Castel Vincent
Gensul Milène
Langlet Marie
Legenvre François-Xavier

La lutte contre l'incendie

Modélisation d'un incendie

Aix*Marseille université

Licence 3 Mathématiques Générales
Maths en Jeans 2012-2013

Table des matières

Table des matières 1
Introduction 2
Prise en main du sujet 3
Etude d'un feu de forêt 4
1- Qu'est-ce qu'un feu de forêt 4
2- Etude de la propagation d'un feu de forêt 5
Choix des contraintes 8
1- Etude des contraintes négligées 8
a- Les contraintes météorologiques 8
b- La végétation 9
c- Les facteurs humains 9
2- Etude des contraintes prises en compte 11
a- Etude de l'importance de la densité de végétation 11
b- Etude de l'importance de la pente 14
Programmation 16
1- Initialisation du modèle 16
2- Programmation d'une propagation linéaire 17
3- Programmation non linéaire : ajout des altitudes 19
4- Programmation non-linéaire : ajout de la densité forestière des Bouches-du-Rhône 24
5- Ajouts supplémentaires souhaités 31
Effectifs 32
1- La flotte des avions bombardiers d'eau en France 32
2- Effectifs routiers 32
3- Chiffres clefs du SDIS (Service Départemental d'Incendie et de Secours) des Bouches-du- Rhône 33
Conclusion 34
Bibliographie 35

Introduction

Depuis tout temps, l'homme a été confronté aux désastres occasionnés par le feu. Il a réussi, dans des moindres mesures, à le contrôler mais la nature lui rappelle sans cesse qu'elle seule peut le faire. Le problème étant que cet ennemi naturel détruit tout sur son passage. Ainsi, dans un espoir de survie et de protection, une force humaine fut créée pour lui résister : les pompiers virent le jour.

De nos jours, les moyens de lutte contre les incendies sont devenus de plus en plus performants. Ces guerriers savent maintenant comment prévoir la création des feux et sa propagation ainsi que des moyens d'extinction selon le type de sol ou de combustible pris dans ceux-ci.

Dans cette optique, nous avons choisi de nous intéresser à ce dur combat. Notre objectif est d'optimiser les moyens de lutte dans une région donnée. Pour se faire, nous nous sommes concentrés sur la compréhension de ce phénomène afin d'en créer une simulation parfaite. Avec ceci, une simple étude expérimentale permettrait le plus efficace positionnement des effectifs pour combattre cette catastrophe incendiaire.

Prise en main du sujet

En arrivant en cours de Maths en Jean, nous avons été intrigués par le sujet de lutte contre l'incendie car notre région est touchée par ce phénomène et ce sujet avait la caractéristique de concerner plusieurs domaines scientifiques. En effet, l'évolution d'un feu s'étudie par la thermodynamique et nous avons décidé d'orienter nos recherches dans le but de créer un modèle mathématique de cette propagation.

Du fait, de sa diversité scientifique, le début des recherches fut laborieux. La quantité d'informations sur le sujet fut très conséquente et vraiment très étendue. Certaines portaient sur les effectifs, d'autres sur l'étude théorique d'un feu puis les dernières sur la législation en vigueur dans les sites touchés par ce phénomène. Après d'intenses lectures et tris de documents, nous avons sélectionné les informations qui nous semblaient les plus explicites.

Nous avons fait l'inventaire de toutes les contraintes en jeu (reliefs, diversification du terrain, effectifs, coût des terrains à protéger, vent, …) et des différentes manières de répondre à tous les aspects de notre problème comme la création d'un feu, sa propagation ainsi que les choix d'optimisation des effectifs. Dans ce dernier but, nous avons recherché les effectifs d'intervention de lutte contre le feu de France et plus particulièrement ceux des Bouches-du-Rhône.

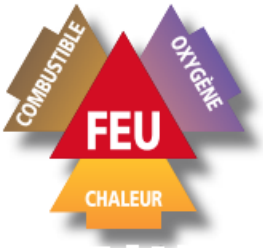
C'est à partir de ce moment que nous avons reçu le document officiel du concours mathématiques en adéquation avec notre sujet. La lecture de ce document nous a permis de mieux cadrer la direction à prendre pour la suite sans pour autant se figer sur les moyens de lutte contre l'incendie en Sibérie. Il nous est donc apparu nécessaire de choisir notre propre lieu d'étude, les Bouches-du-Rhône dont nous connaissions déjà des chiffres clés, et les contraintes que nous utiliserions comme les différents types de zones à considérer (zones urbanisées, forestière, …), la densité de combustibles selon les lieux, le coût économique des divers endroits, l'historique de départ de feux…

Nous avons alors fixé nos objectifs finaux ainsi que les axes que nous allons suivre. Dès cet instant, nous avons laissé de côté la partie recherche de documents pour nous concentrer sur la réalisation de notre modèle.

Etude d'un feu de forêt

1- Qu'est-ce qu'un feu de forêt

On définit un incendie de forêt lorsque le feu touche continûment une surface minimale d'un hectare et qu'une partie de la végétation est détruite. Il s'agit d'un phénomène physique qui suit les lois de la thermodynamique. Les caractéristiques d'un feu dépendent surtout des caractéristiques des combustibles mis en cause.



Pour qu'un feu se manifeste il faut qu'il y ait la réunion de trois éléments : on parle de triangle du feu :

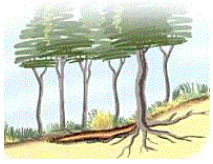
- Combustible : permet d 'alimenter le feu
- Carburant : c'est l'oxygène
- Source de chaleur : nécessaire pour démarrer le phénomène d'incendie.

L'incendie s'accompagne d'une émission d'énergie calorifique décomposée en trois phases :

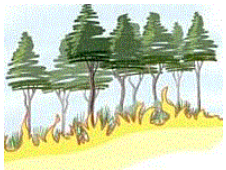
- L'évaporation d'eau contenue dans le combustible
- L'émission de gaz inflammables par pyrolyse : décomposition thermique de matières organiques en l'absence d'oxygène ou en atmosphère pauvre en oxygène. Il s'agit du premier stade de transformation thermique après la déshydratation. Elle débute à un niveau de température relativement bas (à partir de 200 °C) et se poursuit jusqu'à 1000 °C environ.
- L'inflammation

Il y a différents types de feu de forêt :

- Les feux de sol qui brûlent la matière organique contenue dans la litière, l'humus ou les tourbières. Alimentés par incandescence avec combustion, leur vitesse de propagation est faible.



- Les feux de surface qui brûlent les strates basses de la végétation, c'est-à-dire la partie supérieure de la litière, la strate herbacée et les ligneux bas. Ils se propagent en général par rayonnement et affectent la garrigue ou les landes ;



- Les feux de cimes qui brûlent la partie supérieure des arbres (ligneux hauts) et forment une couronne de feu. Ils libèrent en général de grandes quantités d'énergie et leur vitesse de propagation est très élevée. Ils sont d'autant plus intenses et difficiles à contrôler que le vent est fort et le combustible sec.

2- Etude de la propagation d'un feu de forêt

Dans cette partie, nous allons faire l'étude thermodynamique de la propagation d'un feu de forêt.

Durant un incendie, la chaleur générée est transportée vers le front de flammes selon trois processus :

- La conduction permet la transmission de proche en proche de l'énergie cinétique (produite par le mouvement) ;
- Le rayonnement thermique correspond au mode de propagation de l'énergie sous forme d'ondes infrarouges. C'est le principal mode de propagation des incendies ;
- La convection liée aux mouvements d'air chaud. Elle augmente avec le vent et la pente et peut contribuer au transport de particules incandescentes en avant du front de flammes et au déclenchement de foyers secondaires (sautes de feu).

Ce que nous cherchons ici est d'avoir un modèle de la propagation d'un feu.

Dans cette optique nous avons décidé de suivre le modèle de propagation de Rothermel (1972). Ce modèle suit la forme générale suivante pour exprimer la vitesse du front de flammes *F*:

$$F = \frac{flux\ de\ chaleur\ du\ front\ de\ flamme}{chaleur\ requise\ pour\ l'inflammation\ du\ combustible}$$

ou plutôt:

$$1 = \frac{flux\ de\ chaleur\ du\ front\ de\ flamme}{flux\ de\ chaleur\ requise\ pour\ l'inflammationdu\ combustible}$$

Ainsi il faut définir ces deux facteurs. Dans ce but, le modèle thermodynamique de Rothermel nous explique que le flux de chaleur nécessaire pour la propagation du feu, que l'on notera I_p, est la suivante :

$$I_p = F\rho_p \varepsilon Q_{ig}$$

Avec F la vitesse du front de flamme et $\rho_p\ \varepsilon\ Q_{ig}$ représente la quantification de la chaleur nécessaire, de pré-inflammation.

- ρ_p représente la densité de particule végétale inflammable,
- Q_{ig} est la chaleur de préchauffage c'est-à-dire la quantité d'énergie nécessaire pour amener le combustible au point d'inflammation. Il prend en compte la capacité thermique du combustible, qui dépend de la nature du bois, de sa teneur en eau qui la fait diminuer car l'eau est un bon capteur énergétique.
- ε est le coefficient de chauffage effectif, c'est-à-dire comment le combustible conduit la chaleur qui tient aussi compte de cette capacité thermique.

Cependant cette chaleur nécessaire pour la propagation du feu correspond en réalité à une fraction de la production de chaleur libérée par la réaction de combustion I_r, ainsi on a la relation suivante :

$$I_p=\xi I_r$$

où ξ est la fraction de chaleur transmise au combustible qui est une fraction de σ (rapport surface/volume de particule végétale) sur la compacité β (rapport du volume de combustible sur le volume totale disponible).
Cependant on trouve la production de chaleur libérée par la combustion I_r de manière empirique.

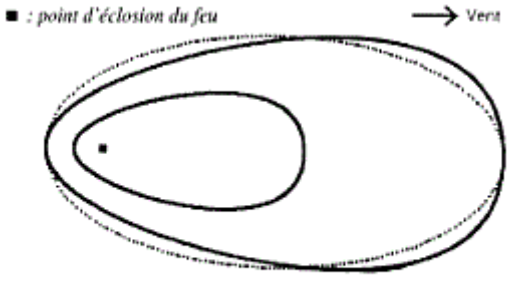
Ainsi en combinant les deux relations précédentes, on arrive à trouver une relation pour la vitesse du front de flamme en isolant *F*:

$$F = \frac{\xi Ir}{\rho_p \varepsilon Q_{ig}}$$

De plus dans ce modèle, il manque des facteurs essentiels : la pente et le vent que l'on note respectivement ϕ_s et ϕ_w. Mais ces facteurs sont pris en compte dans une amélioration de ce modèle pour arriver à la formule que nous utilisons dans notre modèle de propagation :

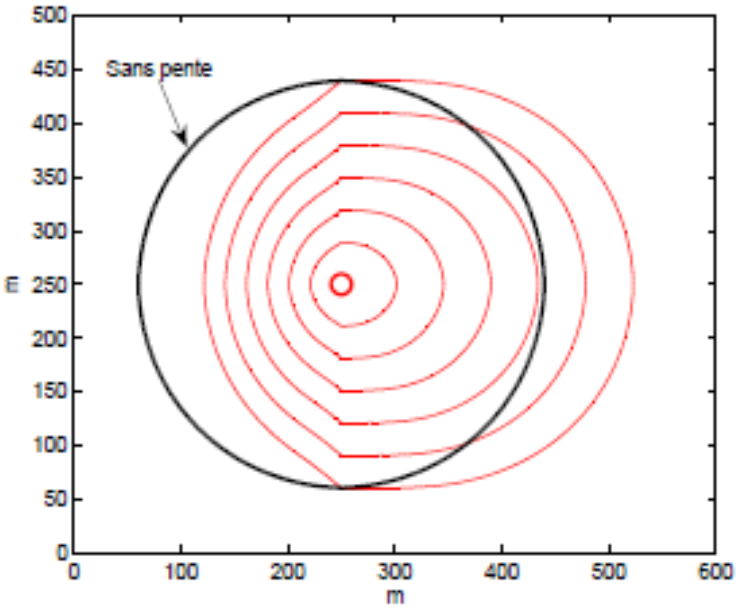
$$F = \frac{I_R \xi (1 + \phi_W + \phi_S)}{\rho_p \varepsilon Q_{ig}}$$

Comme ce modèle est empirique, seule la réalité nous prouve la véracité de notre modèle.



