

UTILISER LES DONNÉES D'OBSERVATION POUR TESTER DES OUTILS DE TÉLÉDÉTECTION : EXEMPLE DE LA DÉTECTION SATELLITAIRE DU DÉBOURREMENT ET DE LA SENESCENCE DES FEUILLES

Eric Dufrêne
Kamel Soudani

Université Paris Sud, Laboratoire Écologie Systématique et Évolution



Utiliser les données d'observation pour tester des outils de télédétection : exemple de la détection satellitaire du débourrement et de la sénescence des feuilles

Soudani Kamel, Delpierre Nicolas, Dufrêne Eric
ESE - Écologie Systématique Évolution, Université Paris-Sud, CNRS, AgroParisTech

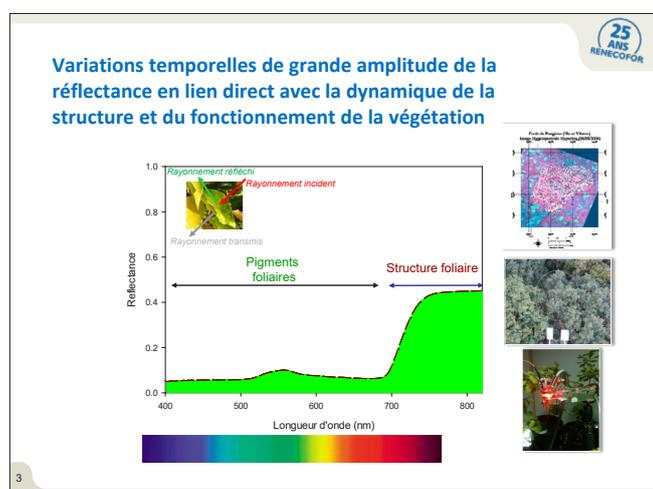
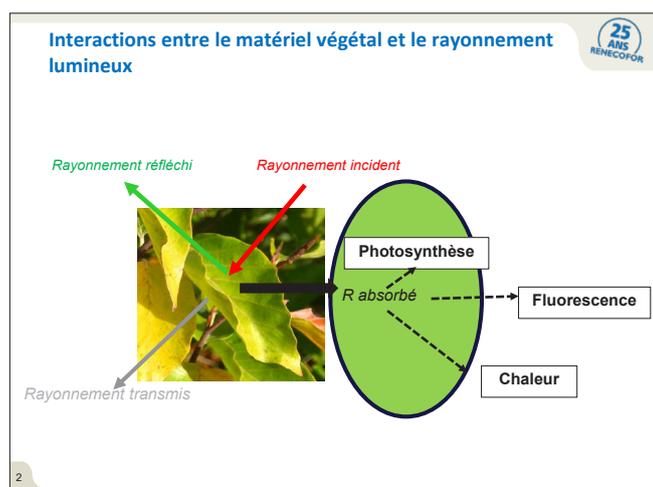
Je dois vous demander d'excuser mon collègue Kamel Soudani qui n'a pas pu venir, et d'être indulgent avec moi qui vais devoir présenter son exposé.

Nous allons parler de télédétection et voir comment on cherche à utiliser la télédétection, satellitaire ou rapprochée, pour avoir des informations sur la phénologie.

Principes méthodologiques

La télédétection, c'est juste une mesure à distance ; ça peut être à 1 mm ou beaucoup plus loin, comme avec les satellites.

