

Suivis de la phénologie en continu à différentes échelles en milieu forestier Des caméras comme outils d'expertise

Frédéric Jean¹, Olivier Ambrosio¹, William Brunetto¹, Henri Picot¹, Olivier Gilg², Luc E. Pâques³, Benjamin Dimouro⁴, Xavier Morin⁵, Jean-Philippe Orts⁶

Résumé. Dans un contexte de changement climatique, l'observation de la phénologie présente le double intérêt d'être à la fois un indicateur puissant du changement en cours mais également un facteur majeur de l'adaptation. C'est pourquoi, aujourd'hui de nombreux praticiens observent l'apparition, dans le temps, des événements biologiques chez les plantes ou les animaux. Cependant, force est de constater que l'observation réalisée à l'œil nu, avec ou sans jumelle, limite l'exercice, à cause de son caractère chronophage, subjectif et ponctuel. C'est pourquoi, certains laboratoires se sont engagés dans une réflexion sur la prise de données de phénologie par caméra en situation isolée. L'objectif de cet article est de faire le point, à travers 3 retours d'expériences, sur l'utilisation de plusieurs types de matériels testés (Brinno, Wingscapes, Axis). Les principaux résultats de ces expériences montrent un gain incontestable dans la qualité des images obtenues et ce quelle que soit l'échelle de l'observation : organe, arbre ou peuplements. Toutefois, ces résultats restent tributaires de l'étanchéité des systèmes testés, de leur fixation ainsi que de la nécessité d'effectuer des essais préliminaires avant de lancer véritablement l'opération. Par ailleurs, pour pouvoir exploiter de manière automatique les images, il faut respecter un certain nombre de recommandations, notamment la pose d'un panneau de référence, la définition de la région d'intérêt ou le choix du logiciel de traitement des données. Enfin, ces essais réalisés en situation isolée des réseaux de communication et électriques, montrent également l'utilité de recourir à des équipements munis de fonctionnalités type Bluetooth et/ou raccordables à des panneaux solaires. Pour avancer sur ces 2 derniers points, des solutions techniques à moindre coût existent et pourraient être développées notamment dans le cadre du SOERE TEMPO.

Mots clés : phénologie, caméra, observation, organe, arbre, peuplement

Introduction

Les Unités de Recherche « Ecologie des Forêts méditerranéennes » et « Amélioration, Génétique et Physiologie forestière » de l'INRA, l'Oak Observatory at OHP (O3HP) et le Centre d'Ecologie fonctionnelle et évolutive du CNRS étudient les divers types de réponses des peuplements forestiers au changement climatique. En particulier, les chercheurs s'intéressent à la phénologie en tant que processus majeur de l'adaptation. Les études de phénologie, rappelons-le, consistent à étudier la succession des événements biologiques annuels, par

¹ UR Ecologie des Forêts méditerranéennes, INRA, 84914 Avignon, France

² UE Entomologie et Forêt méditerranéenne, INRA, 84914 Avignon, France

³ UR Amélioration, Génétique et Physiologie forestières, INRA, 45075 Orléans, France

⁴ UE Génétique et Biomasse forestières, INRA, 45075 Orléans, France

⁵ Centre d'Ecologie fonctionnelle et évolutive, CNRS, 34293 Montpellier, France

⁶ Institut méditerranéen de biodiversité et d'Ecologie marine et continentale, CNRS, 13545 Aix en Provence, France
frederic.jean@inra.fr

exemple débourrement des bourgeons, émission du pollen et réceptivité des ovules, sénescence des feuilles, en lien avec les variations saisonnières du climat (Schwartz, 2003). De multiples travaux scientifiques, notamment dans la filière viticole, ont ainsi montré l'impact du changement climatique sur la phénologie de maturation des fruits et sa répercussion sur les dates de vendanges.

Ces études s'appuient sur les observations des cycles annuels des espèces végétales et animales réalisées par les praticiens directement en milieu naturel ou en plantation expérimentale. Pour faciliter le travail de ces observateurs de terrain, la filière forêt, à travers le Groupe de Recherche 2968 du CNRS intitulé « *Systèmes d'Information phénologique pour la gestion et l'Etude des changements climatiques*⁷ » a développé, en 2006, une grille de notation spécifique inspirée d'une échelle originale connue sous l'acronyme « BBCH ». Cet outil précieux permet d'acquérir des séries de données d'observation harmonisées, ce qui facilite sur le long terme, leur gestion et leur analyse.

Cependant, cette méthode d'observation à partir de l'œil humain a ses limites de par ses caractères chronophage, subjectif et ponctuel. En effet, les contraintes d'observation de terrain comme l'accès, la densité et la hauteur du peuplement limitent, voire empêchent les notations des stades de développement de certaines espèces. De plus, ce type de suivi est potentiellement sujet à l'effet « observateur ». Enfin, il n'offre pas la possibilité de « revenir » sur des données *a posteriori*, notamment pendant la phase de sénescence des feuilles des espèces *décidues*, ou lors du débourrement pour des individus ayant une dynamique rapide ne permettant pas d'observer l'ensemble des stades d'intérêt.

Tout cela a conduit, l'Unité expérimentale de Vigne et Vin (aujourd'hui fermée) du centre INRA Angers-Nantes Pays de la Loire, précurseurs dans les méthodes alternatives de l'observation, à tester des caméras qui permettraient un suivi continu de la phénologie de la vigne. Depuis, au sein du groupe de travail « Capteurs » né dans le cadre du Métaprogramme ACCAF Perpheclim⁸ créé en 2012, nous avons adapté ces techniques d'observation par caméras au contexte forestier ; celles-ci doivent nous permettre d'observer ce type de milieu aux différentes échelles d'intérêt.

L'objectif de cet article est de présenter cette technique alternative à l'observation directe de la phénologie réalisée à partir de prises de vue photographiques adaptées au milieu forestier. A travers des retours d'expériences, nous présentons, ici, divers outils de type « caméras » qui permettent d'effectuer des suivis en continu et de qualité à différentes échelles :

- (i) l'échelle de l'organe pour étudier les processus de synchronisation de la floraison,
- (ii) l'échelle de l'individu pour calibrer les données expérimentales et apprécier l'effet « observateur » inter-unité,
- (iii) l'échelle du peuplement pour qualifier la diversité de la phénologie à l'échelle d'un gradient pour une espèce donnée

Ainsi, pour chaque niveau, nous décrivons l'objectif de l'expérimentation, ses contraintes spécifiques, puis les caractéristiques de l'outil employé, les résultats obtenus et les limites de chaque méthode étudiée.

⁷ <http://www.gdr2968.cnrs.fr/>

⁸ <http://www6.inra.fr/projet-accap-perpheclim/>

Suivi en continu à l'échelle de l'organe

Exemple de l'URFM (F. Jean, O. Ambrosio, W. Brunetto, H. Picot) et de l'UEFM (O. Gilg), Avignon,
La floraison

Qu'est-ce qu'on observe ?

L'étude de la biologie de la reproduction des arbres forestiers est essentielle à la compréhension de la dynamique de leur population. Parmi les processus reproductifs, la phase de pollinisation est primordiale. En effet, elle détermine notamment les variations de succès reproducteur mâle entre individus, et la production de graines particulièrement dans les populations marginales où le pollen peut-être limitant. Face à la difficulté d'observer finement l'émission et la dispersion du pollen jusqu'aux fleurs femelles en temps réel, nous avons choisi d'installer des caméras permettant de suivre la phénologie des fleurs mâles et femelles chez une espèce modèle impactée par le changement climatique, *Abies alba* Mill.

Les objectifs techniques de ce travail expérimental étaient d'identifier :

- ✓ la période de floraison mâle et par voie de conséquence la période d'émission de pollen,
- ✓ la période de floraison femelle et par voie de conséquence la période de réceptivité des ovules,
- ✓ le recouvrement de ces périodes (qui peut conduire à l'autofécondation).