Modèle de l'ovale, comparaison avec ellipse en pointillés
Source : R. Chevrou

Evolution de la propagation du front de flamme selon le modèle de Rothermel avec le facteur du vent



Evolution de la propagation du front de flamme
selon le modèle de Rothermel avec le facteur de la pente

Choix des contraintes

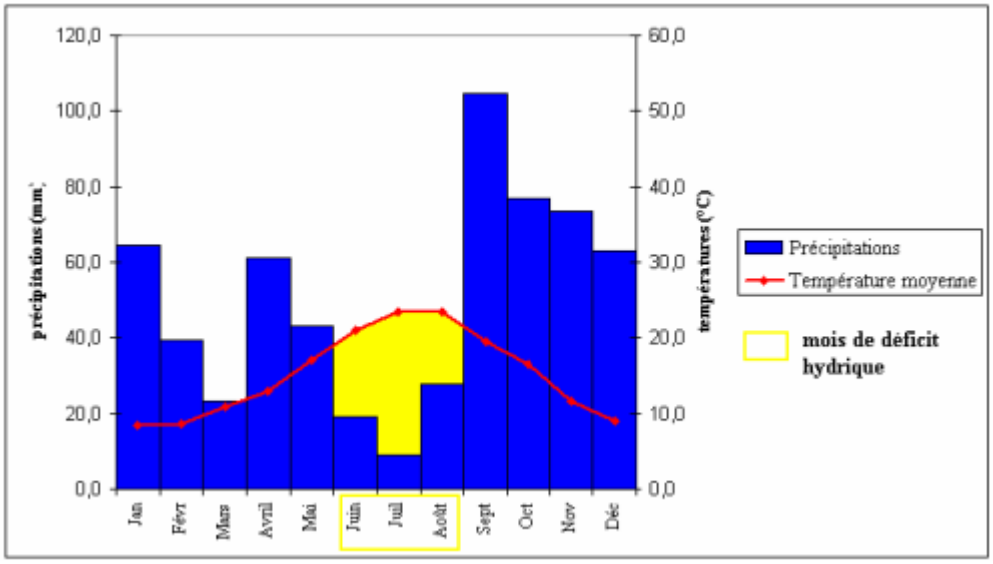
Comme le montre la formule de propagation du feu, il existe de nombreuses contraintes jouant un rôle dans la formation d'un feu son éclosion ou sa propagation.
Dans cette partie, nous allons présenter une vue d'ensemble de ces nombreux facteurs, puis nous évoquerons plus particulièrement ceux que nous allons prendre en compte dans notre modélisation.

1- Etude des contraintes négligées

a- Les contraintes météorologiques

Les contraintes météorologiques sont très importantes dans le département des bouches du Rhône où il règne un climat méditerranéen caractérisé par une pluviométrie faible et une période estivale très sèche.
Les périodes de sécheresse et les épisodes de vents forts sont favorables à l'éclosion des incendies. Ainsi, le vent accélère le dessèchement des sols et des végétaux et augmente le risque de mises à feu, par dispersion d'éléments incandescents. La chaleur dessèche les végétaux par évaporation et provoque, lors des périodes les plus chaudes, la libération d'essences volatiles, à l'origine de la propagation des flammes.

Dans les Bouches-du-Rhône, on peut noter que la période estivale est même marquée par un déficit d'eau. Le peu d'apport pluvieux durant cette période prend la forme d'orages assez violents et concentrés dans le temps, ne permettant pas ainsi à la nature d'accumuler suffisement d'eau pour empêcher les phénomènes précédents de se produire.



Moyenne mensuelle de pluviométrie dans la station météorologique de Gardiole

De plus, le département est aussi soumis à des vents fréquents. Le vent dominant est le mistral qui souffle en moyenne 120 à 180 jours par an depuis le secteur nord/nord-ouest ou nord-ouest, auquel s'ajoute le vent d'Est qui souffle majoritairement du secteur est/sud-est. En moyenne, sur la station météorologique de Marseille il a été recensé plus de 190 jours de vent supérieur à 40km/h.

Le vent n'est donc pas une contrainte négligeable car en plus d'aider à l'éclosion d'un feu, il favorise sa propagation tout en l'orientant.

Feu montant par vent fort

b- La végétation

La prédisposition de la végétation aux incendies est souvent liée à sa teneur en eau, elle-même déterminée par les conditions météorologiques. Quand la teneur en eau est faible, les végétaux s'enflamment à des températures relativement basses. Celles-ci varient entre 260°C et 450°C, elles peuvent facilement être atteintes par des sources de chaleur telles que les allumettes enflammées, des cigarettes incandescentes ou la foudre.
L'état général de la zone forestière : état d'entretien, densité, essences présentes, passage récent d'un feu mais aussi la composition chimique de la végétation : teneur en essences volatiles ou en résines jouent également un rôle déterminant dans l'éclosion des incendies. On répertorie deux types d'essences :

- Les essences pyrophiles dont les caractéristiques (résine, faible teneur en eau) favorisent le développement d'un feu (ex : le pin sylvestre, la bruyère…)
- Les essences pyrorésistantes capables de résister aux incendies (pin d'Alep, chêne vert, châtaigner ou chêne liège…)

c- Les facteurs humains

Des études ont monté qu'en France plus de 80% des incendies sont causés chaque année par des activités humaines, contre 70% en dehors de la zone méditerranéenne.
On répertorie les causes d'origines humaines ainsi :

- Accidentelles : infrastructures de transport (chemins de fer, lignes électriques,…) qui peuvent couver des feux
- Imprudence : jets de mégots, pique-niques en forêt…
- Travaux agricoles et forestiers
- Loisirs : acro-branches, activités en forêts
- Déprise agricole : extension des friches augmentant la probabilité de départs d'incendie.
- L'urbanisation

Dans les Bouches du Rhône, ces facteurs sont souvent augmentés par la venue de nombreux touristes durant la période estivale (augmentant ainsi considérablement la population et les activités dans ou aux abords des zones forestières).

Les trois contraintes présentées ci-dessus comportent des données compliquées à modéliser et de nombreuses variables que nous ne connaissons et maitrisons pas. De ce fait, nous ne les prendrons pas en considération dans la programmation de notre modèle.
En effet, le feu est un phénomène qui est très compliqué et nous avons ajouté les contraintes que petit à petit, le manque de temps nous empêche d'approfondir suffisamment pour pouvoir maitriser ces contraintes et les utiliser à leur juste valeur.
Il était néanmoins indispensable de les mentionner car elles font partie de notre étude sur les incendies mais aussi parce qu'elles nous amènent d'ores et déjà à la conclusion que notre modèle ne pourra pas refléter la réalité…

2- Etude des contraintes prises en compte

a- Etude de l'importance de la densité de végétation

La densité de combustibles, autrement dit de végétation, est importante dans l'avancée du feu. En effet de manière générale plus une forêt est dense, et plus le feu va ralentir sa course contre la destruction. Pour comprendre ce phénomène il faut se ramener au principe déclenchement d'un incendie, résumé dans le triangle du feu.

Grâce à ce schéma, il est facile de comprendre que le pourcentage de combustible influence l'avancée d'un incendie. En effet lorsqu'un feu entre dans une région boisée, ce premier va trouver facilement des arbres sur son passage. Toutefois si cette forêt est très dense, il va forcément avoir plus de matière à brûler donc le feu avancera moins vite que si les arbres sont un peu espacés les uns des autres. De plus une forêt dense est plus étouffante et laisse moins de place à l'air et donc à l'oxygène. En suivant alors le principe du triangle du feu, il va y avoir un déséquilibre entre le combustible, l'énergie et le carburant, ce qui va ralentir la propagation du feu.

Pour intégrer cette notion de densité dans notre programme, nous avons trouvé le pourcentage de région boisée pour chaque commune des Bouches du Rhône. Par exemple nous avons relevé 85% pour Aix-en-Provence, 40% pour Marseille, 0% à Saintes-Maries-de-la-Mer, et ceci pour les 120 communes. Nous avons ensuite délimité toutes ces communes sur notre programme en réalisant un maillage de la carte. De ce fait le programme prend en compte les différentes régions plus ou moins boisées.

