

Ce document est l'un des livrables à fournir lors du dépôt de votre projet : 4 pages maximum (hors documentation).

Pour accéder à la liste complète des éléments à fournir, consultez la page [Préparer votre participation](#).

Vous avez des questions sur le concours ? Vous souhaitez des informations complémentaires pour déposer un projet ? Contactez-nous à [info@trophees-nsi.fr](mailto:info@trophees-nsi.fr).

**NOM DU PROJET : MorphoGénie : les mathématiques de  
la vie**



## > PRÉSENTATION GÉNÉRALE :

L'origine des rayures du zèbre, des taches du léopard et d'autres motifs retrouvés dans la nature ont pendant des siècles été une source d'interrogation pour les hommes.

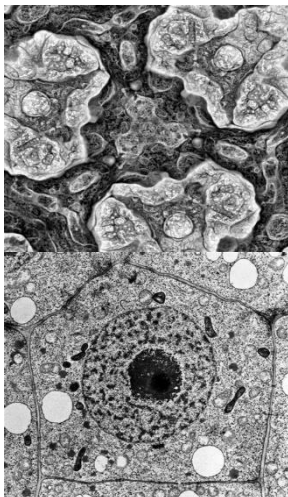
En 1952, Alan Turing, un des fondateurs de l'informatique moderne, publie un document de recherche intitulé *The chemical basis of morphogenesis* (« la base chimique de la morphogenèse »), dans lequel il propose un modèle mathématique, composé de règles relativement simples, qui explique la formation de motifs observés dans la nature.



Image 2 - Alan Turing

Le modèle de Turing repose sur l'hypothèse que deux réactifs chimiques peuvent interagir de manière non linéaire pour créer des motifs de concentration spatiale. En d'autres termes, il peut y avoir des réactions de diffusion qui influencent la manière dont les produits interagissent et se répartissent dans l'espace. Ces interactions peuvent entraîner la formation de structures géométriques régulières, telles que des spirales, des taches ou des bandes. Ce type de modèle est appelé système de réaction-diffusion. L'idée pour ce projet nous est venue lors d'un débat mouvementé sur un des plus grands mystères de la vie : Les zèbres sont-ils noirs ou blancs à la base ? Cette question nous a menés à une vidéo YouTube qui explique la formation des rayures du zèbre à travers les modèles de Turing.

En effet, plus de 70 ans après leur théorisation, les motifs de Turing sont encore à l'origine de découvertes scientifiques dans le domaine de la biologie : on pense que des systèmes de réaction-diffusion similaires à ceux de Turing sont à l'origine non seulement des motifs qu'on peut apercevoir par exemple sur des poissons tropicaux, mais aussi de la formation de nombreux organes tels que nos bras et nos doigts. Ainsi, la question sur laquelle est basé notre projet est : **Comment ces réactions simples entre deux substances peuvent-elles être à l'origine de motifs dans la nature ?**



Images 5 et 6 – Motif de Turing à échelles multiples et image de cellule prise au microscope électronique

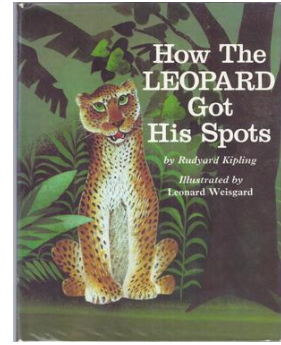
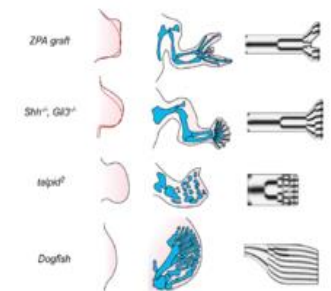


Image 1 - "Comment le Léopard acquit ses tâches", Rudyard Kipling (1902)



Images 3 et 4 – Poisson et organe obéissant au modèle de Turing

Puis, nous sommes tombés sur un [blog](#), qui explique l'idée des [motifs de Turing à échelles multiples](#) : on lance simultanément plusieurs simulations et on les combine dans un tableau, qui une impression de profondeur, et qui ressemble à une image prise au microscope électronique. Ainsi, le but de notre projet est de simuler les systèmes de réaction-diffusion, et de générer des motifs de Turing à échelles multiples.

