

Comment la physique fait fonctionner la biologie

ou

Biophysique Statistique

ou

Physique Statistique de la matière vivante

Aleksandra M Walczak

Laboratoire de Physique Théorique - ENS, CNRS

se reproduire = évoluer (événements rares)

calculer = intégrer, différencier

percevoir = transmettre des informations

prendre des décisions = processus irréversible (hors d'équilibre)

Comment fonctionnent les organismes vivants?

fonctionnent = vivre, se reproduire, calculer, sentir, prendre des décisions, communiquer

comment = contraintes physiques: bruit, échelles de temps, coûts énergétiques, coûts moléculaires, espace



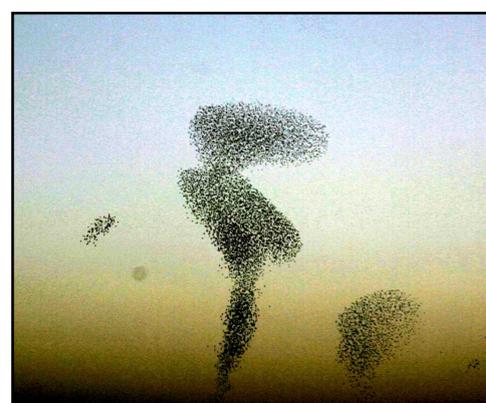
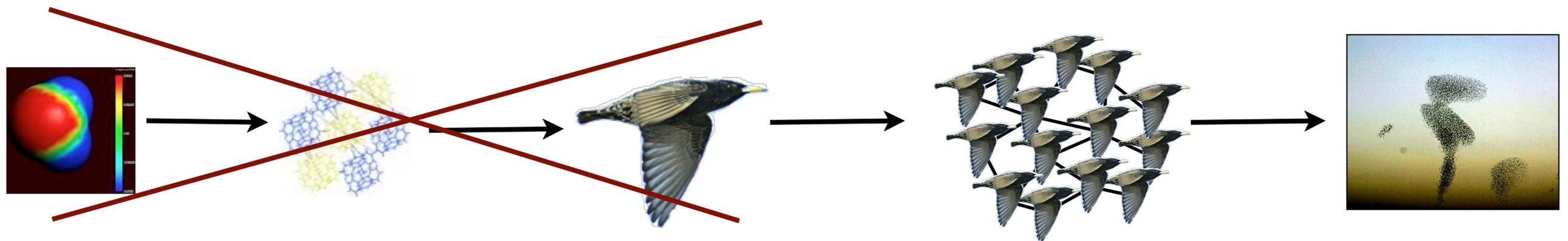
"more is different"

Phillip W Anderson, Science, **177**, 393 (1972)

- reproductibilité vs processus aléatoire
- phénomènes critiques
- émergence
- auto-organisation
- interactions effectives

Physique statistique et matière condensée

More is different



échelles
variables pertinentes

modèles effectifs

fondamentalement nouveau
comportement observé

“infotaxie” ou comment épouser la limite physique

concentrations ne sont pas fiables - trop dilué

comment trouver la source ?