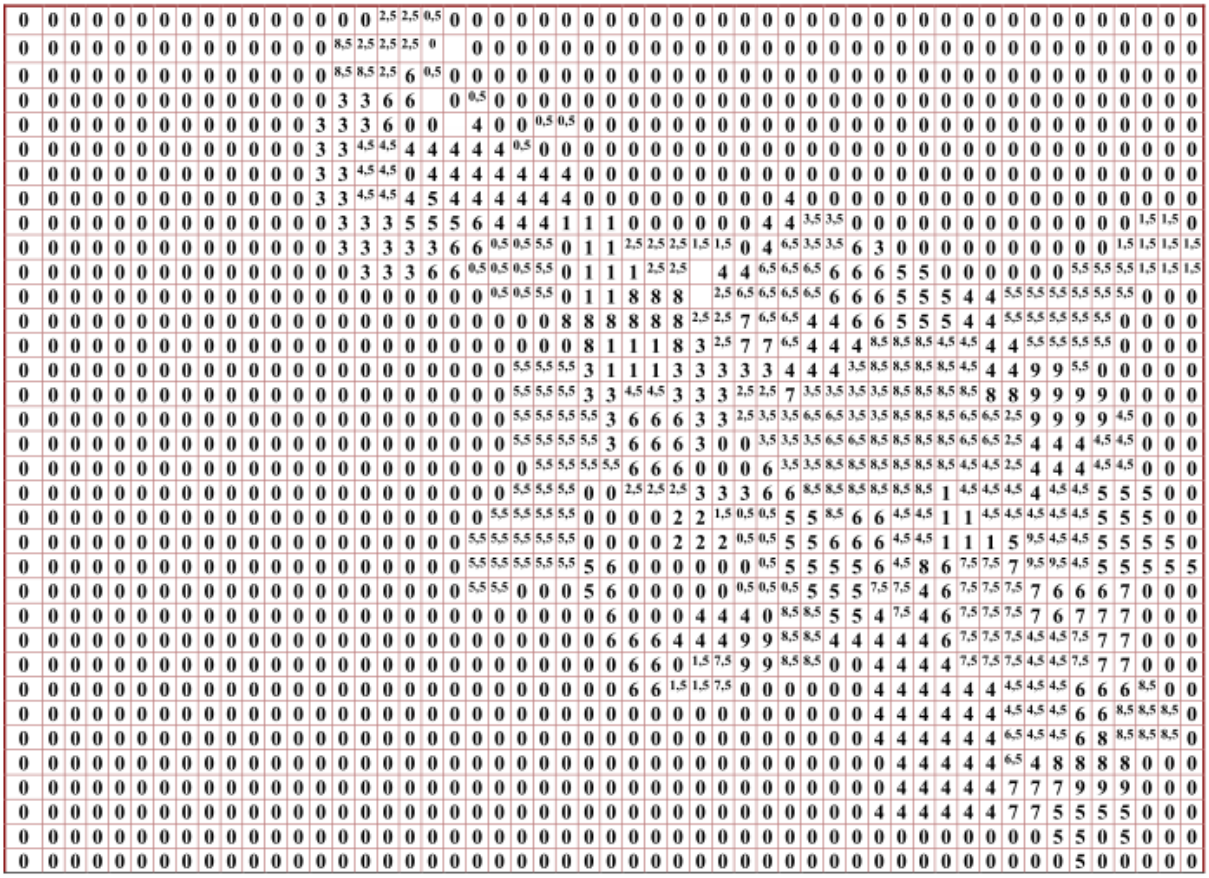
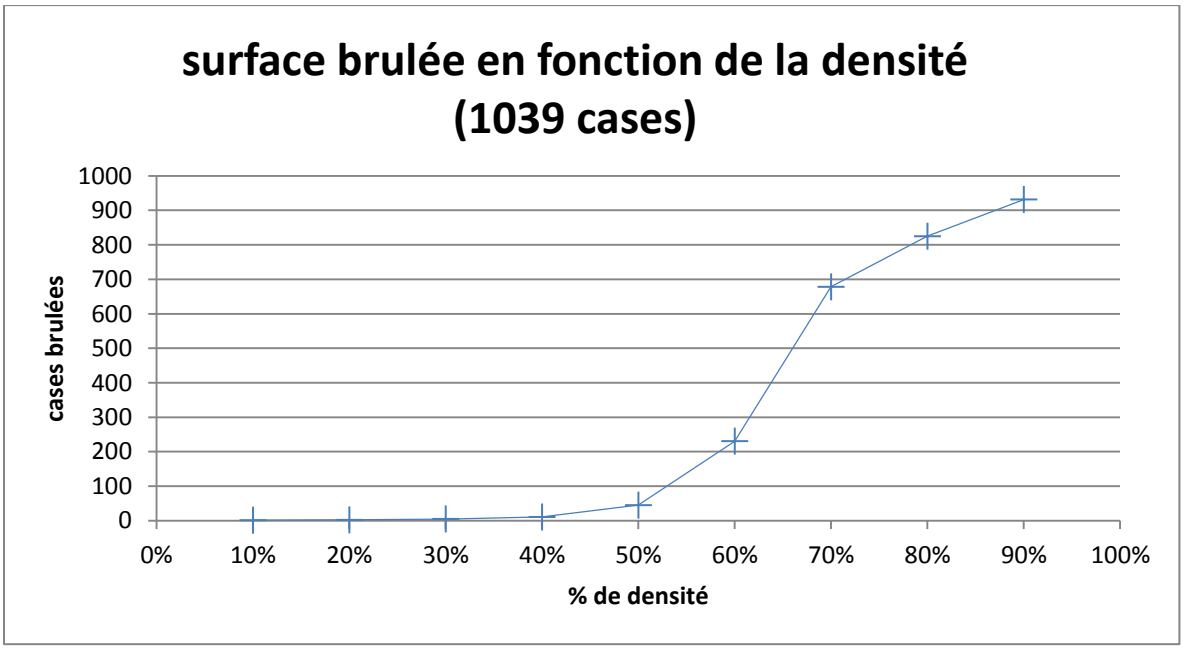
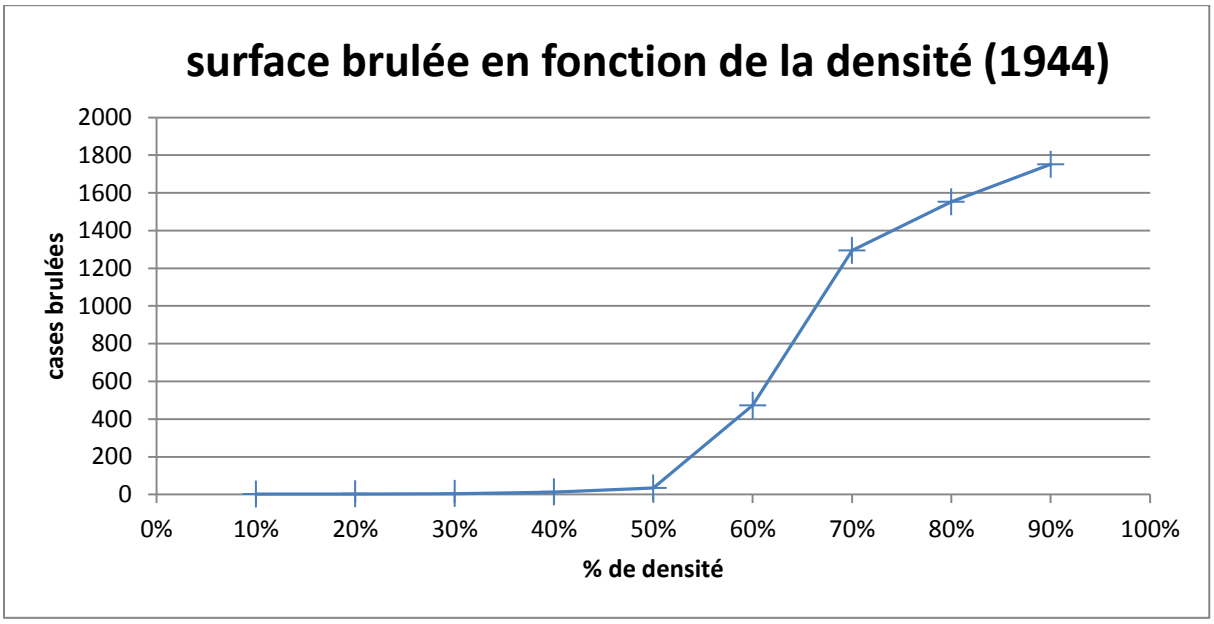
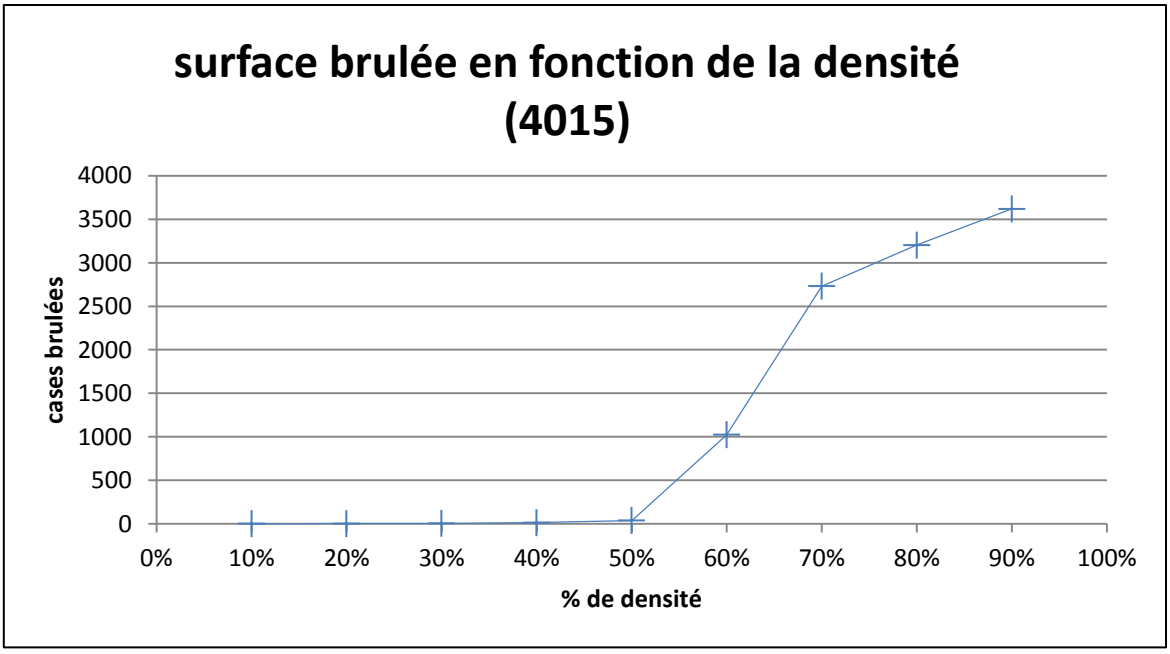


Tableau des densités de végétation des Bouches-du-Rhône

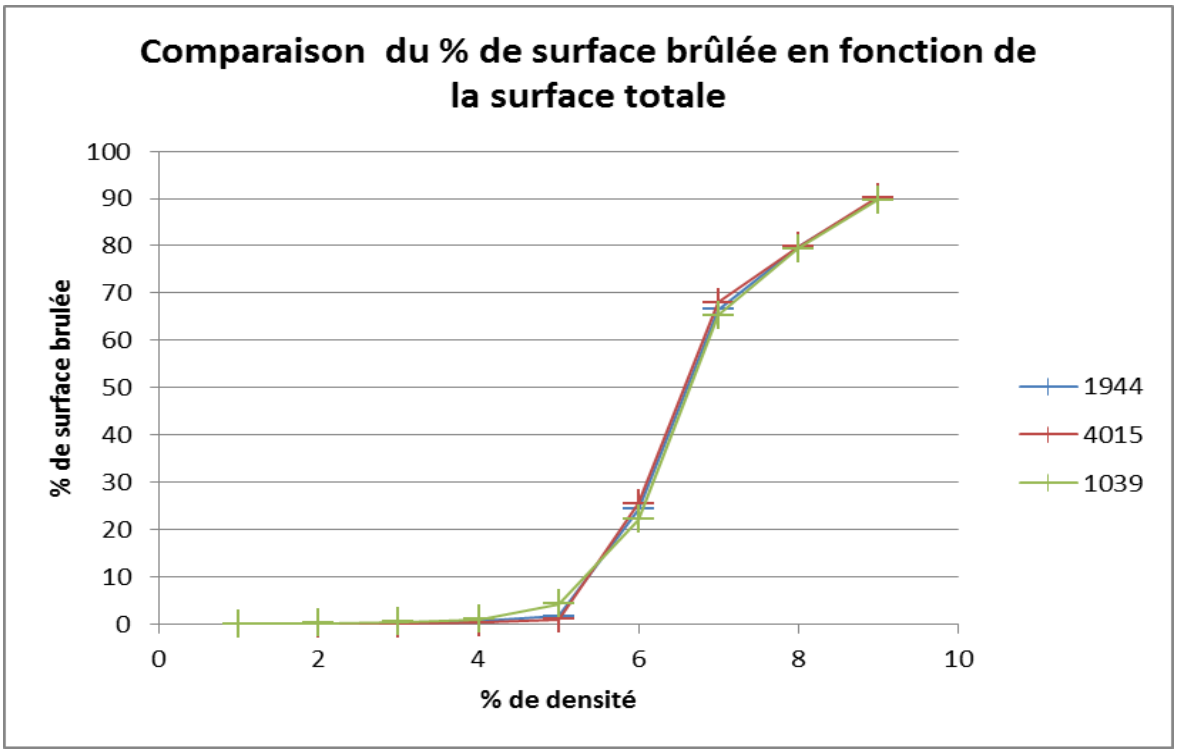
Grâce à notre programme, que nous présenterons plus tard, nous avons pu étudier l'influence de la densité sur la propagation d'un feu de forêt. En effet nous avons fait évoluer la densité d'arbre sur une carte pour étudier la quantité de surface brulée.
Nous avons donc effectué des simulations avec des départs aléatoires pour des densités allant de 10 % de surface « boisée » à 90% de surface boisée. Pour chaque densité nous avons effectué 50 simulations. Nous avons réitéré trois fois cette procédure pour des tailles de cartes différentes (1039, 1944 et 4015 cases).
Après avoir rentré les résultats, nous avons obtenu les courbes suivantes :







