



HAL
open science

Définition et évolution d'indicateurs phénologiques français saisonniers au regard du changement climatique

Océane Gourdin

► **To cite this version:**

Océane Gourdin. Définition et évolution d'indicateurs phénologiques français saisonniers au regard du changement climatique. Biodiversité et Ecologie. 2024. hal-04653892

HAL Id: hal-04653892

<https://hal.inrae.fr/hal-04653892v1>

Submitted on 19 Jul 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - ShareAlike 4.0 International License

Rapport de stage de Master 1

Du 15 avril au 31 juillet 2024

Mention : Biodiversité Écologie Évolution

Parcours : Modélisation en Écologie

Année universitaire 2023-2024

DEFINITION ET EVOLUTION D'INDICATEURS PHENOLOGIQUES FRANÇAIS SAISONNIERS AU REGARD DU CHANGEMENT CLIMATIQUE



Océane GOURDIN

Sous la direction de :

Maîtres de stage : **Iñaki GARCIA DE CORTAZAR-ATAURI**

Isabelle CHUINE

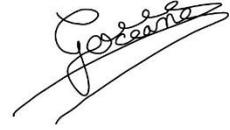
Tuteur-enseignant : **Marie-Pierre ETIENNE**

Organisme d'accueil : Centre INRAE PACA, Unité de service AGROCLIM

Lieu d'enseignement : Université de Rennes

Soutenu le 21 juin 2024 à Rennes

Je soussignée GOURDIN Océane, certifie que le texte de ce rapport, résumé compris, a été rédigé entièrement par moi-même et n'a pas été reformulé ensuite par une IA.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Océane Gourdin', is written over a horizontal line that extends to the left and right.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude à mes deux encadrants **Iñaki Garcia de Cortázar-Atauri** et **Isabelle Chuine** pour la confiance accordée à la réalisation de ce stage, de m'avoir partagé leur enthousiasme et leurs connaissances sur le sujet, mais également pour tout le suivi qui a été réalisé. Je les remercie également de m'avoir permis de participer à la journée de l'Observatoire des Saisons à Montpellier, me permettant de prendre conscience de manière concrète des enjeux actuels concernant mon sujet de stage.

Je suis reconnaissante des **équipes AGROCLIM** et **EMMAH** du **Centre INRAE PACA**, pour leur accueil chaleureux, leur aide précieuse apportée lorsque j'ai rencontré des soucis informatiques, ainsi que les discussions enrichissantes lors de la pause du midi.

Je remercie mes deux collègues de bureau **Marion Teurlay** et **Areski Leroy** pour leur bonne humeur communicative.

Je remercie donc l'**Université de Rennes**, en particulier **Cédric Wolf** et **Marie-Pierre Etienne** qui m'ont permis de concrétiser ce stage très enrichissant de par les connaissances apportées, mais aussi pour toutes les belles personnes rencontrées.

Enfin, je tiens à remercier **ma famille**, qui a toujours cru en moi et m'a soutenu pendant toute la durée du stage malgré la grande distance qui nous sépareit.

SOMMAIRE

I.	Introduction.....	1
II.	Matériel et Méthodes	2
	A. Présentation des données	2
	1. Données phénologiques via la plateforme TEMPO	2
	2. Données climatiques via la plateforme SICLIMA	3
	B. Traitement des données.....	3
	1. Choix des indicateurs phénologiques	3
	2. Calcul des dates médianes par région des indicateurs phénologiques	4
	3. Calcul des indicateurs climatiques	4
	4. Méthodes d'analyses statistiques des données phénologiques et climatiques	5
III.	Résultats.....	5
	A. Choix des indicateurs phénologiques français saisonniers	5
	B. Évolution des indicateurs phénologiques au fil des périodes historiques.....	6
	C. Relations entre l'évolution des indicateurs phénologiques et climatiques	7
IV.	Discussion.....	11
	A. Évolution des indicateurs climatiques	11
	B. Définition d'un indicateur phénologique hivernal en lien avec le réchauffement climatique.....	11
	C. Définition d'un indicateur phénologique du début de la période printanière en lien avec le réchauffement climatique.....	12
	D. Définition des indicateurs phénologiques de la fin de la période printanière et de période estival en lien avec le réchauffement climatique	13
	E. Définition d'un indicateur phénologique automnal en lien avec le réchauffement climatique.....	13
V.	Conclusion	14
VI.	Bibliographie	15
VII.	Annexes	19

I. Introduction

La phénologie est l'étude de l'apparition dans le temps d'événements biologiques, des causes biotiques et abiotiques du moment de ces apparitions et des relations entre les différents événements chez une même espèce ou différentes espèces (Badeau *et al.*, 2017). La phénologie est un sujet d'étude ancien qui a beaucoup évolué. Entre le Xe siècle avant J.-C. et le XIIe siècle, l'observation des phénomènes phénologiques permettait une orientation des décisions agricoles (Piao *et al.*, 2019). Du XVIIe siècle aux années 1990, la phénologie a ensuite connu un premier essor en tant que discipline scientifique à part entière. Les variations phénologiques sont exprimées en degrés-jour (Reaumur, 1735). De plus, les réseaux d'observations de ces événements périodiques commencent à se mettre en place (Barck *et al.*, 1753). Enfin, à partir des années 1990, avec la prise de conscience du réchauffement climatique actuel, de nouvelles techniques de surveillance telle que la télédétection sont mises en place (White *et al.*, 1997 ; Zhang *et al.*, 2003) et des réseaux phénologiques internationaux sont créés, permettant le partage de données phénologiques standardisées à travers le monde (Templ *et al.*, 2018).

Ainsi, avec le changement climatique global, des variations dans la phénologie des plantes ont été observées dans le monde. En Allemagne, une prolongation de la période de végétation allant jusqu'à trois semaines a été observée entre 1991-2009 par rapport à la période 1961-1990 (Schröder *et al.*, 2014). Les changements dans la phénologie des plantes constituaient donc dans cette étude un bioindicateur approprié pour cartographier les premiers signes de transitions écosystémiques face au changement climatique. En Chine, le développement des feuilles est avancé et la coloration est retardée en raison du changement climatique, malgré un ralentissement de cette tendance ces dernières années (Piao *et al.*, 2019). Aux Etats-Unis, les mêmes variations phénologiques sont décrites, celle-ci ayant des conséquences majeures sur la productivité des écosystèmes, les interactions entre espèces, les structures communautaires et la conservation de la biodiversité (Bertin, 2008). Enfin, en Autriche, face aux variations phénologiques entraînées par le changement climatique, des indicateurs phénologiques saisonniers sont utilisés pour suivre ces changements (Scheifinger *et al.*, 2024).

Ainsi, le changement climatique rapide actuel a ravivé l'intérêt pour la compréhension et la modélisation des réponses de la phénologie végétale. Mais hormis des études spécifiques localisées, aucune étude globale n'a été réalisée en France contrairement aux autres pays (Menzel *et al.*, 2020). Cette étude vise donc à trouver des indicateurs phénologiques saisonniers pertinents à l'échelle de la France, visualiser comment ils ont évolué au cours des dernières

décennies, puis déceler leurs potentiels liens avec l'intensité du changement climatique global. Pour cela, une base de données phénologiques publique a été analysée, couplée à l'étude des données climatiques. Suite aux différents résultats obtenus à travers le monde, une corrélation entre la phénologie des indicateurs choisis et les variables climatiques (température, précipitation) est attendue.

II. Matériel et Méthodes

A. Présentation des données

1. Données phénologiques via la plateforme TEMPO

Cette étude tire ses données phénologiques de la plateforme TEMPO¹ (Maury *et al.*, 2023). Il s'agit d'un portail mis en place en 2017 regroupant des sources de données phénologiques disponibles en France et dans quelques pays européens. En effet, celui-ci regroupe 9 bases de données publiques : Agroclim Pheno, Epiphyt, Forêt, ODS Recherche, ODS Tela Botanica, ORE DiaPFC, Phenoclim Agroclim INRAE, PHETEC INRAE et Phenoclim CREA Mont-Blanc. TEMPO met donc à disposition à ce jour plus de $2,8 \times 10^6$ données phénologiques, provenant autant d'instituts de recherches que du grand public par le biais des sciences participatives. Afin de réaliser ces suivis phénologiques, l'échelle BBCH (biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie) a été utilisée (Meier, 2001). Cette échelle internationale décrit les stades phénologiques des espèces végétales grâce à une notation allant de 00 à 99 (Tableau 1). De plus, grâce aux archives, TEMPO permet un suivi phénologique de 2 042 taxons entre 1349 et 2024. Un premier stage a été réalisé avec les données provenant d'ODS Recherche et une partie de Forêt (Schweitzer, 2015). Un nettoyage important a donc été effectué sur les autres bases de données, notamment en retirant près de $1,6 \times 10^6$ observations principalement dû à l'épidémiologie végétale (Epiphyt), où pour une même donnée phénologique, sept pathogènes différents sont étudiés. Certaines confusions jour-mois ont également été corrigées.

