

Modélisation d'un feu en Corse



Chloé Chaufourier et Léon Koenig

2022-2023

Master 1 Biodiversité, Ecologie, Evolution

UE MODE

Université Paris-Saclay

Table des matières

Introduction.....	3
I/ Présentation détaillée des hypothèses et écriture mathématique du modèle	4
II/ Application et évaluation du modèle	5
A) Données utilisées.....	5
Les paysages et leurs variables associées	5
L'humidité et le vent	5
Le temps	6
L'altitude.....	6
Vitesse d'un feu	6
B) Présentation des résultats et illustrations sous forme de tableaux et de graphiques	7
III/ Discussion des résultats	9
Conclusions et perspectives	10
Bibliographie	12
Annexes	13
Annexe 1 : Lien vers les vidéos et résultats de propagation du feu selon différentes conditions extrêmes.....	13
Annexe 2 : Image de la carte de l'altitude	13
Annexe 3 : Carte des paysages et couverts végétaux	13
Annexe 4 : Carte satellite de la zone étudiée.....	14
Annexe 5 : Lien du code utilisé sous Scilab pour une humidité de 50%, un vent provenant de l'Ouest avec une vitesse de 10km/h (code commenté en détail)	14
Annexe 6 : Lien de la version du code avec les murs, finalement non utilisée	14

Introduction

Dans le cadre de l'Unité d'enseignement « Modélisation », nous avons cherché à modéliser le comportement d'un feu se propageant sur différents milieux : forêts, cultures, prairies... Nous prendrons en compte les particularités des différents types de couverts végétaux ainsi que l'altitude, l'humidité, la vitesse et direction du vent.

Pour modéliser cela, nous utiliserons un automate cellulaire. Ce type de modèle se base sur une grille de cellules, dont l'état d'une cellule au temps $t+1$ est déterminé par l'état des cellules l'entourant dites « voisines » au temps t . Il s'agit ainsi d'un modèle déterministe.

Tout d'abord, il est important de discuter de l'écologie des feux. Ceux-ci peuvent avoir des origines naturelles (foudre, composés inflammables produits par les plantes...) mais aussi bien anthropique (mégot oublié, barbecue ou même un incendie criminel). Le feu est un phénomène qui va dégrader les éléments biologiques par combustion et se propager en les utilisant. Comprendre et modéliser ce processus peut servir à la prévention mais aussi bien aux professionnels chargés de les éteindre. Pour cela, nous avons étudié les dynamiques du feu selon les facteurs cités précédemment en créant un modèle mécaniste, c'est-à-dire basé sur le fonctionnement d'un système et non pas un modèle empirique qui aurait nécessité des données issues d'observations.

Les forêts de feuillues brûlent ainsi moins bien que les forêts de conifères, dû à une teneur plus élevée en minéraux qui retarde les départs de feu, même si le risque augmente avec la densité végétale (Harfouche, et al., 2015). La vitesse de progression du feu la plus élevée, s'observe dans les formations végétales basses continues où la biomasse est faible à très faible. Cela, est dû à l'exposition au vent, en effet, la forte biomasse va créer une protection face à celui-ci et donc ralentir la propagation malgré l'intensité. (Hessas, 2007). Néanmoins, les vignes sont très résistantes au feu (Villette, 2021). D'autre part, un milieu très humide sera très peu propice à un départ de feu et il aura une plus forte tendance à se propager en altitude (Dupuy, 2010).

Dans ce rapport, nous présenterons tout d'abord les hypothèses et la formulation verbale du modèle puis l'écriture mathématique qui en découle. Puis nous expliquerons l'application avec les données et les résultats obtenus. Enfin, nous discuterons des résultats et des points d'améliorations possibles du modèle.

