

Les Automates Cellulaires

Dans le Domaine Médical

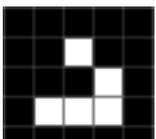
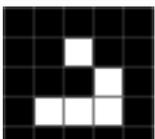


TABLE DES MATIERES

Problématique.....	3
Introduction	3
I. Qu'est qu'un automate cellulaire ?	4
A. Généralités sur les automates cellulaires.....	4
B. Le problème de l'auto-reproduction, de 1950 à 1970.....	5
C. L'étude du Jeu de la vie de 1970 à 1982	7
D. Le développement de possibilités d'applications diverses jusqu'à nos jours.....	11
II. Les automates cellulaires à l'échelle individuelle	13
A. Calcul d'une heure de décès	13
B. Les Tumeurs cérébrales – Rencontre avec un chercheur	15
III. Les Automates Cellulaires à l'échelle d'une population	19
A. Le virus de la Grippe A (H1N1) et son automate cellulaire.....	19
B. Nouveau cas : le virus Ebola.....	21
C. Les limites de l'outil mathématique	22
IV. Conclusion.....	24
V. Annexes	25
A. Rermerciements.....	25
B. Sources	25



PROBLEMATIQUE

↳ Les Automates Cellulaires peuvent-ils assister le milieu médical ?

INTRODUCTION

« *Nous gagnons la vie par ce que nous recevons, nous faisons la vie par ce que nous donnons* » - Winston Churchill, 1959

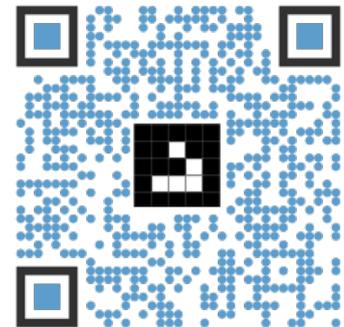
Les fourmis qui construisent une fourmilière, les neurones qui se transmettent l'influx nerveux dans le cerveau, les machines connectées par un réseau, les automobilistes se tamponnant dans un embouteillage, sont autant d'éléments petits et relativement simples qui, malgré la faible portée de leurs interactions, parviennent à former des systèmes très complexes. Les automates cellulaires font partie de ceux-ci : objets mathématiques aux règles simples mais engendrant des résultats complexes, on peut se demander comment une telle complexité peut naître d'objets aussi basiques ? Ce Travail Personnel Encadré (TPE) aura pour but de vous plonger dans le monde de ces incroyables machines théoriques à travers la problématique suivante : les automates cellulaires peuvent-ils assister le milieu médical ?

Dans une première partie, nous découvrirons ce que sont vraiment les automates cellulaires et quelle fut leur utilité depuis leur création, dans un second temps, nous allons aborder les utilisations individuelles des automates cellulaires, comme le calcul de l'heure de décès d'une personne et la migration de cellules tumorales d'un individu. Enfin, nous présenterons l'utilisation de cet outil dans un cas plus global avec la propagation de maladie dans une population.

A l'origine, le support de production de notre TPE est un site internet, vous avez juste à scannez l'image avec votre smartphone pour y accéder :

Nous vous conseillons cependant de consulter cette production sur le support plus approprié pour vous.

Bonne lecture !



T.P.E. 1^{ère} Scientifique 2 : Nous contacter ?

Emilie Hummel - Thomas Faugier - Clément Souchay

URL : <http://automatecellulaire.altervista.org>

E-mail : automate.cellulaire@gmail.com



I. QU'EST QU'UN AUTOMATE CELLULAIRE ?

A. GENERALITES SUR LES AUTOMATES CELLULAIRES

Chacun sait ce qu'est le domaine médical mais peu de personnes savent réellement ce qu'est un **Automate Cellulaire**. Il est donc important de commencer par définir ce que c'est : cela consiste en une grille, dont les cases sont appelées **cellules** ou **agents** (nous les appelleront ici agents pour ne pas les confondre avec les cellules du domaine de la biologie), peuvent avoir un certain nombre d'**états**, régie par des lois simples appelées **règles** ; cependant, ces règles peuvent amener à des situations extrêmement complexes, qui modifient la composition de la grille tour après tour. Ces tours sont appelés des **générations**, des **étapes**, ou même **itération**. Un automate cellulaire est défini par le nombre de voisins que possède chaque agent, le nombre d'états possibles pour chaque agent et les règles qu'il possède.

Le nombre des voisins que possède chaque agent définit la vitesse à laquelle les changements d'états se propagent, mais aussi, plus simplement, la forme des agents (carrées, hexagonales, triangulaire, etc ...). Il faut aussi choisir si les agents dans les angles sont adjacents ou pas à l'agent en question et si les agents des bordures sont voisins.

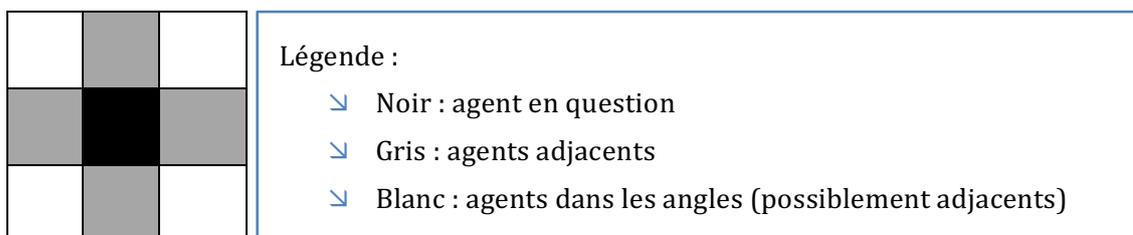


Figure 1 : Schéma des agents voisins ou non à un agent :

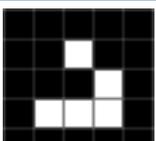
Le nombre d'état que peut posséder chaque agent dépend de ce que l'on veut représenter : une modélisation simple gardera peu d'état alors qu'une modélisation complexe en possèdera généralement plus. Ces états sont, le plus souvent, représentés par des couleurs.

Les règles définissent les deux paramètres précédant et les conditions pour passer d'un état à un autre (elles sont généralement très simples).

Par exemple, voici les règles d'un automate cellulaire simple : Chaque agent a deux voisins, deux états possibles (blanc ou noir), un agent prend l'état de son voisin de gauche à l'état suivant. On établit ici que les agents des bordures sont voisins.

Etape 1 (situation initiale)		■		■		■		
Etape 2			■		■			■
Etape 3				■		■		■
Etape 4	■				■		■	
Etape 5		■				■		■

Figure 2 : Un automate cellulaire simple :



Nous allons ici parler de trois grandes périodes de l'histoire de ses automates, que nous détaillerons ensuite dans plusieurs sous parties.

Les automates cellulaires furent imaginés à la fin des années 1940 par deux scientifiques **John von Neumann** (1903-1957, grand physicien du XXe siècle et pionnier dans la conception des premiers ordinateurs) et **Stanislaw Ulam** (1909-1984, mathématicien ayant notamment aidé à la conception de la théorie de la bombe à hydrogène). Ils créèrent ensuite, en 1952, le « **copieur et constructeur universel** », premier automate cellulaire qui, sous la forme d'une grille dans laquelle chaque cellule pouvait prendre 29 états, reproduisait à l'infini le motif que l'on avait produit au départ. Les automates cellulaires furent ensuite oubliés, jusqu'à ce qu'en 1966, un ouvrage sur l'auto-reproduction soit publié. De nouveaux automates cellulaires sont alors créés pour étudier ce phénomène mais ce sont surtout les ouvrages sur l'œuvre des deux pères des automates cellulaires qui fleurissent. Oubliés pendant une certaine période, les automates cellulaires sont redécouverts en 1966, lorsqu'**Arthur Burks** publie le premier grand ouvrage sur le sujet, *Theory of self-reproducing automata*, en complétant les travaux de Von Neumann. Le nom d'**automate cellulaire** est d'ailleurs inventé par Burks dans cet ouvrage. Les années suivantes voient les automates cellulaires se populariser avec de nouveaux ouvrages et la création de nouveaux automates.

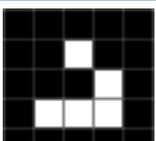
En 1970, **John Conway** (1930, mathématicien britannique) crée un nouvel automate cellulaire : le **Jeu de la Vie**, cet automate cellulaire va énormément se répandre et va populariser ce type d'objet mathématique auprès du grand public. Contrairement à ses prédécesseurs, le Jeu de la vie n'a pas été créé dans le but d'étudier un phénomène ; il a lui-même créé des phénomènes qui ont été étudiés. C'est ce qui a fait son succès : chacun pouvait, sans prétendre d'être un grand chercheur, l'étudier.

Les recherches sur le Jeu de la vie continuent jusqu'à nos jours (bien qu'elles soient peu nombreuses depuis 1982), mais à partir de 1980, d'autres automates cellulaires aux règles simples voient le jour ; on citera celui d'**Edward Fredkin** (informaticien et pionnier de la physique numérique) proposant une règle de « compteur de parité » : chaque cellule compte le nombre de ses voisins activés et s'active si ce nombre est impair et se désactive si ce nombre est pair. Aujourd'hui encore, certains ordinateurs se servent de ces propriétés pour effectuer leurs tests de mémoire au démarrage. Cette dernière période des automates cellulaires qui s'étend jusqu'à nos jours montre une ouverture de l'utilisation des automates cellulaires vers d'autres domaines (principalement la physique).

Dans les sous-parties suivantes, nous allons détailler ces trois grandes périodes de l'histoire des automates cellulaires.