construire une carte *probabiliste* des positions des sources

→ basé sur les observations

→ maximiser la taux de reduction d'entropie

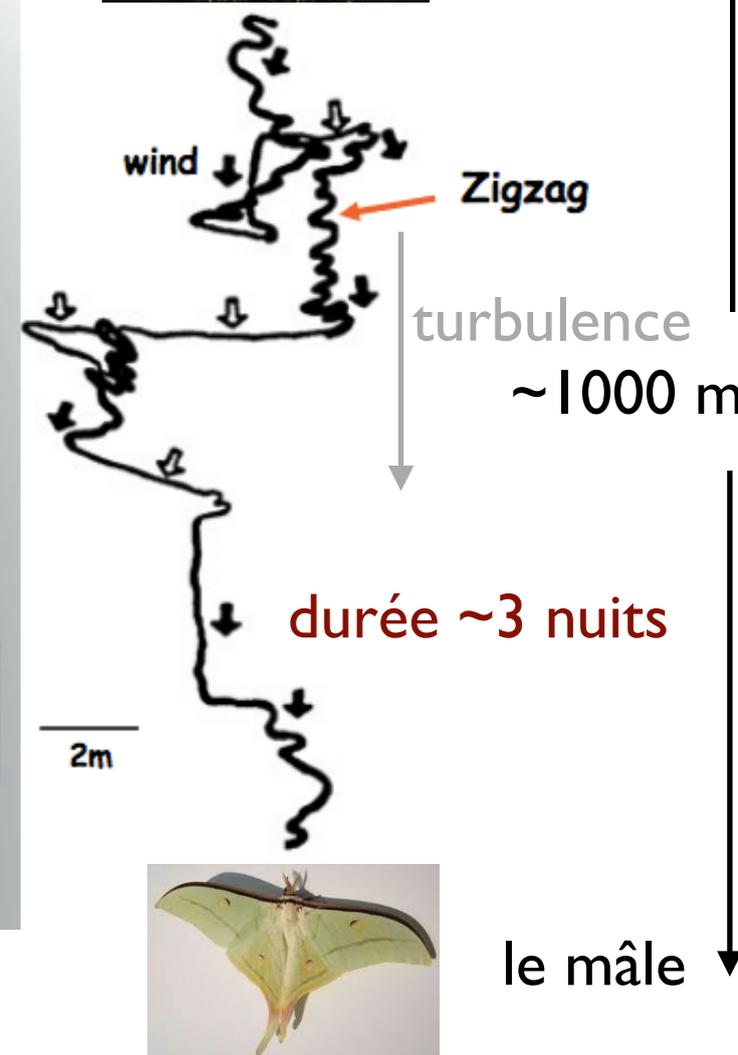
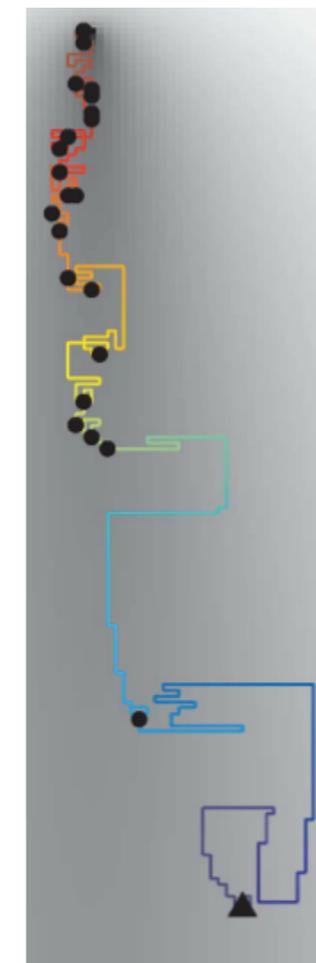
$$\Delta S(\mathbf{r} \rightarrow \mathbf{r}_j) = P_t(\mathbf{r}_j) [-S] + \sum_{k:\text{no de detections}} P(k \text{ detections}) \Delta S_k$$

déplacement :
réduire l'entropie
exploitation - recherche du
maximum vraisemblance
exploration - acquisition des informations
mise a jour

enjeu: reproduction



le but:
la femelle



le mâle

mémoire

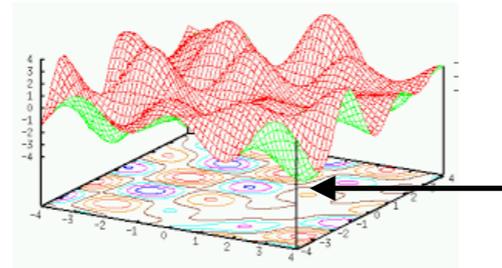
temps de relaxation des neurones ~ 10 - 100 ms