On remarque que l'évolution de la surface brûlée en fonction de la densité est la même quelle que soit la surface de départ. On peut de plus noter que lorsque la densité d'arbre est 65%, il y a 50% de la surface qui brûlera si l'on considère une propagation linaire du feu de proche en proche.



b- Etude de l'importance de la pente

Une des contraintes prise en compte est l'influence de la pente. Elle joue un rôle primordial dans la propagation de l'incendie.
En effet le feu ne se comporte pas de manière identique, suivant s'il « monte » ou « descend ». Lorsque l'incendie gravit des reliefs celui-ci se propage plus rapidement que lorsqu'il les dévale. Pour comprendre ce phénomène, il faut d'abord savoir que la propagation d'un feu et son intensité dépendent avant tout de la quantité de chaleur transférée entre la végétation qui brûle et celle qui est encore intacte. Ceci permet de comprendre pourquoi un feu se propage plus rapidement en montée.
Lorsqu'il y a un feu, celui-ci réchauffe l'air qui l'entoure et produit alors des gaz très chauds. Or un gaz chaud a une masse volumique plus faible qu'un gaz froid. Puisqu'il est moins dense, il monte en entraînant les gaz inflammables qui sont responsables des flammes. En montant, ces gaz vont rencontrer des combustibles, notamment des arbres, qui vont alors s'enflammer. Le feu gagne alors du terrain, et s'avance suivant ce principe jusqu'à arriver au sommet. Inversement la descente d'une pente va ralentir la propagation puisque l'air chaud monte toujours mais il n'y a plus de combustible qui alimente le feu. Ce dernier se propage alors beaucoup moins rapidement car les flammes sont moins en contact avec les arbres, c'est uniquement la chaleur émise par le feu qui permet son avancée.

Feu montant: propagation rapide

Feu descendant: propagation plus lente

Une étude a permis de répertorier les différents types de pente, avec leurs influences sur la propagation d'un feu.

Seuil de pente en %	**Influence sur la propagation du feu**
0 à 15 %	Peu d'influence
15 à 30 %	Accélération modérée
30 à 60 %	Forte accélération
+ de 60 %	Risque de turbulence et embrasement

La pente est une contrainte importante à la propagation de l'incendie. La vitesse du déplacement du feu n'est donc pas constante, et nécessite de connaître parfaitement le terrain à protéger afin d'être le plus efficace possible et de limiter les dégâts.

Puisque la pente joue un rôle primordial dans la propagation du feu, nous avons voulu l'intégrer dans notre programme. En effet nous avons dû trouver une solution afin de représenter cette différence de pente, autrement dit les différentes altitudes. La difficulté a été de passer d'un relief en 3D à un plan en 2D. Pour cela nous avons découpé la carte des Bouches du Rhône en un maillage de 53 colonnes et 35 lignes. Nous avons alors attribué une valeur à chaque case. Ces valeurs varient de 0 à 6 selon une échelle d'environ 200m. De plus la valeur -1 a été attribuée à la mer et à l'étang de Berre, puisque le risque d'incendie à ces endroits-là est nul.

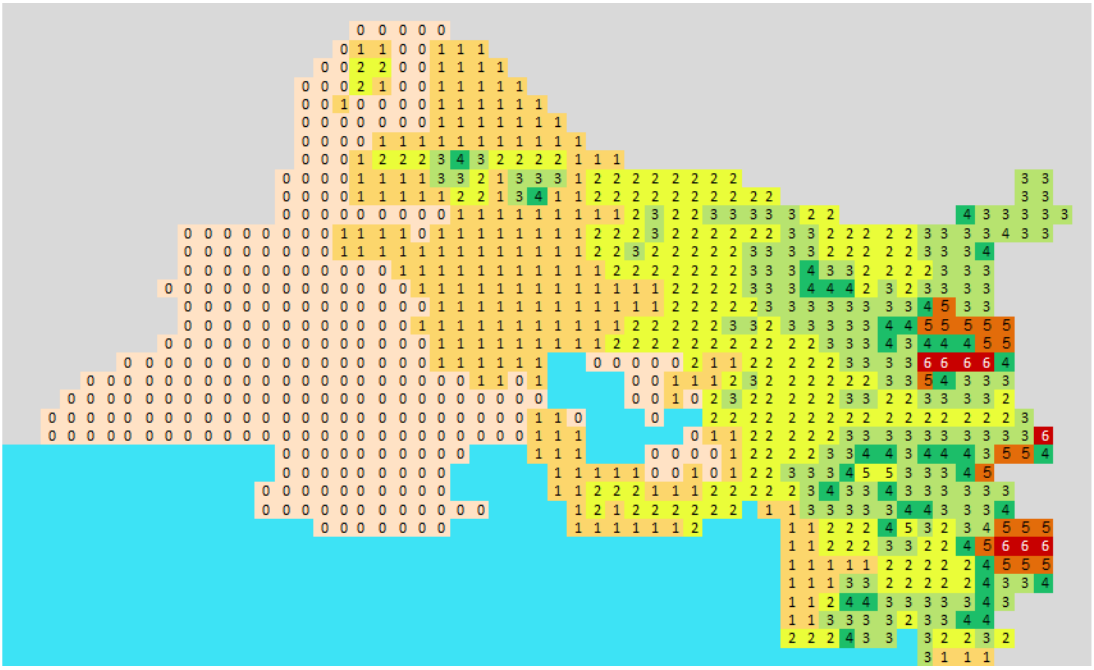


Tableau des altitudes des Bouches-du-Rhône

Programmation

Dans le but de donner une vision qualitative de l'évolution d'un incendie dans notre département, nous avons décidé de créer un programme informatique. Le choix du logiciel fut Net Logo car celui-ci possédait une interface déjà intégrée. Néanmoins, malgré nos bases non négligeables d'informatique, ce langage nous était inconnu. Il nous a donc été nécessaire de comprendre et d'apprivoiser celui-ci. Nous allons présenter ici les différentes étapes que nous avons effectuées dans la réalisation de ce modèle.

1- Initialisation du modèle

Pour commencer, nous avons choisi notre langage de programmation et le logiciel d'interface que nous utiliserons. Notre choix s'est porté sur Net Logo. Ce logiciel est très pratique puisque celui-ci possède l'interface nécessaire pour nous permettre de créer notre carte des Bouches-du-Rhône ainsi que l'évolution des différents feux de notre modèle. De plus, ce logiciel utilise le langage java que certains avaient déjà pratiqué.

La seconde étape de notre modèle est de trouver une échelle adaptée à notre carte. Le problème avec ce genre de démarche est qu'il ne faut pas prendre une échelle trop grande qui rendrait notre modèle trop grossier ou trop petite qui rendrait les tâches à faire trop laborieuses puisque le temps nous était restreint.

Pour la réalisation de notre modèle, nous avons eu besoin de données concernant les altitudes et les densités forestières dans notre région. Après les avoir récoltées, nous les avons rentrées dans notre code à l'aide de matrices. Cet outil mathématique nous permet une utilisation bidimensionnelle d'un système en trois dimensions. Ainsi, nous avons créé des matrices de mêmes tailles que notre carte avec comme coordonnées les altitudes (par palier de 100 mètres) ou les densités forestières (en pourcentage de zones arboricoles par rapport à la surface totale).

Nous présenterons ici les différents types de propagation des feux que nous avons utilisés (selon les contraintes prises en compte ou non). Chacun de ces modèles se décompose en deux parties. La première (nommé : to setup) consistant à initialiser toutes les valeurs utilisées, la carte, et d'autres variables globales. Puis, la deuxième (nommé : to go) permettant la mise en mouvement de notre modèle de propagation du feu selon les cas. Chacun est accessible dans l'interface à l'aide d'un bouton.

2- Programmation d'une propagation linéaire

Tout d'abord, nous avons commencé à programmer un modèle linéaire sans aucune notion des altitudes ou des densités. De plus, ce modèle ne comporte aucune carte prédéfinie. Cependant, dans l'interface, nous pouvons faire varier le pourcentage de surfaces boisées ainsi que le nombre de feux initiaux. Nous avons aussi ajouté des modules permettant de compter le nombre de cases totales ainsi que de voir, au fur et à mesure de l'évolution, le nombre de cases non brûlées et celles qui le sont. Maintenant, présentons notre programme.

