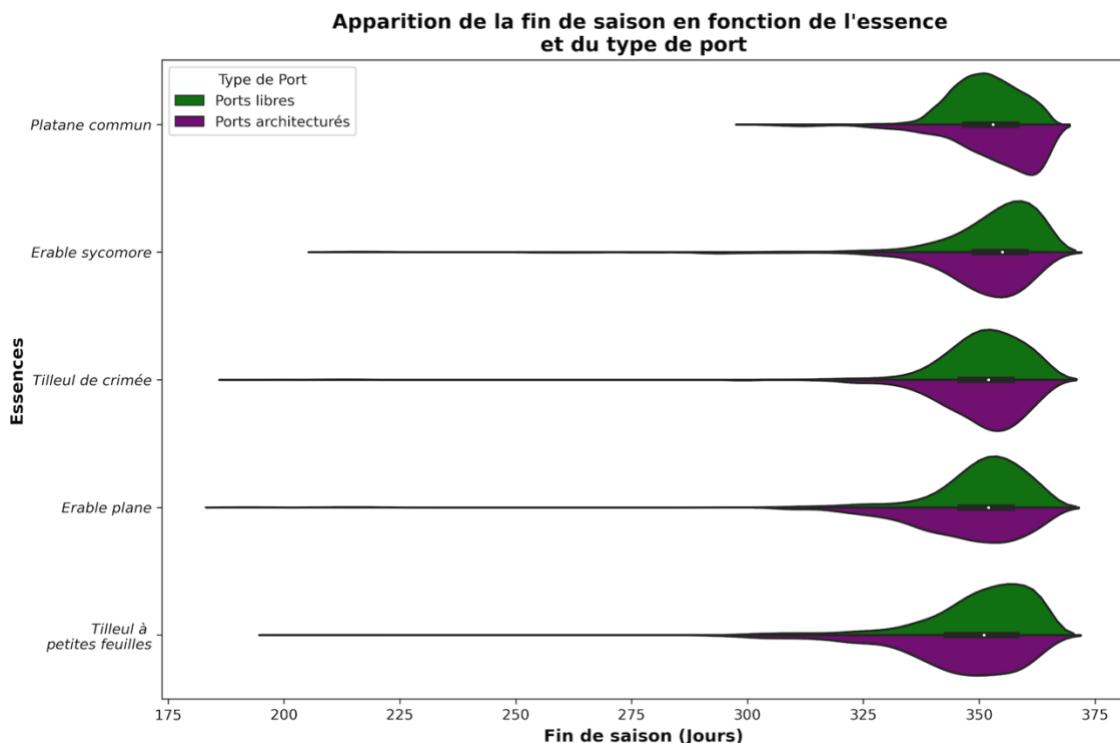


Figure 28 : Diagramme en violon de la fin de saison

L'analyse de cette dernière métrique est plus complexe. Contrairement aux deux métriques précédentes, la fin de la saison se caractérise par une avance des arbres à port architecturé par rapport aux arbres à port libre. Cependant, ces différences sont relativement minimes, atteignant au maximum 5 jours. Cette tendance "inverse" par rapport aux deux autres métriques pourrait s'expliquer par la distribution particulière des données en fin de saison. En effet, les données présentent une distribution asymétrique et se concentrent sur une période d'environ trente jours en fin d'année.

La proportion d'arbres de chaque essence en fonction de leur mode de gestion, résumée dans le tableau mentionné précédemment, apporte des informations supplémentaires à la distribution décrite précédemment. Le platane commun, qui présente un comportement légèrement différent des quatre autres essences étudiées, est l'essence ayant le port le plus architecturé (37%), tandis que les 4 autres essences ont les proportions de ports architecturés les plus élevées (jusqu'à 28% pour l'érable plane). Il est donc possible d'émettre l'hypothèse d'un lien probable qu'est la proportion des types de ports sur les dynamiques temporelles des métriques phénologiques (principalement pour le début et fin de saison).

En effet, l'avancement globale du début de saison par les ports libres peut être expliqué par leur surface foliaire plus étendue pour un pixel d'une image satellite, l'information associé à l'arbre aura une plus grosse proportion. Les ports architecturés peuvent plus se confondre avec les autres éléments du paysage urbain et rend des valeurs de pixels en NDVI plus élevées à un stade de croissance supérieur. Il peut s'agir du même phénomène pour le pic de saison. Enfin la dynamique de la fin de saison est en situation opposée, où l'information enregistrée de la végétation à port libre se fera plus tard dans l'année par la présence de branches et feuilles supplémentaires.

Ces résultats ne sont malgré tout pas représentatifs de l'ensemble des données puisque seules 5 essences ont été étudiées. En parallèle, l'analyse ne prend pas en compte les différenciations des 7 types de ports architecturés. De plus, il est fortement probable que plusieurs facteurs impactent la distribution des métriques phénologiques, et pas seulement les types de ports des arbres.

La composante spatiale semble être à présent nécessaire à étudier, puisque cet aspect n'a été que très peu abordé précédemment (représentation des différences entre images Planet et Sentinel-2) et peut être la cause de différences significatives sur les métriques phénologiques.

Par exemple, les arbres se localisant au sein de zones densément urbanisés, peuvent être impactés d'une manière différentes aux arbres se trouvant dans un par ou encore ceux dans un milieu urbanisé mais plus ouvert. L'axe de recherche suivant aura pour objectif de vérifier l'impact du milieu urbain.

## Axe de recherche n°3 : Étude de la variabilité spatiales des métriques phénologiques selon la morphologie urbaine et du gradient urbain

N'ayant pas spatialisé ces données plus tôt, il s'avère approprié de représenter nos métriques phénologiques remis dans le contexte de l'Eurométropole. Les données de métriques phénologiques ont été disposées sur une maille de 100 m, où chacune des mailles contient la valeur moyenne pour chacune des métriques. Cette simplification a pour objectif de représenter toute l'information de manière continue quand la visualisation sous forme ponctuelle n'aurait pas pu être bien visible.

Il s'agit également de découvrir si des tendances au regroupement de certaines métriques sont visibles au sein de certaines zones, pouvant ainsi y prêter d'avantages d'attention, notamment par les analyses qui vont suivre.

### Analyse visuelle

Cette première carte ci-dessous permet de montrer que la plupart des mailles ont des débuts de saison entre le 7<sup>ème</sup> et le 80<sup>ème</sup> jour. Il est difficile à première vue d'observer des répartitions préférentiels de classes de métriques. Cependant il est possible de voir que le centre de Strasbourg est marqué par un début de saison entre le 60<sup>ème</sup> et le 120<sup>ème</sup> jour. En partant vers le nord et l'ouest, une tendance se dessine et sur un début de saison apparaissant plus tôt. Le long du Rhin et au nord de Strasbourg, les séries de mailles conjointes représentant une série d'alignements d'arbres montrent des débuts de saisons plus élevés (supérieur au 100<sup>ème</sup> jour).

Il est également possible d'extraire des informations sur la répartition spatiale de la métrique du pic de saison. La partie ouest du centre de Strasbourg possède un regroupement de mailles aux alentours du 120-140<sup>ème</sup> jour, quant à l'est, les dates avoisinent les 180-200<sup>ème</sup> jour de l'année. Les alignements d'arbres évoqués pour le début de saison ont cette fois-ci un pic relativement tôt en remettant ces valeurs en perspective du reste des arbres. Enfin un regroupement tardif d'arbres est visible au sud de Strasbourg, et qui semble correspondre à une large zone de végétation.

Fort de leur regroupement dans une période restreinte (la palette de couleur a dû être inversée pour visualiser la répartition), la métrique de la fin de saison montre peu de variations à l'exception de l'hypercentre de la ville de Strasbourg où plusieurs mailles ont des métriques moyennes aux dates plus basses que le reste des données.

Ces premières visualisations nous ont donnés une première idée de la répartition des métriques dans l'Eurométropole. À présent, notre objectif est de comprendre les facteurs qui influencent cette répartition en utilisant une approche statistique et spatiale. Pour cela, nous adoptons deux approches complémentaires, ces dernières pourront faire l'objet d'une comparaison de l'apport (ou non) que chacune a pu avoir sur les métriques phénologiques.

Dans un premier temps, nous analyserons les données phénologiques en tenant compte de la morphologie urbaine. Ensuite, nous les comparerons à l'aide d'un gradient urbain afin de mieux comprendre l'influence de la distance par rapport à un centre urbain.

## Dates du début de saison phénologique des arbres au sein l'Eurométropole de Strasbourg en 2022 pour la série temporelle Planet

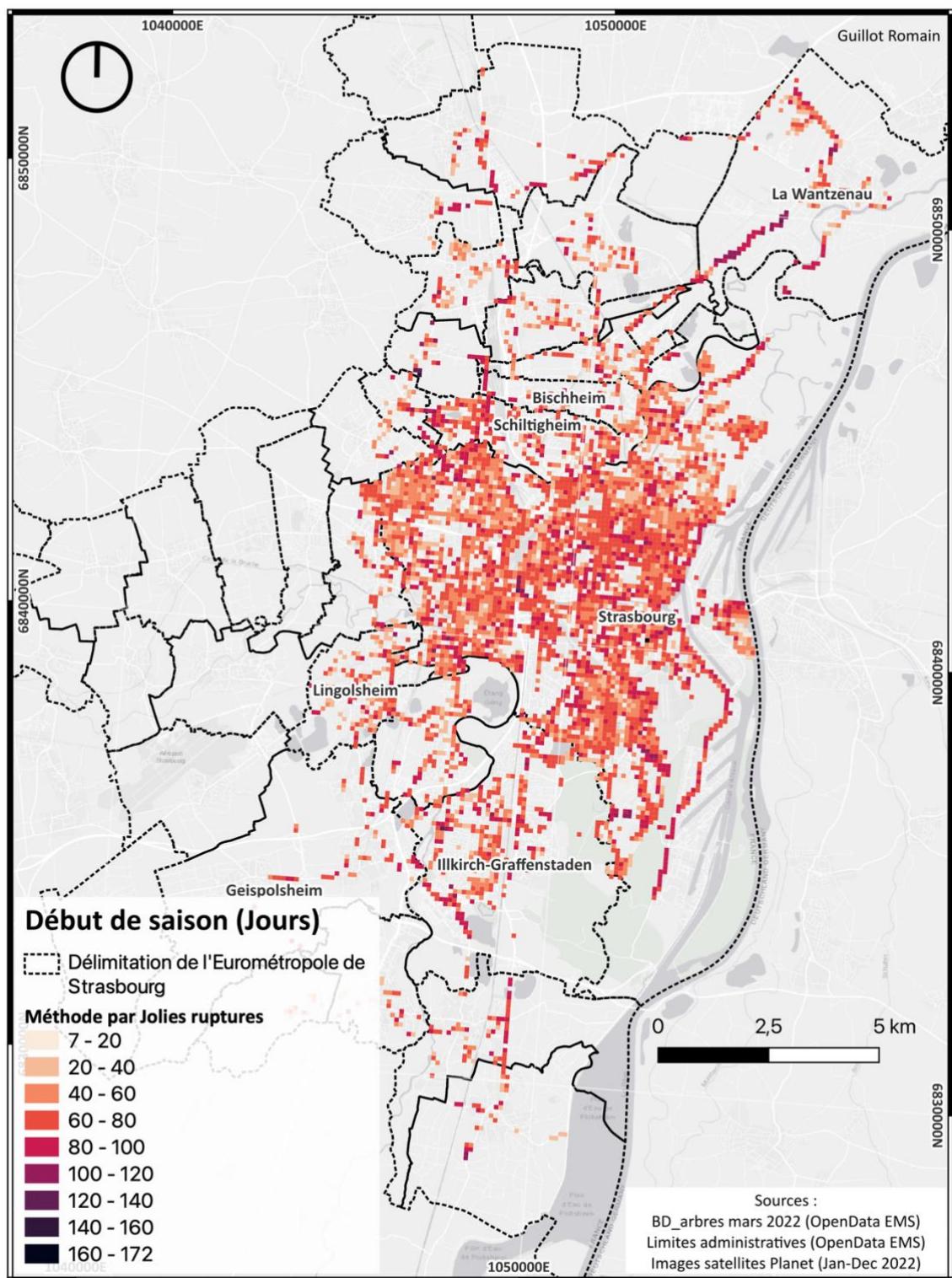


Figure 29 : Carte du début de saison

## I- L'usage des Local Climate Zones (LCZ) par méthode MApUCE pour la caractérisation de la morphologie urbaine

Les Local Climate Zones (zones de climat local) sont un système de classification composé de 17 classes uniques qui permettent de catégoriser les surfaces étudiées en fonction de leurs caractéristiques particulières. « Chaque type est unique dans sa combinaison de structure de surface, de couverture et d'activité humaine » (*Stewart, I. D., 2012*).

