

## ESTIMATION DE LA VITESSE DE PROPAGATION DU FEU DANS LA FÔRET DOMANIALE DE TAKROUNA (NORD OUEST DE LA TUNISIE) PAR LE MODÈLE BEHAVE

Salem SEBEI <sup>1</sup> & Youssef AMMARI <sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Laboratoire d'Ecologie Forestière, Institut national de recherche en génie rurale eaux et forêts, Tunisie, [sebei\\_salem@yahoo.fr](mailto:sebei_salem@yahoo.fr)*

**Résumé :** La forêt de Takrouna est située entre l'étage semi-aride supérieur et subhumide. Elle est dominée par des pinèdes mixtes et pures. Pour estimer la vitesse de propagation du feu nous avons adopté le modèle Behave. Les entrées de ce modèle sont multiples et renferment des données concernant la végétation, le climat et la topographie. Les sorties sont essentiellement la vitesse du feu, la puissance du front du feu et la longueur de la flamme. La maximale du feu simulée par le modèle BEHAVE dans la forêt de Takrouna a atteint 5,2 km/h et la hauteur maximale de flamme s'élève à 7,30 mètres.

**Mots-clés :** modèle Behave, vitesse du feu, pinèdes mixte, puissance du front du feu

**Abstract:** Takrouna Forest is located between the upper and lower semi-arid sub humid. To estimate the fire propagation speed we adopted the Behave model. The entries of this model are multiple, they contain data concerning the vegetation, the climate and the topography. The outputs are essentially the speed of fire, the power of the fire front and the length of the flame. The maximum speed simulated by the BEHAVE model in the Takrouna Forest reached 5.2 km / h and the maximum flame height is 7.30 meters.

**Key words:** Behave model, fire speed, mixed pine forests, fire front power.

### Introduction

La forêt de Takrouna, terrain de notre étude, se situe au Nord-Ouest de la Tunisie (figure 1). Elle appartient à la région du Haut Tell. Au plan climatique, la majeure partie de la série de Takrouna appartient à l'étage bioclimatique humide inférieur et à l'étage subhumide. La région montagneuse d'Ouergha, dont Takrouna fait partie, est la plus arrosée dans la région du haut Tell. Elle reçoit, par endroit, plus de 800 mm/an de précipitation. Nous avons recensé 130 incendies dans cette forêt entre 1940 et 2019, 13% représentent de grands incendies (superficie>100 ha). Les petits incendies (dont la surface inférieure à 1 ha) représentent 45.3% du nombre total des incendies (Sebei, 2017). Cette forêt présente un grand risque d'incendie en comparaison avec d'autres séries forestières dans la région du nord-ouest.

Pour simuler le feu de forêt nous avons adopté le modèle Behave. C'est l'un des modèles semi-empiriques largement utilisé depuis trois décennies dans la simulation du feu dans les pays du bassin méditerranéen. Ce modèle intègre plusieurs paramètres d'entrées tels que le combustible végétal, le degré de pente et la vitesse du vent. Le modèle Behave est fondé sur le modèle de Rothermel inventé en 1972 (Andrews, 1986).