longue durée

~ jours - années

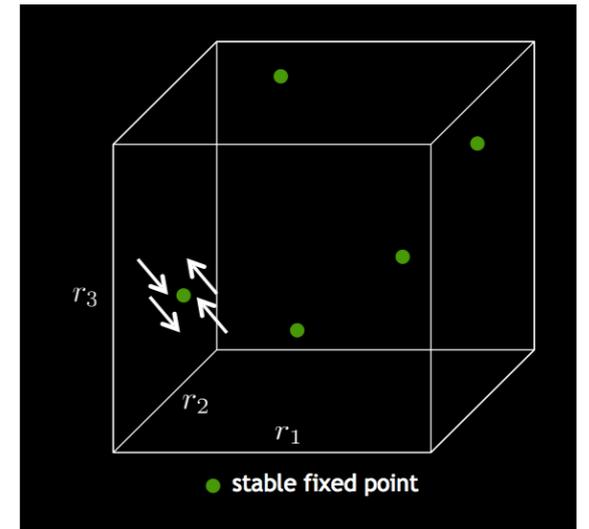
états métastables

modèle de Hopfield

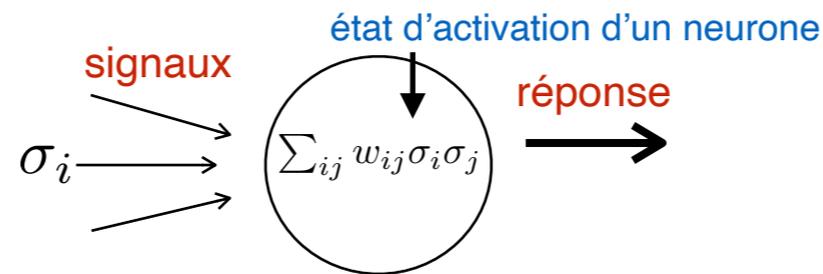


mémoires

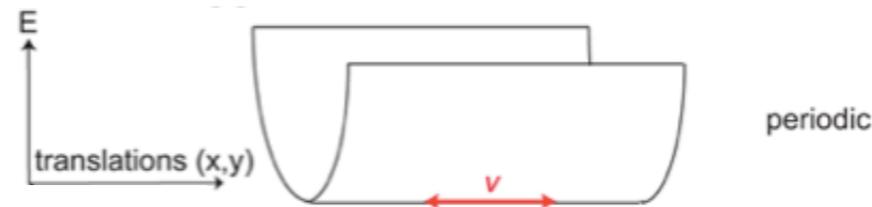
point attracteur



Hopfield

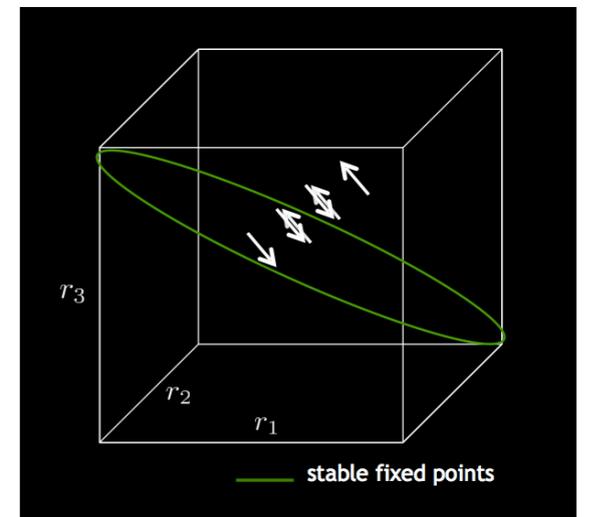


une continuité de solutions



periodic

attracteur continu



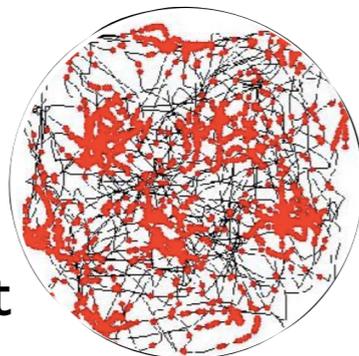
Fiete, Sompolinsky, Seung et al

courte durée

~10 - 100 s

modes zeros

réponse d'un neurone



trajectoire du rat

représentations neuronales ?

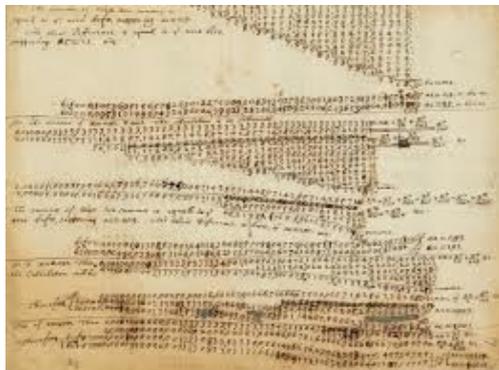
comment encoder le monde dans les réseaux de neurones ?