B. LE PROBLEME DE L'AUTO-REPRODUCTION, DE 1950 A 1970

A la fin des années 1940, John von Neumann voulut savoir si l'on pouvait créer une machine (un **automate** donc) capable d'en construire un second exactement identique. Cependant, la technologie de son époque ne lui permettait pas de créer un tel objet. Un de ses collègues Stanislaw Ulam s'intéressait alors, hors de ses heures de travail, aux « objets géométriques définis de façon récursive » : ce sont en fait des formes évoluant dans un cycle répétitif. Elles sont issues de jeux se déroulant dans un univers « **cellulaire** » et dont les cases (appelées alors cellules) pouvaient se trouver dans un état passif ou dans un état actif. Ulam suggéra alors à Von Neumann d'utiliser un tel univers abstrait pour ses



expériences, ils avaient ainsi créé les automates cellulaires, bien que le terme ne date que de 1966.

Ce problème réglé, Von Neumann pu ensuite créer son mécanisme d'**auto-reproduction**. Il décida que son automate cellulaire devrait comporter deux unités : la première serait la **description** (ce qu'il faut reproduire), la seconde serait le « **constructeur universel** » (mécanisme capable de la reproduire). Pour que le système puisse s'auto-reproduire, il faudrait que la description comporte le système entier (description + constructeur universel) obtenu après la reproduction dont elle est à l'origine.

Imaginons donc le problème suivant, avec SAR le Système Auto-Reproducteur, CU le Constructeur Universel et D la Description. Le SAR est composé de l'ensemble CU+D. Or pour pouvoir continuer la reproduction, D doit être composé de l'ensemble SAR.

Nous assistons alors à une régression vers l'infini :

$$\text{SAR} = \text{CU} + \text{D}$$

$$\text{SAR} = \text{CU} + \text{SAR}$$

$$\text{SAR} = \text{CU} + \text{CU} + \text{D}$$

Ce problème fut un réel blocage pour Von Neumann : comment faire « comprendre » à l'automate que la description ne devait pas s'inclure elle-même ? Il utilisa, cette fois, les travaux d'**Alan Turing** (grand mathématicien, informaticien et cryptologue) du XXe siècle : ce dernier avait créé une machine pouvant résoudre tout calcul, **la machine universelle de Turing**, possiblement adaptable au monde cellulaire.

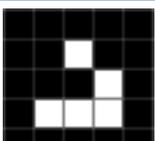
Von Neumann décida donc d'ajouter cette machine en tant que troisième unité à son système auto-reproducteur appelée superviseur. Celui-ci évitait la régression à l'infini en découpant l'auto-reproduction en deux phases :

- ↳ **L'interprétation** : le superviseur lit la description et le constructeur universel fait une copie de lui-même et du superviseur dans un espace vide ;
- ↳ **La copie** : le superviseur ne lit plus la description et la considère comme un groupe de données, le constructeur universel la copie alors.

En 1952, Von Neumann avait terminé l'automate cellulaire avec 29 états différents pour plus de 200 000 agents. Bien que son automate ait été une réussite, il allait délaisser les automates cellulaires pour ne plus les réutiliser, peut-être déçu par la trop grande complexité de son résultat. Il mourra en 1957 et le constructeur universel, son automate, fut oublié car aucun ouvrage ne sortit à ce propos et les premiers ordinateurs ne permirent pas de le tester en raison de leurs capacités insuffisantes.

Von Neumann ayant réussi à créer un automate cellulaire capable de s'auto-reproduire à l'aide de trois unités (pour rappeler : la description, le constructeur universel et le superviseur), une question intéressante serait de se demander si des mécanismes similaires sont développés par les cellules vivantes lors de leur division. Il faut tout d'abord savoir, qu'à l'époque de Von Neumann, la division cellulaire était encore un mécanisme biologique flou, les règles du constructeur universel ne sont donc pas inspirées de cette reproduction. Il serait très impressionnant que Von Neumann ait, par la logique, atteint le même résultat que la vie au fil de l'évolution et de la sélection naturelle.

La réponse à cette question est aussi intéressante qu'étonnante : il s'avère qu'il existe ainsi dans les cellules vivantes un équivalent de la description, de l'unité de



supervision et du constructeur universel. Cela est d'ailleurs souligné par une phrase importante du livre *The Recursive Universe : Cosmic Complexity and the Limits of Scientific Knowledge* écrit par **William Poundstone** : « La solution de Von Neumann est une belle astuce, mais elle est bien plus que cela. Elle constitue la méthode par laquelle la vie authentique, organique se reproduit » (p.189).

Dans les cellules vivantes, l'**ADN** contient une « description » de la cellule, qui ne s'inclut pas elle-même. Cette description est lue par des **ARN-messager** qui la transmettent aux **ribosomes**, équivalents de superviseurs, qui fabriquent des **enzymes**, comme par exemple l'**ADN-polymérase**, qui a la charge de copier l'ADN sans l'interpréter, servant de constructeur universel. La différence entre ces deux processus d'auto-reproduction vient du fait que la version informatique se duplique elle-même (sans sa description) puis duplique sa description sans l'interpréter. La version réelle, en revanche, fait les deux en même temps. Cette différence vient aussi du fait que le système d'auto-reproduction des cellules ne peut pas tout reproduire, contrairement à celui de l'automate cellulaire de Von Neumann.

Les correspondances entre les processus biologiques et la théorie informatique de Von Neumann sont frappantes, d'autant plus qu'au moment des travaux de ce dernier, les mécanismes biologiques n'étaient pas encore connus. Les automates cellulaires permettent donc de joindre deux sciences que l'on aurait pensées éloignées : la logique et la biologie.

C. L'ETUDE DU JEU DE LA VIE DE 1970 A 1982

En 1970, John Conway crée un automate cellulaire sans but particulier : jusqu'à présent, les automates cellulaires étaient créés pour démontrer quelque chose, ou pour réaliser une expérience irréalisable dans la réalité. Cet automate fut le premier à ne pas avoir de réel but, les règles simples que Conway a créé pour celui-ci permettant de réaliser toutes sortes de figures pouvant croître pour devenir géantes sans que l'on puisse prouver qu'elles croîtront à l'infini ou même deviner leur futur. Cet automate est totalement imprévisible.

Voici les règles du Jeu de la vie :

- ↘ Chaque agent est carré, possède huit voisins (les cellules en diagonale sont adjacentes), et a deux états possibles (mort/blanc ou vivant/noir) ;
- ↘ Un agent vivant meurt (c'est-à-dire que la case devient vide) s'il n'a aucun ou qu'un seul voisin : on dit qu'il meurt d'isolement ; s'il en a quatre ou plus : on dit qu'il meurt en raison de la surpopulation ;
- ↘ Un agent qui était mort (la case était donc vide), devient vivant s'il est entouré par exactement trois agents vivants, on dit qu'il naît.

On établit ici que les agents des bordures ne sont pas voisins.

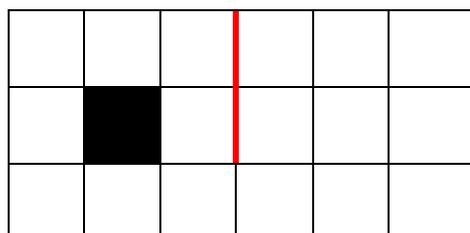
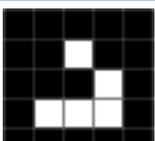


Figure 3 : Mort de tous les agents : le seul agent vivant n'a pas de voisins et meurt (d'isolement) :



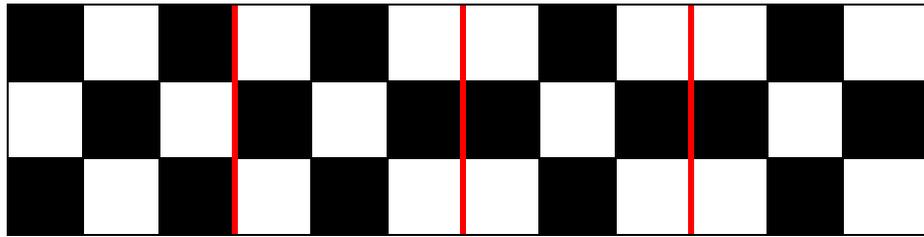


Figure 4 : Mise en place d'un oscillateur : les mêmes positions se répètent en boucle :

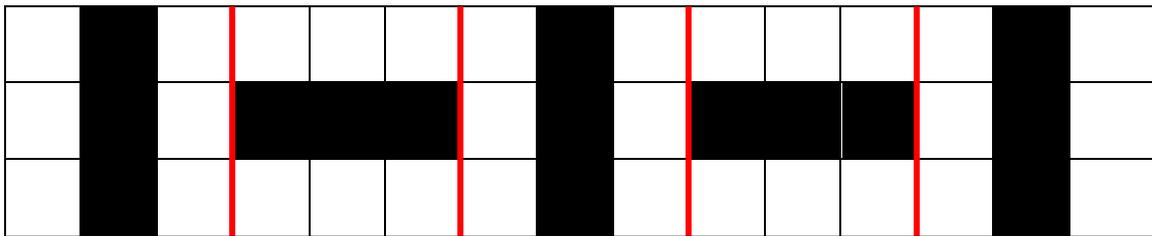


Figure 5 : Mise en place d'une forme stable : chaque agent a deux voisins et tous survivent :

Les résultats finaux d'un Jeu de la vie sont toujours constitués de ces trois solutions : la **mort** de tous les agents, la mise en place d'un **oscillateur**, structure semi-stable, ou la mise en place d'**une forme stable**. Les deux derniers étant compatibles.

