

# Etude d'un capteur adapté à la validation des modèles de feux de forêts

Khaled CHETEHOUNA, Olivier SERO-GUILLAUME & Alain DEGIOVANNI

LEMETA, INPL-UHP Nancy 1, URA CNRS 875 – 2, avenue de la forêt de Haye, B.P 160, 54516 Vandoeuvre cedex, France.

**Résumé** - Cette étude présente d'une part la mise au point d'un dispositif destiné à évaluer certaines grandeurs physiques lors d'un incendie de forêt (flux radiatif, température du gaz et sa vitesse). La description et la présentation technique de cet appareil ainsi que deux modèles thermiques (un complet et un réduit) sont proposés au cours de ce travail. L'estimation du flux de chaleur imposé a permis d'élaborer un modèle, appelé, modèle d'identification. Une étude de sensibilité aux paramètres du modèle réduit est présentée. Des expériences d'étalonnage du flux radiatif sont présentées. Les perspectives d'utilisation de ce capteur seront évoquées. De plus une méthodologie d'utilisation de ce capteur pour la validation des modèles de propagation de feux est proposée.

## Nomenclature

|   |  |
|---|--|
| $a$ diffusivité thermique du matériau, $m^2.s^{-1}$             | <i>Symboles grecs</i>                              |
| $T$ température, °C   | $\rho$ masse volumique, $kg.m^{-3}$                |
| $R, C_{ac}, r, R_{e1}$ et $R_{e2}$ paramètres du modèle complet | $\varphi_0$ densité de flux de chaleur, $W.m^{-2}$ |
| $R, C_{ac}, R_e$ paramètres du modèle réduit                    | $\sigma_b$ écart type de bruit de mesure, °C       |
| $X_j^*$ vecteur de sensibilité réduit                           | $\xi$ vecteur des paramètres                       |
| $k$ conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$                   | <i>Indices et exposants</i>                        |
| $h$ coefficient d'échange, $W.m^{-2}.K^{-1}$                    | <i>ac</i> Acier                                    |
| $S$ surface du cuivre, $m^2$                                    | <i>cu</i> Cuivre                                   |
|   | <i>e</i> environnement                             |

## 1. Introduction

Chaque année, les incendies de forêts sévissent à travers le monde et brûlent ainsi plusieurs centaines de milliers d'hectares. Leur passage dévastateur occasionne de lourds et nombreux dégâts. La flore, la faune, les biens matériels et parfois même les vies humaines ne sont pas épargnés. Pour protéger ces biens précieux et améliorer la lutte, il a donc été nécessaire de comprendre et d'approfondir les mécanismes de propagation d'un feu [1]-[2]. Plusieurs types de modèles de propagation de feu ont été développés, classés par ordre de complexité croissante, ce sont :

1)- les modèles *Statistiques* de type automates cellulaires : la forêt est divisée en sites pouvant prendre trois états (non brûlé, en feu, brûlé); ces états sont modifiés de façon probabiliste compte tenu de l'état des sites voisins. Ces modèles fournissent des codes extrêmement rapides, mais il est assez difficile de relier les transitions de probabilité des sites en fonction de paramètres physiques (vent, humidité, pente etc...).

2)- les modèles *Empiriques* [3] : la vitesse de propagation est déterminée en laboratoire en fonction de paramètres (vent, humidité, pente etc...), par un bilan local d'énergie. Ces modèles fournissent aussi des simulations rapides, mais la base de données expérimentales à établir est énorme. Pour des raisons de similitude physique, les expériences de laboratoire ne

représentent pas nécessairement les feux réels, les corrélations obtenues sont donc difficilement utilisables.

3)- les modèles "*Physiques complets*" [4], [5], [7], [8] : la végétation est considérée comme un milieu multiphasique. Les relations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie sont écrites sur les grandeurs moyennes et des relations de fermeture sont utilisées.

La "validation" des modèles de types 1) ou 2) repose uniquement sur l'identification de la vitesse de propagation du front de feu qui est la seule sortie de ces modèles. Les modèles de type 3) fournissent les champs de vitesse des gaz ainsi que le champ thermique. La validation de ces derniers passe alors par la détermination expérimentale des grandeurs physiques qui sont les sorties du modèles

Dans cette optique, nous proposons d'implanter sur le site plusieurs instruments de mesure de températures et de flux de chaleur du même type. Ils visent à mesurer les données nécessaires pour l'évaluation de certaines grandeurs physiques intervenant lors d'un incendie de forêt telles que : le flux radiatif incident, la température du gaz induit par la flamme ainsi que sa vitesse.

Le présent travail se propose d'étudier un prototype de cet instrument de mesure, fabriqué au sein de notre laboratoire.

## 2. Description du capteur

Le capteur que nous avons fabriqué au LEMTA (*figure 1*) répond aux conditions suivantes :

- Son échelle caractéristique est adaptée à celle utilisée par les modèles type 3)
- Il doit identifier les flux de chaleur.
- Il doit permettre l'évaluation moyenne du flux radiatif incident.
- Il doit permettre aussi l'évaluation moyenne de la température du gaz induit par la flamme ainsi que sa vitesse.
- Il a un faible coût.

### 2.1. Présentation technique

Une unité de ce capteur est constituée d'une armature en acier, d'une couche d'isolant thermique haute température, de couches de colle, de 4 plaquettes de cuivre et de 9 thermocouples gainés type K (*figure 2*).

Les caractéristiques physiques et les propriétés thermiques de chaque élément de ce capteur sont données dans le tableau 1 ci-dessous :

Tableau 1: *Caractéristiques physiques et thermiques du capteur*

|               | <i>Epaisseur</i><br><i>mm</i> | <i>Dimensions</i><br><i>mm<sup>2</sup></i> | <i>Hauteur</i><br><i>cm</i> | <i>k</i><br><i>W/m<sup>o</sup>K</i> | <i>ρ</i><br><i>kg/m<sup>3</sup></i> | <i>a</i><br><i>m<sup>2</sup>/s</i> |
|---------------|-------------------------------|--|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| Acier         | 2                             | 50 x 50                                    | 20                          | 46                                  | 7850                                | 0,12 .10 <sup>-4</sup>             |
| Cuivre        | 1                             | 40 x 40                                    | /                           | 389                                 | 8940                                | 1,14 .10 <sup>-4</sup>             |
| Isolant       | 6                             | 62 x 62                                    | 20                          | 0,10-0,23                           | 288                                 | /                                  |
| Colle         | 5                             | 40 x 40                                    | /                           | 0,29                                | /                                   | /                                  |
| Thermocouples | Gainés de diamètre 1 mm       |  |                             |                                     |                                     |                                    |

### 3. Modélisation du capteur

Nous avons représenté ce capteur par un schéma analogique (*figure 3*), ce dernier a permis de mettre en évidence cinq paramètres  $R, C_{ac}, r, R_{e_1}$  et  $R_{e_2}$  modélisant les échanges thermiques entre les différents éléments du capteur.