Choix de l'outil

D'autres outils ont déjà été utilisés pour suivre cette phase de la reproduction, comme les capteurs à pollen. La nouveauté proposée ici est de suivre la synchronisation entre la réceptivité de la fleur femelle et l'émission de pollen à l'échelle d'un individu.

En outre, le fait de travailler dans des peuplements forestiers adultes, isolés nous contraint de choisir un outil disposant d'un minimum d'autonomie tant au niveau batterie que du stockage des données et résistant aux intempéries.

Enfin, côté prises de vues photographiques nous avons dû travailler avec du matériel permettant d'obtenir des images de qualité à une distance n'excédant pas 1 m. Par ailleurs, des essais préliminaires sont indispensables tant au niveau de la fixation du mât que de la position de prise de vue par rapport aux fleurs (mâles et femelles) que l'on souhaite illustrer.

Caractéristiques de l'outil

Le matériel utilisé était la caméra GardenWatchCam de marque Brinno®. La **Figure 1** ci-dessous illustre la forme de l'objet en situation.

Figure page suivante



Figure 1. Camera GardenWatchCam de marque Brinno®.

Le **tableau** ci-dessous détaille les principales caractéristiques techniques de cet outil.

Critères	Données constructeur	Commentaires
Prix à l'unité	128,90 Euros TTC	
Programmation des paramètres de prises de vues	Par clé USB via logiciel d'interface GardenWatchSetup	
Taille des photos	1280x1024 pixels	
Mémoire maximale	jusqu'à 8 Go USB Flash Drive	
Récupération des données	GardenWatchPlayer	Reprogrammer systématiquement les prises de vue suivantes après déchargement
Autonomie des batteries		60 jours maximum
Étanchéité	IP4	
Notice d'utilisation	http://www.brinno.com/fr/html/GWC-intro.html	

Protocole

L'utilisation de ce type d'outil sur ce type de support en milieu forestier étant originale, nous avons choisi d'effectuer ces essais préliminaires en investissant dans l'achat de quatre caméras permettant d'équiper deux arbres, soit deux caméras par arbre. En effet, nous sommes en présence d'une espèce possédant des fleurs mâles et des fleurs femelles sur le même pied (monoïque) ; par ailleurs, ses fleurs sont unisexuées, soit mâles, soit femelles. Les fleurs femelles se trouvent sur la face supérieure des branches situées essentiellement en partie sommitale de l'arbre ; la prise de vue s'effectue donc par-dessus comme illustré à la **Figure 1**. Les fleurs mâles sont présentes à la face inférieure du rameau de l'année précédente sur des branches situées généralement dans la partie médiane du houppier ; la caméra doit donc être disposée sur une branche positionnée en dessous de la zone d'intérêt, légèrement inclinée vers le haut pour avoir une vue de côté des fleurs mâles.

Etant en phase exploratoire, les caméras sont posées tout au long de la saison de végétation, de début avril à fin octobre. Une visite mensuelle est prévue pour corriger d'éventuels problèmes (panne de batteries, déplacement de la zone d'intérêt...).

Résultats et analyses

La **Figure 2** ci-dessous illustre le type de rendu que l'on peut obtenir avec ce type d'outils dans les conditions où nous avons utilisé le matériel.

Phénologie d'*Abies alba* : débourrement, feuillaison, floraison, développement et maturation des fruits

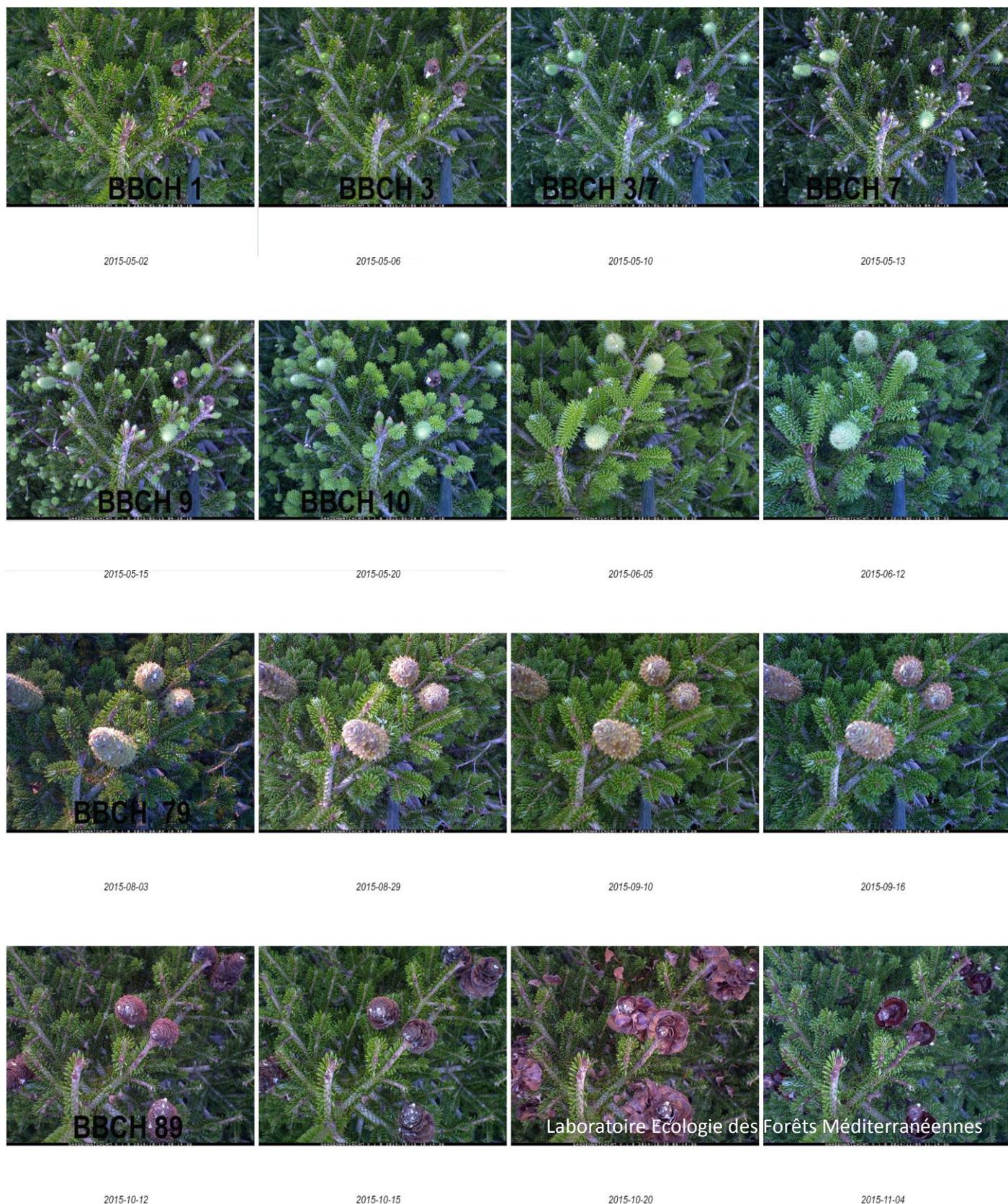


Figure 2. Dynamique du débourrement végétatif, de la floraison femelle et de la fructification chez *Abies alba* au cours d'une saison de végétation.