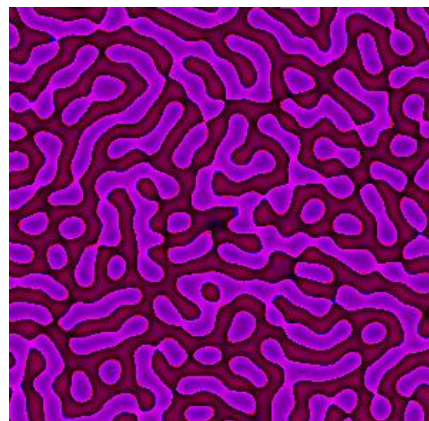
## > ORGANISATION DU TRAVAIL :

Membre	Rôle
Pablo Carette	Interface de ligne de commande, systèmes de réaction-diffusion
Léo Schmidt-Traub	Motifs de Turing à échelles multiples, systèmes de réaction diffusion
Kenzo Viruega-Minagawa	Montage de la vidéo, fonctions d'initialisation, recherche des paramètres intéressants

La grande majorité de notre travail a été réalisée en dehors du cours de NSI, puisque nous n'avons pas réussi à installer les bibliothèques qu'il nous fallait sur les ordinateurs du lycée. Nous avons donc beaucoup communiqué par WhatsApp, et nous nous sommes également envoyés nos programmes par Discord. Finalement, nous avons décidé d'utiliser GitHub comme site d'hébergement du projet.

## LES ÉTAPES DU PROJET :

L'histoire de notre projet a débuté avec une inspiration qui nous est venue après avoir regardé une vidéo sur Internet. On pourrait dire que notre coup de génie a été la conséquence imprévue d'une nuit passée à regarder des vidéos Minecraft sur YouTube. Puis, nous nous sommes mis à programmer la simulation des motifs de Turing en utilisant les équations Fitzugh-Nagumo, tout d'abord en 1-dimension, qui sert plutôt d'illustration du concept, et nous a permis de mieux comprendre les modèles mathématiques utilisés, puis en 2 dimensions : la vraie affaire. Nous n'avons pas beaucoup d'expérience avec les bibliothèques utilisées, donc la mise en main a été difficile, et c'est également ici que nous avons décidé de l'organisation du programme (nous avons opté pour une architecture objet), et de la méthode utilisée pour approximer les équations différentielles (la méthode des différences finies). Par la suite, nous avons pris très très longtemps à programmer la simulation à échelles multiples, et à optimiser le programme afin de rendre une simulation en temps réel possible. Nous avons fini par utiliser la transformation de Fourier (FFT) pour accélérer les convolutions circulaires, et nous n'avons que gardé le tableau de variations afin d'utiliser moins de mémoire. Certaines améliorations ont été apportées, notamment l'ajout des couleurs, de la production de vidéos, des symétries et du modèle Gray-Scott (et non, ce n'est pas le cousin éloigné de "Gay Scott", qui a une tout autre signification... à moins que tu ne sois dans une simulation alternative ;-)). Enfin, nous avons finalisé le projet en repérant quelques bugs, et en ajoutant la documentation et l'interface de ligne de commande, qui rendent le programme accessible aux personnes n'ayant pas une bonne connaissance des modèles mathématiques implémentés. Nous avons également cherché les paramètres prédéfinis de la simulation qui aboutissent à des motifs intéressants.



## > FONCTIONNEMENT ET OPÉRATIONNALITÉ :

En ce qui concerne l'avancement du projet, la majorité du programme est fonctionnel, et nous sommes fiers du résultat. Si on avait un peu plus de temps, on aurait un peu plus expérimenté avec les fonctions d'initialisation, pour voir comment elles changent le résultat de la simulation.

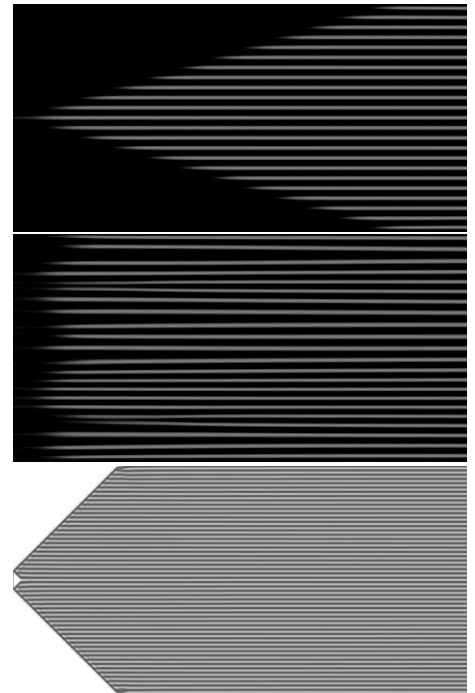
Nous avons opté pour une architecture objet, en créant des classes, car elle possède de nombreux avantages : elle rend le programme claire, modulaire et extensible, et permet par exemple d'utiliser une seule classe pour simuler plusieurs modèles de réaction-diffusion. On aurait même pu mettre les simulations à 1 et à 2 dimensions dans la même classe, puisqu'elles ont beaucoup de code en commun, mais nous pensons que cela rendrait le code moins compréhensible, et nullifierait certains des avantages de l'architecture objet.

