



# Propagation par activité floue : application à la simulation du feu

Eric Innocenti, Paul-Antoine Bisgambiglia, Dominique Urbani

► **To cite this version:**

Eric Innocenti, Paul-Antoine Bisgambiglia, Dominique Urbani. Propagation par activité floue : application à la simulation du feu. Rencontres francophones sur la logique floue et ses applications , Oct 2014, Cargèse, France. <hal-01145573>

**HAL Id: hal-01145573**

**<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01145573>**

Submitted on 27 Apr 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Propagation par activité floue : application à la simulation du feu

## Propagation by fuzzy activity: application to fire simulation

E. Innocenti<sup>1</sup>

P.-A. Bisgambiglia<sup>1</sup>

D. Urbani<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Corse, CNRS UMR SPE 6134, équipe TIC

Campus Grimaldi, Bat PPDB, FST, Université de Corse 20250 Corti, [eric.innocenti@univ-corse.fr](mailto:eric.innocenti@univ-corse.fr)

Campus Grimaldi, Bat PPDB, FST, Université de Corse 20250 Corti, [bisgambiglia@univ-corse.fr](mailto:bisgambiglia@univ-corse.fr)

Campus Grimaldi, Bat PPDB, FST, Université de Corse 20250 Corti, [durbani@laposte.net](mailto:durbani@laposte.net)

### Résumé :

Nous présentons dans ce travail une approche de modélisation permettant de surmonter les limites techniques qu'impose la modélisation des systèmes complexes de propagation. Nous proposons une nouvelle technique de modélisation fondée sur un modèle à base d'automates cellulaires, capable d'intégrer de manière bénéfique le concept d'activité floue.

### Mots-clés :

Modèle cellulaire, Activité, SIF, Logique Floue, DEVS.

### Abstract:

We present in this work a new model formulation to overcome the limitations of conventional definitions of cellular models. We develop a modelling method to integrate with profit the new concept of fuzzy activity.

### Keywords:

Cellular Model, Activity, FIS, Fuzzy Logic, DEVS.

## 1. Introduction

Nous présentons dans ce travail une nouvelle méthodologie permettant d'utiliser la logique floue dans un modèle cellulaire intégrant le concept d'activité.

Les automates cellulaires [1], [2] sont régulièrement utilisés pour modéliser les phénomènes de propagation. Par exemple, ils sont utilisés pour simuler des modèles de feux [3], des modèles épidémiques de type SIR [4], des modèles de coulée de lave, des modèles d'occupation des sols, etc. Les modèles cellulaires sont des formes évoluées des automates cellulaires classiques de John von Neuman et Stanislas Ulam. Ils sont particulièrement bien adaptés à la simulation

informatique des phénomènes spatiaux complexes à grande échelle. En héritant des propriétés des automates cellulaires, ils bénéficient des avantages du phénomène de l'émergence. C'est-à-dire que malgré la définition de règles comportementales simplifiées et déterministes, ils génèrent des comportements d'ensemble, à priori non prévisibles.

Quand il s'agit de simuler des phénomènes complexes spatiaux à grande échelle, ces modèles peuvent devenir très lents à simuler s'ils n'intègrent pas le concept d'activité. Ce concept est présenté dans [5]. Il permet de n'activer qu'une partie des composants de l'environnement durant le processus de simulation. Pour cela, un ensemble d'éléments actifs est créé à partir des états locaux des cellules. Il contient l'ensemble des « cellules actives ».

Dans notre approche, l'utilisation d'un modèle cellulaire à base d'activité permet de séparer de manière modulaire l'expression des spécifications comportementales physiques du système (modèle comportemental local, règle de transition), et les spécifications comportementales de la propagation du phénomène (modèle de propagation, règle de propagation). Nous proposons une méthode basée sur des règles floues pour faire évoluer la gestion de l'activité. Avec notre méthode, les cellules pourront passer dans un état partiel nommé « *potentiellement actives* ». Nous proposons de formaliser cette évolution afin de dépasser les limites qu'imposent les définitions classiques des modèles cellulaires utilisant le

concept d'activité. L'implémentation du simulateur repose sur une architecture objet construite conformément au formalisme de modélisation DEVS [5]. Nous avons pour cela développé plusieurs bibliothèques objets pour représenter le modèle cellulaire (MC), et les différents éléments d'un système d'inférence floue (SIF).