Certains oscillateurs se déplacent sur la grille de case, ces structures sont appelées les vaisseaux et peuvent être le quatrième type de résultat que l'on peut obtenir. La marge entre ceux-ci et les oscillateurs est si faible que nous les considérerons comme des cas particuliers d'oscillateurs. Le plus connu d'entre eux est le *walker* (parfois appelé planeur en français) :

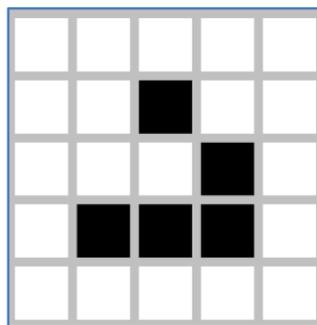
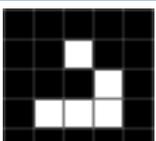


Figure 6 : Un Walker :

Il existe deux types de vaisseaux : les vaisseaux classiques (comme le *walker*) et les « *puffeurs* » qui laissent des débris derrière eux.



Certains oscillateurs « produisent » des vaisseaux, ce sont des **canons** (ou lanceurs), le plus connu fut le canon découvert, par Gosper, le « *Gosper glider gun* » qui produit des *walkers* :



Figure 7 : Un Gosper glider gun :

Le Jeu de la vie illustre la famille des automates cellulaires : bien qu'adoptant des règles simples, il amène à des situations complexes. C'est pourquoi il a énormément été étudié, jusqu'en 1982 principalement, année durant laquelle Conway lui-même prouva que le Jeu de la vie est un constructeur et calculateur universel, comme l'automate de Von Neumann, mais beaucoup plus simple. Cependant, il continue d'être étudié, avec, en 2010, la découverte du premier constructeur universel du Jeu de la vie, baptisé **Gemini** et d'une taille d'environ 4 millions d'agents sur 4 millions d'agents, il arrive à faire une copie exacte de lui-même en détruisant l'image originale en environ 34 millions de générations. Ou encore avec la découverte du premier **jardin d'Eden** en 1971, une configuration de cellules sans passé possible, impossible à obtenir sans en faire la situation initiale :

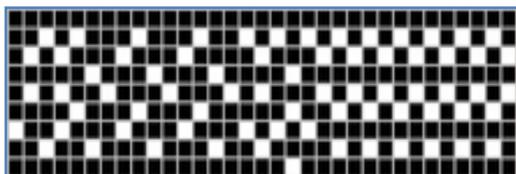


Figure 8 : Le premier jardin d'Eden découvert dans le Jeu de la vie :

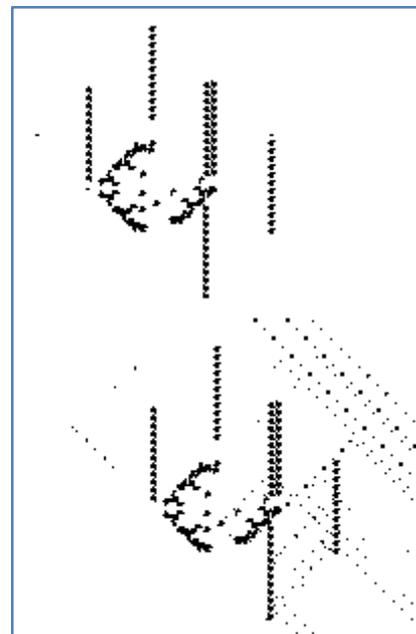


Figure 9 : Gemini, le premier constructeur universel :

Le groupe du bas est le groupe original, celui du haut, la copie, cette dernière est en train d'être supprimée sur cette image.



Le Jeu de la vie a d'ailleurs popularisé les automates cellulaires et inspiré de nombreux autres automates cellulaires avec des particularités très intéressantes. High Life possède un constructeur universel simple. Immigration et Quad Life possèdent respectivement deux et cinq états vivants différents (un agent naissant prend la couleur de la majorité de cellule qui lui ont donné naissance), ce qui permet de représenter le déplacement de plusieurs types d'agents au fil des générations. Enfin, *Day & Night* est un automate cellulaire où les états mort et vivant sont dits « **symétriques** » : si l'état de tous les agents est inversé, l'évolution se fera de façon inversée à l'originale.

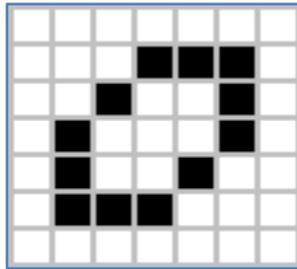
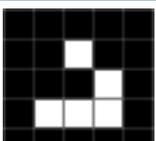


Figure 10 : Le répliqueur le plus simple dans High Life

Etant donné que le Jeu de la vie porte ce nom, nous pouvons nous demander si cet automate a un réel rapport avec le vivant ; en effet, son créateur voyait en lui une représentation de la vie, ce qui lui donna l'idée de ce nom si particulier. Les règles qu'il possède (et que Conway a mis deux ans à élaborer) traduisent très bien une idée d'occupation ou non des agents selon la proximité ou non d'autres agents, tel un grand milieu qui serait plus ou moins favorable au développement des espèces vivantes selon son occupation par ceux-ci.

Cette comparaison n'est pas anodine : elle revient souvent dans la communauté des chercheurs du Jeu de la vie : chaque situation de départ du Jeu de la vie correspond à un grand **milieu**, chaque **agent**, à une place pour un potentiel être de vivant, et les **règles** définissent la quantité de ressources utilisables par les êtres vivants pour survivre. Les règles de bases sont d'ailleurs décrites par certains comme presque parfaites, ni trop simples, ni trop complexes pour le développement de ces êtres vivants. Les **êtres vivants sont** considérés comme étant tous de la même espèce étant donné qu'il n'y a pas de notion de prédateur dans le Jeu de la vie. Ils sont placés au début puis vont évoluer dans ce gigantesque milieu créant des groupes gigantesques mais espacés intérieurement pour assurer la survie de chacun de façon similaire à des groupes d'êtres vivants dans la réalité : ceux-ci vivent ensemble mais sur d'assez grands espaces sans être trop nombreux, au risque d'épuiser leurs ressources, ou pas assez, au risque de ne pas pouvoir assurer une descendance. Dans le Jeu de la vie, ces groupes finissent par former des structures stables (ou mourir), ce qui n'est pas le cas dans le monde réel. Cela est dû au fait que le Jeu de la vie est une version simplifiée qui ne prend pas en compte tous les facteurs réels.

Les ressemblances entre le Jeu de la vie et la vie réelle sont donc belles et bien existantes mais il ne faut pas se leurrer : l'automate ne fait ici office que de modélisation et donc de version simplifiée de la réalité.



A partir de 1982, après la démonstration de Conway sur le fait que le Jeu de la vie soit un calculateur et constructeur universel, les chercheurs se rendent compte que nous connaissons assez les automates cellulaires pour pouvoir nous en servir dans d'autres domaines. En effet, on sait alors que les automates cellulaires apportent des possibilités infinies, comme le montre ce tableau qui donne le nombre de combinaisons possibles d'état d'un agent et de ses voisins selon le nombre d'états et de voisins qu'il peut avoir :

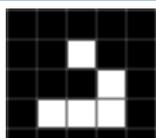
	2 états	3 états	4 états	5 états
2 voisins	8	19 683	4 294 967 296	$> 10^{157}$
3 voisins	256	7 625 597 484 987	$> 10^{38}$	$> 10^{87}$
4 voisins	65 536	$> 10^{38}$	$> 10^{154}$	$> 10^{436}$
5 voisins	4 294 967 296	$> 10^{115}$	$> 10^{616}$	$> 10^{2184}$
6 voisins	$> 10^{19}$	$> 10^{347}$	$> 10^{2466}$	$> 10^{10921}$

Tableau 1 : Nombre de combinaisons possibles d'états d'un agent et de ses voisins en faisant varier le nombre d'états et de voisins

De plus il existe un nombre infini de règles pour que les agents changent d'état. On a alors assez de connaissances pour classer ces règles en trois groupes :

- ↘ Les règles dans lesquelles l'état d'un agent est défini par l'état des autres agents. Très utilisées. Exemple : Un agent d'état *A* passe à l'état *B* si un de ses voisins est à l'état *B*.
- ↘ Les règles dans lesquelles l'état d'un agent est défini selon les résultats d'une expérience. Peu utilisées. Exemple : Un agent d'état *A* a une chance sur deux de passer à l'état *B*.
- ↘ Les règles dans lesquelles l'état d'un agent est défini selon les résultats d'une expérience si les autres agents sont dans un certain état. Parfois utilisé. Exemple : Un agent d'état *A* a une chance sur deux de passer à l'état *B* si un de ses voisins est à l'état *B*.

C'est cette infinité de possibilités qui fait que les automates cellulaires sont utilisables pour modéliser de manière simple de nombreuses choses et d'étudier de nombreux phénomènes mathématiques et informatiques mais aussi d'autres domaines comme par exemple la propagation de feux de forêt ou encore, ici, le domaine médical.



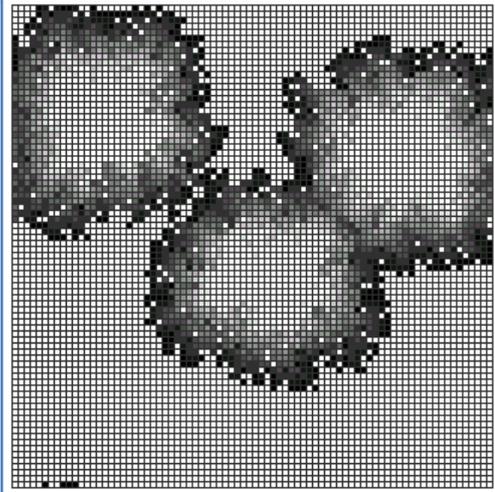
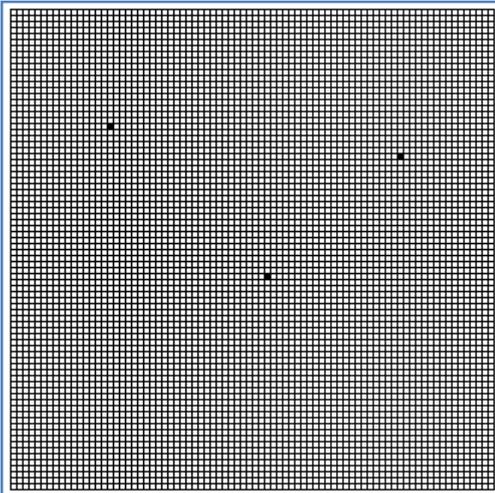
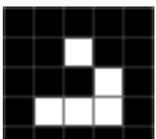


Figure 11 : Automate cellulaire de la propagation des feux de forêt :

La première image est la situation de départ, la seconde est une étape de la propagation, chaque agent représente un arbre, plus un agent est foncé, plus les flammes sont présentes sur l'arbre correspondant.



