



HAL
open science

Quand l'IA explore les prémices d'une vie artificielle

Clément Moulin-Frier, Gautier Hamon, Pierre-Yves Oudeyer

► **To cite this version:**

Clément Moulin-Frier, Gautier Hamon, Pierre-Yves Oudeyer. Quand l'IA explore les prémices d'une vie artificielle. *Pour la science*, 2024, 562. hal-04848954

HAL Id: hal-04848954

<https://inria.hal.science/hal-04848954v1>

Submitted on 19 Dec 2024

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.

Copyright



Nous référons dans cet article à quelques vidéos en ligne qui permettent de bien mieux se rendre compte de la dynamique des systèmes que nous décrivons. Nous avons regroupé ces vidéos dans un site web accessible à <https://sites.google.com/view/pour-la-science-lenia/accueil> (ou par le QR-Code ci-dessus).

Quand l'IA explore les prémices d'une vie artificielle

Clément Moulin-Frier, Gautier Hamon, Pierre-Yves Oudeyer

Équipe Flowers du Centre Inria de l'Université de Bordeaux.

<https://flowers.inria.fr>

Imaginons une simulation informatique dans laquelle un grand nombre d'entités se modifient en fonction de l'activité de leurs voisinage, un peu à la manière de composants chimiques simulés qui interagissent entre eux au cours du temps. Au début, dans cet univers informatique, il y a juste de la matière dispersée au hasard, et quelques règles abstraites de physique artificielle. En particulier il n'y a rien que l'on puisse qualifier de vivant : ni corps, ni cerveau, ni action, ni perception, bref pas d'individus et pas d'évolution. Et puis spontanément apparaissent des sortes de petites créatures artificielles : des formes localisées qui se déplacent, contournent des obstacles, peuvent se reconstruire quand leur corps est endommagé, voire parfois même se reproduire entre elles. Serait-ce une forme d'apparition d'une vie artificielle dans un programme informatique ? Récemment, nous avons réalisé des simulations informatiques de ce type, mettant en œuvre des automates cellulaires continus d'un nouveau type, et dans certaines conditions, nous avons observé la formation spontanée de telles structures. Nous allons découvrir comment ces simulations, qui appartiennent à un domaine scientifique appelé Vie Artificielle, permettent de poser des questions essentielles sur l'origine de processus évolutifs dans le vivant. Faisons un petit retour en arrière.

Notre travail s'inscrit dans la longue quête d'une réponse à une question fondamentale mais difficile: **Comment, dans un environnement initialement sans vie, sans individus (par exemple la Terre il y a environ 4 milliards d'année), certaines structures ont pu se former spontanément pour engendrer les tout-premiers êtres vivants amorçant la mécanique évolutionnaire encore à l'œuvre de nos jours ?** En effet, si la théorie de l'évolution darwinienne nous a fourni un cadre théorique puissant pour comprendre la complexité et la diversité des formes du vivant (de la première forme de vie à l'incroyable diversité des espèces ayant peuplées notre planète), elle ne dit rien des conditions qui ont mis en marche cette formidable machine à créer de la diversité.

Un concept fondamental pour aborder l'origine de la vie est celui d'*auto-organisation*, c'est-à-dire de l'apparition spontanée à l'échelle macroscopique de structures dont les propriétés ne sont pas présentes dans les structures microscopiques qui constituent au départ le système. Par exemple, dans certaines conditions, les molécules d'eau (à l'échelle microscopique) s'auto-organisent en des flocons de neige hexagonaux (à l'échelle macroscopique), et les étoiles s'auto-organisent en gigantesques galaxies spirales. Ce concept permet de reformuler la question de l'origine de la vie en des termes plus précis. Il s'agit de comprendre comment certains constituants d'un environnement initialement sans vie (à l'échelle microscopique) peuvent s'auto-organiser pour **former les tous premiers individus** (à l'échelle macroscopique) et **amorcer leur évolution**. Dans ce cadre, les premiers individus sont conçus comme des structures émergentes capables de s'auto-constituer, de s'auto-maintenir et d'avoir certaines fonctionnalités dans leur environnement. A minima, ces fonctionnalités doivent assurer la survie et la reproduction de ces structures afin d'amorcer une mécanique évolutionnaire assurant leur prolifération et leur diversification.

Concevoir l'origine de la vie comme un phénomène d'auto-organisation met en lumière pourquoi il est extrêmement difficile de l'aborder par une démarche purement théorique. Les phénomènes d'auto-organisation sont par nature difficiles à prévoir par l'intuition. Pour les appréhender, il faut fixer la nature de leurs composants élémentaires et des règles de leurs interactions. Mais par où commencer ? Et avec quelle chance de faire les bonnes hypothèses, pour espérer les vérifier expérimentalement ensuite ? Pour se donner une chance d'explorer l'immense combinatoire d'où est susceptible d'émerger la mécanique du vivant, les théories descriptives ne sont donc pas d'un grand secours.

Toutefois, si nous pouvions simuler sur ordinateur certains aspects de ce phénomène d'auto-organisation, nous pourrions alors rendre totalement explicite nos présuppositions car elles seraient exprimées de manière formelle dans un langage de programmation. Et nous pourrions également analyser en détail l'influence de ces présuppositions sur ce phénomène d'auto-organisation simulé et sur ce qu'il produit. Simuler des systèmes auto-organisés sur ordinateur est en fait très simple. L'exemple le plus connu est le Jeu de la Vie proposé par John Conway dans les années 70 et illustré Fig.1.a). Ce jeu démontre de façon très élégante comment une diversité de structures auto-organisées peut émerger de l'application systématique de règles locales et très simples. Certaines de ces structures sont stables (leur configuration n'est pas modifiée par l'application des règles, Fig.1.b), d'autres sont des

oscillateurs (l'application des règles les modifie mais elles alternent entre plusieurs configurations particulières, Fig. 1.c).

