

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

Morfogènesi: Estructures de Turing



Paraules clau: activador, inhibidor, reacció-difusió, Turing, melanina, fenilalanina, zebra, lleopard, girafa, embrió.

Entre les manifestacions més espectaculars de la natura destaquen les ratlles de la zebra, els polígons de la girafa o les taques del lleopard.



Zebra



Lleopard



Girafa

Com pot produir la natura unes estructures tan regulars?

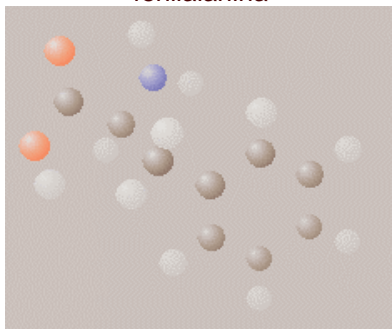
A les fotos veiem l'existència d'un pigment fosc: la melanina.

1) La melanina:

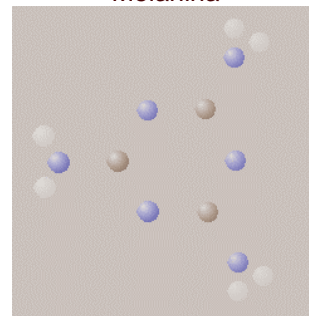
La melanina és una molècula de color marró que dona el seu color a les cèl·lules anomenades melanòcits. Aquest color pot anar del marró al negre.

Aquesta molècula se sintetitza a partir d'un aminoàcid, la fenilalanina, que per l'acció d'enzims dona la melanina.

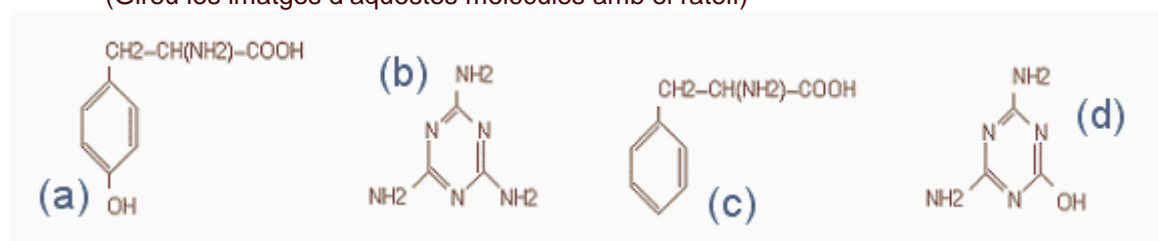
fenilalanina



Melanina



(Gireu les imatges d'aquestes molècules amb el ratolí)




A quines fórmules (a), (b), (c) o (d) corresponen la fenilalanina i la melanina?

La melanina és un aminoàcid? Per què?


 La fenilalanina és un aminoàcid? Per què?

El pas de la fenilalanina a la melanina es fa per l'acció d'**enzims**.

 Trieu, entre les proposicions següents, les que són correctes:
Els enzims:

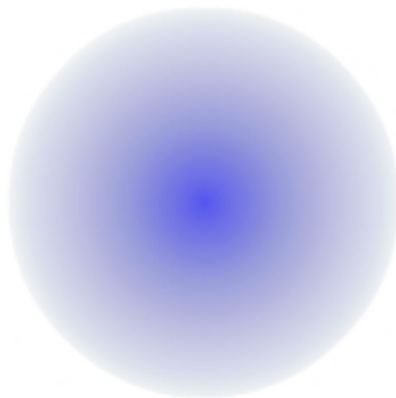
- (a) són catalitzadors de les reaccions bioquímiques
- (b) inhibeixen les reaccions bioquímiques
- (c) són organismes vius capaços de reproduir-se
- (d) són proteïnes
- (e) el seu nom porta el sufix **-asa**
- (f) acceleren la velocitat de les reaccions bioquímiques
- (g) el seu nom porta el sufix **-im**
- (h) són consumits per la reacció bioquímica

La melanina és responsable de la coloració de la pell, del pèl i de l'iris (color dels ulls). Una anomalia genètica pot comportar l'absència de tirosinasa, essencial per a la formació de la melanina.

 Com es diu la malaltia associada a aquesta absència de tirosinasa? Quins són els senyals aparents d'aquesta patologia?

2) Un mecanisme de difusió:

Es tracta de la difusió d'una espècie química. Per exemple, la que es pot observar quan es diposita delicadament una gota de tinta en un medi aquós.