I/ Présentation détaillée des hypothèses et écriture mathématique du modèle

L'utilisation d'un automate cellulaire nécessite une compréhension des dynamiques du feu. Cela revient à déterminer si une case va brûler à $t+1$ ou non. Pour cela, on observe les voisines d'une case en feu et on calcule la probabilité que ces cases brûlent puis on fait un tirage aléatoire. Cette probabilité dépend du facteur de combustion de la case, c'est-à-dire « sa facilité à prendre feu », l'intensité des cases en feu qui l'entoure, l'humidité environnante, la direction du vent, la vitesse du vent qui influe aussi cette grille et enfin la différence d'altitude entre la case en feu et la voisine considérée (Mharzi Alaou, et al., 2017).

Nous disposons de deux matrices de la région étudiée, l'une correspond à l'occupation du sol, c'est-à-dire les types de couverts végétaux, tandis que la deuxième représente l'altitude (cf. Annexe 2 : Image de la carte de l'altitude). Nous avons associé une couleur et une probabilité de combustion à chaque milieu de manière arbitraire en se basant sur les caractéristiques écologiques de ces derniers. (cf. Annexe 3 : Carte des paysages et couverts végétaux). Par la suite, nous avons choisi le point de départ du feu (qui peut aussi être aléatoire, mais pour des soucis de répliquabilité, nous avons gardé un point fixe) et déterminé une durée de modélisation.

$$P(i,j) = f_c \times f_h \times f_v \times f_i \times f_a$$

Avec :

$P(i,j)$: La probabilité que la case aux coordonnées (i,j) brûle à $t+1$

f_c : facteur de combustion de la case (i,j) , déterminé par sa couverture végétale

f_h : facteur d'humidité de l'ensemble de la carte

f_v : facteur du vent regroupant la vitesse du vent et sa direction donnée par la matrice des vents

f_i : facteur d'intensité lié à la somme des intensités des cases avoisinante de (i,j) en feu dépendant de leur couverture végétale

f_a : facteur d'altitude dépendant de la différence d'altitude entre les cases en feu avoisinante et la case (i,j)

Si f_x appartient à $[0,1]$ alors $P(i,j)$ diminue, tandis que si $f_x > 1$ alors $P(i,j)$ augmente, c'est-à-dire que le case aura plus de risque de brûler.

On part ainsi du principe que chaque case en feu va influencer les cases qui l'entoure selon sa propre intensité (déterminée par son paysage) et son altitude par rapport aux autres cases. Le vent influence toutes les cases selon sa direction et sa vitesse. Et chaque case est influencée par les caractéristiques de son milieu, c'est-à-dire son humidité et son type de couvert végétal.

II/ Application et évaluation du modèle

A) Données utilisées

Les paysages et leurs variables associées

Dans un premier temps, nous avons déterminé pour chaque couvert végétal, l'intensité du feu qu'il entraînera et la probabilité que ce type de milieu prenne feu. En effet, comme mentionné dans l'introduction, ces valeurs sont différentes en fonction des paysages. Il était donc important d'explorer la littérature et de se déterminer arbitrairement des valeurs représentatives de nos lectures.

Dans la carte mise à notre disposition, nous avons des forêts de feuillues, des forêts de conifères, des pelouses, des landes ligneuses, de l'urbain dense et diffus, des zones industrielles et commerciales, des surfaces minérales, des plages et dunes, de l'eau, des prairies et des vignes.

Nous partons du principe que les éléments minéraux, les zones urbaines et commerciales, l'eau et les plages ne prennent pas feu.

Nous avons donné un pourcentage d'intensité et de probabilité de combustion pour chaque paysage que nous avons intégré dans le code :

	Probabilité	Intensité
Forêt de feuillues	50	75
Forêt de conifères	60	90
Pelouse	50	20
Landes ligneuses	75	60
Prairies	65	35
Vignes	10	5

*Tableau 1. Probabilité et intensité de combustion de différents couverts végétales (Cerutti, 1990)
(Hessas, 2007)*

Finalement il nous a fallu diviser l'ensemble de ces intensités par trois car la probabilité de feu aurait été trop forte de par l'action de l'ensemble des autres facteurs dans des conditions extrêmes. Cela ne modifie pas probabilité relative entre les différents milieu ne change pas.