¹ <https://data.pheno.fr>

Tableau 1: Tableau représentant les stades de développement des plantes associées aux codes BBCH.

Code BBCH	Stade de développement
00 – 09	Germination, Bourgeonnement
10 – 19	Développement des feuilles
20 – 29	Formation des pousses secondaires : tallage
30 – 39	Elongation de la tige, Croissance de la rosette
40 – 49	Développement des organes végétatifs
50 – 59	Apparition de l'inflorescence
60 – 69	Floraison
70 – 79	Fructification
80 – 89	Maturation
90 – 99	Sénescence

2. Données climatiques via la plateforme SICLIMA

SICLIMA² : Système d'Information de données CLimatiques MAillées (Maury *et al.*, 2021), est une plateforme qui permet d'accéder à deux bases de données climatiques maillées : SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige) (Vidal *et al.*, 2010) pour la période passée et DRIAS (Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnement) pour la période future jusqu'à 2100. Cherchant donc à quantifier les changements climatiques passés, SAFRAN a donc été utilisée. Elle regroupe des mesures météorologiques journalières produites par Météo France depuis 1959. Ainsi, SICLIMA permet de choisir une base de données climatiques (SAFRAN), des zones d'étude (la France) et des périodes d'étude (1959-2023). Il est ensuite possible de calculer des indicateurs climatiques sur ces jeux de données.

B. Traitement des données

1. Choix des indicateurs phénologiques

Dans un premier temps, les données nettoyées ont été étudiées avec le logiciel R (R Core Team, 2023). Ainsi, afin de sélectionner des indicateurs phénologiques, plusieurs critères ont été pris en compte. Tout d'abord, de manière à comparer les données avec des conditions abiotiques similaires, seules les données d'une altitude inférieure à 1 000 mètres ont été prises

² <https://agroclim.inrae.fr/siclma/help/index.html>

en compte. Par ailleurs, les indicateurs choisis devaient permettre un suivi annuel de l'évolution de la phénologie en France. En conséquence, des indicateurs phénologiques ont été choisis pour chaque période saisonnière. Les indicateurs phénologiques choisis devaient ensuite avoir une bonne répartition spatiale au sein des différentes régions administratives françaises, une bonne répartition temporelle afin de suivre leur évolution au cours du temps, de même qu'un nombre suffisant de données pour pouvoir réaliser des tests statistiques ($n > 3$ pour chaque année).

2. Calcul des dates médianes par région des indicateurs phénologiques

Le climat des derniers mois aurait un impact sur la phénologie végétale (Garcia de Cortázar-Atauri *et al.*, 2010). Ainsi, pour chaque indicateur phénologique, le jour médian de la période a été calculé, puis les données climatiques ont été récoltées pour chaque indicateur sur une amplitude temporelle de deux mois avant le jour médian jusqu'à celui-ci. Or, puisque huit climats ont été identifiés et cartographiés sur le territoire métropolitain (Joly *et al.*, 2010), le processus de calcul des jours médians a été ajusté pour chaque région dans laquelle l'indicateur était présent. Les données ont ensuite été compilées afin d'obtenir des valeurs médianes à l'échelle française.

3. Calcul des indicateurs climatiques

Par la suite, les indicateurs phénologiques identifiés ont été analysés au regard du changement climatique grâce à SICLIMA. Ainsi, la présente analyse s'est limitée à l'étude de l'évolution des indicateurs phénologiques conjointement au climat sur la période 1959-2023. Deux séries temporelles ont été comparées : 1959-1990 et 1991-2023. En effet, la littérature illustre une rupture climatique à partir de 1990 (Reid *et al.*, 2015 ; García de Cortázar-Atauri *et al.*, 2017). Cette étude visant à analyser l'impact du réchauffement climatique sur les indicateurs phénologiques français, les données des 7 969 mailles (taille d'une maille : 8 km x 8 km) avec une altitude inférieure à 1 000 mètres ont donc été récupérées pour les indicateurs de moyenne des minimales des températures (mint), moyenne des moyennes des températures (meant), moyenne des maximales des températures (maxt) et de moyenne des amplitudes thermiques (ranget), l'amplitude thermique étant la différence journalière enregistrée entre la

température minimale et maximale en un point donné. Mais le réchauffement climatique ayant également un impact sur les précipitations (Szpakowski et Szydłowski, 2018 ; Inouye *et al.*, 2022), la somme des précipitations (rainsum) a également été prise en compte.

4. Méthodes d'analyses statistiques des données phénologiques et climatiques

Afin de créer les graphiques présents dans ce rapport, les données obtenues ont été analysées statistiquement sous le logiciel R (R Core Team, 2023). Des boxplots, histogrammes et régressions linéaires ont été réalisés avec le package ggplot2 (Wickham *et al.*, 2016). En l'absence de normalité des données, des tests U de Mann-Whitney ont été réalisés pour comparer les moyennes. Enfin, pour déterminer si les pentes des régressions linéaires étaient significativement différentes de zéro, des test T ont été effectués. La significativité des tests est indiquée par des astérisques sur les figures. Pour plus de détails sur les résultats des tests T, deux tableaux sont joints en annexe (Annexe 1 et Annexe 2).

III. Résultats

A. Choix des indicateurs phénologiques français saisonniers

L'analyse des données présentes sur le portail TEMPO a permis de sélectionner cinq espèces associées à un stade phénologique (Figure 1A). Ainsi, toutes les espèces choisies correspondent à une période saisonnière annuelle définie : Hiver (décembre, janvier et février) pour *Corylus avellana* (BBCH 65 = floraison) ; Début du printemps (février, mars et avril) pour *Syringa vulgaris* (BBCH 65 = floraison) ; Fin du printemps (avril, mai et juin) pour *Vitis vinifera* (BBCH 65 = floraison) ; Été (juillet, août et septembre) pour *Malus domestica* (BBCH 87 = maturité) ; Automne (août, septembre et octobre) pour *Betula pendula* (BBCH 95 = sénescence). Ces indicateurs phénologiques sont présents *a minima* dans 9 régions françaises (*Malus domestica*, BBCH = 87), jusqu'à 12 régions pour les espèces les mieux représentées géographiquement (*Corylus avellana*, *Syringa vulgaris* et *Vitis vinifera*, BBCH = 65) (Figure 1B). Sur la période 1959-2023, des observations phénologiques ont été réalisées pour ces indicateurs *a minima* pour 28 années (*Corylus avellana*, BBCH = 65), jusqu'à 57 années (*Syringa vulgaris*, BBCH = 65) (Figure 1C). Enfin, *a minima* 513 observations ont été réalisées

(*Corylus avellana*, BBCH = 65), au maximum jusqu'à 7 208 (*Vitis vinifera*, BBCH = 65) (Figure 1D).