Les données à la base de cette classification sont à la fois des caractéristiques climatiques ou de la morphologie du milieu urbain. Les LCZ ont l'avantage de pouvoir être utilisés de manière universelle et permettent une comparaison entre territoires, notamment les villes. Évoquée dans la présentation des données, la méthode MApUCE a été sélectionnée par les résultats les plus performants pour notre zone d'étude face à d'autres méthodes présentées (*Dupre, L. 2022*).

L'objectif principal de l'utilisation des LCZ est de pouvoir comparer et détecter d'éventuelles dynamiques entre ces différentes classes qui composent la morphologie urbaine pour l'analyse des métriques phénologiques.

Les classes présentes (14) au sein de l'Eurométropole de Strasbourg, sont divisées en deux catégories (types construits et couvertures végétales), traduites et simplifiées de la définition complète de chaque classe (*Stewart, I. D., 2012*) :

- [1] '**Compact high-rise**' = Zones caractérisées par des bâtiments de grande hauteur avec une densité élevée.
- [2] '**Compact mid-rise**' = Zones avec des bâtiments de taille moyenne et une densité moyenne.
- [3] '**Compact low-rise**' = Zones avec des bâtiments de faible hauteur et une densité relativement faible.
- [4] '**Open high-rise**' = Zones caractérisées par des bâtiments de grande hauteur et une densité élevée, mais avec une proportion plus importante d'espaces ouverts.
- [5] '**Open mid-rise**' = Zones avec des bâtiments de taille moyenne et une densité modérée, mais avec une proportion plus importante d'espaces ouverts.
- [6] '**Open low-rise**' = Zones avec des bâtiments de faible hauteur et une densité relativement faible, avec un grand nombre d'espaces ouverts.
- [7] '**Lightweight low-rise**' = Zones avec des bâtiments de faible hauteur et une densité légère.
- [8] '**Large low-rise**' = Zones avec des bâtiments de faible hauteur et une densité élevée, mais moins compactes que les autres classes.
- [9] '**Sparsely build**' = Zones peu développées avec une faible densité de bâtiments.
- [101] '**Dense trees**' = Zones caractérisées par une végétation dense, telle que des parcs ou des forêts.
- [102] '**Scattered trees**' = Zones avec une végétation dispersée, comprenant des arbres isolés ou des petites zones boisées.
- [104] '**Low plants**' = Zones avec une végétation principalement composée de plantes basses, comme des pelouses ou des buissons.
- [105] '**Bare soil or sand**' = Zones avec un sol nu ou recouvert principalement de sable, sans végétation.
- [107] '**Water**' = Zones recouvertes d'eau

## 1.1 Distribution statistique des LCZ

Les diagrammes en boîtes permettent d'obtenir de nombreuses informations sur la distribution des données. La dimension du diagramme est notamment déterminée par les valeurs du 1<sup>er</sup> et 3<sup>ème</sup> quartiles représentant 25% et 75% du jeu de donnée. L'étendue de la boîte correspond également à l'écart interquartile (Q3 - Q1). Le diagramme en boîte possède également la médiane (ou Q2), qui est visible par une ligne à l'intérieur de la boîte. La médiane divise donc les données en deux parties égales.

Les lignes en « T » (également appelé sérifs) représentent les « valeurs adjacentes » fournissant une mesure de la dispersion des données, indiquant à quel point les valeurs peuvent s'éloigner des quartiles (1,5 fois l'écart interquartile, par défaut avec la librairie Seaborn utilisée). Enfin représentées sous forme de points, les valeurs aberrantes se situent en dehors de la plage normale des données et représentent ainsi les valeurs extrêmes pouvant affecter certains résultats (Le Guen, M., 2001).

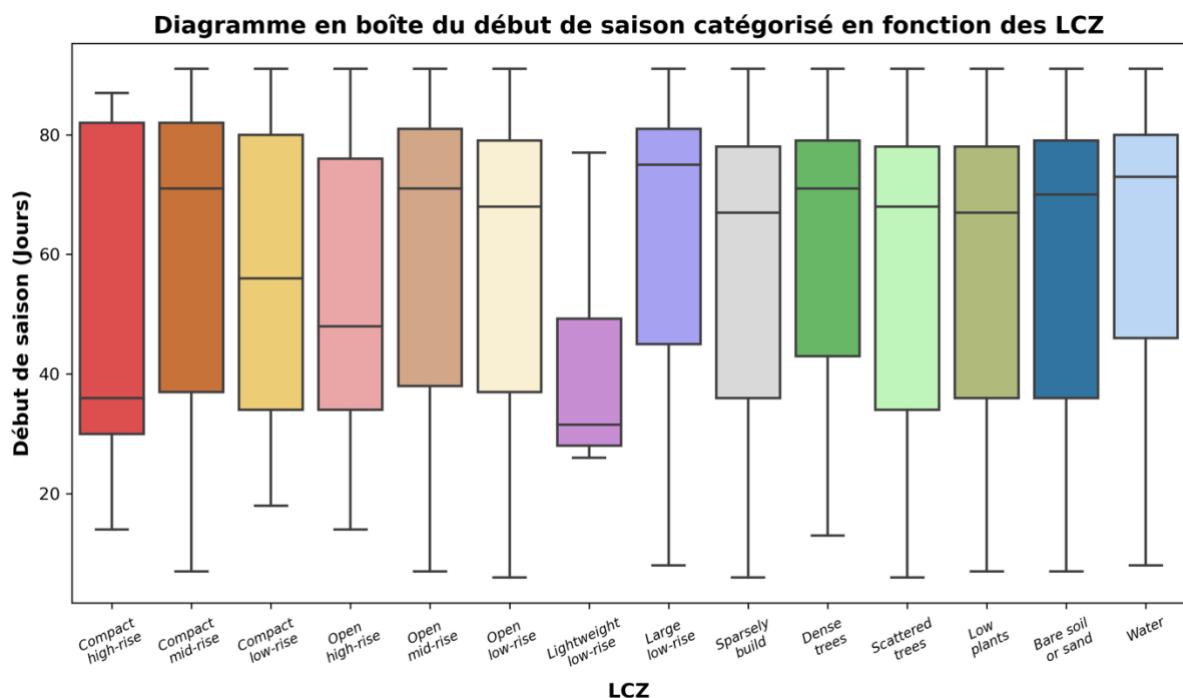


Figure 30 : Diagramme en boîte du début de saison

Pour le début de saison, ce premier diagramme met en évidence une relative homogénéité dans les étendues des boîtes pour la plupart des classes de LCZ. La classe compact high-rise correspondant à l'hypercentre de Strasbourg est marqué par une boîte la plus étendue indiquant que la moitié des arbres classés dans cette typologie ont un début de saison entre 30<sup>ème</sup> et le 80<sup>ème</sup> jour. Malgré tout, la valeur médiane est très proche du premier quartile (37<sup>ème</sup> jour), indiquant que cette classe ne suit pas une distribution normale mais plutôt asymétrique.

Les classes compact mid-rise, compact low-rise et open high-rise représentent une diminution progressive de la densité globale de la zone urbaine. Ces dernières sont représentées par des valeurs médianes en corrélation avec cette tendance, avec un début de saison médian déterminé respectivement au 70<sup>ème</sup>, 55<sup>ème</sup> et 50<sup>ème</sup> jour de l'année.

Les classes Open mid-rise et Open low-rise, correspondent à des espaces moins densifiés et plus ouverts. Contrairement à la tendance précédente, nous retrouvons des valeurs

médianes autour du 70<sup>ème</sup> jour, et des sérifs toutes aussi importantes que la classe compact mid-rise.

La classe lightweight low-rise est la seule qui se différentie de manière forte, avec un début de saison autour du 40<sup>ème</sup> jour ; les données sont concentrées proche du 1<sup>ère</sup> quartile ainsi que des valeurs plus dispersées pour le 3<sup>ème</sup> quartile. Cette classe fait référence à un habitat ouvert tel que de l'habitat résidentiel n'ayant pas ou peu d'arbres (Stewart, I. D., 2012). Les quelques arbres présents dans cette classe ne permettent pas d'obtenir une information très précise et représentative de la métrique dans cette zone.

Enfin les classes d'eau, de végétations et d'habitat résidentiel (Sparsely build) montrent une orientation similaire pour le début de saison, tant pour les écarts interquartiles, les valeurs médianes et les valeurs adjacentes. L'habitat résidentiel, où les arbres sont souvent disposés en parallèle de pelouses, est un facteur pouvant influencer le résultat pour cette classe et ici retrouvé presque de manière identique à la distribution de la classe végétation basse. Toutes ces classes ont une valeurs médiane du début de saison aux alentours du 70 – 75<sup>ème</sup> jour.

