

Modélisation de milieux granulaires grâce aux automates cellulaires

J'ai vu dans ce projet l'occasion d'approfondir mes connaissances sur les automates cellulaires, objets fascinants tant par leur diversité qu'à travers le formalisme mathématique associé. Je me suis proposé de modéliser différents milieux granulaires contraints, omniprésents, mal compris et au cœur de nombreuses problématiques actuelles.

Les automates cellulaires servent, entre autres, d'outils de modélisation et sont particulièrement bien adaptés à l'étude des milieux granulaires qui obéissent à une règle locale et sont déjà « discrétisés ». Prévoir l'évolution de phénomènes potentiellement dangereux tels que l'érosion côtière, la cratérisation, les avalanches permet de mieux les prévenir.

Positionnement thématique (ETAPE 1)

MATHEMATIQUES (Mathématiques Appliquées), PHYSIQUE (Physique de la Matière), INFORMATIQUE (Informatique Théorique).

Mots-clés (ETAPE 1)

Mots-Clés (en français)	Mots-Clés (en anglais)
<i>automate cellulaire</i>	<i>cellular automaton</i>
<i>milieu granulaire</i>	<i>granular material</i>
<i>universalité</i>	<i>universality</i>
<i>érosion</i>	<i>erosion</i>
<i>cratérisation</i>	<i>craterisation</i>

Bibliographie commentée

C'est dans les années 1950, avec notamment les travaux d'Ulam et Von Neumann, qu'émergent les premiers résultats sur les automates cellulaires, qui sont alors étudiés en mathématiques et en informatique théorique, en tant que systèmes dynamiques discrets et modèles de calcul. La définition utilisée pour ce travail a été proposée entre autres par Laurent Boyer dans sa thèse Comportements typiques dans les automates cellulaires [1] qui présente l'essentiel du formalisme utilisé pour la suite.

Plus récemment (1970), Stephen Wolfram décrit empiriquement, dans A New Kind Of Science [2], 256 automates cellulaires dits «élémentaires», à une dimension et deux états. Tout en étant parmi les plus simples, ils présentent déjà une diversité considérable, illustrant les notions d'érosion, de convergence, d'émergence, de mots d'Éden...

Simultanément, Le Jeu De la Vie est imaginé par John Conway et rendu accessible à un large public [3]. L'écart entre la simplicité de définition de cet automate et la complexité résultante est particulièrement remarqué à l'époque, et fascine toujours autant.

Aujourd'hui, les automates cellulaires sont principalement employés pour des modélisations, et ils seront certainement davantage sollicités avec la diminution des temps de calculs exploré dans [7].

Ainsi, d'un point de vue pratique, ils servent notamment à effectuer un changement d'échelle, en

mettant en évidence le lien entre interactions locales et comportement global, ou même par exemple comme correcteurs d'erreurs dans des réseaux sans autorité centrale (dits distribués). L'exemple le plus parlant est certainement celui de l'automate de la majorité, qui est capable de rendre un milieu homogène malgré une configuration initiale qui présente des «défauts». [4]

Une démarche inspirante d'utilisation d'automates cellulaires est fournie par la thèse d'Alexis Hérault Création d'un système d'information pour la gestion des risques volcaniques [5] où l'auteur développe un système complet de type prise d'information - prévention - production de cartes de risques, à partir d'un traitement d'images satellitaires. Il modélise les coulées de lave de l'Etna à l'aide d'automates cellulaires, qui permettent de passer de lois physiques à des lois d'évolutions. On y observe que les automates cellulaires sont particulièrement bien adaptés pour les situations dans lesquelles l'espace est facilement discrétisable, en particulier dans le cadre des milieux granulaires.

C'est également pour cela que je me suis naturellement dirigé vers l'étude de ces milieux, qui présentent par ailleurs des phénomènes nécessaires à appréhender convenablement, en faisant un enjeu majeur dans la prévention des risques, comme peut l'être l'érosion cotière par exemple.

J'ai été amené à utiliser les logiciels Golly (acronyme de Game Of Life) et Ready, sous licence libre, développés par des amateurs spécialement pour la réalisation d'automates [6]. Ils utilisent en particulier des techniques de hashing, qui permettent des performances bien supérieures à celles réalisables «naïvement». Le principe est de diviser l'espace par «régions similaires» et de ne faire les calculs de générations qu'une seule fois. Si la configuration est assez «régulière» on peut en plus «sauter» des générations sur certaines régions de l'espace en n'appliquant les règles de transition qu'aux frontières des zones délimitées.