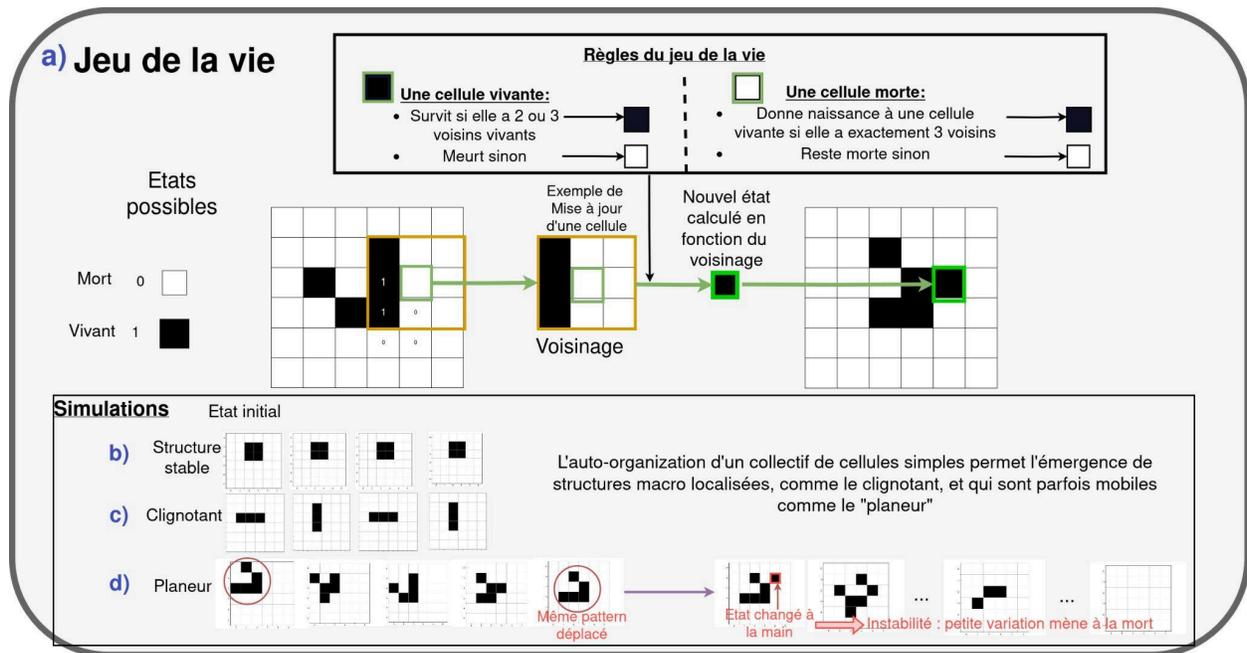


Figure 1 : Le Jeu de la Vie, un système auto-organisé simulé sur ordinateur.

Existe-t-il de la vie dans le jeu de la vie ?

Rien de vivant, ici, bien sûr. Mais prenons l'exemple d'une structure auto-organisée bien connue dans le Jeu de la Vie : le Planeur (Fig.1.d , [Vidéo 1.](#)). Il s'agit d'une configuration particulière de la grille qui, lorsqu'on y applique successivement les règles du système, produit une structure cohérente se déplaçant en diagonale. Le planeur possède certaines caractéristiques d'un "individu", dans le sens où il maintient sa propre organisation de façon cohérente malgré des modifications de sa structure. Il semble également avoir une certaine "fonctionnalité", ou comportement, car il semble se déplacer de manière autonome dans la grille. Toutefois, à la différence d'un organisme vivant, il est très peu robuste à des perturbations extérieures. Il suffit par exemple de modifier l'état d'une seule cellule dans son voisinage pour détruire sa cohérence (Fig. 1.d). De plus, le Planeur ne se reproduit pas et ne peut donc pas évoluer par sélection naturelle. Il existe bien dans le jeu de la vie des "pistolets à planeurs", de grandes structures capables de générer continuellement des planeurs ([Vidéo 2.](#)). Mais il ne s'agit pas là d'auto-reproduction et tous les planeurs qui en résultent sont exactement identiques : les variations des planeurs générés ne leur permettent pas de mieux s'adapter à leur environnement.

Le jeu de la vie semble donc limité en tant que modèle pour appréhender certains mécanismes fondamentaux du vivant. Bien qu'on puisse trouver une diversité de structures capables de maintenir leur propre organisation interne, des sortes de proto-individus, leur diversité est limitée et elles sont en général soit instables (comme le planeur), soit à la dynamique très simple (telle que les oscillateurs). De plus, aucune configuration du jeu de la vie découverte à ce jour ne permet d'amorcer un processus évolutif.

Lenia : une grande famille d'automates cellulaires

Le jeu de la vie a plusieurs limitations importantes : chaque cellule ne possède que deux états possibles (vivante ou morte), l'état suivant d'une cellule ne dépend que de l'état courant de ses huit voisins immédiats, et la dynamique du système est régie par un ensemble de règles fixes.

Le chercheur Bert Chan a récemment proposé une nouvelle génération d'automates cellulaires résolvant certaines de ces limitations : Lenia. Dans Lenia (Fig. 2), l'état d'une cellule est représenté par des nombres réels : il existe ainsi une infinité d'états possibles pour chaque cellule. De plus, l'état suivant de chaque cellule est calculé à partir de l'état courant de ses cellules voisines (comme dans le jeu de la vie), mais ce voisinage peut-être de taille arbitraire, c'est-à-dire qu'il n'est plus limité aux seuls 8 voisins les plus proches. Enfin, la règle de mise-à-jour, c'est à dire comment l'état d'une cellule est modifiée en fonction de l'état de ses voisins, est maintenant une fonction arbitraire que l'on peut choisir à sa guise (alors qu'il s'agit d'une règle fixe dans le jeu de la vie). Ce dernier point fait de Lenia non pas un automate cellulaire particulier, mais plutôt une famille d'automates cellulaires. En fait, le jeu de la vie lui-même correspond à une configuration particulière de Lenia, dans laquelle les états sont binaires (vivant ou mort), le voisinage correspond aux 8 voisins les plus proches, et la fonction de mise à jour a une forme particulière. David Louapre explique très clairement ceci sur sa chaîne en ligne Science Étonnante ([Vidéo 3](#)).