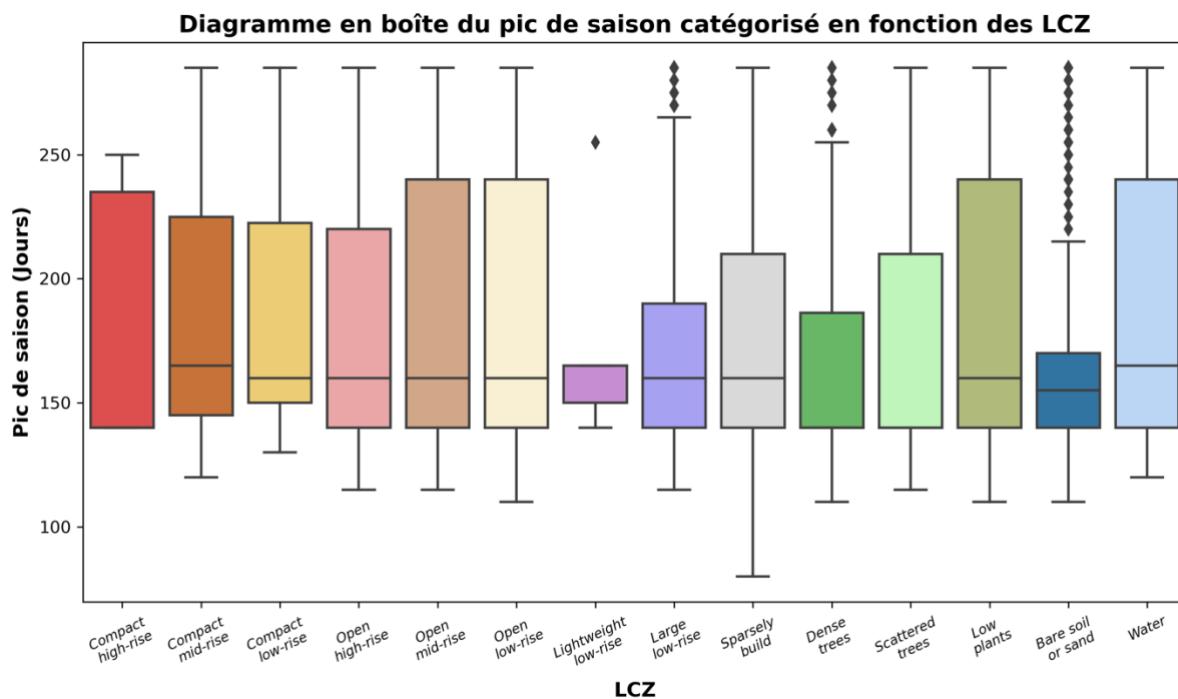


Figure 31 : Diagramme en boîte du pic de saison

Pour le pic de saison, nous retrouvons les 6 premières classes de LCZ avec des schémas similaires. Malgré tout, la classe possède un pic de saison plus tardif (env. 175<sup>ème</sup> jour) quand les 5 autres classes sont aux alentours du 160<sup>ème</sup> jour. L'ordre est inversé par rapport au début de saison.

L'étendue interquartile de la végétation basse et de l'eau sont relativement importante même si la valeur médiane reste proche du premier quartile (160<sup>ème</sup> jour). La valeur médiane des classes Large low-rise, Sparsely build, Dense trees sont également autour de la même date (9 juin). La classe Scattered trees est marquée par une médiane plus élevée (170-175<sup>ème</sup> jour) et il est intéressant de constater que le début de saison pour cette classe n'était pas différent des autres classes de végétations. Pour cette métrique, il est possible de formuler une hypothèse quant à ce retard, notamment par rapport à la classe Dense trees. Étant des arbres

isolés ou des bosquets d'arbres, l'information du pic de saison pour ces arbres est entachée d'une erreur pouvant être liée au type de végétation au pied et autour de ces arbres.

Au vu de la distribution de la classe Low plants, il est fortement probable que ce type de végétation ait déteint sur les résultats de cette dernière. Cette hypothèse, remis dans les conditions d'étude de ces LCZ (sous forme de mailles), la rend légitime.

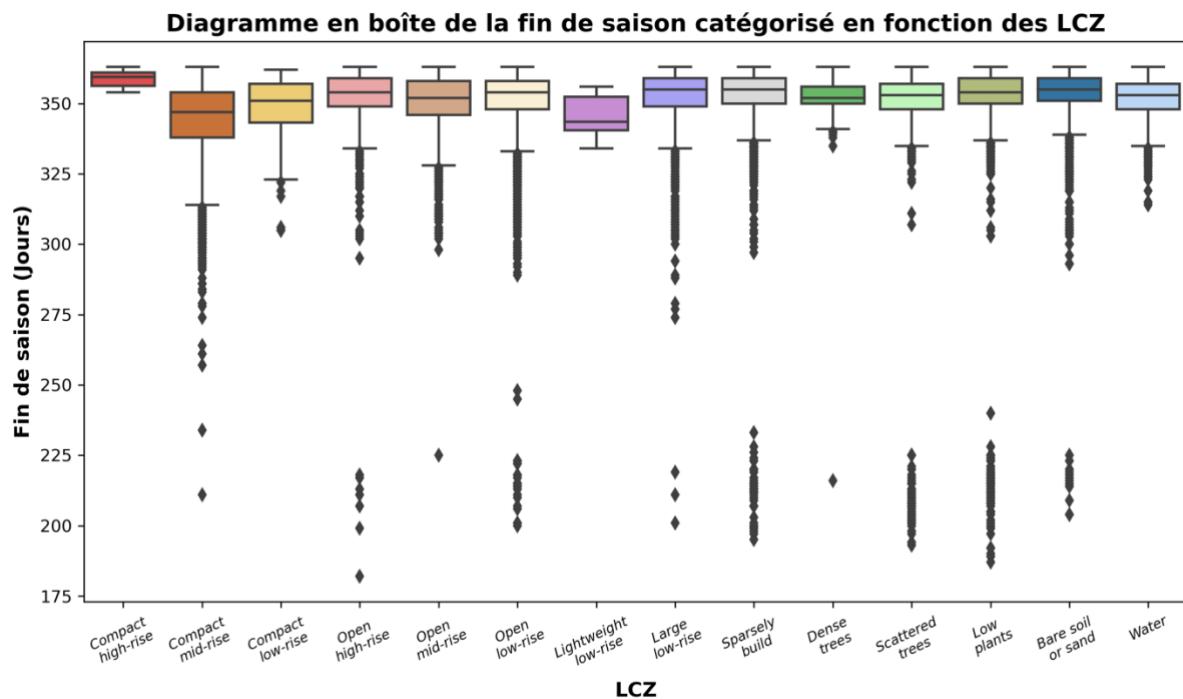


Figure 32 : Diagramme en boîte de la fin de saison

Pour la fin de saison, il est plus difficile d'analyser les résultats. La majorité des arbres a en effet une fin de saison se concentrant sur quelques jours et la faible étendue entre les quartiles permet de confirmer ces propos déjà mis en avant. Il est néanmoins possible de faire trois constats sur cette distribution.

La classe Compact mid-rise (et d'ailleurs Lightweight low-rise) ne possède pas de valeurs extrêmes, signifiant que toutes les données ont une distribution normale. La fin de saison est la plus tardive (env. 350<sup>ème</sup> jour). Ce résultat va à l'encontre de l'analyse visuelle effectuée, où nous avions pu remarquer que le centre avait les jours de fin de saison les plus précoces.

La classe Lightweight low-rise et Compact mid-rise ont quelques jours d'avance sur le reste des classes présentes. Nous ne pouvons pas donner de réelles explications quant à cette distribution. Enfin la plupart des données ont des valeurs extrêmes comprises entre le 175<sup>ème</sup> et le 330<sup>ème</sup> jour.

Les résultats présentés montrent qu'il est difficile d'obtenir des résultats concluants montrant que la morphologie urbaine à travers les LCZ exerce une influence claire sur les métriques phénologiques des arbres. Seules quelques indices évoqués plus haut nous laissent penser qu'il existe néanmoins une relation mais qu'à travers cette analyse, cette dernière semble restée cachée.

Ces résultats remettent en question la méthode utilisée pour extraire les informations des LCZ. Il est possible qu'une méthode différente, ou dans notre cas la prise en compte d'une dimension différente pour nos grilles, puisse être une source d'amélioration, étant donné que l'utilisation de grilles de 100 mètres de côté semble introduire une erreur importante dans le

cas où il existe une relation entre la morphologie urbaine et la phénologie des arbres. Malgré tout, cette approche semble être une option viable car elle correspond à l'échelle du quartier, où des microclimats locaux peuvent varier.

Se basant également sur les LCZ, l'étude de *Zhao, C. (2022)* sur la ville d'Austin (Texas) aux États-Unis avait mis en avant leurs utilités et montré que le début de saison de la végétation était plus précoce dans les LCZ caractérisés par un habitat urbain dense. Étudiant une ville nord-américaine, l'utilisation de ce type de typologie n'est peut-être pas la plus adaptée pour la morphologie urbaine des villes européennes. En effet, les caractéristiques urbaines et environnementales peuvent varier considérablement entre les villes de ces deux continents, ce qui soulève la question de l'efficacité des LCZ dans le contexte européen. Le support d'un article évoquant cette classification sur une ville européenne aurait été une source d'information utile pour notre étude, à la fois dans la méthodologie ou de la comparaison des résultats.

Par conséquent nous allons explorer une autre approche pour comprendre la spatialisation des métriques phénologiques dans notre zone d'étude.

## II- Exploration de la distribution spatiale des métriques par un gradient urbain

Le gradient urbain est un procédé qui permet d'observer des variations d'un phénomène étudié (les métriques phénologiques) en fonction de la distance par rapport à un point de référence et en fonction des caractéristiques de la surface présent au sein du gradient. Ces derniers sont souvent utiles pour l'étude des variations entre le milieu rural et urbain (*Kroll, F., 2012*).

En examinant les différences dans les métriques phénologiques des arbres le long de ce gradient, nous allons chercher à déterminer si l'éloignement par rapport au centre urbain exerce une influence sur le moment où les différentes phases de développement des arbres se produisent.

Pour chaque anneau du gradient, nous avons calculé la valeur moyenne des trois métriques phénologiques pour les 15 essences principales, ainsi que pour cinq essences traitées individuellement. Ces cinq essences sont celles qui ont le plus grand nombre d'arbres, sans prendre en compte des essences communes telles que l'Érable plane et l'Érable sycomore. Les cinq essences sélectionnées sont le Platane commun, l'Érable sycomore, le Tilleul de Crimée, le Frêne commun et le Marronnier commun (voir annexe pour les résultats pour chaque essences<sup>2</sup>).

Nous pouvons émettre l'hypothèse que l'éloignement par rapport au point de référence à un impact sur la date d'apparition plus tardive des métriques phénologiques. De plus, cette répartition sous la forme d'une distance pourrait varier selon les essences.

La carte ci-dessous permet la visualisation du gradient pour le début de saison de l'Érable sycomore.