(animation flash)

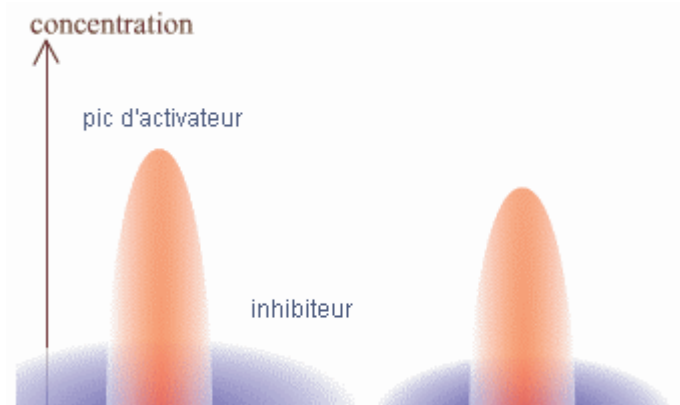
La tinta s'escampa progressivament fins a ocupar tot el medi. Aquest fenomen s'explica pel moviment brownià.

3) El model de Turing de reacció-difusió:

Hipòtesi: un medi viu, d'entrada homogeni i amorf, conté dues substàncies concurrents (la natura química de les quals no és important):

- un **activador A**
que és catalitzador de la seva pròpia formació (autocatàlisi)
que es difon lentament
- un **inhibidor B**
la formació del qual és catalitzada per l'activador
que es difon ràpidament
que retarda la formació de l'activador

Sota l'efecte dels moviments aleatoris de les molècules es pot formar, en un indret del medi, un excés ínfim de l'activador. Els mecanismes d'activació comportaran, en aquet indret, una producció suplementària d'A i una producció de B. Es formarà un pic d'activador A i de B. L'inhibidor es difon més de pressa que l'activador i el pic de B s'escampa més àmpliament que el d'A. Hi haurà un dèficit d'inhibidor al centre del pic i, per contra, un excés d'aquest mateix inhibidor a les «ales» del pic. Això provoca una localització del pic d'activador en l'espai. A una distància prou gran del primer pic, la influència de l'inhibidor s'afebleix i es poden formar altres pics d'activador.

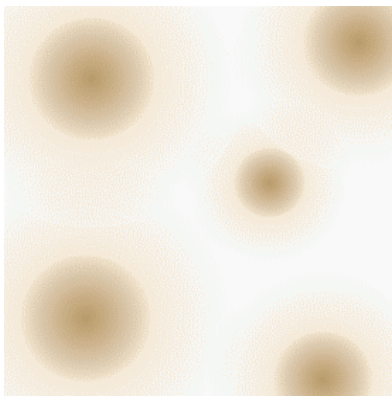


(animation Flash)

☞ Per què aquest mecanisme s'anomena reacció-difusió?

☞ Es pot veure aparèixer un nou pic d'activador entre dos pics ja existents? En quines condicions?

Canviem els colors i el punt de vista (la superfície del medi en què es produeix la reacció-difusió és vista des de sobre).



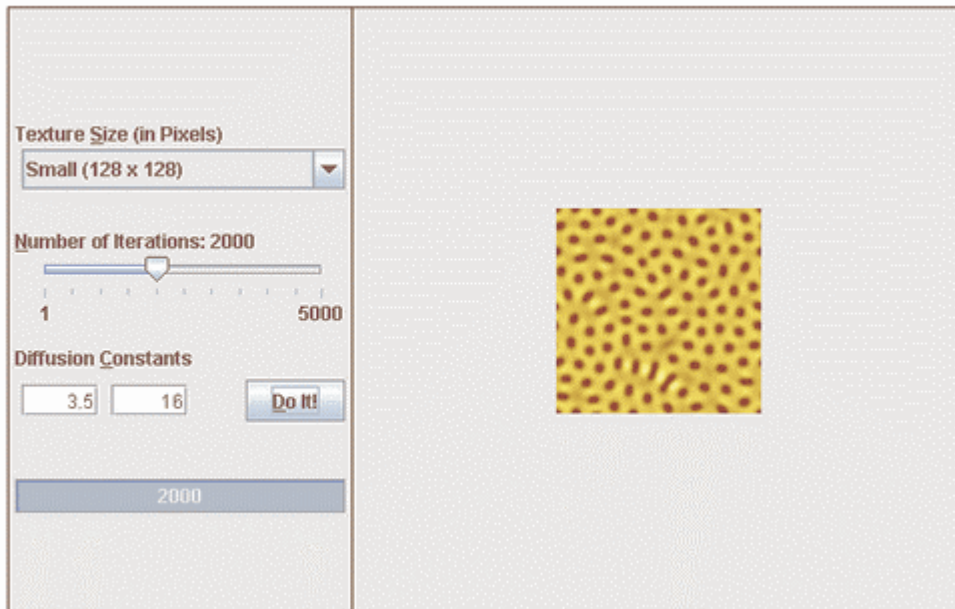
(animation Flash)



☞ La simulació mostra d'una manera aproximada un d'aquests tres motius. Quin?