Dans une première partie, nous présentons le formalisme à événements discrets DEVS, les modèles cellulaires, le concept d'activité, et certaines notions de la logique floue. Dans une deuxième partie, nous décrivons les principaux composants de l'architecture objet développée. Enfin, dans une troisième et dernière partie, nous discutons des résultats obtenus.

## 2. Concepts

La théorie des systèmes [6] et la théorie de la modélisation et de la simulation mettent à la disposition du modélisateur des solutions mathématiques et informatiques permettant de faciliter la compréhension des phénomènes complexes naturels. Ces théories fournissent des méthodes, des formalismes, des algorithmes, et des techniques pour modéliser et simuler les systèmes naturels. Le formalisme DEVS (Discrete Event System Specification) [5] est un formalisme modulaire et hiérarchique pour la modélisation, la simulation et l'analyse de systèmes dynamiques complexes. Il permet l'expression de modèles informatiques qui peuvent être à temps discrets, à événements discrets, ou encore à temps continus, comme ceux décrits, par des équations différentielles. Le formalisme DEVS permet en outre la modélisation hybride, c'est-à-dire la spécification de systèmes continus et discrets dans un même modèle informatique. De nombreux travaux de la communauté DEVS ont montré qu'il était facile et intéressant de représenter les modèles cellulaires avec ce formalisme [3], [7], [8]. Nous proposons dans ce travail notre propre interprétation, basée sur les définitions suivantes.

### 2.1 Modèles cellulaires

Les modèles cellulaires sont des spécialisations des automates cellulaires permettant d'étendre les fonctionnalités du modèle de base. Nous pouvons définir un modèle cellulaire comme « un automate cellulaire auquel on a ajouté un ou plusieurs éléments structurels et fonctionnels afin de le spécialiser ». Formellement, cela revient à écrire :  $CM = (Z^d, S, N, \delta_{int}, \Delta, \Lambda)$  où :  $Z^d$  est l'ensemble des d-tuples de nombres entiers identifiant les cellules de la grille;  $S$  est l'ensemble fini des états que peut prendre une cellule de la grille;  $N$  est un sous-ensemble fini de  $Z^d$  appelée voisinage;  $\delta_{int}$  est la fonction de transition interne, permettant le passage d'un état  $s_1$  de  $S$  à un nouvel état  $s_2$ ;  $\Delta$  est une spécialisation structurelle, et  $\Lambda$  est une spécialisation fonctionnelle.

Les modifications entreprises depuis les automates cellulaires originels concernent aussi bien les éléments structurels (grille, voisinage, etc.), que les éléments fonctionnels (nombre et nature des fonctions de transition, synchronisme, etc.).

Les modèles cellulaires ont de nombreux avantages, mais comme nous l'avons rappelé les simulations à grande échelle peuvent devenir trop longues à exécuter. Le concept d'activité, la parallélisation ou la distribution des composants apportent des solutions aux problèmes concernant les temps d'exécution. Nous reformulons ici le concept d'activité et nous nous attacherons lors de futurs travaux à paralléliser les composants de simulation [9].

### 2.2 Concept d'activité

Le concept d'activité consiste à identifier dynamiquement à l'instant  $t$  les composants actifs du modèle susceptibles de changer d'état, ou qui basculeront dans un état définitivement inchangé à l'instant  $t+1$ . Nous mesurons l'activité du modèle cellulaire au niveau le plus haut de la hiérarchie des composants, grâce à un ensemble de cellules

actives. Le niveau local informe ainsi le niveau global de l'activité du modèle.

Soient :

- $c$  une cellule,
- $S$   $\{IS, gS\}$  l'ensemble des états de la cellule  $c$ ,
  - $IS$  les états locaux  $\{Active ; Inactive\}$ ,
  - $gS$  les états globaux ou physiques,
- $cC$  la cellule courante,
- $ecV$  l'ensemble des cellules voisines de  $cC$ ,
- $ecA$  l'ensemble des cellules actives,

$IS\{cC\} \leftarrow Active$  ssi  $gS\{cC\}$  entraîne une action,

$c \in ecV, IS\{c\} \leftarrow Active$  ssi  $IS\{cC\} = Active$

$ecA \leftarrow c$ .

