



CENTRE D'ÉCOLOGIE
FONCTIONNELLE
& ÉVOLUTIVE



Analyse des anomalies phénologiques de l'hiver 2015-2016 en France

**Rapport de stage de Master 1 Modélisation en Ecologie
Université Rennes 1**

Année universitaire 2015-2016

Période de stage : 11/04/2016 – 04/06/2016

Rédigé par **Célia Bodin**

Maitre de stage : **Isabelle Chuine**
Préparer au sein du *Centre d'Ecologie*
Fonctionnelle et Evolutive de Montpellier

Correspondant universitaire : **Frédéric
Hamelin**
Soutenu à Rennes le 15/06/2015.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier chaleureusement mon maître de stage, **Isabelle Chiune**, directrice de recherche au CEFÉ, pour m'avoir gentiment proposé ce sujet de stage, pour tout le temps qu'elle a pu m'accorder pendant sa réalisation et pour sa confiance.

Je souhaite également remercier **Iñaki Garcia de Cortazar-Atauri**, ingénieur de recherche dans le service AGROCLIM de l'INRA d'Avignon, pour sa gentillesse, sa disponibilité et pour avoir fourni toutes les données météorologiques.

Merci également à **Jennifer Carré**, responsable de réseaux à Tela-botanica, pour les données ODS ; **Marjorie Bison** et **Anne Delestrade** du CREA pour les données Phénoclim ; **Philippe Feldmann**, Chargé de mission au Cirad pour les données d'Orchisauvage.

Enfin un grand merci à toute l'équipe **FORECAST** pour son ambiance conviviale et décontractée, on s'y sent vite à son aise !

Table des matières

INTRODUCTION.....	1
MATERIEL ET METHODE	3
Données phénologiques.....	3
Origine des données	3
Tri des données.....	4
Exploration des données.....	5
Données météorologiques	5
Relation entre phénophases et température	5
Projections dans le futur	6
Analyses statistiques	7
RESULTATS	7
Caractérisation des années en fonction des réponses phénologiques.....	7
Caractérisation des réponses phénologiques des différentes espèces	8
Interprétation climatique des réponses phénologiques de 2016.....	10
Projections dans le futur	12
DISCUSSION	12
Réponses des espèces	12
Relation entre phénophases et température	13
Projections dans le futur	14
Conclusion et perspectives	15
BIBLIOGRAPHIE.....	16
ANNEXES	20

INTRODUCTION

Entre avril 2015 et mars 2016, la température globale moyenne - combinant la température de l'air et des océans - n'a fait que battre ses propres records (<http://www.noaa.gov/>). En effet, chacun de ces 11 mois a connu sa température moyenne la plus élevée depuis le début des enregistrements réalisés par l'Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique (NOAA). De plus, pour la première fois en décembre 2015, la NOAA a enregistré des anomalies de températures combinant air et océans dépassant 1.11°C les normales. Ce record fut suivi par celui de janvier 2016 avec un écart moyen aux normales de +1.04°C, février 2016 de +1.23°C et mars 2016 de +1.22°C. Ces anomalies semblent être liées au réchauffement global dû à l'accumulation des gaz à effet de serres mais aussi à un El Niño particulièrement fort, qui est un phénomène océanique naturel entraînant une hausse de la température à la surface de l'eau dans l'océan Pacifique, autour de l'équateur (<http://www.climatecentral.org/>). En France, des tendances identiques ont été observées. Selon le bilan climatique de météo France (sur les températures de l'air uniquement), bien que le début de l'automne 2015 ait été plutôt frais, le mois de novembre fut beaucoup plus doux, et se trouve être le troisième mois de novembre le plus chaud depuis 1900. L'hiver 2015-2016 fut le plus chaud depuis 1900, ne présentant aucune vraie condition hivernale. Il bat ainsi le précédent record de chaleur des hivers 2006-2007 et 2013-2014 avec des anomalies de températures moyennes de l'air de 3.9°C au-dessus des normales. Enfin, décembre 2015 fut le mois de décembre le plus chaud depuis le début des relevés météorologiques (<http://www.meteofrance.fr/>).

Ces conditions de températures anormalement hautes ont entraîné de nombreuses répercussions sur les règnes animal et végétal. Dans leur communiqué de presse du 21 mars 2016, la Ligue pour la Protection des Oiseaux (LPO) rapporte de nombreuses observations anormales dans le monde animal. Les chants de certaines espèces d'oiseaux ainsi que les premières nichées ont été observées avec beaucoup d'avance par rapport aux dates théoriques et habituelles. Des changements dans les habitudes migratoires sont également apparus avec des espèces restées hiverner en France plutôt que d'aller en Afrique.

Mais ces modifications ne s'arrêtent pas qu'aux oiseaux. De nombreux mammifères qui hivernent se sont réveillés beaucoup plus tôt, les insectes se retrouvent désynchronisés par rapport au cycle de vie de leur source de nourriture ou prédateurs (communiqué de presse, LPO 2016), et certains apiculteurs ont même dû nourrir eux-mêmes leurs abeilles restées actives tout l'hiver.

Des observations identiques en termes de précocité ont été faites concernant les végétaux. Plusieurs programmes de sciences participatives ont rapidement fait état de phénomènes phénologiques anormaux, notamment des floraisons automnales et hivernales d'espèces printanières.

Les nombreuses anomalies phénologiques qui ont eu lieu cet hiver chez de nombreux groupes taxonomiques, animal et végétal, ont engendré des désynchronisations de cycle entre espèces en interaction au sein des chaînes trophiques, entraînant un préjudice pour l'une ou les deux parties et pouvant avoir des répercussions négatives sur l'ensemble de la chaîne trophique et des écosystèmes (Hegland *et al.* 2009 ; Post *et al.* 2008).

Les principaux facteurs agissant sur l'occurrence des principales phénophases des plantes (débourrement, floraison, maturation des fruits, senescence foliaire) sont la température et la photopériode. En effet, chez de nombreuses espèces, en automne les bourgeons vont entrer dans une phase de repos, appelée dormance. Ce phénomène peut être découpé en deux phases : l'endodormance, pendant laquelle les bourgeons restent en dormance à cause de facteurs internes, et l'écodormance pendant laquelle les bourgeons restent en dormance à cause de facteurs externes (Chuine *et al.* 2010). Les raisons d'entrée et sortie en endodormance restent mal connues même si la diminution des températures et celle de la photopériode semblent impliquées (Campoy *et al.* 2011).

Pour lever l'endodormance, le bourgeon doit accumuler suffisamment de froid (Campoy *et al.* 2011). Quand la plante a atteint ses besoins en froid, l'endodormance est levée et les bourgeons peuvent reprendre leur croissance dès lors que les conditions sont favorables, c'est à dire sous certaines conditions de températures (plutôt élevées), d'humidité du sol et de nutriment, et pour les espèces photosensibles, certaines conditions de photopériode (Körner et Basler 2010 ; Polgar et Primack 2011). Ces conditions favorables doivent durer pendant un certain temps pour que l'éclatement des bourgeons apparaisse (Polgar et Primack 2011 ; Maligi *et al.* 2015).

Les modèles phénologiques prédisant l'occurrence des différentes phénophases en fonction des conditions environnementales (principalement température et photopériode), prévoient que l'augmentation globale de température pendant l'hiver va ralentir voire compromettre la levée de l'endodormance par manque de jours de froid (Chuine *et al.* 2016). Cependant, certains auteurs pensent que ce manque de froid hivernal pourrait être partiellement remplacé par une photopériode longue (Körner et Basler 2010 ; Caffarra *et al.*

2013). Néanmoins, cette compensation par la photopériode ne peut avoir lieu que chez les espèces photosensibles (Laube *et al.* 2014).

Cette sensibilité des phénophases aux variations de température annuelles en fait un bon indicateur des impacts biologiques du changement climatique sur le long terme et sur les écosystèmes terrestres (Richardson *et al.* 2013). Plusieurs études ont montrées que les phénophases les plus sensibles aux variations de températures sont celles se déroulant au printemps ou en été et qu'il existe une relation approximativement linéaire entre l'occurrence de ces phénophases et la température (Gordo et Sanz 2005 ; Beaubien et Hamann 2011 ; Spark *et al.* 2000 ; Fitter et Fitter 2002 ; Morin *et al.* 2010). Ainsi, durant les dernières décades, de nombreuses espèces ont vu leurs dates de débourrements devenir de plus en plus précoces avec l'augmentation des températures. Les objectifs principaux de cette étude étaient d'établir des groupes de réponses des différentes espèces sur la base de leur comportement phénologique de cet hiver et d'identifier les causes des différences de réponse observées entre espèces. Pour remplir ces objectifs, nous avons utilisé les données provenant de trois programmes de Sciences participatives : L'Observatoire des Saisons (www.obs-saisons.fr), Phenoclim (<http://phenoclim.org/fr>), Orchisauvage (<http://www.orchisauvage.fr/>), et du réseau national d'observation phénologique (www.gdr2968.cnrs.fr). Nous nous sommes concentrés dans ce travail sur la réponse de flore sauvage et cultivée. En perspective de ces analyses, il nous est apparu opportun de déterminer également, à l'instar de l'été 2003, si l'hiver anormal de 2015-2016 allait devenir la norme d'ici à 2100 et quelles conséquences cela aurait-il pour les espèces.