Le Cahier des Techniques de l'INRA 2017 (90)

Tout d'abord, pour interpréter les images enregistrées par la caméra et qualifier les différents stades de développement des bourgeons floraux et végétaux, nous nous sommes appuyés sur une grille standard de notation des stades phénologiques. Cette échelle de notation originale « BBCH », abréviation de **B**iologische **B**undesanstalt, **B**undessortenamt et **C**hemische Industrie permet en effet de caractériser les stades de développement d'intérêt de la plupart des espèces végétales. Elle a fait l'objet de modifications pour être adaptée aux espèces ligneuses et plus particulièrement à *Abies alba* Mill. Dans notre cas **l'annexe 1** présente la signification des notes attribuées aux évènements suivis dans le cadre de ce projet.

Par rapport aux objectifs que nous nous étions fixés nous sommes donc en capacité

i) d'évaluer la fenêtre de floraison des fleurs femelles entre le 6 et 20 mai.

Par ailleurs, si l'on observe les illustrations de la **Figure 3** ci-dessous autour de la fenêtre de réceptivité de la fleur femelle on peut alors mettre en relation à l'échelle d'un arbre et à partir de deux prises de vues photographiques la synchronisation des deux floraisons (mâles – femelles). Ceci s'apprécie au regard des stades de développement de la floraison femelle observés du 6 au 20 mai et de la période de pollinisation qui semble, elle aussi, se situer entre le 6 et le 20 mai 2015 pour l'arbre suivi. Le processus d'autofécondation pourra donc éventuellement se produire.

Figure 3 page suivante

Phénologie d'*Abies alba*, période d'émission du pollen par les chatons et de réceptivité des fleurs femelles (du 06 au 20 mai 2015)

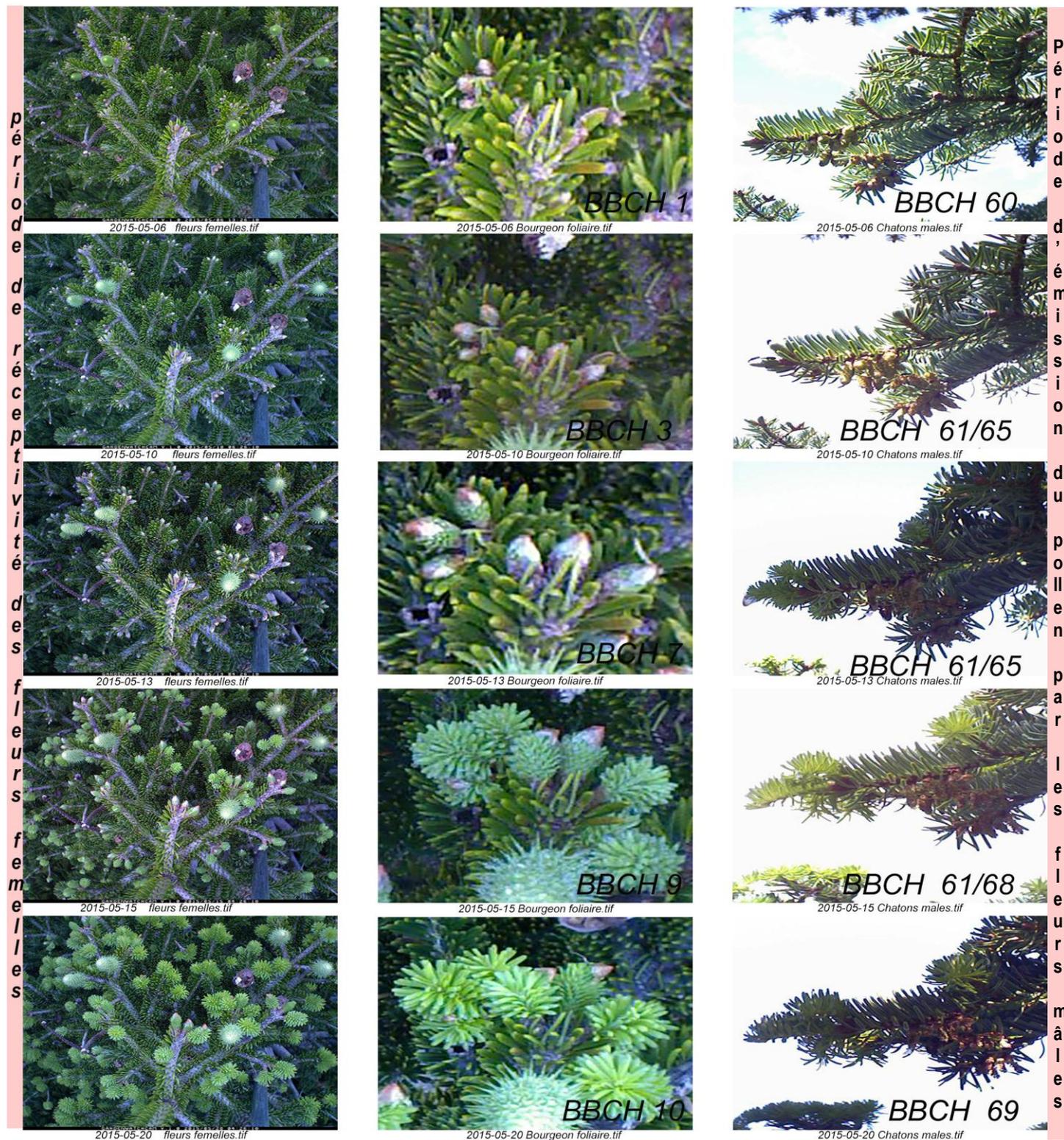


Figure 3. Identification des stades de floraison femelle (à gauche), du débourrement végétatif (au centre) et de la floraison mâle (à droite) chez *Abies alba* au cours de la floraison. (photo URFM).

- ii) En outre, ce suivi fin nous permet de mettre en relation le débourrement végétatif avec la floraison et ainsi de pressentir la notation de la phénologie du débourrement comme un bon proxy de la fenêtre de réceptivité des fleurs femelles pour un certain nombre d'individus. En effet, les stades de développement phénologique pour les fleurs femelles et bourgeons végétatifs semblent homogènes sur la partie de houppier prospectée. Ceci illustre une relation relativement robuste entre les dates de débourrement végétatif et floral. Ainsi, on peut considérer le stade phénologique BBCH7 des bourgeons végétatifs comme un bon indicateur de la fenêtre de réceptivité des fleurs femelles.

Cependant, et d'après la littérature la période de réceptivité de la fleur femelle chez les *Abies* n'excédant pas une semaine, il serait judicieux pour affiner notre diagnostic de :

- i) répliquer ce dispositif sur plusieurs sites et sur plusieurs années pour assoir ces premières observations à l'échelle de l'espèce,
- ii) procéder avec une meilleure définition d'image,
- iii) avoir un angle de prise de vue plus latéral qui nous permettrait d'apprécier la fermeture des écailles ovulifères et ainsi la fin de la période de réceptivité,
- iv) penser à positionner la caméra de façon à minimiser les prises de vue à contre-jour,
- v) faire des observations destructives des fleurs femelles nous permettant d'examiner l'évolution morphologique des écailles en cours de floraison à la fréquence d'une récolte par jour pendant les 15 jours préalablement supposés comme réceptifs.

Enfin, et de façon plus générale, notons la rapidité de l'évolution des fleurs et des pousses. Ceci est particulièrement visible sur les bourgeons végétatifs qui ont quasiment tous éclaté entre le 10 mai et 15 mai.

Ceci vient conforter l'importance de suivre quasi-quotidiennement la phénologie de la reproduction si l'on souhaite comprendre comment celle-ci peut interférer sur la quantité et qualité des graines produites.

Conclusion

Sur un plan méthodologique, notre étude a clairement permis de progresser dans l'identification de stades clés de la pollinisation chez le sapin. Néanmoins, nous avons rencontré plusieurs problèmes techniques. En effet, concernant l'étanchéité, certaines caméras ont eu des problèmes du fait des contraintes d'utilisation que nous avons dû mettre en œuvre. Ceci car la position des fleurs nous contraint à ne pas systématiquement positionner les caméras à la verticale.

