

Diffusion, structures spatiales et origine de la vie



Comment le processus de diffusion peut-il favoriser l'émergence de la vie?

Modèle sur réseau

Coopération

La **coopération** de réseaux primitifs de molécules est présumée être l'une des propriétés clés ayant permis au vivant d'émerger (Nghe, 2015). Le modèle par excellence pour étudier l'émergence de comportements coopératifs est celui du **dilemme du prisonnier itéré**. Deux joueurs peuvent soit coopérer ou faire défection, or dans ce modèle ils seront avantagés s'ils décident tous deux de coopérer—un reflet de ce qui est observé dans la nature (Axelrod, 1981).

Joueur 1 \ Joueur 2	Coopération	Défection
	Coopération	Défection
Coopération	3, 3	0, 5
Défection	5, 3	1, 1

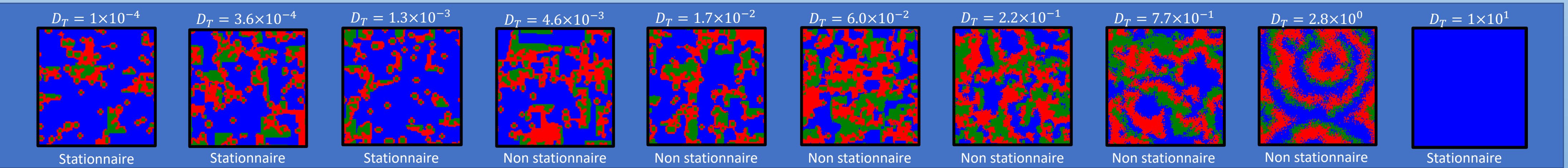
Taux d'erreur

Tout système physique subit nécessairement des **perturbations**, qu'elles soient d'origine thermique, mécanique ou encore électromagnétique. L'environnement qui a vu naître la vie n'y a pas échappé non plus; que l'on pense aux perturbations associées aux **rayons cosmiques ou encore à la radiation ionisante**, nous devons tenir compte de ces « imperfections » du système étudié dans nos modèles. C'est ce que représente le **taux d'erreur** qui a été intégré aux simulations.

Il s'avère que ce paramètre a une influence profonde sur le comportement du système: lorsque des joueurs s'affrontent au dilemme du prisonnier sur un réseau 2D, des **structures spatiales** se forment suivant l'évolution des diverses stratégies. En variant le taux d'erreur, le système **passse d'un régime à un autre**; des types différents de structures se forment et peuvent être observées—tel des domaines aux frontières fractales, des îlots de **coopérateurs inconditionnels** (ALLC) entourés de **défecteurs** (ALLD) ou encore de minces filaments de défauts dans une mer de **coopérateurs réciproques** (TFT).

Structures spatiales

La **diffusion** est un processus physique qui joue un rôle prédominant dans tout problème avec présence d'un substrat à température finie—tel que le système ici modélisé. La diffusion tend à *aplanir les gradients*, l'on pourrait donc penser qu'elle ne favorise pas l'apparition des structures complexes requises pour l'émergence de la vie. Or les travaux du mathématicien **Alan Turing** sur le **bris de symétrie** dans les systèmes non linéaires ont montré il y a plus de cinquante ans que la diffusion pouvait y être **génératrice de structures spatiales** (Turing, 1952). Ces structures sont tout à fait pertinentes dans un contexte prébiotique, où plusieurs réactions chimiques nécessitent un **gradient** dans la concentration des réactifs pour être déclenchées. La formation de structures spatiales a également été démontrée comme étant utile pour se prémunir contre l'**effet de parasites** qui pourraient prendre avantage sur des populations de répliqueurs primitifs (Mizuuchi, 2018), et pour favoriser une **concentration élevée de monomères** (Poudyal, 2018). En variant le paramètre de diffusion dans le modèle ici présenté, l'on retrouve certains résultats obtenus précédemment par Turing, soit la formation de structures spatiales bien définies, signe positif pour l'émergence de la vie!