MATERIEL ET METHODE

Données phénologiques

Origine des données

Les données ont été récupérées à partir de quatre bases de données différentes dont trois d'entre elles sont alimentées par un programme de sciences participatives : Orchisauvage (<http://www.orchisauvage.fr/>) géré par la Société Française d'Orchidophilie, Phenoclim (<http://phenoclim.org/fr>) géré par le Centre de Recherche sur les Ecosystème d'Altitude, l'Observatoire des Saisons (www.obs-saisons.fr) géré par Tela Botanica. Ces programmes proposent au public d'observer certains stades phénologiques de quelques espèces animales et végétales, et de consigner les dates d'occurrence de ces événements dans des bases de données en ligne. Enfin, une quatrième base de données a été utilisée. Elle est

gérée par le CEFE et a été constituée dans le cadre du Groupement De Recherche 2968 Systèmes d'Information Phénologique pour la Gestion et l'Etude des Changements Climatiques (GDR 2968 SIP-GECC) du Centre National de Recherche Scientifique (CNRS). Cette base de données regroupe toutes les observations phénologiques qui ont pu être réalisées sur le territoire métropolitain depuis 1349 par les autorités territoriales (bans de vendange), ecclésiastes et savants naturalistes, météorologues, puis organismes de recherche.

En sus des données relayées normalement tout au long de l'année par les participants, le programme ODS a lancé, cet hiver, un appel à témoignage de phénomènes phénologiques anormaux avec mention de l'espèce, du stade phénologique précis, de la date, de la géolocalisation de l'observation, et d'une photographie.

Tri des données

A partir des différentes bases de données et des observations récupérées par e-mail, un premier tri a été réalisé. Seuls les couples espèce-événement phénologique ayant au moins dix observations en automne-hiver 2015-2016 et les années antérieures ont été conservés.

A partir des anomalies météorologiques de France sur le dernier siècle (figure 1), nous avons identifié deux périodes relativement homogènes climatiquement auxquelles nous pouvions comparer l'hiver 2015-2016. Une première période allant de 1901 à 1920 montre des anomalies moyennes de température d'environ 0.4°C en dessous des normales de 1961-1990. Cette période est antérieure au réchauffement climatique. La deuxième période allant de 1961 à 1980 correspond aux normales. Une troisième période allant de 1995 à 2014 montre des températures en moyenne 1°C au-dessus des normales.

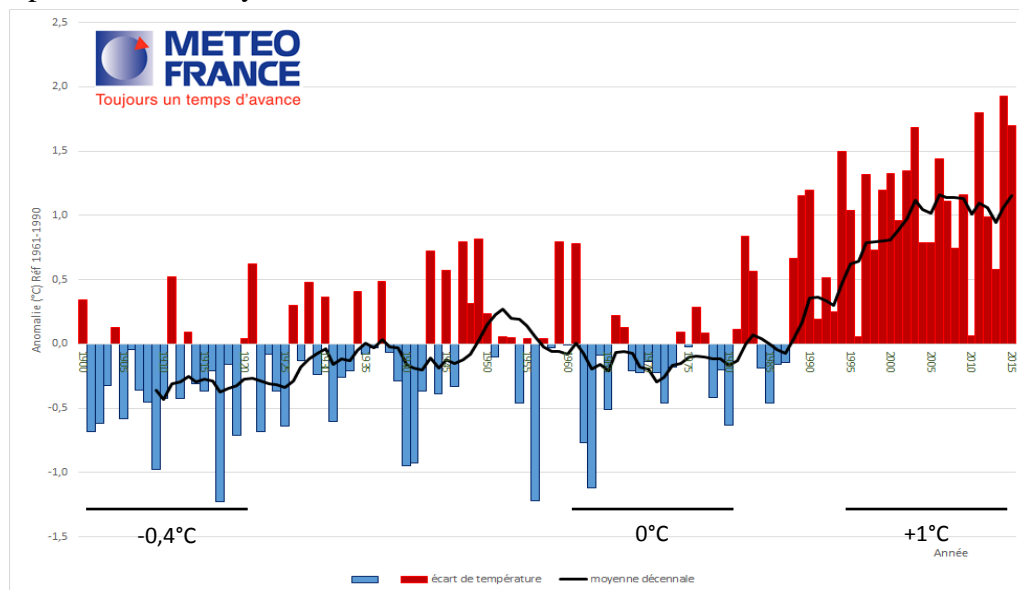


Figure 1 : Anomalies moyennes des températures par année en France, par rapport à la période 1961-1990. Ce document est issu des données Météo France. Les barres en bleu représentent les moyennes sous les normales, celles en rouges les moyennes supérieures aux normales. La courbe représente la moyenne décennale.

Au final nos analyses ont été réalisées sur 22 espèces et 40 couples espèce-événement, sur les périodes 1901-1920 ; 1995-2014 ; 2015-2016. Cela correspond à plus de 38 000 observations (voir annexe 1). A noter que pour les orchidées, les observations recueillies commençant en 2001, l'hiver 2015-2016 n'a pu être comparé qu'à la dernière période identifiée.

Exploration des données

Une première exploration des données a été réalisée à l'aide de box plots pour représenter les dates de chaque par espèce et événement par année. Ces box plots ont permis de classer les années par niveau de précocité/tardivité mais aussi d'identifier les années où les occurrences de floraison et de feuillaison se dissociaient. En effet, ces deux événements se produisent normalement soit en même temps, voir à quelques jours d'intervalle pour les espèces avec des bourgeons mixtes, soit de façon rapprochée, de quelques jours à deux ou trois semaines quand les bourgeons floraux et foliaires sont distincts.

Dans un second temps, pour chaque espèce-événement nous avons calculé les différences en jour entre les dates observées cet hiver et les années précédentes des deux périodes identifiées. Nous avons ensuite représenté graphiquement et conjointement ces écarts aux deux périodes d'intérêt.

Données météorologiques

Sélection des données

A partir de la localisation des données phénologiques sélectionnées, 30 stations météorologiques ont été retenues, 25 gérées par l'INRA et 5 par Météo France (annexe 2), pour lesquelles nous avons obtenu les données de température journalière minimales et maximale depuis 2005.

A l'aide de ces données nous avons dressé une typologie des années en fonction des anomalies de température automnales, hivernales, et printanières ; que ce soit sur la température moyenne, maximale ou minimale. Les années montrant les automne-hiver les plus chauds après 2015-2016 sont 2015, 2014, 2012, 2011, 2008 et 2007 (année du 1^{er} janvier de l'hiver). Pour chaque année sélectionnée, la température moyenne sur l'ensemble des stations ainsi que son amplitude ont été calculées à l'échelle mensuelle, bimensuelle, décadaire et journalière.

Relation entre phénophases et température

Un calcul du nombre de jour sous 12°C depuis le 1^{er} septembre et de la somme de degrés jour (température moyenne – base) sur une base de 5°C depuis le 1^{er} octobre a

également été effectué. Ces variables correspondant respectivement à une estimation du froid ressenti par les plantes pour lever la dormance des bourgeons et à la chaleur nécessaire à la croissance cellulaire pour atteindre le stade considéré. Ce seuil (base de 5°C) est dû au fait qu'au-dessous d'une certaine température, les enzymes utiles à la croissance cellulaire sont inactives (Higley *et al.* 1986). Dans les faits, les lois de réponse à la température pendant l'endodormance et l'ecodormance ne sont pas linéaires et varient d'une espèce à l'autre, mais dans le cadre de ce travail, nous n'avons pas eu le temps d'analyser séparément la relation à la température de chaque espèce-événement. Nous avons simplement cherché à identifier le phénomène global qui avait engendré les différents niveaux de réponses observés chez les espèces. Pour cela nous avons construit un modèle simple basé sur les quantités de froid reçu permettant de lever la dormance et les quantités de chaleur reçues permettant la croissance cellulaire.

A partir des dates correspondant à 10% des observations pour chaque couple espèce-événement au cours des différentes années, nous avons déterminé la quantité minimale de chaud et froid cumulé permettant l'occurrence de l'évènement. A partir de ces quantités de froid et de chaud, nous avons estimé la date d'occurrence attendue pour chaque espèce-événement ainsi : à partir du 1^{er} septembre, une fois la quantité minimale de froid atteinte (nombre de jour sous 12°C), le cumul de chaleur (somme de degré-jour en base 5°C) est commencé ; lorsque la somme minimale est atteinte la date attendue par notre modèle simple est atteinte. Ce modèle simple permet de traiter toutes les espèces conjointement mais surestime nécessairement les dates attendues. En effet, les quantités minimales de chaleur identifiées pour chaque espèce sont surestimées car calculées à partir du 1^{er} octobre et non calculées à partir de la date de levée de dormance. Néanmoins, ce modèle simple devrait pouvoir retranscrire les variations interannuelles observées.

Projections dans le futur

Nous avons cherché à savoir si les conditions climatiques de l'hiver 2015-2016 qui ont engendré des anomalies phénologiques importantes chez de nombreuses espèces allaient se retrouver dans les décennies à venir. Pour cela nous avons récupéré, sur le site drias-climat.fr, les résultats de simulation du modèle climatique ALADIN mis en place par le Centre National de Recherches Météorologiques (www.cnrm-game-meteo.fr) pour trois scénarii : RCP8.5 qui le plus pessimiste, RCP4.5 et RCP 2.6 qui est le plus optimiste. Pour chacun d'entre eux, sur des périodes de 20 ans, les moyennes mensuelles, bimensuelles, décadaires et journalières sur l'ensemble des 30 stations ont été calculées.

Analyses statistiques

Toutes les analyses statistiques et la réalisation des graphiques ont été effectuées sur le logiciel R dans sa version 3.2.2.

Pour chaque box plot (construit avec le package GGLOT2), des analyses de variance entre chaque année ont été effectués à l'aide d'une ANOVA - suivie du test post-hoc de Tukey - ou du test non paramétrique de Wilcoxon. L'hypothèse nulle, dans tous les cas, étant qu'il n'y a pas de différence entre les années.

Des ACP sur les jours médians et de premier décile de chaque couple espèce-événement en fonction des années ont également été réalisés à l'aide du package ADE4.