On trouve davantage d'éléments sur les milieux granulaires dans la thèse de Sarah Badr, Érosion d'un milieu granulaire par un jet [7]. Cela a permis de comprendre certains comportements propres à ces milieux et de tenter de les reproduire. D'un point de vue informatique, le modèle conçu par Didier Müller dans Techniques informatiques efficaces pour la simulation de milieux granulaires par la méthode des éléments distincts [8], et les différentes problématiques qu'il soulève mettent en évidence l'ampleur de la difficulté d'une modélisation plus poussée.

Enfin, les automates cellulaires peuvent être étendus à des définitions plus larges, qui offrent davantage de possibilités, comme les automates à partition, dont le plus fameux est certainement le billard ball machine. Ils sont décrits par Jérôme Durand-Lose dans sa thèse Automates Cellulaires, Automates à Partitions et Tas de Sable [9]

Problématique retenue

Quel est l'intérêt du formalisme des automates cellulaires et comment l'appliquer dans le cadre d'une modélisation ou d'une démonstration?

En particulier, comment les utiliser pour mieux comprendre les milieux granulaires?

Objectifs du TIPE

J'ai pour objectif principal de me familiariser avec la théorie des automates cellulaires, et également de:

-Découvrir certaines constructions originales d'automates cellulaires, à partition ou autre et conduisant à des résultats très variés

- Prendre connaissance des lois physiques qui décrivent les milieux granulaires et les hypothèses associées
- Réaliser et observer plusieurs mises en application des automates cellulaires pour mieux appréhender certains phénomènes physiques liés aux milieux granulaires en utilisant les logiciels Golly et Ready
- Explorer certains résultats liés à ce formalisme dont le théorème de Curtis Edlund London et l'universalité de certains automates

Références bibliographiques (ETAPE 1)

- [1] LAURENT BOYER : Comportements typiques dans les automates cellulaires. : *Université de Grenoble, 2010. Français. fftel-00862704*
- [2] STEPHEN WOLFRAM : A New Kind of Science : *Wolfram Media Inc, 1970*
- [3] MARTIN GARDNER : Mathematical games: The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life" : *Scientific American (October 1970)*
- [4] IRÈNE MARCOVICI : Automates cellulaires et correction d'erreurs : <https://www.youtube.com/watch?v=o5n55dKvoJU&t=1s>
- [5] ALEXIS HÉRAULT : Création d'un système d'information pour la gestion des risques volcaniques : *Information scientifique et technique, Paris Est, 2008*
- [6] TIM HUTTON, ROBERT MUNAFO, ANDREW TREVORROW, TOM ROKICKI, DAN WILLS : "Golly" & "Ready, a cross-platform implementation of various reaction-diffusion systems." : <http://golly.sourceforge.net/> & <https://github.com/GollyGang/ready>
- [7] SARAH BADR : Erosion d'un milieu granulaire par un jet : *Physique [physics]. Université Paris Sud - Paris XI, 2014. Français. ffNNT : 2014PA112349ff. fftel-01134321*
- [8] DIDIER MÜLLER : Techniques informatiques efficaces pour la simulation de milieux granulaires par la méthode des éléments distincts : *thèse numéro 1545 (1996)*
- [9] JÉRÔME DURAND-LOSE : Automates Cellulaires, Automates à Partitions et Tas de Sable : *Informatique [cs]. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 1996. Français. fftel-00548830*

Références bibliographiques (ETAPE 2)

- [1] DAMIEN LACHOUETTE : Modélisation d'une interface fluide/solide avec érosion, application à l'érosion interne. : *Université du Sud Toulon Var, 2009. HAL Id: tel-00643226*

DOT

- [1] janvier 2021: découverte du jeu de la vie et des automates cellulaires élémentaires [2,3]
- [2] mars-juin 2021: théorie des automates cellulaires [1,9] et approche formelle; travail sur l'universalité intrinsèque
- [3] juillet-août 2021: familiarisation avec Golly [6] et lecture de [5]
- [4] septembre 2021: visionnage de [4], propriété d'érosion et orientation vers les milieux granulaires [7, 8]
- [5] octobre à décembre 2021: réalisation d'automates érosifs

[6] mars 2022: mesure de coefficients de réflexion et transmission par une digue (expérience réalisée à 2) mais inexploitable

[7] mai-juin 2022: réalisation des dernières règles pour la cratérisation