Les systèmes à événements discrets (DES) possèdent leurs extensions floues (FDES [10]), et le formalisme DEVS possède également son extension floue appelée Fuzzy-DEVS [11]. Les modèles cellulaires ont également été étendus aux préceptes de la logique floue [12]–[14]. De manière générale ces extensions expriment toutes le même type de spécialisation. Elles *fuzzifient* les principales caractéristiques des automates cellulaires comme la fonction de transition ou le délai entre deux transitions [14]. Les automates cellulaires flous (FCA) constituent un type particulier de modèles cellulaires où la règle de transition locale est décrite par une fonction de transition floue [12], la règle de transition locale est *fuzzifiée*. L'approche proposée dans notre travail est différente car elle introduit la *fuzzification* au niveau de la gestion de l'activité (règle de propagation). Pour cela, nous utilisons un système d'inférence floue (SIF).

## 2.4 Systèmes d'inférence floue

Les SIF [15], [16] sont composés d'une collection de règles de forme générale : '*Si p alors q*'. La conception des SIF exige en général des connaissances expertes pour définir les termes linguistiques correspondant aux variables (ensemble de fonctions d'appartenance), et l'expression d'algorithmes

d'apprentissage ou de méthodes empiriques pour générer les règles d'inférence.

Pour décrire notre SIF, nous avons utilisé nos précédents travaux [17]–[20]. Dans [18], [19], nous proposons une structure de données (classe *FuzzySet*) pour représenter un objet de type '*sous-ensemble flou*', et un modèle DEVS permettant de simuler des imprécisions. Dans [17], [20], nous élaborons une structure de données modulaires capable de représenter un SIF. Un nouveau composant appelé *FuzzySets*, permet de stocker plusieurs objets de type *FuzzySet* puis d'appliquer les fonctions de defuzzifications classiques [21].

## 3. Cadre expérimental

Les concepts présentés précédemment ont été implémentés en langage Python. Comme le souligne la Figure 1, ci-dessous, notre framework s'articule autour de trois groupes de composants (Cellular Automata, Fuzzy Framework, DEVS Framework) et sur un composant dédié au traitement des résultats des simulations (Experiments Framework).

### 3.1 Matériel

Le cœur du simulateur repose sur la mise en œuvre du formalisme DEVS. Cela nous permet de modéliser et de simuler ultérieurement d'autres systèmes. Les algorithmes de simulation sont donc conformes aux spécifications du formalisme DEVS. Nous avons également développé des composants détaillant le comportement du modèle cellulaire et ses sous-ensembles flous. La partie expérimentale repose sur un programme principal séquentiel qui permet d'instancier et de coordonner les composants des différentes bibliothèques du framework.

### 3.2 Modèle

Les simulations effectuées dans ce travail traitent de la propagation d'un feu de forêt. Le modèle physique utilisé est volontairement simple.