Pour vérifier l'absence de bugs, nous avons employé pour la méthode infallible : « mettre des print partout et prier que ça marche » (le saint graal de la programmation), et pour nous assurer de la facilité d'utilisation nous nous sommes tournés à des membres de famille pour tester le programme (parce que si mamie peut utiliser notre programme, alors tout le monde peut le faire).

Afin d'être sûrs que le programme fonctionne bien, nous avons recherché d'autres simulations en ligne, et nous avons vérifié que nos résultats étaient en concordance avec ce que nous avons vu sur Internet.

Ensuite, nous avons tenté de faire des statistiques sur l'évolution de ces systèmes. Pour les modèles à une dimension, nous avons créé une fonctionnalité qui génère une image des concentrations de la substance A au fil du temps. Chaque colonne de l'image représente le système à une étape donnée (c'est l'option 4 dans le CLI). Toutefois, nous n'avons pas réussi à faire la même chose pour la simulation en deux dimensions. Nous devons trouver une mesure qui puisse décrire le tableau de manière plus concise. Nous pourrions, par exemple, étudier la variation des valeurs du tableau pour déterminer si le système atteint un état d'équilibre. Bref, cette partie du projet doit encore être développée.

Une explication plus élaborée et technique du fonctionnement des algorithmes est détaillée dans le `README` du projet, et nous avons commenté les parties du code qui nécessitent un approfondissement, pour éviter que dans deux mois on se retrouve à pleurer devant notre écran sans comprendre ce qu'il se passe.

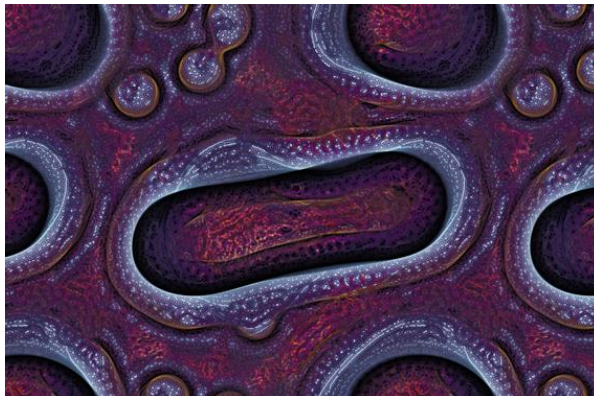


*Notre tentative à une étude de l'évolution des systèmes de réaction-diffusion (en 1 dimension) : 1-Modèle FN avec perturbation, 2-Modèle FN avec initialisation gaussienne, 3-Modèle GS*

## > OUVERTURE :

De manière générale, nous sommes plutôt satisfaits avec ce que nous avons pu accomplir dans ce projet, vu les nombreuses difficultés rencontrées. Tout de même, il reste quelques éléments que nous aurions aimé améliorer.

Tout d'abord, nous aurions bien aimé faire une simulation de réaction-diffusion en 3 dimensions, ou encore une simulation en 2 dimensions sur une géométrie non-euclidienne (c'est-à-dire sur une vache), mais cette idée s'est avérée un peu trop compliquée et couteuse en calcul. Il aurait également été intéressant d'accélérer la simulation en trouvant une technique plus rapide que la méthode des différences finies pour approximer l'évolution du système.



Pour améliorer la simulation en deux dimensions, on aurait pu ajouter d'autres substances, pour générer des motifs qui ne sont pas bicolores, ou encore permettre à l'utilisateur de prendre un « snapshot » de la simulation en temps réel, et de sauvegarder ses propres valeurs prédéfinies.

Quant à la simulation à échelles multiples, on aurait pu ajouter des couleurs ce qui donne lieu à des images très belles, comme celle ci-contre, ce qui se fait en associant une couleur à chaque échelle, et en rapprochant à chaque itération la couleur de chaque pixel vers celle de la couche qui a la plus petite variation, ce qui donne lieu à des images absolument splendides, comme celle ci-dessus.

Par ailleurs, il serait intéressant de faire de la recherche sur ces modèles de réaction-diffusion, de trouver des méthodes qui permettent de trouver de manière plus scientifique les paramètres qui mènent à des résultats intéressants (plutôt que d'y aller à l'aveugle en priant la divinité de la réaction-diffusion) et de voir comment chaque paramètre influence le résultat final.

Les motifs de Turing peuvent sembler être une idée plutôt simple, mais ils ont été révolutionnaires dans les domaines de la morphogenèse et des mathématiques appliquées. Par conséquent, nous pensons qu'Alan Turing devrait être acclamé non seulement comme le père de l'informatique, mais aussi comme un des pionniers de la recherche autour de la formation des êtres vivants.