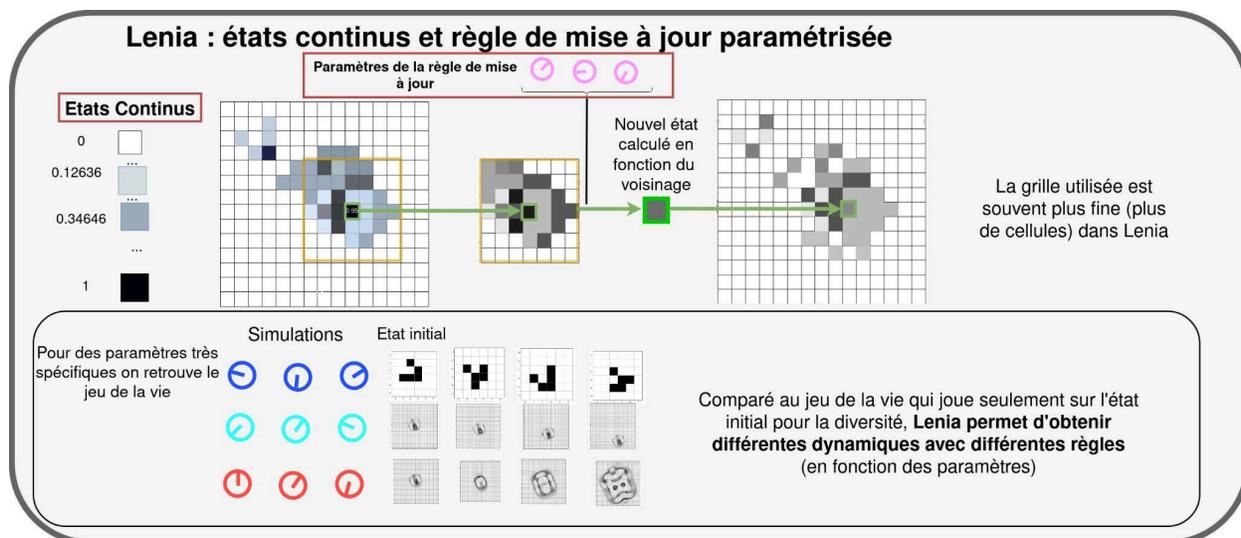


Figure 2. Lenia : une famille d'automates cellulaires paramétrables

Ainsi, Lenia permet de simuler une grande diversité d'automates cellulaires, chacun avec sa propre dynamique. On peut alors explorer cette diversité d'automates à la recherche de structures intéressantes, par exemple des structures qui pourraient ressembler à des sortes d'êtres vivants artificiels. Le créateur de Lenia a réalisé un véritable travail de fourmi à ce sujet. Un peu à la manière dont Darwin a exploré notre planète pour observer l'immense diversité des formes de vie sur Terre et en proposer une taxonomie (ce qui a permis de rendre crédible la théorie de l'évolution à partir d'observations de terrain), Bert Chan a pour sa part exploré l'espace des paramètres de Lenia pour observer la diversité des structures qu'on peut y trouver. Il l'a principalement fait manuellement, en choisissant par intuition et expérience certains paramètres du système lui semblant prometteurs, en particulier ceux générant des structures auto-organisées pouvant ressembler à des formes observées dans le vivant. Pour cela, il s'est parfois aidé d'algorithmes d'optimisation pour accélérer le processus. Il en a également proposé une taxonomie qui partage certaines ressemblances avec celles proposées pour la vie sur Terre (Fig 3., [vidéo 4](#)). On trouve par exemple des structures pouvant ressembler à des vers ou à des méduses.

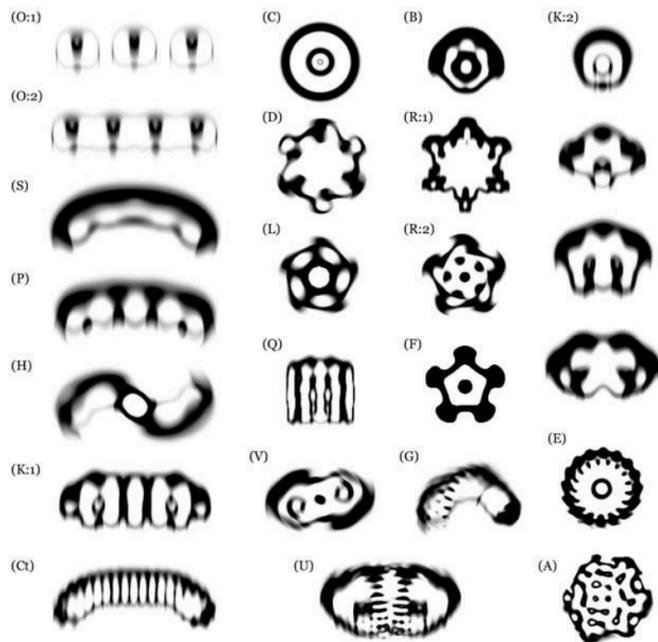


Figure 7. Biodiversity in Lenia as exemplified by the 18 Lenia families (not to scale). Column 1: (O) Orbidae, (S) Scutidae, (P) Pterifera, (H) Helicidae, (K) Kronidae, (Ct) Ctenidae. Column 2: (C) Circidae, (D) Dentidae, (L) Lapillidae, (Q) Quadridae, (V) Volvidae. Column 3: (B) Bullidae, (R) Radiidae, (F) Folidae, (G) Geminidae, (U) Uridae. Column 4: (K) Kronidae, (E) Echinidae, (A) Amoebidae.

Figure 3. Diversité de créatures découvertes dans Lenia (tiré de l'article "Lenia: Biology of Artificial Life" de Bert Chan)

Si la diversité des structures découvertes dans Lenia est fascinante, on bute encore une fois sur d'importantes limitations. D'abord, il est très fastidieux d'explorer manuellement l'espace des paramètres de Lenia : Pour chaque jeu de paramètres il faut lancer une simulation informatique puis caractériser son résultat, manuellement ou avec des algorithmes de vision par ordinateur, alors qu'une grande majorité de ces paramètres ne mène à aucune structure intéressante. Ensuite, si certaines des structures trouvées peuvent ressembler à des sortes d'êtres vivants artificiels, elles sont généralement peu robustes à des perturbations extérieures et montrent des comportements d'une complexité limitée : certaines se déplacent dans une certaine direction d'autres tournent sur elles-mêmes, mais il est très difficile de trouver des comportements plus complexes. Finalement, comme il existe une infinité de paramètres à tester dans Lenia, on ne peut jamais considérer que l'on a exploré l'ensemble des structures existantes.