Par ailleurs, lors des phases de recueil mensuel des données nous avons dû avoir recours systématiquement à des techniques de grimpage chronophages cependant indispensables lors des phases de pose et de réglages. Ainsi, pour optimiser le temps à consacrer à ce genre de dispositif, certains constructeurs proposent des caméras permettant d'établir une communication type Bluetooth ou GSM via une tablette ou un téléphone portable. In fine, le gain de temps peut alors permettre de multiplier le nombre de caméras sur le site d'étude.

Perspectives

- i) Mettre en relation les différents stades phénologiques avec les conditions environnementales (exemple de la phase de pollinisation chez les conifères et de l'effet combiné du niveau d'humidité atmosphérique et du vent...)
- ii) Identifier la présence d'insectes ravageurs des graines, prédateurs d'autres insectes, ou venant tout simplement se nourrir des gouttelettes émises au niveau de l'ovule pour capter les grains de pollen ; contribuent-ils ainsi à la pollinisation ?

Références bibliographiques

Philippe G, Baldet P, Héois B, Ginisty C (2006) *Reproduction sexuée des conifères et production de semences en vergers à graines*. Editions Quae, 570 p.

Schwartz MD (2003) *PHENOLOGY : An integrative environmental science*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands.

Suivi en continu à l'échelle de l'individu

Exemple de l'UR AGPF (L.E. Pâques) et de l'UE GBFOR (B. Dimouro), Orléans-De la feuillaison à la sénescence

Qu'est-ce qu'on observe ?

Traditionnellement dans la plupart des programmes d'amélioration, le débourrement végétatif est observé en tests de provenances/descendances à un stade juvénile et généralement uniquement au niveau du bourgeon terminal. Pour des espèces très sensibles au gel tardif, par exemple les épicéas, ce type d'observation se justifie assez facilement ; en effet, à certains stades de débourrement le gel peut entraîner la destruction du bourgeon terminal et par voie de conséquence des défauts de forme, voire la mortalité. Pour d'autres essences comme le mélèze, l'intérêt des observations de phénologie est d'étudier le lien entre phénologie et croissance ; aussi se focaliser uniquement sur le bourgeon terminal peut être limitant. En effet, un décalage de plusieurs jours, voire de plusieurs semaines, entre le verdissement de l'arbre (acropétal) et le débourrement du bourgeon terminal peut être observé. Les notations, subjectives, de verdissement du houppier restent très compliquées ; effectivement, la diversité des espèces étudiées (3) et des génotypes testés, et donc des architectures aériennes (densité de branchaison, densité, taille et couleur des aiguilles) à noter perturbe fortement l'observation. En outre, si le débourrement végétatif est assez souvent pris en compte, la sénescence foliaire est très rarement étudiée. Pour nos études, elle est aussi importante que le débourrement pour estimer la longueur de la saison de végétation. Le mélèze étant un des rares conifères à feuillage caduque, la décoloration des aiguilles à l'automne facilite l'observation.

Techniquement, notre objectif était d'une part de tester la robustesse des caméras en situation de terrain et d'autre part en fonction du niveau de définition des photos, valider la possibilité d'analyser visuellement ou automatiquement cette information pour détecter des stades clés du débourrement et de la sénescence foliaire à l'échelle de l'arbre.

Par ailleurs, l'utilisation de caméras a été testée en même temps que d'autres outils (capteurs LED, dendromètres, etc.) dans le cadre du projet européen Trees4Future.

Choix de l'outil

Notre objectif étant d'observer le verdissement/jaunissement des cimes d'arbres entiers, d'une dizaine de mètres de hauteur, pendant pratiquement toute l'année, de fin mars – fin novembre/décembre ; l'autonomie de fonctionnement (batterie) et l'étanchéité des caméras nous semblaient aussi importants que leur prix, en cas de déploiement à plus grande échelle. Nous avons donc opté pour des caméras TimeLapse de Wingscapes (**Figure 4** ci-dessous) qui ont été mises en place et suivies par l'UE GBFOR (B.Dimouro) dans un parc à clones sur le site INRA d'Orléans.



Figure 4. Caméra TimeLapse de marque Wingscapes®.

Caractéristiques de l'outil

Critères	Données constructeur	Commentaires
Prix à l'unité	100 US \$	(+ frais douane)
Programmation des paramètres de prises de vues	Programmation interne (par choix multiples)	
Résolution	8.0 MP	
Focus	6 pieds à l'infini	
Taille des photos	Low 640 x 480, Medium 1600 x 1200, High 2592 x 1944, Enhanced 3264 x 2448	
Mémoire maximale	Carte SD (16-32 Go)	
Récupération des données	Via carte ou câble USB	
Autonomie des batteries	6 mois (6 C-cell)	
Étanchéité	Réputé 'Weather-resistant and lockable'	
Notice d'utilisation	http://www.wingscapes.com/wingscapes-timelapsecam	

La caméra peut être fixée sur un autre arbre ou un poteau via une sangle. Un support sur lequel se visse la caméra est fourni permettant d'orienter la caméra. Il peut être sanglé ou vissé. La visée de l'arbre s'effectue à partir d'un viseur à l'arrière de la caméra ; celle-ci est approximative et impose de prendre quelques photos puis d'ajuster. Une autre contrainte oblige à orienter la caméra face au nord, ce qui n'est pas forcément toujours évident au regard de la disposition des arbres. Plusieurs problèmes ont été rencontrés en particulier avec la fenêtre de programmation (cristaux liquides) devenue illisible, des défauts d'étanchéité (condensation à l'intérieur des caméras), des pannes de batterie (mauvais choix du type de piles). Un suivi régulier des caméras est donc

indispensable d'autant plus que d'autres incidents peuvent se produire (déjection animale sur l'objectif, déplacement de la caméra par le vent, etc.). Les séries de données sont donc parfois incomplètes.

Protocole

Douze mélèzes hybrides (*Larix x eurolepis* ; 6 clones x 2 ramets) en parc à clones à l'INRA (Orléans) sont suivis depuis 2013.

Les caméras ont été installées à une distance permettant de pouvoir photographier l'arbre entier. Elles sont orientées vers le nord dans la mesure du possible. Une photo est prise toutes les heures entre 9h et 18h. En parallèle, des notations classiques de phénologie du débourrement et de la sénescence (bourgeon terminal et code BBCH à l'échelle de l'arbre) ont été réalisées par l'UE GBFOR (B.Dimouro) de manière à nous fournir des stades de référence.

Résultats et analyses des photographies

a) Fonctionnement des caméras

Résultats quantitatifs : sur les 3 années disponibles d'utilisation des caméras, on observe de nombreuses plages journalières manquantes, surtout en 2013, liées au dysfonctionnement des caméras et surtout à un manque de surveillance régulière. Les dysfonctionnements étaient surtout liés à des piles non adaptées (à l'époque, type non correctement spécifié par le fournisseur) et à la défection de l'affichage à cristaux liquides pour des caméras exposées face au soleil ou présentant une mauvaise étanchéité.