L'humidité et le vent


D'autre part, l'humidité du milieu, la vitesse et la direction du vent sont des variables qui peuvent être modifiées selon la situation climatique que l'on souhaite modéliser. L'humidité est exprimée en pourcentage, tandis que le vent a une direction provenant du Nord, du Sud, de l'Est ou de l'Ouest et une vitesse en km/h. Nous utilisons une vitesse moyenne, car les rafales ne sont pas importantes pour des feux sur des temps longs (Drouet, 1973).

Le vent possède aussi trois facteurs en fonction de sa direction, multipliés par sa vitesse. Ceux-ci permettent d'inclure la direction du vent dans les calculs. Nous avons choisi 0,01 dans la direction inverse du vent, 1,2 dans sa direction et 0,8 sur les côtés. Pour les déterminer, nous

avons réalisé des tests qui avaient pour but de bien observer la direction du vent sur la modélisation sans changer trop la dynamique de propagation, car en effet, la littérature ne donne pas de tels valeurs. Cependant, celle-ci nous indique bien que le feu suit la direction du vent, celui-ci poussant les flammes par l'arrière leur permettant d'atteindre de nouveaux éléments du paysage (Drouet, 1988). Il existe des feux capables d'aller contre le vent, ils sont malgré tout rare et possibles dans des conditions de faible brise et d'une faible humidité (Silva, 1988).

Exemple avec un vent provenant de l'Est, matrice des facteurs de la direction du vent :

1,2	0,8	0,01
1,2	0	0,01
1,2	0,8	0,01



Il est important de rappeler que la direction du vent représente son origine et est donc l'opposé de la direction de déplacement du vent, par exemple s'il est direction Est, le vent va donc vers l'Ouest.

Le temps

Il était indispensable de donner une durée maximum au modèle pour arrêter la modélisation après un certain nombre de temps/générations. Nous avons choisi de réaliser 150 générations, pour le calcul de la vitesse nous avons dû convertir ce temps en minutes. Nous pouvons faire varier cette valeur mais au-delà de 350 générations le feu atteint généralement les limites de la carte et le temps de calcul entre chaque génération augmente avec le temps. Une génération de modélisation correspond à 100 secondes dans la réalité (nombre déterminé de manière empirique de manière à obtenir une vitesse cohérente).

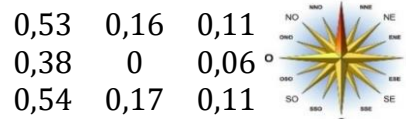
L'altitude

La différence d'altitude entre deux cases va permettre de déterminer le facteur d'altitude dans notre modèle. On utilise cette différence qui est soit positive, soit négative afin d'augmenter ou diminuer la probabilité de combustion. On multiplie par 0,01 la différence (car sinon le nombre est trop grand) et on l'ajoute à 1 pour ainsi obtenir le facteur de multiplication du vent. Nous avons choisi cette formule car la littérature ne donne aucune information à ce sujet et que ce facteur est discriminatoire sans être aberrant et permet d'obtenir une modélisation cohérente.

Vitesse d'un feu

La littérature donne des vitesses de feu très variables, allant en moyenne à moins de 0,5 kilomètres par heures à près de 30km/h pour des feux dit éruptifs qui sont des cas extrêmes où leur comportement est imprévisible (ce qui n'est pas notre cas). Cela est influencé par de nombreux facteurs, chaque feu étant unique par sa composition végétale mais aussi en fonction des conditions météorologiques qu'il subit (Trabaud, 1979) (Chevrou, 2021) (Moretti,

2016/2021). Nous resterons sur des vitesses allant jusqu'à 1 km/h environ, ce qui correspond à un feu rapide (deux fois plus rapide qu'en moyenne). On calcule la vitesse moyenne du feu en direction de chaque point cardinal à la fin de la modélisation et on en fait une matrice sous la forme d'une rose des vents, par exemple :



Cette matrice des vitesses en km/h, a pour vitesse dans la direction Sud-Ouest : 0,54km/h. On calcule la vitesse moyenne du feu en faisant la moyenne des vitesses dans toutes les directions, ici elle est d'environ à 0,26km/h.