Des méthodes d'IA pour explorer des automates cellulaires

Existe-t-il des jeux de paramètres de Lenia pouvant générer des structures qui se rapprochent de notre notion intuitive d'être vivant ? C'est peut-être le cas, mais pour le découvrir nous avons besoin de méthodes efficaces pour explorer l'infinité de l'espace des paramètres de Lenia à la recherche de telles structures. Pour cela nous avons proposé d'utiliser des algorithmes d'intelligence artificielle développés dans notre équipe qui permettent d'explorer efficacement l'ensemble des comportements possibles d'un système donné. Ces algorithmes, dont les premières versions datent des années 2000, s'intéressent initialement à modéliser le développement de l'enfant, en particulier les mécanismes de curiosité qui guident l'exploration de son environnement pour continuellement découvrir de nouvelles façons d'interagir avec celui-ci, de nouvelles compétences. Dans notre équipe nous aimons comparer un enfant à un petit scientifique, qui va se fixer des objectifs très divers, parfois même farfelus (*et si je dessinais un chat avec la confiture ?*), et concentrer ses efforts pendant un certain temps pour essayer de les atteindre. C'est entre autres cette analogie qui nous a incité à appliquer ces algorithmes d'exploration, que nous qualifions de "guidés par la curiosité", au domaine de la découverte scientifique assistée par ordinateur. Les scientifiques sont en effet en permanence confrontés à des systèmes qu'ils cherchent à mieux comprendre, et pour cela ils doivent tester différentes configurations de ces systèmes pour découvrir l'étendue des comportements qu'ils peuvent avoir. Prenons justement l'exemple d'un système tel que Lenia. Il reçoit en entrée un jeu de paramètres spécifiant ses règles de mise à jour, et produit en sortie des données de simulation (c-a-d la séquence d'états du système calculée durant sa simulation), à partir desquelles on peut observer certains comportements (par exemple une structure se déplaçant dans la grille). L'objectif de nos algorithmes, que nous qualifions d' "assistants pour la découverte guidés par la curiosité", est d'explorer efficacement l'espace des paramètres d'entrée du système afin de générer la plus grande diversité possible de comportements en sortie, tout en guidant cette exploration vers des comportements que nous jugeons intéressants (Figure 4).

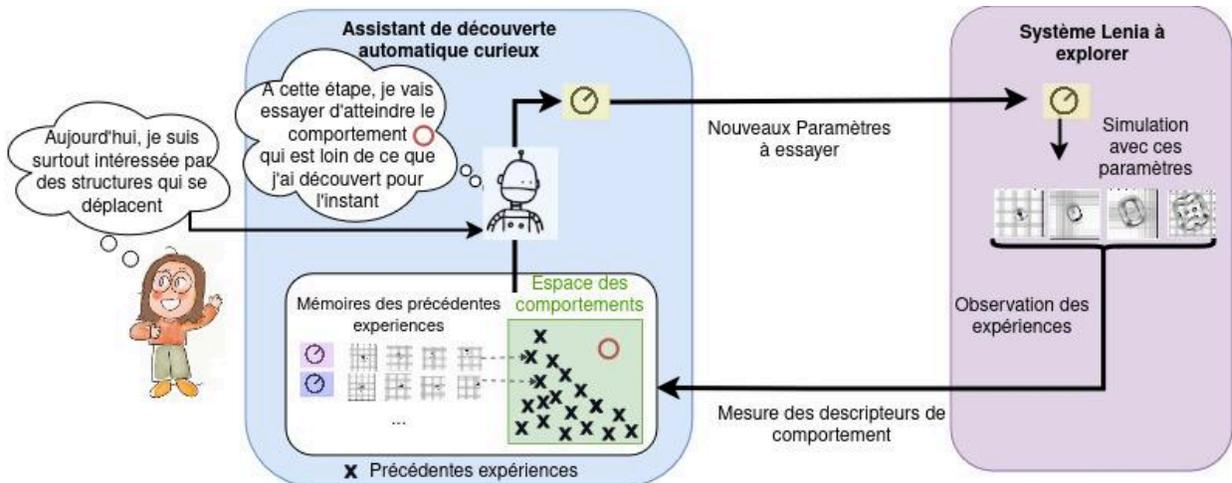


Fig 4. Assistant de découverte automatique curieux (algorithme d'Intelligence Artificielle) explorant l'espace des paramètres de Lenia (système de Vie Artificielle).

À la découverte d'individus dans Lenia

Précisons ce que l'on entend par "intéressant". Ici nous nous concentrerons sur des structures auto-organisées que l'on pourrait qualifier de "proto-individus", c'est-à-dire des structures capables de s'auto-constituer et de s'auto-maintenir, malgré des perturbations de l'environnement, et implémentant certaines fonctionnalités comportementales (telles que par exemple se déplacer, collecter des ressources, ou éviter des obstacles). Nous parlerons d'"agent sensorimoteur" pour nommer ces structures, un terme venant des domaines des sciences cognitives et de l'intelligence artificielle.

Pour cela, nous avons choisi de nous focaliser sur des structures capables de naviguer dans des champs d'obstacles tout en maintenant leur organisation interne. Pour cela, nous fixons un sous-ensemble des paramètres de l'environnement pour positionner des obstacles dans la grille de Lenia. Les autres paramètres sont libres et peuvent générer certaines structures. Lorsque ces structures entrent en collision avec un obstacle, une règle fixée dans l'environnement va les détruire en partie. Nous opérons alors en deux phases. La première est une phase de découverte, dans laquelle l'objectif est d'explorer les paramètres libres de l'environnement, et tenter de découvrir ceux qui permettent la formation de structures capables de naviguer dans ces champs d'obstacles tout en maintenant leur structure interne malgré les perturbations induites par des collisions avec les obstacles présents (Figure 5.a, [Vidéo 5](#)). Pour cela, nous utilisons les algorithmes d'assistance à la découverte mentionnés plus haut. La deuxième phase est une phase d'évaluation, dans laquelle nous cherchons à caractériser le comportement des structures découvertes pendant la première phase. Pour cela nous mesurons la capacité des structures découvertes à résoudre les tâches de navigation pour

lesquelles elles ont été optimisées en première phase. Nous mesurons également la robustesse des ces structures à des perturbations de l'environnement auxquelles elles n'ont jamais été exposées auparavant.