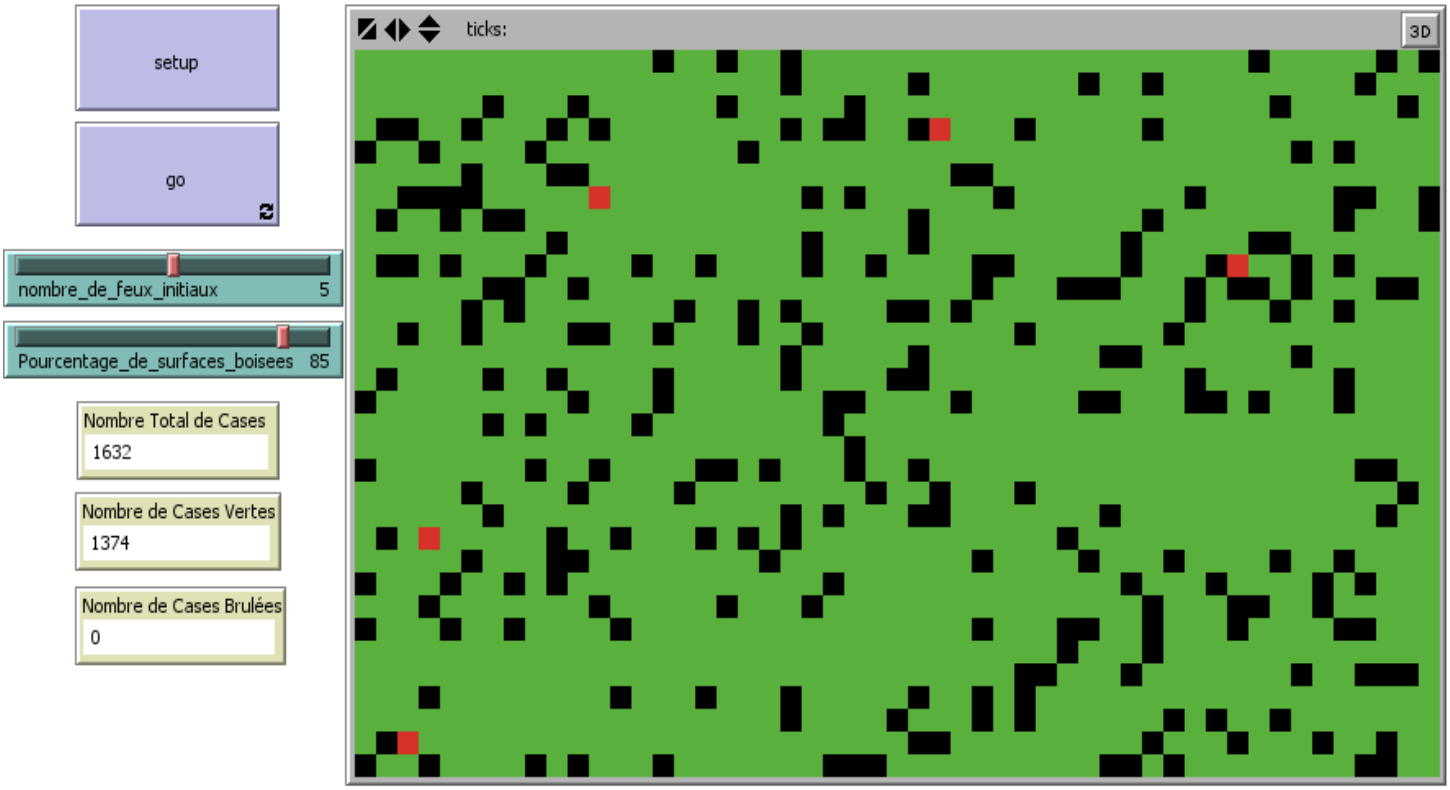
```
;; Variables globales:
;;     nbre_feux: variables permettant le decompte du nombre de feux
globals[nbre_feux]

;; Initialisation des parametres
to setup

 ;; Remises a zero des anciens parametres
 clear-all

 ;; Coloriage de la carte
 ask patches
 [
  if (random-float 100 < Pourcentage_de_surfaces_boisees)
  [
   set pcolor green
  ]
 ]

 ;; Creation des feux
 set nbre_feux 0

 ask patches with [ pcolor = green ]
 [
  if (nbre_feux < nombre_de_feux_initiaux)
  [
   set pcolor red
   set nbre_feux (nbre_feux + 1)
  ]
 ]

end
```

Nous commencons toujours par définir nos variables puis nous remettons à zéro les anciens paramètres.

Pour le coloriage de la carte, pour chaque case, nous prenons un nombre aléatoire entre 1 et 100 puis nous le comparons avec le pourcentage de surfaces boisées sélectionné dans l'interface. Si ce nombre répond à notre critère de comparaison, la case associée est coloriée en vert.

Pour la création des feux, nous initialisons la variable global de nombres de feux (*nbre_feux*) jusqu'à atteindre la valeur de nombre de feux initiaux définie dans l'interface (*nbre_de_feux_initiaux*). Nous prenons, ensuite, l'ensemble des cases vertes aléatoirement que nous colorions en rouge (bien entendu, il faut que notre case d'origine soit brûlable pour qu'elle puisse s'enflammer). Puis, nous incrémentons notre compteur de feux.

Voici le résultat après avoir effectué *setup* sur l'interface.



Maintenant, voici la deuxième partie du programme : la propagation linéaire de notre feu.

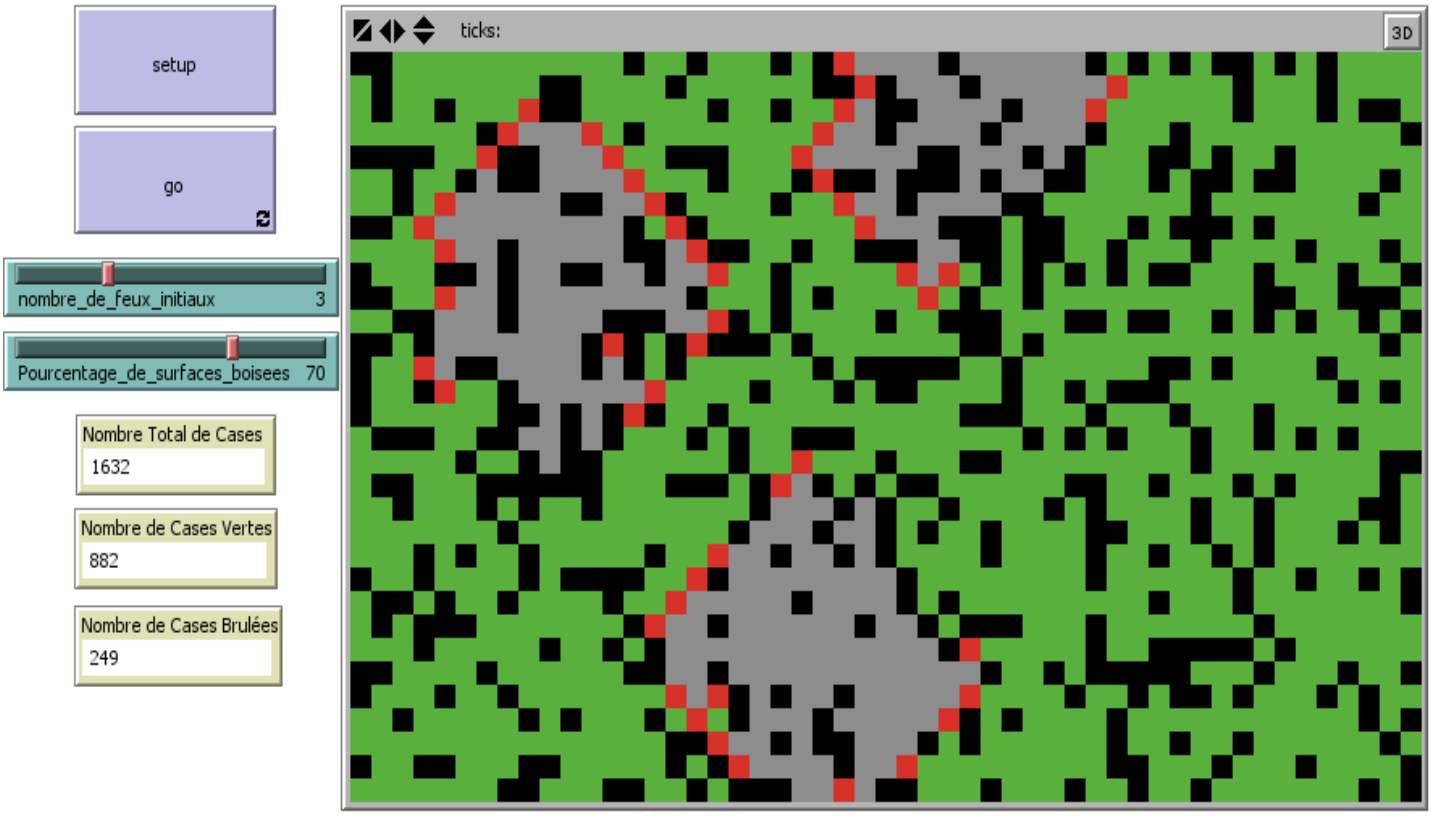
```
;; Mise en mouvement
to go

 ;; Enflammation des cases voisines
 ask patches with [ pcolor = red ]
 [
  ask neighbors4 with [ pcolor = green ]
  [
    set pcolor red
  ]

  ;; Pre-coloriage des zones brulees
  set pcolor (pcolor - 1)
  set pcolor (pcolor - 1)
  set pcolor (pcolor - 1)
  set pcolor (pcolor - 1)
  set pcolor (pcolor - 1)

  ;; Coloriage des zones brulees
  if (pcolor < (red - 4))
  [
   set pcolor gray
  ]
 ]

 ;; Attente entre deux mises en mouvement
 wait 0.5

end
```

Nous demandons à toutes les cases en feux (de couleur rouge) d'incendier celles adjacentes qui sont brûlables, donc de transformer les voisins verts des cases rouges en cases rouges.

Nous rendons les anciennes cases rouges (déjà brulées) encore plus rouges afin de les distinguées par la suite des nouvelles (les voisines qui viennent de bruler). Puis, nous les colorions en gris (couleur de nos surfaces déjà consommées par le feu).

Nous demandons, au programme, d'attendre un petit peu avant de se relancer pour que l'utilisateur puisse voir l'évolution dans l'interface.

Voici le résultat après avoir effectué *go* sur l'interface. Notons qu'ici le programme n'est pas encore terminé. Nous l'avons volontairement arrêté.



3- Programmation non linéaire : ajout des altitudes

Maintenant, nous allons intégrer à notre modèle une cartographie des Bouches-du-Rhône et les altitudes associées. Le feu ne se propagera que à l'intérieur de notre région (ni dans l'eau, ni au-delà des frontières). Le modèle n'est plus linéaire. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, un feu réel se propage plus facilement dans le sens d'une montée que d'une descente. Ainsi, notre modèle de propagation va préférer aller à chaque pas dans le sens de plus grande montée et ne se propagera plus à tous ses voisins.

```
;; Variables globales
globals [nbre_feux altitude x y m y-max g-alti d-alti b-alti h-alti max-alti max-alti1 max-alti2]

;; Extensions de Net Logo utilisées
extensions[matrix]

to setup

 ;; Mises à zero de toutes les variables
 __clear-all-and-reset-ticks
 clear-all

 ;; Matrice des altitudes
 set altitude matrix:from-column-list [
    ]

 ;; Valeur maximale des y
 set y-max 35

 ;; Coloriage de toute la carte en vert
 ask patches
  [
    set pcolor green
  ]
 ;; Coloriage de la mer en bleu
 ask patches
  [
    set x pxcor
    set y pycor
    set m matrix:get altitude x (y-max + 1 - y)
    if (m = -1)
    [
      set pcolor blue
    ]
  ]

 ;; Coloriage en noir de la surface exterieure aux bouches du rhones
 ask patches
  [
    set x pxcor
    set y pycor
    set m matrix:get altitude x (y-max + 1 - y)
    if (m = -2)
    [
      set pcolor black
    ]
  ]

 ;; Creation des feux
 set nbre_feux 0
 ask patches with [ pcolor = green ]
 [
  if (nbre_feux < Nombre_de_feux_initiaux)
  [
    set pcolor red
    set nbre_feux (nbre_feux + 1)
  ]
 ]
end
```