B) Présentation des résultats et illustrations sous forme de tableaux et de graphiques

Il y a plusieurs résultats possibles pour notre modèle en fonction du choix de paramètres. En effet, nous pouvons faire varier la direction du vent et sa vitesse, mais aussi l'humidité. Les résultats obtenus pour une modélisation dans différentes conditions sont disponibles en Annexe 1 (cf. Annexe 1 : Lien vers les vidéos et résultats de propagation du feu selon différentes conditions).

Les sorties du modèle sont sous la forme d'une carte avec le feu en rouge, son point de départ en noir et des informations dans la console sur le temps de modélisation, les paramètres choisis, la vitesse et le temps de calcul (cf. Annexe 5 : Lien du code utilisé sous Scilab pour une humidité de 50%, un vent provenant de l'Ouest avec une vitesse de 10km/h).

```

Le feu a commencé à la ligne 143, colonne 254.
Origine représentée par une case noire.
Nombre de générations de la modélisation : 150
Durée réelle de la simulation : 15000 secondes soit 250 minutes.
Direction du vent :Est
Humidité : 10 pourcents
Vitesse du vent : 90 km/h
Matrice des vitesses du feu pour chaque direction (point cardinal) en centimètres par seconde :

29.333333  9.6  5.866667
20.      0.  2.533333
30.4      10.8  4.533333
Matrice des vitesses du feu pour chaque direction (point cardinal) en kilomètres par heure :

1.056  0.3456  0.2112
0.72   0.     0.0912
1.0944 0.3888  0.1632
Vitesse moyenne de propagation du feu : 14.133333 mètres par secondes soit 0.508800 kilomètres par heure.
Temps de calcul total pour la modélisation : 251 secondes soit environ 4 minutes.

```

Figure 1. Résultats obtenus dans la console à la fin de la modélisation de 150 générations pour un vent d'Est, une humidité de 10% et un vent allant à 90km/h (conditions extrêmes)