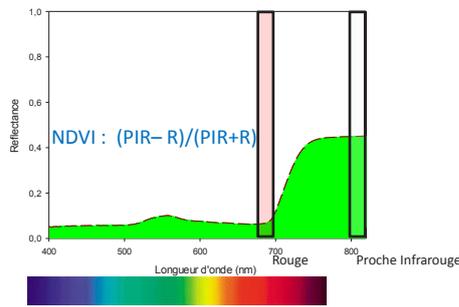
Ce qui nous intéresse en l'occurrence, c'est essentiellement l'interaction entre le matériel végétal et le rayonnement lumineux. Que ce soit à l'échelle de la feuille ou à l'échelle de l'écosystème, le rayonnement incident qui arrive sur la végétation est en partie réfléchi, en partie transmis et en partie absorbé (par la feuille ou la canopée). Et le rayonnement absorbé a lui-même trois devenir possibles : une part fournit l'énergie nécessaire à la photosynthèse, et le reste est réémis sous forme de rayonnement lumineux (de fluorescence, par exemple) ou sous forme de rayonnement thermique. J'ajoute au passage que ce rayonnement absorbé fait actuellement l'objet de beaucoup de développements de télédétection, entre autres sur la fluorescence, avec le lancement de nouveaux satellites qui vont permettre ou qui permettent déjà en partie d'avoir des informations directes sur la photosynthèse du couvert et des feuilles.



Ce qu'on peut mesurer à l'aide de capteurs, c'est la réflectance, c'est-à-dire le rapport entre le rayonnement réfléchi et le rayonnement transmis. On peut la mesurer à différentes distances, avec des capteurs rapprochés, au niveau des feuilles (image en bas à droite) ou au-dessus d'un couvert végétal (image au milieu à droite), ou avec des capteurs très éloignés dans des satellites (image en haut à droite). C'est la mesure directe.

Cette réflectance (en ordonnée sur la figure) est sensible à la longueur d'onde exprimée en nanomètres. Dans la gamme visible, jusqu'à 700 nanomètres, elle dépend essentiellement des pigments foliaires et dans la gamme proche infra-rouge, au-delà de 700 nanomètres, elle va plutôt dépendre de la structure foliaire ou de la structure du couvert selon l'échelle à laquelle on se place.

Indice optique de biomasse : le NDVI - Normalised Difference Vegetation Index ou Indice de Végétation normalisé



Réseau de télédétection in situ

Mesures optiques
NDVI, PRI, spectre de réflectance visible – proche infrarouge, fluorescence passive SIF (600-800 nm), température du couvert

Mesures sur les sites à flux
CO₂; H₂O; rayonnements; précipitations; température air, couvert et sol; humidité du sol; croissance des arbres; etc.

Ecosystèmes
chêne sessile (Barbeau-Fontainebleau); hêtre (Hesse); pin maritime (Bordeaux); chêne vert (Montpellier); pin d'Alep/chêne vert (Avignon); Eucalyptus (Brésil); forêt tropicale humide (Guyane), etc.

Réseau Français (SOERE FORET)



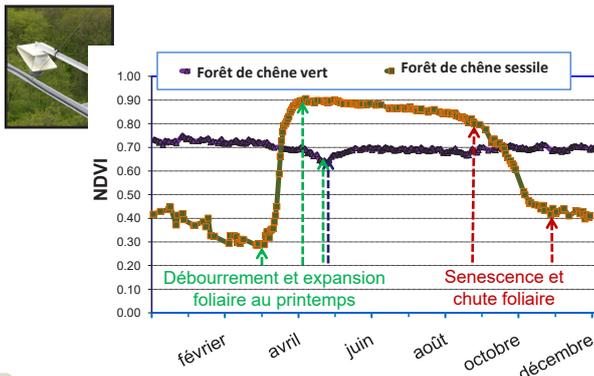
Pour caractériser l'état, l'activité de la végétation, on utilise classiquement des indices qui combinent les valeurs de réflectance particulièrement informatives. Et notamment l'indice de végétation normalisé (NDVI), qui considère deux bandes spectrales (plages de longueurs d'onde) : une dans le proche infra-rouge (PIR), l'autre dans le rouge (R) autour de 680 nanomètres, dans la bande d'absorption de la chlorophylle A. Remarque : on voit qu'il y a dans cette bande une forte absorption parce qu'on a une faible réflectance ; même chose dans le bleu, domaine d'absorption des deux chlorophylles A et B ; dans le vert, par contre il y a peu d'absorption, d'où une forte réflectance du couvert. Le NDVI est un indice normalisé : on calcule la différence entre les valeurs de réflectance dans les deux longueurs d'onde et on normalise par la somme des deux. L'indice varie donc entre -1 et 1, ou si on préfère, entre -100% et 100%.