Résultats qualitatifs : les conditions climatiques, et en particulier de forte nébulosité et de pluie, fin d'hiver-début printemps, ont eu pour conséquence de générer de très nombreuses séries de photos trop sombres et/ou floues (buée, gouttelettes de pluie sur l'objectif) et/ou surexposées (à certaines heures de certaines périodes de l'année) pour être exploitées correctement. Parfois, sur une série de photos d'une journée, une seule photo est exploitable.

b) Analyse des photographies

Le logiciel PhenoCam (<https://phenocam.sr.unh.edu/webcam/tools/>) développé sous Matlab a été utilisé pour l'analyse des photos. Préalablement, celles-ci sont regroupées par arbre, par année puis par mois/année en autant de répertoires et sous-répertoires et le nom de chaque fichier est standardisé. Le logiciel permet d'une part de délimiter sur une photo de 1 à 3 régions d'intérêt (ROI) de forme libre (correspondant par exemple à la cime de plusieurs arbres) ; ces régions d'intérêt sont ensuite appliquées à l'ensemble des photos d'une année. D'autre part, le logiciel permet de filtrer les photos d'une série (plage horaire ; niveau d'obscurité) et enfin d'appliquer un lissage sur plusieurs jours. Sur base des composantes de couleur (bleu, rouge et vert), il calcule ensuite un index (Gcc = Green chromatic component) qui représente la part de la composante verte dans la gamme de couleurs. Les valeurs de Gcc (brutes ou lissées) sont ensuite portées sur un graphique en fonction du jour de l'année et peuvent être exportées pour la suite des analyses.

Une mauvaise fixation des caméras voire même la seule manipulation d'ouverture des caméras pour remplacer les piles et/ou décharger la carte SD peut entraîner un léger déplacement des caméras ; de même des vents forts peuvent déplacer les cimes des arbres au moment de la prise de vue. Les ROI d'une série annuelle doivent alors être redéfinis plusieurs fois.

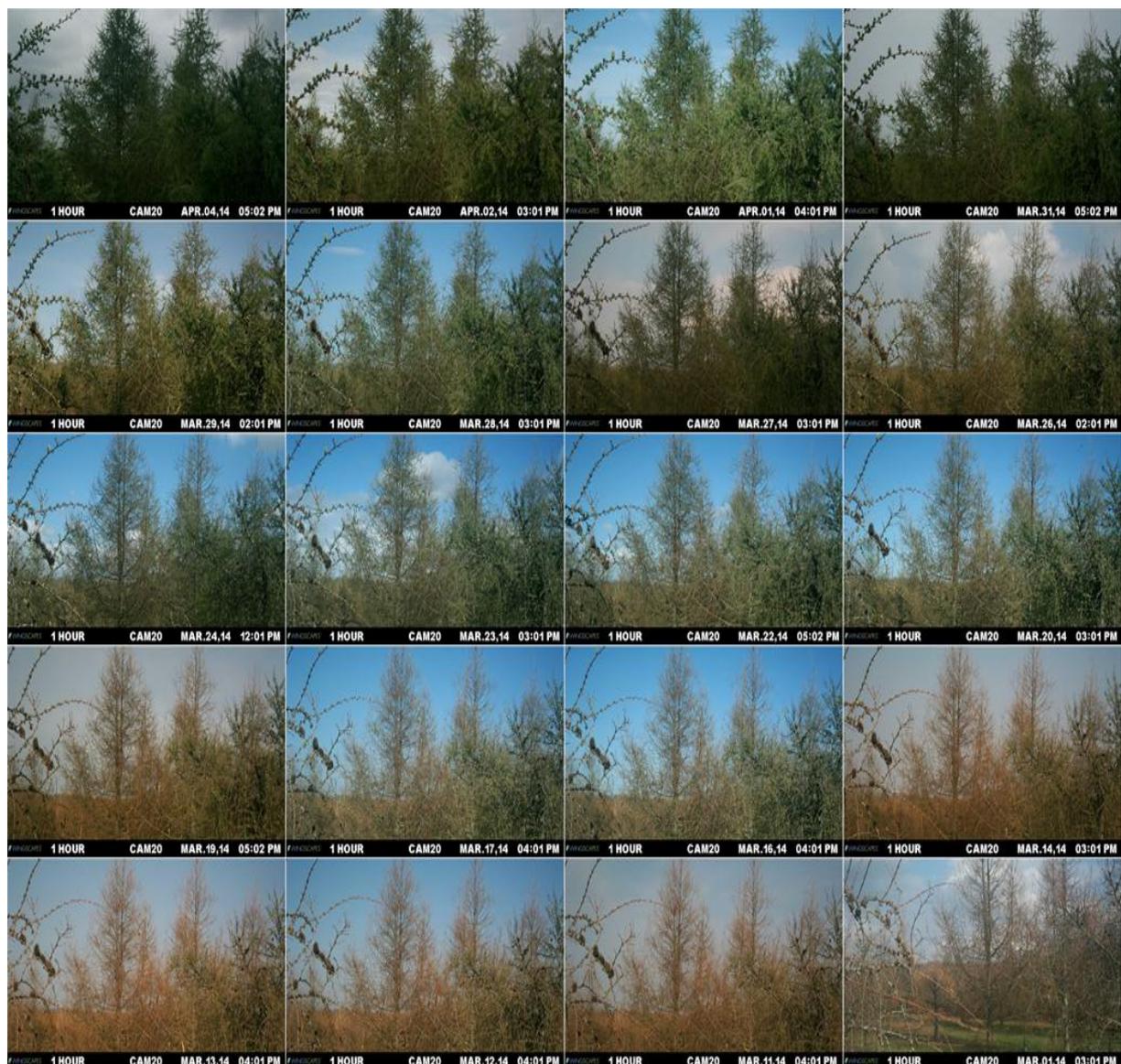


Figure 5. Verdissement progressif de la cime entre le 1 mars (en bas à droite) et le 4 avril 2014 (en haut à gauche).



Figure 6. Sénescence observée entre le 31 octobre (en bas à droite) et le 17 décembre 2013 (en haut à gauche).

Les Figures 5 et 6 ci-dessus permettent de voir le développement parfois très rapide du débournement et du jaunissement des aiguilles (exemple : entre le 22 et le 24 novembre 2013 sur la Figure 6). Pour certains arbres, certaines années, le verdissement massif de la cime se passe en quelques dizaines d'heure, soit à une vitesse que les notations classiques de phénologie en tests génétiques (une fois par semaine) ne permettent pas de capturer.

Par ailleurs, la Figure 7 ci-dessous compare l'évolution de la notation visuelle par code BBCH et du Gcc pour deux clones. La notation BBCH montre une différence nette de phénologie du débournement entre les deux individus : l'arbre 2 étant considéré comme précoce et le 3 comme tardif. Les courbes de Gcc obtenues à partir de l'analyse des photos via PhenoCam mettent bien en évidence ce décalage de phénologie entre les deux clones. À noter que ces courbes sont décalées dans le temps : le notateur voit systématiquement le plein verdissement de la cime (BBCH 19) plusieurs jours plus tôt que le pic de Gcc.

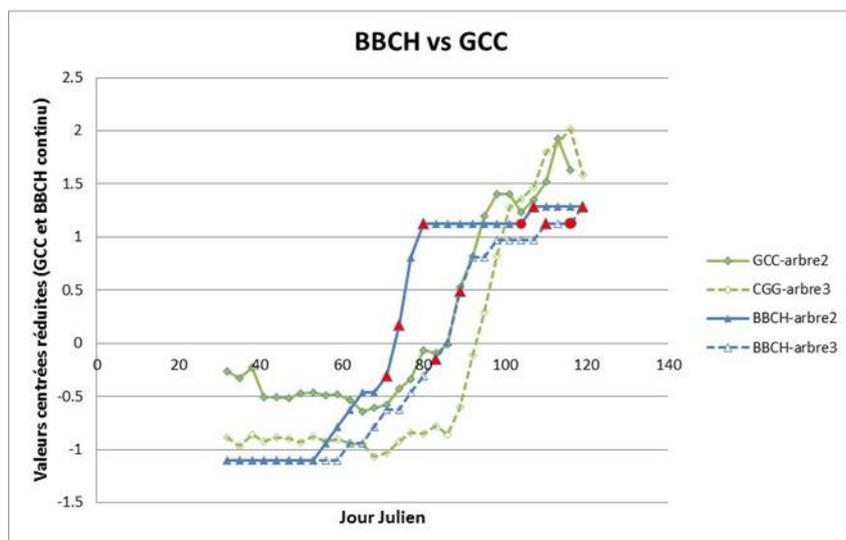


Figure 7. Evolution de la note BBCH (échelle continue) (en bleu) et du Gcc (Green chromatic component) (en vert) pour deux clones (arbres 2 et 3) entre le 1/02 (JJ : 32) et le 28/04/2014 (JJ : 119). Les données sont exprimées en valeurs centrées réduites. Les triangles rouges correspondent respectivement aux stades BBCH10, 15 et 19 et 31 (début de l'élongation) ; les ronds rouges au stade 5 (bourgeon terminal complètement débourré).