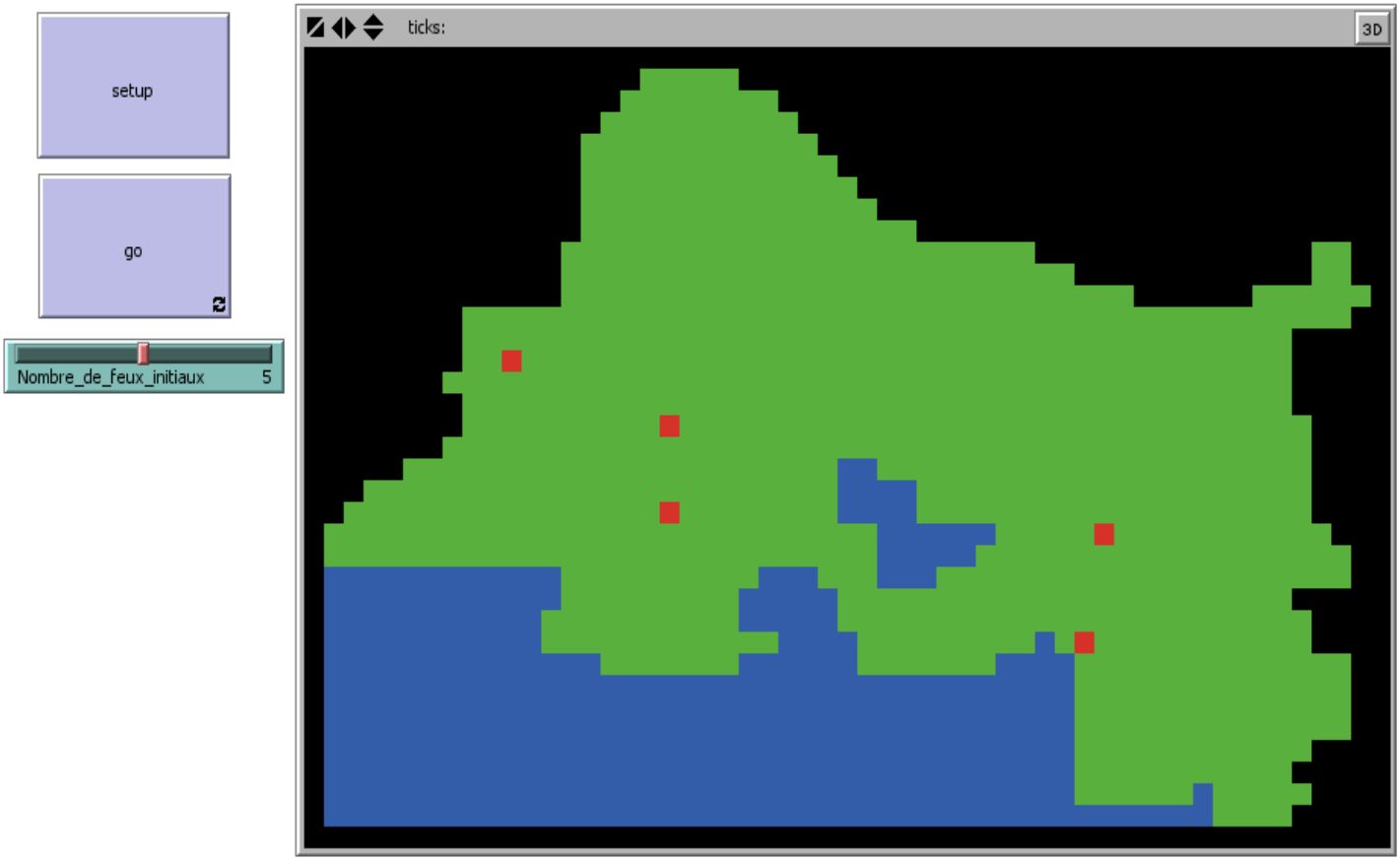
Nous commençons encore par initialiser les variables et les extensions que nous allons utiliser. Puis nous remettons à zéros toutes les anciennes variables.

Nous créons la matrice des altitudes. Nous ne l'affichons pas ici car sa taille est trop importante et qu'il n'y a pas un très grand intéret à la voir. Nous aurons aussi besoin par la suite de la valeur maximale des y que nous initialisons.

Pour colorier la carte, nous commençcons par la colorier entièrement en vert puis nous recolorions les autres zones selon les cas. La mer sera donc coloriée en bleu et les zones extérieures en noir. Pour se faire, nous avons attribué une valeur distincte dans la matrice des altitudes, à savoir -1 pour la mer et -2 pour l'extérieur

Les feux sont toujours crééent aléatoirement sur les cases vertes avec un compteur de feu allant jusqu'à la valeur du nombre de feux initiaux définies dans l'interface.

Voici le résultat après avoir effectué *setup* sur l'interface.



Maintenant, regardons la partie *go* pour voir la mise en mouvement de notre feu.

```
to go

 ask patches with [pcolor = red]
 [
  ;; Initialisation des diverses variables
  set x pxcor
  set y pycor
  set g-alti matrix:get altitude x (y-max + 1 - (y - 1))
  set d-alti matrix:get altitude x (y-max + 1 - (y + 1))
  set b-alti matrix:get altitude (x - 1) (y-max + 1 - y)
  set h-alti matrix:get altitude (x + 1) (y-max + 1 - y)
  set max-alti1 0
  set max-alti2 0
  set max-alti max-alti1
```

Nous ne prenons en compte que les cases rouges. Nous initialisons tous les paramètres utiles au bon fonctionnement de la procédure *go*: les coordonnées de ce point, la valeur de l'altitude de ces voisins et d'autres paramètres annexes.

```
;; Calcul de la plus grande altitude
  ask patch (x - 1) y
  [
   if (pcolor = green)
   [
     set max-alti1 g-alti
   ]
  ]

  ask patch (x + 1) y
  [
   if (pcolor = green) and (max-alti1 < d-alti)
   [
     set max-alti1 d-alti
   ]
  ]

  ask patch x (y - 1)
  [
   if (pcolor = green)
   [
     set max-alti2 b-alti
   ]
  ]

  ask patch x (y + 1)
   [
    if (pcolor = green) and (max-alti2 < h-alti)
    [
      set max-alti2 h-alti
    ]
   ]

  ifelse (max-alti1 < max-alti2)
  [
    set max-alti max-alti2
  ]
  [
    set max-alti max-alti1
  ]
```

Ici, nous calculons la plus grande altitude parmi les voisins puisque notre modèle de propagation va dans le sens de plus grande monté ou dans le cas d'un pic, de moins grande descente.

```
  ;; Coloriage des cases de plus grandes altitudes
  ask patch (x - 1) y
  [
    if (g-alti = max-alti) and (pcolor = green)
    [
      set pcolor  red
    ]
  ]

  ask patch (x + 1) y
  [
    if (d-alti = max-alti) and (pcolor = green)
    [
      set pcolor  red
    ]
  ]

  ask patch x (y - 1)
  [
    if (b-alti = max-alti) and (pcolor = green)
    [
      set pcolor  red
    ]
  ]

  ask patch x (y + 1)
  [
    if (h-alti = max-alti) and (pcolor = green)
    [
      set pcolor  red
    ]
  ]
  ;; Coloriage des cases deja brulees
  set pcolor (pcolor - 1)
  set pcolor (pcolor - 1)
  set pcolor (pcolor - 1)
  set pcolor (pcolor - 1)
  set pcolor (pcolor - 1)

  if (pcolor < (red - 4))
  [
    set pcolor gray
  ]

 ]

  ;; Attente entre deux mises en mouvement
  wait 0.5

end
```

Maintenant que nous avons la plus grande altitude des voisins, nous transformons ceux qui sont concernés en cases incendiés (de couleur rouge). Bien entendu, nous avons encore demandé ceci aux voisins qui ne sont pas encore touchées par le feu (donc de couleur verte).

Enfin, nous redemandons au programme d'attendre un petit peu avant de se relancer afin que l'utilisateur puisse voir l'évolution dans l'interface.

En voici donc le résultat :

4- Programmation non-linéaire : ajout de la densité forestière des Bouches-du-Rhône

Pour la suite, nous avons décidé d'inclure à notre programme les densités forestières des Bouches-du-Rhône. Le départ de feu ne se fait plus totalement aléatoirement. Si une zone A est plus boisé qu'une zone B (possède densité forestière supérieur), alors la zone A possède une plus grande probabilité de brûler que la zone B. Il existe toujours tout de même un facteur aléatoire donc la zone B peut brûler sans que la zone A ne le fasse.
De plus, si une zone enflammée a une densité trop faible, le feu s'éteindra de lui-même. En effet, dans la vie réelle, si un feu n'a pas assez de matière à brûler, il s'éteint. D'après la partie précédente sur l'étude de la densité, nous avons observé que le feu ne se développe quasiment pas si la densité ne dépasse pas les 40%.
Nous allons maintenant voir notre programmation.

```
;; Variables globales
globals [altitude densite x y m min_densite y-max g-alti d-alti b-alti h-alti max-alti max-alti1 max-alti2]

;; Extensions de Net Logo utilisées
extensions[matrix]


to setup

 ;; Mises à zero de toutes les variables
 __clear-all-and-reset-ticks
 clear-all

 ;; Matrice des altitudes
 set altitude matrix:from-column-list [
 ]

 ;; Matrice des densites forestieres des Bouches-du-Rhones (sur 20 (= zone entierement boisee))
 set densite matrix:from-column-list [
 ]

 ;; Valeur maximale des y
 set y-max 35

 ;; Valeur minimale des densites (ici, 40% = 8 pour notre echelle)
 set min_densite 8
 ;; Coloriage de toute la carte en vert
 ask patches
  [
    set pcolor green
  ]

 ;; Coloriage de la mer en bleu
 ask patches
  [
    set x pxcor
    set y pycor
    set m matrix:get altitude x (y-max + 1 - y)
    if (m = -1)
    [
      set pcolor blue
    ]
  ]
```

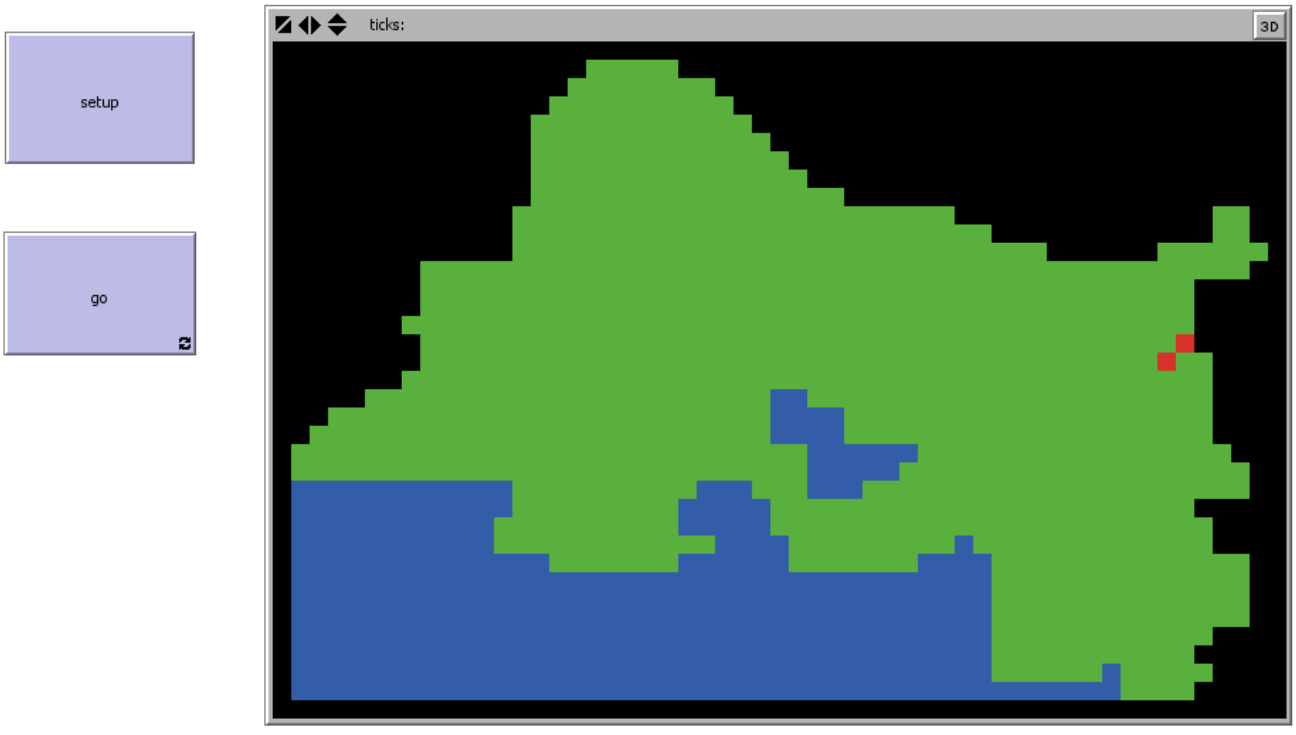
Toujours, le commencement se fait par l'initialisation des variables et les extensions de Net Logo que nous allons utiliser et une remise à zéro du système.