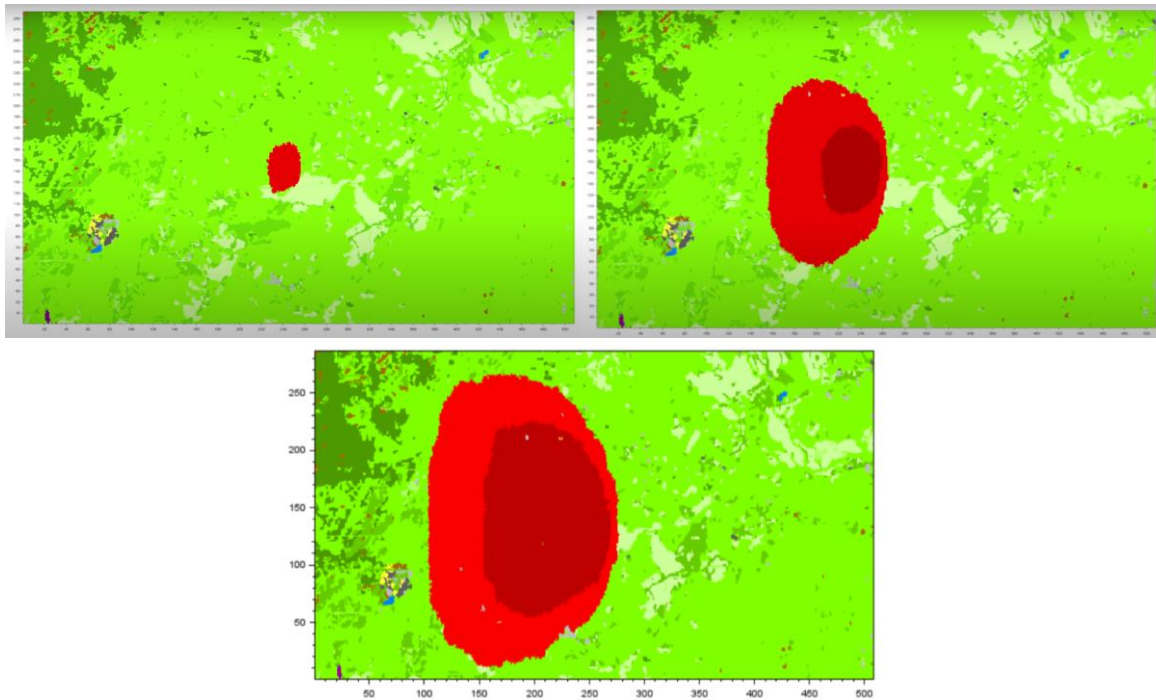


Figure 2. Cartes du feu obtenues à 3 étapes de la modélisation (début, milieu et fin)

```

Le feu a commencé à la ligne 143, colonne 254.
Origine représentée par une case noire.
Nombre

de générations de la modélisation : 150
Durée réelle de la simulation : 15000 secondes soit 250 minutes.
Direction du vent :Est
Humidité : 50 pourcents
Vitesse du vent : 10 km/h
Matrice des vitesses du feu pour chaque direction (point cardinal) en centimètres par seconde :

14.933333  4.533333  3.2
10.8       0.       1.6
15.2       4.8       3.2
Matrice des vitesses du feu pour chaque direction (point cardinal) en kilomètres par heure :

0.5376  0.1632  0.1152
0.3888  0.       0.0576
0.5472  0.1728  0.1152
Vitesse moyenne de propagation du feu : 7.283333 mètres par secondes soit 0.262200 kilomètres par heure.
Temps de calcul total pour la modélisation : 93 secondes soit environ 1 minutes.

```

Figure 3. Résultats obtenus dans la console à la fin de la modélisation de 150 générations pour un vent d'Est, une humidité de 50% et un vent de 10km/h (conditions moyenne)

Nous avons optimisé les calculs en mettant en place un vieillissement du feu, c'est-à-dire que le calcul de probabilité et de certains facteurs ne sont pas effectués pour les cases ayant déjà été en feu pendant au moins 50 générations, en effet celle-ci ne peuvent plus transmettre le feu à d'autres cases car ces dernières ont déjà brûlé depuis longtemps. Cette astuce nous permet de réduire fortement le temps de calcul de chaque génération.

Nous avons stocké la matrice dans une liste à chaque génération afin de toutes les afficher à la fin de la modélisation. Le but étant de ne pas avoir de délai lié au calcul entre chaque

génération qui augmente au fur et à mesure de la modélisation et permet ainsi d'avoir un temps constant entre chaque affichage de matrice.

Afin de déterminer la vitesse moyenne de propagation du feu dans toutes les directions, il nous faut déterminer, à la fin de la modélisation, la distance entre l'origine du feu et les contours du feu pour chaque point cardinal. Une fois que l'on a trouvé les coordonnées de ces points, on peut facilement trouver les distances (exprimées en cases) en calculant la norme des vecteurs (origine ; point cardinal). On multiplie ensuite la valeur obtenue par 20 pour le Sud, Nord, Est et Ouest car cela correspond à la longueur en mètres du côté d'une case et par $\sqrt{20^2 + 20^2}$ pour le Nord-Est, Sud-Est, Nord-Ouest et Sud-Ouest car cela représente la diagonale d'une case. On divise ensuite par la durée de la modélisation pour enfin obtenir la vitesse moyenne.

III/ Discussion des résultats

Les modèles étant des éléments d'aide à la décision et de visualisation sur de longs temps, ils ne prennent pas en compte les variations subtiles du milieu. En effet, nous aurions pu mettre en place un changement de direction du vent au cours de la modélisation, mais ce changement entraînerait un retour du feu sur ses pas et compliquerait l'algorithme. Il serait également possible de faire évoluer la vitesse du vent au cours du temps, la ralentir ou bien l'augmenter, même si comme expliqué précédemment les rafales n'impactent pas tant la progression du feu sur de longs temps.