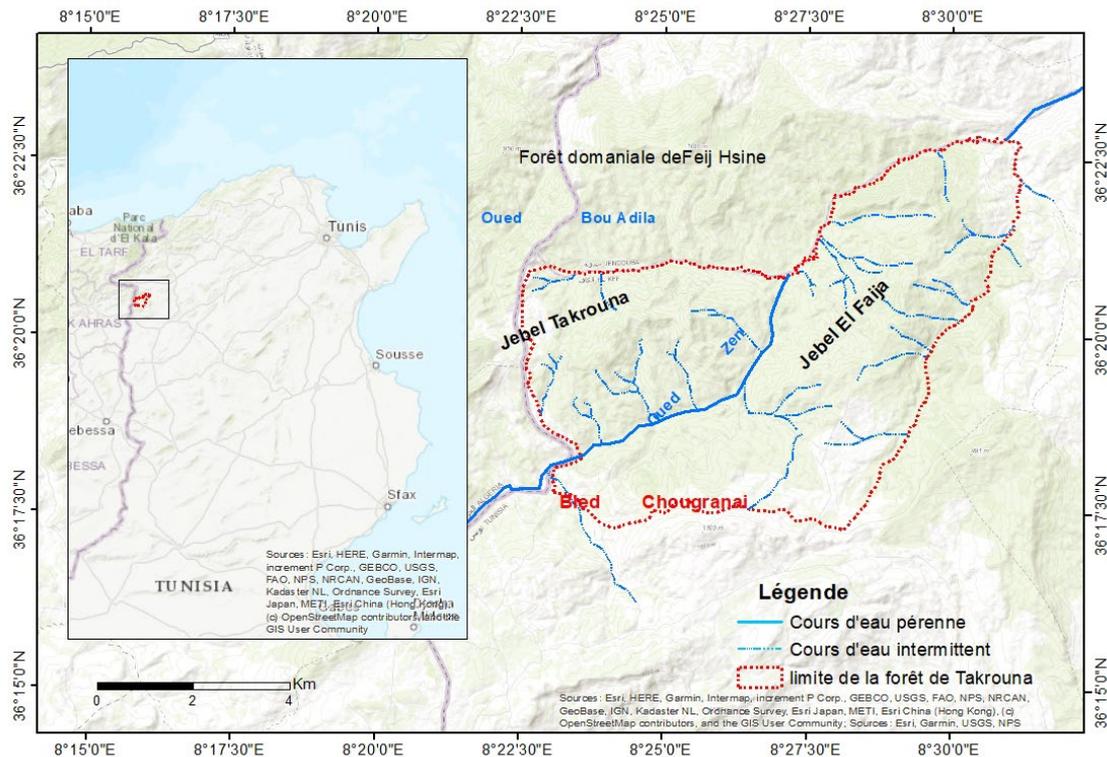


figure1. Situation de la forêt domaniale de Takrouna.

Le modèle Behave de prédiction de comportement de feu de forêt avec ses deux sous- systèmes Fuel et Burn sont des outils interactifs de programme informatique.

Il a été utilisé depuis 1984 par les aménageurs des espaces à risque d'incendie aux Etats-Unis d'Amérique. L'utilisateur du modèle peut adapter les prédictions à ces besoins spécifiques en se basant sur la résolution des données d'entrée et l'interpolation des données de sortie.

## 1. Données et Méthodes

### 1.1. Paramètres caractérisant le combustible végétal

Nous prenons comme exemple de ces paramètres la charge du combustible mort d'une heure (tableau1). Les paramètres pris en considération dans le calcul de la charge de ce type de combustible sont : la masse volumique des aiguilles de pin d'Alep ( $\rho$ ) - puisqu'elle constitue la composante essentielle de la litière - la fraction volumique ( $\beta$ ) et l'épaisseur de la couche de la litière et herbes sèches mesurés sur terrain ( $\sigma$ ). La formule de la charge de litière est la suivante :

$$W(T/ha) = \rho \times \beta \times \sigma$$

La masse volumique des aiguilles de pin d'Alep ( $\rho$ ) = 800 kg/m<sup>3</sup> et la fraction volumique de la litière ( $\beta$ ) = 0,03, ces deux paramètres sont constants (Alexandrian *et al.*, 1982). La charge de la litière ne dépend que de son épaisseur ( $\sigma$ ) mesurée sur la placette d'où :

$$W(T/ha) = 2.4 \times \sigma$$

**Tableau 1.** Les paramètres d'entrée caractérisant le combustible végétal.

Paramètres	Unités
Charge du combustible mort d'1 h	Tonne/ha
Charge du combustible mort d'10 h	Tonne/ha
Charge du combustible mort d'100 h	Tonne/ha
Charge des herbes vivantes	Tonne/ha
Charge du bois vivant	Tonne/ha
Rapport surface /volume du combustible d'1 h	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Rapport surface /volume des herbes vivantes	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Rapport surface /volume du bois vivant	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Epaisseur du lit du combustible	mètre
Pouvoir calorifique du combustible vivant	KJ/kg
Pouvoir calorifique du combustible mort	KJ/kg

### 1.2. Humidité du combustible végétal

Les combustibles végétaux d'1 heure de dimension comprise entre 0 et 6mm sont composés d'aiguilles, de feuilles et brindilles qui sont définis comme des combustibles fins. Les combustibles de 10 heures de dimensions comprises entre 6 et 25 mm constitués de ramilles, rameaux et morceaux d'écorce sont qualifiés de moyens (tableau 2). La teneur en eau de la litière et des végétaux morts dépend uniquement des phénomènes physiques : échanges par capillarité avec le sol et équilibre avec la vapeur d'eau dans l'atmosphère (Trabaud, 1989).

**Tableau 2.** Les paramètres d'entrée caractérisant l'humidité du combustible végétal (en %).

Paramètres
Humidité d'extinction du combustible mort
Humidité du combustible d'1h
Humidité du combustible de 10 h
Humidité du combustible de 100 h
Humidité des herbes vivantes
Humidité du bois vivant

Pour certaines espèces comme le ciste de Montpellier ou le romarin, le feuillage subit un dessèchement partiel ou total pendant les périodes particulièrement sèches. Leur teneur en eau rapportée à la masse sèche peut descendre sous les 30% selon Valette (2007).