Coefficient de diffusion

Modèle continu

Passage au continu

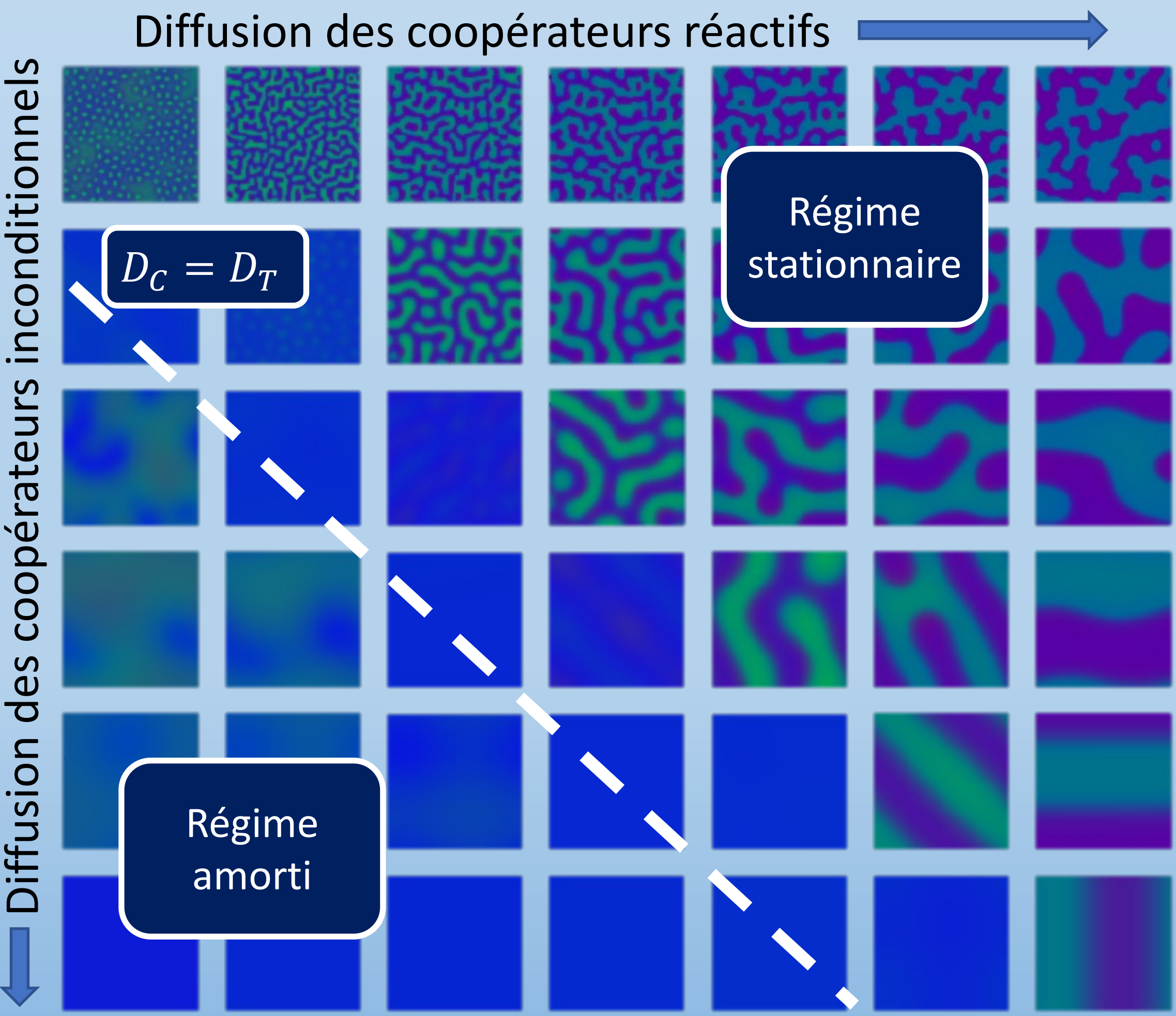
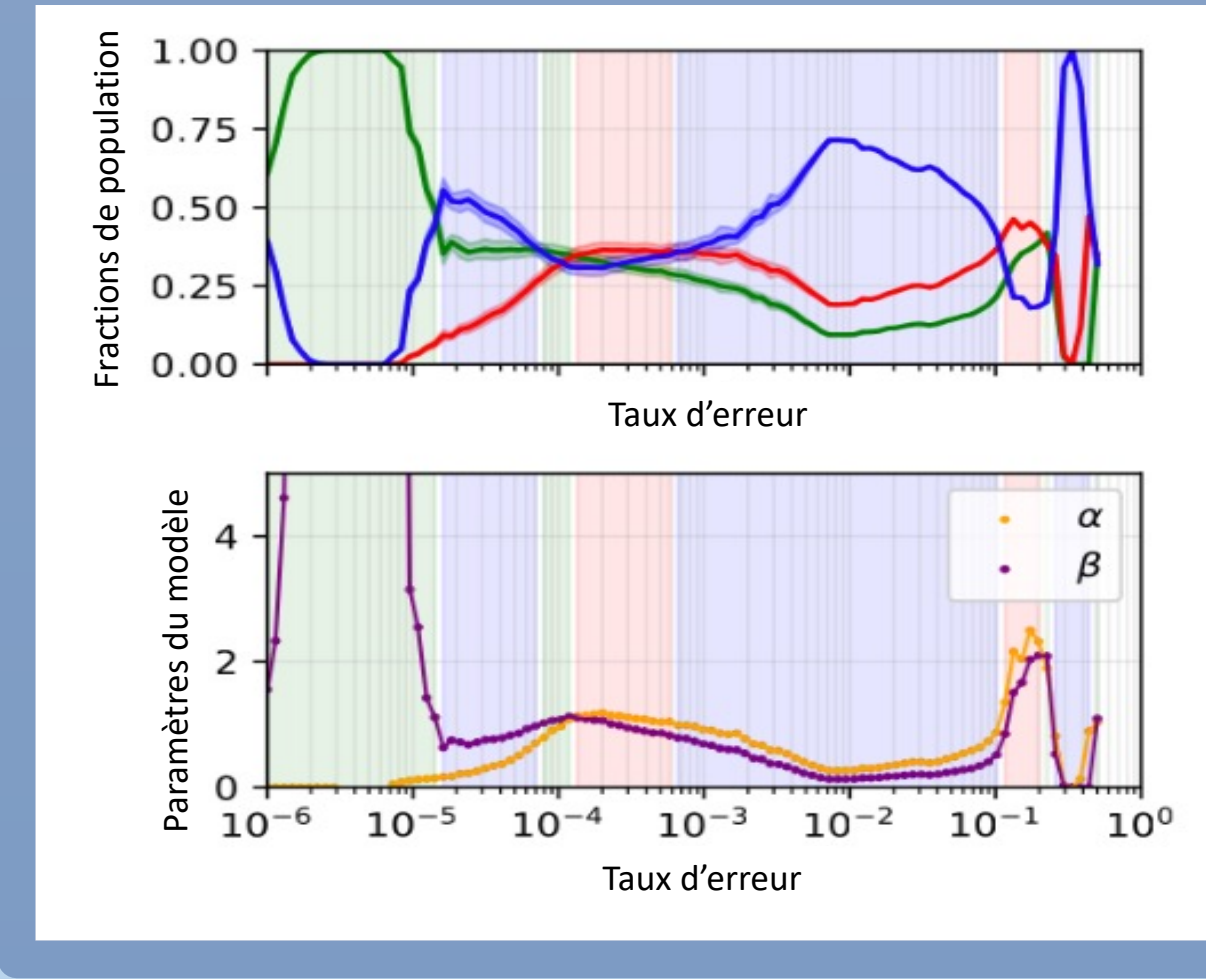
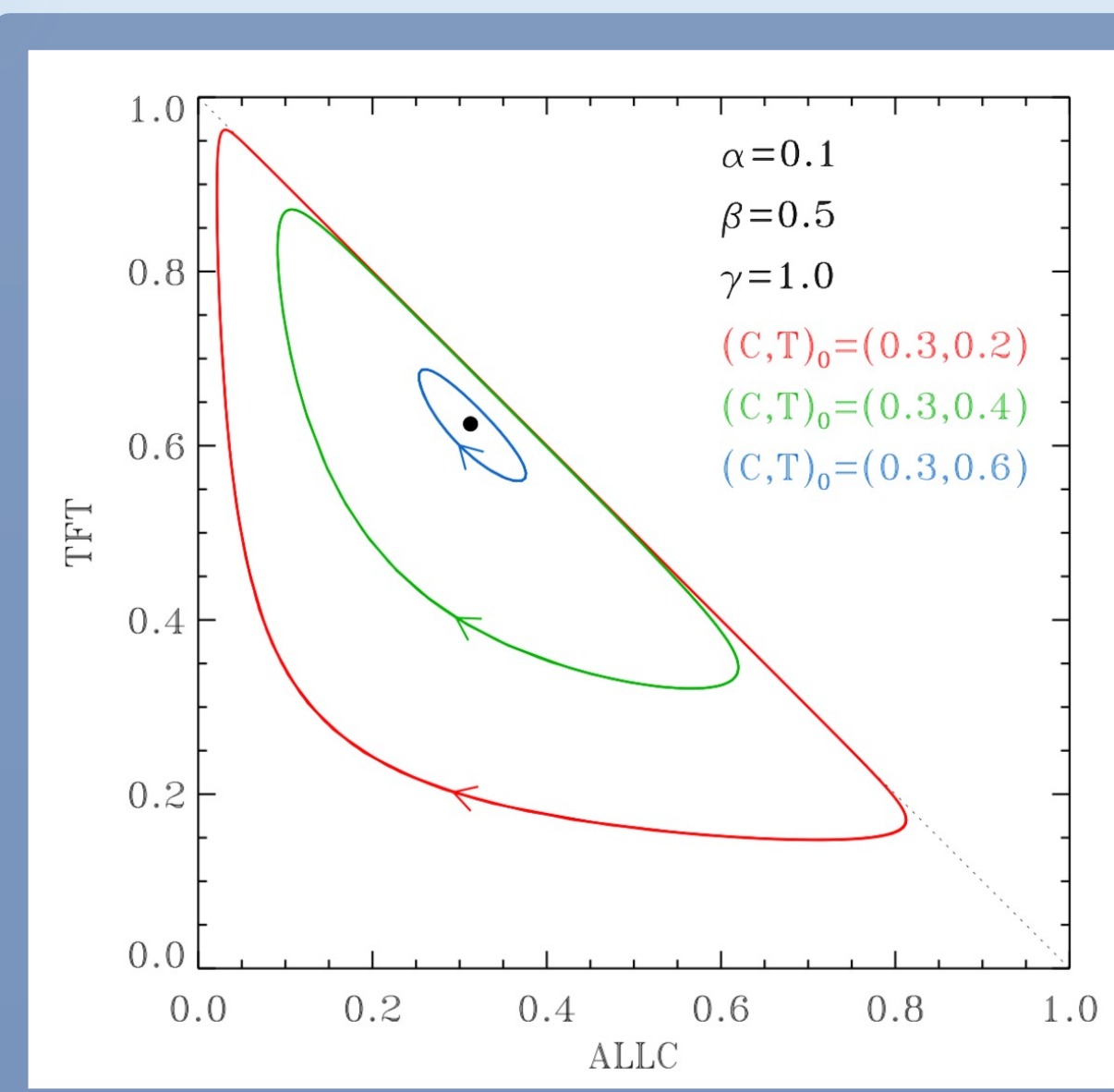
À tout modèle dit « **discret**, » tel le modèle sur réseau présenté à gauche, peut correspondre un modèle dit « **continu** » où les éléments finis (i.e., les sites du réseau) sont remplacés par une variable continue qui peut être décrite par un système d'équations différentielles—l'objectif étant de **faire le pont entre l'aspect microscopique et macroscopique** du système. Dans le cas présent, le modèle est décrit par un système prédateur-proie à trois espèces:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \alpha CT - \gamma CD \quad \frac{\partial T}{\partial t} = -\alpha CT - \beta TD \quad \frac{\partial D}{\partial t} = \gamma CD - \beta TD$$