RESULTATS

Caractérisation des années en fonction des réponses phénologiques

Les box plots par espèce et par événement phénologique montrent que les floraisons de l'année 2016 ont été les plus précoces sur les dix dernières années, alors que celles de 2005 ont été les plus tardives (Fig. 3 exemple du noisetier). Cette observation est confirmée par les tests statistiques, puisque ces deux années sont significativement différentes de toutes les autres. Ils montrent également que pour certaines espèces, les événements de floraison ont eu une distribution bimodale, avec des individus ayant commencé à fleurir des mois avant la période habituelle, engendrant des floraisons automnales chez des espèces à floraison printanière (voir annexe 3 : exemple du lilas). En ce qui concerne la feuillaison, l'année 2011 apparaît dans l'ensemble comme la plus précoce et la différence avec les autres années est toujours significative.

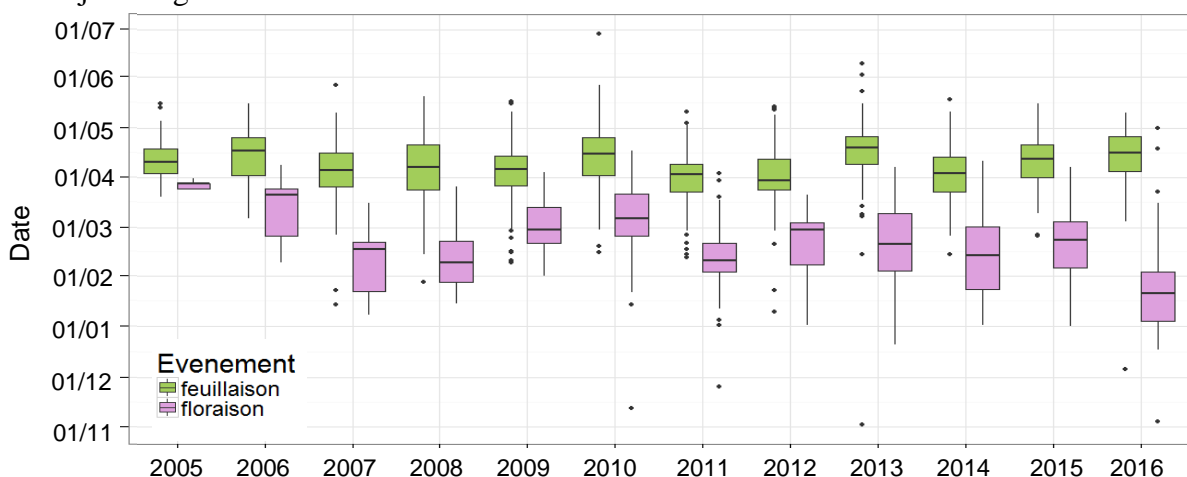


Figure 3 : Représentation des jours moyens d'observation de la floraison (rose) et de la feuillaison (vert) chez *Corylus avellana*, de 2005 à 2016.

Les box plots montrent aussi que l'écart entre la feuillaison et la floraison a été beaucoup plus important en 2016 relativement aux autres années.

Ainsi sur l'ensemble des espèces, l'année 2016 a été la plus précoce, et particulièrement pour la floraison qui montre des mois d'avance chez un grand nombre d'espèces, mais pas pour la feuillaison.

Caractérisation des réponses phénologiques des différentes espèces

Les figures 3 et 4 montrent l'écart en nombre de jours entre respectivement les dates moyennes de floraison et de feuillaison de l'année 2016 et ces mêmes dates sur les périodes 1901-1920 et 1995-2014, période respectivement plutôt froide et plutôt chaude par rapport à la normale.

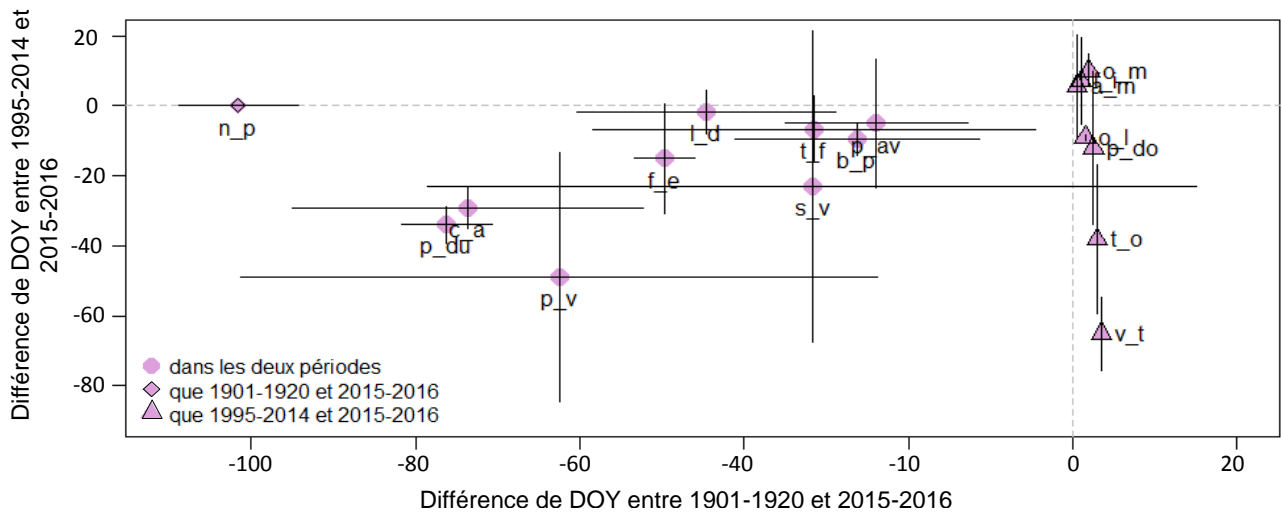


Figure 3 : Représentation des écarts de jours moyens (\pm écart-type) d'observation (DOY = Day Of Year) de la floraison pour toutes les espèces retenues entre septembre 2015- mai 2016 et les périodes 1901-1920 ou 1995-2014. Une différence de DOY négative signifie que l'observation en 2015-2016 est plus précoce d'autant de jour que pendant la période concernée. Les espèces n'ayant des données disponibles que sur une des deux périodes sont représentées par un triangle si pas de donnée en 1901-1920, un losange si pas de données en 1995-2014.

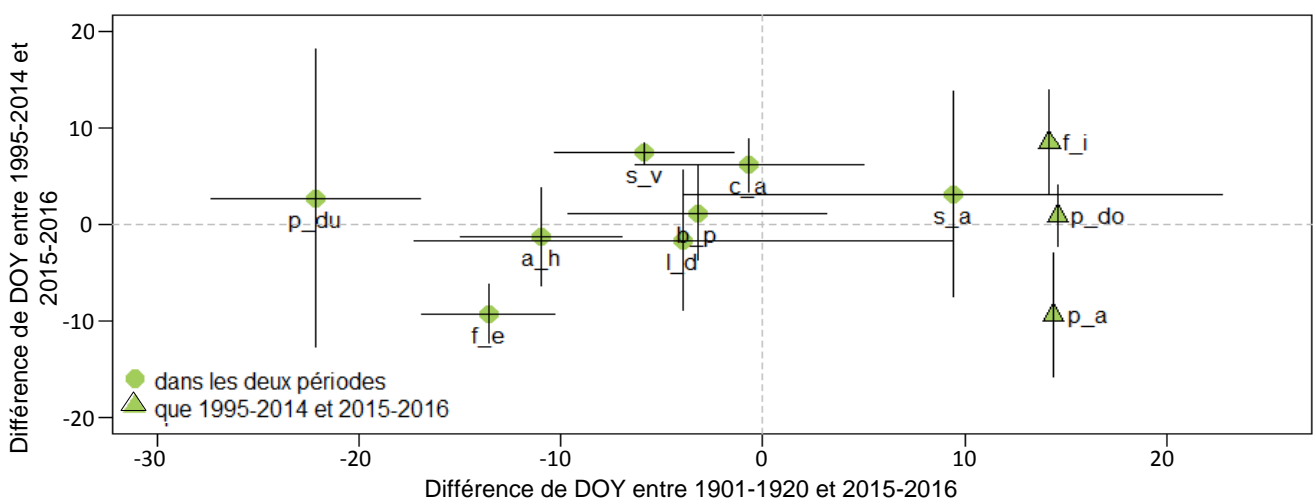


Figure 4 : Représentation des écarts de jours moyens (\pm écart-type) d'observation (DOY = Day Of Year) de la feuillaison pour toutes les espèces retenues entre septembre 2015- mai 2016 et les périodes 1901-1920 ou 1995-2014. Une différence de DOY négative signifie que l'observation en 2015-2016 est plus précoce d'autant de jour que pendant la période concernée. Les espèces n'ayant des données disponibles que sur une des deux périodes sont représentées par un triangle si pas de données en 1901-1920.

Ces figures montrent que les événements de floraison ont beaucoup plus avancé que ceux de feuillaison, puisque les premières floraisons de 2016 ont eu lieu plus de 100 jours en avance (écart-type compris) par rapport à 1901-1920 contre 30 jours pour la feuillaison. Par rapport à la période 1995-2014, l'avancement est moindre mais est quand même de 80 jours pour la floraison contre moins de 20 jours pour la feuillaison.

Ces figures permettent également d'identifier des groupes de réponses des espèces (table 1). De plus, la représentation des écart-types permet de visualiser la durée de l'évènement en 2016, particulièrement long chez *Syringa vulgaris* et *Primula veris* pour la floraison ainsi que *Prunus dulcis* et *Sorbus aucuparia* pour la feuillaison.