Notre laboratoire développe et installe des capteurs de télédétection rapprochée depuis pas mal années déjà, et fait des mesures avec des spectromètres qui permettent d'accéder au NDVI mais aussi à d'autres informations dont je ne parlerai pas ici. Ces systèmes sont installés sur un réseau de sites, principalement les sites ICOS* et les sites du réseau SOERE F-ORE-T* dont Guy Landmann a brièvement parlé (session 1). Comme il se fait bien d'autres choses sur ces mêmes sites, et en particulier des mesures de flux, ça nous donne d'autres informations qu'on peut comparer avec la phénologie.

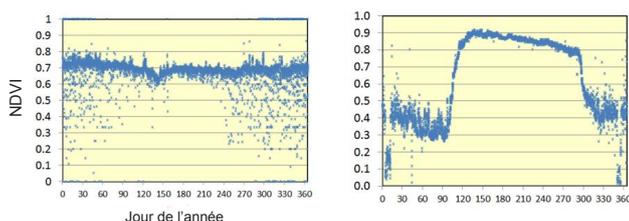
Télédétection rapprochée du débournement et de la sénescence

Pour entrer dans le vif du sujet, voici le type de tracé qu'on obtient sur ces sites pour le NDVI, l'indice de végétation, en fonction de la période de l'année. Le vert/kaki correspond à une forêt de chêne sessile, la forêt de Barbeau près de Fontainebleau ; le bleu correspond à une forêt de chêne vert, la forêt de Puéchabon dans l'Hérault. On voit entre les deux une grande différence dans la dynamique de signal : c'est que le chêne sessile est une espèce à feuilles caduques tandis que le chêne vert est sempervirent. Chez le chêne sessile, le NDVI reste très faible pendant la période sans feuilles ; il monte très rapidement lors de la feuillaison puis connaît une sorte de plateau et une décroissance lors du jaunissement et de la chute foliaire. Mais dans des systèmes où la surface foliaire et la chlorophylle varient relativement peu, on a quand même un signal : on le voit, chez chêne vert, lors de la pousse des feuilles (la chute et la pousse sont quasi simultanées) ; et comme on peut relier ce signal avec des flux de carbone, on sait que ce n'est pas un artefact.

Phénologie et dynamique temporelle de la structure du couvert à partir des séries temporelles NDVI

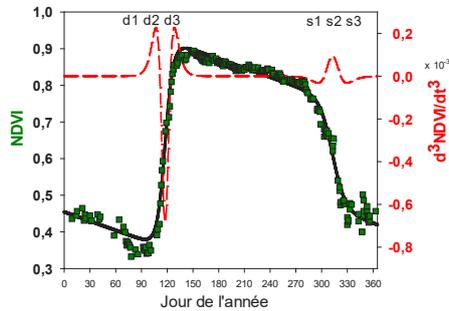


Le signal NDVI doit être filtré afin de supprimer le bruit causé par les conditions atmosphériques



Je viens de vous montrer le signal « propre », mais en fait le signal brut correspondant, ci-contre, est sensible au rayonnement et en particulier à la proportion de rayonnement diffus et direct. Pour obtenir les courbes précédentes, il faut traiter ces données et en particulier les « seuiller » en fonction du rayonnement.

Principe de détermination des indicateurs phénologiques de printemps et d'automne à partir des séries temporelles du NDVI