Pour réduire le nombre des paramètres, nous avons supprimé le paramètre  $r$  et considéré la température de la structure en acier uniforme (hypothèse validée par le petit écart entre les températures des faces d'acier) et remplacé les résistances  $R_{e_1}$  et  $R_{e_2}$  par une résistance équivalente  $R_e$  (*figure 4*).

### 4. Expériences et modèle d'identification

Nous avons mené au laboratoire 12 expériences d'identification en imposant sur chaque plaquette de cuivre trois échelons de flux de chaleur :  $\varphi_0^{(1)} = 1,10 \text{ kW/m}^2$ ,  $\varphi_0^{(2)} = 2,06 \text{ kW/m}^2$  et  $\varphi_0^{(3)} = 3,12 \text{ kW/m}^2$ . Lors de l'estimation de ces trois valeurs de flux, nous avons constaté qu'il faut introduire une résistance supplémentaire  $R_c = 60 \text{ K/W}$  modélisant le contact imparfait entre les plaquettes de cuivre et la source de chaleur. Nous proposons par la suite un modèle, appelé, *modèle d'identification* (*figure 5*) qui va permettre d'estimer les paramètres, inconnus, du modèle réduit  $R, C_{ac}$  et  $R_e$ .

### 5. Estimation des paramètres et étude de sensibilité

La solution du modèle d'identification est le couple de valeurs de température de la plaquette de cuivre et de la barre d'acier, soit :

$$\theta_{cu}(t) = T_{cu} - T_{ref} = K_1 \varphi_0 \{ 1 - \beta_3 e^{-\beta_1 t} - (1 - \beta_3) e^{-\beta_2 t} \}, \quad (1)$$

$$\theta_{Ac}(t) = T_{Ac} - T_{ref} = K_1' \varphi_0 \{ 1 - \alpha_3 e^{-\alpha_1 t} - (1 - \alpha_3) e^{-\alpha_2 t} \}, \quad (2)$$

où  $K_1, \beta_1, \beta_2, \beta_3; K_1', \alpha_1, \alpha_2$  et  $\alpha_3$  sont des fonctions des paramètres inconnus.

#### 5.1. Méthode d'estimation

La méthode des moindres carrés pondérée est utilisée pour l'estimation expérimentale des paramètres inconnus en minimisant la fonction:

$$S(R, C_{ac}, R_e) = \sum_i [\theta_{cu(th)}^*(t_i) - \theta_{cu(exp)}^*(t_i)]^2 + \frac{1}{10} \sum_i [\theta_{Ac(th)}^*(t_i) - \theta_{Ac(exp)}^*(t_i)]^2, \quad (3)$$

où  $\theta_{cu}^* = \frac{\theta_{cu}}{\theta_{cu}(t_{norm})}$ ,  $\theta_{Ac}^* = \frac{\theta_{Ac}}{\theta_{Ac}(t_{norm})}$  et  $t_{norm} = 847,6s$ .

#### 5.2. Etude de sensibilité et résultats

Pour vérifier la possibilité d'identification de l'ensemble des paramètres, nous proposons une étude de sensibilité de la température normée des plaquettes de cuivre aux paramètres du modèle, les sensibilités réduites étant définies par :

$$X_j^*(t, \xi) = \xi_j \frac{\partial \theta_{cu}^*(t, \xi)}{\partial \xi_j}, \quad (4)$$

où  $\xi = (R, C_{ac}, R_e)'$  est le vecteur des paramètres inconnus.

La matrice de variance-covariance sur les paramètres est donnée par la relation suivante :

$$V(\hat{\xi}) = \sigma_b^2 (X' X)^{-1} \quad (5)$$

où  $\hat{\xi}$  et  $\sigma_b$  sont respectivement, le vecteur des paramètres estimés et l'écart type du bruit de mesure.

Les valeurs des paramètres du modèle réduit ainsi que leurs écarts types sont montrés au tableau 2 ci-dessous :

Tableau 2 : Résultats de l'estimation en  $R, C_{ac}$  et  $R_e$  ( $\sigma_b = 0,016 \text{ } ^\circ\text{C}$ )

| $R \pm \sigma_R (K/W)$ | $C_{ac} \pm \sigma_{C_{ac}} (J/K)$ | $R_e \pm \sigma_{R_e} (K/W)$ |
|------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| $14,3 \pm 0,3$         | $144 \pm 11$                       | $3,2 \pm 0,1$                |

La figure 6 donne les courbes de sensibilité réduite; il est évident que les trois paramètres sont décorrélés et peuvent donc être identifiés simultanément ; on constate également ce qui est normal que les sensibilités s'annulent à  $847,6 \text{ s}$  ce qui correspond à  $t_{norm}$ , valeur utilisée pour la normalisation des températures théoriques.

## 6. Estimation du flux radiatif : Expériences et Résultats

Nous avons mené au laboratoire trois expériences en imposant sur le capteur, sur un fluxmètre et sur une plaquette de cuivre un flux de chaleur radiatif par une lampe Halogène de puissance de  $1 \text{ kW}$  (figure 7).

Les figures 8 et 9 montrent l'évolution des températures au cours de temps. Nous remarquons que la plaquette de cuivre répond que celles du capteur car ces dernières sont en contact avec des couches de colle. La température de référence  $T_{ref}$  est calculée à partir de deux thermocouples, un placé à l'intérieur du capteur donne  $T_{in}$  et l'autre placé à l'extérieur donne  $T_{ex}$ , soit :  $T_{ref} = \frac{T_{in} + T_{ex}}{2}$ .

Concernant les trois tracés du flux, montrés sur la figure 10, nous constatons que :

Dans l'intervalle du temps  $[0,600\text{s}]$  :

- Le flux estimé par la plaquette de cuivre est égal au flux mesuré par le fluxmètre.
- Le flux estimé par le capteur est plus faible par rapport à celui mesuré par le fluxmètre.

Dans l'intervalle du temps  $[600,1200\text{s}]$  :

- Le flux mesuré par le fluxmètre est plus faible par rapport aux autres flux.

## 7. Assimilation de données.

L'objectif final de l'utilisation du capteur est la validation des modèles. Nous allons évoquer sur un exemple dans cette section, la méthodologie de validation des modèles que nous envisageons de mettre en œuvre. Considérons le modèle de propagation 2D donné en Annexe, ce modèle est simplifié et peut être obtenu à partir du modèle « complet » développé en [7]. Il dépend de 16 paramètres. Certains de ces paramètres semblent avoir une signification intrinsèque comme la capacité calorifique. Rappelons cependant que ce modèle est issu d'un modèle tridimensionnel de milieu équivalent. Le capacité calorifique, par exemple est celle d'un milieu contenant du « bois » et du gaz. La mesure effective d'une telle capacité calorifique en laboratoire est très difficile. Il en va de même pour presque tous les autres paramètres du modèle. Disons que pour ce type de phénomènes (feux de forêt) il est très difficile de réaliser des expériences de laboratoire, où l'influence d'un seul paramètre puisse être isolée, et qui soit pertinente à l'échelle réelle. Ce problème se pose pour tous les modèles de systèmes naturels à grande échelle : Météorologie (échelle d'espace), Géologie (échelle de temps et d'espace)... On doit donc déterminer ces paramètres par des méthodes indirectes. On parle de méthode inverse ou quelquefois d'assimilation de données, l'assimilation de données s'appliquant plus spécifiquement aux conditions initiales.