A. CALCUL D'UNE HEURE DE DECES

Les automates cellulaires (AC), bien qu'avant tout un outil de modélisation, sont également utiles à la médecine et peuvent participer à un diagnostic. Nous pouvons les adapter à tout type de situation. C'est une échelle « individuelle » puisque cette utilisation des AC nous permet de mettre en place une base sur laquelle seules les caractéristiques personnelles changent, que ce soit d'un individu à un autre ou d'une situation sensiblement différente d'une autre. Les automates cellulaires vont par exemple pouvoir être utilisés pour déterminer l'heure de décès d'un individu.

Initialement sous forme d'une fonction bi exponentielle, puis d'une équation avec quatre variables, le docteur **Claus Henssge** met au point un moyen de **calculer l'heure de décès d'un cadavre**. Cette formule s'appuie sur la division de la différence entre la température rectale du cadavre (T_r) et la température ambiante (T_a), sur la différence entre la température moyenne d'un corps soit $37,2^\circ\text{C}$ et la température ambiante. Toutes les températures sont en degrés Celsius. Dans le résultat de cette égalité, k représente le coefficient de refroidissement et t le temps depuis l'heure de la mort k dépend majoritairement des conditions autour du cadavre, mais cette formule est plutôt fiable.

$$\frac{T_r - T_a}{37,2 - T_a} = 1,25e^{-kt} - 0,25e^{5kt}.$$

Formule 1 : Formule d'Henssge :

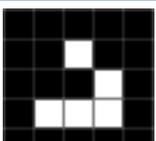
La mort telle que la médecine la décrit est considérée comme le moment où le corps d'un individu commence à se décomposer. Quand ce phénomène commence à opérer, la température du cadavre se stabilise avec la température extérieure (c'est généralement un refroidissement, soit facilement quantifiable). Cette équation utilise alors des paliers de température selon l'état du corps étudié. Cela permet de généraliser toutes les situations, même si cela manque cruellement de précision. Malheureusement, cette méthode a un grand défaut : la variabilité de la température ambiante entre le décès et la mesure.

Nous essayons alors d'améliorer le calcul de l'heure de décès d'un individu en utilisant un automate cellulaire, afin de voir précisément l'évolution de cette température (non plus sur une courbe prédéfinie mais sur un tout nouvel affichage, plus précis).

Pour concevoir un automate cellulaire capable de s'adapter à chaque individu dans la situation qui nous intéresse, une solution simple a été trouvée : on adapte **non pas les règles, mais les agents**. Leur nombre n'est pas prédéfini mais déterminé en fonction de la taille de l'individu.

On ne s'intéresse ici qu'aux cellules qui transportent de la chaleur : les cellules des muscles, de la peau et du cerveau.

Mais leur nombre n'a que peu d'importance sans leur masse. La masse de chaque cellule est principalement différenciée par deux critères : cela dépend de leur rôle dans l'organisme, ainsi que de leur **inertie thermique** (lorsque qu'un matériau est en équilibre thermique, lorsque les échanges de chaleur sont équilibrés, l'inertie thermique



représente le temps que met ce matériau à se re-stabiliser après une perturbation thermique). Pour résumer, les cellules du cerveau, des muscles ou encore de la peau sont donc précisément définies par leur masse, leur taille ainsi que leur capacité thermique massique, propre à chaque cellule.

Les agents situés à l'extérieur du « corps humain » sont divisées en deux catégories : solide ou fluide. Ce critère permet de définir la réaction de chaque type à l'énergie qu'elles reçoivent ou donnent. Les principales variations dans l'automate sont dues à la variabilité de la chaleur, que ce soit à l'extérieur ou dans le corps. Il existe **trois modes physiques de transfert thermique** :

- ↳ **Convection** : transfert de chaleur dans un liquide ou d'un liquide à un solide ;
- ↳ **Conduction** : transfert de chaleur de proche en proche dans les solides ;
- ↳ **Radiation** : transfert de chaleur dans le vide.

On ne va appliquer que 2 d'entre elles : la **convection** et la **conduction**. A partir de ces lois physiques, l'automate cellulaire parcourt l'ensemble des agents et applique les lois thermiques à chacun de leurs voisins en fonction de leur état, de leur masse et leur chaleur. Grâce à ces échanges, l'automate peut alors calculer une nouvelle température, pour le temps t+1, en faisant la moyenne en fonction de ses voisins.

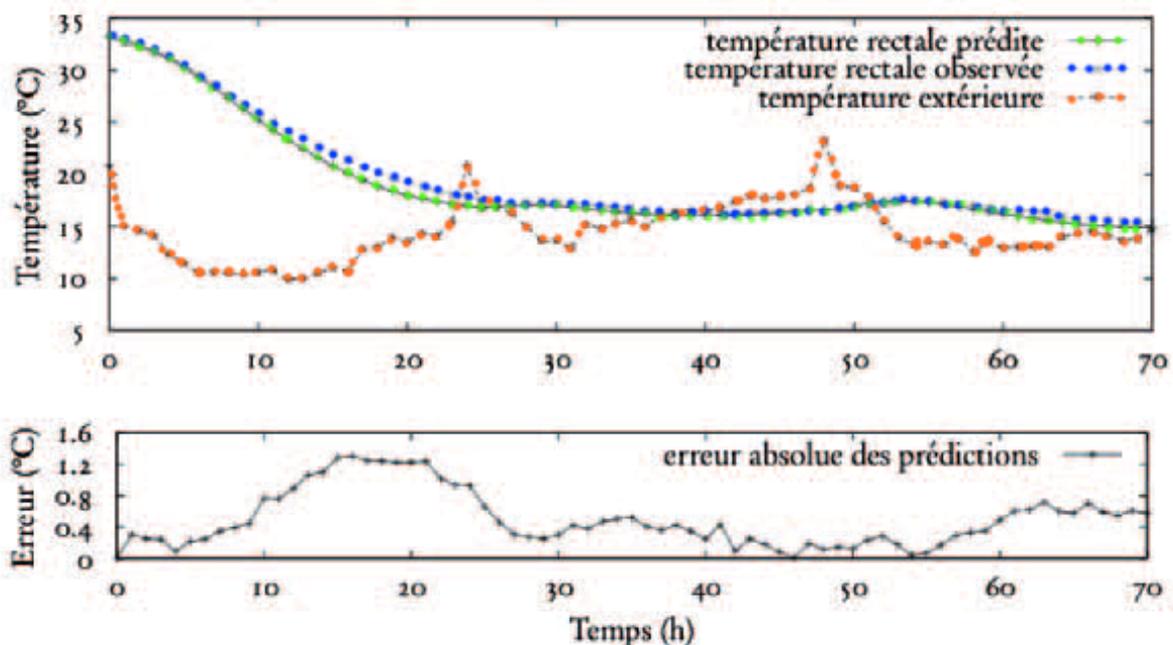
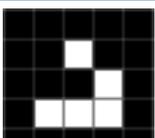


Tableau 2 : Tableau représentatif des résultats expérimentaux obtenus à l'aide de l'automate cellulaire.

Cette approche, encore expérimentale, a été testée sur des cadavres de porcs. Les résultats étaient très proches des attentes des scientifiques, ainsi que des résultats du modèle de Henssge. La courbe orange ci-dessus nous montre que malgré les changements de la température extérieure, les résultats concordent bien avec ce qui était attendu. Cette subtilité n'est pas prise en compte par la formule d'Henssge.



De plus, grâce à cette technique, les chercheurs ont pu se rendre compte que la température interne subissait tout d'abord une forte décroissance avant de se stabiliser entre 15° et 20°, selon la température ambiante. L'écart observable ne dépasse jamais 2°C, ce qui encourage d'autant plus les chercheurs. Même si cela prouve que l'automate cellulaire est au moins aussi précis que la formule d'Henssge, les règles ne sont pas validées. Mais si les tests sur des cadavres humains sont valides, cet automate est bien plus pertinent que la formule d'Henssge.

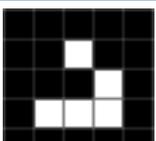
B. LES TUMEURS CEREBRALES – RENCONTRE AVEC UN CHERCHEUR

Mêmes s'ils peuvent être plus utiles et plus optimisés, les automates cellulaires ne sont pas les outils les plus communs en matière de recherche. Il existe plusieurs modélisations possibles. C'est alors le choix de chercheurs qui, à partir d'une problématique, envisagent un ensemble de solutions. Nous avons eu l'occasion de rencontrer **M. Christophe Deroulers**, maître de conférences à la faculté d'Orsay et chercheur en modélisation des systèmes biologiques à l'Imagerie et Modélisation en Neurobiologie et Cancérologie d'Orsay, ou IMNC, qui travaille en ce moment même sur un projet particulier. Des médecins lui ont demandé, à lui et son équipe un moyen d'anticiper la **migration des tumeurs diffuses** (par opposition aux tumeurs solides : ce sont des tumeurs éparpillées, dont la localisation n'est pas nette et qui grâce à leur séparation, sont capables de se régénérer si l'on n'en retire pas toutes les occurrences.) notamment dans la zone cérébrale. Les tumeurs sont des masses de cellules anormales. Elles peuvent être causées par un cancer, mais également par des traumatismes (ou microtraumatisme pour le cas des verrues). Ce groupe de recherche comprend aussi Marine Aubert, également chercheuse à l'IMNC, qui a fait une thèse sur l'évolution de sphéroïdes (modèle en 3D qui reconstitue le microenvironnement cellulaire) de cellules issues de glioblastomes (tumeur cérébrale maligne particulièrement agressive).

