

"Il trouve, il trouve, pour ce souci,  
Le drôle de zèbre, des facéties."  
A. Souchon Le Zèbre

## Morphogénèse : Structures de Turing



**Mots Clés :** activateur, inhibiteur, réaction-diffusion, Turing, mélanine, phénylalanine, zèbre, léopard, girafe, embryon.

Parmi les manifestations les plus spectaculaires de la nature se trouvent les rayures du zèbre, les polygones de la girafe ou les tâches du léopard.



Zèbre



Léopard



Girafe

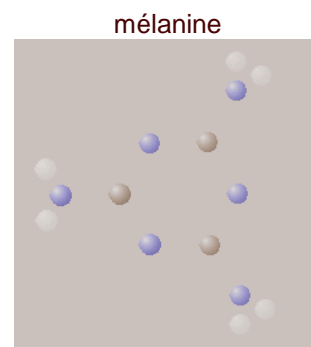
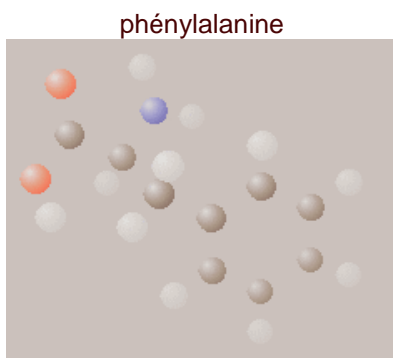
Comment la nature peut elle produire des structures si régulières?

On voit sur les photos l'existence d'un pigment foncé : la mélanine.

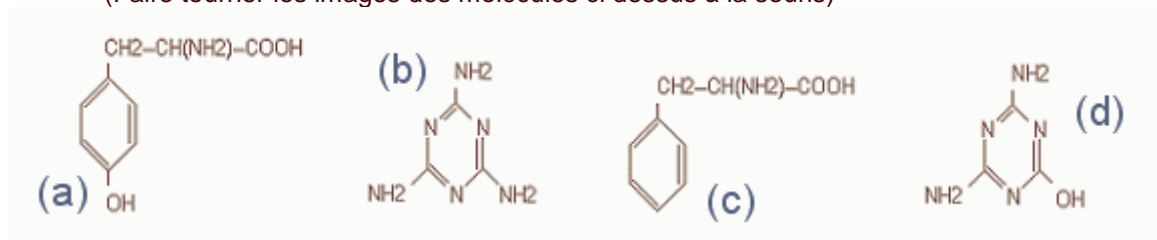
### 1) La mélanine :


La mélanine est une molécule de couleur brune donnant sa couleur aux cellules appelées mélanocytes. Cette couleur peut aller du brun au noir.

Cette molécule est synthétisée à partir d'un acide aminé la phénylalanine qui sous l'action d'enzymes donne la mélanine.





(Faire tourner les images des molécules ci dessus à la souris)



 A quelles formules développées (a), (b), (c) ou (d) correspondent la phénylalanine et la mélanine?

 La mélanine est elle un acide aminé? Pourquoi?

 La phénylalanine est elle un acide aminé? Pourquoi?  
Le passage de la phénylalanine à la mélanine se fait sous l'action d'**enzymes**.

 Choisir parmi les propositions ci dessous celles qui sont correctes :  
Les enzymes :

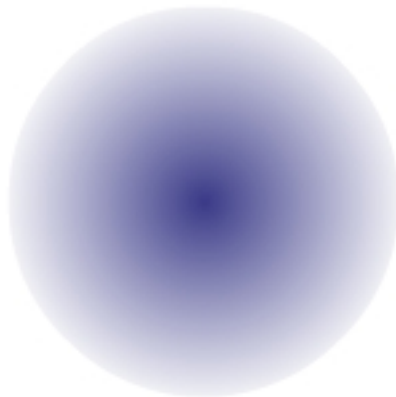
- (a) sont des catalyseurs des réactions biochimiques
- (b) inhibent les réactions biochimiques
- (c) sont des organismes vivants capables de se reproduire
- (d) sont des protéines
- (e) ont un nom comportant un suffixe en **-ase**
- (f) augmentent la vitesse des réactions biochimiques
- (g) ont un nom comportant un suffixe en **-yme**
- (h) sont consommées par la réaction biochimique

La mélanine est responsable de la coloration de la peau, des cheveux, de la couleur de l'iris (couleur des yeux). Une anomalie génétique peut entraîner l'absence de tyrosinase essentielle à la formation de mélanine.