Table 1 : Groupes d'espèces en fonction de leur réponse phénologique en 2016. Sont considérées comme étant de la catégorie "beaucoup plus tôt" les espèces ayant au moins 30 jours d'avance en moyenne par rapport aux deux périodes, comme "plus tôt" les espèces ayant entre 10 et 30 jours d'avance sur la période 1995-2014, et comme "inchangée" celles ayant moins de 10 jours d'avance ou de retard sur la période 1995-2014.

	Beaucoup plus tôt (>30j)	Plus tôt (<30j)	Inchangé (<10j)
Floraison	<i>Narcissus pseudonarcissus</i> , <i>Viburnum tinus</i> , <i>Prunus dulcis</i> , <i>Taraxacum officinale</i> , <i>Coryllus avellana</i> , <i>Primula veris</i>	<i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Betula pendula</i> , <i>Prunus domestica</i> , <i>Ophrys lupercalis</i> , <i>Syringa vulgaris</i>	<i>Larix decidua</i> , <i>Tussilago farfara</i> , <i>Prunus avium</i> , <i>Forsythia intermedia</i> , <i>Ophrys massiliensis</i> , <i>Anacamptis morio</i>
Feuillaison		<i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Platanus acerifolia</i>	<i>Larix decidua</i> , <i>Betula pendula</i> , <i>Aesculus hippocastanum</i> , <i>Prunus domestica</i> , <i>Prunus dulcis</i> , <i>Sorbus aucuparia</i> , <i>Coryllus avellana</i> , <i>Syringa vulgaris</i> , <i>Forsythia intermedia</i>

Afin de confirmer les groupes identifiés avec les figures 3 et 4, une ACP par évènement phénologique a été réalisée à partir des jours d'observation médians et déciles de chaque couple espèce-évènement en fonction des années, de 2007 à 2016. Des groupes assez similaires à ceux décrits dans le tableau 2 sont obtenus avec l'ACP sur les déciles de la floraison (figure 5).

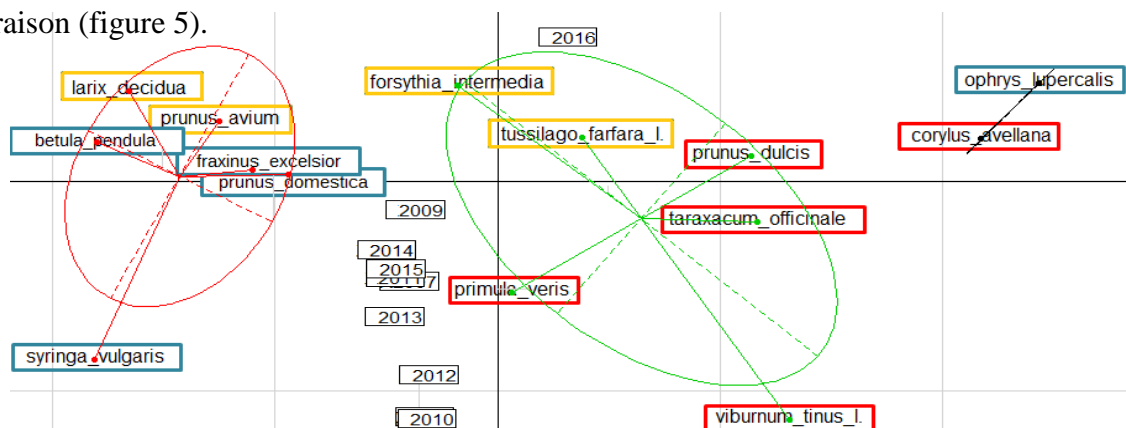


Figure 5 : ACP sur les déciles des jours d'occurrence de la floraison. Les années sont encadrées en noir. Les espèces encadrées en rouges appartiennent au groupe identifié comme "beaucoup plus tôt" dans la table 1, celles en bleu comme "plus tôt" et celles en orange comme "pas de changement". Les groupes identifiés par Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) sont représentés par les cercles d'inertie.

En ce qui concerne la représentation des années, pour la floraison on remarque l'année 2016 qui sort du lot, alors que pour la feuillaison c'est 2015 qui est à part.

Interprétation climatique des réponses phénologiques de 2016

La figure 6 montre les températures mensuelles moyennées sur les 30 stations météorologiques utilisées pour cette étude, des quatre années les plus chaudes ainsi que l'année 2013 qui fut une année plutôt moyenne en termes de phénologie, et l'année 2009 qui fut une année plutôt tardive.

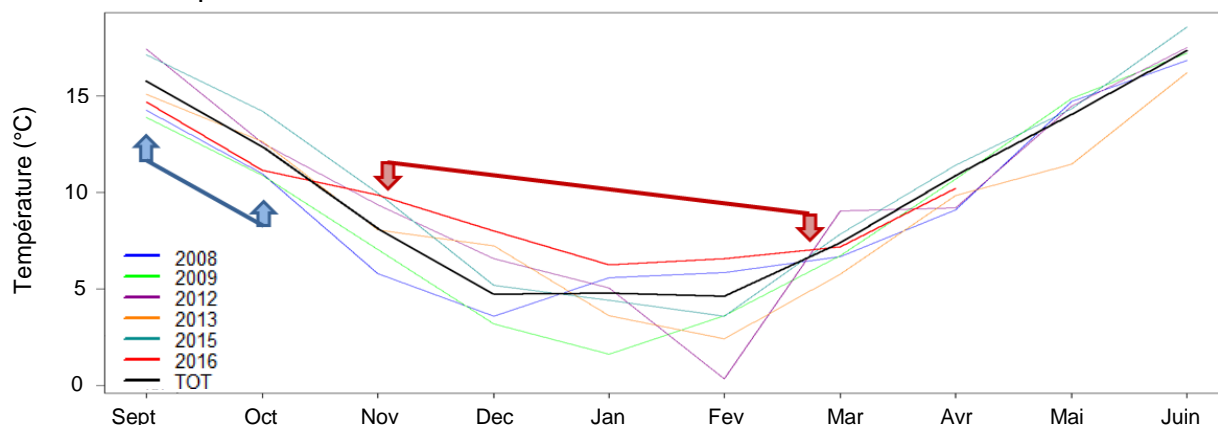


Figure 6 : Représentation de la moyenne des températures mensuelles sur l'ensemble des 30 stations pour les années sélectionnées. Les flèches bleu montrent la période de froid de l'année 2016, celles en rouge la période très chaude de 2016.

Elle montre clairement un début d'automne plutôt froid de septembre à octobre suivi d'une fin d'automne et d'un hiver plutôt chaud relativement aux autres années. Si l'on regarde à une échelle temporelle plus fine, on se rend compte que le début d'automne froid de 2016 est dû simplement à une huitaine de jours début octobre où la température est descendue sous 7°C en moyenne.

Pour ce qui est de l'amplitude thermique (amplitude mensuelle moyenne), elle été particulièrement élevée de novembre à janvier en 2016 (annexe 4). Sur l'ensemble de l'année elle reste toujours au-dessus de la moyenne générale sauf pour le mois de septembre.

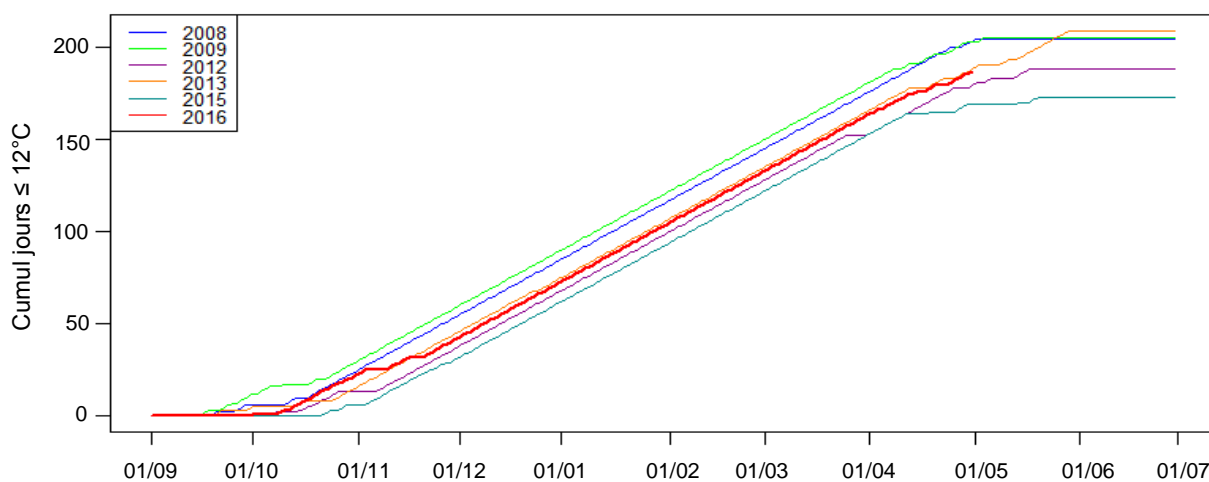


Figure 7 : Cumul du nombre de jours ayant une température moyenne inférieure à 12°C à partir du premier septembre, pour toutes les années sélectionnées

Afin de caractériser l'année 2016 plus précisément quant aux besoins physiologiques

des végétaux concernant la température, nous avons calculé le cumul de nombre de jours de froid (température journalière inférieure à 12°C) (figure 7) permettant la levée de la dormance ainsi que le cumul de degré-jours en base 5°C qui est corrélé à la vitesse de croissance cellulaire (figure 8).