---

<sup>2</sup> Pour chaque métriques, les gradients suivent la même logique pour la méthode de discréétisation des données (et la représentation sous forme de dégradé de couleurs)

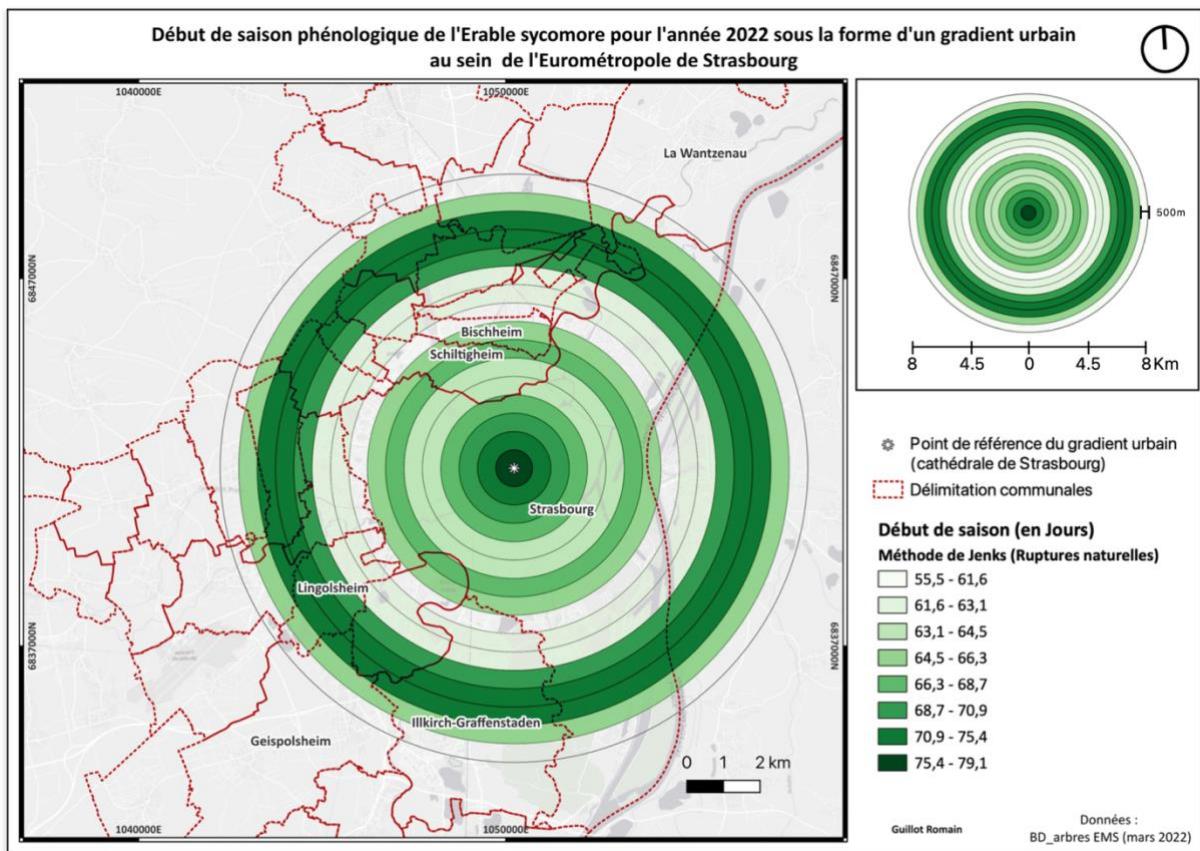


Figure 33 : Exemple du gradient urbain pour l'érable sycomore

## 2.1 Analyse visuelle

En examinant visuellement pour cette essence en particulier, nous pouvons observer une tendance claire. Dans la première couronne (inférieure à 500 mètres), les arbres ont un début de saison plus tardif, avec une moyenne au 79<sup>ème</sup> jour (voir tableau ci-dessous). Le début de saison tend à se dérouler de plus en plus tôt à mesure que l'on s'éloigne progressivement du centre jusqu'à 4 km. Entre 6 et 7 km par rapport au centre, les moyennes augmentent à nouveau (entre le 69<sup>ème</sup> et le 75<sup>ème</sup> jour).

Nous pouvons également comparer cette tendance pour les autres essences en utilisant la même métrique. Les 4 essences prisent individuellement ainsi que les 15 essences étudiées simultanément montre une dynamique similaire malgré quelques variations. Ces variations peuvent être attribuées au nombre d'arbres constituant la donnée de cette couronne, ou tout simplement des essences qui ont un comportement singulier.

Seul le Tilleul de Crimée ne présente pas de début de saison tardif dans sa première couronne, mais le comportement des couronnes suivantes (entre 500 m et 1.5 km) suggère une exception probablement due à un faible nombres d'arbres et de leur non représentativité par un phénomène localisé touchant ces arbres. Il serait intéressant de regarder en détail l'environnement direct de ces arbres.

En ce qui concerne le pic de saison, la distribution spatiale observée pour le début de saison est moins prononcée pour cette métrique. Nous remarquons pour de nombreuses essences deux couronnes voisines avec des jours de pic de saison variables d'une couronne à l'autre. Cela est particulièrement vrai dans l'intervalle de 3 à 7 km.

Bien que cela soit plus difficile à mettre en évidence pour le marronnier, les autres essences étudiées montrent un gradient progressif où la fin de saison devient de plus en plus tardive avec la distance (jusqu'à 7 km notamment). Pour chaque métrique et essence, les dates moyennes des métriques phénologiques en fonction de la distance sont présentées dans le tableau suivant :

Comparaison de l'apparition des métriques en fonction des essences pour le gradient urbain																		
ID	Début de saison																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
Distance (m)	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000		
Platane commun	93	72	78	83	78	79	77	84	84	88	85	78	74	91	76	99		
Erable sycomore	79	73	71	69	65	64	67	65	62	63	63	69	75	74	66	56		
Tilleul de Crimée	58	71	69	68	62	62	64	61	65	65	57	47	83	63	70	41		
Frêne commun	83	76	72	70	64	63	61	68	58	58	62	69	63	69	72	99		
Marronnier commun	74	68	70	68	65	63	63	62	60	73	76	67	63	71	68	35		
Essences majoritaires (15)	74	68	67	64	61	61	61	64	61	62	62	67	70	66	64	67		
Pic de saison																		
ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
Distance (m)	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000		
Platane commun	212	207	215	214	221	222	229	222	235	232	224	209	223	235	220	199		
Erable sycomore	196	174	187	191	166	183	179	178	183	173	175	156	150	166	151	183		
Tilleul de Crimée	174	186	168	174	173	160	171	161	168	179	164	150	160	161	189	150		
Frêne commun	189	155	181	165	174	178	187	187	218	189	180	158	163	187	170	216		
Marronnier commun	163	145	149	153	143	153	154	149	152	148	152	158	147	137	137	144		
Essences majoritaires (15)	200	187	187	189	186	193	198	196	198	192	183	186	193	190	188	191		
Fin de saison																		
ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
Distance (m)	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000		
Platane commun	336	349	351	353	352	350	355	351	355	357	356	353	356	357	350	346		
Erable sycomore	344	347	343	348	350	352	353	355	352	350	349	351	362	356	354	361		
Tilleul de Crimée	342	342	344	348	352	349	352	354	356	356	357	356	354	357	356	357		
Frêne commun	340	346	347	354	352	353	355	355	356	357	356	354	347	355	359	357		
Marronnier commun	347	335	333	349	349	347	353	352	351	353	339	353	345	358	356	346		
Essences majoritaires (15)	344	344	347	352	352	353	355	354	354	355	356	355	356	357	357	354		

Figure 34 : Comparaison statistique des métriques en fonction du gradient urbain

Nous allons maintenant procéder à une analyse statistique pour confirmer la relation entre les dates d'apparition des métriques phénologiques et le gradient urbain. Pour ce faire, nous allons mettre en évidence ces tendances à travers un graphique en ligne.

## 2.2 Analyse statistique

Les graphiques ci-dessous représentent les moyennes des métriques phénologiques en fonction de la distance et complètent l'analyse cartographique. Pour le début de saison, nous observons une diminution progressive du temps phénologique jusqu'à 4 km. Entre 4 et 7 km, le début de saison reste constant aux alentours du 70ème jour. Seul le platane ne suit pas cette tendance et présente un début de saison environ 10 jours plus tard sur l'ensemble du gradient. La dernière couronne (entre 7,5 et 8 km) montre des tendances complètement différentes, probablement en raison du faible nombre d'arbres dans cette zone.

En effet, alors que 4010 érables sycomores sont recensés dans l'ensemble de l'Eurométropole, seuls 6 arbres se trouvent dans la dernière couronne du gradient urbain étudié. Cette situation se répète pour les deux autres métriques, et il est important de prendre en compte les 7 km depuis le centre du gradient pour une analyse adéquate par rapport aux autres couronnes.

L'analyse du pic de saison reste complexe, bien que ce graphique nous permette de constater que le pic saisonnier est plus précoce d'environ vingt jours pour la plupart des essences, à l'exception du platane. La date du maximum saisonnier reste relativement stable

malgré l'éloignement du centre, comme le montre la courbe regroupant les 15 essences majoritaires.

Enfin, le dernier graphique confirme également que le gradient exerce une influence sur la fin de saison des arbres.

Ces derniers entrent plus tôt en période d'hivernage lorsqu'ils se trouvent dans le centre-ville de Strasbourg par rapport à la périphérie, avec des différences d'environ 10 à 15 jours.