Leur recherche ne peut s'effectuer qu'in vitro : en effet aucun test ne peut être effectué sur un être vivant. Leur recherche a donc débuté dans des boîtes de Petri afin de quantifier la diffusion des tumeurs à partir d'un point précis. Les chercheurs travaillent sur le facteur qui permet aux tumeurs de migrer. On sait que les cellules tumorales peuvent, dans le cerveau, migrer via les jonctions communicantes (aussi appelées jonctions ouvertes ou *gap junctions*, qui mettent en relation les cytoplasmes de deux cellules). Ils ont donc mis des cellules tumorales dans un milieu qui rend les jonctions communicantes inefficaces. Mais ces jonctions permettent aussi aux ions, aux sucres et à d'autres petites molécules de passer. Les couper occasionnerait donc des dommages dangereux, particulièrement pour la zone du cerveau. Néanmoins, c'est un début de piste pour empêcher la migration des tumeurs.

L'automate cellulaire leur permet de faire un grand nombre de modélisations et d'ensuite comparer les résultats, et en faire une moyenne. Les chercheurs ont donc décidé de concevoir un automate cellulaire asynchrone afin que deux agents ne fusionnent pas dans une même case du quadrillage. Pour la forme des cases, un pavage hexagonal a été choisi : c'est un équilibre entre la taille de l'agent et le nombre de ses voisins et ne demande pas trop de puissance à l'ordinateur pour faire les calculs. Les chercheurs ont ensuite décidé d'attribuer un comportement spécial aux agents afin d'adapter les déplacements de chacun à la situation.

L'équipe de chercheurs a hésité à modéliser des **cellules allongées** : en effet le mouvement de ces cellules leur donne une forme plus longue. Mais ce facteur ne pouvait



être pris en compte : la place deux fois plus importante que prenaient les cellules causaient des « embouteillages » et ne correspondaient pas à ce qu'ils pouvaient observer sur la boîte de Petri.

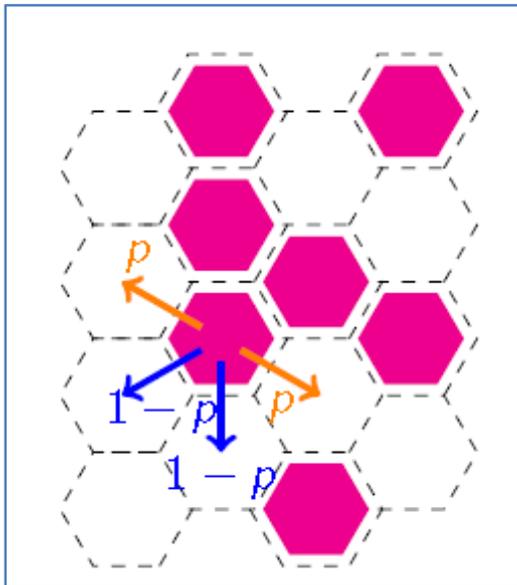


Figure 12 : Schéma d'un déplacement d'agent en fonction de la probabilité p

Grâce à l'expérience in vitro, les chercheurs ont pu octroyer aux agents une probabilité p qui leur permet d'avoir une **préférence** lors de leurs déplacements : ils peuvent préférer (ou non) une case en contact avec un autre agent lors du mouvement.

Cette probabilité permet de contrôler l'étalement des agents, et donc des cellules dans le tissu étudié. On voit sur le schéma ci-joint que selon la valeur de p , entre 0 et 1, que les agents (représentés en rose) auront tendance à rester près des agents voisins pour p compris entre 0.5 et 1, et au contraire à s'éloigner de leurs voisins initiaux pour p compris entre 0 et 0.5.

Ce paramètre modifiable permet un changement très sensible de l'automate et offre aux chercheurs la chance de « coller » au mieux à ce qu'ils peuvent voir. En effet en modifiant la valeur de p , le résultat en visible :

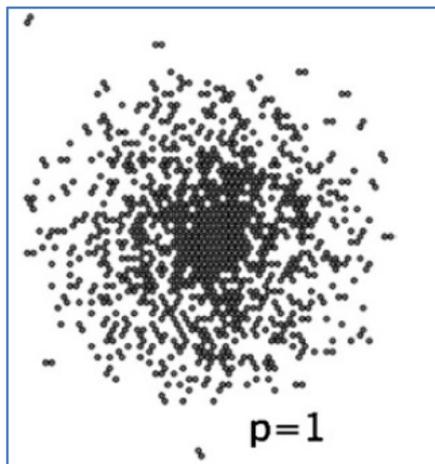


Figure 13 : schématisation de la migration des tumeurs avec $p=1$

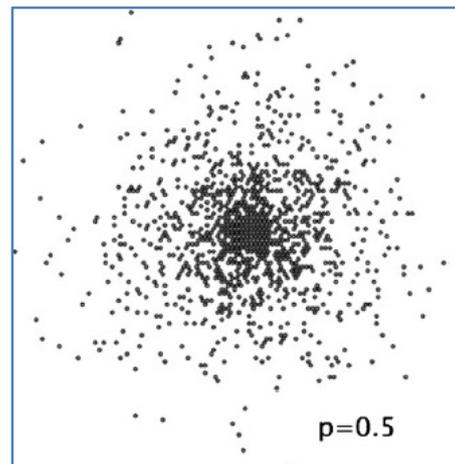


Figure 14 : schématisation de la migration des tumeurs avec $p=0,5$



Ces images sont des captures de leur automate cellulaire avec un p différent. On voit nettement la différence entre les deux : la seconde simulation s'est bien plus éparpillée que la première. Tous les facteurs possibles ayant été pris en compte ou écartés, les chercheurs ont fini par obtenir cet automate cellulaire :

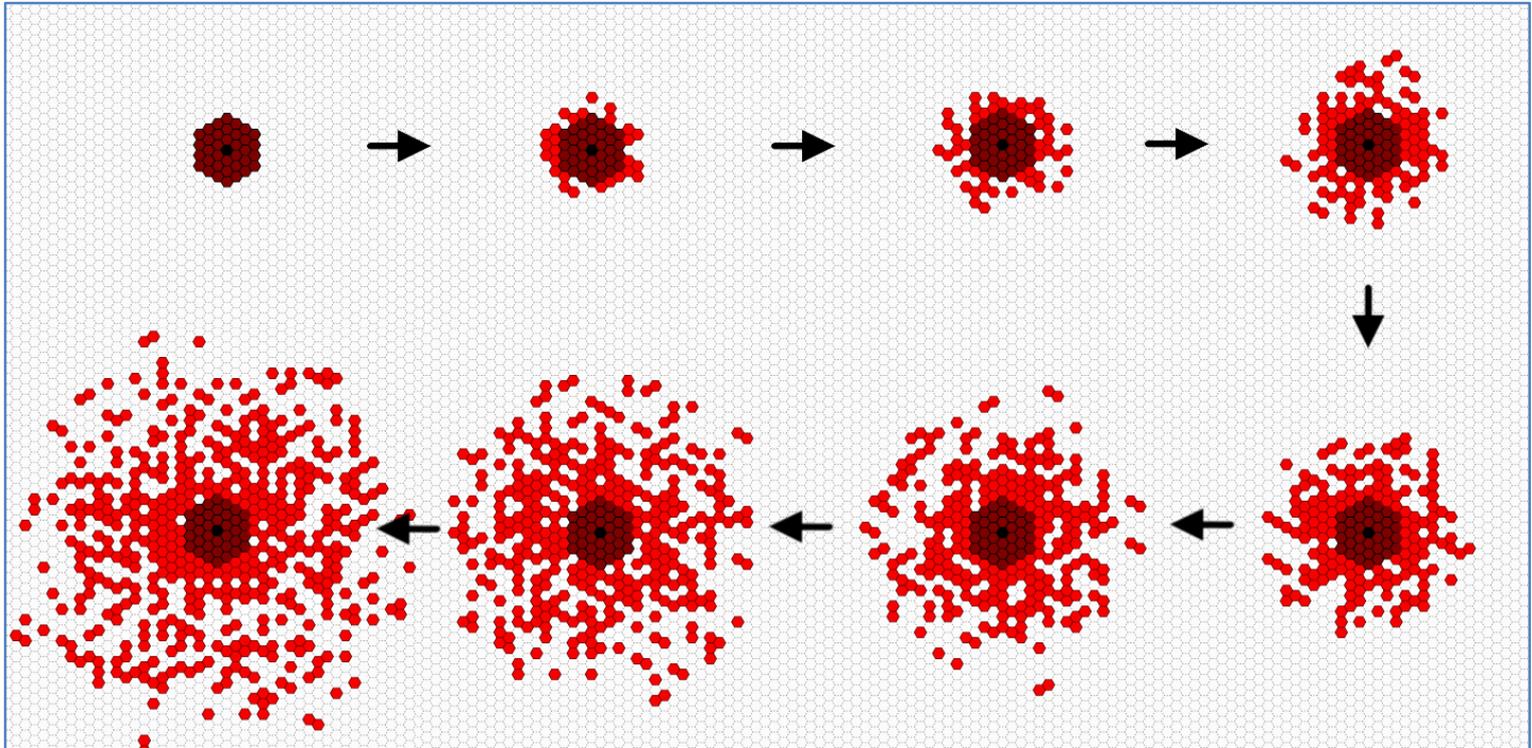


Figure 15 : Modélisation de la migration des cellules tumorales jusqu'à $t=500$

L'hexagone plus foncé correspond à la zone de départ des tumeurs. Cette zone est constamment renouvelée par de nouveaux agents : le cœur de la tumeur continue en effet de se reproduire.

