

# **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*



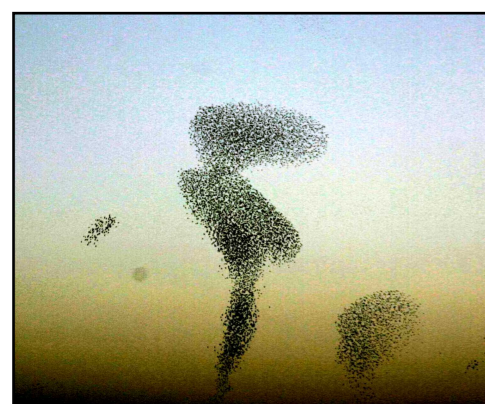
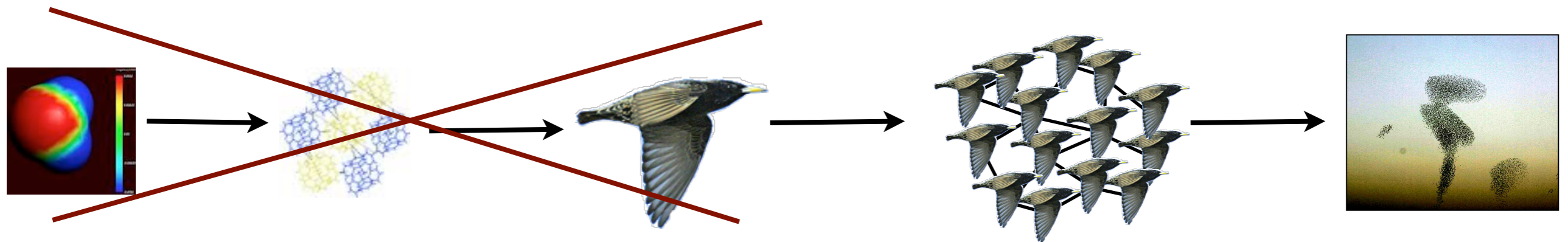
# "more is different"

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 réduction d'entropie

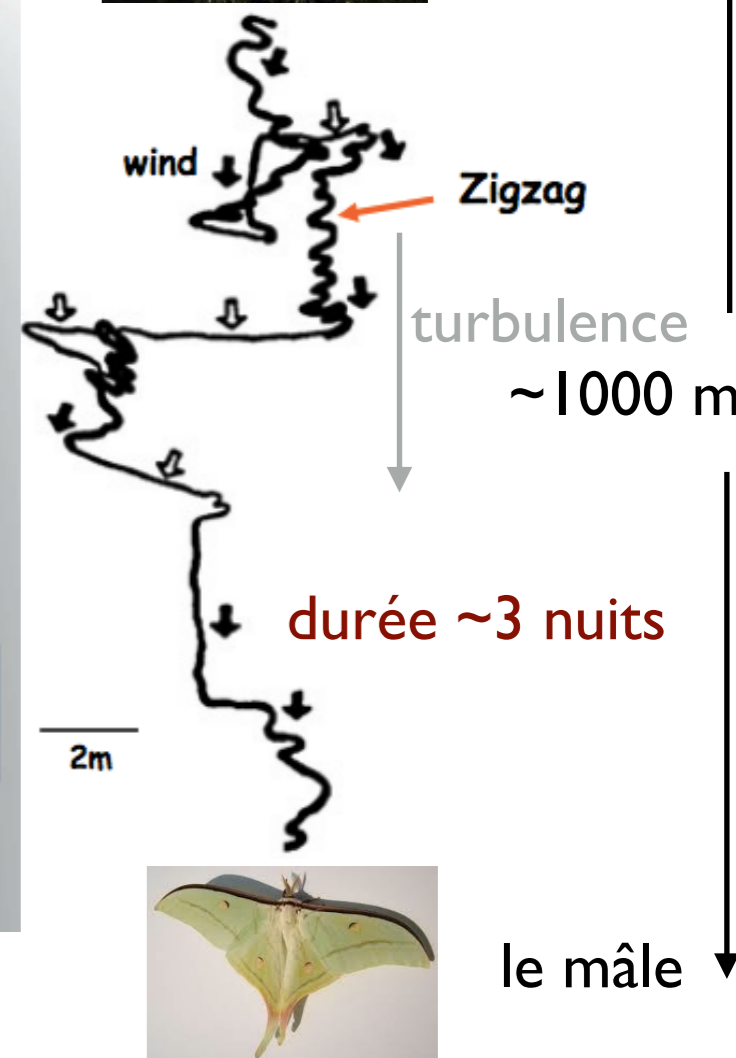
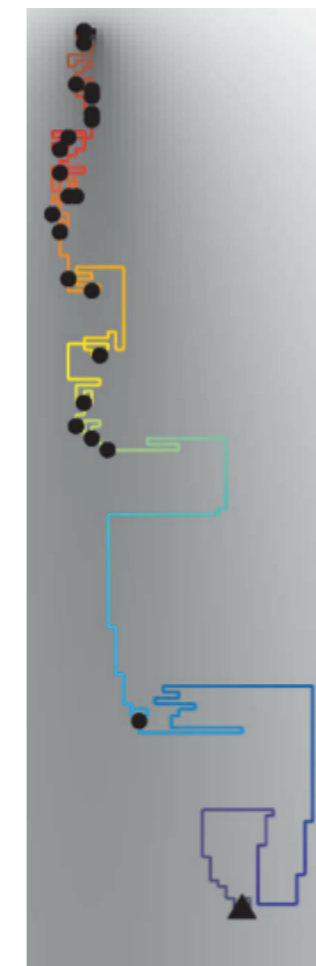
$$\Delta S(\mathbf{r} \rightarrow \mathbf{r}_j) = P_t(\mathbf{r}_j) [-S] + \sum_{k: \text{no de detections}} P(k \text{ detections}) \Delta S_k$$