D'autre part, il aurait été intéressant de rajouter des pompiers, ils auraient pu ralentir le feu, voir l'éteindre. Nous aurions pu alors déterminer les meilleures stratégies à adopter face au feu dans certaines conditions. Néanmoins, cet ajout aurait été très approximatif, en effet la stratégie des pompiers étant dépendante d'un trop grand nombre de critères tel que leurs équipements et leur effectif.

Lors du développement du modèle nous avons introduit la génération aléatoire de lignes non inflammables sur la carte afin de simuler des travaux anti-feux comme des tranchées. Malheureusement pour que ces murs ralentissent réellement le feu, il fallait que ces derniers soient de 3 cases d'épaisseur soit près de 60 mètres, ce qui n'est pas réaliste et donc pas exploitable dans la modélisation, d'où le choix de retirer cette fonctionnalité (cf. Annexe 6 : Lien de la version du code avec les murs, finalement non utilisée).

De plus, les coefficients et facteurs que nous avons choisis sont approximatifs et très arbitraires. La littérature étant non-exhaustive et très variée, nous avons tenté d'uniformiser nos lectures, pour trouver une progression au plus proche de ce que nous pourrions observer sur le terrain.

Nous avons calculé l'élasticité du modèle pour les différentes variables avec une variation de 1%. Nous avons utilisé le rapport des taux de variation entre les sorties du modèle avec une variation de 1% sur le paramètre :

Paramètre entrée	Sortie	Elasticité
Humidité	Fact_humidité	1
Vitesse du vent	Eff_vit_vent	1
Vent_pos	Eff_vit_vent	0,89
Vent_neg	Eff_vit_vent	1
Vent_neut	Eff_vit_vent	1
Différence d'altitude	Fact_alt	1

Tableau 2. Élasticité à une variation de 1% des paramètres d'humidité, du vent et de la différence d'altitude

On observe qu'une élasticité de 1 signifie qu'une variation de 1% sur le paramètre d'entrée entraîne une variation de 1% dans la variable sortie. Dans le cas d'une variation de vent_pos, on aura une variation inférieure à 1%. Notre modèle possède donc une bonne élasticité de manière générale, la variation à l'entrée impacte bien la sortie de manière proportionnelle.

Notre choix était donc de rester sur une simplification des nombreux critères influençant la progression d'un feu. Les tests réalisés sur notre modèle avec la variation du vent et de l'humidité sont en accord avec les données de la littérature, et la progression du feu suit donc la direction du vent et avance plus lentement avec l'augmentation de l'humidité. Le feu est ralenti sur les terrains en pente négative et s'adapte aux milieux qu'il rencontre.

Chaque étape du code a été expliquée sous la forme de commentaires pour qu'il soit compréhensible facilement par une personne extérieure au projet. La plateforme de répertoire GitHub a été utilisée afin de sauvegarder régulièrement le code en ligne et d'avoir des points de sauvegarde permettant de retourner en arrière dans le cas d'un éventuel problème.

Conclusions et perspectives

En définitif, nous avons réussi à modéliser la propagation d'un feu sur plusieurs couverts végétaux, en fonction de l'humidité, du vent et des caractéristiques de combustion des milieux. Nous aurions pu aller plus loin en ajoutant des variations de la vitesse et de la direction du vent au cours de la modélisation mais cela aurait nécessité plus de temps, complexifié le modèle et surtout risqué d'avoir des résultats incohérents.

De nombreuses autres variables auraient pu être ajoutées, comme la composition exacte des forêts, en effet, certains arbres sont plus sensibles que d'autres et certains sont de très bons combustibles tel que *Penelopina Nigra* ou *P. halepensis* (Gonzalez, et al., 2005). De même que la structure de l'arbre et ses caractéristiques telles que sa taille et son diamètre qui sont négativement corrélés avec sa probabilité de combustion. Nonobstant, cela demanderait une

excellente connaissance floristique du milieu et un temps nécessaire à la création et la collecte de données (très compliqué pour une zone d'une taille semblable à la nôtre). D'autres éléments de littérature nous citent aussi l'importance de la saison et l'heure de la journée (Silva, 1988).