### 1.3. Climat et topographie

Dans le modèle Behave la vitesse du vent est corrigée par un coefficient qui varie entre 0,1 et 0,6 selon les situations topographiques et le degré de fermeture du peuplement. Avec un peuplement fermé le coefficient de réduction est fort. L'écoulement du vent au-dessus des formations végétales est fonction de leur rugosité. Dans les groupements stratifiés, l'amointrissement de la vitesse d'écoulement de l'air conduit à un confinement relatif, donnée essentielle du climat interne (Braque, 1988).

La structure de la végétation peut jouer le rôle de brise-vent. Ce mécanisme est complexe, et ses effets diffèrent selon la hauteur, l'épaisseur et la perméabilité de l'abri. La réduction de la vitesse du vent se produit à la fois en avant de l'écran, où se forme un « coussin d'air » en surpression, sur lequel glisse le courant, et à l'aval sur une largeur et une épaisseur variable (coussin d'air en sous-pression). A cette diminution de la vitesse, sont associés des effets microclimatiques et une action sur le climat régional (Braque, 1988). Pesson (1974), indique que les bois augmentent la rugosité du paysage et

diminuent ainsi d'une façon générale la vitesse du vent et que le rideau boisé freine efficacement le vent sur une distance égale à 20 fois sa hauteur. Sous-bois, la vitesse du vent est freinée et c'est au niveau des couronnes que la réduction est la plus forte. Khader (2009) a adopté cette classification avec une description de la propagation du feu que nous avons résumé dans le tableau 3.

**Tableau 3.** Classes de pente et leur impact sur la propagation des feux de forêts.

Pente	Description de la pente	Impact sur la propagation du feu
$P < 15\%$	Pente faible	Sans incidence sur la propagation
$15 < p < 30\%$	Pente moyenne	Accélération modérée du front du feu
$30 < p < 60$	Pente forte	Accélération importante du front du feu
$p > 60$	Pente très forte	Risque de turbulence, saute de feu embrasement

Source : Khader (2009).

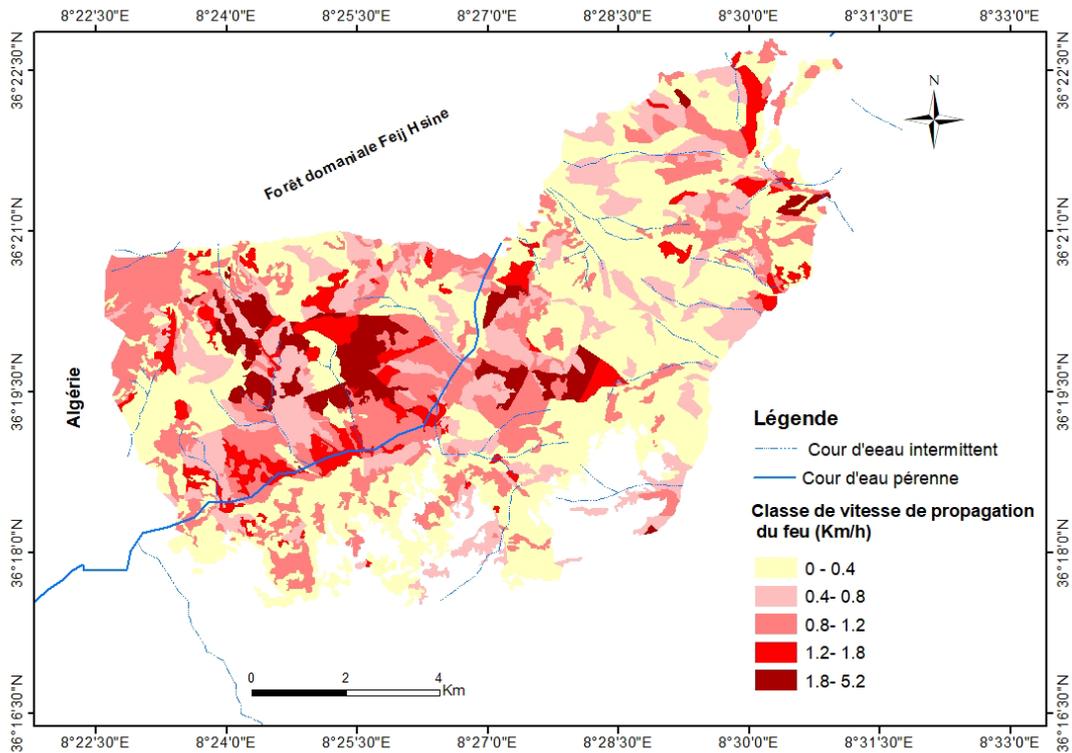
Dans la forêt domaniale de Takrouna, 44, 34% de la surface est dominée par des pentes fortes à très fortes susceptibles d'engendrer une accélération importante du front du feu, il y a aussi le risque de turbulence, saute du feu et embrasement. Khader (2009) utilise le concept de pente positive, « lorsque l'exposition fait face au vent ». Dans cette situation le feu sera amplifié. La pente est qualifiée comme négative « lorsque l'exposition est opposée au vent ».