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

enjeu: reproduction



le but:  
la femelle



# mémoire

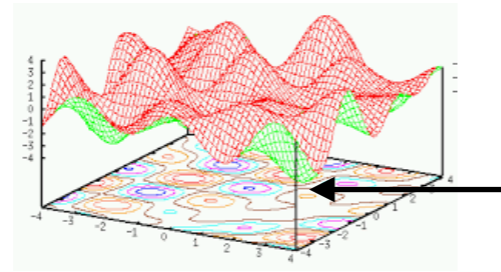
temps de relaxation des neurones ~ 10 - 100 ms

longue durée

~ jours - années

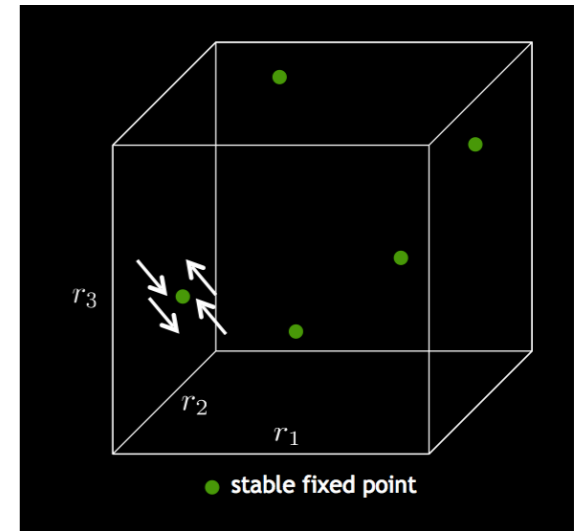
états métastables

modèle de Hopfield

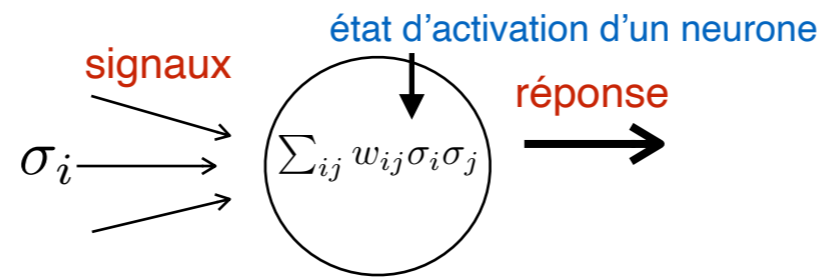


mémoires

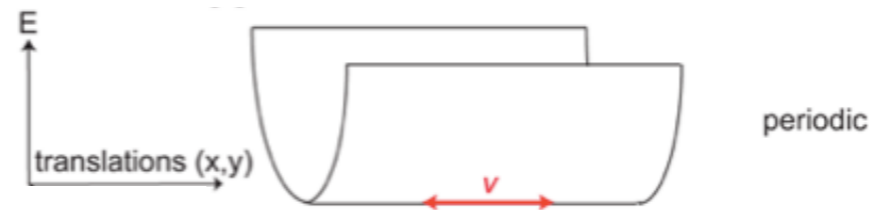
point attracteur



Hopfield

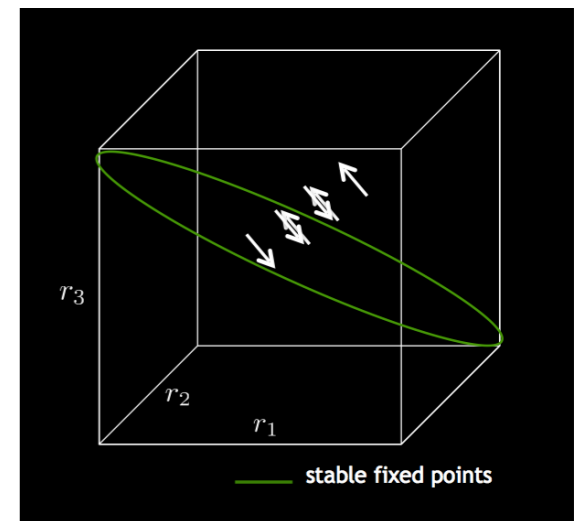


une continuité de solutions



periodic

attracteur continu



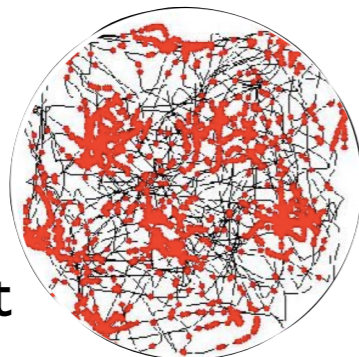