### 7.1 Méthodes inverses, ou assimilation de données : Exemple d'utilisation.

Nous allons montrer sur un exemple la démarche associée à la détermination de paramètres par méthodes inverses. L'idée est d'obliger le système que forme le modèle à suivre au mieux des résultats expérimentaux. Considérons la propagation d'un feu sur une litière homogène telle que décrit par Curry et Fons en 1947 [9]. Ces auteurs donnent la surface brûlée en fonction du temps, notons là  $S_{ex}(t)$ . Considérons la fonction objectif suivante :

$$Obj = \int_0^T (\int_{S_{mod}(t)-S_{ex}(t)} dS) dt, \quad (6)$$

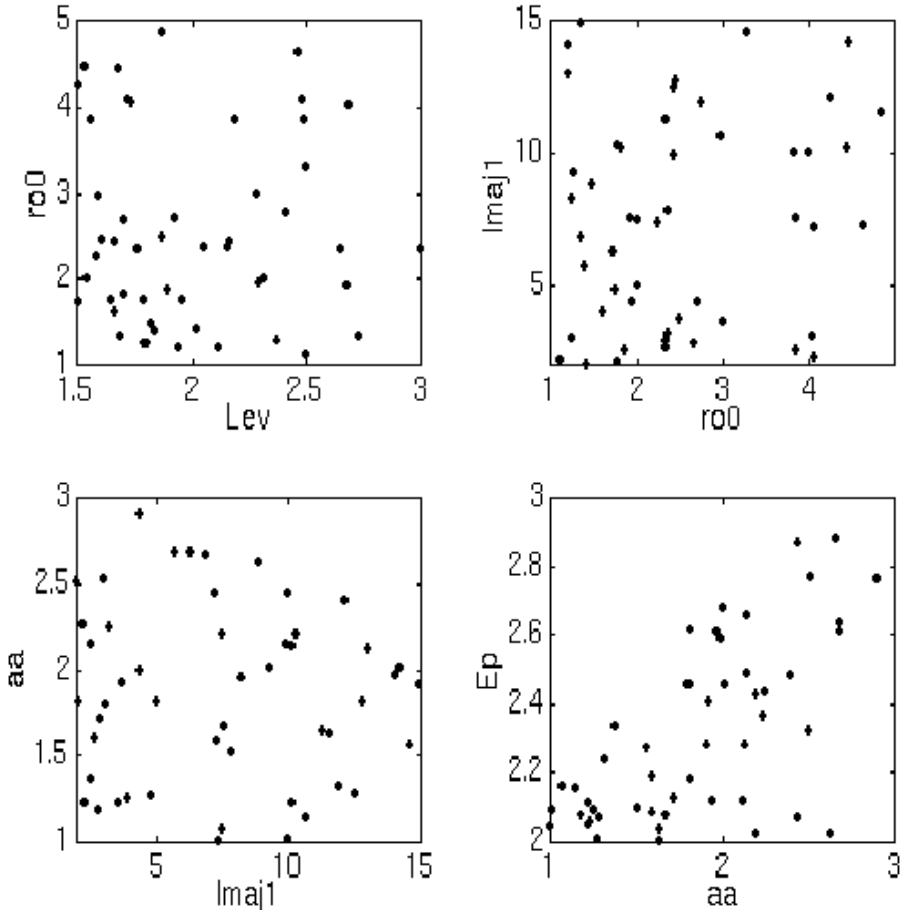
qui représente l'écart cumulé entre la surface brûlée expérimentalement et la surface brûlée obtenue par le modèle, notée  $S_{mod}(t)$ . Cette fonction  $Obj$  (comme fonction objectif) dépend alors des paramètres considérés comme inconnus dans le modèle. Une méthode d'assimilation consiste alors à chercher le jeu de paramètres pour lequel la fonction  $Obj$  est minimum. La minimisation d'une telle fonctionnelle est difficile. De façon à éviter les problèmes de convergence liés à la condition initiale, et pour explorer de façon la plus complète l'espace des phases, l'algorithme utilisé doit fournir le minimum global. La différentielle de la fonctionnelle (6) est complexe à obtenir, il est donc souhaitable de choisir une méthode de minimisation qui ne repose pas sur la direction de plus grande pente de la fonctionnelle. Nous avons donc choisi d'utiliser une minimisation de type algorithme génétique [10]. L'algorithme est le suivant

- 1) Génération d'une population de points dans le domaine acceptable, stockage des points dans une liste  $D$ .
- 2) Tri de ces points par valeur croissante de la fonction objectif.
- 3) Répartition de la population de points en  $p$  complexes  $A_1, \dots, A_p$ , chacun contenant  $m$  points.
- 4) Evolution indépendante de chaque complexe, puis réinsertion des points des complexes dans  $D$ .
- 5) La population se resserre autour du minimum alors fin de l'algorithme si la taille de  $D$  est suffisamment petite sinon retour en 2).

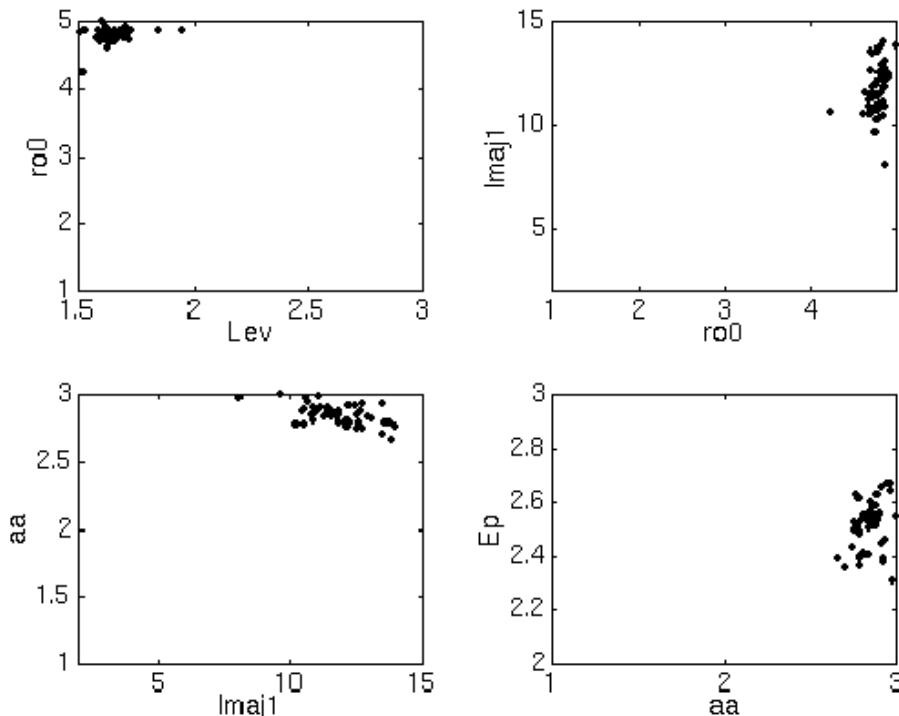
La taille de la population peut être visualisée en traçant des projections 2D de la population aux différentes générations.