 Comment s'appelle la maladie associée à cette absence de tyrosinase? Quels sont les signes apparents de cette pathologie?

## 2) Un mécanisme de diffusion :

Il s'agit ici de la diffusion d'une espèce chimique. Celle par exemple que l'on peut observer en déposant délicatement une goutte d'encre dans un milieu aqueux.



(animation flash)

L'encre s'étale progressivement jusqu'à occuper tout le milieu. Ce phénomène s'explique par le mouvement brownien.

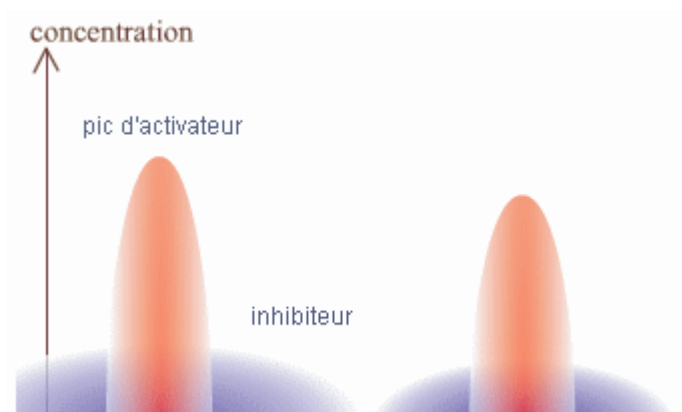
## 3) Le modèle de Turing de réaction-diffusion :

Hypothèse : un milieu vivant au départ homogène et amorphe contient deux substances concurrentes (dont la nature chimique importe peu) :

- un **activateur A**  
qui est catalyseur de sa propre formation (autocatalyse)  
qui diffuse lentement
- un **inhibiteur B**  
dont la formation est catalysée par l'activateur

qui diffuse rapidement  
qui ralentit la formation de l'activateur

Un infime excès de l'**activateur** peut se former à un endroit du milieu sous l'effet des mouvements aléatoires des molécules. Les mécanismes d'activation vont entraîner à cet endroit une production supplémentaire de **A** ainsi qu'une production de **B**. Un pic d'activateur **A** et de **B** va se former. L'inhibiteur diffuse plus vite que l'activateur et le pic de **B** s'étale plus largement que celui de **A**. Il y aura un déficit en inhibiteur au centre du pic et par contre un excès de celui-ci sur les "ailes" du pic. Ceci entraîne une localisation du pic d'activateur dans l'espace. A distance suffisamment grande du premier pic, l'influence de l'inhibiteur faiblit et d'autres pics d'activateur peuvent se former.

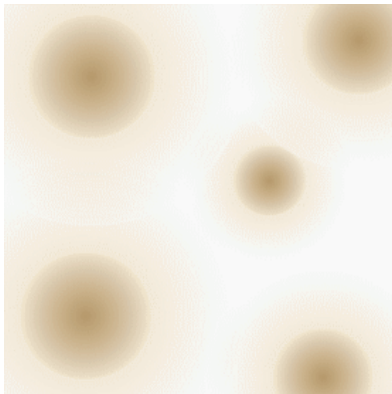


(animation Flash)

🔗 Pourquoi appelle-t-on ce mécanisme réaction-diffusion?

🔗 Peut-on voir apparaître un nouveau pic d'activateur entre deux pics déjà existants? A quelle condition?

Changeons les couleurs et le point de vue (la surface du milieu où se produit la réaction-diffusion est vue de dessus).



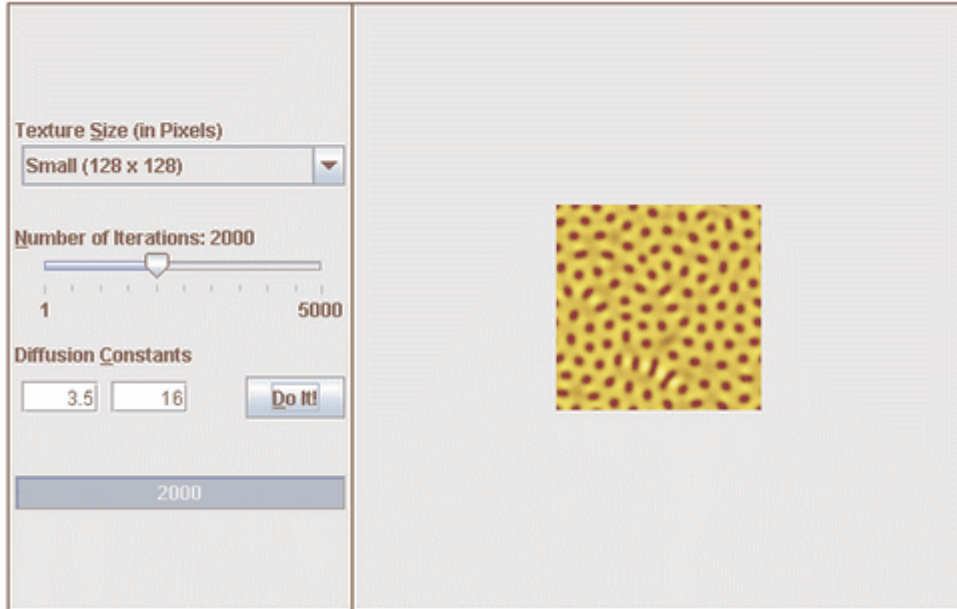
(animation Flash)