confronter
aux données

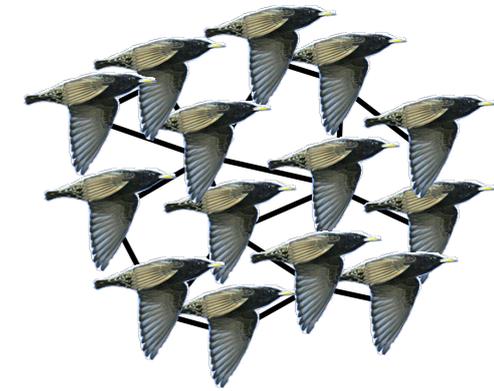


apprendre
des
données



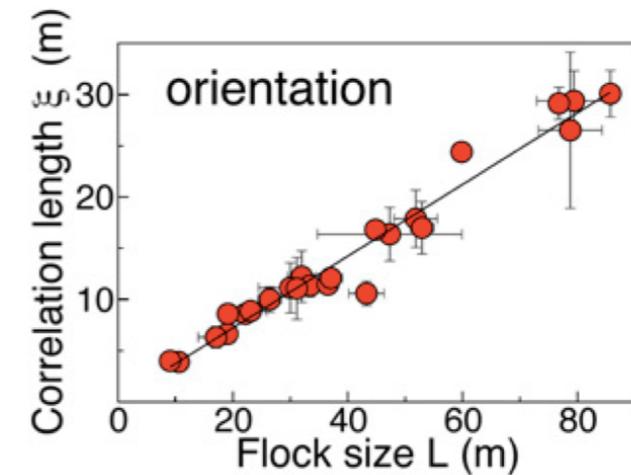
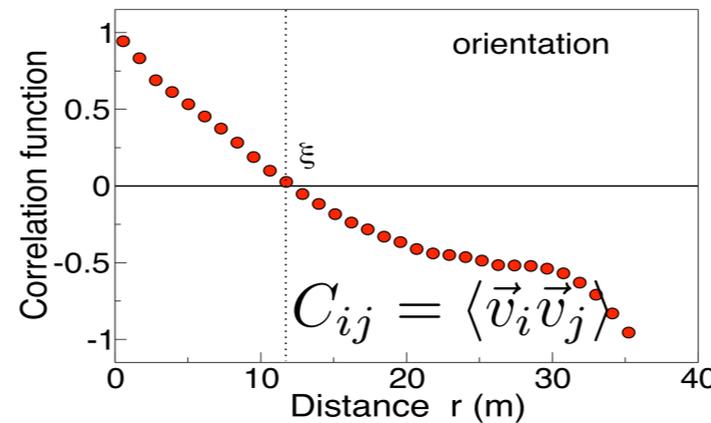
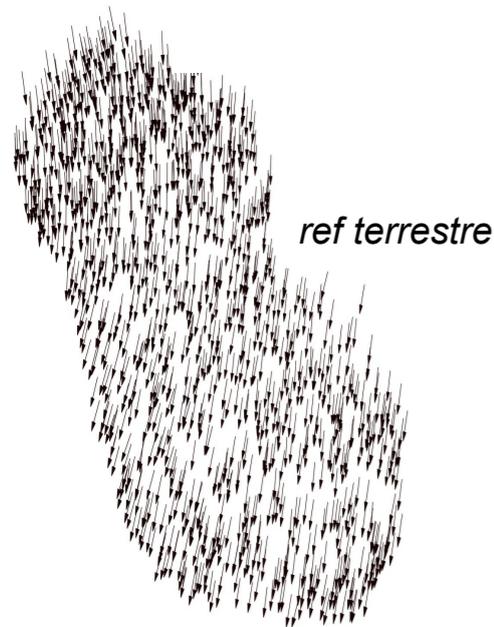
invariance d'échelle dans les nuées d'oiseaux

interactions locales → ordre global ?