Ils ont ainsi mis au point un automate cellulaire, imparfait mais qui permet déjà de faire un grand nombre d'essai et d'en faire une moyenne pour faire avancer le projet.

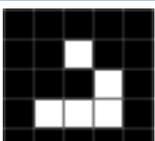
Cela permet tout de même de mettre au point une formule permettant de déduire la propagation des cellules tumorales autour de l'espace de départ :

$$\frac{dp(\vec{r}, t)}{dt} = \vec{v} \left[D(p) \vec{\nabla} p(\vec{r}, t) \right] + kp(1 - p)$$

Formule 2 : Formule du déplacement des cellules tumorales autour d'un point

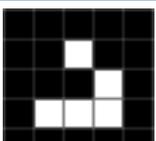
M. Deroulers n'a malheureusement pas eu le temps de nous expliquer cette équation.

Un nouveau problème apparaît alors. La modélisation 3D est nécessaire pour approcher encore plus la réalité. Malheureusement, la capacité des ordinateurs qu'ils utilisent ne permet pas de prendre en compte les différents obstacles qui peuvent



intervenir dans la propagation des cellules tumorales. L'automate n'est qu'une petite partie de cette recherche mais il permet d'avancer, de découvrir un nouveau point de vue sur la problématique.

Modéliser précisément un caractère concret est très difficile. Dans la réalité, une modélisation ne peut être que simplifiée. Spécialement dans les automates cellulaires, puisque c'est à nous de définir les règles de notre automate, à nous de prendre en compte toutes les possibilités, et de les traduire en un langage que l'ordinateur pourra comprendre. Certaines notions sont parfois hors de notre portée. L'outil qu'est l'automate cellulaire, même si bien utile pour des modélisations d'informations individuelles, est donc plus manipulable sur des utilisations plus globales, en généralisant les comportements.



III. LES AUTOMATES CELLULAIRES A L'ECHELLE D'UNE POPULATION

En effet, l'automate cellulaire est utilisé de manière plus générale, pour étudier les mouvements plus importants que peuvent connaître notre société.

Nous allons aborder ici **les automates cellulaires à l'échelle d'une population** avec comme exemple principal la **grippe A (H1N1)**.

A. LE VIRUS DE LA GRIPPE A (H1N1) ET SON AUTOMATE CELLULAIRE

La grippe A (H1N1) est une maladie respiratoire aiguë de l'être humain apparue en 2009. Elle est provoquée par un virus dérivé de celui de la grippe A, de sous-type H1N1. Ce nouveau virus grippal, contient des gènes de plusieurs virus connus d'origine porcine, aviaire et humaine. La contamination s'effectue principalement par voie aérienne, c'est-à-dire par la respiration, la toux et les éternuements.

Le symbole « A » de ce type de grippe signifie « Aviaire » car ce virus a pour origine les oiseaux. Pour ceux-ci, le virus est assez peu dangereux et se loge principalement dans leur tube digestif. En effet, les oiseaux représentent **un réservoir viral**, dont les souches peuvent se transmettre à l'Homme soit directement (plutôt rare) ; soit indirectement, via le porc, dont les gènes sont plus proches par rapport aux deux espèces. Sachant que le virus présente une forte capacité à muter, des souches apparaissent, ainsi, compatibles avec l'Homme et le porc.

Il provoqua une épidémie grippale dans les mois qui ont suivi son apparition. Devant l'ampleur de l'épidémie, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a qualifié la situation de **pandémie** (épidémie présente sur une large zone géographique) le 11 juin 2009. En août 2010, le monde entre en période post-pandémique selon l'OMS. Cependant, il ne s'agit que de l'alerte, le virus circule toujours abondamment autour du globe.

Voici une frise chronologique récapitulant les différentes pandémies ainsi que leurs caractéristiques sur différentes souches grippales :

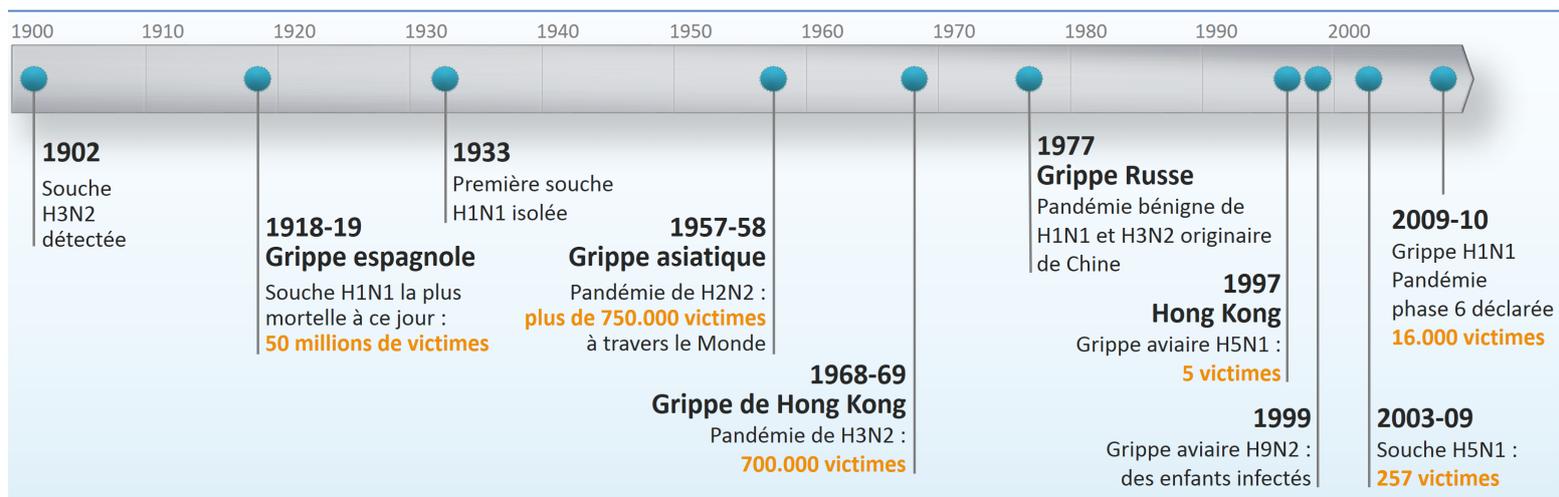
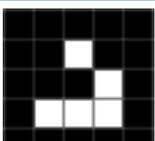


Figure 16 : Frise chronologique représentant les différentes pandémies grippales ainsi que leurs caractéristiques sur différentes souches grippales :



Désormais, nous savons mieux ce qu'est la grippe A (H1N1). Le lien entre cette épidémie et les automates cellulaires s'est fait grâce à un mathématicien du nom d'**Hervé Lehning** qui a créé un automate cellulaire pour modéliser la propagation de la Grippe A (H1N1) sur un modèle probabiliste. En effet, celui-ci a utilisé cet outil mathématique, trouvant que ce dernier est particulièrement utile pour modéliser les processus d'expansion des épidémies. Pour ce faire, il a alors créé de nouvelles règles (en se basant sur la réalité) pour son automate cellulaire, en se plaçant dans une situation de départ dans un damier à l'infini où tous les agents sont sains sauf l'un d'entre eux (agent infecté) :

- ↳ Les agents voisins de l'agent infecté sont infectés au coup suivant avec la probabilité p ;
- ↳ L'agent infecté meurt ou est immunisé le coup suivant.

Le modèle étant ici probabiliste, on ne peut donc pas prédire à l'avance ce qui va se produire lors d'un essai en particulier. Pour avoir une idée rapide de l'évolution moyenne du système, le mieux est de procéder à une simulation. Pour cela, on « joue » selon les règles énoncées ci-dessus en utilisant un **générateur de nombres pseudo-aléatoires**, et on comptabilise le nombre de cellules infectées.

En jouant cent fois de suite et en faisant la moyenne des résultats, on obtient une mesure de l'expansion moyenne de l'épidémie. En dessous d'un certain taux de contamination p , l'épidémie ne s'étend pas. En revanche, au-dessus de ce taux, elle envahit le monde entier. Dans le cadre de notre modèle simplifié, le taux critique se situe entre 30% et 40%. Une maladie ne devient épidémique que si ce taux est dépassé. Cependant, ces pourcentages ne concernent que le modèle de voisinage composé de huit agents dit voisinage de Moore, du nom d'Edward Forrest Moore (1925-2003), l'un des fondateurs de la théorie des automates cellulaires :

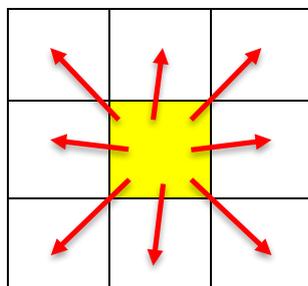


Figure 17 : Schéma représentant le voisinage de Moore :

Si le modèle de voisinage est composé de quatre agents ce qui est donc plus simple, dit voisinage de Von Neumann, le taux critique pour lequel une maladie devient épidémique se situe aux alentours de 60 % :