Cette méthode nous a permis de trouver des structures aux propriétés encore jamais observées dans Lenia. À partir d'une configuration initiale, celles-ci sont capables d'auto-constituer leur propre morphologie, de se déplacer dans la grille, de "sentir" la présence d'obstacles à proximité, et de modifier leur trajectoire en réaction aux perturbations induites par ces obstacles. Cela peut faire penser aux agents développés dans le domaine de l'IA (par exemple ceux apprenant à jouer à des jeux vidéos ou au jeu de Go, [Vidéo 6](#)), mais c'est en fait radicalement différent. En IA, les chercheurs définissent à l'avance quels sont les capteurs de l'agent (comment il perçoit l'environnement, par exemple par une caméra), quels sont ses effecteurs (comment il agit, par exemple en activant des moteurs) et l'architecture en charge de la prise de décision (comment agir sur ses moteurs en fonction de l'activité sur ses capteurs, ceci étant le plus souvent pris en charge par un réseau de neurones artificiels). À l'inverse, les agents sensorimoteurs que nous avons découverts dans Lenia n'ont aucune notion prédéfinie de capteur, d'effecteur, de prise de décision, ni même de corps. C'est simplement par l'application de règles locales sur un ensemble de cellules, toutes soumises aux mêmes règles (celles découvertes par l'algorithme de découverte guidé par la curiosité mentionné plus haut), que ces concepts émergent de leur dynamique collective. Nos agents sont eux aussi capables de percevoir et d'agir dans l'environnement, mais ceci émerge directement de la dynamique bas-niveau du système (ce qui s'apparente à sa physique) sans avoir prédéfini de capteur, effecteur, centre de décision ou corps. On peut ainsi générer l'hypothèse que ce type de phénomène d'auto-organisation partage certaines propriétés avec celui par lequel les tout premiers êtres vivants ont émergé d'un environnement initialement sans vie.

De plus, ces sortes de "créatures artificielles" montrent une robustesse impressionnante à de nombreuses variations internes ou externes auxquelles elles n'ont jamais été exposées dans la première phase de découverte (Figure 5.b). Par exemple, elles sont robustes à différentes positions des obstacles ainsi qu'à leur taille, ainsi qu'à la présence de bruit dans les règles de mise à jour, et l'on peut mesurer précisément cette robustesse en phase d'évaluation. Nous avons également observé, subjectivement cette fois, des comportements émergents plutôt surprenants. Par exemple, si l'on place ces obstacles pour former une sorte de labyrinthe, les créatures découvertes en trouveront souvent la sortie. Si on place plusieurs de ces créatures dans le même environnement, elles réaliseront des sortes de "dances" coordonnées, s'attirant ou se repoussant les unes avec les autres. Nous avons même observé que lorsque deux de ces créatures entrent en collision, elles peuvent parfois se reconstituer pour former une troisième créature. Cette dernière observation est très intéressante car il s'agit là d'une sorte de "reproduction émergente" qui pourrait potentiellement amorcer un processus évolutif darwinien dans ce système artificiel.

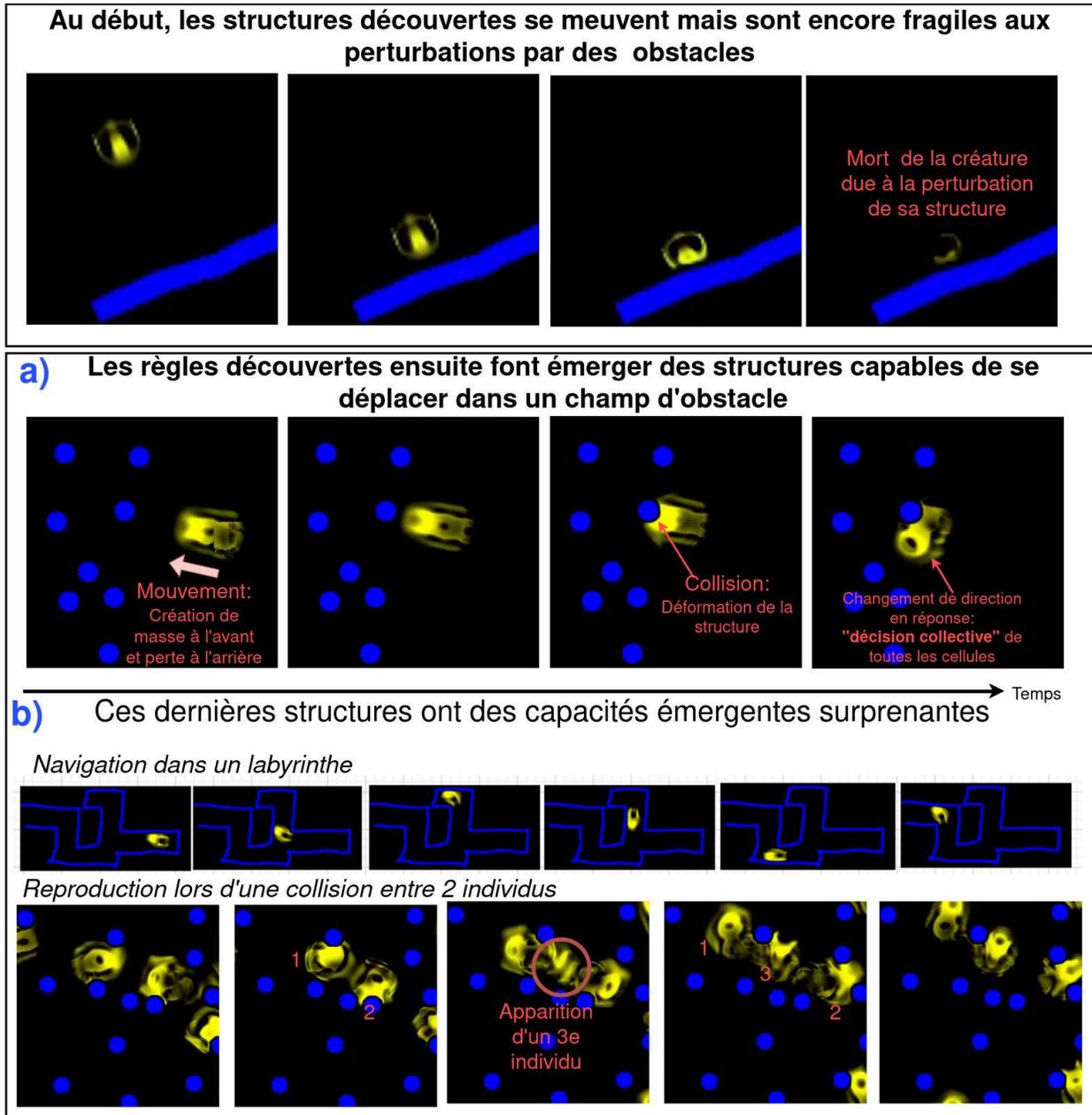


Figure 5. Découverte de structures capables de se mouvoir dans un champs d'obstacles ([Video 5](#))