La simulation réalisée par le modèle Behave concerne seulement la propagation du front du feu. Elle n'envisage pas l'éclosion qui représente un autre créneau de recherche prometteur. La logique des simulations est fondée sur le choix de scénario reposant sur le changement des paramètres d'entrée connaissant une variabilité importante en relations avec le type de temps : il s'agit de la vitesse et la direction du vent en plus de l'état hydrique de la végétation. Dans notre étude nous avons choisi un scénario dans lequel la vitesse du vent est la moyenne des vitesses au cours des incendies ravageant la forêt de Takrouna. La direction du vent est celle du vent le plus fréquent au cours des sinistres. La simulation concerne toutes les unités cartographiques comme si le feu incendiera l'ensemble de la série forestière.

Le modèle Behave fournit trois paramètres de sortie indispensables pour la lutte active, c'est à dire au cours du sinistre, et pour la lutte passive qui concerne les travaux de prévention. Les trois paramètres sont : la vitesse de propagation du feu, la puissance du front du feu et la longueur de la flamme.

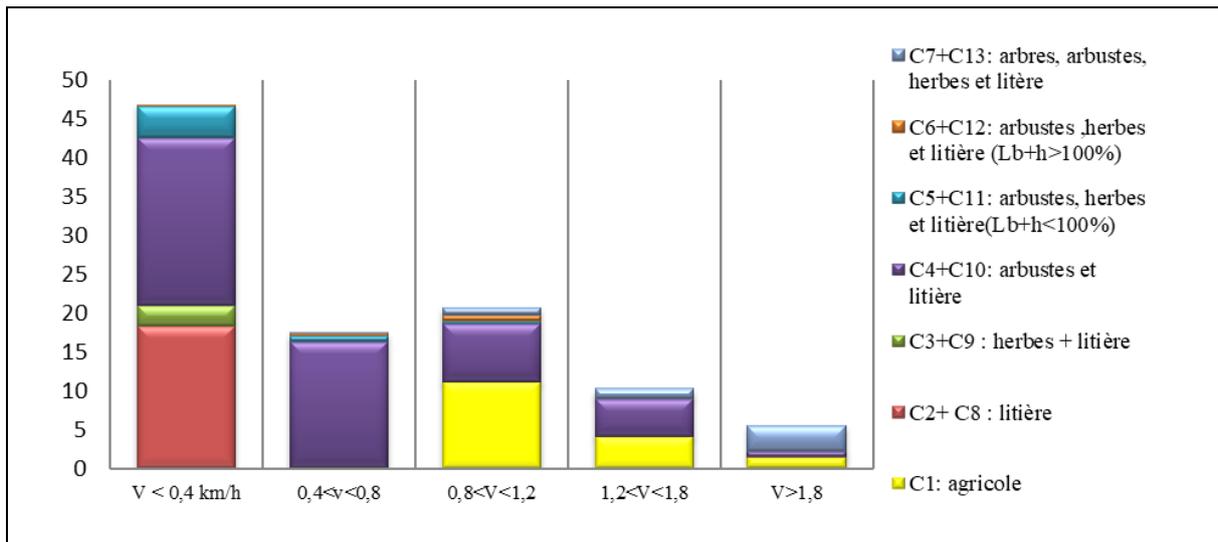
## 2. Résultats

La vitesse du front du feu est de valeur capitale pour les forces de lutte et pour les organismes responsables de l'organisation et la répartition des équipements et des engins d'extinction du feu pendant la saison à risque, de mai à octobre (figure 2). Nous avons adopté l'échelle d'intensité pour le phénomène incendie de forêt développé par Lampin *et al.* (2003). Cette échelle est déterminée soit à partir des paramètres physiques du phénomène soit en prenant compte des endommagements observés sur des enjeux standards. La classe de vitesse du feu caractérisée comme très faible représente 45 % de la surface de la série. La classe de vitesse très élevée couvre la surface la plus faible ; soit 360 ha. Cette classe concerne les unités cartographiques qui constituent des matorrals moyens à élever qui n'ont pas subi des travaux d'éclaircie et d'égagage avec un recouvrement global de la strate ligneuse haute supérieur à 50 % et qui atteint même 85% (figure 3).