L'évolution de la sénescence est représentée par la Figure 8 ci-dessous à travers la notation visuelle par code BBCH et le Gcc. Pour le BBCH, les deux clones se démarquent assez nettement avec une sénescence plus précoce des aiguilles chez le clone 2 par rapport au clone 3. La dynamique d'évolution du Gcc montre bien une décroissance du Gcc avec l'avancement de la saison de végétation mais le démarquage des deux clones n'est pas clair.

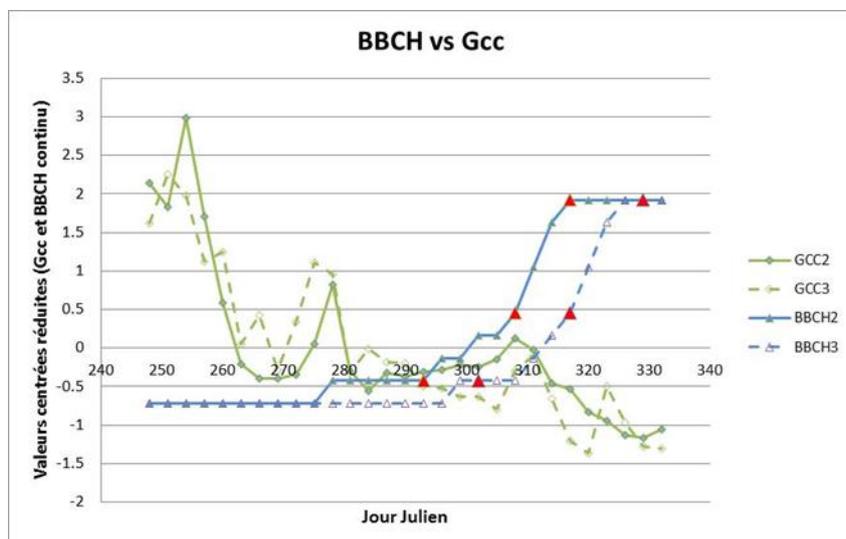


Figure 8. Evolution de la note BBCH (échelle continue) (en bleu) et du Gcc (Green chromatic component) (en vert) pour deux clones (arbres 2 et 3) entre le 4/09 (JJ : 248) et le 27/11/2015 (JJ : 332). Les données sont exprimées en valeurs centrées réduites. Les triangles rouges correspondent respectivement aux stades BBCH91, 95 et 99.

Conclusion

Sur un plan purement technique cette étude révèle plusieurs points de vigilance : le choix des piles, de l'exposition et la fixation de la caméra pour un traitement automatique des images optimum. Tout ceci justifie une phase de test et des visites fréquentes du dispositif en phase d'acquisition afin d'optimiser le nombre et la qualité

des images obtenues. Un suivi régulier (au moins une fois par semaine) semble indispensable pour vérifier le bon fonctionnement des caméras et la propreté de l'objectif. D'autres types de caméras existent (voire 1^{ère} partie de cet article) et sont en cours d'évaluation.

Par ailleurs, et au regard de ces premiers résultats, nous avons pu démontrer qu'il est possible d'obtenir des images de qualité suffisante permettant un traitement automatique des données.

Ceci permet de passer d'une donnée qualitative fortement soumise à l'effet observateur à une donnée quantitative comparable d'une année à l'autre et/ou d'un dispositif à l'autre.

Suite du texte page suivante

Exemple du CEFE – Chêne pubescent et hêtre commun – De la feuillaison à la sénescence (X. Morin)

Qu'est-ce qu'on observe ?

La phénologie végétative joue un rôle primordial dans la compétition entre les espèces présentes au sein d'un même peuplement. Elle peut en effet conditionner l'accès aux ressources hydriques, à la lumière mais aussi in fine impacter la productivité des essences en compétition. L'objet de cette étude à travers le suivi de la phénologie par caméras consiste donc à suivre le débourrement dans des peuplements mélangés de chêne et de hêtre d'une part et de sapin et hêtre d'autre part.

Choix de l'outil

Les gradients altitudinaux sont des outils très intéressants pour étudier les effets du climat sur les dynamiques des peuplements forestiers. En effet, ils ont l'avantage de présenter des variations continues et progressives des conditions environnementales et ce sur un espace relativement restreint. Cependant, la singularité des observations en écologie forestière justifie de multiplier le nombre de sites d'étude pour bien cerner le processus étudié. Ceci étant, cette multiplicité des sites d'études peut vite présenter un caractère chronophage. C'est pourquoi, et concernant le suivi de la phénologie, nous avons choisi d'installer des caméras présentant une forte autonomie (un téléchargement par an), une facilité de récolte des données via une clé USB et une bonne étanchéité face aux intempéries.

Caractéristiques de l'outil

Le matériel utilisé est la caméra GardenWatchCam de marque Brinno® présentant les mêmes caractéristiques que celles présentées pour l'exemple de l'URFM.

Protocole

Le principe est d'échantillonner des placettes le long de gradients altitudinaux, en peuplements monospécifiques et en peuplements mélangés. Autrement dit nous avons échantillonné des triplets de placettes (une placette en mélange, et une placette pour chaque espèce en peuplement monospécifique). Dans chaque placette, sont mesurés la hauteur et le diamètre des arbres, la densité du bois et la croissance récente (par carottage). Les placettes sont matérialisées par des cercles de 10 m de rayon, où tous les arbres sont échantillonnés. Des observations complémentaires de caractérisation du milieu sont également réalisées (relevés botaniques, sol, litière). Une caméra par placette est installée afin de suivre la phénologie de plusieurs individus de la placette. Pour ce faire, celles-ci sont fixées à 5m de hauteur sur un arbre de la placette, et visent un groupe d'arbres. Deux prises de vue par jour sont programmées. Les sites d'étude étant éloignés du laboratoire aucune observation à l'œil en parallèle ne peut être réalisée.

Résultats et analyses

La **Figure 9** ci-dessous illustre le type d'image que l'on peut obtenir avec ce genre de matériel dans la situation décrite précédemment.



Figure 9. Illustrations du rendu photographique en situations de peuplement mélangé ou pur.

La qualité des résultats obtenus nous permet de distinguer le débourrement des espèces d'intérêt présentes au sein des peuplements mélangés étudiés et ce quel que soit le type de mélange (décidus/décidus ou décidus/semperverent). Cependant, seul un échantillon des arbres de chaque placette est suivi ; si l'on souhaite avoir une représentation de la phénologie sur un nombre plus important d'individus, la densité de caméra doit donc être augmentée.

Conclusion

Concernant l'équipement choisi, à raison de deux prises de vue par jour, les caméras n'ont eu aucun problème technique (batterie, stockage...) sur une durée d'un an et demi. En outre, l'ensemble des données étant exploitable, ce type d'outil nous permet ainsi à moindre coût et en situation isolée de suivre la phénologie du débourrement.