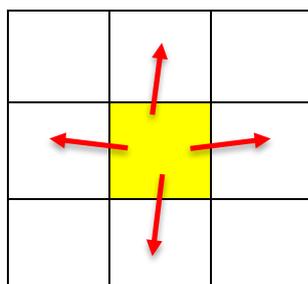
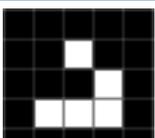
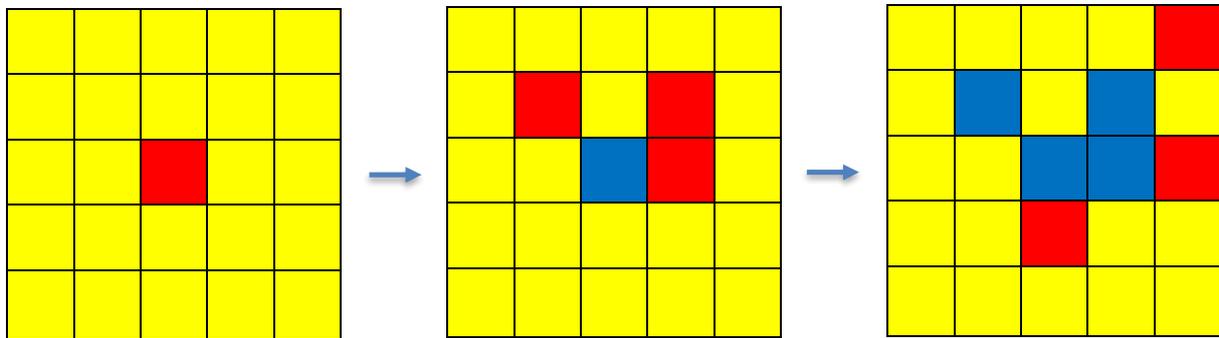


Figure 18 : Schéma représentant le voisinage de Von Neumann :



Pour finir, voici un exemple de simulation avec les règles de l'automate cellulaire d'Hervé Lehning. Sachant qu'un agent infecté contamine un agent sain avec un taux de 25%, on a :



- Légende :
- Jaune : Agent sain ;
 - Rouge : Agent infecté ;
 - Bleu : Agent mort ou immunisé

Figure 19 : Séquence de simulation avec les règles de Lehning :

Ainsi, en se basant sur cette démarche, nous avons-nous aussi créé notre automate cellulaire sur le virus Ebola.

B. NOUVEAU CAS : LE VIRUS EBOLA

Dans le cadre de notre TPE, et plus particulièrement de notre oral de TPE, nous avons mené nos recherches sur l'épidémie d'Ebola. Nous avons ainsi pu modéliser la propagation du virus Ebola par le biais d'un automate cellulaire.

Le **virus Ébola** appartient à la famille des Filovirus. Il a été identifié pour la première fois en 1976 dans la province ouest-équatoriale du Soudan et dans une région voisine du nord du Zaïre (aujourd'hui République Démocratique du Congo).

Il existe des ambiguïtés sur l'origine du virus Ebola, mais il semblerait que ce soient des **chauves-souris frugivores** de la famille des Ptéropodidés qui constituent vraisemblablement le réservoir naturel du virus. Cependant, d'autres mammifères peuvent être infectés. Chez l'homme et les autres primates, il provoque la maladie à virus Ebola, et a causé plusieurs épidémies.

Cette maladie, pour laquelle il n'existe **pas de traitement homologué**, a un taux de létalité allant de 25 % à 90 % chez l'humain, qui affichait le 22 février 2015 un taux de 40,5 % (9 604 morts sur 23 729 cas

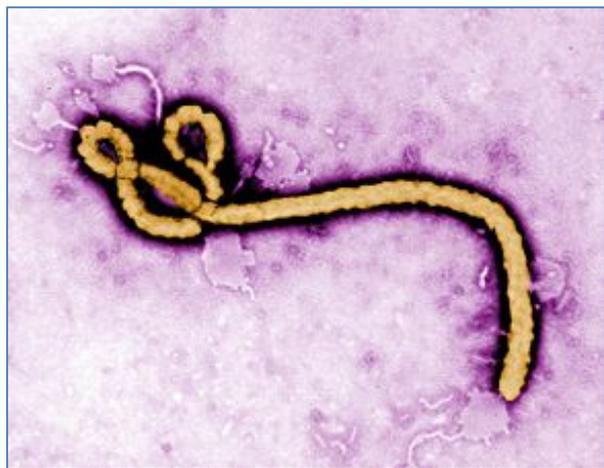


Figure 20 : Image représentant une particule virale Ebola, colorisée et obtenue par microscopie électronique en transmission en août 2014 :



recensés). La transmission entre humains se fait principalement par contact direct avec des fluides corporels tels que le sang, la salive, l'urine, le lait maternel, le sperme, la sueur, les selles et les vomissures (ou avec des objets qui ont été contaminés par les fluides corporels de patients infectés).

Le virus Ebola est responsable d'une maladie grave et souvent mortelle qui donne de la fièvre, des diarrhées, une fatigue intense, des vomissements, des douleurs musculaires et articulaires, et dans les cas les plus graves des saignements internes (hémorragies) qui peuvent, ainsi, causer la mort.

Les flambées de fièvre hémorragique provoquées par le virus Ebola surviennent principalement en Afrique. **La précocité et la qualité de la prise en charge des patients** jouent un rôle important dans la diminution de la mortalité associée à la maladie.

En France, les chances de guérison sont beaucoup plus élevées que dans les pays d'Afrique en raison de la surveillance mise en place et de la prise en charge rapide et adapté des patients.

Maintenant que nous connaissons un peu mieux ce virus, il faut savoir que nous avons établie **deux automates cellulaires de la propagation d'Ebola** : l'un en Afrique, et l'autre en Europe. Ainsi, cela nous donne une meilleure idée de la pertinence de chacun de ces deux modèles d'un point de vue global.

Nous allons retenir quelques chiffres qui nous ont permis de créer les règles de l'automate cellulaire chargé de modéliser la propagation du virus Ebola en Afrique :

- ↘ Une létalité de 25% à 90% ;
- ↘ Une chance de guérison de 10% (dans le cas le plus dramatique) ;
- ↘ Une incubation du virus de 2 jours à 20 jours ;
- ↘ Une personne infectée contamine environ 25% de ses connaissances.

Et quelques chiffres pour les règles de l'automate cellulaire chargé de modéliser la propagation du virus Ebola en Europe :

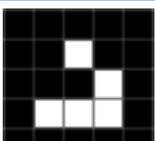
- ↘ Une létalité de 35% ;
- ↘ Une chance de guérison de 65% ;
- ↘ Une incubation du virus de 5 jours à 25 jours ;
- ↘ Une personne infectée contamine environ 4% de ses connaissances.

Les modélisations de propagations de virus sont utiles pour obtenir un nouveau point de vue sur une maladie, que ce soit pour anticiper les soins nécessaires ou bien étudier le virus.

Malgré cela, nos automates cellulaires possèdent des limites, cela concerne aussi l'outil mathématique en général.

C. LES LIMITES DE L'OUTIL MATHÉMATIQUE

Nous avons vu jusqu'à présent les nombreux avantages que présentent les automates cellulaires. Cependant, il existe malheureusement des défauts à ce modèle mathématique qui limitent de ce fait son utilisation dans le domaine médical. En effet, nous pouvons en noter quelques-uns dans un cas général :

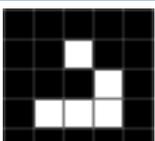


- ↳ Les automates cellulaires sont un outil mathématique de modélisation qui sert pour des représentations simplifiées, théoriques, rationnelles et donc limitées d'un phénomène réel ;
- ↳ Il y a aussi la limite technologique dont Von Neumann a d'ailleurs subi les effets : l'informatique a permis d'outrepasser pour un temps ces « barrières » grâce à des calculs complexes faits de plus en plus rapidement, mais pour modéliser des phénomènes réels, les règles sont très nombreuses et nécessitent de ce fait des machines informatiques encore plus puissantes ;
- ↳ Le facteur humain est l'une des plus importantes limites lorsque que la modélisation est utilisée pour les êtres humains. En effet, les automates cellulaires ne peuvent pas modéliser les réactions aussi complexes que déroutantes des humains.

Pour mieux comprendre ce qu'est le facteur humain, nous allons voir un exemple très intéressant issu d'un jeu vidéo. C'est en 2005, sur la plateforme en ligne du jeu vidéo **World of Warcraft**, qu'a eu lieu un évènement important pour les domaines de recherche. Le jeu World of Warcraft est un jeu de rôle en ligne où les joueurs incarnent un personnage personnalisable dont le but est de devenir de plus en plus fort en gagnant de l'expérience. Les développeurs du jeu ont décidé de créer un nouvel ennemi pour confronter les joueurs de haut niveau à une nouvelle difficulté : celui-ci est capable de lancer le sort « Sang corrompu », ou « Sang vicié ». Ce sort avait la particularité de se transmettre de joueur en joueur et de les blesser (tout comme un virus ...). Le sort n'était, à l'origine, pas censé sortir de l'enceinte d'une certaine zone mais un bug lui a permis de rester discrètement sur les familiers des personnages (un familier est une sorte d'animal de compagnie suivant toujours son personnage) tel **un porteur sain**. Une fois de retour dans les villes virtuelles, les familiers ont alors transmis ce **virus virtuel** aux autres joueurs, et ainsi commença la première **épidémie** à l'intérieur d'un jeu vidéo.

Si le problème a été réglé en l'espace d'une semaine, il a tout de même fait suffisamment de bruit pour interpeler des chercheurs qui publièrent, en 2007, des articles dans de prestigieux magazines scientifiques comme **Science** ou **The Lancet**. Les spécialistes en épidémie ce sont en effet rendus compte qu'il y avait de nombreux points communs entre le comportement des joueurs à travers leur personnage et le comportement de gens dans la vraie vie. Par exemple, on pouvait observer des joueurs qui fuyaient les villes pour ainsi échapper à la population contaminée, ou des joueurs qui aidaient les malades, en les soignant. Nous avons alors découvert ce que **Nina Fefferman** (professeur d'université, spécialiste en modélisation informatique) a appelé le « facteur stupide » ou encore le **facteur humain** : des joueurs, curieux, allaient dans les grandes villes et retournaient dans les zones saines, transportant malgré eux le virus, et provoquèrent ainsi une pandémie présente sur tous les continents du jeu. En effet, ce comportement s'est vu dans le monde réel, avec des journalistes, qui partaient plusieurs jours à l'étranger pour témoigner de l'état d'une épidémie et revenait dans leur pays, parfois porteurs de la maladie.