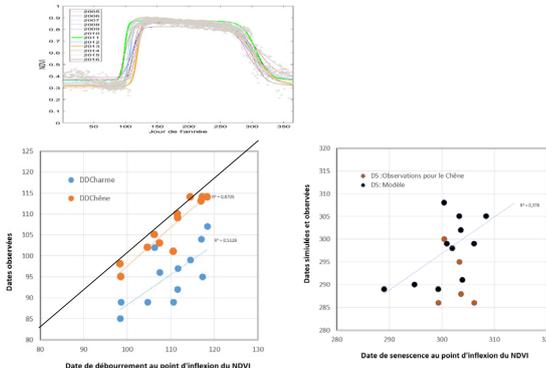


8



Ensuite, pour valider la pertinence de ces courbes en matière de détection du débourrement et de la sénescence, il faut comparer avec les mesures de phénologie faites sur les réseaux (dont RENECOFOR). Or on a un signal dynamique qui s'étend sur toute l'année alors que les données d'observation phénologique sont ponctuelles dans le temps. Pour pouvoir comparer, il faut extraire de nos dynamiques saisonnières l'information souhaitée. Pour la phase de débourrement, nous avons extrait la date de démarrage de croissance des feuilles, c'est-à-dire le point d'inflexion (qui correspond à la vitesse de croissance maximale) et la date à la valeur maximale ; même démarche pour le jaunissement et la chute des feuilles.

Relations entre observations in situ et les indicateurs basés sur le NDVI sur la forêt de Barbeau-Fontainebleau



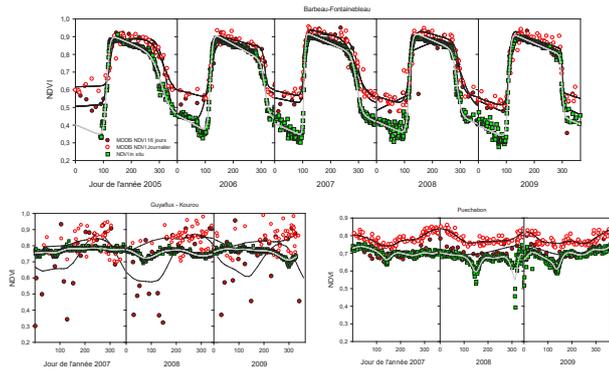
9



Ainsi, sur le site de Barbeau, où nous avons 12 années de données (voir l'aperçu en haut), nous avons pu comparer la date d'observation avec la date de débourrement issue du point d'inflexion (figure de gauche), et nous l'avons fait pour deux espèces, parce que le chêne (points orange) est accompagné de charme (points bleus) en sous-étage. Pour le chêne, on a une bonne relation qui n'est pas biaisée par rapport à la droite 1/1. Pour le charme on obtient aussi une bonne relation, mais elle est biaisée ou plus exactement décalée, ce qui est normal : comme vous le savez, le charme débourre 15 jours à 3 semaines avant le chêne sous nos climats ; or la réflectance mesurée au-dessus du couvert est celle de l'étage dominant, c'est-à-dire du chêne. Pour le jaunissement nous avons fait la même approche, sauf que (figure de droite) on a 2 types de points (des points de modèle et des points de données) mais peu importe : nous n'avons pas de relation entre le signal de télédétection qu'on arrive à extraire et les dates d'observation sur le site de Barbeau. La télédétection ne fonctionne pas (actuellement) pour détecter la date de jaunissement des feuilles.

Test de la télédétection satellitaire

Relations entre observations in situ et indicateurs basés sur le NDVI satellitaire : réseau SOERE



10



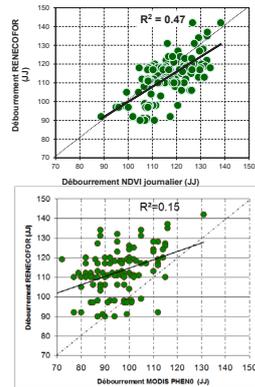
Jusqu'à là c'était facile parce que le capteur est proche du couvert et qu'on a peu d'interférence avec l'atmosphère. Mais quand on utilise des données satellitaires, le signal qu'on capte est fortement bruité car il doit traverser toute l'atmosphère et subit donc une forte interférence. Je vous présente ici des données de NDVI au fil du temps sur trois écosystèmes : la forêt de chêne sessile sur le site Barbeau (en haut), la forêt tropicale du site de Kourou en Guyane (en bas à gauche) et la forêt de chêne vert du site de Puéchabon (en bas à droite). En rouge, ce sont les données du satellite MODIS, avec des produits journaliers (points creux) ou des produits composites à 16 jours (points pleins), et en vert ce sont comme précédemment les données mesurées in situ depuis les tours à flux. Disons, pour faire simple, qu'en ce qui concerne le chêne sessile on arrive plus ou moins à reproduire depuis le satellite le signal observé localement. Mais sur la forêt tropicale de Guyane c'est plus compliqué, entre autres à cause de l'ennuage, et ça marche mal ; sur le chêne vert, ça ne marche pas bien non plus.