Perspectives

Au vu de ces premiers résultats encourageants, le dispositif va pouvoir être étendu à l'ensemble des placettes suivies dans le cadre de notre projet. Cela nous permettra d'appréhender finement l'effet I) du climat sur les dates de débourrement ainsi que II) l'effet de la composition (pur ou en mélange). In fine, l'observation de la sénescence des feuilles pourrait nous permettre d'estimer la durée de la saison de végétation qui est un paramètre primordial souvent pris en compte dans les modèles de bilans carbone.

Suivi en continu à l'échelle du peuplement

Exemple de l'UR AGPF – Orléans – Suivi d'un gradient altitudinal (L. E. Pâques)

Qu'est-ce qu'on observe ?

Dans le cadre de ses études sur l'adaptation des arbres aux changements climatiques, l'INRA-AGPF (coord. P. Rozenberg) a mis en place avec l'UE GBFOR un site atelier sur un gradient de mélèze d'Europe à Villar-St-Pancrace. Quatre placettes de +/- 200 arbres ont été délimitées à 1300, 1700, 2000 et 2400 m et font l'objet de différentes études génétiques et de dendrochronologie. Elles sont complétées par des plantations réciproques (tests clonaux) qui permettront d'étudier la part de l'adaptation locale vs plasticité phénotypique. Outre la croissance, la phénologie est un caractère adaptatif majeur auquel ce type de projet s'intéresse en priorité.

Choix et caractéristiques de l'outil

Sans contrainte particulière de terrain, le choix s'est porté vers des caméras de type TimeLapse de Wingscapes permettant d'acquérir des images de qualité sur un plan général à l'échelle du paysage.

Protocole

De manière à suivre sur l'ensemble du versant l'évolution de la phénologie (débourrement et sénescence) et de la période d'enneigement aux différentes altitudes, les caméras ont été installées sur le versant en face du gradient à +/- 3-4 km à vol d'oiseau des placettes ciblées. Elles sont installées depuis mai 2013 et sont relevées 1 à 2 fois/an. Une photo est prise toutes les heures.

Résultats et analyses (images)

Les photos de la **Figure 10** ci-dessous montrent quelques étapes de l'évolution de la phénologie et de l'enneigement le long du gradient le 22/02 (à gauche), le 2/05 et le 18/10/2015 (droite). En particulier, on distingue assez nettement les mélèzes encore non débourrés à 2000 et 2400 m (milieu) le 2 mai et les arbres en phase de sénescence à ces mêmes altitudes le 18 octobre.

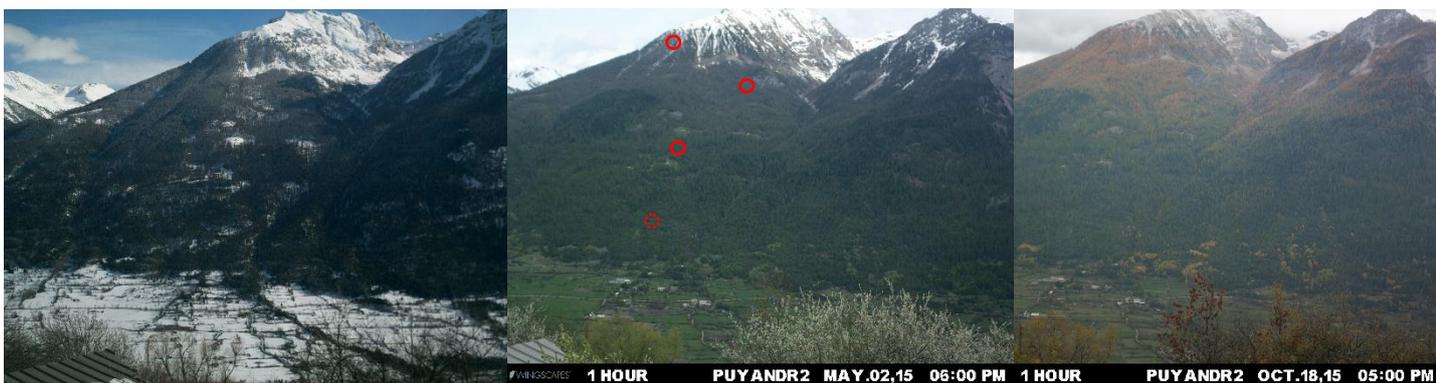


Figure 10. Villar-St-Pancrace (05) : gradient altitudinal de mélèze vu depuis la mairie de Puy-St-André (en rouge, localisation approximative des placettes ; celle du bas (1300 m) est en réalité non visible sur cette photo).

Conclusion

A l'abri d'un bâtiment, les deux caméras fonctionnent correctement depuis 2013 (batterie, stockage des images, etc.) avec un minimum de suivi (1-2 x par an) et se sont donc montrées très fiables. Néanmoins, les nombreux jours d'intempéries mais aussi de mauvaises expositions (zones d'ombre) y compris en période estivale à certaines heures de la journée obligent à abandonner de nombreuses photos.

Cependant ces observations permettent d'apprécier la longueur de la saison de végétation aux différentes altitudes du gradient. Cette donnée étant un des facteurs clé des modèles permettant de quantifier les bilans carbone des peuplements forestiers dans le cadre du changement climatique, l'utilisation de ce type d'outil semble permettre de répondre en partie aux objectifs scientifiques de l'étude.

Suite du texte page suivante

Exemple de l'UMR O3HP – St Michel l'Observatoire – Débourrement-floraison-sénescence et chute des feuilles (J-P. Orts)

Qu'est-ce qu'on observe ?

L'étude la phénologie des chênes pubescents et de l'érable de Montpellier nous permet de mieux connaître leurs biologies et d'étudier les mécanismes d'adaptation à court terme que ces espèces mettent en place face au changement climatique, ceci notamment, à partir d'un système d'exclusion de pluie qui vient simuler le climat plus sec prévu en Provence d'ici 2050. Pour ce faire, un suivi visuel très régulier mais particulièrement chronophage est effectué. Par ailleurs, il a ses limites, du fait d'une part d'une vitesse de débourrement parfois très rapide au printemps et d'autre part, des changements de couleurs assez fin à l'automne. Ceci justifie en partie la mise en place d'un système d'observation automatique dont les résultats sont illustrés par les **Figures 13,14 et 15** ci-après ; ce dernier devant également permettre de minimiser les effets observateurs.

Origine du projet

Deux opportunités ont permis d'initier le projet illustré en partie sur la **Figure 11**. Tout d'abord un mât de mesures de type ICOS1, (Intégré Carbon Observatory System) a été installé à proximité de notre site de mesure en 2014. Cela permet donc de disposer d'un mât de 100 m au-dessus de la forêt étudiée.

Par ailleurs, le raccordement au réseau électrique et à l'internet filaire au sommet de ce mât offre la possibilité de choisir des outils très performants en termes de qualité d'image tout en permettant un rapatriement automatique et aisé des données acquises. Ainsi, une caméra, de modèle AXIS Q6035-E PTZ Dome Network Camera, a pu être installée au sommet à 100 m.



Figure 11. Photographie du site expérimental de l'O3HP (Oak Observatory at OHP).

Caractéristiques de l'outil choisi

www.axis.com



Le modèle de caméra AXIS Q6035-E PTZ Dome Network, illustrée par la **Figure 12** ci-contre, est une caméra grand public, qui sert généralement à faire de la surveillance de site. Elle est étanche, pilotable et dirigeable à distance via le réseau internet. Sa direction, sa résolution, son zoom et fréquences des prises de photos automatiques sont programmables.

Figure 12. Camera
AXIS Q6035-E PTZ
Dome Network®

Elle dispose d'une résolution maximale de 1920 x 1080 pixels, d'un zoom optique de 20x et d'un zoom numérique de 12x. La caméra peut envoyer automatiquement l'image sur une boîte email ou serveur accessible en ligne permettant de stocker les images en toute sécurité (sauvegarde).