Enfin, cela a été compliqué de créer des facteurs, n'étant basé que sur notre compréhension des éléments après lecture des dynamiques d'un feu. Or, notre modélisation est cohérente avec la littérature, elle pourrait servir de preuve de concept en vue de la création d'un support plus complexe. Avec plus de variables (saison, heure de la journée, couvert végétal plus exact...) et des comparaisons aux données réelles relevées par des professionnels (non trouvable en ligne), le modèle alors élaboré pourrait permettre aux acteurs du milieu de mettre en place des mesures de protection des populations et de la biodiversité en cas de départ de feu dans cette région ou au test de différentes structures préventives.

Bibliographie

Cerutti, François. 1990. La Corse, île de feu. *Revue forestière française*. 1990.

Chevrou, Robert B. 2021. *Les modèles feu de forêt et leur utilisation pour la prévention*. 2021.

Drouet, J. Ch. 1973. Les feux de forêts, en région méditerranéenne. Théorie de propagation et moyens de lutte efficaces. *Méditerranée, deuxième série, tome 12, 1-1973*. 1973, 12, pp. 29-53.

Drouet, J.C. 1988. Considérations sur le modèle de feu par vent arrière. *forêt méditerranéenne*. 1988, Vol. X, n°1.

Dupuy, J.L. 2010. Comprendre le comportement du feu à l'échelle du paysage : une approche physique tri-dimensionnelle. *Forêt méditerranéenne*. 2010.

Gonzalez, Ramon, et al. 2005. A fire probability model for forest stands in Catalonia. *EDP Sciences*. 2005, Vol. 63.

Harfouche, Romana et Poupet, Pierre. 2015. *Du Mont Liban aux Sierras d'Espagne: Sols, eau et sociétés en montagne: Autour du projet franco-libanais CEDRE "Nahr Ibrahim"*. s.l. : Archaeopress, 2015.

Hessas, Nassima. 2007. *Evaluation cartographique et évolution diachronique par télédétection du risque incendie de forêt. Simulation de la propagation du feu dans le bassin versant du Paillon, Nice, Alpes-Maritimes*. Grenoble : s.n., 2007.

Mharzi Alaou, Hicham, Assal, Fouad et Rouchdi, Mohamed. 2017. Cartographie de l'intensité du feu et de la sensibilité aux feux de cimes en forêts méditerranéennes. Cas de la province de Chefchaouen au nord du Maroc. *Revue d'Ecologie (Terre et Vie°)*. 2017, Vol. 72, 4.

Moretti, Basiliu. 2016/2021. *Modélisation du comportement des feux de forêt pour des outils d'aide à la décision*. Université de Corse : s.n., 2016/2021.

Silva, J. Moreira da. 1988. La stratégie de l'utilisation du feu dans la lutte contre les incendies de forêts. *forêt méditerranéenne, t. X, n° 1, juillet 1988*. 1988, Vol. X, n° 1.

Trabaud, L. 1979. *Etude du comportement du feu dans la Garrigue de Chêne kermès à partir des températures et des vitesses de propagation*. Montpellier : s.n., 1979.