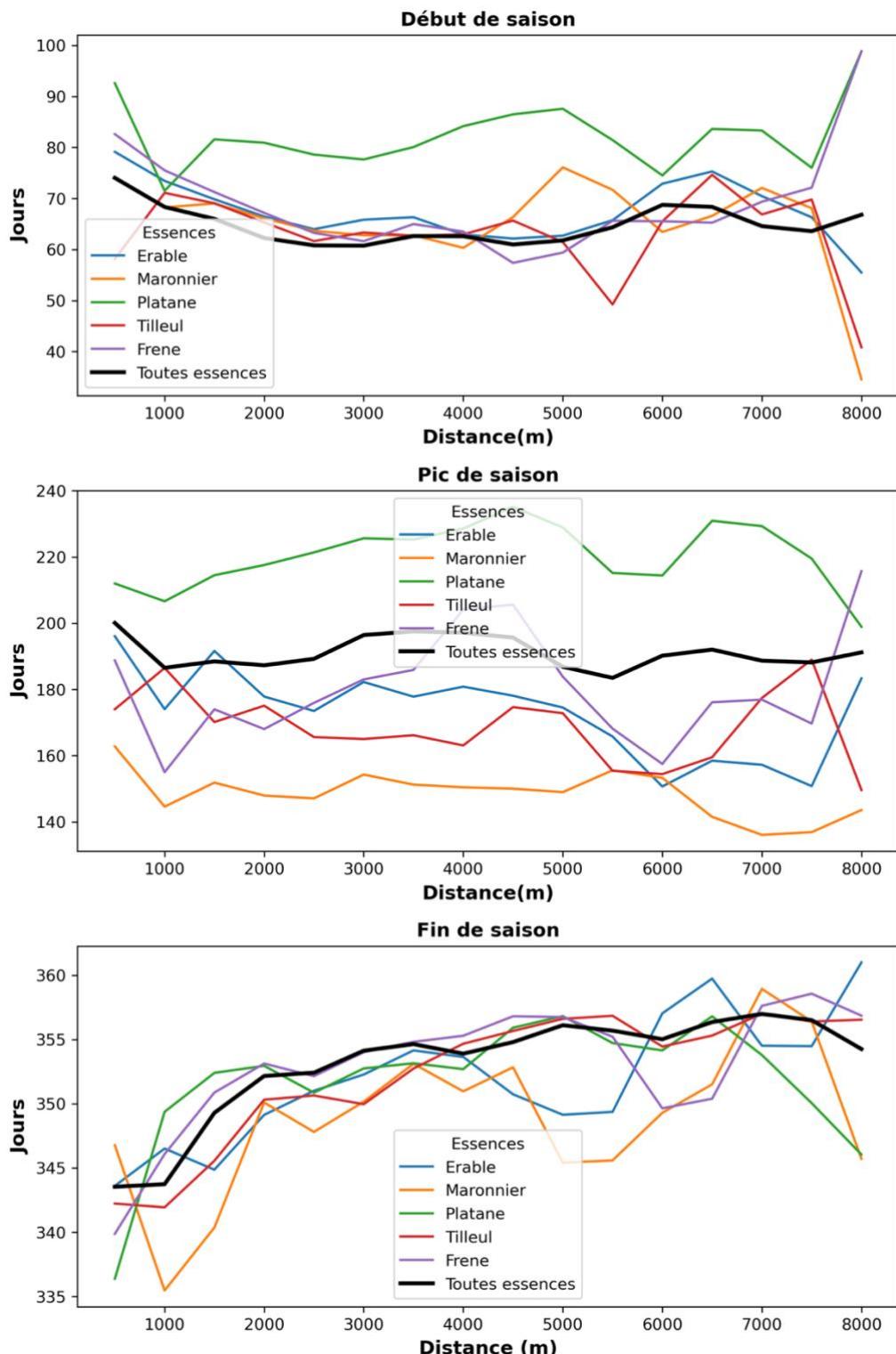


Figure 35 : Graphiques en ligne du gradient urbain

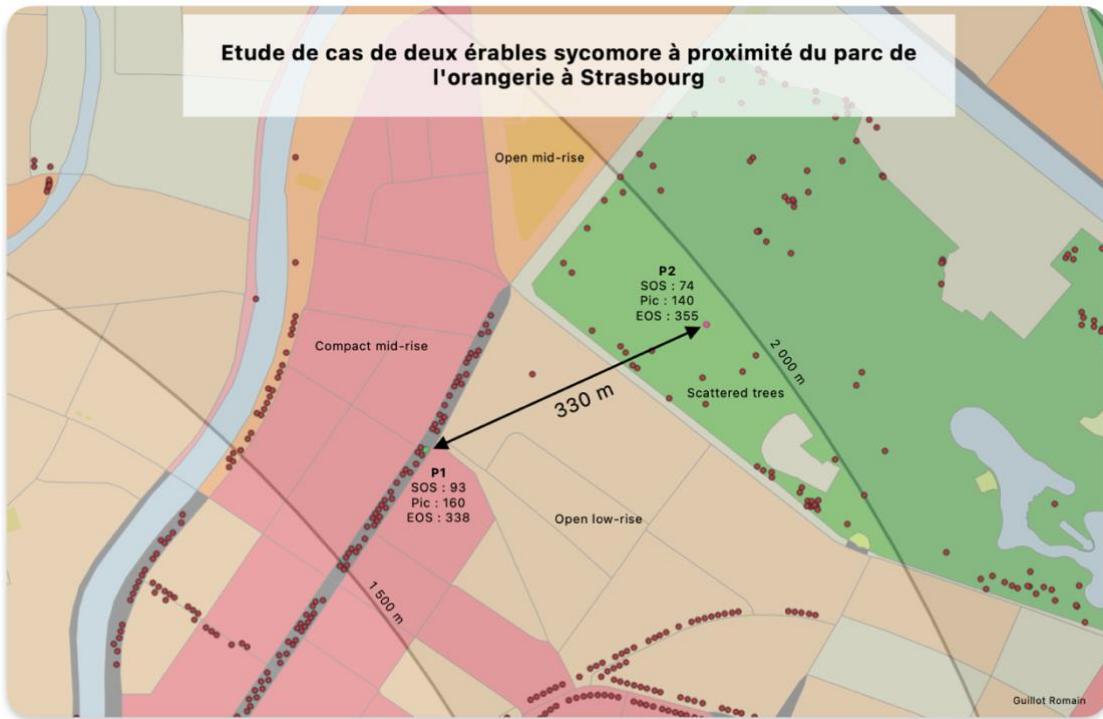


Figure 36 : Étude de cas du gradient urbain - LCZ

Cette étude de cas plus localisée permet de mettre en perspective les différentes analyses mises en avant dans ce troisième axe de recherche. La spatialisation des métriques et l’interprétation de leur dynamique temporelle au cours de la saison 2022 n’a pas été aussi visible que les résultats attendus.

Bien que les résultats soient assez convaincants pour le gradient urbain, ils sont plus contrastés pour les LCZ, ce qui indique que les méthodes utilisées ne sont pas optimales. La présence de deux érables dans la même couronne, situés à seulement 330 mètres l’un de l’autre, montre des différences d’environ 20 jours pour chaque métrique phénologique. Leurs emplacements dans des zones urbaines aux morphologies différentes nous laissent penser qu’il s’agit d’un facteur jouant un rôle pour la variation de la phénologie au sein d’une saison, et même que cela puisse être une combinaison de ces facteurs.

L’étude de la fin de saison selon le gradient urbain à travers le graphique précédent montre que l’érable et le marronnier présentent un comportement particulier entre les couronnes du 5<sup>ème</sup> et du 6<sup>ème</sup> kilomètres. Nous pouvons émettre l’hypothèse qu’un facteur local puisse être la cause de ce comportement différent. Dans cet intervalle de distance, la majorité des arbres de ces deux essences se localisent au niveau de zones de végétation, correspondant aux classes 101, 102 et 104 des LCZ (Dense trees, Scattered trees, Low plants). Ces arbres, ou nous pouvons suggérer qu’ils soient plus regroupés, pourraient donner une autre dynamique à cet ensemble ; notamment en comparaison aux arbres en zones plus artificialisées tel que les rues ou ces derniers sont principalement en alignement. Enfin cette baisse de quelques jours dans cette métrique pourrait s’appuyer sur la méthode de gestion des arbres. Dans les parcs et bosquets, les arbres semblent être moins sujets aux taillages de leurs branches. Pour rappel, l’étude des ports avait montré que les ports libres avaient des métriques (sauf pour la fin de saison où la situation n’était pas très marquée) globalement en avance sur des arbres architecturés. Ces deux situations plus localisées pourraient faire l’objet d’une recherche plus poussée.

## Discussion

A travers les différents traitements mis en avant par les axes de recherches, nous pouvons faire plusieurs retours quant à l'amélioration des résultats trouvés :

### Données utilisées – Statistiques zonales

Les statistiques zonales ont permis l'attribution des valeurs de NDVI pour chaque couronne, une étape à la base des autres traitements réalisés par la suite. Repérés visuellement par endroit, les diamètres de couronnes ne correspondent pas toujours à l'emprise réelle de l'arbre pouvant avoir comme conséquence une valeur de NDVI biaisé. Venant de la base de données arborée des services publics, la méthode pour l'obtention de cette information à l'avantage d'être uniforme sur l'ensemble des données. Nous pouvons prendre ces erreurs comme étant localisées et peu représentatives à l'échelle de l'Eurométropole.

En parallèle la prise en compte de la valeur médiane pour les statistiques zonales a été justifiée mais d'autres statistiques peuvent être envisagées. La comparaison entre ces statistiques (médiane, moyenne, valeur maximale) pourrait être étudiée sur la base des métriques phénologiques.

### Méthodologie – Axe de recherche n°2 et n°3

La caractéristique d'alignement des arbres n'a pas fait l'objet de recherches faute de temps et de données manquantes. Il s'agirait d'une étude importante pour comprendre si des éléments comme le regroupement d'arbres (bosquet) ou leurs alignements le long de routes pourraient avoir une incidence sur les métriques. Cette donnée peut s'avérer utile pour la gestion des arbres dans le but de faire une sélection d'essences appropriées en fonction du milieu en question.

Tous ces éléments pourraient être étudiés en prenant d'autres métriques phénologiques, tel que la longueur de saison. Ayant recours à de nombreux scripts python et à la donnée déjà préparée, la comparaison des résultats trouvés par la série Planet aurait pu être faite avec Sentinel-2, et cela pour les axes de recherche n°2 et 3.

Cette possibilité n'a pas été retenue par le temps qu'il nous était disponible, mais cela pourrait être intéressant de l'étudier pour compléter d'avantage la comparaison entre les séries temporelles par la suite.

L'axe de recherche n°3, sur la représentation des métriques de manière spatialisée, a montré des résultats pour la morphologie urbaine en demi-teinte face aux hypothèses qu'il aurait été intéressant de valider. La dimension du maillage pour l'analyse des LCZ pourrait être ré-évaluée, ainsi que la méthode pour extraire l'information des LCZ de départ. A l'inverse, le gradient et son échelle de distance revus à la baisse. Cette distance avait déjà été réduite (16km au départ), constatant un manque d'arbres dans les dernières couronnes.

De plus, un essai a été entrepris pour représenter les métriques phénologiques pour l'ensemble de l'Eurométropole. La réalisation d'une interpolation spatiale a été effectuée par une méthode de krigeage. N'étant pas fonctionnel sur les logiciels SIG, ce procédé a été réalisé via python et en prenant en compte les mailles de 100 m déjà réalisées. Les résultats trop incohérents et ne correspondant pas à la distribution que pourrait avoir la donnée en réalité n'ont pas permis d'afficher ces traitements. La prise en compte d'une méthode différente ou de données de type point pourraient faire l'objet de meilleurs résultats. L'obtention de manière

continue d'informations pour l'ensemble de l'Eurométropole peut être une base intéressante pour obtenir le comportement saisonnier des autres arbres constitutants la zone d'étude (terrains privés notamment).

#### Autres choix de données – Perspective d'un travail ultérieur

Dans l'idée d'en comprendre davantage sur la phénologie des arbres, d'autres aspects peuvent être étudiés à l'avenir et ainsi avoir une base d'analyse plus diversifiée. Présent dans de nombreuses villes, le phénomène d'îlots de chaleur peut faire varier le climat local (des températures plus élevées notamment) et ainsi avoir de possibles différences au niveau des comportements des individus arborés. Cette donnée pourrait ainsi être utilisée et mise en perspective avec les métriques phénologiques.

Dans le même ordre d'idée, la prise en compte de données climatiques pourrait également être un choix, en complément ou non des îlots de chaleurs. Il serait intéressant de sélectionner les températures, les précipitations ou même l'humidité de l'air. Ces facteurs ont été évoqués dans plusieurs études scientifiques. En effet, les îlots ou l'augmentation de la température dans les zones étudiées ont pu mettre en évidence des modifications dans la phénologie des arbres en milieu urbain. Cela aurait apporté un intérêt de retranscrire ce phénomène au sein de notre zone d'étude.

#### Comparaison de résultats issus d'articles

De part ces articles, le milieu urbain semble avoir majoritairement un impact sur l'avancement du début de saison des arbres. Dans notre étude, nous ne retrouvons pas clairement ce phénomène à travers les deux méthodes spatialisées. La comparaison des résultats issus d'écrits scientifiques serait une base intéressante lors d'un prochain travail en utilisant d'autres données.

## Conclusion

Les arbres sont bien ancrés dans le paysage urbain et sont largement appréciés pour les bénéfices qu'ils permettent d'obtenir sur l'environnement urbain et sa population. L'écosystème urbain (milieu influencé par l'activité de l'homme) est façonné de multiples facteurs qui ne contribuent pas au développement optimale des arbres et des différentes essences au sein des villes.