Protocole

Le but de cette expérimentation est d'obtenir une photo par jour à midi TU de la zone d'étude pour apprécier l'évolution journalière de la phénologie du site d'étude. Midi a été choisi car cela correspond à l'heure de plus fort éclaircissement et présentant un minimum d'ombres portées. Sur le long terme, l'objectif est d'associer à ces prises de vues un traitement automatique pour s'affranchir du côté subjectif de l'œil humain, notamment pour le changement de couleur au moment de la sénescence foliaire.

Aujourd'hui, l'échelle d'étude est la population mais si la résolution le permet, il serait intéressant de tester ce type de suivi à l'échelle de l'individu.

Résultats et analyses

La sensibilité de la caméra ne permet pas de voir les changements trop fins. Cependant, elle permet de suivre la variation journalière, en dehors des jours très brumeux. D'autre part, même si la vue n'est pas totalement à la verticale du site chaque arbre est repérable individuellement au printemps et à l'automne quand les arbres ont assez de différences entre eux. Toutefois, en dehors de ces périodes, la hauteur et la résolution de la caméra limitent l'identification certaine des houppiers de chaque arbre.

Par ailleurs, la caméra ayant une balance automatique des blancs, la couleur affichée peut varier sensiblement d'un jour à l'autre en fonction de l'ensoleillement sans que cela soit dû à un changement de stade phénologique. Pour éviter une dérive des couleurs en fonction des jours plus ou moins ensoleillés, la pose d'un écran blanc de référence dans le champ de la caméra est prévue. Ceci permet le traitement des photographies avec la même balance des blancs.



Figure 13. 13 avril 2015, les érables verts clairs sont en fleurs ou en train de former leurs feuilles, les chênes pubescents commencent juste comme les gros bouquets au centre et au premier plan.

Figure 14 page suivante



Figure 14. 28 octobre 2014, les chênes commencent à peine à jaunir mais les érables sont déjà bien rouges. Le sumac fustet, arbuste de sous-bois, est lui aussi bien rouge (un peu plus foncé) et tapisse le sol par endroit.



Figure 15. 18 novembre 2014, les érables ont perdu leurs feuilles et les chênes sont en train de changer de couleurs.

Conclusion

Pour mieux maîtriser les dérives de couleurs et optimiser la qualité des données, trois photos par jour (8h, 12h et 18h TU) ont été effectuées.

Une hauteur de fixation à 50 m aurait été suffisante. Ceci aurait permis d'avoir une meilleure résolution.

Une balance des blancs automatique a faussé la représentation des couleurs et a donc été source d'erreur.

L'installation d'une plaque blanche de 30*30 cm comme référence de « vrai blanc » aurait permis de comparer les images entre elles.

Enfin, le format JPEG, seul disponible, peut fausser la représentation des couleurs et peut être une source de bruit (ou un biais) dans l'évaluation de l'intensité de chaque couleur. Un format non-compressé de type TIFF, PNG ou BMP serait préférable. Au minima, il est recommandé de programmer un Jpeg de qualité optimale.

Perspectives

- i) Appliquer les recommandations, ci-dessus, permettrait d'avoir une photo claire où chaque individu suivi en phénologie depuis le sol serait identifiable et permettrait un suivi individuel automatisé
- ii) Mettre en place un traitement automatisé des changements de couleurs de la végétation tout au long de l'année pour le mettre en corrélation avec les observations au sol par le personnel et ainsi améliorer la précision et la résolution temporel des observations.
- iii) Intégrer le réseau Europhen (<http://european-webcam-network.net>)

Conclusion générale

Les diverses situations décrites dans cet article pour observer la phénologie à partir de caméras montrent l'efficacité de ces dispositifs. Ce sont de véritables outils d'aide à la décision pour déterminer par exemple la longueur de saison de végétation ; ils permettent également de comparer de nombreuses situations intra et inter-espèce, à la fois dans le temps (intra et interannuel) et dans l'espace (intra et intersite).

Toutefois, aucune solution « clé en main » ne semble se dégager. La diversité des situations et les contraintes singulières à l'environnement forestier nécessitent une adaptation au cas par cas.

Points de vigilance sur le déploiement du matériel *in situ*

Malgré les garanties du constructeur, l'étanchéité semble être un problème récurrent. Ce problème concerne plusieurs types de produits présentés dans cet article hormis le modèle de caméra utilisée par l'équipe de l'IMBE de St Michel l'Observatoire (AXIS Q6035-E PTZ Dome Network) et dans les conditions décrites.

Par ailleurs, les contraintes d'autonomie et de déchargement des données peuvent être un véritable frein au déploiement de ce type d'outil. Cependant, l'objectif ici est bien d'offrir des solutions permettant d'observer en continu les écosystèmes particulièrement isolés et n'ayant pas accès au réseau électrique et internet à proximité. Parmi les alternatives intéressantes le raccordement à des panneaux solaires peut offrir une solution intéressante concernant l'accès à l'énergie. Côté communication, l'accès à des réseaux de communication, soit téléphonie mobile, soit sans fil type Bluetooth ou wifi, peut également faciliter l'exploitation du matériel. Toutefois, le recours à ce type de technologie présente un surcoût manifeste à l'achat du matériel.

Recommandations sur le traitement automatique de l'image

En fonction des objectifs de l'expérimentation, observation ponctuelle ou suivi long terme des écosystèmes, une réflexion est nécessaire pour déterminer s'il est judicieux de traiter l'image de façon visuelle ou automatique. Dans l'optique d'un traitement visuel de l'image sujet également à interprétation, le biais observateur est a priori plus réduit qu'une observation de terrain effectuée par différents notateurs. De plus, la photographie offre la possibilité de pouvoir revenir sur la donnée acquise. A contrario, un traitement automatique des photographies évite en partie le « biais observateur ».

L'acquisition des images d'intérêt associée à un panneau de référence permet d'exploiter de façon automatique les images et ce quel que soit l'intensité lumineuse.

Par ailleurs, il est important de choisir, en amont de la prise d'image, un logiciel adapté qui permet un traitement rapide des images acquises. A ce propos, des logiciels développés pour le suivi de la phénologie des écosystèmes existent et peuvent répondre aux besoins recherchés, par exemple, PhenoCamGUI à l'échelle mondiale (<https://phenocam.sr.unh.edu/webcam/tools/>) ou Phenopix R Package, à l'échelle européenne, dans le cadre des réseaux ICOS (Integrated Carbon Observation System) baptisé EUROPHEN (<http://european-webcam-network.net/map.php>) pour ce qui concerne ce réseau de caméras.

Il est aussi important de souligner que ce choix de type de traitement automatique des données permet de passer rapidement d'une donnée qualitative à une donnée quantitative plus facilement exploitable.

Perspectives

Cet article invite donc à poursuivre le déploiement de ce type de suivi à l'échelle du réseau des observateurs de la phénologie en dehors des sites déjà instrumentés. Ceci pourra se faire en s'appuyant sur l'expérience de l'UMR Interactions Sol Plante Atmosphère – INRA Bordeaux qui coordonne ce type d'action au niveau des sites instrumentés.

Cet effort pourrait être maintenant fédéré en grande partie autour du SOERE (Systèmes d'observation et d'Expérimentation au long terme pour la Recherche en Environnement) TEMPO (réseau national d'observatoires de la phénologie du vivant), dont l'un des objectifs est de produire des outils de recherche et d'observation innovants sur la phénologie.

Remerciements pour les soutiens financiers apportés au projet

GDR Pheno SIP 2968, Métaprogramme ACCAF Perpheclim, projet Européen Trees4Future

Annexe 1 : WP1 Harmonisation des protocoles de l'ACCAF Perpheclim Version du 10.11.2016.