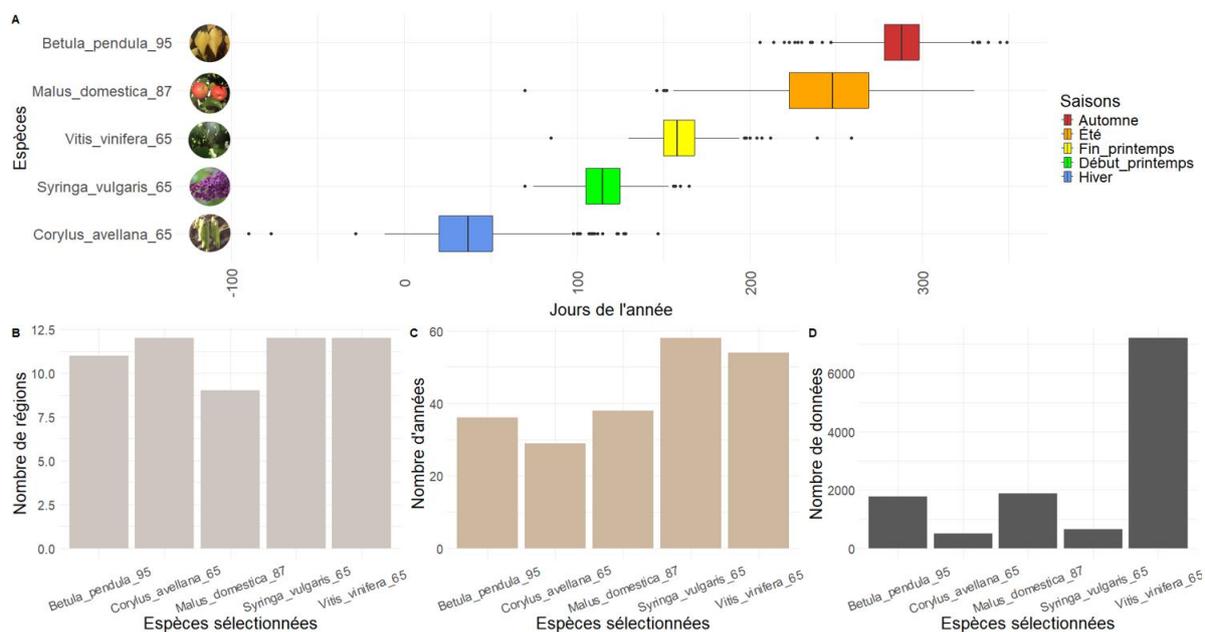


Figure 1 : Boxplot représentant la phénologie du stade BBCH des cinq espèces sélectionnées. Selon le jour médian de l'année, chaque espèce a été associée à sa saison correspondante (A). Sont associées trois histogrammes représentant pour les espèces sélectionnées associées à leur stade BBCH le nombre de régions (B), d'années (C), de données (D), pour lesquelles la phénologie de celles-ci a été observée.

B. Évolution des indicateurs phénologiques au fil des périodes historiques

Pour chaque indicateur phénologique, une différence significative a été observée entre la période 1959-1990 et 1991-2023 (Hiver : $W = 8\ 476$, $P = 2,07e-06$; Début du printemps : $W = 36\ 693$, $P < 2,20e-16$; Fin du printemps : $W = 898\ 263$, $P < 2,20e-16$; Été : $W = 25\ 151$, $P = 1,77e-06$; Automne : $W = 25\ 784$, $P = 1,64e-06$) (Figure 2). Pour l'hiver, le jour médian d'observation de *Corylus avellana* 65 est de 60 entre 1959 et 1990 contre 36 entre 1991 et 2023 (-24). Pour le début du printemps, le jour médian d'observation de *Syringa vulgaris* 65 est de 130 entre 1959 et 1990 contre 113 entre 1991 et 2023 (-27). Pour la fin du printemps, le jour médian d'observation de *Vitis vinifera* 65 est de 172 entre 1959 et 1990 contre 157 entre 1991 et 2023 (-15). Pour l'été, le jour médian d'observation de *Malus domestica* 87 est de 264 entre 1959 et 1990 contre 246 entre 1991 et 2023 (-18). Enfin, pour l'automne, le jour médian d'observation de *Betula pendula* 95 est de 305 entre 1959 et 1990 contre 288 entre 1991 et 2023 (-17). Ainsi, la Figure 2 montre une date d'observation de ces indicateurs phénologiques plus précoce sur la période 1991-2023 au regard de la période 1959-1990.

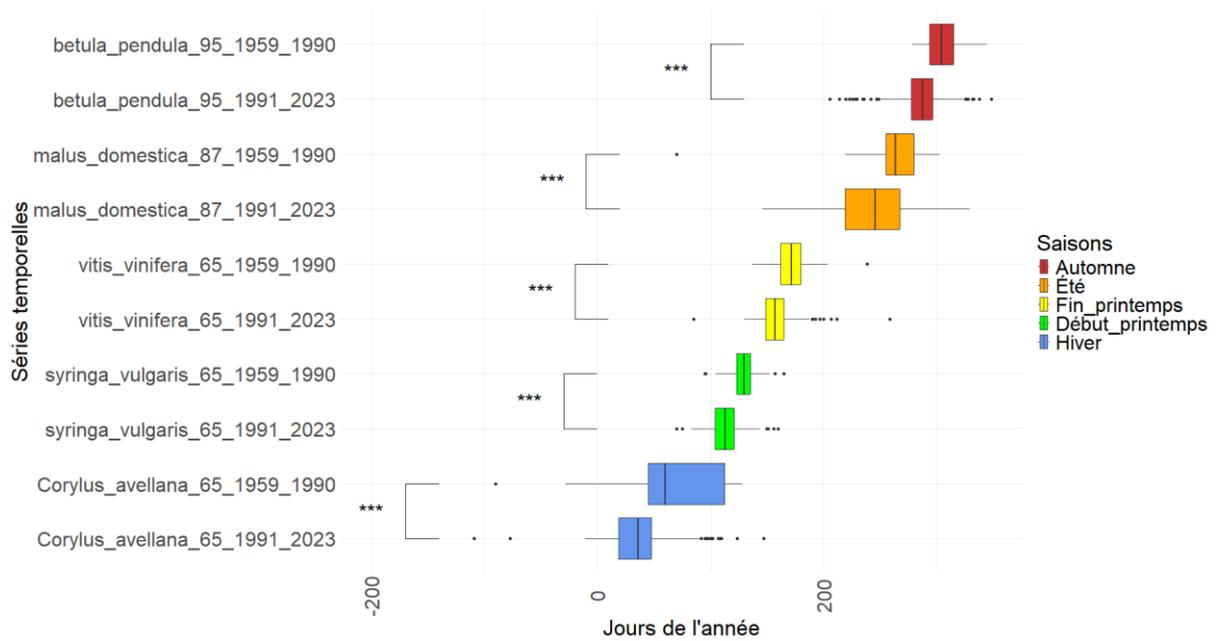


Figure 2 : Boxplot représentant l'évolution de la phénologie des cinq indicateurs sélectionnés entre la période 1959-1990 et 1991-2023. Les couleurs associées aux boxplots permettent d'associer chaque indicateur phénologique à sa saison correspondante. Les astérisques retournent le degré de significativité du test de comparaison de moyenne réalisé (test U de Mann-Whitney) pour chaque indicateur entre les moyennes obtenus pour chaque série temporelle en fonction de la phénologie (***) : p-value < 0.001).

C. Relations entre l'évolution des indicateurs phénologiques et climatiques

L'analyse des données SAFRAN a permis de montrer que pour chaque saison, les cumuls des précipitations (rainsum) ne changent pas significativement entre 1959 et 2023 (Figures 3C, 3F, 3I, 3L, 3O). Ainsi, l'indicateur climatique rainsum ne sera pas pris en compte dans la suite de l'étude. En revanche, une augmentation significative est observée entre 1959 et 2023 pour la moyenne des minimales des températures (mint), la moyenne des moyennes des températures (meant), la moyenne des maximales des températures (maxt) (Figures 3A, 3D, 3G, 3J, 3M) et l'amplitude thermique (ranget) (Figures 3B, 3E, 3H, 3K, 3N). En hiver, mint, meant, maxt et ranget ont donc respectivement augmenté de 0,72°C, 0,87°C, 1,06°C et 0,39°C entre la période 1959-1990 et 1991-2023 ; au début du printemps de 0,64°C, 1,03°C, 1,61°C et 1,09°C ; à la fin du printemps de 1,07°C, 1,24°C, 1,52°C et 0,48°C ; en été de 1,16°C, 1,32°C, 1,64°C et 0,51°C ; en automne de 0,60°C, 0,64°C, 0,99°C et 0,52°C.