🔗 La simulation rend compte de manière approximative d'un des trois motifs ci-dessus. Lequel?


🔗 Dans l'animation ci-dessus quelle est la couleur associée à l'activateur? Quelle est la couleur associée à l'inhibiteur?

L'applet Java ci dessous permet de simuler une transformation de réaction-diffusion à partir des équations de Turing. L'auteur de l'applet est Christopher Jennings ( <http://www.sfu.ca/~cjennin/toybox/lsystems/index.html> ) qui nous a autorisé à l'utiliser. L'applet ne fonctionne qu'avec la machine virtuelle Java 5 qui peut être téléchargée chez Sun ( <http://java.com/en/download> )



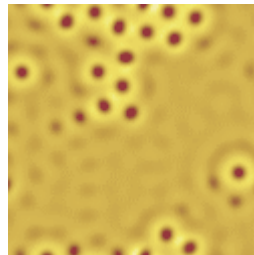
 Que représentent les deux constantes de diffusion?

Voici une liste de constantes de diffusion proposées par Christopher Jennings (8.4, 46.0), (0.5, 4.0), (1.0, 3.0), (2.0, 6.0), (1.0, 16.0), (4.05, 16.4).

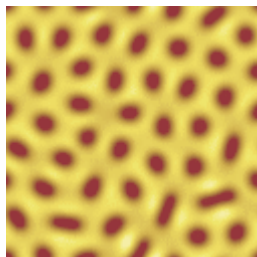
 Les images ci dessous ont été obtenues avec les couples de constantes de diffusion ci dessus. Retrouver pour chaque image le couple utilisé.



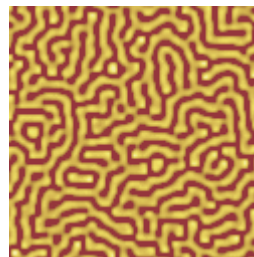
Couple :



Couple :



Couple :



Couple :

 Pourquoi la première valeur du couple est-elle toujours inférieure à la deuxième?

 Que se passe-t-il si on inverse les deux valeurs d'un couple?

#### 4) De la souris à l'éléphant :

Les équations de réaction-diffusion de Turing montrent que le motif obtenu dépend :

- de la forme
- de la taille de la surface

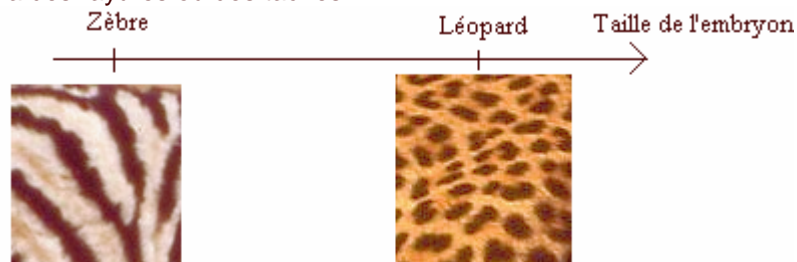
sur laquelle il se développe.

*De la taille de la surface :*

Un embryon très petit comme celui d'une souris n'offre pas de surface convenable : pas de motif. Des souris grises, des souris blanches mais pas de souris blanches tachetées de gris.

Un embryon très gros comme celui de l'éléphant ne donne pas de motifs : couleur unie. Des éléphants gris ... ou roses -) Mais pas d'éléphant rayé.

Entre les deux, la taille de l'embryon au moment de la production de mélanine détermine si le motif du pelage sera des rayures ou des taches.