Nous avons notre matrice des altitudes que nous complétons avec notre matrice des densités présentées plus haut que nous n'affichons toujours pas. Nous aurons aussi besoin par la suite de la valeur maximale des *y* que nous initialisons.

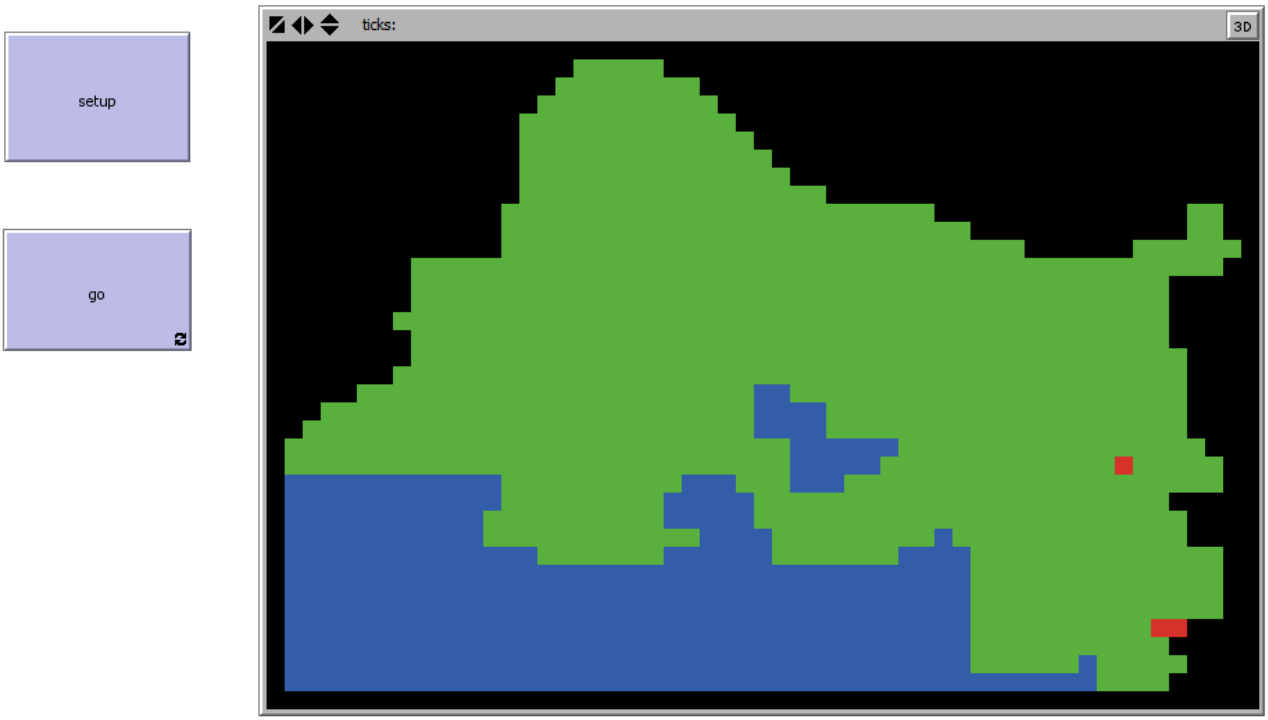
```
;; Coloriage en noir de la surface extérieure aux Bouches-du-Rhones
ask patches
 [
  set x pxcor
  set y pycor
  set m matrix:get altitude x (y-max + 1 - y)
  if (m = -2)
  [
   set pcolor black
  ]
 ]
;; Creation des feux avec la densite de chaque surface pris en compte
ask patches with [pcolor = green]
 [
  set x pxcor
  set y pycor
  set m matrix:get densite x (y-max + 1 - y)
  if (random-float 100 * (m + 1) > 1800)
  [
   set pcolor red
  ]
 ]

end
```

Les feux ne sont plus créés totalement aléatoirement. Nous faisons rentrer en compte la densité de chaque parcelle que nous comparons avec un nombre donné par nos expériences (à savoir *1800*).

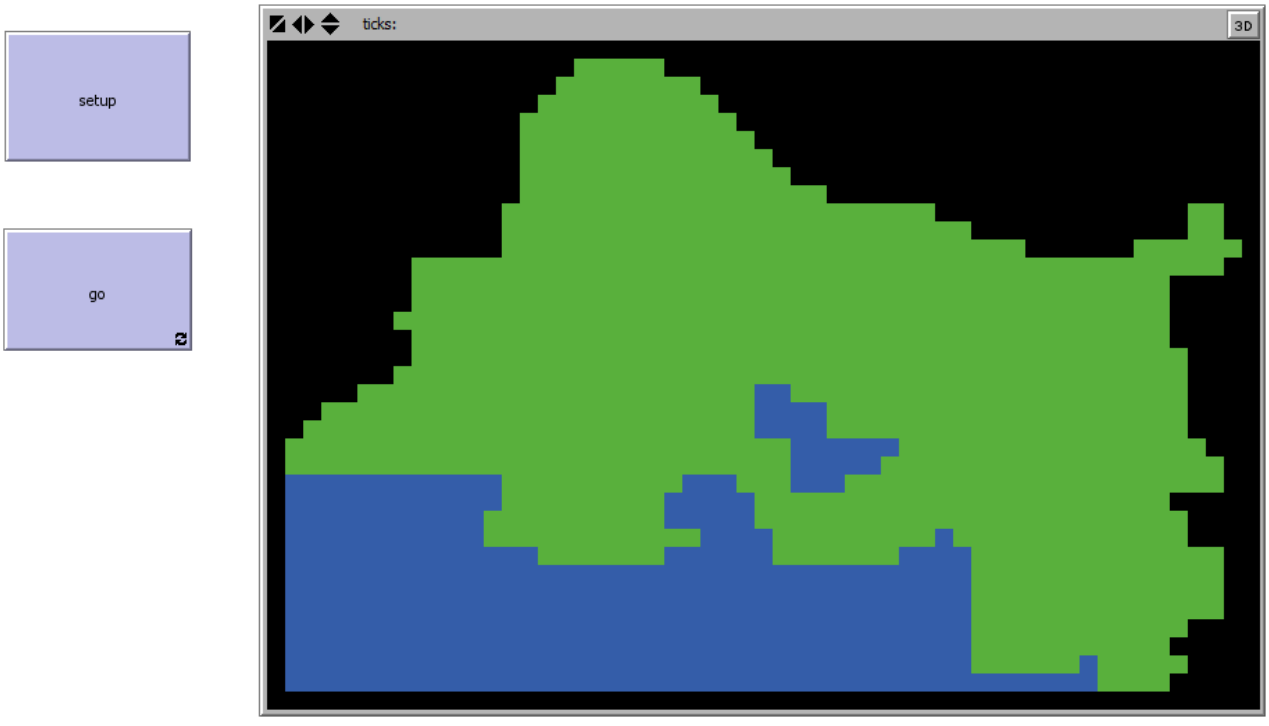
Cette initialisation nous donne les différents résultats suivants avec des départs de feux que nous voyons concentrer sur l'ouest de la carte ou même qui n'existe pas.



Deux feux se sont déclarés.



Trois feux se sont déclarés et dans des endroits différents que les précédents.



Nous observons que, dans ce cas, aucun feu ne s'est déclenché.

Regardons maintenant la partie mise en mouvement de notre programme.

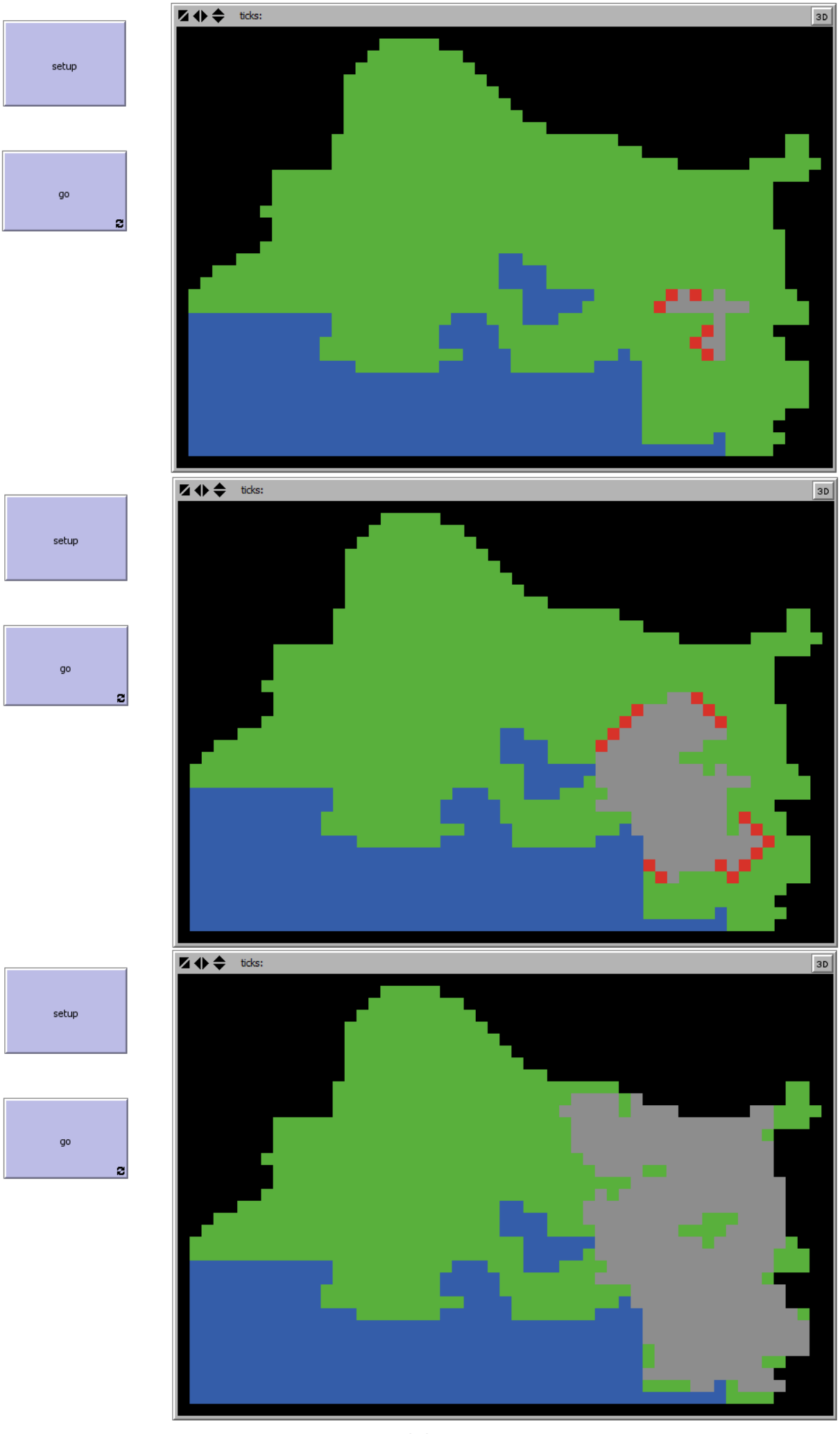
```
to go

 ;; Extinction des feux sur les zones ou la densite est trop faible (< min-densite)
 ask patches with [pcolor = red]
 [
  set x pxcor
  set y pycor
  set m matrix:get densite x (y-max + 1 - y)
  if (m < min_densite)
  [
   set pcolor gray
  ]
 ]

 ;; Mise en mouvement des autres feux
 ask patches with [pcolor = red]
 [
  ;; Initialisation des diverses variables
  set x pxcor
  set y pycor
  set m matrix:get densite x (y-max + 1 - y)
  set g-alti matrix:get altitude x (y-max + 1 - (y - 1))
  set d-alti matrix:get altitude x (y-max + 1 - (y + 1))
  set b-alti matrix:get altitude (x - 1) (y-max + 1 - y)
  set h-alti matrix:get altitude (x + 1) (y-max + 1 - y)
  set max-alti1 0
  set max-alti2 0
  set max-alti max-alti1
  ;; Calcul de la plus grande altitude
    ask patch (x - 1) y
    [
     if (pcolor = green)
     [
      set max-alti1 g-alti
     ]
    ]

    ask patch (x + 1) y
    [
     if (pcolor = green) and (max-alti1 < d-alti)
     [
      set max-alti1 d-alti
     ]
    ]

    ask patch x (y - 1)
    [
     if (pcolor = green)
     [
      set max-alti2 b-alti
     ]
    ]

    ask patch x (y + 1)
     [
      if (pcolor = green) and (max-alti2 < h-alti)
      [
       set max-alti2 h-alti
      ]
     ]

    ifelse (max-alti1 < max-alti2)
    [
     set max-alti max-alti2
    ]
    [
     set max-alti max-alti1
    ]
```