Cette anecdote précise donc le problème de la modélisation du **facteur humain**. Les machines informatiques (et leurs algorithmes) sont en effet trop rationnelles pour modéliser le comportement parfois aléatoire de certaines personnes, et sous-estiment souvent dangereusement la vitesse de propagation d'une maladie. Modéliser des populations humaines est donc **particulièrement complexe**, et les facteurs à prendre en compte ne sont pas encore tous connus.



IV. CONCLUSION

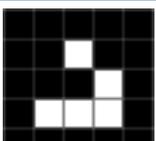
Que ce soit pour prouver une loi mathématique, pour étudier des règles très différentes des nôtres ou pour faire avancer des domaines tels que la biologie ou la physique, les automates cellulaires, de leur création en 1950 à nos jours, ont toujours servi à modéliser des choses complexes dans notre monde en les traduisant dans l'univers cellulaire, aux règles plus simples. Cette simplicité a subjugué les chercheurs jusqu'à aujourd'hui, de par la complexité qu'elle cache.

Les automates cellulaires ne sont pas qu'un outil mathématique : ils sont aussi un outil pour le domaine médical, utilisé pour modéliser des maladies, que ce soit à petite échelle, chez un patient en particulier, ou à grande échelle, dans une population entière. Bien que surtout utilisés lors d'expérience, les automates cellulaires ont un potentiel énorme, grâce à l'adaptation des règles simples.

Cependant, il est important de noter que cette simplicité est également un inconvénient : les automates cellulaires ne peuvent représenter que quelques facteurs d'un phénomène, ce qui amène donc à des modélisations basiques du phénomène de départ. Les résultats ainsi obtenus sont souvent éloignés de ceux que l'on aurait dû obtenir.

Même si l'automate cellulaire peut être considéré comme un outil parfois peu précis, il reste très utile car il s'applique dans tous les domaines et permet d'apporter des éléments de réponse utiles à des problèmes confus, comme nous avons pu le voir au laboratoire d'Orsay. Ils permettent donc de faire avancer des recherches médicales, et assistent autant les médecins que les chercheurs.

Donc, nous pouvons répondre un grand **OUI** à notre problématique de départ : Les Automates Cellulaires peuvent-ils assister le milieu médical ? En effet, les automates cellulaires peuvent nous apporter un nouveau point de vue, une nouvelle manière de penser qui révolutionnera peut-être un jour ce domaine, ainsi que les sciences.



V. ANNEXES

A. RERMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous tenons à remercier le lycée Jules Vernes de Limours, pour nous offrir la chance de pouvoir effectuer ce travail de TPE.

Ensuite, nous tenons à remercier tous particulièrement nos parents pour nous avoir soutenu, aidé, et quelques fois, véhiculé.

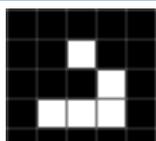
Nous tenons aussi à remercier :

- ↳ Pascal Parneix, pour nous avoir aidé dans la recherche de professionnels dans le milieu des Automates Cellulaires ;
- ↳ Christophe Deroulers, pour nous avoir accordé une « interview » dans le cadre de notre TPE, en nous parlant de son métier sur les Automates Cellulaires dans le cas de tumeurs cérébrales ;
- ↳ Mme. Dehais et M. Parizot (nos professeurs de SVT et Mathématiques) pour nous avoir encadré, guidé, et aidé tout au long de ce travail.

Pour finir, nous remercions le lecteur pour avoir lu notre travail.

B. SOURCES

- ↳ Science étonnante [en ligne]. 2013 [consulté le 15 novembre 2014]. Les automates cellulaires élémentaires. Disponible sur : <https://sciencetonnante.wordpress.com/>
- ↳ Fatès, Nazim. Les automates cellulaires : vers une nouvelle épistémologie. Septembre 2001, 82 p.
- ↳ Rennard, Jean-Philippe. Automates cellulaires. Décembre 2000, 25 p.
- ↳ Automate cellulaire [en ligne]. Wikipedia, mis à jour le 11 février 2015 [consulté en décembre 2014]. Disponible sur : http://fr.wikipedia.org/wiki/Automate_cellulaire
- ↳ Jeu de la vie [en ligne]. Wikipedia, mis à jour le 26 février 2015 [consulté en janvier 2015]. Disponible sur : http://fr.wikipedia.org/wiki/Jeu_de_la_vie
- ↳ Glider. In Wikipedia [en ligne]. Mis à jour le 19 mai 2014 [consulté en décembre 2014]. Disponible sur : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Vaisseau_\(automate_cellulaire\)#mediaviewer/File:Glider.svg](http://fr.wikipedia.org/wiki/Vaisseau_(automate_cellulaire)#mediaviewer/File:Glider.svg)
- ↳ Gosper, Gosper glider gun. In Lifewiki. Mis à jour le 18 février 2015 [consulté en janvier 2015]. Disponible sur : <http://www.conwaylife.com/w/images/b/b6/Gosperglidergun.gif>
- ↳ Gemini. In Lifewiki. Mis à jour le 29 juillet 2014 [consulté en février 2015]. Disponible sur : <http://www.conwaylife.com/wiki/File:Gemini.png>
- ↳ Garden of Eden Pattern. In Wikipedia [en ligne]. Mis à jour en janvier 2015 [consulté en janvier 2015]. Disponible sur : http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Garden_of_Eden_pattern.png?uselang=fr
- ↳ Highlife replicator. In Wikipedia [en ligne]. Mis à jour le 17 mai 2013 [consulté en décembre 2014]. Disponible sur : http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Highlife_replicator.png?uselang=fr



- ↳ Veremme (A.) et Charabdize (D.). « De la cellule humaine à l'automate cellulaire » Tangente, hors série n°42, 8 décembre 2011, pp. 148-154.
- ↳ D. Charabdize. Décomposition d'un cadavre [en ligne]. SPIP, mis à jour le 18 avril 2011, [consulté le 13 octobre 2014]. Disponible sur : <https://www.forensseek.org/blog/Decomposition-d-un-cadavre.html>
- ↳ Wikipédia, l'encyclopédie libre [en ligne]. Fondation Wikimedia, 13 décembre 2004, mis à jours le 21 décembre 2014 [consulté le 13 octobre 2014]. Datation des cadavres. Disponible sur : http://fr.wikipedia.org/wiki/Datation_des_cadavres
- ↳ Marieb, Elaine N. Anatomie et physiologie humaines. DeBoeck Université. Edition du Renouveau pédagogique Inc., 1999. 1194 pages. Collection Anatomie/Physiologie. ISBN 2-8041-3219-6
- ↳ Wikipédia, l'encyclopédie libre [en ligne]. Fondation Wikimedia, 14 novembre 2004, mis à jours le 23 décembre 2014 [consulté le 17 janvier 2015]. Tumeur. Disponible sur : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Tumeur>
- ↳ ANSM. La Grippe A(H1N1) v. In : ANSM [en ligne]. ANSM, 2009, [consulté en Décembre 2014]. Disponible sur : <http://ansm.sante.fr/Dossiers/Pandemie-grippale/La-Grippe-A-H1N1-v/%28offset%29/0>
- ↳ OMS. Grippe pandémique H1N1 2009. In : OMS [en ligne]. OMS, 2009, [consulté en Décembre 2014]. Disponible sur : <http://www.who.int/fr/>
- ↳ Aloysia, Laura, Mathilde. Peut-on fabriquer un vaccin contre une pandémie de grippe A. In : TPE 2013 – Vaccin Grippe A [en ligne]. Aloysia, Laura, Mathilde, 2013, [consulté en Janvier 2015]. Disponible sur : <http://www.notre-tpe.fr/>
- ↳ Hervé Lehning. La Théorie des jeux. Tangente, Novembre-Décembre 2009, n°131, p. 8-9.
- ↳ Wikipédia. Encyclopédie libre [en ligne]. Fondation Wikimédia, 2012, [consulté en Décembre 2014]. Grippe A (H1N1) de 2009. Disponible sur : http://fr.wikipedia.org/wiki/Grippe_A_%28H1N1%29_de_2009
- ↳ Sante.gouv. Ebola, qu'est-ce que c'est ? In : Sante.gouv [en ligne]. Sante.gouv, 2014, [consulté en Janvier 2015]. Disponible sur : <http://ebola.sante.gouv.fr/ebola-qu-est-ce-que-c-est/>
- ↳ Wikipédia. Encyclopédie libre [en ligne]. Fondation Wikimédia, 2014, [consulté en Février 2015]. Virus Ebola. Disponible sur : http://fr.wikipedia.org/wiki/Virus_Ebola
- ↳ Aloysia, Laura, Mathilde. La grippe A est-elle dangereuse ? [Schéma] In Aloysia, Laura, Mathilde. TPE 2013 – Vaccin Grippe A [en ligne], Wordpress, 2013 [consulté en Janvier 2015]. Disponible sur : <http://www.notre-tpe.fr/wp-content/uploads/2013/02/Sch%C3%A9ma-la-grippe-A-est-elle-dangereuse.png>
- ↳ Wikipédia. Ebola_virus [image]. Wikipédia [en ligne], Wikipédia, 2014, [consulté en Février 2015]. Disponible sur : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/06/Ebola_virus_%282%29.jpg

