

APPORT DE LA TÉLÉDÉTECTION SATELLITAIRE OPTIQUE/THERMIQUE HAUTE RÉOLUTION À LA PRÉDICTION DE LA SÉVÉRITÉ DES INCENDIES DE FORÊT EN ZONE MÉDITERRANÉENNE FRANÇAISE

Thèse de Victor **PENOT**¹

Analysée par Jean-Luc **PEYRON**²

Directeur de thèse : Olivier **MERLIN**, Directeur de recherche au CNRS d'Occitanie Ouest, Responsable de l'équipe Eau du Centre d'études spatiales de la biosphère (CESBIO).

La thèse de Victor PENOT vise à améliorer la précision avec laquelle on peut appréhender la sévérité potentielle des incendies de forêts en zone méditerranéenne française. Ce sujet est étonnamment encore peu développé en France au-delà de l'étude des facteurs de variabilité que constituent les conditions météorologiques, l'état du combustible, la topographie des lieux. Il se limite souvent à l'utilisation de modèles calibrés pour les Etats-Unis mais difficiles à transposer en France en raison des différences relatives aux échelles et conditions entre les deux pays : de ce fait, les prédicteurs utilisés en France s'avèrent grossiers et méritent largement d'être amendés. La télédétection permet de nouvelles approches susceptibles de combler les lacunes en la matière.

Un premier objectif de la thèse consiste donc à rechercher des prédicteurs de la sévérité des incendies de forêts qui soient plus performants que ceux qui sont couramment utilisés. Pour cela, la télédétection spatiale offre la possibilité de calculer des indices de végétation durant la période précédant les incendies et d'estimer l'état du combustible et son évolution avant l'occurrence du feu. Un second objectif se concentre sur le stress hydrique des forêts, facteur majeur de la sévérité des incendies, qui peut être appréhendé par l'intermédiaire de données optiques et thermiques de télédétection ainsi qu'à la faveur de la nouvelle couverture LIDAR en haute définition de la France sous l'égide de l'IGN.

Victor PENOT a organisé son rapport de thèse en sept chapitres dont les quatre chapitres principaux numérotés 3 à 6 font chacun l'objet d'un article (dont deux publiés avant la soutenance de thèse). Ils sont précédés d'une introduction (chapitre 1) puis d'un état de l'art (chapitre 2) et sont suivis d'une conclusion synthétique incluant des perspectives d'avenir (chapitre 7). L'amélioration des prédicteurs de la sévérité des incendies (premier objectif) fait l'objet des chapitres 3 et 4 tandis que l'estimation du stress hydrique est traitée dans les chapitres 5 et 6.

Mesurer la sévérité des incendies et le stress hydrique par télédétection

La sévérité des incendies, telle qu'elle peut être constatée sur le terrain après incendie, fait en pratique l'objet d'un indice composite (*Composite Burn Index* -CBI) qui prend en compte la biomasse brûlée de cinq strates des étages supérieur et inférieur, y compris le substrat, d'une placette de 30 mètres de diamètre en quantifiant leur niveau d'altération de 0 (non brûlée) à 3 (combustion complète). Cet indice a par ailleurs été adapté aux milieux ouverts (GeoCBI).

¹ La thèse de Victor PENOT a été préparée au sein du CESBIO (Centre d'études spatiales de la biosphère), unité mixte de recherche n°5126 constituée entre le CNRS, l'IRD, le CNES et l'Université de Toulouse 3 Paul Sabatier ; elle s'inscrit dans le cadre de l'École doctorale « Sciences de l'univers, de l'environnement et de l'espace (SDU2E) » ; elle a été présentée et soutenue le 10 juin 2025.

² Membre de l'Académie d'agriculture de France, section 2 « Forêts et filière-bois ».

La télédétection spatiale permet une analyse de la sévérité des incendies sur de grandes surfaces en caractérisant l'état de surface après incendie à partir d'indices combinant des réflectances dans des bandes spectrales allant du bleu ou, plus souvent, du proche infrarouge au moyen infrarouge. Certains de ces indices associent aussi des mesures avant et après incendie. A côté de ces approches empiriques, des modélisations physiques des éléments constitutifs de la scène et des transferts radiatifs sont parfois utilisées. Elles nécessitent plus de données (de bandes spectrales) et sont plus complexes à mettre en œuvre. Les limites de la télédétection spatiale pour estimer la sévérité des incendies sont liées à l'ampleur du temps écoulé entre l'incendie et la prise de données, aux confusions possibles entre cendres et substrat minéral, aux difficultés d'estimation dans le cas de feux sous couvert n'ayant pas atteint la cime des arbres, ou encore dans le cas de formations à végétation clairsemée.

L'état du combustible avant incendie influe directement sur le comportement du feu et sur sa sévérité par le biais de trois caractéristiques principales : sa structure tridimensionnelle, le ratio entre biomasse morte et biomasse vivante, son contenu en eau. La première est accessible par LIDAR, la biomasse vivante par l'indice de végétation (NDVI), qui prend en compte la différence de réflectance de la végétation dans le rouge et le proche infrarouge, la teneur en eau de la végétation est approchée par des indices météorologiques. C'est la biomasse morte qui reste la plus difficile à caractériser.