Sur l'exemple des expériences décrites en [9], nous avons testée la méthode, en prenant comme paramètres d'optimisation : 3 paramètres associés à la flamme et un paramètre associé à la végétation. On voit sur les figures qui suivent que l'algorithme converge.

**Génération Initiale**



**Generation 11**



Les paramètres ainsi obtenus permettent de prévoir l'évolution du feu à moins de 1%. Cependant l'assimilation faite ici peut être qualifiée de géométrique, elle ne met en jeu que la surface brûlée. Une assimilation physique pose un ensemble de questions :

Quels paramètres doit on chercher à assimiler ?

Quelles grandeurs prendre en compte pour l'assimilation : Température, flux thermiques, vitesse des gaz, position du front de flamme, vitesse du front... ?

Combien de point de mesures sont nécessaires, quelle est l'influence de l'incertitude associée aux mesures, sur l'assimilation ?

Pour la méthode d'assimilation décrite ci dessus, quelle fonctionnelle objectif doit on choisir ?

## 8. Conclusion

Nous avons présenté, au cours de ce travail, une étude d'un prototype du dispositif expérimental destiné au domaine des feux de forêts. Les paramètres inconnus, modélisant les échanges thermiques entre les différents éléments de ce dispositif, ont été estimés avec leurs intervalles d'incertitude. Trois expériences d'étalonnage du flux radiatif ont été présentés lors de cette étude. La prochaine étape consiste à valider la reproductibilité des expériences du flux radiatif ainsi que la recherche d'une méthode permettant d'exprimer la vitesse de l'air en fonction des températures mesurés et des flux estimés. Le calibrage en situation réelle du capteur sera faite au CEREN, dans le nouveau tunnel à feu. Ce dernier sera instrumenté pour donner le flux radiatif et la vitesse des gaz au pendant la propagation de feux avec de la végétation réelle (chêne kermès).

De plus nous avons défini une méthodologie d'assimilation de paramètres, nous pourrions parler de « mode d'emploi du capteur ». L'ensemble des questions que posent l'utilisation du capteur représente un champ immense de recherche. Nos objectifs immédiats sont :

1°) Etude de la sensibilité par rapport aux paramètres du modèle donné en [8], les résultats de cette étude devraient permettre de choisir les paramètres à assimiler et ceux qui peuvent être évalués ou mesurés.

2°) Essai de différentes fonctions objectifs pour l'assimilation.

### Références

- [1] S.J. Pyne, P.L. Andrews and R.D. Laven, Introduction to Wildland Fire, 2<sup>nd</sup> edition U.S.A 1996.
- [2] L. Trabaud, Les feux de forêts : Mécanismes, comportement et environnement, édition France-Sélection 1992.
- [3] R.C. Rothermel, A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels, USDA Forest Service, 1972, Research paper INT-115, Ogden, Utah, USA, 40 p.
- [4] A.M. Grishin, Mathematical modeling of forest fires and new methods of fighting them, translated by M. Czuma, L. Chikina and L. Smokotina, ed. Frank Albini, 1997.
- [5] M. Larini, F. Giroud, B. Porterie, J-C. Loraud, A multiphase formulation for fire propagation in heterogeneous combustible media, International Journal of Heat and Mass transfer. 41 (6-7) (1998) 881-897.
- [6] J.V. Beck, K.J. Arnold, Parameter Estimation in Engineering and Science, John Wiley & Sons, New-York 1977.
- [7] O. Séro-Guillaume, J. Margerit, Modeling Forest : A complete Set of Equations Derived by Extended Irreversible Thermodynamic. Soumis à Combustion and Flammes. Mars 2000.
- [8] O. Séro-Guillaume, J. Margerit, Modeling Forest : Derivation of a two dimensional model of propagation and simulation. Soumis à Combustion and Flammes. Mars 2000.
- [9] J. R. CURRY, W. L. FONS, Rate of Spread of Surface Fires in the Ponderosa Pine type of California. J. of Agricultural Research. Vol. 57. p. 239-264. 1938.
- [10] O. SERO-GUILLAUME , T. FELICI, D. BERNARDIN, Asymptotic matching and genetic optimization applied to optimal aerospace design". International Journal of Systems Science, vol. 28, number 3, pp.229-240. 1997



figure Photographie du capteur.