Pour l'Eurométropole de Strasbourg et l'année 2022, l'étude de la dynamique spatiale, spécifique et d'un critère de gestion s'est révélée utile pour comprendre la dynamique saisonnière des arbres. Les métriques phénologiques du début, du pic et de la fin de saison ont été le support à l'exploration de la phénologie. L'usage de la télédétection, à très haute résolution spatiale, s'avère une manière efficace pour l'étude du milieu urbain. L'usage de deux séries d'images temporelles, issu du satellite Sentinel-2 et Planet, ont été analysées tout comme un produit de phénologie calculé à partir d'images Sentinel-2.

Les résultats comparant ces trois sources d'acquisitions ont rapidement mis en avant la difficulté du produit Copernicus à obtenir des résultats cohérents pour le milieu urbain. Les deux séries temporelles ont également montré que ces dernières étaient très divergentes dans les résultats des métriques phénologiques. Ces différences ont été mises en relation avec les caractéristiques propres aux satellites, à la fois par la résolution spatiale, spectrale ou temporelle.

La prise en considération, uniquement de la série temporelle Planet, a permis de réaliser divers traitements couvrant l'étude de plusieurs facteurs pouvant influencer la phénologie arborée. L'analyse de la distribution entre essences permet de montrer que ces dernières peuvent présenter des différences significatives tel que le platane commun. En continuité l'investigation selon le critère de gestion des ports d'arbres met en avant l'impact de la taille des arbres avec une adaptation de leurs cycles de développement, correspondant à un retard de quelques jours sur les arbres laissés en développement libre.

Enfin la recherche de facteurs ayant une dynamique spatiale a démontré que l'influence sur la phénologie des arbres ne vient pas d'un seul critère au sein d'une ville, mais d'une combinaison de facteurs qui peuvent interagir sur le cycle des arbres. Le recours, au Local Climate Zones et à un gradient urbain, a montré l'impact de la distance ainsi que de la morphologie urbaine sur les arbres. L'impact de la morphologie urbaine n'a pas été clairement identifiée mais de nombreux indices impactant certaines métriques phénologiques ont été mis en avant, laissant penser une relation restant cachée par une méthodologie peu efficace.

Ce mémoire a permis d'étoffer le sujet de la phénologie, d'en maîtriser le patrimoine arboré en ville tout en garantissant une évolution des recherches, d'améliorer et d'approfondir l'étude à travers de nouveaux aspects.

## Annexes

### Répartition du nombre d'arbres en fonction des métriques phénologiques et des différentes sources d'images acquises

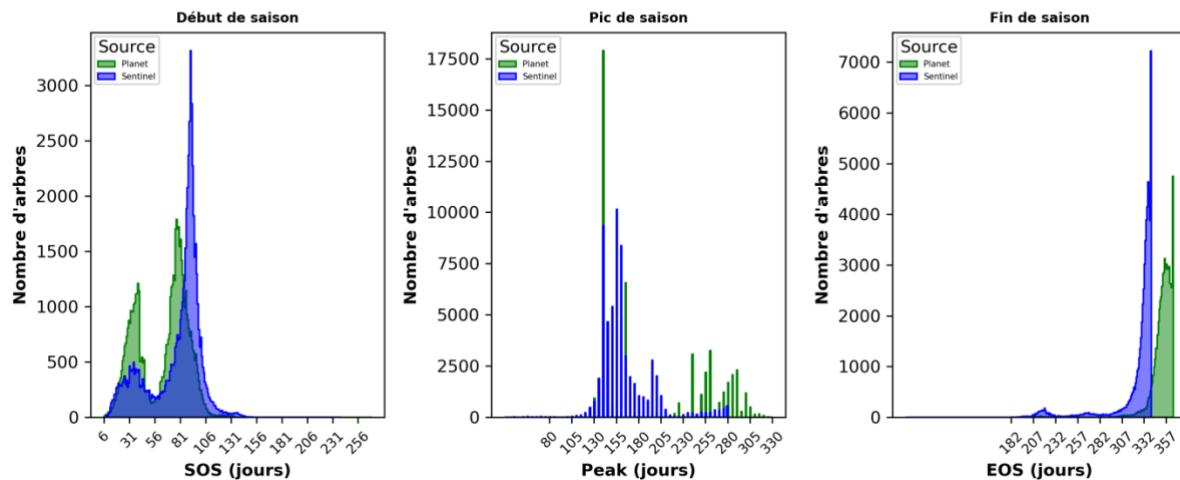


Figure 37 : Histogramme de la série Sentinel et Planet

### Courbes de densité des métriques phénologiques en fonction des différentes sources d'images acquises

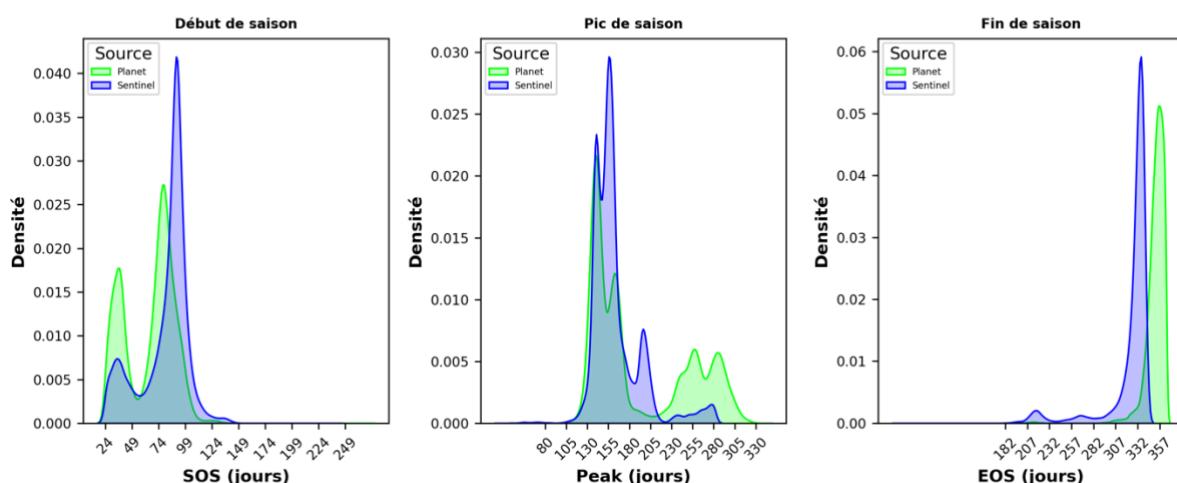


Figure 38 : Courbe de densité de la série Sentinel et Planet

**Variation des métriques phénologiques pour les principales essences d'arbres au sein de l'Eurométropole de Strasbourg en 2022**

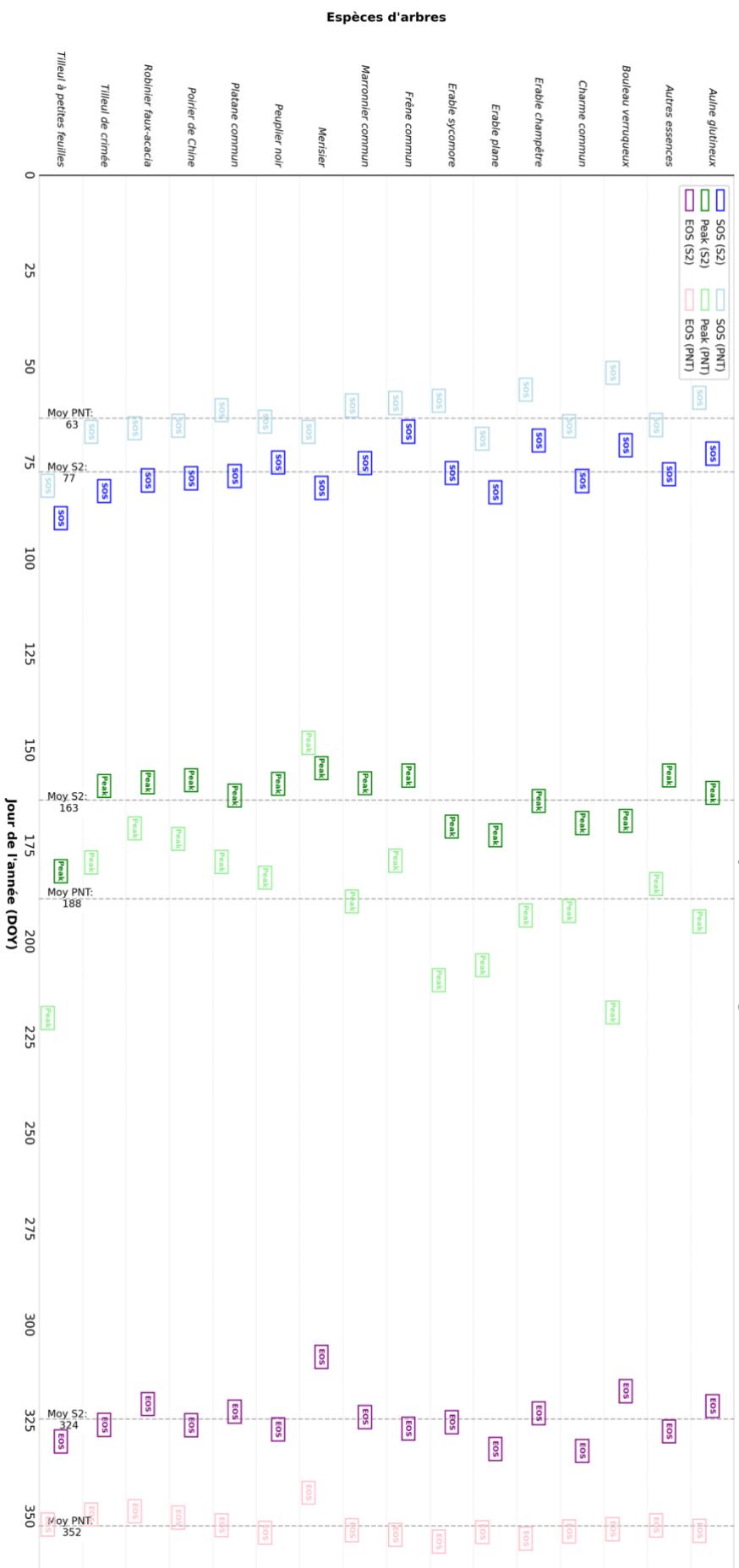


Figure 39 : Variations des métriques phénologiques pour les essences des deux séries temporelles (Version agrandie)

**Dates du pic de saison phénologique des arbres au sein l'Eurométropole de Strasbourg en 2022 pour la série temporelle Planet**