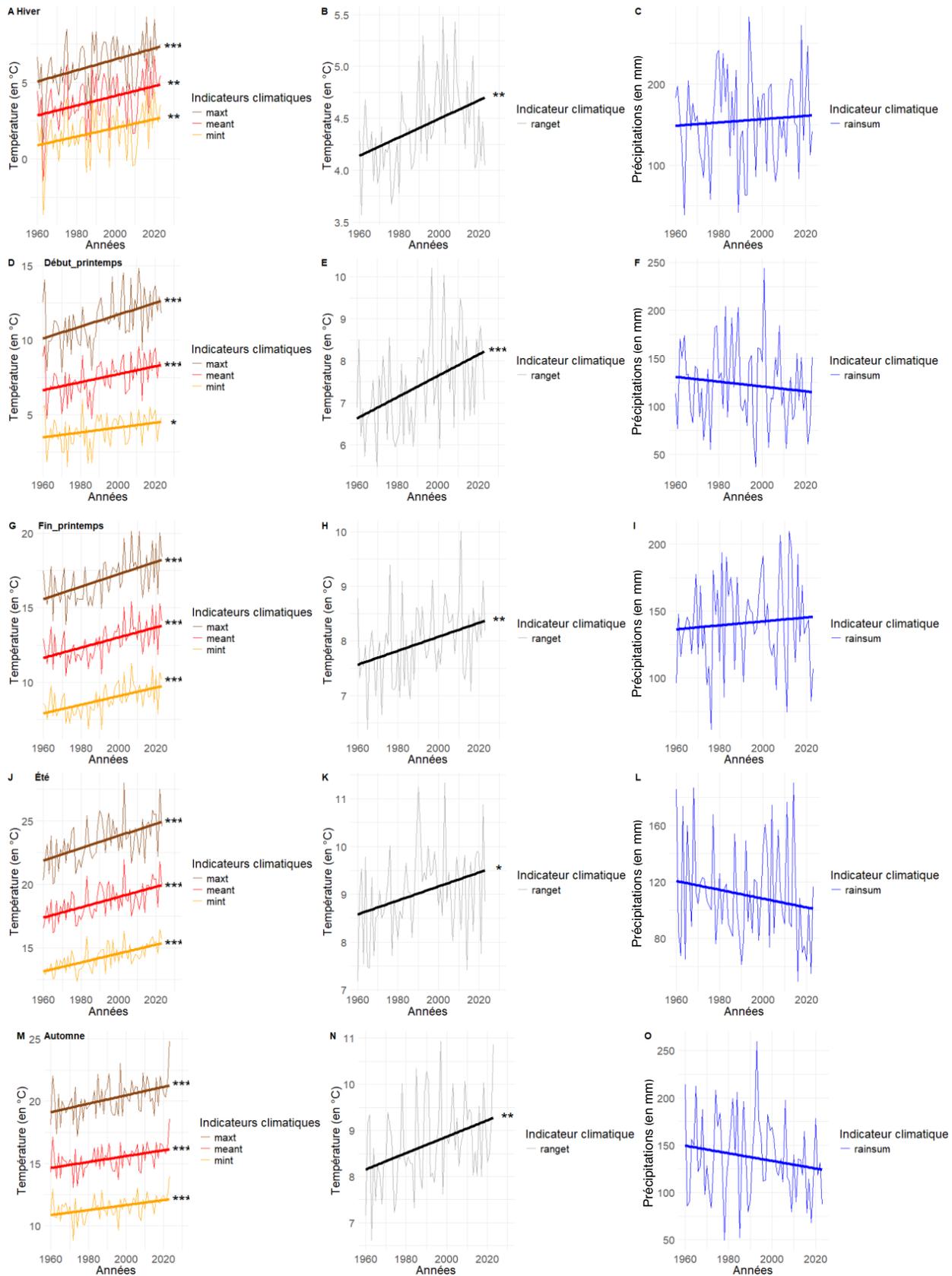
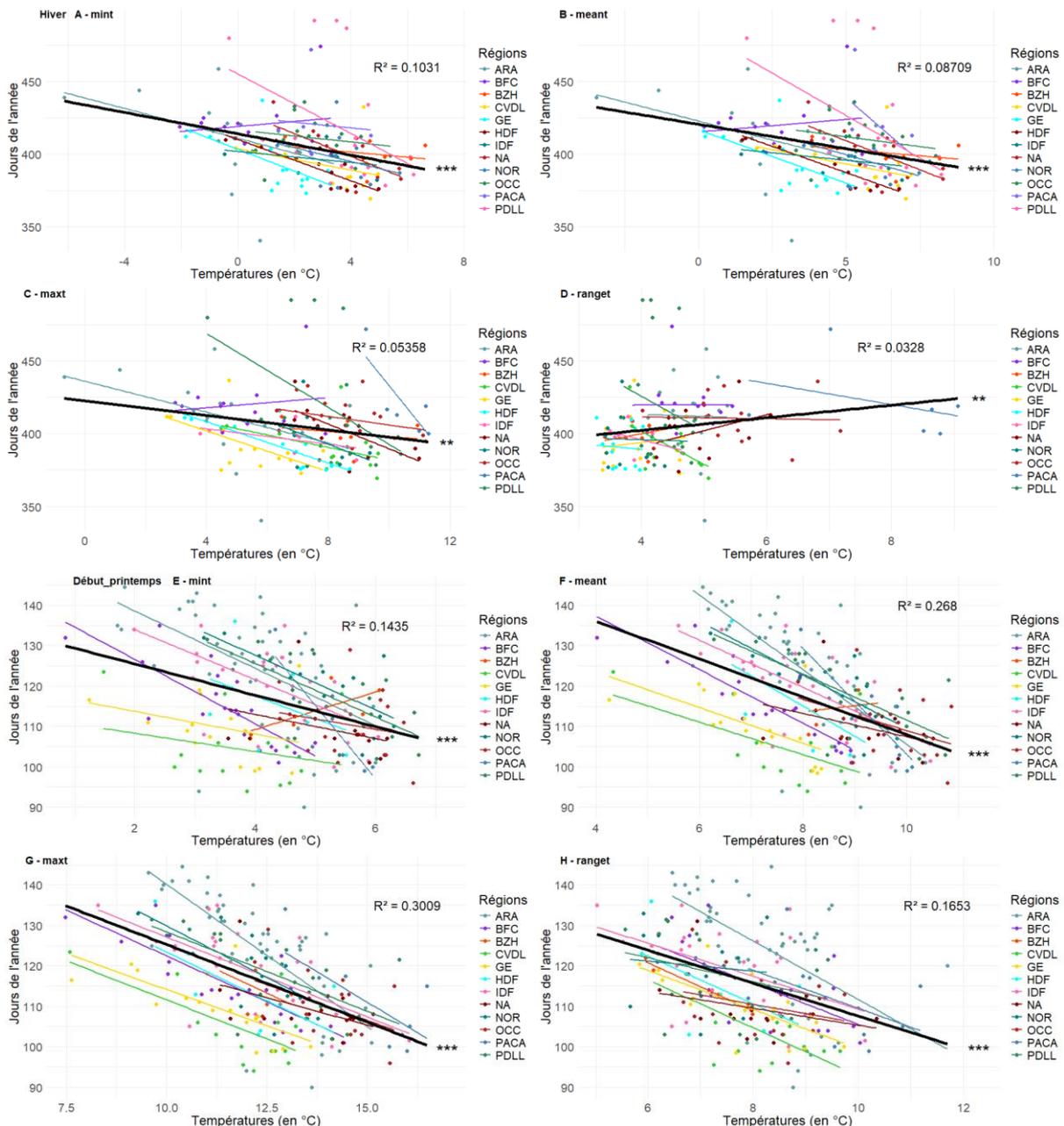


Figure 3 : Régressions linéaires représentant l'évolution de cinq indicateurs climatiques (mint, meant, maxt, ranget et rainsum) entre 1959 et 2023 pour chaque saison (Hiver : A, B et C ; Début du printemps : D, E et F ; Fin du printemps : G, H et I ; Été : J, K et L ; Automne : M, N et O). Les astérisques retournent le degré de significativité du test statistique réalisé (test T) pour chaque droite de régression (* : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$; *** : $P < 0.001$).

Ensuite, il a été observé que peu importe la saison, la phénologie de nos indicateurs est négativement corrélée à mint (Figures 4A, 4E, 4I, 4M, 4Q) et à meant (Figures 4B, 4F, 4J, 4N, 4R). Cependant, la phénologie des indicateurs choisis est négativement corrélée aux indicateurs climatiques maxt (Figures 4C, 4G, 4K, 4Q) ainsi qu'à ranget (Figures 4D, 4H, 4L, 4P) uniquement pour les saisons hiver, début du printemps, fin du printemps et été. Tandis que pour l'automne aucune corrélation n'est observée (Figures 4S et 4T). Ainsi, une augmentation des températures et des amplitudes thermiques entraîne de manière globale une avancée de la phénologie des indicateurs choisis, excepté en automne où seuls mint et meant ont un effet significatif. Mais ces résultats sont à analyser avec précaution au vu des faibles R^2 obtenus. Ces observations sont également observées par région avec des intensités de changement plus fortes pour les régions du Nord (exemple : Pays de la Loire) par rapport aux régions du Sud (exemple : Provence-Alpes-Côte d'Azur).