À la découverte d'écosystèmes évolutifs dans Lenia

Bien que la méthode ci-dessus soit très prometteuse pour chercher des comportements qu'on spécifie à l'avance (par exemple naviguer dans des champs d'obstacles), cela reste très différent des mécanismes évolutifs qui ont mené à la complexité du vivant actuel. En effet, l'évolution biologique n'a pas de finalité prédéfinie : il n'existe pas en biologie d'"objectif ultime"

de l'évolution. Bien sûr, pour qu'une espèce évolue elle doit a minima survivre et se reproduire, mais il s'agit là d'un problème déjà résolu depuis l'origine de la vie (il n'y aurait pas de vie sinon), ce ne peut donc être une finalité. L'évolution n'est ainsi non pas "tirée vers le haut" par un objectif à atteindre, mais plutôt "poussée par le bas", par les contraintes et opportunités présentes dans l'environnement. Or ces dernières évoluent elles-mêmes constamment de part l'évolution des autres individus présents dans l'environnement. En d'autres termes, les organismes vivants ne sont pas seulement les produits de l'évolution, ils en sont aussi les causes car ils modifient eux-mêmes l'environnement et donc les pressions évolutives sur d'autres espèces. Les biologistes qualifient ce phénomène de "boucle de retro-action éco-évolutive", qui guide l'évolution vers toujours plus de diversité et de complexité biologique (les chercheurs en Vie Artificielle parlent d'"évolution à la dynamique ouverte", *open-ended evolution* en anglais).

Peut-on découvrir une telle dynamique évolutive ouverte dans un automate cellulaire tel que Lenia ?

C'est ambitieux mais nous commençons déjà à explorer plusieurs pistes. Pour cela il faut d'abord résoudre certaines limitations importantes de Lenia. En biologie, les organismes vivants sont contraints par les règles physiques immuables de l'environnement dans lequel ils évoluent : par exemple le fait que la quantité de matière du système entier, incluant la biomasse, reste constante au cours du temps. Ainsi rien ne se perd (ou se gagne), tout se transforme : pour se développer, un individu doit extraire des ressources de l'environnement et les métaboliser. À l'inverse, dans Lenia rien ne contraint cette conservation et il existe de nombreux jeux de paramètres pour lesquels l'activité du système, équivalente de sa masse totale, augmente sans contrainte. De plus, la dynamique de chaque cellule dans Lenia suit exactement les mêmes règles, ce qui limite très fortement la diversité des structures qui peuvent s'auto-organiser dans une même simulation. Ces deux limitations importantes rendent très difficile d'introduire une dynamique évolutive ouverte dans le système.

C'est pour répondre à ces deux problématiques que nous avons introduit Flow-Lenia (Figure 6). Dans Flow-Lenia, l'activation d'une cellule est interprétée comme sa masse. Ainsi, les différences d'activation dans la grille entre deux pas de temps permettent de calculer des mouvements de masses (ou flux, *flow* en anglais, d'où le terme Flow-Lenia). (voir [Vidéo 7](#) pour une visualisation). Ainsi, comme nous ne faisons que déplacer de la matière existante, la masse totale du système reste forcément constante sur toute la simulation et seulement sa répartition sur la grille change. Flow-Lenia introduit ainsi une contrainte de conservation de masse immuable à l'échelle du système entier.

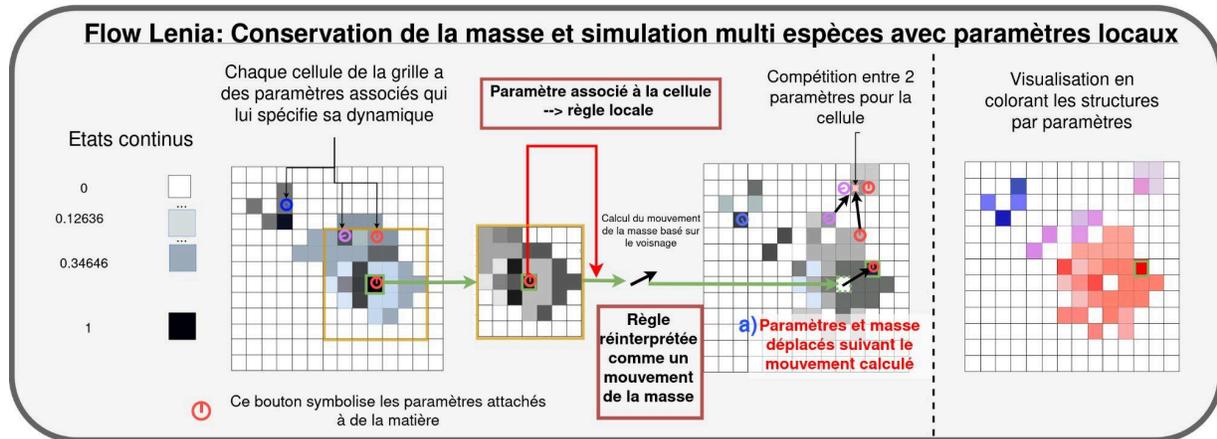


Figure 6. Flow-Lenia introduit une contrainte de conservation de masse et permet d'attacher des paramètres locaux à de la matière

Ensuite, il est dans cette formulation très facile d'attacher différents paramètres à différentes cellules de manière cohérente, puisque ces paramètres pourront se déplacer avec la masse à laquelle ils sont rattachés (FIG. 6.a). Ces paramètres peuvent par exemple être ceux de la règle de mise à jour (ici de calcul du mouvement), ce qui permet à différentes structures sur la grille d'être régies par des règles, et donc des dynamiques, différentes. Il est donc maintenant possible de simuler sur la même grille des structures aux dynamiques très diverses (contrairement à Lenia où pour la plupart des règles, les structures dans une même grille ont des dynamiques très similaires).