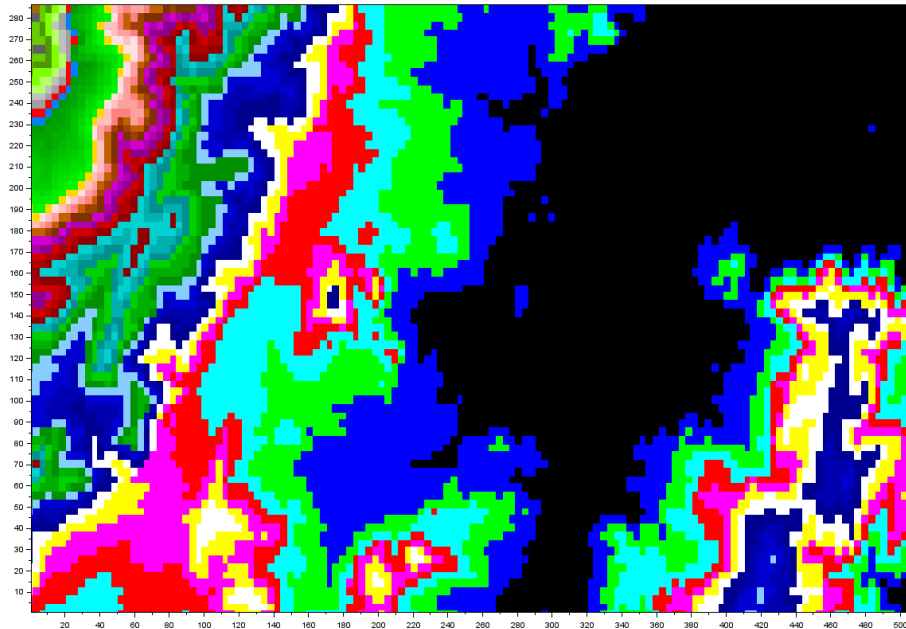
Villette, Guillaume de Chevron. 2021. La vigne est-elle un coupe feu ? s.l. : Transition : Le magazine de l'agroécologie, 2021.

Annexes

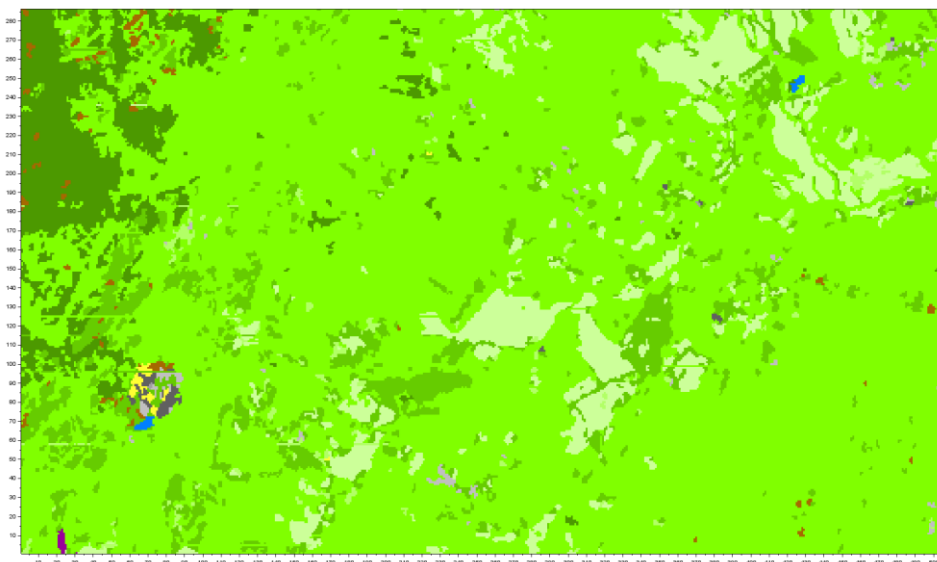
Annexe 1 : Lien vers les vidéos et résultats de propagation du feu selon différentes conditions extrêmes

[Lien Google drive des vidéos](#)

Annexe 2 : Image de la carte de l'altitude



Annexe 3 : Carte des paysages et couverts végétaux



Annexe 4 : Carte satellite de la zone étudiée



Annexe 5 : Lien du code utilisé sous Scilab pour une humidité de 50%, un vent provenant de l'Ouest avec une vitesse de 10km/h (code commenté en détail)

[Lien github du code](#)

Annexe 6 : Lien de la version du code avec les murs, finalement non utilisée

[Lien github ancienne version du code avec murs](#)