et sujet à la contrainte $0 \leq C, T, D$ et $C + T + D = 1$. On peut ensuite ajouter un terme de diffusion, puis linéariser ce système d'équations (Murray, 1990) afin d'obtenir la relation de dispersion suivante:

$$\lambda^2 + [k^2(D_C + D_T)]\lambda + \left[D_C D_T k^4 + \frac{\beta \gamma}{s} (D_C - D_T) k^2 + \frac{\alpha \beta \gamma}{s} \right] = 0$$

décrivant des **oscillations harmoniques** autour de la solution d'équilibre (Figure de droite, haut, ici sans diffusion). Le passage entre le système sur réseau et le modèle continu peut se faire via une conversion des paramètres en utilisant la solution d'équilibre de ce dernier (Figure de droite, bas). La Figure ci-dessous est une solution du système d'équations différentielles ci-haut, et la relation de dispersion confirme de manière analytique la présence de **patrons stationnaires** et d'**oscillations amorties**.



Diffusion et structures spatiales

Puisque les différentes stratégies peuvent être considérées comme le reflet de différentes molécules prébiotiques, il est tout à fait plausible que leur **diffusion ne s'effectue pas de manière égale**. Le modèle qu'on présente ici prend en compte cette réalité, et l'on présente à la Figure de gauche les structures spatiales formées pour différentes combinaisons de coefficients de diffusion des **coopérateurs inconditionnels** (ALLC) et **réciproques** (TFT). On retrouve à nouveau un résultat obtenu par Turing (voir texte précédent), soit que dans un système non linéaire des coefficients de diffusion différents **favorisent l'apparition de structures spatiales**—à nouveau une bonne nouvelle pour l'émergence du vivant.