Si la zone possède une densité trop faible (ici inférieur à 40% qui vaut 8 pour notre échelle dans la matrice), le feu s'éteint tout seul.

```
  ;; Coloriage des cases de plus grandes altitudes
  ask patch (x - 1) y
  [
    if (g-alti = max-alti) and (pcolor = green)
    [
      set pcolor  red
    ]
  ]

  ask patch (x + 1) y
  [
    if (d-alti = max-alti) and (pcolor = green)
    [
      set pcolor  red
    ]
  ]

  ask patch x (y - 1)
  [
    if (b-alti = max-alti) and (pcolor = green)
    [
      set pcolor  red
    ]
  ]

  ask patch x (y + 1)
  [
    if (h-alti = max-alti) and (pcolor = green)
    [
      set pcolor  red
    ]
  ]

   ;; Coloriage des cases deja brulees
   set pcolor (pcolor - 1)
   set pcolor (pcolor - 1)
   set pcolor (pcolor - 1)
   set pcolor (pcolor - 1)
   set pcolor (pcolor - 1)

   if (pcolor < (red - 4))
   [
     set pcolor gray
   ]

 ]

 ;; Attente entre deux mises en mouvement
 wait 0.5

end
```

Le reste de cette partie ne différe en rien de la partie précédente. Il s'agit de la prise en compte de l'altitude dans la propagation de l'incendie, du coloriage des cases déjà brûlées suivies de la phase d'attente.

Maintenant, regardons le résultat final de ce programme sur une simulation.


setup
go
ticks:
3D
setup
go
ticks:
3D
setup
go
ticks:
3D

Nous pouvons donc observer ici l’évolution de notre simulation jusqu’à la fin.

5- Ajouts supplémentaires souhaités

Dans cette dernière partie du paragraphe programmation, nous parlerons des ajouts que nous aurions aimés apporter à notre programme que nous n'avons pas réussi par manque de temps et/ou de compétences.

Tout d'abord, nous aurions voulu prendre encore plus en compte la densité forestière en rendant des progressions plus lentes si une zone avait plus de choses à brûler. Il s'agit, ici, d'un manque de compétence. En effet, nous n'arrivions pas à créer des compteurs totalement indépendants pour chacun des feux. Les feux restaient, dans tous les cas, synchronisés les uns avec les autres.

Ensuite, nous aurions eu envie de faire une possibilité que le feu ne détruise pas chaque case directement, qu'il puisse faire au moins un deuxième passage sur chaque case. Le problème n'était, à notre sens, pas trop compliqué ; seul le temps nous manquait pour la réalisation de cette partie.

Enfin, nous aurions voulu rajouter le facteur du vent dans notre modèle selon des études statistiques de notre surface d'étude. Cependant, nous ne savions pas comment le modéliser, peut-être avec des matrices de couples indiquant le sens et l'intensité du vent en chacun des points. Le fait est que le manque de temps et de compétences nous restreignent pour la résolution de ce dernier problème.

Effectifs

Dans notre projet initial, notre objectif était le positionnement des différents effectifs de lutte contre l'incendie, à termes nous voulions les répartir grâce à notre programme.
Nous n'avons pas pu aboutir jusqu'à cette partie de notre projet, néanmoins nous savions déjà quels effectifs nous avions à disposition dans les Bouches-du-Rhône.

1- La flotte des avions bombardiers d'eau en France

- 12 Canadairs :

Capacité : 6 tonnes d'eau
Ecopage : 12s sur 1500m
Caractéristique : Toujours groupés par 4

- 9 Trackers :

Avion bombardier d'eau
Capacité : 3200 L
Caractéristique : Intervention sur les feus naissants (produits mouillant et retardant)

- 2 Dash :

Avion transporteur et bombardier d'eau
Capacité : 10 000L
Caractéristique : utilisation mixte pour le transport d'eau ou la faible émission d'eau.

Une grande partie de cette flotte est actuellement basée dans les Bouches-du-Rhône.

2- Effectifs routiers

Un Groupe d'intervention feu de forêt est composé de:

- 4 CCF : Camion-Citerne Feux de forêts (hors route), quantité d'eau en citerne : 2000 à 8000 litres. Equipé de lances tronconiques (4 positions différentes)

- 4 FPTL : Fourgon Pompe Tonne Litre, homologue de CCF mais routier, la citerne contient 1500 à 6000 litre avec un début de 1000 à 3000 litres par minutes

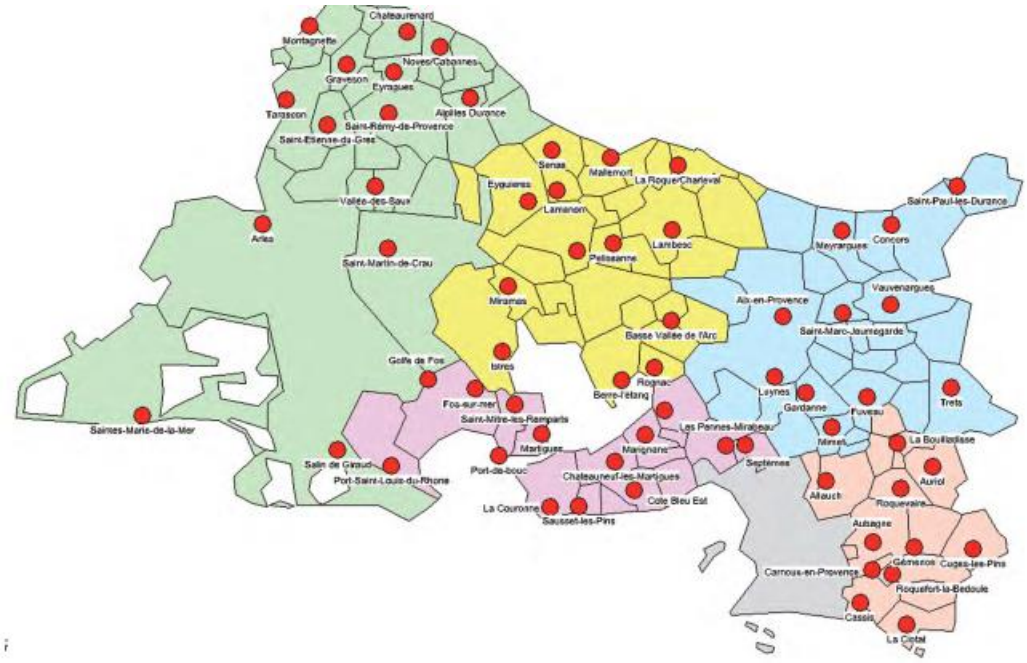
- 1 VLHR (Voiture de Liaison Hors Route) : véhicule tout terrain permet le transport des effectifs de commandement en tout lieu

3- Chiffres clefs du SDIS (Service Départemental d'Incendie et de Secours) des Bouches- du- Rhône

Les différents effectifs humains dans les Bouches-du-Rhône sont :

- 1 154 pompiers professionnels.
- 4 424 pompiers volontaires.
- 379 PATIS (Personnel Administratifs Techniques et Spécialisés).

On recense dans les Bouches-du-Rhône :
Plus de 1 535 véhicules.
63 centres d'interventions répartis sur les 5 groupements territoriaux.



Implantation des casernes du SDIS

Conclusion

Notre programme associé aux données sur les effectifs permet un positionnement optimal de ces derniers. Seulement, notre programme est loin d'être parfait. En effet, dans la vie réelle, les pompiers peuvent parcourir une certaine distance. Ainsi le positionnement ne suffit pas, il est nécessaire de prendre en compte le coût temporel et financier de leur déplacement. De plus dans le processus de lutte contre l'incendie, certaines décisions, politiques et économiques entrent en jeux. Certaines zones ne doivent absolument pas être touchées par un incendie alors que certaines peuvent brûler. Une centrale ferait d'énormes dégâts si elle était incendiée. D'un autre côté, un plan de garrigues peut être laissée sans sécurité car sa structure en buissons fait qu'un feu ne se propagera pas longtemps et donc s'éteindra de lui-même.

Un autre problème notable est les conditions météorologiques qui varient selon la région. Elles influent sur le taux d'humidité des espaces boisés. De plus, cette absorption varie selon le type de bois, la géographie...

Ainsi, le placement des effectifs dans la lutte contre les incendies est primordial. Cependant, tous les paramètres à mettre en corrélation sont extrêmement nombreux ce qui en fait un problème très complexe. Seule la nature peut comprendre tout ce mécanisme ; malgré tous ses efforts, l'homme, face à elle, est toujours impuissant.

Bibliographie

http://www.sdis13.fr/ : Service Départemental d'Incendie et de Secours des Bouches-du-Rhone.

http://www.promethee.com/ : La banque de données sur les incendies de forêts en région Méditerranéenne en France

http://ebrunelle.ep.profweb.qc.ca/maitrise.pdf

http://www.developpementdurable.gouv.fr

http://unpmc.free.fr/documents/parcnational/gip2007/PdM_Calanques_260907.pdf

http://www.ofme.org/documents/textesdfci/PDPFCI/PDPFCI_13_Annexes_1.pdf

Wikipédia