mécanique statistique

interactions locales → corrélations invariantes d'échelle

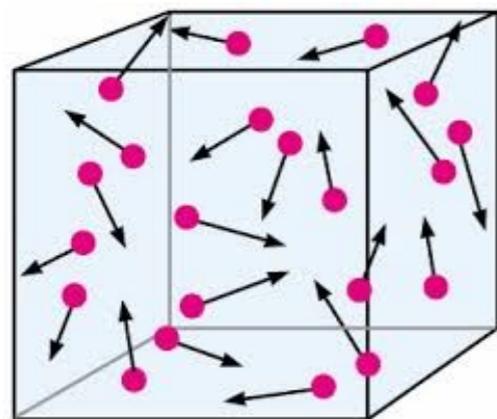


direction globale aléatoire → brisure de symétrie → mode zéro

modèle des interactions sur un réseau changeant

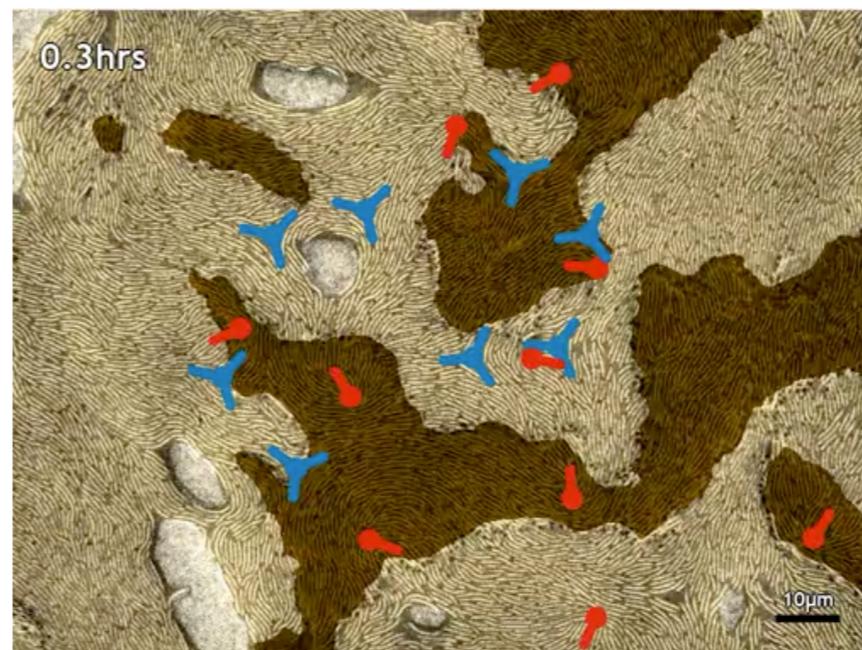
→ eq. stochastique du mouvement ↔ modèle "social" d'interactions