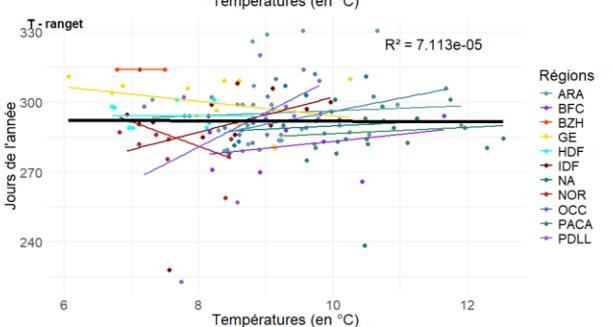
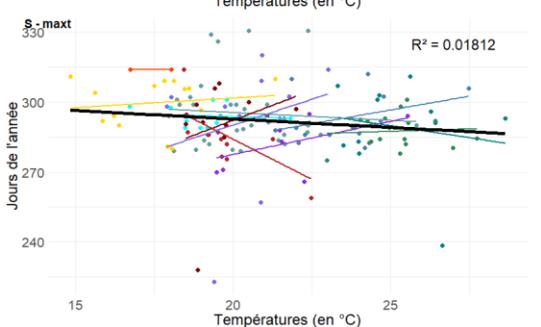
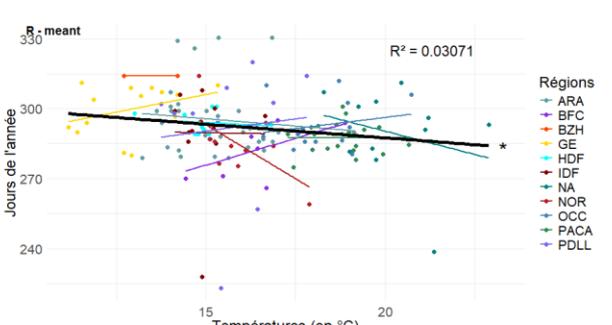
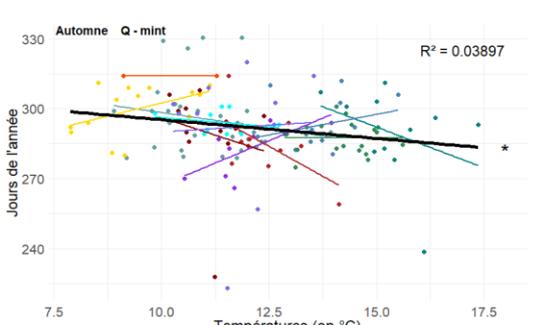
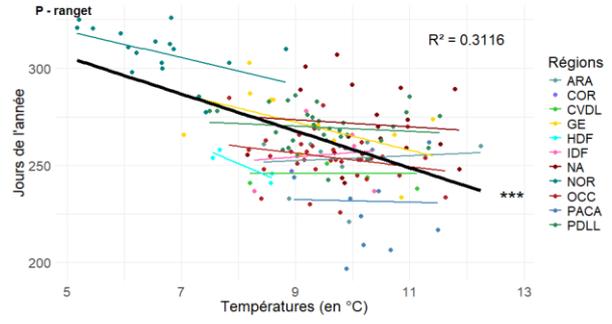
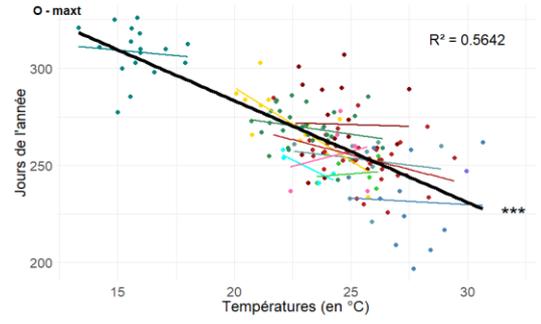
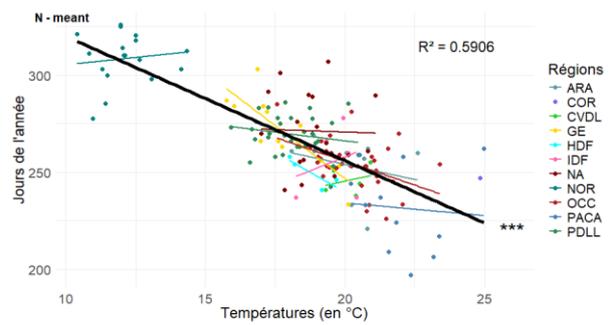
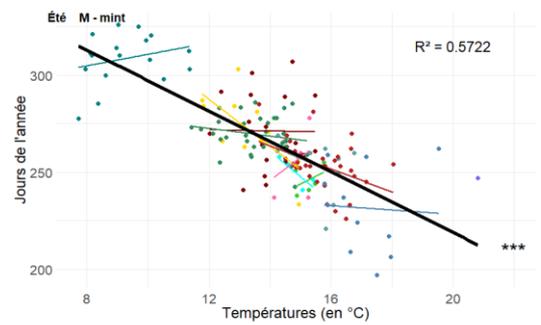
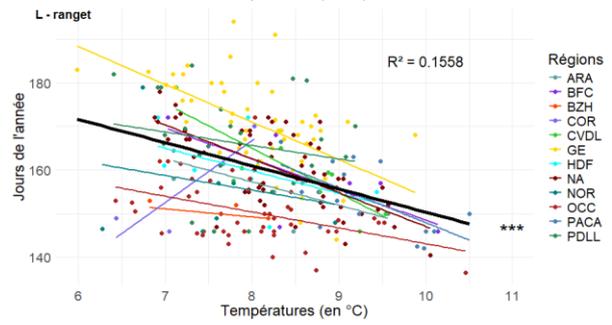
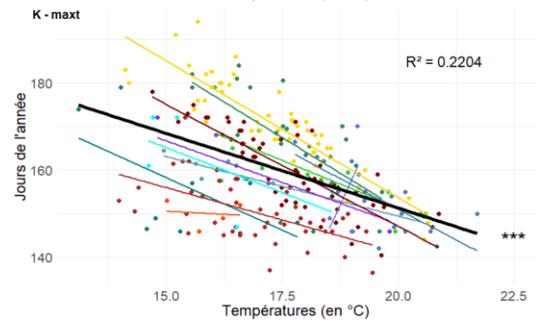
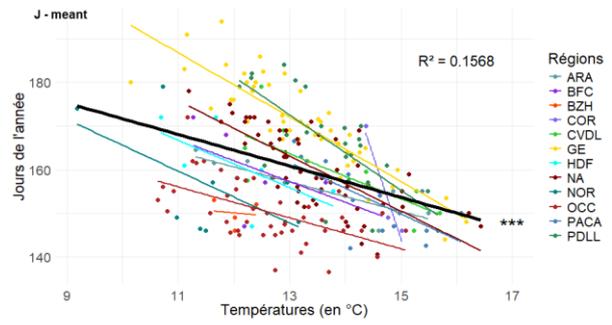
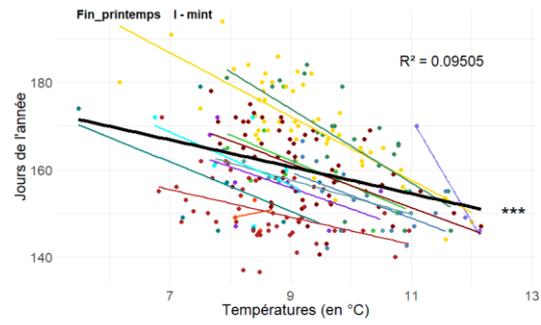


Figure 4 : Régressions linéaires par saison représentant l'évolution de la phénologie des cinq indicateurs choisis en fonction des quatre indicateurs climatiques retenus (mint, meant, maxt et ranget) entre 1959 et 2023 (Hiver : A, B, C et D ; Début du printemps : E, F, G et H ; Fin du printemps : I, J, K et L ; Été : M, N O et P ; Automne : Q, R, S et T). Une légende indique les droites de régression obtenues par régions administratives françaises (ARA = Auvergne-Rhône-Alpes ; BFC = Bourgogne-Franche-Comté ; BZH = Bretagne ; COR = Corse ; CVDL = Centre-Val de Loire ; GE = Grand Est ; HDF = Hauts-de-France ; IDF = Île-de-France ; NA = Nouvelle-Aquitaine ; NOR = Normandie ; OCC = Occitanie ; PDLL = Pays de la Loire ; PACA = Provence-Alpes-Côte d'Azur). Une droite de régression noire a été tracée en prenant en compte la totalité des points. Le coefficient de détermination multiple R^2 pour chaque droite de régression française est indiqué sur chaque graphique. Les astérisques retournent le degré de significativité du test statistique réalisé (test T) pour chaque droite de régression (* : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$; *** : $P < 0.001$).