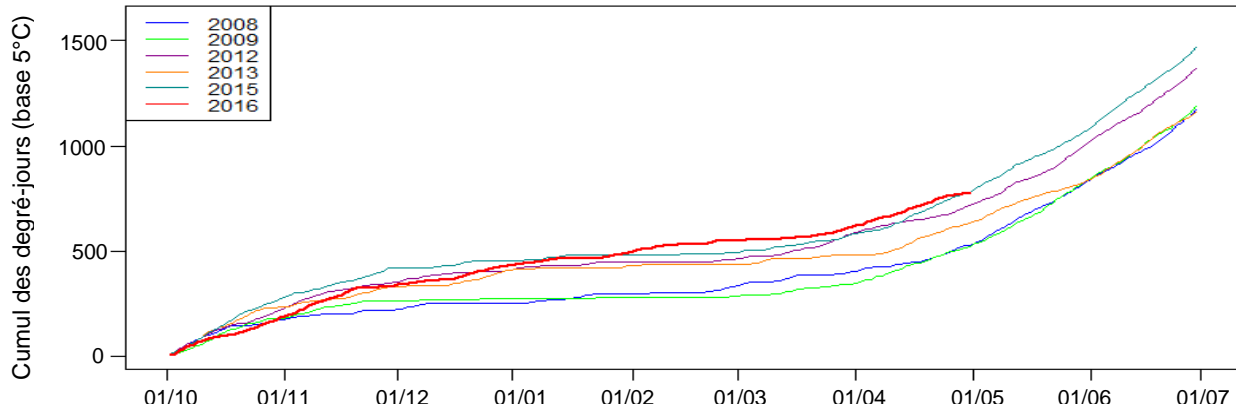


Figure 8 : Cumul des degrés- jours sur une base de 5°C à partir du premier octobre, pour toutes les années sélectionnées.

Ces figures montrent que l'on peut regrouper les années en deux groupes. Le premier groupe est composé de 2008 et 2009 qui commencent à cumuler le froid rapidement, mais les degrés jours beaucoup plus lentement. Le second est composé des années 2012, 2013 et 2015 qui commencent à cumuler du froid plus tardivement mais cumulent des degrés-jours plus rapidement. On constate que l'année 2016 se retrouve partagée entre les deux groupes puisqu'elle cumule rapidement du froid comme le premier groupe, mais elle cumule également rapidement des degrés-jour comme le second groupe.

La figure 9 montre la régression linéaire entre les dates d'occurrence attendues d'après le modèle phénologique simple décrit en section 2.3 et les dates observées. La relation linéaire est significative montrant ainsi que nous avons correctement identifié le phénomène météorologique à l'origine des réponses phénologiques de 2016.

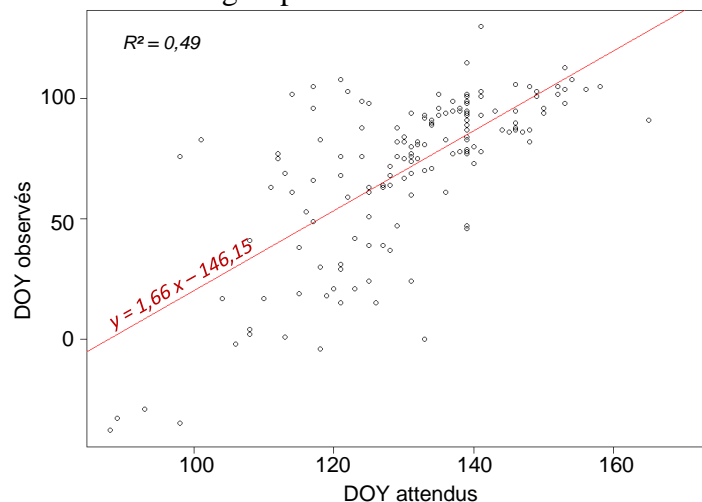


Figure 9 : Régression linéaire des résultats donnés par le modèle en fonction des observations. $R^2 = 0,49$, $P < 2,2.1016$.

Ainsi, il semble que les événements phénologiques particulièrement précoces chez certaines espèces de 2016 aient été dus à une conjonction d'événements météorologiques peu courants, à savoir une petite vague de froid précocement à l'automne suivi d'une fin d'automne et un hiver particulièrement chauds. Ces conditions nous permettent de caractériser

les besoins en froid des espèces étudiées ici, ce qui a rarement été fait, et requiert habituellement des expérimentations en conditions contrôlées assez lourdes. Aussi les espèces de la catégorie "beaucoup plus tôt" ont un besoin en froid allant de 35 à 75 jours sous 12°C, celles "plus tôt" de 77 à 152 jours (sauf *Syringa vulgaris* avec 38 jours) et celles "inchangé" de 104 à 152 jours (sauf *Ophris massiliensis* avec 68 jours).

Projections dans le futur

Les prévisions de températures moyennes mensuelles sur l'ensemble des 30 stations et sur des périodes de 20 ans ont été comparées à celles des années à hiver les plus chauds observés à ce jour. Pour le scénario climatique le plus optimiste (avec politique de limitation du réchauffement à +2°C en 2100, annexe 5), les températures seront légèrement supérieures à la moyenne mais l'hiver restera plus froid que celui de 2016.

La figure 10 montre pour le scénario climatique le plus pessimiste (+4 ou 5°C par an en moyenne), qu'à partir de 2026, les hivers seront plus chauds que celui de 2016. Cependant, la période de froid observée cette année en septembre-octobre ne semble pas se reproduire dans le futur. Ainsi, il semble que la configuration de l'hiver 2016 ne se reproduira plus.

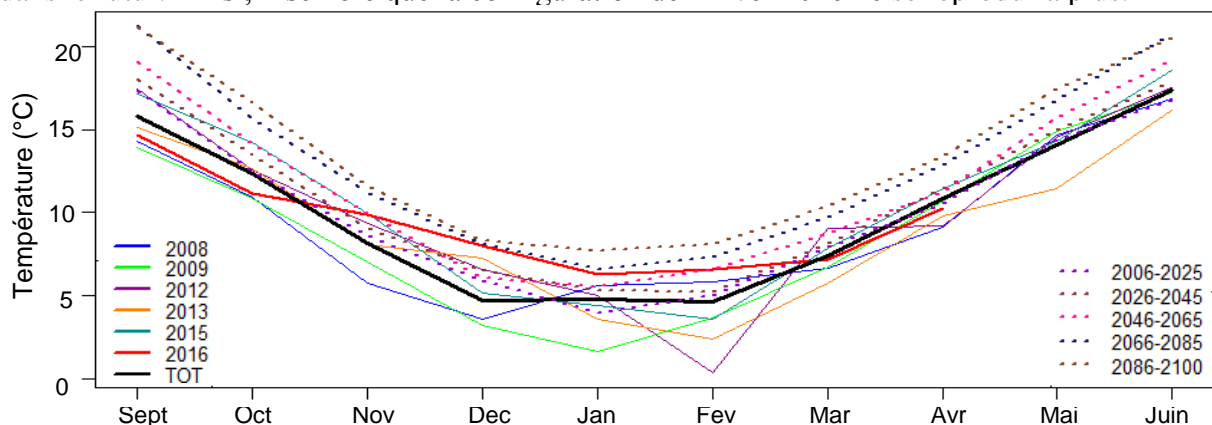


Figure 10 : Représentation de la moyenne des températures mensuelles sur l'ensemble des 30 stations pour les années sélectionnées (traits pleins) et pour les années à venir (traits pointillés) jusqu'en 2100 à partir du modèle le plus pessimiste. Les prévisions futures sont moyennées par période de 20 ans.

DISCUSSION

Réponses des espèces

Nos résultats montrent que les conditions météorologiques de l'hiver 2015-2016 ont différencié les espèces sur la base de leurs dates de floraison beaucoup plus qu'habituellement, alors que leurs dates de feuillaison ont été beaucoup moins impactées, bien que ces deux types d'événement se succèdent d'ordinaire à quelques jours voire quelques semaines près. D'une part, les espèces se sont différenciées sur leur précocité moyenne de

floraison plus ou moins importante. D'autre part, elles se sont différenciées sur l'étalement de leur floraison. Ainsi, certaines espèces comme la viorne tin (*Viburnum tinus*) ou encore l'amandier (*Prunus dulcis*) ont eu une date moyenne de floraison beaucoup plus précoce en 2015-2016 mais sur une courte durée (variance faible). D'autres comme les primevères (*Primula veris*) ou le lilas (*Syringa vulgaris*) vont non seulement avoir une date moyenne de floraison plus précoce mais avec des individus allant du très précoce au plutôt tardif. Ces observations apportent des éléments de compréhension importants sur le déterminisme environnemental des dates de floraison et de feuillaison des espèces étudiées, et notamment leurs besoins en froid pour lever la dormance. Elles montrent également que ces besoins peuvent être différents entre bourgeons floraux et bourgeons foliaires. Nous pouvons supposer que les espèces ayant fleuri ou débourré particulièrement tôt cette année sont les plus sensibles aux variations climatiques et feraient de bonnes espèces indicatrices de l'impact du changement climatique.

Cette précocité peut entraîner différentes perturbations. En fleurissant plus tôt, l'individu se désynchronise du cycle de vie de ses pollinisateurs. La reproduction étant une phase d'importance capitale et demandant beaucoup d'énergie, la fitness de la plante peut se retrouver fortement diminuée si ses pollinisateurs ou disperseurs de graines ne sont pas présents au bon moment (Hegland *et al.* 2009 ; Forrest 2014 ; Memmot *et al.* 2007).

Les végétaux étant à la base des chaînes trophiques, la précocité d'une phénophase végétative a des répercussions sur l'ensemble de l'écosystème puisque les espèces qui le composent ne vont pas forcément toutes répondre de la même manière (Visser et Both 2005). De nombreuses études, notamment sur les oiseaux et les herbivores, ont montré les effets négatifs de ces dérèglements sur les réseaux trophiques et la fitness des individus (Post *et al.* 2008 ; Stenseth et Mysterud 2002 ; Durant *et al.* 2007 ; Visser *et al.* 2004 ; Straile *et al.* 2015).