une coordination frappante dans la direction du vol



distribution de Maxwell-Boltzmann

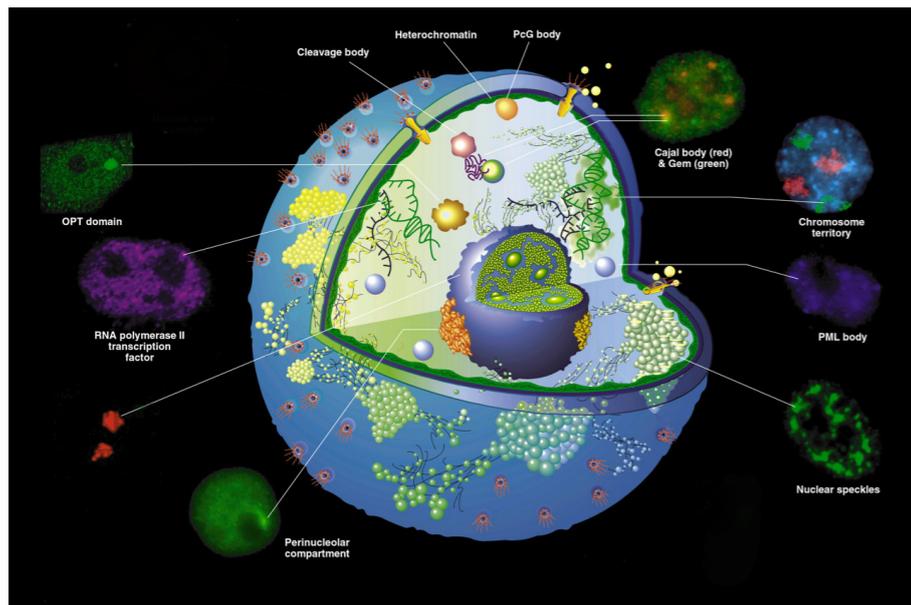
$$P(\vec{v})d\vec{v}$$



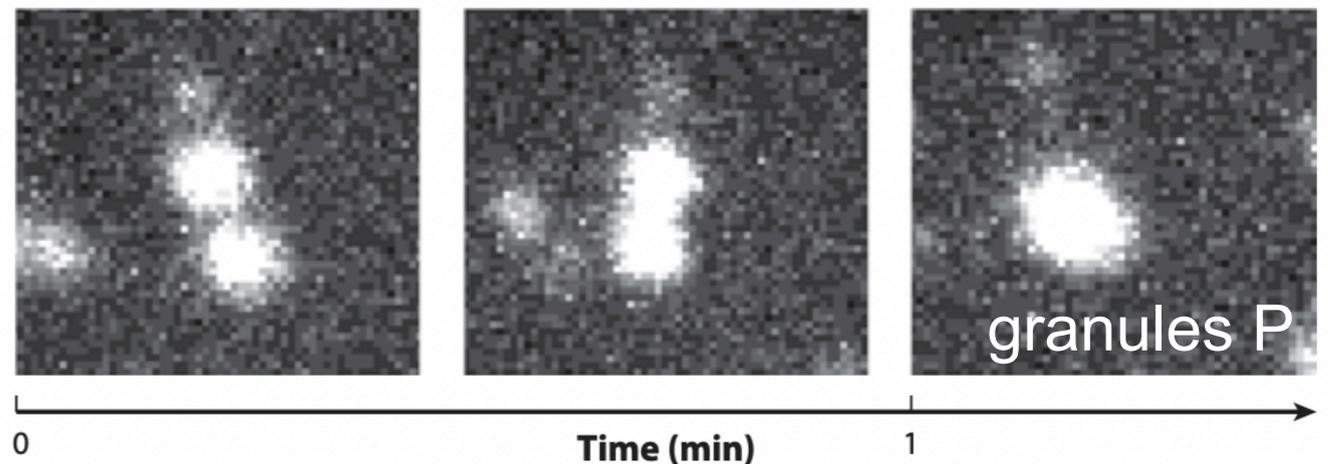
défauts topologiques

auto-organisation sans membrane dans les cellules

plusieurs compartiments sans membranes

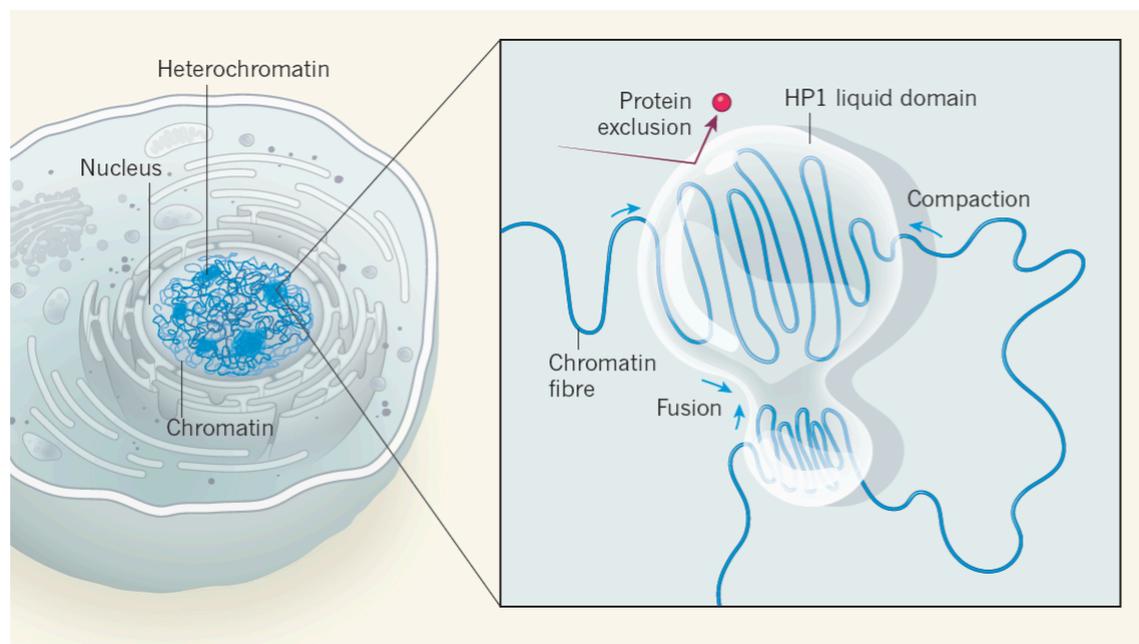


pôle de régulation post-traductionnelle: première exemple de gouttelettes



→ comme des liquides :

- forme sphérique
- possibilité de réorganiser l'intérieur
- capacité à fusionner