IV. Discussion

A. Évolution des indicateurs climatiques

Les résultats ont donc montré un avancement de la phénologie pour les cinq indicateurs saisonniers retenus sur la période 1991-2023 par rapport à 1959-1990. En raison des différents climats relevés en France, ces avancements phénologiques sont plus ou moins intenses selon les régions administratives. Les quatre indicateurs climatiques liés à la température ont significativement augmenté pour toutes les saisons. Malgré aucune différence trouvée pour les cumuls des précipitations de ces dernières décennies, la floraison de *Syringa vulgaris* a déjà démontré une sensibilité à celle-ci (Kalvāne *et al.*, 2009). Il faut garder à l'esprit que les interactions entre plusieurs facteurs compliquent la modélisation et la prédiction des changements phénologiques des plantes (Piao *et al.*, 2019).

B. Définition d'un indicateur phénologique hivernal en lien avec le réchauffement climatique

En France, l'augmentation des températures semble aboutir à une précocité des événements phénologiques. En effet, l'augmentation moyenne des températures de 2,5°C en hiver aboutit en France à une avancée phénologique du stade BBCH 65 de *Corylus avellana* de 27,6 jours,

donc environ 11 jours/°C. Cela a été également observé en Slovénie en hiver où une augmentation de 1°C a favorisé la floraison mâle de *Corylus avellana* de 7,0 à 8,8 jours et la floraison femelle de 6,3 à 8,9 jours (Črepinšek *et al.*, 2012). Ainsi l'effet du réchauffement climatique est plus important sur l'indicateur phénologique hivernal choisi en France par rapport à d'autres pays européens. Or, *Corylus avellana* est pollinisé par le vent et les fleurs mâles et femelles doivent être pollinisées de manière croisée (Heard, 2016). Avec l'accélération du réchauffement climatique, *Corylus avellana* risque donc de disparaître de part une floraison femelle trop précoce en regard de la floraison mâle (Taghavi *et al.*, 2021). Initialement, les bourgeons floraux mâles sont peu exigeants au froid et se montrent peu réactifs au réchauffement hivernal (Asse *et al.*, 2018). Mais les modèles climatologiques suggèrent que les changements environnementaux atteindront éventuellement une stabilisation, ce qui affectera également les changements phénologiques (Inouye, 2022). Ainsi, cet indicateur phénologique hivernal s'avère être un bon choix.

C. Définition d'un indicateur phénologique du début de la période printanière en lien avec le réchauffement climatique

Des études montrent également une validation du lien entre la phénologie et la température au printemps. En effet, à chaque décennie la phénologie de *Syringa vulgaris* est avancée de 1,9 à 4,4 jours en Hongrie et de 3,0 à 3,4 jours en Pologne en lien avec l'augmentation des moyennes des températures (Szabó *et al.*, 2016 ; Czernecki et Jablonska, 2016), des moyennes et des maximales des températures aux Etats-Unis entre 1965 et 2001 (Wolfe *et al.*, 2005), aux minimales, moyennes et maximales des températures en Lituanie et Lettonie (Kalvāne *et al.*, 2009). En France, une avancée phénologique de 27 jours est observée entre 1959 et 2023 pour *Syringa vulgaris*, ce qui équivaut à une avancée moyenne de 4,2 jours par décennie. Ainsi, la France se situe dans la fourchette haute concernant l'impact du réchauffement climatique sur la phénologie au printemps. *Syringa vulgaris* est une espèce de référence au niveau internationale pour les études de phénologie en lien avec le réchauffement climatique (Badeau *et al.*, 2017) et semble donc être l'indicateur phénologique idéal du début du printemps en France.

D. Définition des indicateurs phénologiques de la fin de la période printanière et de période estival en lien avec le réchauffement climatique

Vitis vinifera et *Malus domestica* étant des espèces centrales des productions fruitières, notamment avec l'existence de cultures avec de nombreuses variétés différentes, il a donc été choisi de regrouper ces deux indicateurs phénologiques. De la même manière que précédemment, le lien entre l'avancement de la phénologie et l'augmentation des températures est vérifié en fin de période printanière et en période estivale en France. En effet, la phénologie du stade 65 de *Vitis vinifera* est avancée de 2,64 jours par décennie et la phénologie du stade 87 de *Malus domestica* est avancée de 2,81 par décennie. Ce résultat peut être confronté à des études similaires. Ainsi, entre 1965 et 2001, un avancement phénologique de 2 jours par décennie est obtenu pour la floraison de *Vitis vinifera* et de 1,46 jour par décennie pour la maturation de *Malus domestica* aux Etats-Unis (Wolfe *et al.*, 2005). Par conséquent, le réchauffement climatique a un effet important sur les indicateurs phénologiques choisis en France par rapport aux Etats-Unis. Les températures élevées peuvent entraîner des concentrations plus élevées de sucre dans les fruits au moment de la récolte et donc avancer les dates de récolte (Parker *et al.*, 2020). Mais cette sensibilité face aux températures varie considérablement selon les variétés (Wolkovich *et al.*, 2017). Chaque variété possède sa propre variabilité (García de Cortázar-Atauri *et al.*, 2017), et il existe également une variabilité entre populations (Marchand *et al.*, 2020). De plus, les variations climatiques interannuelles sont aussi à prendre en compte. Effectivement, des avancées entre 2,43 et 10,43 jours sont observées pour différents stades phénologiques de *Malus domestica* en Inde et au Pakistan en 2018 par rapport aux enregistrements de 2017 (Ali *et al.*, 2022). Ainsi, les indicateurs phénologiques de la fin du printemps et de l'été pourraient se préciser avec le choix de variétés.

E. Définition d'un indicateur phénologique automnal en lien avec le réchauffement climatique

Enfin, les indicateurs climatiques choisis semblent avoir un effet mitigé sur la phénologie de notre indicateur automnal. Même s'il s'agit d'une tendance très largement observée en Europe, la sénescence de *Betula pendula* est tout de même avancée en lien avec l'augmentation des températures en Lettonie et en Lituanie (Kalvāne *et al.*, 2009), alors qu'en

Russie, un retard est plutôt observé (Minin *et al.*, 2020). La compréhension actuelle des réponses phénologiques automnales au changement climatique chez les espèces d'arbres à feuilles caduques reste en effet limitée, principalement en raison des difficultés à définir les événements automnaux et du manque de connaissances sur son mécanisme (Kloos *et al.*, 2024). En effet, la combinaison des facteurs telles que les maladies et la sécheresse génèrent un signal plus ou moins identique avec le jaunissement des feuilles. Une nouvelle méthode basée sur la mesure de la teneur en chlorophylle A dans les tissus des feuilles pendant tout le processus de sénescence automnale a été mise en place. Ainsi, le début de la coloration des feuilles a été défini lorsque 50 % de la chlorophylle A avait été perdue (Zhang *et al.*, 2020). En conclusion, l'indicateur phénologique *Betula pendula* semble donc prometteur pour caractériser l'automne.

V. Conclusion

En conclusion, cette étude a permis de définir cinq indicateurs phénologiques saisonniers français sensibles au réchauffement climatique. De manière générale, un avancement phénologique plus important est observé avec une même intensité de variation climatique en France par rapport aux pays cités. Tandis que *Corylus avellana* et *Syringa vulgaris* semblent être de bons candidats pour représenter respectivement l'hiver et le début du printemps, des ajustements sont encore à prévoir pour les indicateurs phénologiques de la fin du printemps (*Vitis vinifera*), l'été (*Malus domestica*) et l'automne (*Betula pendula*). De futures études pourraient donc se concentrer sur la recherche de meilleurs indicateurs phénologiques sur ces saisons ou leur création pour de nouvelles saisons, de même que des études permettant une meilleure compréhension des mécanismes des événements automnaux. Par la suite, une fois les indicateurs phénologiques saisonniers choisis, il serait possible de développer ou tester des modèles déjà existants de phénologie (Wenden *et al.*, 2021) pour chaque espèce afin de simuler leurs évolutions futures. Enfin, cette étude est également une invitation à s'engager au sein des sciences participatives autour de la récolte de données phénologiques. Car hormis quelques régions très actives en terme de production de données phénologiques, certaines en sont au contraire très pauvres, telle que la Bretagne.