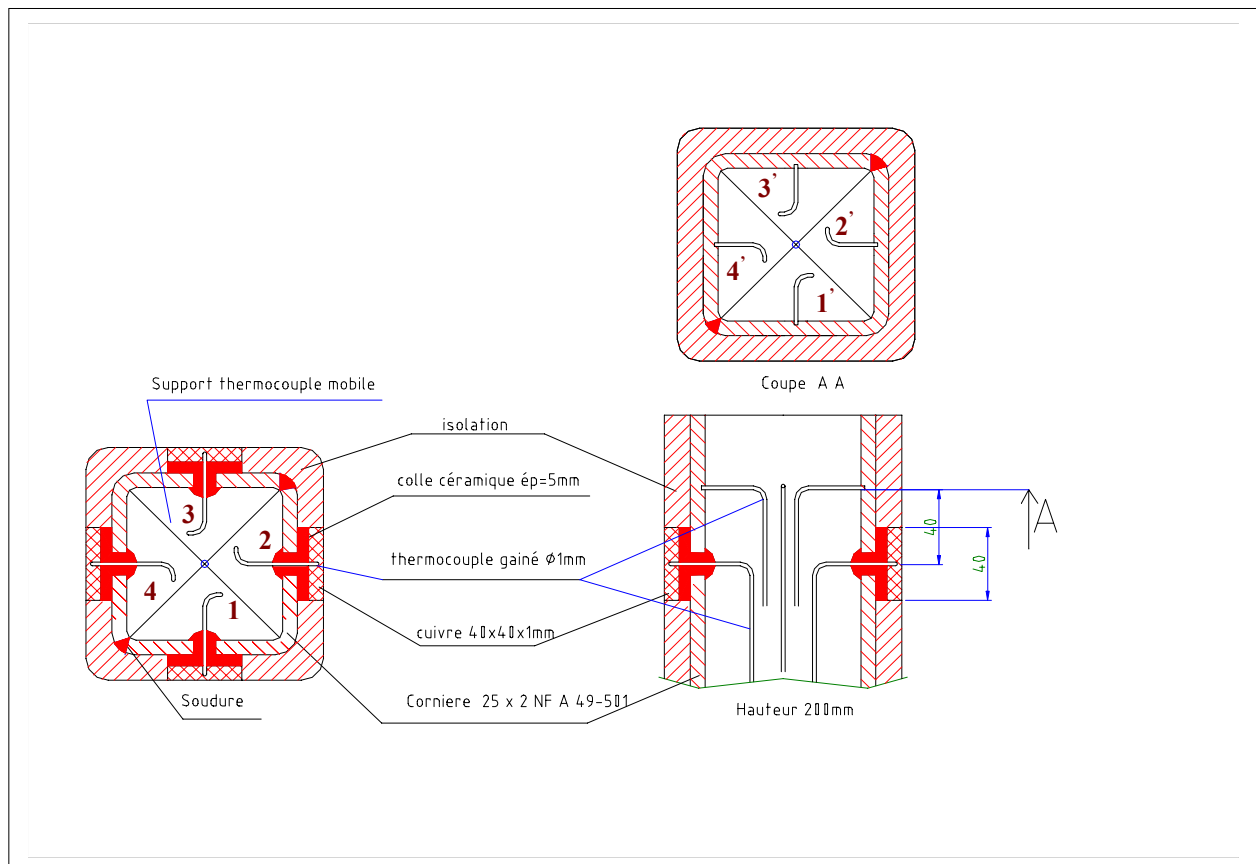


Figure 2 : Coupes horizontale et verticale du capteur

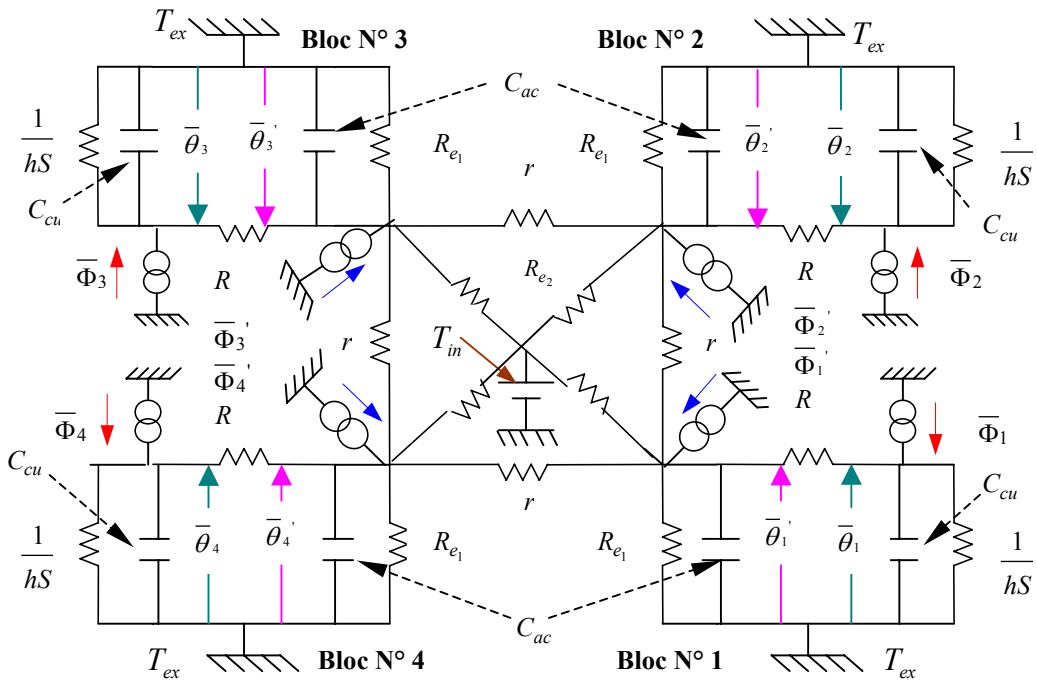


Figure 3 : Modèle complet du capteur - Schéma analogique -

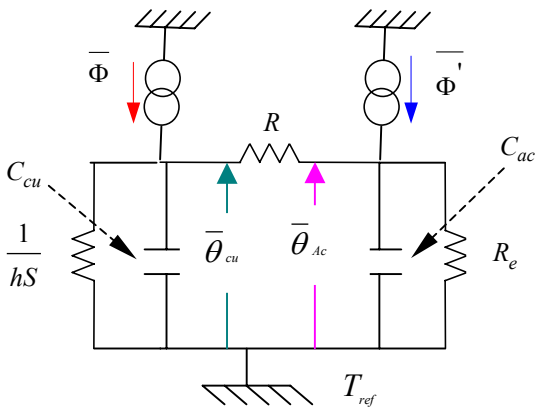


Figure 4 : Modèle réduit du capteur

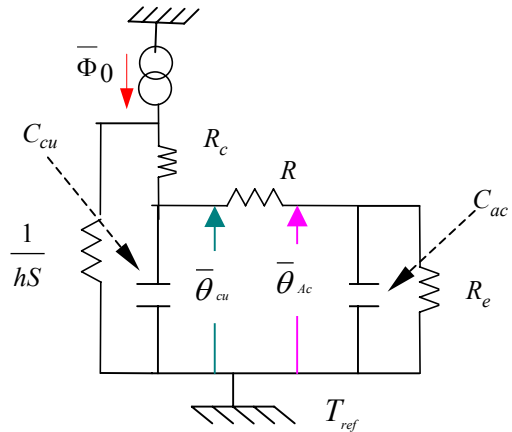


Figure 5 : Modèle d'identification

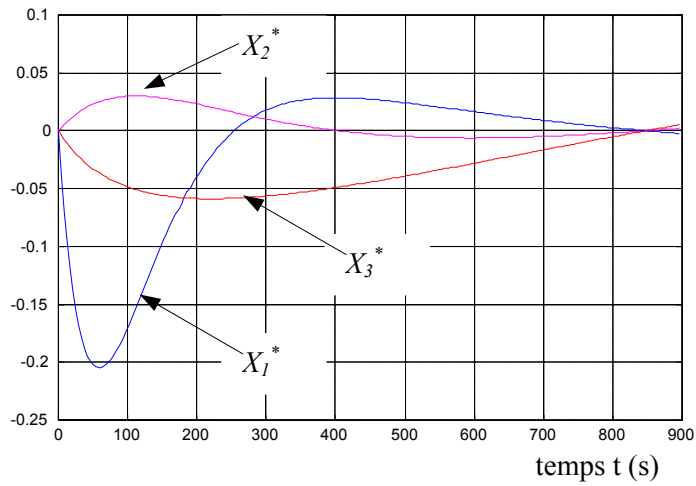


Figure 6 : Sensibilités réduites aux paramètres

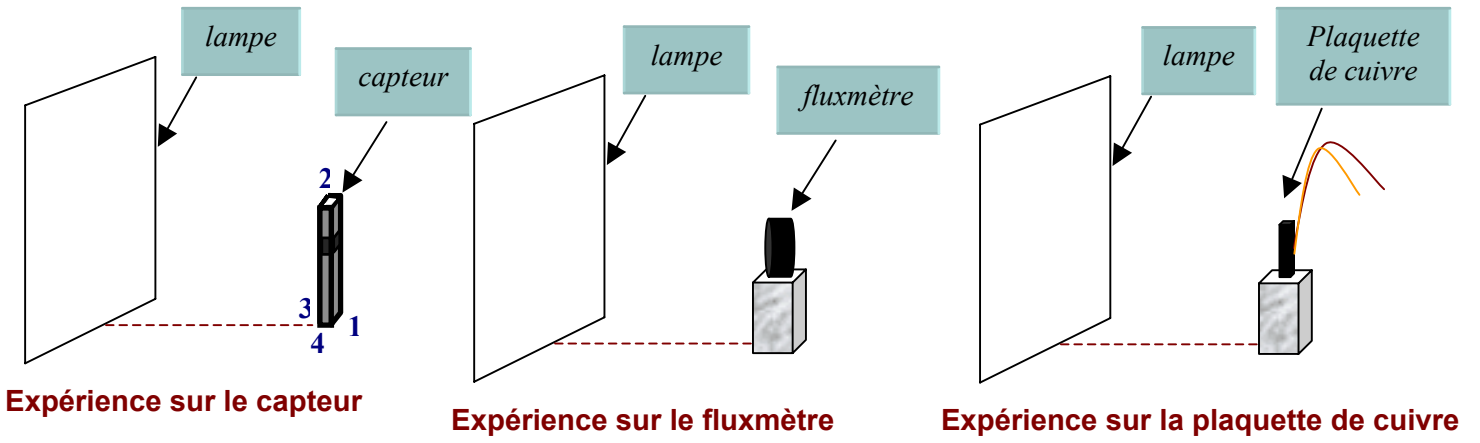


Figure 7 : Expériences du flux radiatif

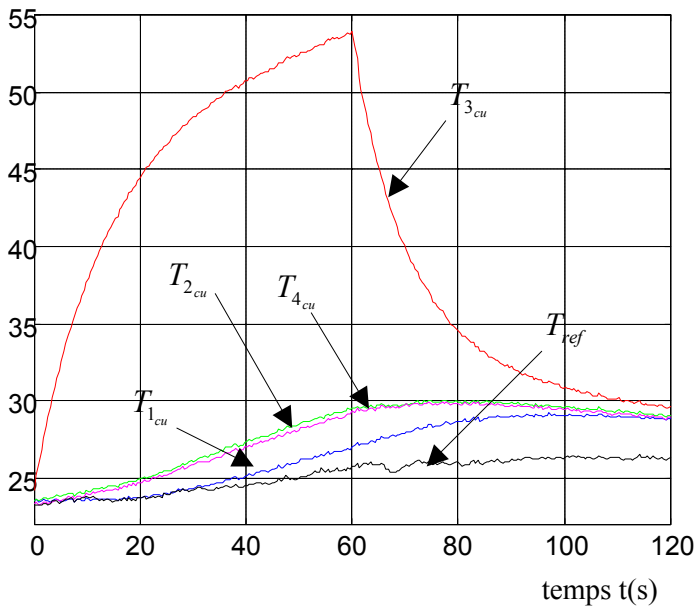


Figure 8 : Réponses du capteur à un créneau de flux

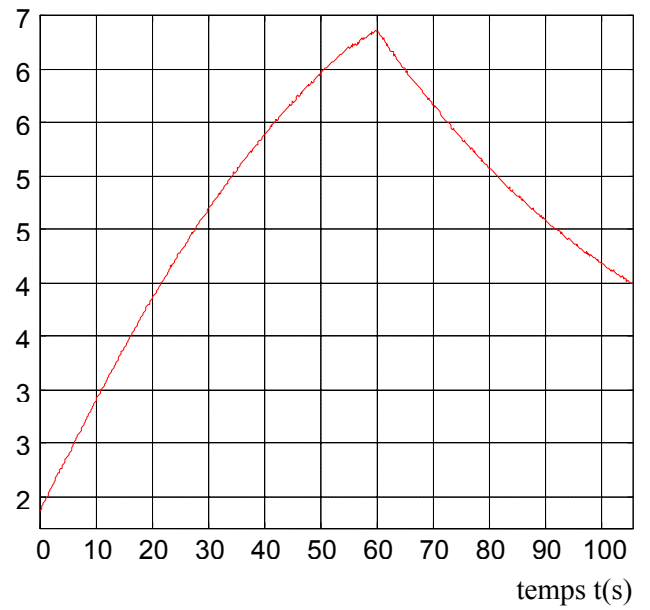


Figure 9 : Réponse de la plaquette de cuivre à un créneau de flux

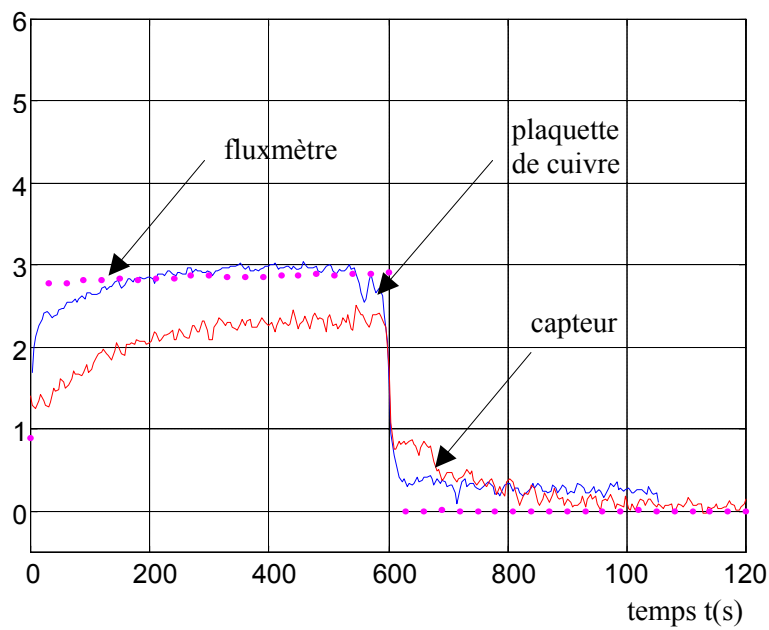


Figure 10 : Evolution des flux en Watts au cours de temps

**Annexe** : Un modèle de propagation.

i) Avant le front de flamme ( $T \leq T_{ig}$  et  $P_p \geq P_{ext}$ )

$$\begin{cases} P_p d_p + H_u C_w \frac{\partial T}{\partial t} = M_r - \delta K \bar{h} (T - T_a) & \text{if } T < T_{ev} \\ -P_p L_{ev} \frac{\partial H_u}{\partial t} = M_r - \bar{h} (T_{ev} - T_a) & \text{if } T = T_{ev} \text{ and } H_u = 0, \\ P_p C_p \frac{\partial T}{\partial t} = M_r - \bar{h} (T - T_a) & \text{if } T > T_{ev} \end{cases}$$

avec

$C_p$  capacité calorifique de la végétation,  $C_w$  capacité calorifique de l'eau;

$\delta$  hauteur de la végétation,  $\bar{h}$  coefficient de perte thermique;

$L_{ev}$  chaleur latente d'évaporation,  $T_a$  température ambiante.