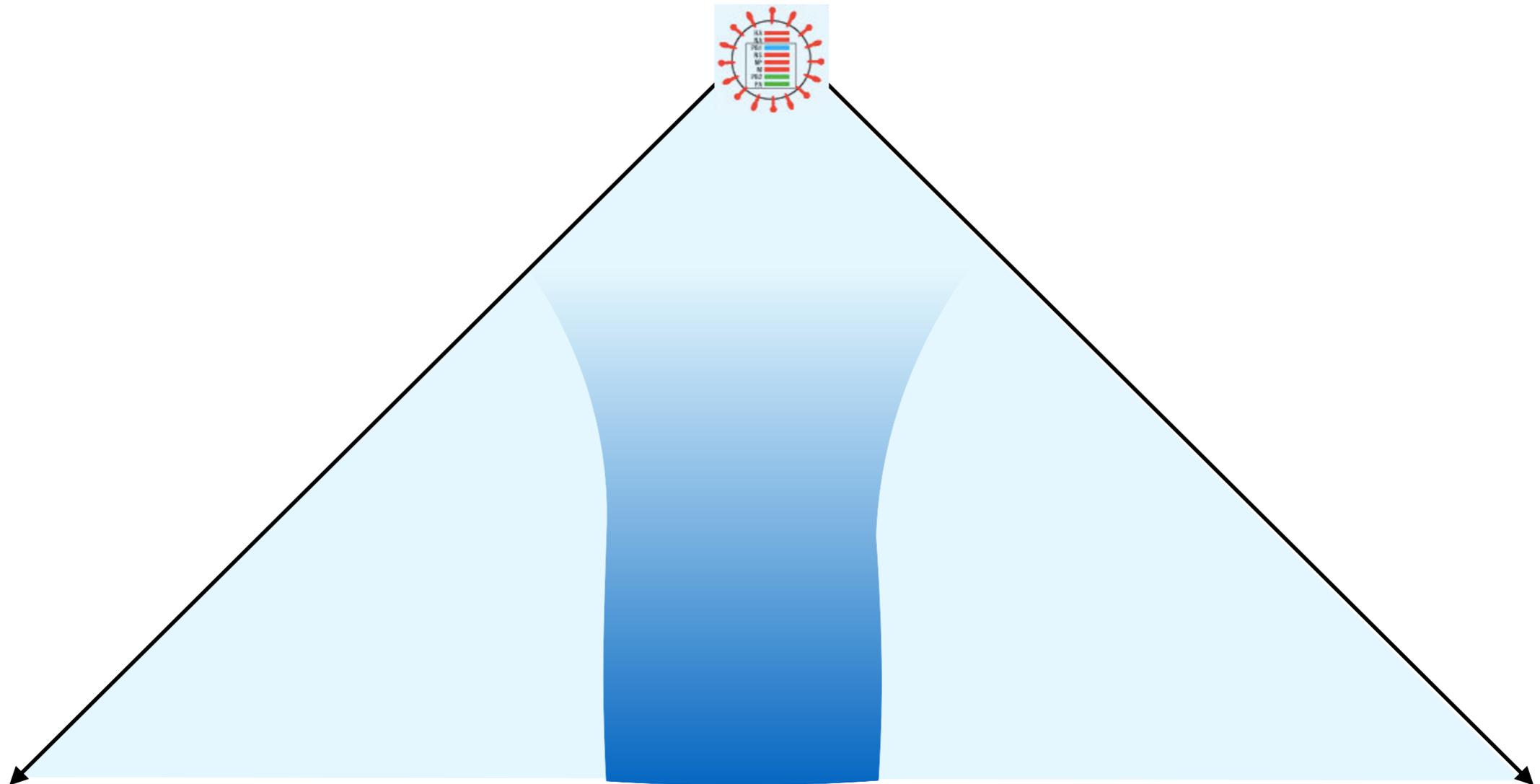
comportement de gouttelettes vivant ?

quels critères dans la cellule pour formation de gouttelettes ?

l'évolution génère de **la diversité**

l'espace des solutions diverses est-il *infini*?