*De la forme de la surface :*

A surface égale permettant la formation de taches, la forme fait la différence. Si on donne à une surface assez grande qui permet la formation de taches la forme d'un cylindre, les taches deviennent des rayures.

C'est le cas sur la queue de forme cylindrique du guépard qui est rayée alors que le corps est tacheté.



L'inverse n'est pas possible : un animal au pelage rayé ne peut pas avoir de queue tachetée.



Trouver les intrus :

- un éléphant gris à queue grise
- une souris tachetée
- un zèbre à queue rayée
- une souris grise à queue tachetée de blanc
- un zèbre à queue tachetée
- un guépard à queue rayée
- un léopard à queue tachetée

#### 5) Les limites du modèle de Turing :

Pour l'instant, aucune mise en évidence expérimentale des phénomènes de réaction-diffusion dans la morphogénèse n'a été effectuée. Cependant, les résultats théoriques sont si troublants que le modèle de Turing reste prometteur.

## 6) Anneaux de Liesegang :

Les anneaux de Liesegang sont un exemple de structure périodique obtenue par une réaction chimique de diffusion/précipitation.



### Mode opératoire :

Mettre dans 120mL d'eau chaude 0,12g de bichromate de potassium et 4g de gélatine alimentaire.  
Remplir avec la mélange obtenu un tube à essai à moitié. Attendre la prise en masse.

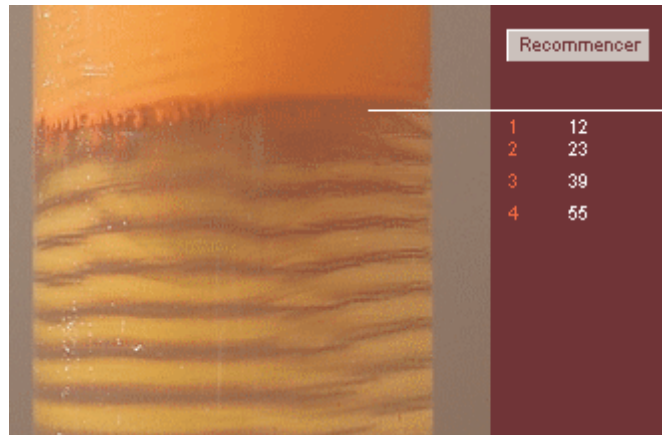
Verser ensuite dans le tube à essai 5mL d'une solution contenant 0,4g de nitrate d'argent.


Observer après un jour ou deux les anneaux formés de chromate d'argent ayant précipité.

L'applet ci contre permet de mesurer en pixels la distance entre l'interface gélatine/solution de nitrate d'argent et les anneaux.

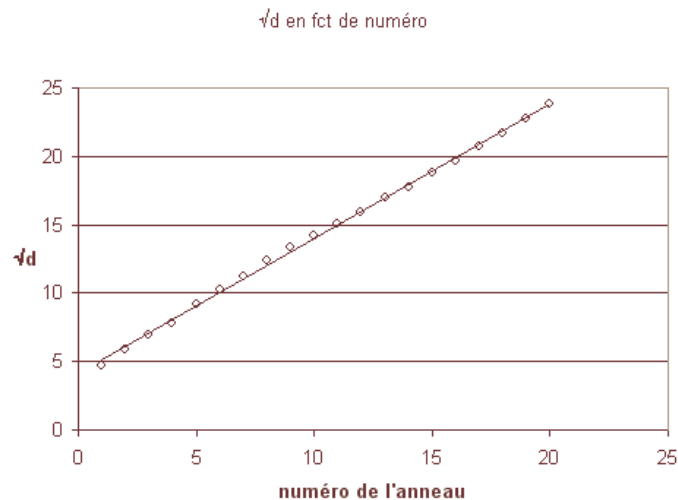
Pointer, en cliquant, les anneaux avec la souris, dans l'ordre où ils se présentent.

Deux nombres s'affichent :  
- en rouge, le numéro d'ordre de l'anneau  
- en blanc, la distance d en pixels par rapport à l'interface.



 Relever ces couples de valeur et les rentrer dans un tableur-grapheur.

 Tracer le graphe  $\sqrt{d}$  en fonction du numéro d'ordre de l'anneau. Observer la linéarité remarquable obtenue.



*Matériel : peau de zèbre, de léopard, de girafe, béccher rempli d'une solution gélifiée, encrier, compte goutte, le matériel pour une expérience d'autocatalyse, ordinateur avec Java 5 installé, les tubes avec les anneaux de Liesegang.*