VI. Bibliographie

- Ali, M.T., Mir, M.S., Mehraj, S. & Shah, I.A., 2022. Implications of variable environments on phenology of apple (*Malus×domestica* Borkh.) in Northwestern Himalayan region. *International Journal of Biometeorology*, 66(5), 945-956. <https://doi.org/10.1007/s00484-022-02250-0>
- Asse, D., Chuine, I., Vitasse, Y., Yoccoz, N.G., Delpierre, N., Badeau, V., Delestrade, A. & Randin, C.F., 2018. Warmer winters reduce the advance of tree spring phenology induced by warmer springs in the Alps. *Agricultural and Forest Meteorology*, 252, 220-230. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.01.030>
- Badeau, V., Bonhomme, M., Bonne, F., Carre, J., Cecchini, S., Chuine, I., Ducatillon, C., Jean, F., Lebourgeois, F.F. & Seguin, B., 2017. Les plantes au rythme des saisons. Du plaisir d'observer la phénologie. *Biotope*, 336, ISBN : 978-2-36662-196-9
- Barck, H., VonLinné, C. & Höjer, L.M., 1753. Vernatio arborum. *Missouri Botanical Garden*. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.39550>
- Bertin, R.I., 2008. Plant phenology and distribution in relation to recent climate change. *The Journal of the Torrey Botanical Society*, 135(1), 126-146. <https://doi.org/10.3159/07-RP-035R.1>
- Črepinšek, Z., Štampar, F., Kajfež-Bogataj, L. & Solar, A., 2012. The response of *Corylus avellana* L. phenology to rising temperature in north-eastern Slovenia. *International Journal of Biometeorology*, 56, 681-694. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0469-7>
- Czernecki, B. & Jablonska, K., 2016. Reconstruction of late spring phenophases in Poland and their response to climate change, 1951–2014. *Acta Agrobotanica*, 69(2). <http://dx.doi.org/10.5586/aa.1671>
- García de Cortázar-Atauri, I., Daux, V., Garnier, E., Yiou, P., Viovy, N., Seguin, B., Boursiquot, J.M., Parker, A.K., van Leeuwen, C. & Chuine, I., 2010. Climate reconstructions from grape harvest dates: Methodology and uncertainties. *The Holocene*, 20(4), 599-608. <https://doi.org/10.1177/0959683609356585>
- García de Cortázar-Atauri, I., Duchêne, E., Destrac-Irvine, A., Barbeau, G., De Resseguier, L., Lacombe, T., Amber, K.P., Saurin, N. & Van Leeuwen, C., 2017. Grapevine phenology in France: from past observations to future evolutions in the context of climate change. *OENO One*, 51. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2017.51.2.1622>
- Heard, B.N., 2016. The phenology and compatibility of Hazelnut (*Corylus avellana*) cultivars in Tennessee. *Honors theses*. <https://scholar.utc.edu/honors-theses/80>
- Inouye, D.W., 2022. Climate change and phenology. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 13(3), e764. <https://doi.org/10.1002/wcc.764>
- Joly, D., Brossard, T., Cardot, H., Cavailhes, J., Hilal, M. & Wavresky, P., 2010. Les types de climats en France, une construction spatiale. *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.23155>
- Kalvāne, G., Romanovskaja, D., Briede, A. & Bakšienė, E., 2009. Influence of climate change on phenological phases in Latvia and Lithuania. *Climate Research*, 39(3), 209-219. <https://doi.org/10.3354/cr00813>

- Kalvāne, G., Gribuste, Z. & Kalvāns, A.**, 2021. Full flowering phenology of apple tree (*Malus domestica*) in Pūre orchard, Latvia from 1959 to 2019. *Advances in Science and Research*, 18, 93-97. <https://doi.org/10.5194/asr-18-93-2021>
- Kloos, S., Klosterhalfen, A., Knohl, A. & Menzel, A.**, 2024. Decoding autumn phenology: Unraveling the link between observation methods and detected environmental cues. *Global Change Biology*, 30(3), e17231. <https://doi.org/10.1111/gcb.17231>
- Marchand, L. J., Dox, I., Gričar, J., Prislán, P., Leys, S., Van den Bulcke, J., Fonti, P., Lange, H., Matthysen, E., Peñuelas, J., Zuccarini, P. & Campioli, M.**, 2020. Inter-individual variability in spring phenology of temperate deciduous trees depends on species, tree size and previous year autumn phenology. *Agricultural and Forest Meteorology*, 290, 108031. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108031>
- Maury, O., Garcia de Cortazar Aauri, I., Bertuzzi, P., Persyn, B. & Lagier, M.**, 2021. SICLIMA : Système d'information de données climatiques maillées. *Portail Data INRAE*, V1. <https://doi.org/10.15454/HIPDPZ>
- Maury, O., Quidoz, M.C., Garcia de Cortazar Aauri, I., Chuine, I., El Hasnaoui, M. & Tromel, L.**, 2023. Portail de données phénologiques du réseau TEMPO / TEMPO Data Portal. *Recherche Data Gouv*, V1. <https://doi.org/10.57745/NQ9HRV>
- Meier, U.**, 2001. Stades phénologiques des mono- et dicotylédones cultivées, BBCH monographie, *Centre federal des Recherches biologiques pour l'Agriculture des Forêts*, 86. <https://doi.org/10.5073/20180906-075455>
- Menzel, A., Yuan, Y., Matiu, M., Sparks, T., Scheifinger, H., Gehrig, R. & Estrella, N.**, 2020. Climate change fingerprints in recent European plant phenology. *Global Change Biology*, 26(4), 2599-2612. <https://doi.org/10.1111/gcb.15000>
- Minin, A.A., Trofimov, I.E. & Zakharov, V.M.**, 2020. Assessment of the stability of phenological indices of the silver birch *Betula pendula* under climate change. *Biology bulletin*, 47, 149-152. <https://doi.org/10.1134/S1062359020020041>
- Parker, A.K., García de Cortázar-Aauri, I., Trought, D.R., Agnew, A., Sturman, A. & van Leeuwen, C.**, 2020. Adaptation to climate change by determining grapevine cultivar differences using temperature-based phenology models. *OENO One*, 54 (4). <https://doi.org/10.20870/oenone.2020.54.4.3861>
- Piao, S., Liu, Q., Chen, A., Janssens, I.A., Fu, Y., Dai, J., Liu, L., Lian, X., Shen, M. & Zhu, X.**, 2019. Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges. *Global change biology*, 25(6), 1922-1940. <https://doi.org/10.1111/gcb.14619>
- R Core Team**, 2023. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org>
- Réaumur, R.A.**, 1735. Observation du thermometer, faites à Paris pendant l'année 1735, comparés avec celles qui ont été faites sous la ligne, à l'Isle de France, à Alger et en quelques-unes de nos isles de l'Amérique. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, 545-576.
- Reid, P.C., Hari, R.E., Beaugrand, G., Livingstone, D.M., Marty, C., Straile, D., Barichivich, J., Gobeille, E., Adrian, R., Aono, Y., Brown, R., Foster, J., Groisman, P., Hélaouët, P., Hsu, H., Kirby, R., Knight, J., Kraberg, A., Li, J., Lo, T., Myeni, R.B., North, R.P., Pounds, J.A., Sparks, T., Stübi, R., Tian, Y., Wiltshire, K.H., Xiao, D. & Zhu, Z.**, 2015. Global impacts of the 1980s regime shift. *Global change biology*, 22(2), 682-703. <https://doi.org/10.1111/gcb.13106>