évolution = événements rares

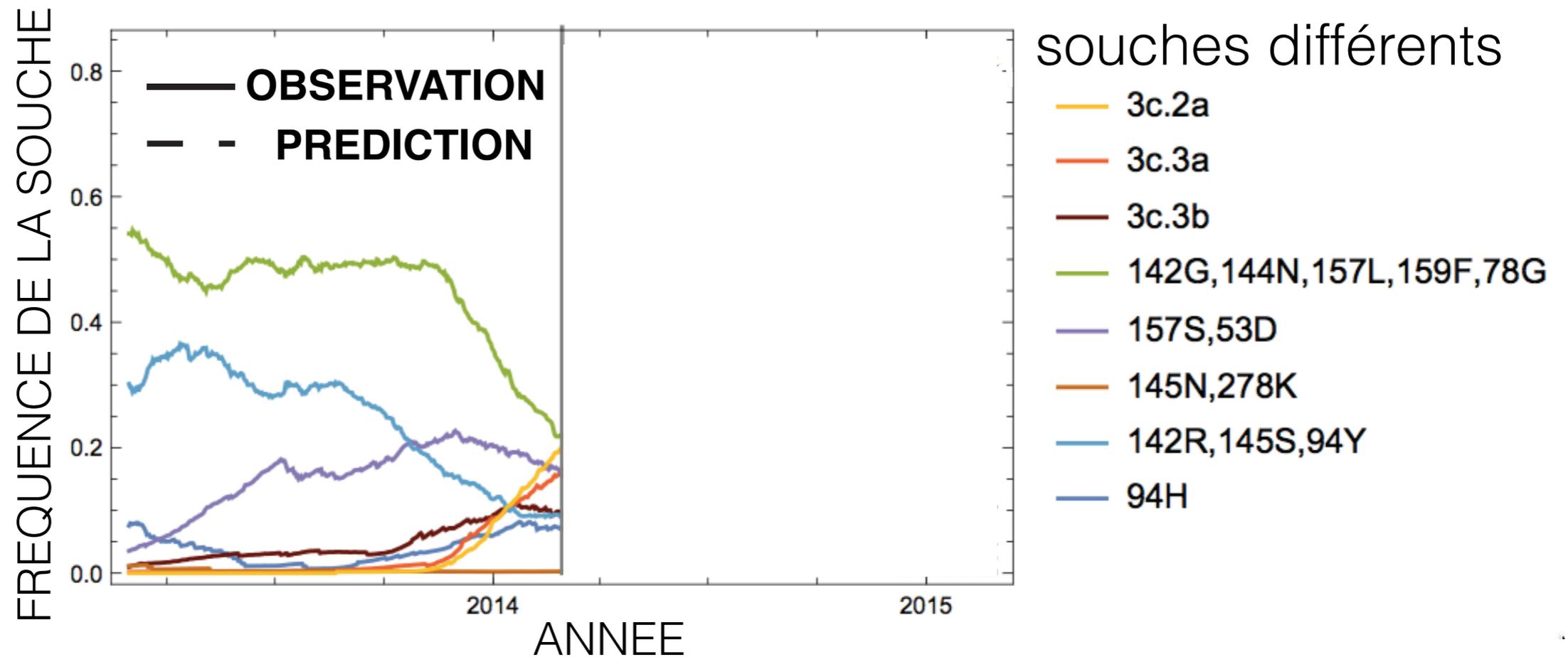


co - évolution = événements rares *constraints*

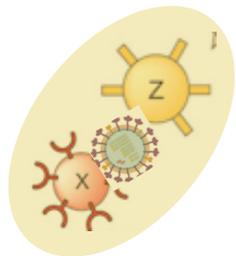
les chemins de l'évolution sont-ils reproductibles / prévisibles?

prédiction (probabiliste) de la grippe

prédiction pour l'hiver 2014/2015



$$P(\text{souches}, t + 1) = \sum_{\text{trajectoires}} \sum_{\text{autres souches}} P(\{\text{souches}\}, t)$$



co-évolution → échelles des temps pour les constraints

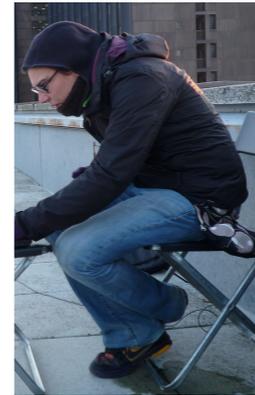
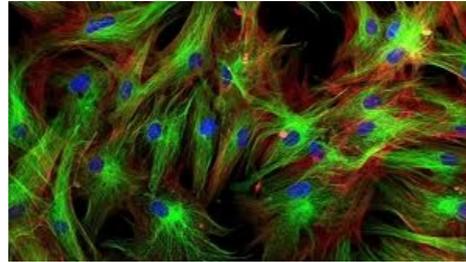
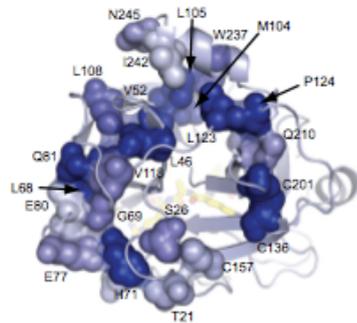
la vie à travers les échelles

moléculaire

cellulaire

organismique

écologique



cascade des échelles: peut-on comprendre une échelle sans les autres ?

mêmes **lois** physiques

→

nouvelles **lois** ?

- les limites
- les strategies

↑

observations → phénoménologie → théorie → **applications**

interactions fortes / stochastique / non linéaire

↓

reproductibilité vs prévisibilité?