L'introduction de paramètres attachés à une quantité de matière dans Flow-Lenia introduit aussi une dynamique de compétition pour la masse. En effet, lorsque plusieurs cellules avec des paramètres différents se déplacent vers une même cellule d'arrivée, il faut choisir les paramètres finaux qui seront retenus sur cette cellule (Fig 7). Plusieurs choix sont possibles, mais dans la règle que nous avons utilisée les paramètres des cellules ayant une plus grande quantité de matière sont favorisés. On peut interpréter ce mécanisme comme une compétition entre différents jeux de paramètres au sein du système qui, lorsqu'ils se déplacent vers une même cellule, ont intérêt à envoyer plus de masse que les autres. Enfin, nous introduisons un mécanisme de mutation aléatoire des paramètres. De temps en temps, nous sélectionnons une petite région aléatoirement dans la grille, et ajoutons de petites modifications aléatoires des paramètres présents dans cette région. Ce mécanisme peut être vu comme des mutations introduisant des variations des paramètres existants.

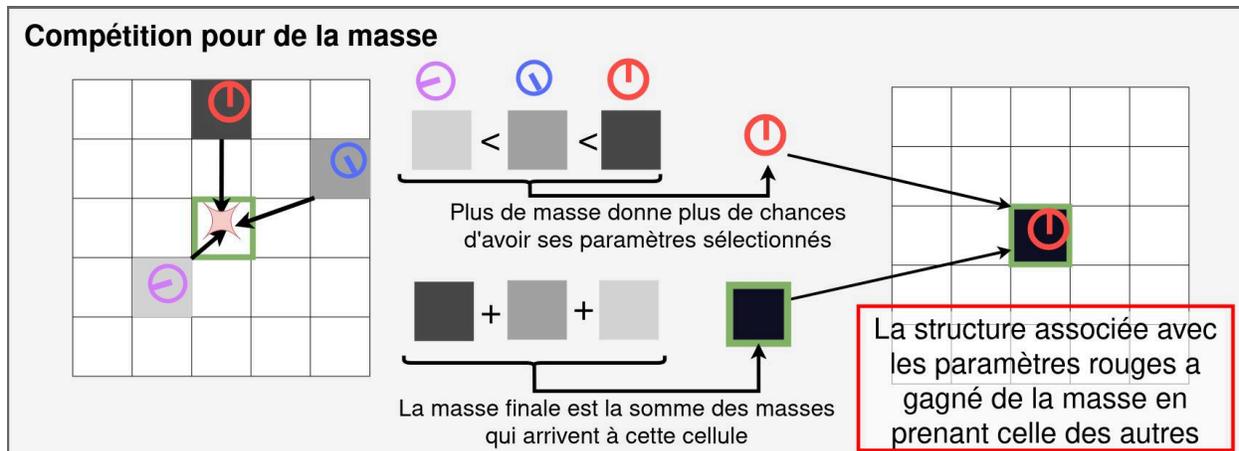


Figure 7. Compétition pour de la masse entre des cellules avec différents paramètres

Nous avons maintenant tous les ingrédients pour simuler ce système. Dans nos expériences, nous l'initialisons avec plusieurs patches de matière disposés dans la grille. Chaque cellule appartenant au même patch contient les mêmes paramètres (c'est-à-dire les mêmes règles de mise à jour), mais différents patches ont différents paramètres (Fig 8.a, différents paramètres étant représentés par différentes couleurs). À partir de cette "soupe primitive", nous voulons étudier si la contrainte de conservation de masse introduite dans Flow-Lenia, couplée au mécanisme de compétition pour la masse et de mutation, peut amorcer un processus évolutif à la dynamique ouverte (c'est-à-dire générant des structures auto-organisées de diversité et de complexité croissante).

Les simulations réalisées vont en effet en ce sens (Fig. 8 et [Vidéo 8](#)). À partir de l'état initial de cette soupe primitive, on observe d'abord que chaque patch s'auto-organise en certains individus aux morphologies diverses à partir de l'application des règles définies par les paramètres initiaux (Fig. 8.b). De par leurs déplacements dans la grille, ces différentes structures vont parfois entrer en collision et la règle de compétition pour la masse décidera de quels paramètres gagneront cette compétition. Si cette compétition a lieu localement, à l'échelle de chaque cellule de la grille, certains jeux de paramètres peuvent être favorisés par la dynamique collective qu'ils induisent. Par exemple, on observe parfois des symbioses entre ces différentes morphologies qui semblent agir de concert, avec par exemple certains paramètres formant des sortes de membranes entourant des structures régies par d'autres paramètres (FIG 8.c). L'émergence de nouvelles structures peut ainsi modifier la pression évolutive sur les structures existantes de par la compétition pour la masse, un mécanisme analogue aux boucles de rétroaction éco-évolutives mentionnées plus haut. On observe d'ailleurs, lorsqu'on suit l'évolution des paramètres au cours de la simulation, des arbres phylogénétiques qui rappellent ceux élaborés par les biologistes pour représenter l'évolution des espèces (FIG 8.d). Il est important de noter ici qu'il n'existe aucun objectif prédéfini dans ce système, à la différence des algorithmes évolutifs classiques qui cherchent à optimiser explicitement certains critères. Dans Flow-Lenia, la dynamique évolutive émerge de la dynamique bas niveau du

système, dans le sens où il n'existe pas de programme externe décidant de quelles structures sont sélectionnées ou non.

La meilleure façon de se rendre compte de la complexité qui émerge de Flow-Lenia est de visualiser la vidéo d'une simulation ([Vidéo 8](#)). Cela fait parfois penser à l'observation d'organismes microscopiques visualisés au microscope. Cependant, même si nous espérons que de longues simulations dans de larges environnements pourraient générer une diversité et une complexité croissantes d'individus, les simulations actuelles montrent plutôt une dynamique dans laquelle, au bout d'un certain temps, certains finissent par prendre le dessus sur tous les autres et couvrent finalement toute la grille. On ne peut donc pas, à ce stade, qualifier ce système d'évolution émergente à la dynamique ouverte.