$K = \beta\sigma / 4$ , est le coefficient d'extinction,

Le transfert radiatif est donné par :

$$M_r(\mathbf{M}, t) = \int_{\Omega} \varphi(\mathbf{P}, t) \xi^*(\mathbf{P}, \mathbf{M}) d\omega$$

avec:

$$\varphi(\mathbf{P}, t) = \delta h_f \frac{K(\mathbf{P}) B}{4\pi \pi} T^4(\mathbf{P}, t),$$

$$\text{et } \xi(\mathbf{P}, \mathbf{M}) = \frac{K(\mathbf{P})}{\|\mathbf{MP}\|^2} \exp\left(-\frac{K(\mathbf{P}) \|\mathbf{MP}\|}{H}\right) \frac{(1 + \sin^2 \alpha_f)(1 - \sin \alpha_f \cos(\varphi - \varphi_f))}{\cos^2 \alpha_f} \frac{\|\mathbf{MP}\|}{r}$$

ii) Dans la zone en feu ( $T > T_{ig}$  et  $P_p \geq P_{ext}$ )

La température est constante et égale à la température d'ignition.

$$T = T_{ig},$$

la variation de masse due aux réactions chimiques est donnée par :

$$\frac{\partial P_p}{\partial t}(\mathbf{P}, t) = v_r(\mathbf{P}, t - t_{ig}) P_p(\mathbf{P}, t),$$

$t_{ig}$  est l'instant d'ignition,  $v_r$  caractérise la vitesse de la réaction, on peut d'ailleurs considérer une loi d'Arrhenius:

$$v_r(\mathbf{P}, t - t_{ig}) = A \exp(-E / RT).$$

iii) Dans la zone brûlée ( $T \leq T_{ig}$  and  $P_p = P_{ext}$ ).

$$T = T_a$$

$$P_p = P_{ext}.$$

|   |  |
|---|--|
| $C_p = 2400 \text{ J / kg.K}$             | $C_w = 4180 \text{ J / kg.K}$              |
| $\delta = 1 \text{ m}$                    | $K = \beta\sigma / 4 = 0.2 \text{ m}^{-1}$ |
| $h = 44 \text{ J / m}^2 \cdot \text{s.K}$ | $L_{ev} = 2.25 \cdot 10^6 \text{ J / kg}$  |
| $T_a = 300 \text{ K}^\circ$               | $T_{ev} = 373 \text{ K}^\circ$             |
| $h_f = 2 \text{ m}$                       | $T_f = 1200 \text{ K}^\circ$               |

|  |   |
|--|---|
| $h = 44 \text{ J / m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}$ | $L_{ev} = 2.25 \cdot 10^6 \text{ J / kg}$ |
| $T_a = 300 \text{ K}^\circ$                            | $T_{ev} = 373 \text{ K}^\circ$            |
| $h_f = 2 \text{ m}$                                    | $T_f = 1200 \text{ K}^\circ$              |

avec  $\beta = 2 \cdot 10^{-3}$ ,  $\sigma = 400 \text{ m}^{-1}$ ,  $A = 5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,  $E = 1.398 \cdot 10^5 \text{ J / mole}$ ,  $R = 8.314 \text{ J / mole} \cdot \text{K}$

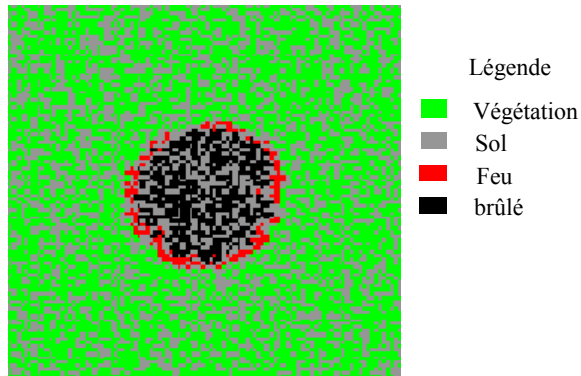
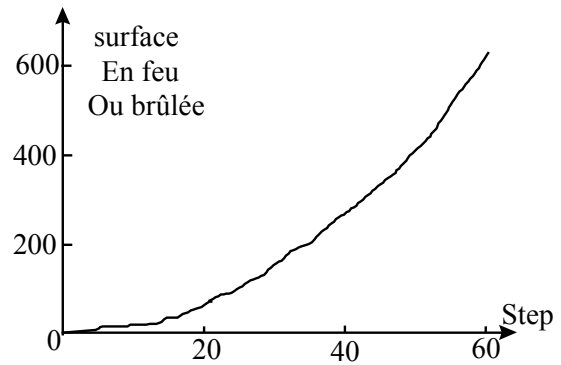
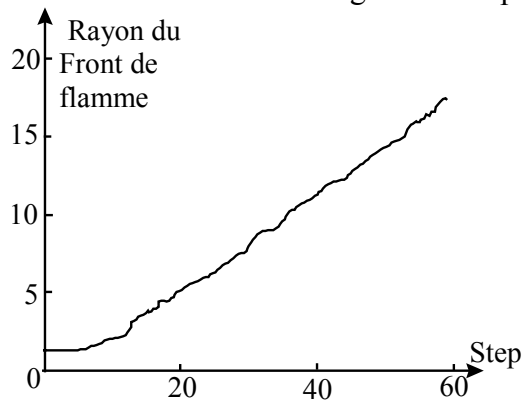


Figure 4 : Propagation du feu  $d = 0.7$ .



Figures 5,6 : Evolution du rayon et de la surface en feu.

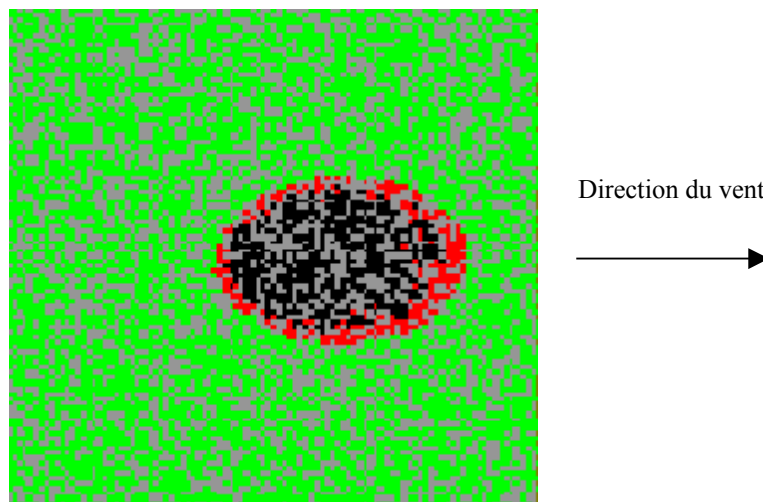


Figure 7 : Evolution du feu compte tenu du vent.