Il est fort probable que les espèces n'ayant pas réagi aux conditions de l'année 2016 aient un besoin en froid pour lever la dormance qui n'a pas été atteint avec seulement la courte période de froid au début de l'automne. Il leur a donc fallu cumuler ce froid sur une période bien plus longue que pour les autres espèces. Si c'est effectivement le cas, il se pourrait que ces espèces ne soient plus capables dans le futur de lever la dormance de leur bourgeon (Pope *et al.* 2013).

Relation entre phénophases et température

Avec les figures 7 et 8 il est possible d'identifier la raison des anomalies phénologiques observées cet automne-hiver 2016. En effet les cumuls rapides de froid et de

degrés-jours ont permis une levée de dormance et un développement cellulaire rapide. C'est la première fois que ces deux conditions sont remplies sur un si court laps de temps depuis le début des observations menées dans le réseau national d'observation phénologique.

Une hypothèse pouvant expliquer également la précocité de la floraison et feuillaison est que la dormance aurait été seulement superficielle, lui permettant d'être levée plus rapidement, c'est-à-dire avec peu de froid. L'état de dormance superficielle a été montré sur des bourgeons du myrtillier *Vaccinium myrtillus* (Selås *et al.* 2015), qui ont été capables de commencer leur croissance cellulaire sans période de refroidissement. Si cette hypothèse est correcte, le fait que l'année 2016 ait connue de plus fortes amplitudes thermiques journalière durant le mois de décembre, associant ainsi un effet des températures froides la nuit sur la levée de dormance et un effet de températures douces le jour sur la croissance cellulaire, pourrait également expliquer les niveaux de précocité observés cette année. En calculant le cumul des degrés jour sur une base de 12°C, l'année 2016 se retrouve être celle ayant le cumul le plus lent et le moins élevé parmi les années étudiées (résultats non montrés). Cela suggère que les températures ayant le plus impacté le cumul de degrés-jour en 2016 sont celles comprises entre 5°C et 12°C. Le seuil de température permettant la croissance cellulaire dépend de chaque espèce (Edey 1980). Il est possible que les espèces n'ayant pas eu de floraison ou feuillaison précoce en 2016 aient un seuil plus proche des 12°C que des 5°C.

Une autre hypothèse quant à la non-précocité de floraison et feuillaison chez ces espèces pourrait être qu'elles sont sensibles à la photopériode, et qu'elles ne puissent pas débourrer tant qu'une certaine photopériode n'est pas atteinte. Dans une étude non publiée, Zohner *et al.* ont testé l'impact de la photopériode sur le débourrement d'une centaine d'espèces arborescentes. Seules neuf espèces sont communes à notre étude, et l'importance de la durée de photopériode n'est observée que pour trois de ces espèces. En effet, selon cette étude, l'effet de la photopériode sur le débourrement serait existante mais faible chez *Corylus avellana* et *Syringa vulgaris*, et forte chez *Aesculus hippocastanum*. Ces trois espèces n'ont en effet pas montré de précocité de leurs dates de feuillaison. En revanche, *Corylus* et *Syringa* ont montré une précocité de la floraison d'au moins 20 jours, ce qui suggérerait que le photopériodisme puisse s'appliquer uniquement aux bourgeons foliaires.

Projections dans le futur

D'après les prédictions climatiques (figure 10 et annexe 5), en fonction du scénario qui se réalisera, les températures devraient soit être inférieures à celle de cet hiver dans le cas le plus optimiste, ou les hivers devraient devenir plus chauds que cet hiver à partir de 2026 dans

le cas le plus pessimiste. Cependant, quel que soit le scénario, on ne retrouve pas de petite vague de froid en début d'automne comme ce fut le cas cet année. Ainsi, l'augmentation globale des températures générera des automnes et des hivers anormalement chauds, sans période de froid capable de lever la dormance des bourgeons, ce qui aurait des conséquences très néfastes pour les végétaux. En effet, si les besoins en froid ne sont pas remplis, c'est la feuillaison et la floraison qui sont compromis et donc leur survie et capacité de reproduction. Certains auteurs (Piao *et al.* 2015) ont récemment montré que les tendances générales à la précocité de la floraison et feuillaison avaient diminué et formulaient l'hypothèse que cela pouvait être dû aux conditions plus chaudes de l'automne-hiver ralentissant l'accumulation de froid et retardant la levée de dormance.

Des cas d'espèces n'ayant pas accès à suffisamment de froid pour lever la dormance de leurs bourgeons sont déjà connus. En effet, il n'est pas rare que des espèces fruitières soient cultivées dans des régions à la limite de leur niche climatique. Ainsi en cas de déficit du cumul de froid, des individus produisent des fleurs moins nombreuses, avec peu de pollen, ou encore malformées (Thompson *et al.* 1974 ; Kingstion *et al.* 1990).

Conclusion et perspectives

Cette étude nous a permis de comprendre le phénomène ayant engendré la forte précocité phénologique de l'automne-hiver 2016 chez certaines espèces. La petite vague de froid entre mi-octobre et début novembre suivie d'un hiver très doux a permis des floraisons automnales et hivernales chez de nombreuses espèces. Aussi, même s'il ne semble pas que de telles conditions puissent devenir la nouvelle norme dans les années à venir, le réchauffement global pourrait avoir de lourdes conséquences.

Notre étude a permis de faire une première analyse de ce qui s'était passé cet hiver. Une étude plus approfondie, espèce par espèce, serait nécessaire pour aller plus loin dans la caractérisation des besoins de chaque espèce. Il serait également intéressant d'obtenir des observations sur la fructification des espèces ayant eu une floraison très précoce. Une récente étude de Springmann *et al.* (2016) prévoit que le changement climatique pourrait entraîner une baisse de production de 4% de fruit et légumes par personnes d'ici 2050. En 2007, les cerisiers n'ont pas produit de cerises en France et cet échec de reproduction a été imputé aux conditions de températures chaudes de l'hiver (pers. Comm. CTIFL Balandran). Des hivers chauds seront donc problématiques pour le succès reproducteur de toutes les espèces, sauvages et cultivées, et pourrait donc avoir une forte répercussion sur l'économie mondiale.

BIBLOGRAPHIE

- Beaubien E, Hamann A (2011) Spring Flowering Response to Climate Change between 1936 and 2006 in Alberta, Canada. *BioScience* 61:514–524. doi: 10.1525/bio.2011.61.7.6
- Campoy JA, Ruiz D, Egea J (2011) Dormancy in temperate fruit trees in a global warming context: A review. *Scientia Horticulturae* 130:357–372. doi: 10.1016/j.scienta.2011.07.011
- Caffarra A, Donnelly A, Chuine I, B. Jones M (2011) Modelling the timing of *Betula pubescens* budburst. I. Temperature and photoperiod: a conceptual model. Vol. 46: 147–157.
- Chuine I, Morin X, Bugmann H (2010) Warming, photoperiods and tree phenology. www.sciencemag.org. 329
- Chuine I, Bonhomme M, Legave JM, García de Cortázar-Atauri I, Charrier G, Lacoite A, Améglio T (2016) Can phenological models predict tree phenology accurately in the future? The unrevealed hurdle of endodormancy break. *Global Change Biology*. Accepted.
- Durant JM, Hjernmann DØ, Ottersen G, Stenseth NC (2007) Climate and the match or mismatch between predator requirements and resource availability. *Climate Research (CR)* 33:271–283.
- Dray S, Dufour AB (2007) The ade4 package: implementing the duality diagram for ecologists. *Journal of Statistical Software*. 22(4): 1-20.
- Edey SN, Canada, Agriculture Canada (1980) *Degres-jours de Croissance et Production des Cultures au Canada*. Agriculture Canada.
- Fitter AH, Fitter RSR (2002) Rapid Changes in Flowering Time in British Plants. *Science* 296:1689–1691. doi: 10.1126/science.1071617
- Forrest JRK (2015) Plant-pollinator interactions and phenological change: what can we learn about climate impacts from experiments and observations? *Oikos* 124:4–13. doi: 10.1111/oik.01386
- Gordo O, Sanz JJ (2005) Phenology and climate change: a long-term study in a Mediterranean locality. *Oecologia* 146:484–495. doi: 10.1007/s00442-005-0240-z
- Hegland SJ, Nielsen A, Lázaro A, Bjerknes AL, Totland Ø (2009) How does climate warming affect plant-pollinator interactions? *Ecology Letters* 12:184–195. doi: 10.1111/j.1461-0248.2008.01269.x