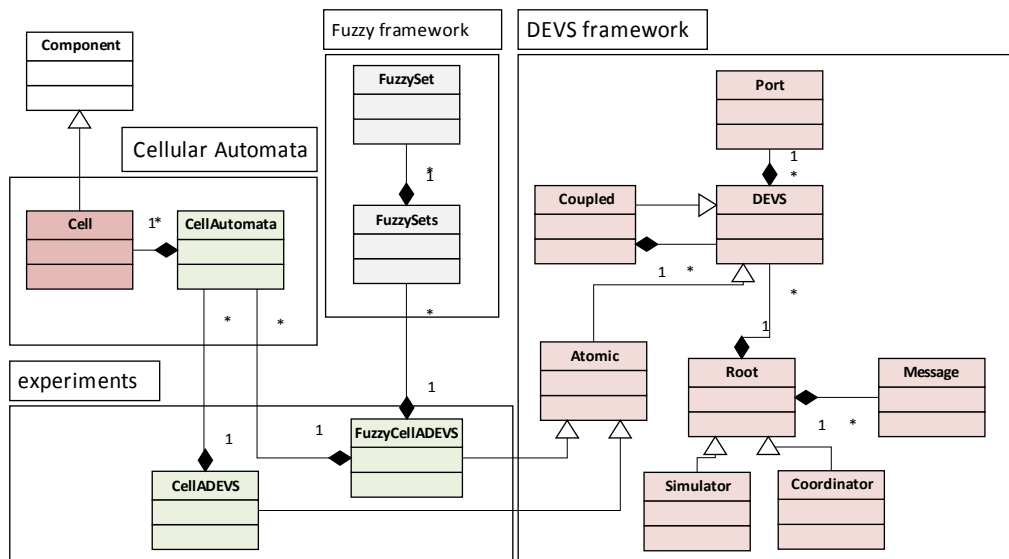


Figure 1 – Diagramme de classes de l'architecture objet développée.

La problématique soulevée par ce travail est axée sur la mise en place d'une méthode floue de gestion de l'activité. Elle ne nécessite pas l'expression d'un comportement physique élaboré. Nous utilisons un modèle empirique de propagation que nous avons fondé sur l'observation expérimentale des temps de combustion d'une quantité homogène de végétaux, lors d'expériences à grande échelle. Le modèle physique décrivant le comportement de combustion locale pourra être complexifié ultérieurement, celui-ci étant lié de façon modulaire au comportement de propagation grâce au concept de l'activité. Nous avons identifié quatre *états physiques* qui sont fonctions de la température de combustion d'une cellule en fonction de sa masse: (*P*) préchauffage, (*C*) combustion, (*R*) refroidissement, (*B*) brûlé. Pour chacun de ces états transitoires, nous avons exprimé analytiquement le temps nécessaire à la combustion de la masse végétale d'une surface élémentaire : la cellule. Pour cela, chaque objet cellule possède plusieurs propriétés dont un état local intégrant la notion d'activité. Si une cellule est active, nous exécutons sa fonction de transition interne et son prochain état est calculé. Dans un modèle cellulaire basique, si une cellule est active, sa fonction de voisinage

active toutes les cellules voisines inactives conformément à la règle d'activité décrite section 2.2. L'expression d'une règle de propagation trop simplifiée engendre un comportement de propagation trop linéaire et des sorties graphiques peu réalistes.

Pour exprimer plus finement la complexité du phénomène de propagation, nous avons utilisé dans un premier temps une règle stochastique. Soient :

- *c* une cellule,
- *S* {*IS*, *gS*} l'ensemble des états de la cellule *c*
  - *IS* les états locaux {Active ; Inactive},
  - *gS* les états globaux {*P* ; *C* ; *R* ; *B*},
- *cC* la cellule courante,
- *ecV* l'ensemble des cellules voisines,
- *ecA* l'ensemble des cellules actives,
- *dP* une distribution de probabilité,
- hasard un tirage aléatoire.

$$IS\{cC\} \leftarrow \text{Active ssi } gS\{cC\} = (P \text{ ou } C \text{ ou } R)$$

$$c \in ecV, IS\{c\} \leftarrow \text{Active ssi } IS\{cC\} = \text{Active et hasard} > dP$$

$$ecA \leftarrow c$$

Les figures 2 et 3 décrivent un résultat de simulation à partir de la méthode stochastique, et avec la règle d'activité décrite ci-dessus.

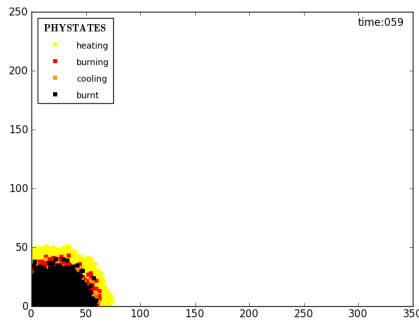


Figure 2 - Etats physiques des cellules t=59  
 approche stochastique classique (Noire :  
 brûlées, Orange : qui refroidissent, Rouge : en  
 combustion, Jaune : incandescentes).