Relations entre observations in situ et indicateurs basés sur le NDVI satellitaire : réseau RENECOFOR



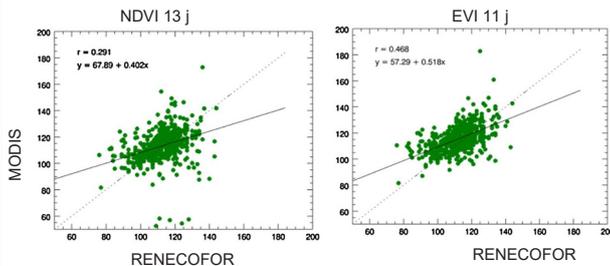
Débourrement : sur la période 2000-2004, l'incertitude est de 8 jours avec les images MODIS journalières et de 25 jours avec une image composite tous les 16 jours.

D'après Soudani *et al.* (2008)



11

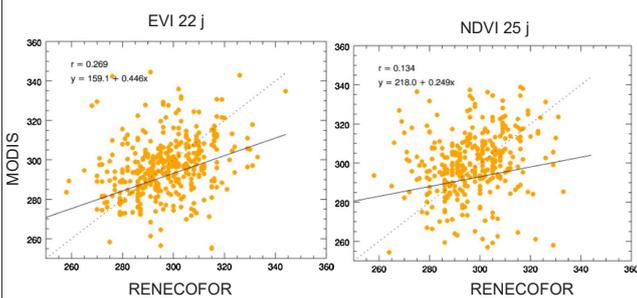
Débourrement : sur une période de 12 ans (2001-2012), l'incertitude est d'environ 12 jours avec les images MODIS journalières



D'après Testa *et al.* (2017)

12

Jaunissement : L'incertitude est entre 22-25 jours avec les images MODIS journalières.



D'après Testa *et al.* (2017)

13

À une échelle plus large, Kamel et quelques autres ont utilisé les observations phénologiques du réseau RENECOFOR (sites de hêtre et chênes), pour les comparer aux indications issues des données NDVI du satellite MODIS.

Pour le débourrement, ça donne une incertitude de 8 jours avec les produits journaliers et de 25 jours sur une image composite. Je parle là des produits fournis par MODIS, des données qu'on peut aller télécharger directement sur le site internet : pour nous, en gros, elles ne valent pas grand-chose. Par contre, quand on accède aux images journalières brutes de MODIS et qu'on les traite soi-même comme savent le faire les télédéTECTEURS comme Kamel, on obtient une relation plus étroite, qui commence à vouloir dire quelque chose (figure en haut à droite) [en bas c'est le produit phénologique MODIS calculé avec des images composites sur 16 jours].

Nous avons fait la même chose, c'est-à-dire la comparaison des données MODIS et des données RENECOFOR, mais en utilisant deux indices de végétation : le NDVI et l'EVI (Enhanced Vegetation Index), qui prend en compte la lumière bleue pour tenter de corriger les effets de l'atmosphère, dont j'ai dit qu'ils parasitaient pas mal les données. Cela concerne, les feuillus (chêne et hêtre), et pour toutes les années d'observation disponibles pour la comparaison (2001-2012).

Au final, on n'obtient pas grand-chose de mieux en tentant de corriger avec ce rayonnement bleu.

Même exercice enfin pour le jaunissement : on a vu précédemment que la comparaison ne marchait déjà pas en télédéTECTION rapprochée... alors forcément ça marche encore moins bien depuis le satellite.