- Higley LG, Pedigo LP, Ostlie KR (1986) DEGDAY: a program for calculating degree-days, and assumptions behind the degree-day approach. *Environmental entomology* 15:999–1016.
- Kingston CM, Klinac DJ, van Epenhuijse CW (1990) Floral bud disorders of nashi (*Pyrus serotina*) grown in New Zealand. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science* 18:157–159. doi: 10.1080/01140671.1990.10428088
- Körner C, Basler D (2010) Phenology under global warming. www.sciencemag.org. 327
- Laube J, Sparks TH, Estrella N, Höfler J, Ankerst DP, Menzel A (2014) Chilling outweighs photoperiod in preventing precocious spring development. *Glob Chang Biol* 20:170–182. doi:10.1111/gcb.12360
- Malagi G, Sachet MR, Citadin I, Herter FG, Bonhomme M, Regnard JL, Legave JM (2015) The comparison of dormancy dynamics in apple trees grown under temperate and mild winter climates imposes a renewal of classical approaches. *Trees* 29:1365–1380. doi: 10.1007/s00468-015-1214-3
- Memmott J, Craze PG, Waser NM, Price MV (2007) Global warming and the disruption of plant?pollinator interactions. *Ecology Letters* 10:710–717. doi: 10.1111/j.1461-0248.2007.01061.x
- Morin X, Roy J, Sonié L, Chuine I (2010) Changes in leaf phenology of three European oak species in response to experimental climate change. *New Phytologist* 186:900–910. doi: 10.1111/j.1469-8137.2010.03252.x
- Piao S, Tan J, Chen A, Fu YH, Ciais P, Liu Q, ... & Li Y (2015). Leaf onset in the northern hemisphere triggered by daytime temperature. *Nature communications*, 6.
- Polgar CA, Primack RB (2011) Leaf-out phenology of temperate woody plants: from trees to ecosystems: Tansley review. *New Phytologist* 191:926–941. doi: 10.1111/j.1469-8137.2011.03803.x
- Pope KS, Dose V, Da Silva D, Brown PH, Leslie CA, Dejong TM (2013) Detecting nonlinear response of spring phenology to climate change by Bayesian analysis. *Global Change Biology* 19:1518–1525. doi: 10.1111/gcb.12130
- Post E, Pedersen C, Wilmers CC, Forchhammer MC (2008) Warming, plant phenology and the spatial dimension of trophic mismatch for large herbivores. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 275:2005–2013. doi: 10.1098/rspb.2008.0463
- Richardson AD, Keenan TF, Migliavacca M, Ryu Y, Sonnentag O, Toomey M (2013) Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the

- climate system. *Agricultural and Forest Meteorology* 169:156–173. doi: 10.1016/j.agrformet.2012.09.012
- Selås V, Sønsteby A, Heide O, Opstad N (2015) Climatic and seasonal control of annual growth rhythm and flower formation in *Vaccinium myrtillus* (Ericaceae), and the impact on annual variation in berry production. *Plant Ecology and Evolution* 148:350–360. doi: 10.5091/plecevo.2015.1110
- Sparks TH, Jeffree EP, Jeffree CE (2000) An examination of the relationship between flowering times and temperature at the national scale using long-term phenological records from the UK. *International Journal of Biometeorology* 44:82–87.
- Springmann M, Mason-D'Croz D, Robinson S, Garnett T, Godfray HCJ, Gollin D, Rayner M, Ballon P, Scarborough P (2016). Global and regional health effects of future food production under climate change: a modelling study. *The Lancet*, 387(10031), 1937-1946.
- Stenseth NC, Mysterud A (2002) Climate, changing phenology, and other life history traits: nonlinearity and match–mismatch to the environment. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99:13379–13381.
- Straile D, Kerimoglu O, Peeters F (2015) Trophic mismatch requires seasonal heterogeneity of warming. *Ecology* 96:2794–2805. doi: 10.1890/14-0839.1
- Thompson WK, Nichols DG, Jones DL (1974) Chilling requirements of the apple cultivar Stoke Red. *Animal Production Science* 14:702–704.
- Visser ME, Both C (2005) Shifts in phenology due to global climate change: the need for a yardstick. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 272:2561–2569. doi: 10.1098/rspb.2005.3356
- Visser ME, Both C, Lambrechts MM (2004) Global Climate Change Leads to Mistimed Avian Reproduction. *Advances in Ecological Research*. Elsevier, pp 89–110
- Wickham H (2009) *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York
- February Blows Away Global Heat Record. <http://www.climatecentral.org/news/february-blows-away-global-heat-record-20134>. Accessed 16 May 2016
- How a Monster El Niño Transforms the World's Weather | Climate Central. <http://www.climatecentral.org/news/monster-el-nino-transforms-worlds-weather-20138>. Accessed 4 Jun 2016
- Drias, Les futurs du climat - Accompagnement. <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/section/182>. Accessed 4 Jun 2016

[GDR SIP-GECC]. <http://www.gdr2968.cnrs.fr/index.php>. Accessed 5 May 2016

Record de douceur hivernale la faune sauvage fait face aux changements climatiques - Communiqués de presse - LPO. <https://www.lpo.fr/communiqués-de-presse/record-de-douceur-hivernale-la-faune-sauvage-fait-face-aux-changements-climatiques>. Accessed 1 Jun 2016

Bilan climatique de l'hiver 2015-2016. <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/bilans-climatiques/bilan-2016/hiver>. Accessed 1 Jun 2016

Global Analysis - September 2015 | State of the Climate | National Centers for Environmental Information (NCEI). <http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201509>. Accessed 14 May 2016

Observatoire des Saisons. <http://www.obs-saisons.fr/>. Accessed 5 May 2016

Accueil - www.orchisauvage.fr. <http://www.orchisauvage.fr/>. Accessed 5 May 2016

Phenoclim — Français. <http://phenoclim.org/fr>. Accessed 5 May 2016

R Core Team (2015). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

ANNEXES

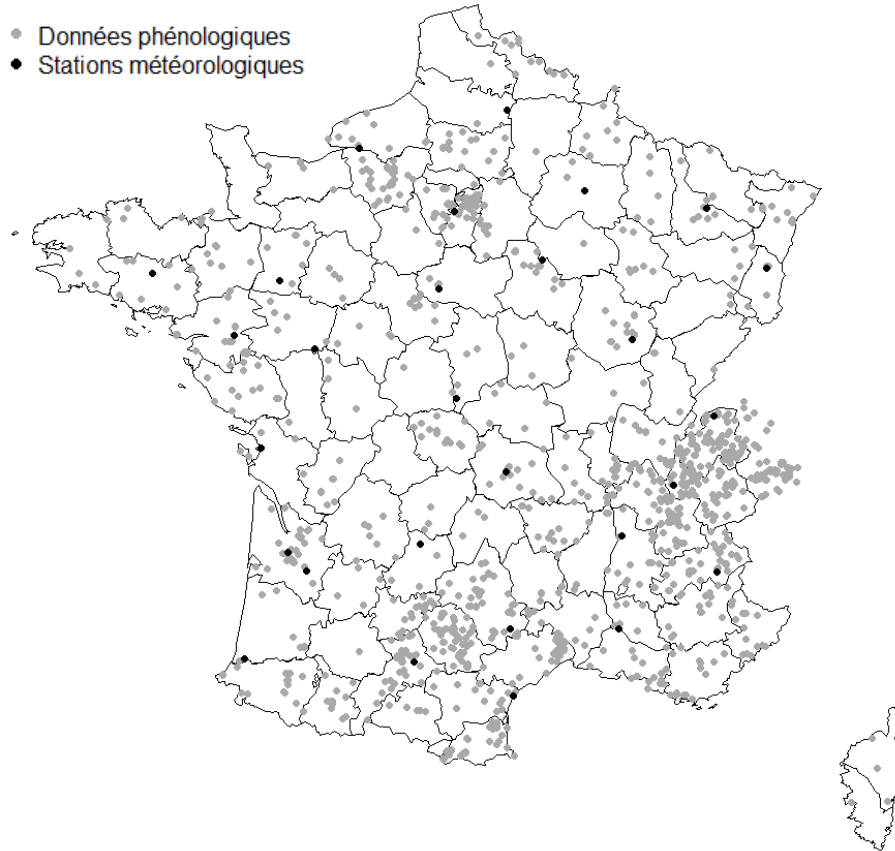
Annexe 1

Liste des couples espèces-événement phénologique et des effectifs pour chaque période étudiée

Espèce	Evenement	1901-1920	1995-2014	sept 2015-2016	Total général
aesculus hippocastanum	feuillaison	310	144	36	490
aesculus hippocastanum	fructification	266	22	14	302
anacamptis morio	floraison	0	30	25	55
betula pendula roth.	feuillaison	670	2375	41	3086
betula pendula roth.	floraison	384	939	19	1342
betula pendula roth.	senescence	178	4289	173	4640
corylus avellana	feuillaison	851	2652	86	3589
corylus avellana	floraison	559	1369	108	2036
forsythia intermedia	feuillaison	0	233	23	256
forsythia intermedia	floraison	0	421	71	492
forsythia intermedia	senescence	0	39	21	60
fraxinus excelsior	feuillaison	283	2863	52	3198
fraxinus excelsior	floraison	233	1308	38	1579
larix decidua	feuillaison	256	2039	29	2324
larix decidua	floraison	111	908	23	1042
larix decidua	senescence	0	3521	141	3662
narcissus pseudonarcissus	floraison	524	0	9	533
ophrys lupercalis	floraison	0	24	25	49
ophrys massiliensis	floraison	0	5	7	12
platanus acerifolia	feuillaison	0	88	10	98
platanus acerifolia	senescence	0	51	13	64
primula veris	floraison	70	449	34	553
prunus avium	floraison	133	384	34	551
prunus avium	senescence	0	117	25	142
prunus domestica	feuillaison	0	147	18	165
prunus domestica	floraison	0	183	30	213
prunus domestica	senescence	0	37	12	49
prunus dulcis	feuillaison	139	104	30	273
prunus dulcis	floraison	140	226	34	400
prunus dulcis	senescence	81	18	15	114
quercus pubescens	fructification	0	10	6	16
quercus pubescens	senescence	0	28	15	43
robinia pseudoacacia l.	senescence	212	70	14	296
sorbus aucuparia	feuillaison	283	732	6	1021
sorbus aucuparia	senescence	102	1328	87	1517
syringa vulgaris	feuillaison	339	1398	61	1798
syringa vulgaris	floraison	336	937	43	1316
taraxacum officinale	floraison	0	186	34	220
tussilago farfara l.	floraison	229	351	15	595
viburnum tinus l.	floraison	0	71	10	81
Total général		6689	30096	1487	38272