**figure 2.** Vitesse de propagation du feu (km/h) au sein des unités cartographiques de la forêt domaniale de Takrouna.

Au sein de ces unités cartographiques issues des incendies de 1993 et 1994, le nombre moyen de pieds de pin dénombrés dans 48 placettes de 4 m<sup>2</sup> est de 52000 pieds / hectare. Le nombre de pieds de pin atteints par endroit est de 95000 pieds / hectare. La vitesse du feu est la résultante de plusieurs facteurs qui influencent directement ou indirectement ce paramètre tels que les transferts thermiques de la combustion, la vitesse du vent, la biomasse aérienne, la pente, la teneur en eau et la porosité de la couche de combustible.



**figure 3.** Pourcentage des surfaces des unités cartographiques de la série forestière de Takrouna en fonction de la vitesse de propagation du feu (Km/h) et les types de complexes de combustibles.

## Discussion et conclusions

La vitesse de propagation du front du feu qui est le paramètre le plus important pour les aménageurs et les combattants du feu, varie dans les unités cartographiques de la série forestière de Takrouna entre 0 (vitesse nulle) et 5,2 km/h. En Tunisie, l'étude réalisée par Abdelmoula (2005), sur la série forestière de Djebel Mansour dans le Nord Est de la Dorsale a abouti à des résultats que l'auteur a considérés comme fortement surestimés ; les vitesses de propagation du feu sont comprises entre 4 et 13 km/h. Sur les vitesses du front de feu observées dans des feux expérimentaux dans les forêts méditerranéennes, nous avons pris comme exemple l'incendie de la forêt de Nohèdes (Pyrénées – Orientales) en date du 15 septembre 1999 qui sont de l'ordre de 1,1 à 1,2 km/h dans des peuplements fermés. Sur des peuplements ouverts sans obstacle elle est de 1,3 à 1,5 km/h.

Lors de l'incendie de Lambec, en août 1995, la vitesse du front de feu est variable selon la nature de l'occupation du sol ou la nature du peuplement. Elle varie entre 1,08 et 2,5 km/h sur le versant exposé au vent et entre 0,7 km/h et 1,08 dans le versant sous le vent.

**Remerciements :** Nous remercions les responsables au niveau du Direction générale des forêts (DGF) et les techniciens du laboratoire d'Ecologie Forestière à l'INRREF, Tunisie, qui ont aimablement accepté de participer aux travaux de terrain.

## Bibliographie

- Abdelmoula, K., 2005. *Evaluations de l'efficacité de réseaux de coupures de combustible sur la réduction du risque d'incendie à l'échelle du massif forestier*. Thèse, Université de Provence, Aix-Marseille, 199p.
- Alexandrian, D., 1982. Estimation de l'inflammabilité et de la combustibilité de la végétation ; *bulletin d'information CEMAGREF* N° 228.
- Andrews, P. L. (1986). *Behave: fire behaviour prediction and fuel modelling system; Burn subsystem, part I*. USDA Forest Service General Technical Report. (INT-194), 130p.
- Braque, R., 1988. *Biogéographie des continents*. Paris. Masson. 470p.
- Khader, M., Benabdeli, K., Mederbal, K., Fekir, Y., Gueddim, R. et Mekkous, B., 2009. *Etude du risque incendie à l'aide de la géomatique, cas de la forêt de Nesmoth (Algérie)*. *Mediterranea. Serie de Estudios Biológicos. Epoca II, n. 20 (2009)*. ISSN 1130-6203.
- Lampin, C., Jappiot M., Alibert N. et Marley R., 2003. *Une échelle d'intensité pour le phénomène incendie de forêts*. SIRNAT-JPRN. Orléans, 9p.
- Pesson, P. (ouvrage collectif), 1974. *Ecologie forestière, la forêt : son climat, son sol, ses arbres, sa faune*. Paris. Gautier. Villars éditeur.
- Sebei S., 2017. *Etude des facteurs de risque d'incendie dans la forêt Domaniale de Takrouna (Sakiet Sidi Youssef)*. Thèse, Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis, 352p.
- Trabaud L., 1989. *Les feux de forêts : mécanismes, comportement et environnement*. France-sélection, Aubervilliers.
- Valette, JC., 2007. *Présentation du système Behave et du modèle de Rothermel*. I.N.R.A. Document PIF9324 I.N.R.A. Département de Recherches forestières, 27p.