- Scheifinger, H., Hübner, T. & Ressler, H.**, 2024. Graphical representation of real time phenological information for the purpose of quality control, Citizen Science participation, media and climate impact monitoring. *Copernicus Meetings*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-10866>
- Schröder, W., Schmidt, G. & Schönrock, S.**, 2014. Modelling and mapping of plant phenological stages as bio-meteorological indicators for climate change. *Environmental Sciences Europe*, 26, 1-13. <https://doi.org/10.1186/2190-4715-26-5>
- Sweitzer, G.**, 2015. Production d'indicateurs de l'effet du changement climatique. *Sciences du Vivant [q-bio]*. dumas-01266614
- Szabó, B., Vincze, E. & Czúcz, B.**, 2016. Flowering phenological changes in relation to climate change in Hungary. *International Journal of Biometeorology*, 60, 1347-1356. <https://doi.org/10.1007/s00484-015-1128-1>
- Szpakowski, W. & Szydłowski, M.**, 2018. Probable rainfall in Gdansk in view of climate change. *Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumiectionis*, 3(18(3)), Article 18(3). <https://doi.org/10.15576/asp.fc/2018.17.3.175>
- Taghavi, T., Rahemi, A., Dale, A., Galic, D. & Kelly, J.**, 2021. Hazelnut floral phenology in southern Ontario. *Canadian Journal of Plant Science*, 101(6), 803-817. <https://doi.org/10.1139/cjps-2020-0333>
- Templ, B., Koch, E., Bolmgren, K., Ungersböck, M., Paul, A., Scheifinger, H., Rutishauser, T., Busto, M., Chmielewski, F.M., Hájková, L., Hodzić, S., Kaspar, F., Pietragalla, B., Romero-Fresneda, R., Tolvanen, A., Vučetić, V., Zimmermann, K. & Zust, A.**, 2018. Pan European Phenological database (PEP725): a single point of access for European data. *International journal of biometeorology*, 62, 1109-1113. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1512-8>
- Vidal, J.P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M. & Soubeyroux, J.M.**, 2010. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International journal of climatology*, 30(11), 1627-1644. <https://doi.org/10.1002/joc.2003>
- Wenden, B., Chuine, I., Farrera, I., García de Cortázar-Atauri, I. & Legave, M.**, 2021. Des modèles prédictifs comme outils d'anticipation des changements phénologiques chez les espèces fruitières. Dans Legave, J.M. (dir.), Les productions fruitières à l'heure du changement climatique, *Synthèses. Éditions Quae*, 227-258. ISBN: 978-2-7592-3251-2
- White, M.A., Thornton, P.E., & Running, S.W.**, 1997. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability. *Global biogeochemical cycles*, 11(2), 217-234. <https://doi.org/10.1029/97GB00330>
- Wickham, H., Chang, W. & Wickham, M.H.**, 2016. Package 'ggplot2'. Create elegant data visualisations using the grammar of graphics. Version, 2(1), 1-189.
- Wolfe, D.W., Schwartz, M.D., Lakso, A.N., Otsuki, Y., Pool, R.M. & Shaulis, N.J.**, 2005. Climate change and shifts in spring phenology of three horticultural woody perennials in northeastern USA. *International Journal of Biometeorology*, 49, 303-309. <https://doi.org/10.1007/s00484-004-0248-9>
- Wolkovich, E.M., Burge, D.O., Walker, M.A. & Nicholas, K.A.**, 2017. Phenological diversity provides opportunities for climate change adaptation in winegrapes. *Journal of Ecology*, 105(4), 905-912. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12786>

Zhang, X., Friedl, M.A., Schaaf, C.B., Strahler, A.H., Hodges, J.C.F., Gao, F., Reed, B.C. & Huete, A., 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84(3), 471–475. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00135-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00135-9)

Zhang, S., Dai, J. & Ge, Q., 2020. Responses of autumn phenology to climate change and the correlations of plant hormone regulation. *Scientific reports*, 10(1), 9039. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65704-8>

VII. Annexes

Annexe 1 : Tableau représentant les résultats des tests T réalisés sur les régressions linéaires de la Figure 3.

Saison	Indicateur climatique	Valeur du test T	Degrés de liberté	P
Hiver	mint	2,87	62	5,61e-03
Hiver	meant	3,22	62	2,02e-03
Hiver	maxt	3,64	62	5,60e-04
Hiver	ranget	3,45	62	1,00e-03
Hiver	rainsum	0,37	62	0.59
Printemps	mint	2,47	62	1,64e-02
Printemps	meant	3,64	62	5,64e-04
Printemps	maxt	4,15	62	1,04e-04
Printemps	ranget	3,88	62	2,58e-04
Printemps	rainsum	-0,89	62	0.38
Début de l'été	mint	5,18	62	2,58e-06
Début de l'été	meant	5,26	62	1,89e-06
Début de l'été	maxt	5,15	62	2,86e-06
Début de l'été	ranget	2,93	62	4,78e-03
Début de l'été	rainsum	0,66	62	0.51
Fin de l'été	mint	7,03	62	1,92e-09
Fin de l'été	meant	5,64	62	4,45e-07
Fin de l'été	maxt	5,01	62	4,82e-06
Fin de l'été	ranget	2,53	62	1,39e-02
Fin de l'été	rainsum	-1,32	62	0.19
Automne	mint	3,67	62	5,12e-04
Automne	meant	3,80	62	3,38e-04
Automne	maxt	3,94	62	2,10e-04
Automne	ranget	3,05	62	3,34 e-03
Automne	rainsum	-1,38	62	0.17

Annexe 2 : Tableau représentant les résultats des tests T réalisés sur les régressions linéaires de la Figure 4.

Saison	Indicateur climatique	Valeur du test T	Degrés de liberté	P
Hiver	mint	-4,04	142	8,73e-05
Hiver	meant	-3,68	142	3,30e-04
Hiver	maxt	-2,84	142	5,25e-03
Hiver	ranget	2,19	142	2,98e-02
Printemps	mint	-5,91	209	1,32e-08
Printemps	meant	-8,75	209	7,29e-16
Printemps	maxt	-9,48	209	2,20e-16
Printemps	ranget	-6,43	209	8,40e-10
Début de l'été	mint	-4,99	237	1,17e-06
Début de l'été	meant	-6,64	237	2,15e-10
Début de l'été	maxt	-8,19	237	1,68e-14
Début de l'été	ranget	-6,61	237	2,47e-10
Fin de l'été	mint	-14,12	149	< 2,20e-16
Fin de l'été	meant	-14,66	149	< 2,20e-16
Fin de l'été	maxt	-13,89	149	< 2,20e-16
Fin de l'été	ranget	-8,21	149	9,58e-14
Automne	mint	-2,40	142	1,77e-02
Automne	meant	-2,12	142	3,56 e-02
Automne	maxt	-1,62	142	0,11
Automne	ranget	-0,10	142	0,92

RÉSUMÉ

Définition et évolution d'indicateurs phénologiques français saisonniers au regard du changement climatique.

Dans un contexte actuel de réchauffement climatique, de nombreuses études analysent à travers le monde les variations phénologiques d'indicateurs saisonniers végétaux. Ce travail n'ayant pas été réalisé de manière globale en France, cette étude vise donc à définir des indicateurs phénologiques saisonniers français grâce aux bases de données phénologiques présentes sur la plateforme TEMPO, et d'étudier leur évolution conjointement au réchauffement climatique grâce aux données climatiques SAFRAN via la plateforme SICLIMA. Ainsi l'hiver, le début du printemps, la fin du printemps, l'été et l'automne sont respectivement représentés par les floraisons de *Corylus avellana*, *Syringa vulgaris* et *Vitis vinifera*, la maturation de *Malus domestica* et la sénescence de *Betula pendula*. Il a été montré que ces indicateurs phénologiques ont une date d'observation plus précoce entre 1991 et 2023 par rapport à la période s'étalant de 1959 à 1990. De plus, une augmentation des températures minimales, moyennes et maximales, ainsi que des amplitudes thermiques a également été observée entre ces périodes, contrairement au cumul des précipitations, où aucune différence significative n'a été notée. Ces variables climatiques retenues semblent expliquer en partie les variations phénologiques des indicateurs choisis, mais d'autres variables sont à considérer. Ainsi, l'étude a permis de présélectionner des indicateurs phénologiques saisonniers français qui seront encore à affiner.

Mots-clés : Phénologie ; Réchauffement climatique ; Bioclimatologie ; *Corylus avellana* ; *Syringa vulgaris* ; *Vitis vinifera* ; *Malus domestica* ; *Betula pendula* ; code BBCH ; précoce ; saisons

Definition and evolution of French seasonal phenological indicators in the light of climate change.

In the current context of global warming, a lot of studies around the world are analyzing phenological variations in seasonal plant indicators. As this work has not been carried out on a global scale in France, this study aims to define French seasonal phenological indicators using the phenological databases available on the TEMPO platform, and to study their evolution in conjunction with global warming using SAFRAN climate data via the SICLIMA platform. Thus, winter, early spring, late spring, summer and autumn are represented respectively by the flowering of *Corylus avellana*, *Syringa vulgaris* and *Vitis vinifera*, the ripening of *Malus domestica* and the senescence of *Betula pendula*. These phenological indicators have been shown to have an earlier observation date between 1991 and 2023 than in the period from 1959 to 1990. In addition, an increase in minimum, mean and maximum temperatures, as well as in thermal amplitudes, was also observed between these periods, in contrast to cumulative precipitation, where no significant difference was noted. These climatic variables appear to explain some of the phenological variations in the selected indicators, but there are other variables to consider. In this way, the study has enabled us to pre-select French seasonal phenological indicators that still need to be refined.

Key-words : Phenology ; Global warming ; Bioclimatology ; *Corylus avellana* ; *Syringa vulgaris* ; *Malus domestica* ; *Vitis vinifera* ; *Betula pendula* ; BBCH code ; early ; seasons