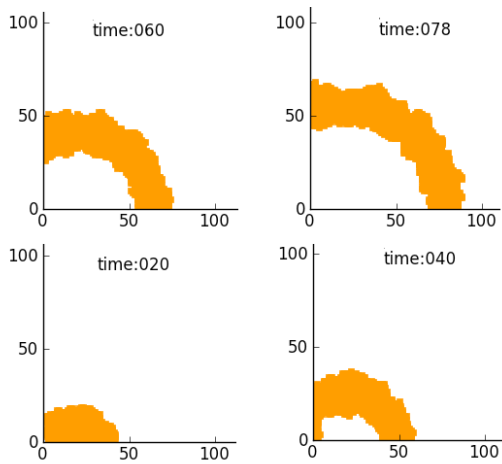


Figure 3 - Cellules actives dans le temps  
 simulé (activité stochastique).

Nous souhaitons maintenant comparer les résultats obtenus à partir de l'approche stochastique à ceux que l'on obtient en utilisant l'activité floue.

Rappelons que dans tous les cas, notre approche commande d'instaurer un ordre chronologique entre règle comportementale (règle de transition) et règle de propagation (règle d'activité). Le modèle de combustion est basé sur la *règle de transition* régissant son comportement. La propagation est quant à elle dirigée par la *règle d'activité*. Dans le modèle de base, il a déjà été prouvé que l'expression de cette *règle d'activité* quand elle est stochastique, améliore le rendu des simulations [3]. Nous proposons ici une nouvelle approche permettant d'exprimer la règle d'activité avec des règles floues intégrées dans un *SIF*.

### 3.3 Modèle flou

Nous utilisons des règles floues pour formaliser un doute sur la possible activité des cellules voisines impliquées dans la propagation du phénomène. Ce doute est dû au manque d'information habituellement constaté quand il s'agit de prendre la décision de propagation depuis les états physiques lors de la simulation. Afin de garantir la généralité de notre approche, nous avons volontairement exclu de modifier le modèle physique de combustion. Les états physiques considérés pour exprimer l'activité sont toujours les mêmes quelle que soit l'expérimentation envisagée (classique, stochastique ou floue). Nous proposons de placer les cellules dans un état partiel d'activité : possiblement active *PActive*. Cet état transitoire nécessitera de réévaluer l'activité de la cellule au prochain pas de temps. Par exemple, si une cellule ne possède qu'une seule cellule voisine active, nous ne l'activerons pas, si au pas de temps suivant, elle en possède plus de  $N$  ( $N > 1$ ), nous l'activerons. Il faut donc redéfinir les *règles de propagation* en fonction de *règles de décision* exprimées avec des règles floues (redéfinition de la méthode d'activation des cellules). Cette solution permet d'évaluer l'activité des cellules voisines d'une cellule active à l'aide de *règles floues*, grâce à la mise en place d'un *SIF*. Cela nous permet de nous affranchir de l'utilisation d'une règle booléenne trop simpliste, ou d'une règle stochastique nécessitant de nombreuses réplifications. La méthode floue permettrait donc un gain de temps important.

Nous définissons donc l'état intermédiaire nommé *PActive*. Une cellule active modifie l'état de ses voisines inactives. L'état d'inactivité des cellules voisines devient partiellement actif : *PActive*. Un coefficient d'influence qui dépend de la température des cellules actives voisines est introduit dans chacune des cellules. Le calcul de ce coefficient, nécessite de faire la moyenne des températures des cellules actives du voisinage.

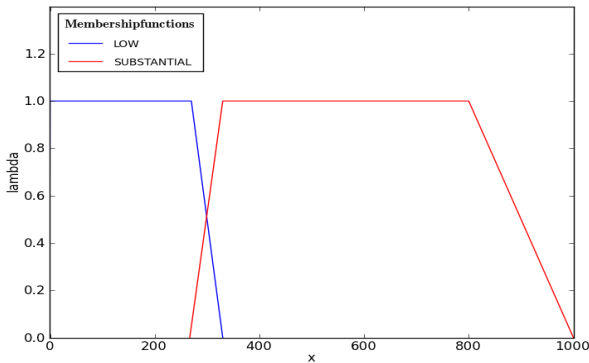


Figure 4 - Entrée du SIF : influence en fonction de la température de la cellule courante sur ses voisines.

Le calcul de l'activité d'une cellule à partir de son coefficient d'influence est complété avec un SIF qui possède en entrée les SEF présentés sur la Figure 4: influence basse (LOW), et influence importante (SUBSTANTIAL) avec comme abscisse la température de la cellule. L'entrée réelle du SIF est donc la température de la cellule active. Nous stockons dans les cellules voisines le couple : label, degré d'appartenance, obtenu en fonction de la température : c'est l'étape de *fuzzification*.