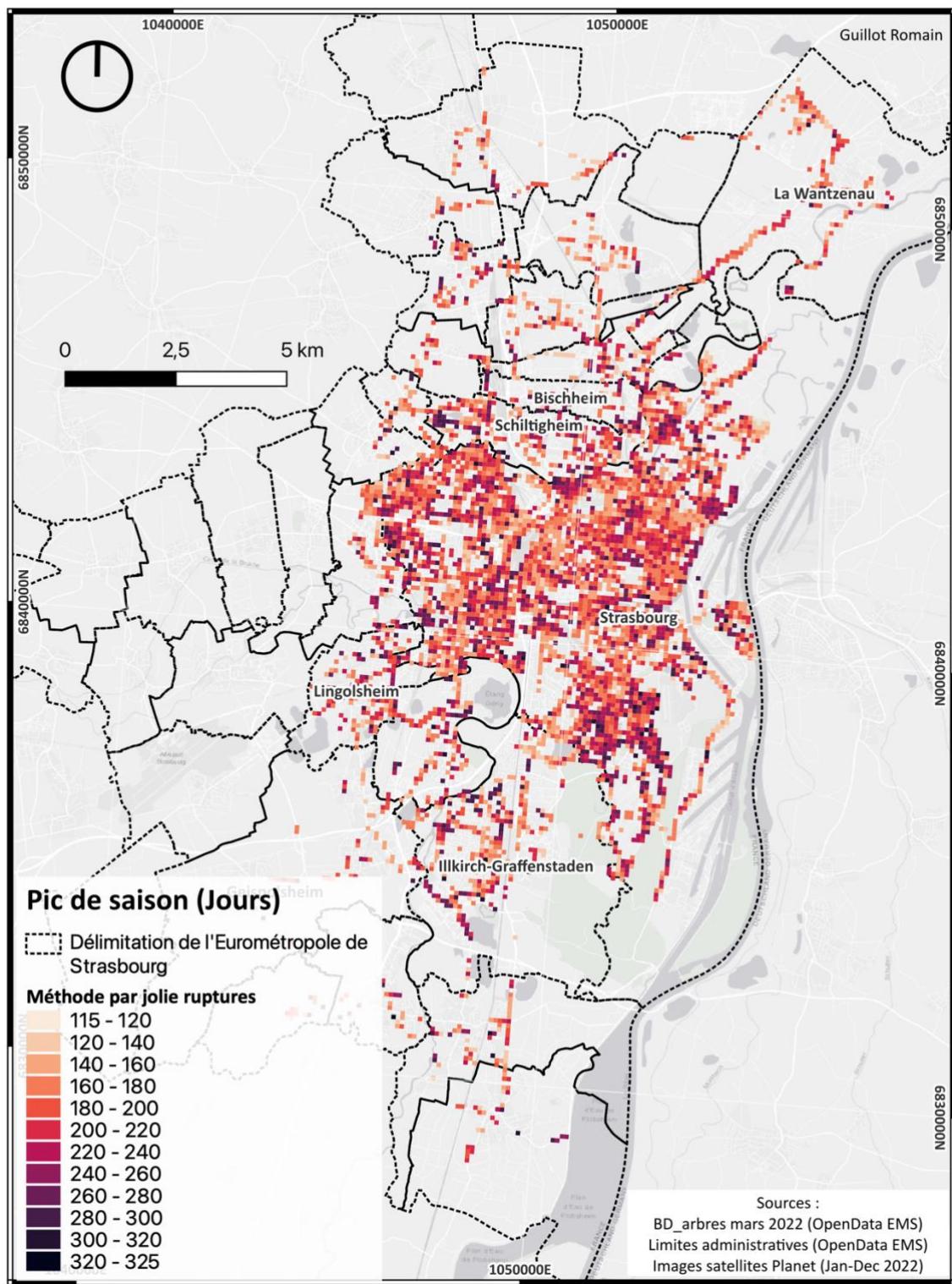


Figure 40 : Carte du pic de saison

**Dates de la fin de saison phénologique des arbres au sein l'Eurométropole de Strasbourg en 2022 pour la série temporelle Planet**