☞ En l'animació anterior, quin és el color associat a l'activador? Quin és el color associat a l'inhibidor?

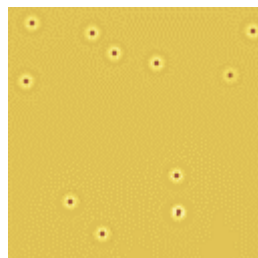
La miniaplicació (applet) Java següent permet simular una transformació de reacció-difusió a partir de les equacions de Turing. L'autor de la miniaplicació és Christopher Jennings (<http://www.sfu.ca/~cjenning/toybox/systems/index.html>), que ens ha autoritzat a utilitzar-la. L'applet només funciona amb la màquina virtual Java 5, que es pot descarregar de Sun Microsystems (<http://java.com/en/download>).



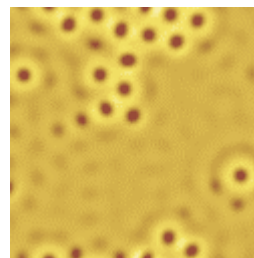
 Què representen les dues constants de difusió?

Presentem una llista de constants de difusió proposades per 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).

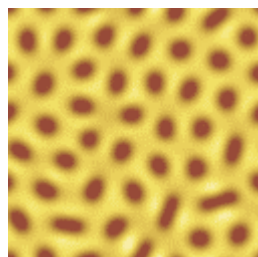
 Les imatges següents s'han obtingut amb els parells de constants de difusió esmentats més amunt. Trobeu el parell utilitzat per a cada imatge.



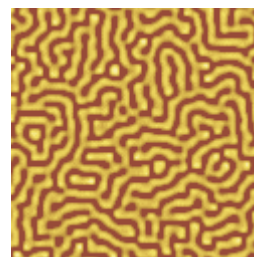
Parell:



Parell:



Parell:



Parell:

 Per què el primer valor del parell és sempre inferior al segon?

 Què passa si s'inverteixen els dos valors d'un parell?

4) De la rata a l'elefant:

Les equacions de reacció-difusió de Turing mostren que el motiu obtingut depèn:

- de la forma
- de la mida de la superfície

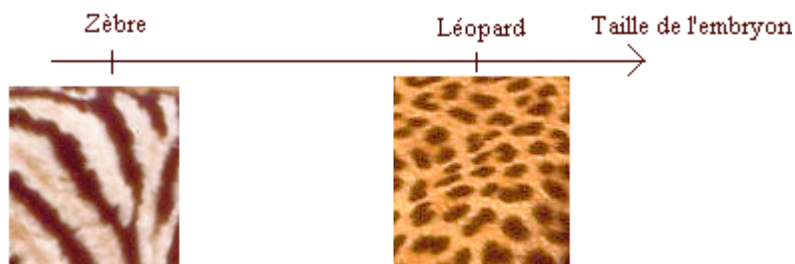
sobre la qual es desenvolupa.

De la mida de la superfície:

Un embrió molt petit com el d'una rata no ofereix la superfície que cal: no hi ha cap motiu. Rates grises, rates blanques, però no rates blanques tacades de gris.

Un embrió molt gran com el de l'elefant no dona cap motiu: color uniforme. Elefants grisos... o roses -), però no elefants ratllats.

Entre tots dos, la mida de l'embrió al moment de la producció de melanina determina si el motiu del pelatge seran ratlles o taques.



De la forma de la superfície:

A una superfície igual que permeti la formació de taques, la diferència ve donada per la forma. Si donem a una superfície prou gran per permetre la formació de taques la forma d'un cilindre, les taques es converteixen en ratlles.

És el cas de la cua de forma cilíndrica del guepard, que és ratllada, mentre que el cos és tacat.



El cas invers no és possible: un animal de pelatge ratllat no pot tenir una cua tacada.



Trobeu els intrusos:

- un elefant gris amb la cua gris
- una rata tacada
- una zebra amb la cua ratllada
- una rata gris amb la cua tacada de blanc
- una zebra amb la cua tacada
- un guepard amb la cua ratllada
- un lleopard amb la cua tacada

5) Els límits del model de Turing:

Fins ara no s'han evidenciat experimentalment els fenòmens de reacció-difusió en la morfogènesi. Tanmateix, els resultats teòrics són tan torbadors que el model de Turing promet.

Material: pell de zebra, de lleopard, de girafa, vas de precipitats ple d'una solució gelificada, tint, comptagotes, material per a un experiment d'autocatàlisi, ordinador amb Java 5 instal·lat.