À chaque voisine correspond un ensemble de labels linguistiques de taille variable. Le moteur d'inférence mis en place est dynamique, car nous ne connaissons pas à l'avance le nombre de voisines prises en compte, et donc la taille de l'ensemble.

Soient :

- c une cellule,
- S {IS, gS} l'ensemble des états de la cellule c,
  - IS les états locaux {Active ; PActive ; Inactive},
  - gS les états globaux {P ; C ; R ; B},
- cC la cellule courante,
- ecV l'ensemble des cellules voisines,
- ecA l'ensemble des cellules actives,
- ecpA l'ensemble des cellules partiellement actives.

IS{cC} ← Active ssi gS{cC} = (C)  
 c ∈ ecV, IS{c} ← Active  
   ssi plusieurs IS{cC} = Active (SIF)  
 ecA ← c  
 sinon IS{c} ← PActive

ecpA ← c

Les règles sont assez simples :

- si le nombre des labels linguistiques de type SUBSTANTIAL est inférieur ou égal à 1 alors l'activité de la cellule est PASSIVE ;
- si le nombre de SUBSTANTIAL est inférieur ou égal à 2 alors l'activité de la cellule est PACTIVE (Partiellement Active) ;
- si le nombre de SUBSTANTIAL est supérieur à 2 alors l'activité de la cellule est ACTIVE ;

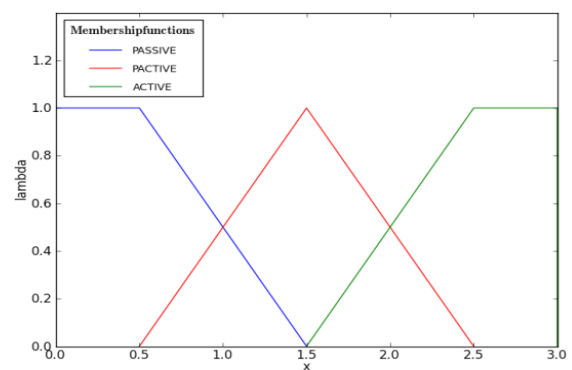


Figure 5 - Sortie du SIF : niveau d'activité de la cellule.

Nous décrivons sur la Figure 5 le SEF de sortie du SIF. Grâce au résultat du moteur d'inférence, et après *défuzzification*, nous obtenons un niveau d'activité pour chacune des cellules. Après cette étape, nous obtenons trois types de cellules, les *cellules Actives*, les *cellules PActives*, et les *cellules Inactives*. Il va donc falloir traiter les cellules partiellement actives, afin de déterminer si elles évoluent vers l'état inactif ou actif en fonction du coefficient d'influence. Les résultats que nous obtenons sont présentés dans la section suivante.

## 4. Résultats et discussion

Nous avons simulé 80 unités de temps dans un environnement cellulaire de 350x250 cellules. Le processus d'initialisation procède de l'activation de huit cellules du domaine: elles sont enflammées.

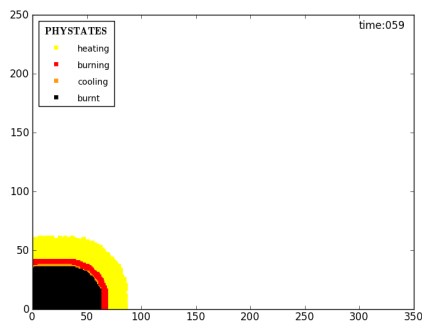


Figure 6 - Etats physiques des cellules t=59 activité floue.

Les Figures 2 et 6 présentent les différents états physiques au temps simulé t=59. La Figure 2 est issue de la simulation stochastique, et la Figure 6 de la simulation avec activité floue.