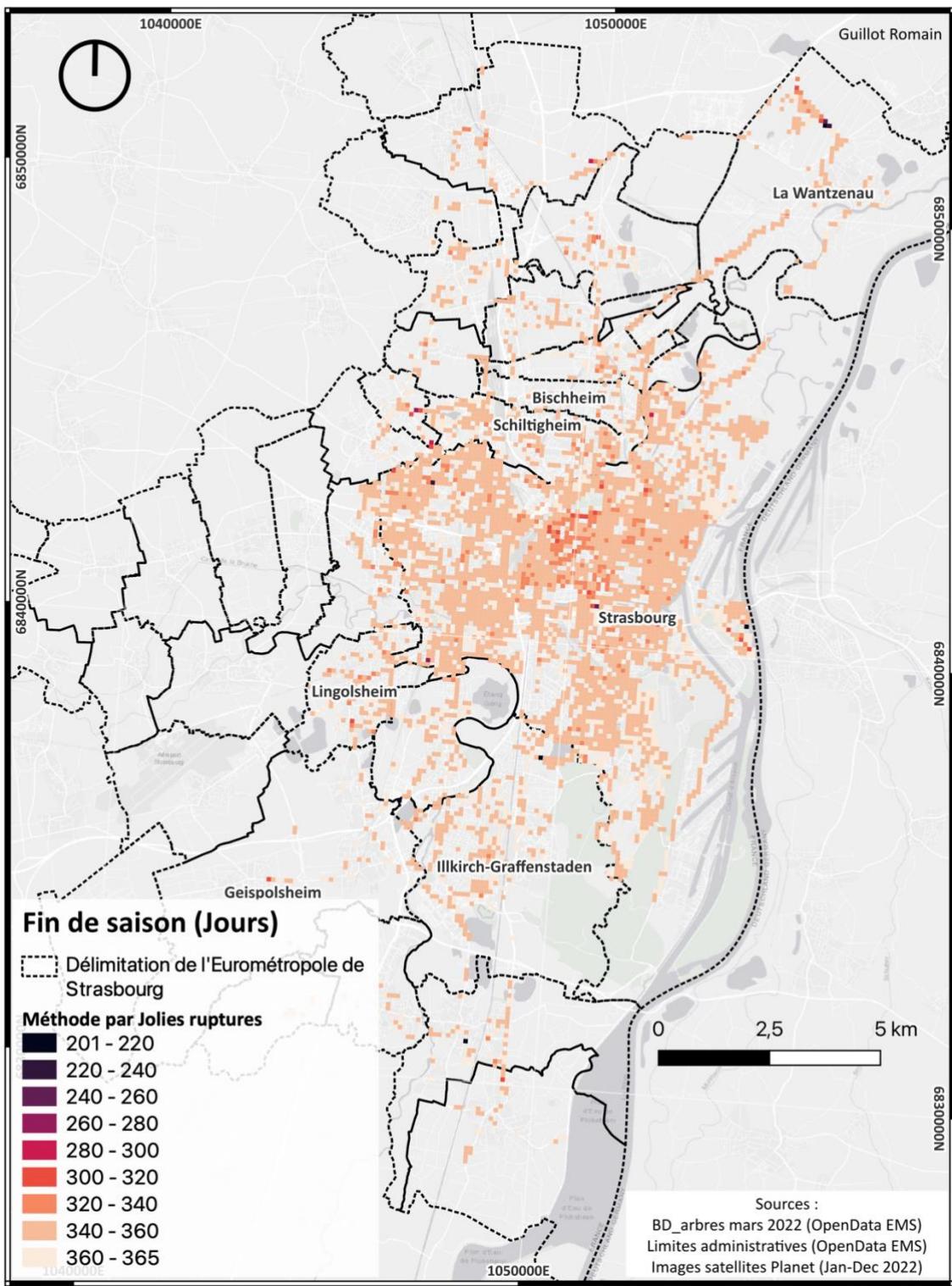


Figure 41 : Carte de la fin de saison

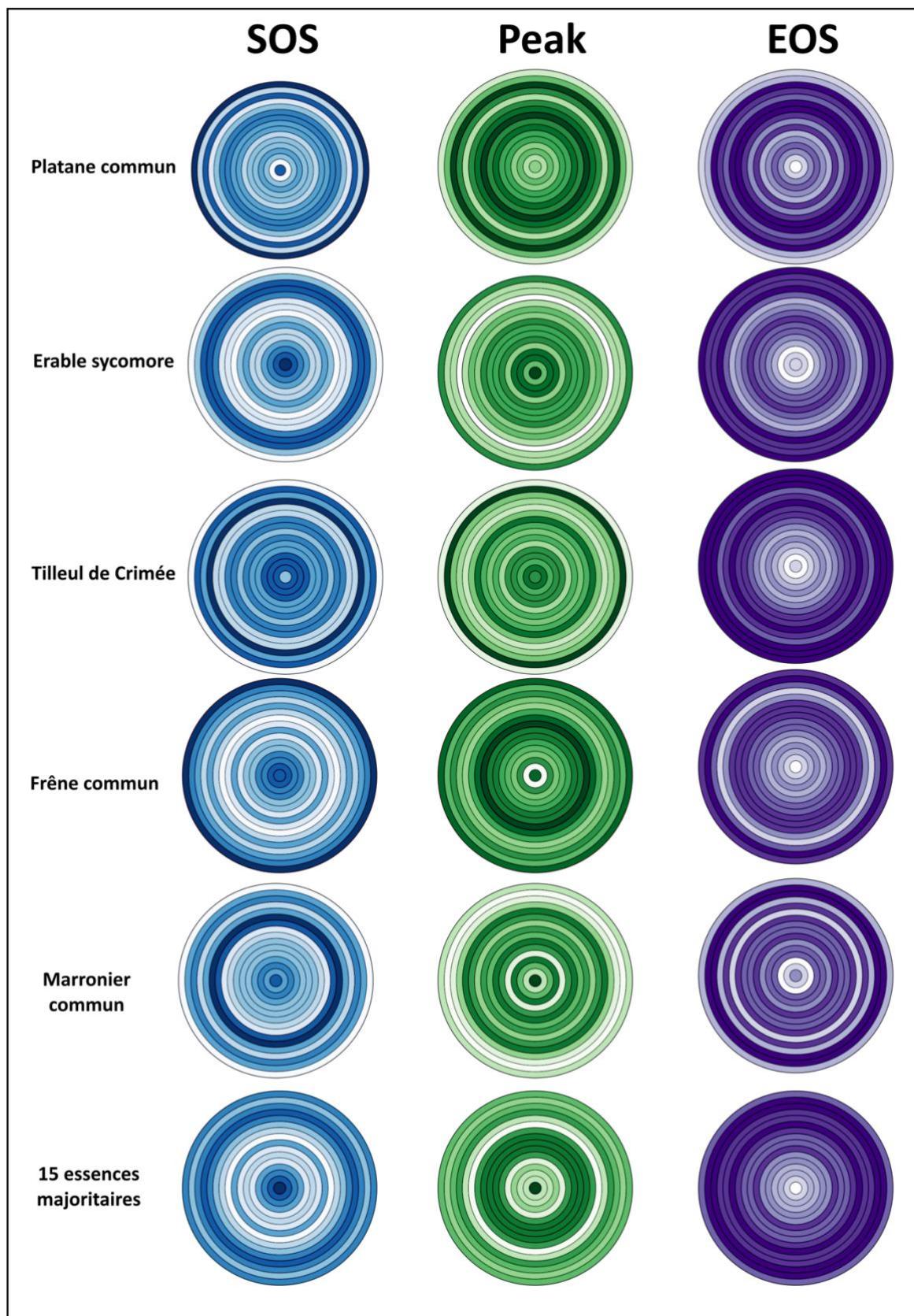


Figure 42 : Gradient urbain pour toutes les essences et métriques

## Bibliographie et Sitographie

- Alonzo, M., Baker, M. E., Caplan, J. S., Williams, A., & Elmore, A. J. (2022). Canopy composition drives variability in urban growing season length more than the heat island effect. *Urban Forestry & Urban Greening*, 68, 126063.
- Cheng, Y., Vrieling, A., Fava, F., Meroni, M., Marshall, M., & Gachoki, S. (2020). Phenology of short vegetation cycles in a Kenyan rangeland from PlanetScope and Sentinel-2. *Remote Sensing of Environment*, 248, 112004.
- Czaja, M., Kolton, A., & Muras, P. (2020). The Complex Issue of Urban Trees—Stress Factor Accumulation and Ecological Service Possibilities. *Forests*, 11(9), 932.
- Dalponte, M., Marzini, S., Solano-Correa, Y. T., Tonon, G., Vescovo, L., & Gianelle, D. (2020). Mapping forest windthrows using high spatial resolution multispectral satellite images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 93, 102206.
- Dye, C. (2008). Health and urban living. *Science*, 319(5864)
- Fang, F., McNeil, B., Warner, T., Dahle, G., & Eutsler, E. (2020). Street tree health from space? An evaluation using WorldView-3 data and the Washington D.C. Street Tree Spatial Database. *Urban Forestry & Urban Greening*, 49, 126634.
- Tian, F., Cai, Z., Jin, H., Hufkens, K., Scheifinger, H., Tagesson, T., Smets, B., Van Hoolst, R., Bonte, K., Ivits, E., Tong, X., Ardö, J., & Eklundh, L. (2021). Calibrating vegetation phenology from Sentinel-2 using eddy covariance, PhenoCam, and PEP725 networks across Europe. *Remote Sensing of Environment*, 260.
- Foucart, T. (2006). Colinéarité et régression linéaire. *Mathématiques et sciences humaines. Mathematics and social sciences*, (173).
- Galán Díaz, J., Gutiérrez-Bustillo, A. M., & Rojo, J. (2023). Influence of urbanisation on the phenology of evergreen coniferous and deciduous broadleaf trees in Madrid (Spain). *Landscape and Urban Planning*, 235, 104760.
- Granero-Belinchon, C., Adeline, K., Lemonsu, A., & Briottet, X. (2020). Phenological Dynamics Characterization of Alignment Trees with Sentinel-2 Imagery: A Vegetation Indices Time Series Reconstruction Methodology Adapted to Urban Areas. *Remote Sensing*, 12(4), 639.
- Guyader, A. (2011). Régression linéaire. Université Rennes, 2, 60-61.
- Han, G., & Xu, J. (2013). Land surface phenology and land surface temperature changes along an urban–rural gradient in Yangtze River Delta, China. *Environmental Management*, 52(1), 234-249.
- Hu, P., Sharifi, A., Tahir, M. N., Tariq, A., Zhang, L., Mumtaz, F., & Shah, S. H. I. A. (2021). Evaluation of Vegetation Indices and Phenological Metrics Using Time-Series MODIS Data for Monitoring Vegetation Change in Punjab, Pakistan. *Water*, 13(18), 2550.
- IPCC. (2023). Summary for Policymakers. In Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. Geneva, Switzerland: IPCC. (in press).
- Kastendeuch, P., Schott, E., Philipps, N., & Najjar, G. (2020). Changement climatique et confort thermique à Strasbourg (Climate change and thermal comfort in Strasbourg). [Rapport Technique] Université de Strasbourg.
- Kokubu, Y., Hara, S., & Tani, A. (2020). Mapping Seasonal Tree Canopy Cover and Leaf Area Using Worldview-2/3 Satellite Imagery: A Megacity-Scale Case Study in Tokyo Urban Area. *Remote Sensing*, 12(9), 1505.

- Kroll, F., Müller, F., Haase, D., & Fohrer, N. (2012). Rural-urban gradient analysis of ecosystem services supply and demand dynamics. *Land Use Policy*, 29(3), 521-535.
- Kumar, P., 2021. Climate Change and Cities: Challenges Ahead. *Frontiers in Sustainable Cities*, 3(5).
- Le Guen, M. (2001). La boîte à moustaches de Tukey, un outil pour initier à la Statistique. Statistiquement Votre - SFDS, 4, 1-3.
- Le Mentec, S. (2022). Impact de la végétalisation sur l'îlot de chaleur urbain et la pollution d'ozone : quantification par une approche de modélisation à l'échelle d'un quartier (Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay).
- Liang, S., Shi, P., & Li, H. (2016). Urban spring phenology in the middle temperate zone of China: dynamics and influence factors. *International Journal of Biometeorology*, 60(4), 531-544.
- Livesley, S.J., McPherson, E.G. & Calfapietra, C. (2016), The Urban Forest and Ecosystem Services: Impacts on Urban Water, Heat, and Pollution Cycles at the Tree, Street, and City Scale. *J. Environ. Qual.*, 45, 119-124
- Luo, Z., Sun, O. J., Ge, Q., Xu, W., & Zheng, J. (2007). Phenological responses of plants to climate change in an urban environment. *Ecological Research*, 22(4), 507-514.
- Miller, R. W., Hauer, R. J., & Werner, L. P. (2015). Urban forestry: planning and managing urban greenspaces. Waveland Press, Chapter 8 (221-246).
- Motohka, T., Nasahara, K. N., Oguma, H., & Tsuchida, S. (2010). Applicability of Green-Red Vegetation Index for Remote Sensing of Vegetation Phenology. *Remote Sensing*, 2(10), 2369–2387.
- Nikolopoulou, M.-H., Baker, N., Steemers, K. (2001). Thermal Comfort in Outdoor Urban Spaces: Understanding the Human Parameter. *Solar Energy* 70, 227–235.
- Orzechowska-Szajda, I. D., Sobolewski, R. K., Lewandowska, J., Kowalska, P., & Kalbarczyk, R. (2020). The influence of urban conditions on the phenology of *Aesculus hippocastanum* L. using the example of Wrocław (Poland). *Forests*, 11(12), 1261.
- Parece, T., & Campbell, J. (2018). Intra-Urban Microclimate Effects on Phenology. *Urban Science*, 2(1), 26.
- Pu, R., & Landry, S. (2012). A comparative analysis of high spatial resolution IKONOS and WorldView-2 imagery for mapping urban tree species. *Remote Sensing of Environment*, 124, 516-533.
- Pu, R., Landry, S., & Yu, Q. (2018). Assessing the potential of multi-seasonal high resolution Pléiades satellite imagery for mapping urban tree species. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 71, 144-158
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900
- Stumpf, A., Michéa, D., & Malet, J.-P. (2018). Improved Co-Registration of Sentinel-2 and Landsat-8 Imagery for Earth Surface Motion Measurements. *Remote Sensing*, 10(2), 160
- Puissant, A., & Weber, C. (2002). The Utility of Very High Spatial Resolution Images to Identify Urban Objects. *Geocarto International*, 17(1), 33-44.
- Quénol, H., Dubreuil, V., Mimet, A., Pellissier, V., Aguejjad, R., Clergeau, P., Bridier, S. (2010). Climat urbain et impact sur la phénologie végétale printanière. *La Météorologie*, 68, 50-57.
- Ren, Q., He, C., Huang, Q., & Zhou, Y. (2018). Urbanization Impacts on Vegetation Phenology in China. *Remote Sensing*, 10(12), 1905.
- Riley, C. B., McHale, M. R., Haas, J. E., Locke, D. H., & Nowak, D. J. (2017). Exotic trees contribute to urban forest diversity and ecosystem services in inner-city Cleveland, OH. *Urban Forestry & Urban Greening*, 23, 46-53.
- Sommeechai, M., Wachrinrat, C., Dell, B., Thangtam, N., & Srichaichana, J. (2018). Ecological Structure of a Tropical Urban Forest in the Bang Kachao Peninsula, Bangkok. *Forests*, 9(1), 36.

- Stratopoulos, L. M. F., Zhang, C., Häberle, K. H., Pauleit, S., Duthweiler, S., Pretzsch, H., & Rötzer, T. (2019). Effects of Drought on the Phenology, Growth, and Morphological Development of Three Urban Tree Species and Cultivars. *Sustainability*, 11(18), 5117.
- Taconet, P. (2019). Tutoriel d'initiation à la télédétection spatiale sur logiciel libre.
- Tzoulas, K., Korpela, K., Venn, S., Yli-Pelkonen, V., Kaźmierczak, A., Niemela, J., & James, P. (2007). Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: A literature review. *Landscape and Urban Planning*, 81(3), 167-178.
- Urša Vilhar, Egbert Beuker, Toshie Mizunuma, Mitja Skudnik, François F. Lebourgeois, et al. (2013). Chapter 9 - Tree Phenology. In Marco Ferretti and Richard Fischer (Eds.), *Forest Monitoring, Volume 12, 1st Edition: Methods for terrestrial investigations in Europe with an overview of North America and Asia* (pp. 169-182).
- Vrieling, A., Skidmore, A.K., Wang, T., Meroni, M., Ens, B.J., Oosterbeek, K., O'Connor, B., Darvishzadeh, R., Heurich, M., Shepherd, A., & Paganini, M. (2017). Spatially detailed retrievals of spring phenology from single-season high-resolution image time series. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 59, 19-30.
- Wang, H., & Zeng, Z.-C. (2021). Satellite observations of urban greenery phenology in downtown Beijing at meter to kilometer scales. *Urban Forestry & Urban Greening*, 62, 127219.
- Wohlfahrt, G., Tomelleri, E., & Hammerle, A. (2019). The urban imprint on plant phenology. *Nature Ecology & Evolution*, 3(11), 1668-1674.
- Xu, K., Zhang, Z., Yu, W., Zhao, P., Yue, J., Deng, Y., & Geng, J. (2021). How Spatial Resolution Affects Forest Phenology and Tree-Species Classification Based on Satellite and Up-Scaled Time-Series Images. *Remote Sensing*, 13(14), 2716.
- Zhao, C., Weng, Q., Wang, Y., Hu, Z., & Wu, C. (2022). Use of local climate zones to assess the spatiotemporal variations of urban vegetation phenology in Austin, Texas, USA. *GIScience & Remote Sensing*, 59(1), 393-409.

Copernicus Land Monitoring Service User Manual: HIGH RESOLUTION VEGETATION PHENOLOGY AND PRODUCTIVITY (HR-VPP). European Environment Agency (EEA). Récupéré le 17 juin 2023, à partir de <https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/hr-vpp-data-access-manual>

Eurométropole de Strasbourg. (2023). Budget Primitif de l'Eurométropole de Strasbourg, exercice 2023 [PDF]. Récupéré le 15 mai 2023, à partir de <https://www.strasbourg.eu/documents/976405/1086045/0/a8eb1e2d-aa30-6c47-ede5-dc6c6a4b5f95>

ESA. (s. d.). PlanetScope. Récupéré le 10 mai 2023, à partir de <https://earth.esa.int/eogateway/missions/planetscope#instruments-section>

ESA. (s. d.). Sentinel-2. Récupéré le 10 mai 2023, à partir de <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>

INSEE. (2023). Données locales - Statistiques locales en France [Dossier complet – Commune de Strasbourg]. Récupéré le 10 mai 2023, à partir de <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2011101?geo=COM-67482>

Planet. (s. d.). Understanding PlanetScope Instruments. Récupéré le 17 juin 2023, à partir de <https://developers.planet.com/docs/apis/data/sensors/>