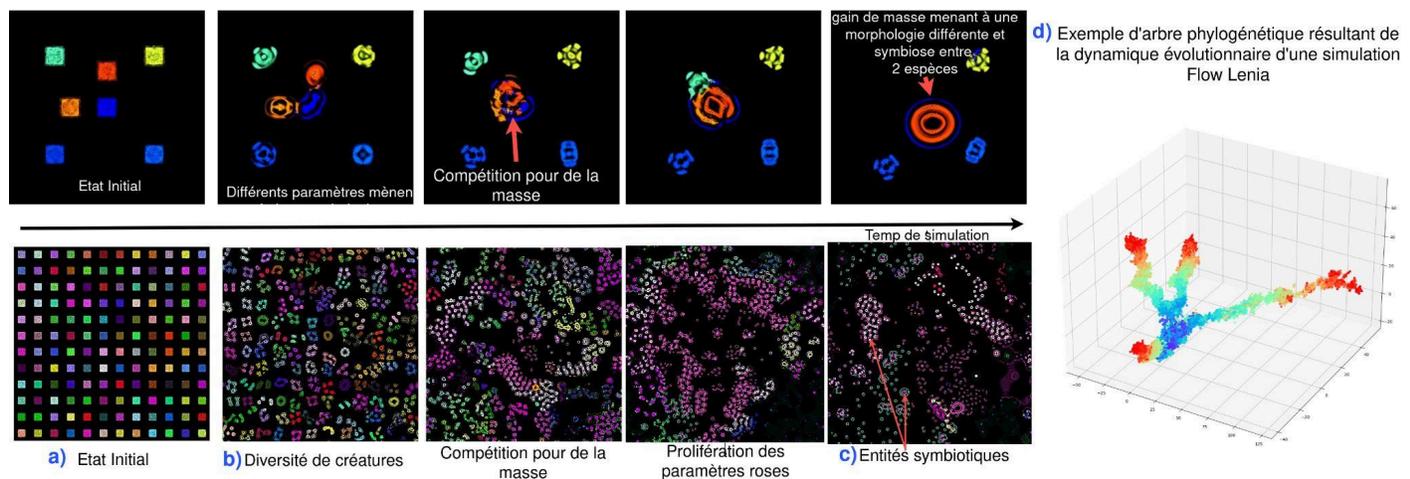


Figure 8. Emergence de processus évolutifs dans des simulations Flow Lenia.

C'est joli, mais à quoi ça sert ?

Nous avons vu que la simulation informatique, notamment par l'intégration de méthodes issues de la Vie Artificielle et de l'Intelligence Artificielle, peut nous permettre d'approcher certaines questions très fondamentales sur l'origine de la vie, des individus et de l'évolution.

Dans nos futurs travaux, nous souhaitons d'une part étudier la formation d'individus avec des capacités morpho-cognitives plus complexes, par exemple montrant des capacités de mémoire ou d'apprentissage, d'autre part de découvrir des conditions pouvant amorcer un processus évolutif à la dynamique réellement ouverte dans Flow-Lenia, c'est-à-dire menant à la formation d'une diversité et complexité croissante d'individus comme cela a été le cas en évolution biologique. Pour cela nous nous appuyons sur nos algorithmes d'assistance à la

découverte, ainsi que sur nos discussions avec des biologistes, pour aider dans cette exploration.

Nous pensons que ces expérimentations sont pertinentes pour différents domaines scientifiques. En informatique, elles fondent les bases d'une reformulation du concept d'intelligence artificielle, qui n'est ici non plus considéré comme un modèle de cognition, mais plutôt comme une propriété émergente de la dynamique bas niveau d'un système complexe régi par des règles locales simples. Certains chercheurs du domaine, tel que Jeff Clune, parlent d'"algorithmes générant de l'intelligence artificielle", en contraste des algorithmes classiques implémentant directement une intelligence artificielle. Dans ce cadre, l'objectif n'est plus d'optimiser des agents artificielles pour réaliser certaines tâches pré-spécifiées, comme c'est généralement le cas en IA, mais plutôt de découvrir des conditions menant à la constitution d'agents pouvant s'adapter à une grande diversité de tâches sans qu'ils n'y soient forcément exposé au préalable. En biologie évolutionnaire, ce type de simulations permet de considérer la question de l'origine de la vie "telle qu'elle pourrait être" (*life as it could be* en anglais), c'est-à-dire sans se limiter aux spécificités de la vie telle qu'elle est apparue sur Terre. L'avantage de cette méthode est qu'elle peut potentiellement permettre de révéler des mécanismes très généraux du vivant indépendamment d'un substrat particulier dans lequel il apparaît. L'inconvénient, toutefois, est que cette approche peut peiner à convaincre des biologistes évolutionnaires, qui eux sont généralement plus intéressés par la proposition de mécanismes précis aux origines physico-chimiques tangibles. C'est également un de nos objectifs que de favoriser les échanges entre informaticiens et biologistes sur ces domaines, car nous nous posons des questions très similaires mais devons encore trouver un langage commun pour pouvoir collaborer efficacement.

Enfin, nous touchons ici à une question scientifique très fondamentale à la fois en informatique, en physique et en biologie : celle des mécanismes par lesquels certains systèmes complexes peuvent continuellement générer des structures de diversité et de complexité croissantes. On parle de système « *open-ended* » en anglais, un terme difficile à traduire en français (nous proposons le terme « système à la dynamique ouverte »). Par exemple l'évolution biologique, le développement de l'enfant, ou la culture humaine sont de tels systèmes à la dynamique ouverte : ils génèrent continuellement des structures (biologiques, comportementales, culturelles) qui ont tendance à se diversifier et à se complexifier avec le temps. Ces systèmes partagent-ils des principes généraux communs et si oui lesquels ? Sont-ils fréquents dans l'Univers ou la Terre est-elle un cas très particulier ? Est-il possible de simuler de tels systèmes dans des simulations informatiques et si oui jusqu'à quel niveau d'organisation ? Ce sont là des questions encore ouvertes et nous espérons que nos simulations peuvent contribuer à les aborder.