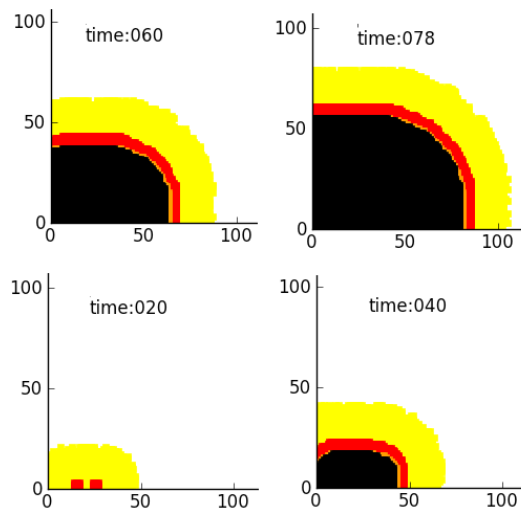


Figure 8 - Evolution des états physiques du modèle à base d'activité floue.

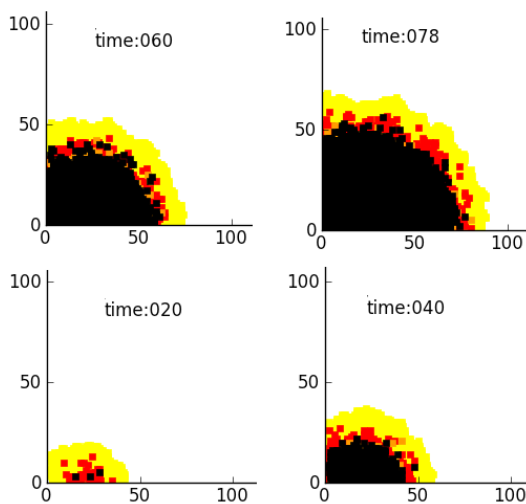


Figure 7 - Evolution des états physiques du modèle à base d'activité stochastique.

Nous observons que l'activité floue génère un phénomène de propagation régulier et plus rapide. Les Figures 7 et 8 présentent les résultats aux temps de simulation t=20, 40, 60 et 78. Nous observons que l'activité floue a tendance à accélérer le processus de propagation et que le phénomène présente une forme assez régulière. Au regard des résultats énoncés dans [14], nous pensons obtenir une dynamique de propagation plus chaotique que celle que nous observons. L'accélération de la propagation peut facilement être paramétrée en modifiant les règles du SIF.

En l'état, les apports de notre méthode *floue* sont discutables car nous n'exploitons pas pleinement les possibilités du SIF. Nous ne pouvons quantifier précisément les résultats obtenus avec l'activité floue comparativement à ceux obtenus avec l'activité stochastique. Pour ce faire, il faudrait que nos résultats soient comparés avec des données expérimentales. Rappelons que l'objectif de ce travail était purement qualitatif. Nous pouvons tout de même constater que le phénomène de propagation est bien représenté en utilisant l'activité floue. Nos résultats sont donc encourageants, notamment car ils permettent d'éviter les longues phases de réplifications indispensables dans le cas de méthode stochastique. De plus, il sera très intéressant d'analyser les résultats issus de simulations basées sur des variations des paramètres du SIF. Par exemple, jouer sur l'expression des règles floues permet d'accélérer ou de réduire le processus de propagation, et modifier les SEF permet d'obtenir des résultats assez chaotiques comme énoncé dans [14].

## 5. Conclusion

Nous avons proposé une nouvelle approche de modélisation de l'activité dans un modèle cellulaire. Le principe de l'activité floue permet de surmonter les limites techniques



qu'impose usuellement la modélisation des systèmes complexes de propagation. Grâce à cette approche, nous sommes capables de gérer l'activité dans un modèle cellulaire à partir d'un système d'inférence floue. L'approche donne des résultats encourageants que nous devons quantifier plus précisément. Nous pouvons considérer l'activité floue comme une alternative crédible aux modèles stochastiques classiques. Dans nos prochains travaux, nous consacrerons une grande partie de nos efforts à l'optimisation de l'activité floue, en intégrant notamment les techniques du calcul parallèle pour simuler des domaines de très grande taille.