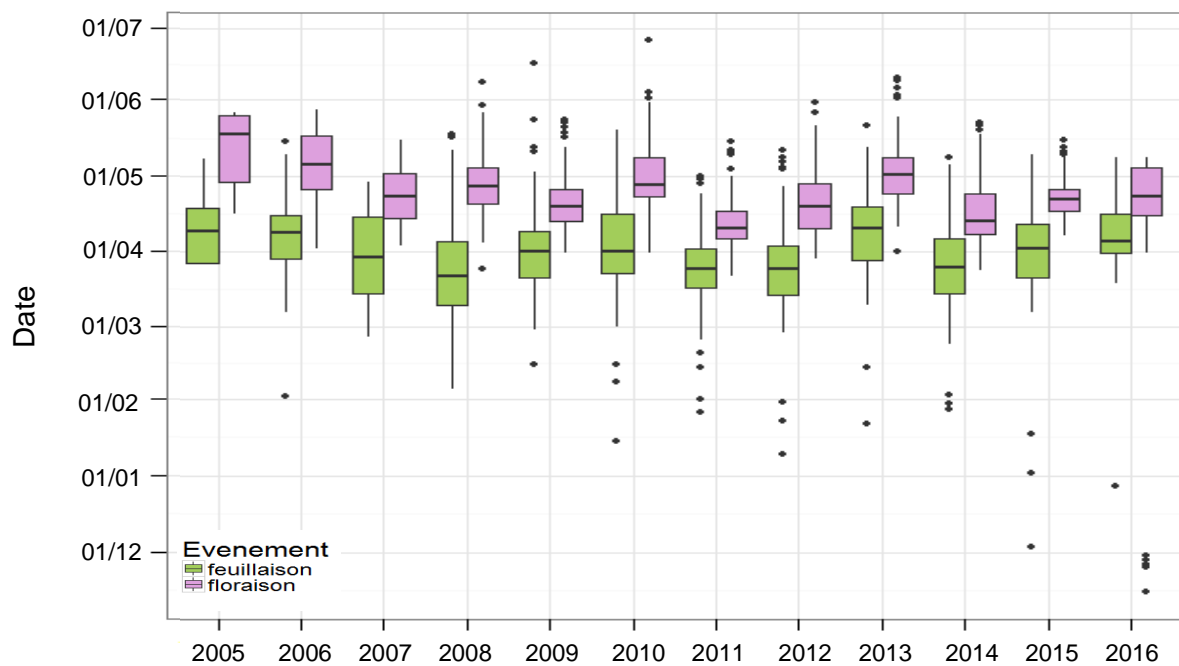
Annexe 2

Carte de répartition des observations phénologiques et des stations météorologiques.



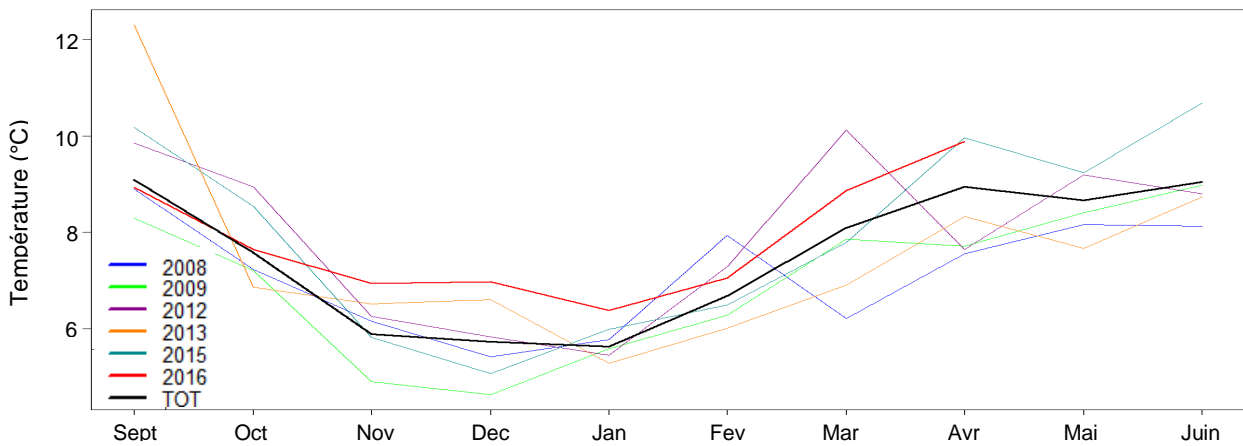
Annexe 3

Représentation des jours moyens d'observation de la floraison (rose) et de la feuillaison (vert) chez *syringa vulgaris*, de 2005 à 2016.



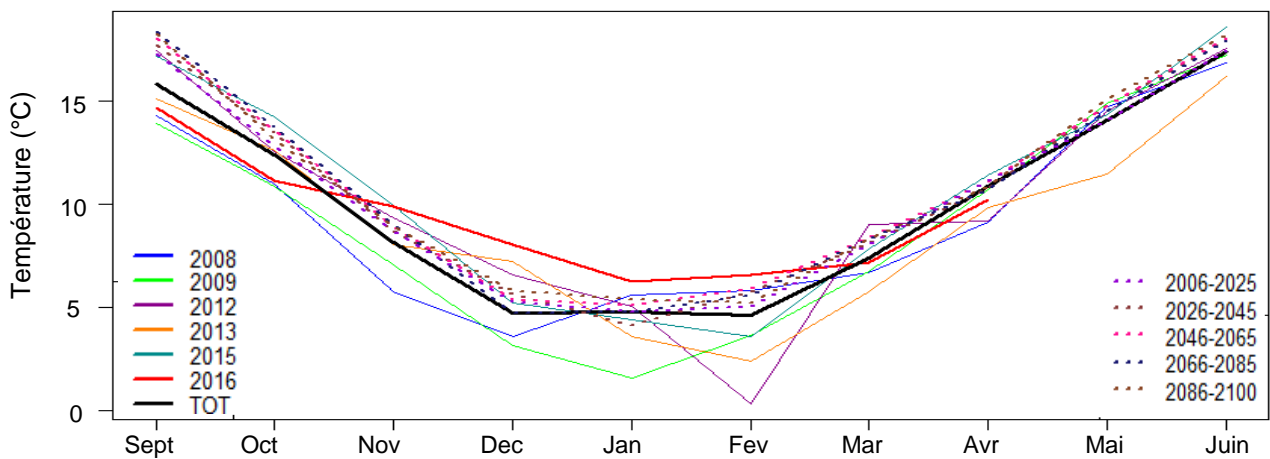
Annexe 4

Représentation de la moyenne des amplitudes de températures mensuelles sur l'ensemble des 30 stations pour les années sélectionnées.



Annexe 5

Représentation de la moyenne des températures mensuelles sur l'ensemble des 30 stations pour les années sélectionnées (traits pleins) et pour les années à venir (traits pointillés) jusqu'en 2100 à partir du modèle le plus optimiste. Les prévisions futures sont moyennées par période de 20 ans.



RESUME

L'automne-hiver 2015-2016 fut particulièrement anormal sur le plan phénologique. De nombreuses espèces végétales se sont mises à fleurir plusieurs mois en avance par rapport à la normale. Les objectifs principaux de cette étude étaient d'établir des groupes de réponses des espèces en termes de dates de floraison et de feuillaison aux conditions météorologiques particulières de cet hiver ; et d'identifier les causes des différences de réponse entre groupes. Nous avons utilisé des données phénologiques provenant de différents programmes de sciences participatives et les données météorologiques sur les dix dernières années. Nos résultats montrent trois groupes de réponse liés à la précocité de la floraison et deux groupes quant à celle de la feuillaison ; ainsi que deux groupes, transversaux aux premiers, liés à l'allongement de la floraison. Les données météorologiques montrent un hiver 2015-2016 particulièrement chaud précédé d'une quinzaine de jours froids sous 7°C début octobre ; une configuration jamais vu auparavant depuis le début des observations. Grâce à un modèle phénologique simple et générique, nous avons pu montrer que les groupes de réponse d'expliquaient par des différences de besoins en froid pour lever la dormance des bourgeons, puis de besoin en chaleur pour la croissance cellulaire. Les conditions exceptionnelles de cet hiver nous ont permis d'estimer la quantité de froid nécessaire à la levée de dormance pour de nombreuses espèces, information très rare car difficile à obtenir. Même s'il semblerait que cette situation ne se reproduise pas régulièrement dans le futur, les observations de cette année soulèvent des inquiétudes quant aux conséquences du réchauffement climatique sur les productions fruitières et le maintien de certaines espèces en marge sud de leur aire de répartition.

Mots-clés : *Changement climatique, phénologie, floraison, feuillaison, espèces végétales*

Analysis of the phenological anomalies of winter 2015-2016 in France

ABSTRACT

The autumn-winter 2015-2016 was particularly abnormal on the phenology's aspect. Many plant species flowered several months in advance compared to normal. The main goals of this study were to define response groups of species in terms of blooming and bud leafing, and identify the causes of the differences between groups. We used phenological data from different citizen science programs and meteorology data from the last ten years. Our results show three response groups related to flowering precocity and two response groups related to leafing precocity; and another two groups, transverse to the first, related to the lengthening of the flowering. Meteorological data show that the winter 2015-2016 was particularly warm preceded by a dozen of cold days (under 7 ° C) in early Octobre; an unprecedented configuration since the onset of phenological observations. Using a simple and generic model, we were able to show that response groups could be explained by both chilling requirement to break buds' dormancy, and forcing temperature requirement for cell growth, that varied between groups. The exceptional conditions of this winter allowed us to estimate the amount of chilling required to break dormancy for many species, information very rare because difficult to obtain. Even though it seems that this meteorological configuration is unlikely to occur again in the future, observations of this year raises nevertheless many concerns about the consequences of global warming on fruit production and on species survival at their southern range limit.

Keys-words: *Global warming, phenology, flowering, leafing, plant species*