Photo : Luc Croisé ONF

Débourrement du chêne à Fontainebleau

Les figures de cette présentation sont extraites de :

Hmimina, G., Dufrière, E., Pontailier, J. Y., Delpierre, N., Aubinet, M., Caquet, B., de Grandcourt, A., Burban, B., Flechard, C., Granier, A., Gross, P., Heinesch, B., Longdoz, B., Moureaux, C., Ourcival, J. M., Rambal, S., André, L. S. & Soudani, K. (2013)-Evaluation of the potential of MODIS satellite data to predict vegetation phenology in different biomes: an investigation using ground-based NDVI measurements. *Remote Sensing of Environment*, 132:145-158

Soudani K., le Maire G., Dufrière E., François C., Delpierre N., Ulrich E. & Cecchin S. (2008)-Evaluation of the onset of green-up in temperate deciduous broadleaf forests derived from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data. *Remote Sensing of Environment*, 112(5):2643-2655

Testa S., Soudani K., Boschetti L., Mondino E.B. (2017)-MODIS-derived EVI, NDVI and WDRVI time series to estimate phenological metrics in French deciduous forests. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64, 2018:132-144

La télédétection satellitaire constitue un moyen efficace pour suivre la phénologie à différentes échelles spatiales mais les incertitudes associées aux estimations doivent être rigoureusement évaluées.

- Sur les écosystèmes feuillus, la date de débourrement peut être estimée avec une incertitude acceptable si des observations plus précises ne sont pas disponibles. La date de senescence demeure par contre inaccessible par télédétection.
- Sur les écosystèmes sempervirents notamment tropicaux, l'interprétation du signal satellitaire doit être réalisée avec beaucoup de précaution. La subtilité des variations phénologiques et les conditions atmosphériques rendent l'obtention d'un signal fiable très difficile.

Le réseau RENECOFOR constitue un moyen très utile pour répondre à cet objectif.



Intérêt du réseau phénologique RENECOFOR pour la télédétection de la structure et du fonctionnement des écosystèmes

- **Représentativité** : espèces, spatiale (échelle de l'arbre et du peuplement et étendue géographique) et statistique (nombre d'arbres concernés)
- **Homogénéité** : protocole standardisé
- **Continuité** dans le temps

La télédétection fournit une information phénologique écosystémique, de l'ensemble du couvert y compris la strate herbacée. La phénologie et la dynamique temporelle de la végétation herbacée est rarement décrite alors que son rôle aussi bien sur le signal télédétekté que sur le fonctionnement éco-physiologique est loin d'être négligeable.



Conclusion

Je ne suis pas télédétecteur de formation, je suis simplement utilisateur de la télédétection et mes commentaires sont moins enthousiastes que ceux de Kamel, mais en gros nos avis sont assez proches. « La télédétection satellitaire constitue un moyen efficace... », écrit-il, alors que pour moi ça ne marche pas dans un certain nombre de cas, ça dépend de quelle télédétection on parle, ça dépend de comment les données sont traitées, etc. En gros, la télédétection fonctionne assez bien, pour le suivi du débourrement, sur les écosystèmes feuillus avec une forte dynamique. Mais sur les écosystèmes sempervirents, tropicaux ou autres, c'est beaucoup plus compliqué. Il pourrait y avoir des progrès dans les années à venir, grâce aux nouveaux satellites radar qui commencent à voler et qui, eux, ne sont pas sensibles à l'ennuage : on obtient des signaux visiblement beaucoup plus « propres », mais avec d'autres types d'inconvénients.

Quelques mots encore pour dire tout ce que nous a apporté le réseau RENECOFOR, et surtout les qualités, de cet apport : la dimension plurispécifique, l'aspect représentativité au sens spatial, depuis l'échelle de l'arbre et du peuplement jusqu'à celle du pays, et aussi au niveau statistique puisqu'on a un nombre d'arbres suffisant. Autres qualités fondamentales : les protocoles standardisés, et la continuité dans le temps. Pour faire utilement des comparaisons avec des données satellitaires, qui sont en principe normalisées et calibrées, il faut que les données d'observation soient, de leur côté, aussi normalisées et calibrées que possible. Merci à RENECOFOR.