## Références

- [1] J. V. Neumann, *Theory of Self-Reproducing Automata*. Champaign, IL, USA: University of Illinois Press, 1966.
- [2] S. Wolfram, *Theory and applications of cellular automata*. Advanced Series on Complex Systems, Singapore: World Scientific Publication, 1986, 1986.
- [3] E. Innocenti, X. Silvani, A. Muzy, et D. R. C. Hill, « A software framework for fine grain parallelization of cellular models with OpenMP: Application to fire spread », *Environ. Model. Softw.*, vol. 24, n° 7, p. 819–831, juill. 2009.
- [4] K. Bajracharya et R. Duboz, « Comparison of Three Agent-based Platforms on the Basis of a Simple Epidemiological Model (WIP) », in *Proceedings of the Symposium on Theory of Modeling & Simulation - DEVS Integrative M&S Symposium*, San Diego, CA, USA, 2013, p. 7:1–7:6.
- [5] B. P. Zeigler, H. Praehofer, et T. G. Kim, *Theory of Modeling and Simulation, Second Edition*. 2000.
- [6] K. E. Boulding, « General Systems Theory », *Manag. Sci.*, vol. 2, n° 3, p. 197–208, 1956.
- [7] G. A. Wainer et N. Giambiasi, « Application of the Cell-DEVS Paradigm for Cell Spaces Modelling and Simulation », *SIMULATION*, vol. 76, n° 1, p. 22–39, janv. 2001.
- [8] L. Ntaimo et B. P. Zeigler, « Expressing a Forest Cell Model in Parallel DEVS and Timed Cell-DEVS Formalisms », 2002.
- [9] G. Wainer, Q. Liu, et S. Jafer, « Parallel Simulation of DEVS and Cell-DEVS Models in PCD++ », in *Discrete-Event Modeling and Simulation*, vol. 20115630, G. Wainer et P. Mosterman, Éd. CRC Press, 2011, p. 223–270.
- [10] F. Lin et H. Ying, « Fuzzy discrete event systems and their observability », in *Proceedings of IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference, Vancouver, (Canada)*, 2001, vol. 3, p. 1271 – 1276.
- [11] Y. Kwon, H. Park, S. Jung, et T. Kim, « Fuzzy-DEVS Formalisme\*: Concepts, Realization and Application », *Proc. AIS 1996*, p. 227–234, 1996.
- [12] A. I. Adamatzky, « Hierarchy of fuzzy cellular automata », *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 62, n° 2, p. 167–174, mars 1994.
- [13] G. Cattaneo, P. Flocchini, G. Mauri, C. Q. Vogliotti, et N. Santoro, « Cellular automata in fuzzy backgrounds », *Phys. Nonlinear Phenom.*, vol. 105, n° 1–3, p. 105–120, juin 1997.
- [14] H. Betel et P. Flocchini, « On the relationship between fuzzy and Boolean cellular automata », *Theor. Comput. Sci.*, vol. 412, n° 8–10, p. 703–713, mars 2011.
- [15] S. Guillaume, « Designing fuzzy inference systems from data: An interpretability-oriented review », *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 9, n° 3, p. 426–443, juin 2001.
- [16] P. Y. Glorennec, *Algorithmes d'apprentissage pour systèmes d'inférence floue*. Hermès Science, 1999.
- [17] P.-A. Bisgambiglia, B. Poggi, et C. Nicolai, « Models-Based Optimization Methods for the Specification of Fuzzy Inference Systems in Discrete Event Simulation », in *Proceedings in the 7th conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology (EUSFLAT-2011) and (LFA-2011)*, 2011, vol. 1–1, p. 957–964.
- [18] P.-A. Bisgambiglia, E. de Gentili, P. A. Bisgambiglia, et J. F. Santucci, *Modélisation floue basée sur le formalisme DEVS et sur la méthode des fronts*, Cépaduès Editions. 2007.
- [19] P.-A. Bisgambiglia, E. de Gentili, P. Bisgambiglia, et J. F. Santucci, « Méthode de modélisation de systèmes à paramètres imprécis », *Tech. Sci. Inform.*, vol. 30, n° 1, p. 93–118, 2011.
- [20] P.-A. Bisgambiglia, L. Capocchi, P. Bisgambiglia, et S. Garredu, « Fuzzy inference models for Discrete Event systems », in *FUZZ-IEEE*, 2010, p. 1–8.
- [21] T. Takagi et M. Sugeno, « Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control », *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol. SMC-15, n° 1, p. 116–132, janv. 1985.