Quant au stress hydrique, il peut être estimé à l'aide de modèles de bilan d'énergie et de données de télédétection dans l'infrarouge thermique qui permettent d'accéder à la température de surface.

Prendre en compte la dynamique de végétation améliore la prédiction des incendies

Victor PENOT a analysé 79 feux estivaux qui se sont déroulés en région méditerranéenne entre 2016 et 2021. Il a caractérisé l'état de la végétation sur une période de deux mois avant incendie en utilisant des données de télédétection (Sentinel-2, Landsat-7/8) pour calculer l'évolution de l'indice de végétation et des données météorologiques pour fournir des indices de sécheresse. La performance de prédiction de la sévérité de l'incendie (à travers un indice spectral) s'est trouvée augmentée de 32% grâce à l'utilisation des séries temporelles sur les deux mois précédant l'incendie plutôt qu'à une seule date juste avant l'incendie. Il a également été possible de mettre en évidence l'effet direct sur la sévérité, non seulement d'une forte sécheresse atmosphérique le jour de l'incendie, mais également de la rapidité de son augmentation durant la période de deux mois précédant l'incendie. Il en va de même de l'effet non seulement d'un faible indice de végétation le jour de l'incendie, mais encore de la rapidité de sa diminution durant la période précédente.

En comparant différents indices de sévérité, il s'avère encore une fois que les performances de prédiction s'améliorent en proportion de la quantité d'informations avant incendie qui est utilisée. Il faut cependant tenir compte du fait qu'on sait dans ce cas que l'incendie est arrivé et à quel moment : le test sur des feux anciens est donc biaisé, ce qui est discuté dans le manuscrit de thèse.

Corriger les données des effets de la hauteur de canopée et des ombres portées

Victor PENOT analyse le stress hydrique à partir de données de télédétection dans l'infrarouge thermique en combinaison avec des données spectrales, complétées par des informations LIDAR sur la hauteur des couverts. Il s'agit d'améliorer l'appréciation de la sévérité des incendies mais aussi, beaucoup plus largement, de cartographier l'évapotranspiration et la vulnérabilité au changement climatique. L'expérimentation est conduite sur deux sites forestiers méditerranéens (Puéchabon et Fontblanche) pour lesquels on dispose de neuf années de mesures de flux (2013-2021) et qui sont caractérisés par des hauteurs de couvert très différentes (5,5 mètres à Puéchabon et 13 m à Fontblanche).

Dans le cas des couverts forestiers hauts, ceux-ci sont responsables d'une résistance aérodynamique qui décorrèle la température de surface des flux d'évapotranspiration réelle

(elle est complètement décorrélée au-delà de 40 mètres de hauteur). La température de surface est ainsi sous-estimée et, pour éviter ce biais, une normalisation de la température de surface par la hauteur de couvert est réalisée. Cette correction améliore fortement la corrélation entre mesures de terrain et estimation par télédétection.

Par ailleurs, l'angle de vue du satellite sur des couverts forestiers hauts ont des effets directionnels d'écran (ombres portées) qui perturbent également l'estimation de la température de surface. Deux types de correction sont apportés par Victor PENOT pour les données Landsat : le premier utilise des données de terrain tandis que le second s'en affranchit. Les deux méthodes donnent des résultats similaires, la première étant logiquement un peu plus performante.

La mise en évidence des effets directionnels à partir de mesures satellitaires à haute résolution (reposant seulement sur la plateforme Landsat avant que le capteur ECOSTRESS ne soit installé en orbite) est difficile et n'a pas été abordée classiquement dans des études précédentes. En particulier, les données Landsat sont acquises au nadir et les effets directionnels ne dépendent de fait que de la position du soleil et non plus classiquement de la direction de visée : ils ont souvent été masqués par les impacts des variations saisonnières du rayonnement incident. De fait, le travail effectué ici est à féliciter.

Une approche novatrice

Les travaux présentés par Victor Penot sont novateurs par plusieurs aspects. Ils combinent des données de divers types de télédétection (multispectral, infrarouge proche, moyen et thermique, LIDAR) avec des données environnementales (météorologie, végétation). Ils contribuent à résoudre, au moins partiellement, des faiblesses d'une transposition en France d'indices établis à l'étranger. Ils viennent également proposer des corrections pour des phénomènes qui n'étaient pas pris en compte jusque-là et résultent de la hauteur du couvert et des ombres portées. Ils contribuent à améliorer l'appréciation du risque d'incendie de forêts et, au-delà, de permettre la cartographie à grande échelle de l'évapotranspiration et du stress hydrique dont l'importance grandit avec le changement climatique.

Globalement, hormis une difficulté de lecture induite par l'abus de sigles et acronymes, la thèse constitue un tout très cohérent présenté de façon claire et logique, reposant sur des protocoles bien explicités. Victor PENOT mentionne quelques limites de l'étude, notamment le caractère restreint du périmètre géographique de l'étude et une période d'étude n'incluant pas des années sèches telles que 2022. Il en résulte des propositions de recherches ultérieures.

En conclusion, pour sa contribution à une meilleure prise en compte des risques d'incendie de forêt, notamment pour en prédire la sévérité potentielle, et pour ses propositions visant à améliorer l'utilisation de la télédétection dans ce but, la thèse de Victor PENOT mérite d'être valorisée sur le Site de l'Académie d'agriculture et dans son Mensuel.