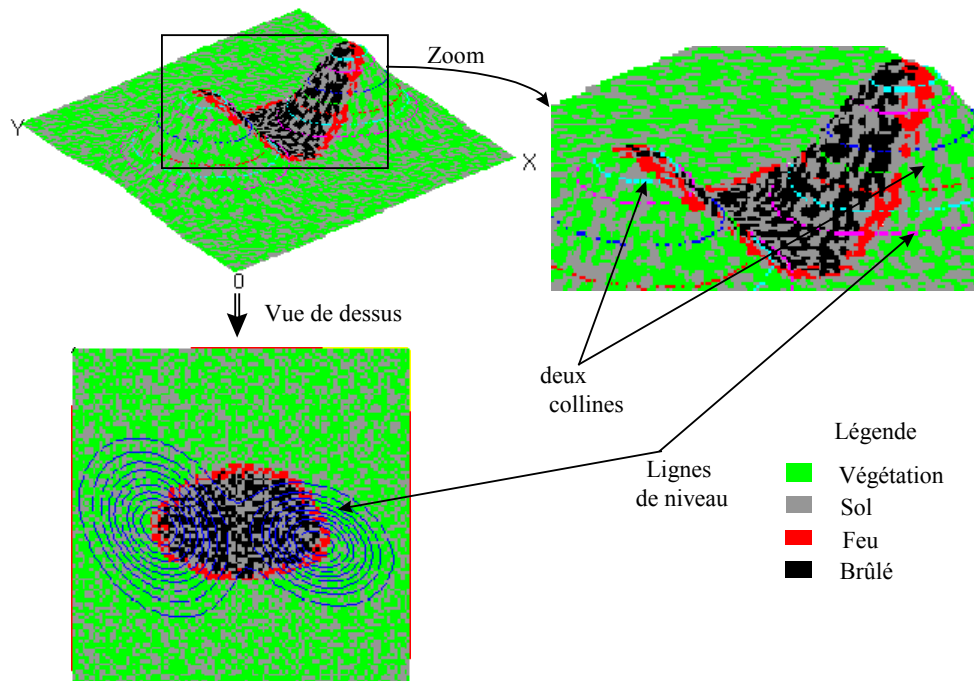
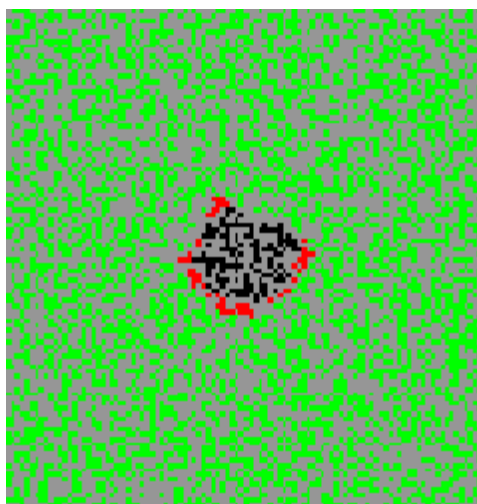
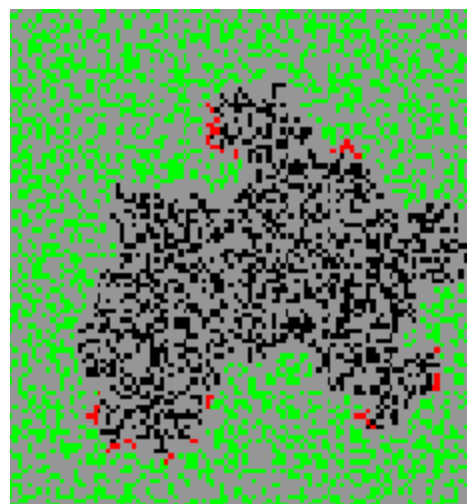


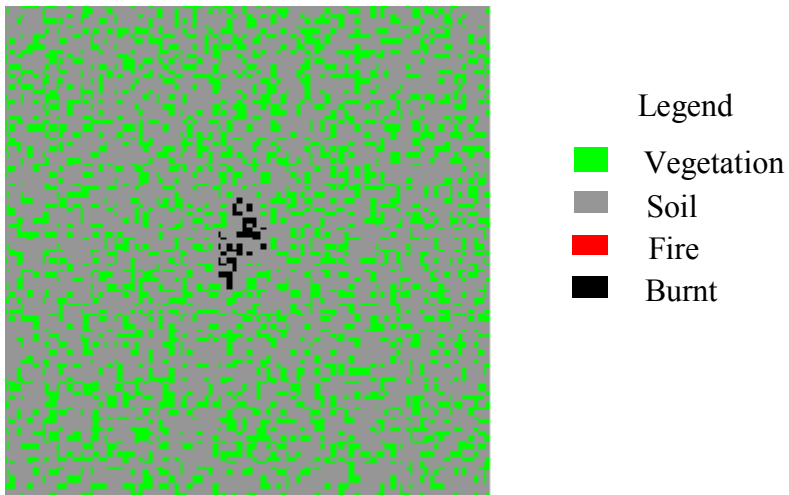
Figure 8 : Evolution d'un feu en présence d'une pente.



density  $d = 0.4$



density  $d = 0.39$



density  $d = 0.3$ , iteration 53

Figure 10 : Percolation process.

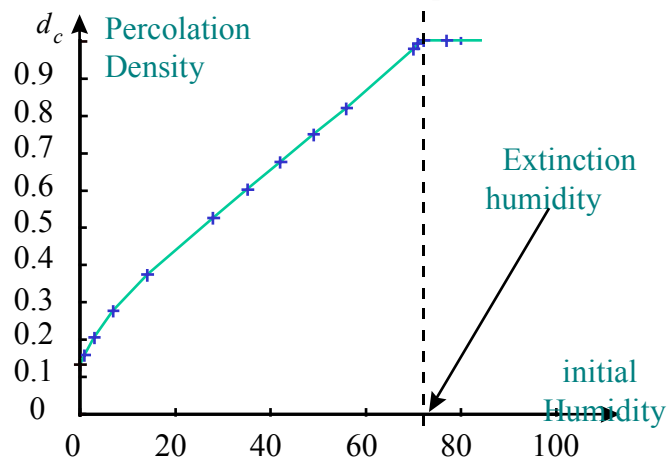


Figure 11 : Critical percolation density as a function of humidity.