Fiete, Sompolinsky, Seung et al

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

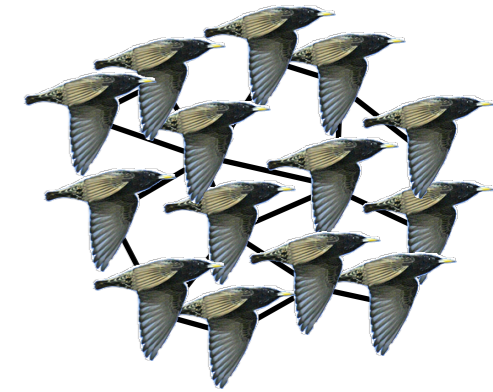


apprendre  
des  
données



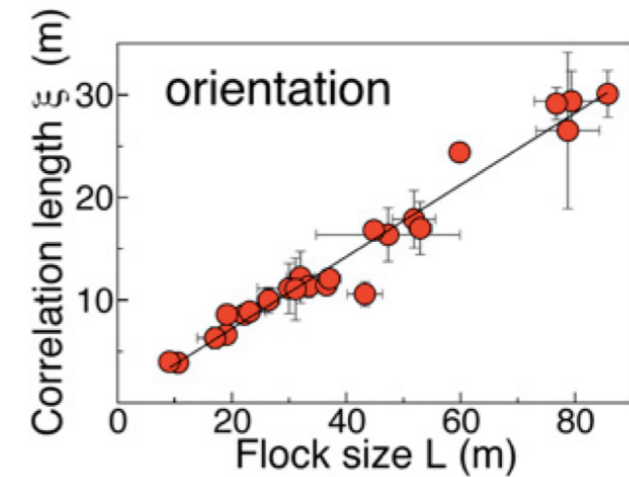
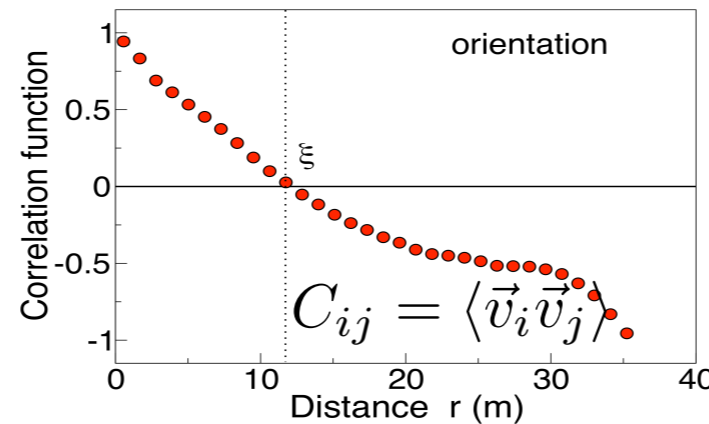
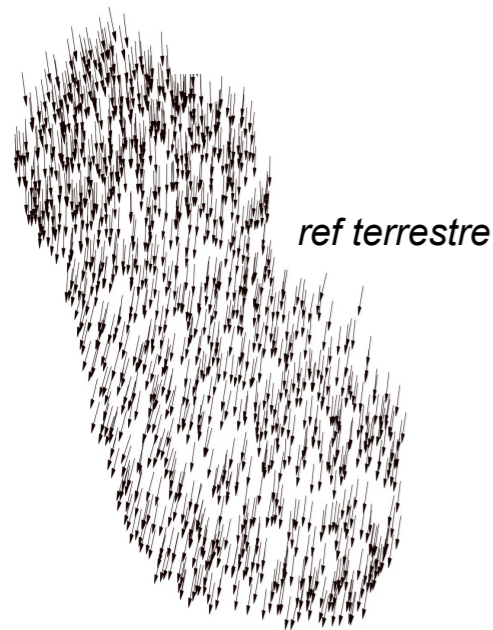
# invariance d'échelle dans les nuées d'oiseaux

interactions locales → ordre global ?



mécanique statistique

interactions locales → corrélations invariantes d'échelle

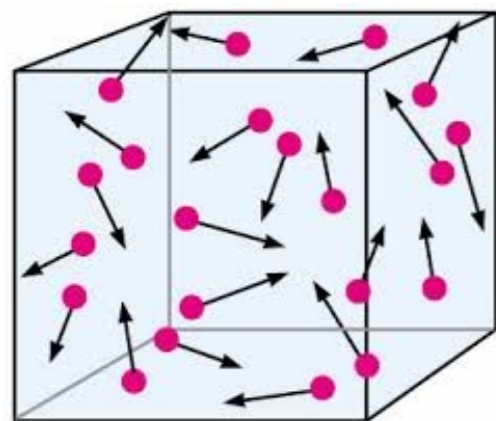


direction globale aléatoire → brisure de symétrie → mode zéro

modèle des interactions sur un réseau changeant

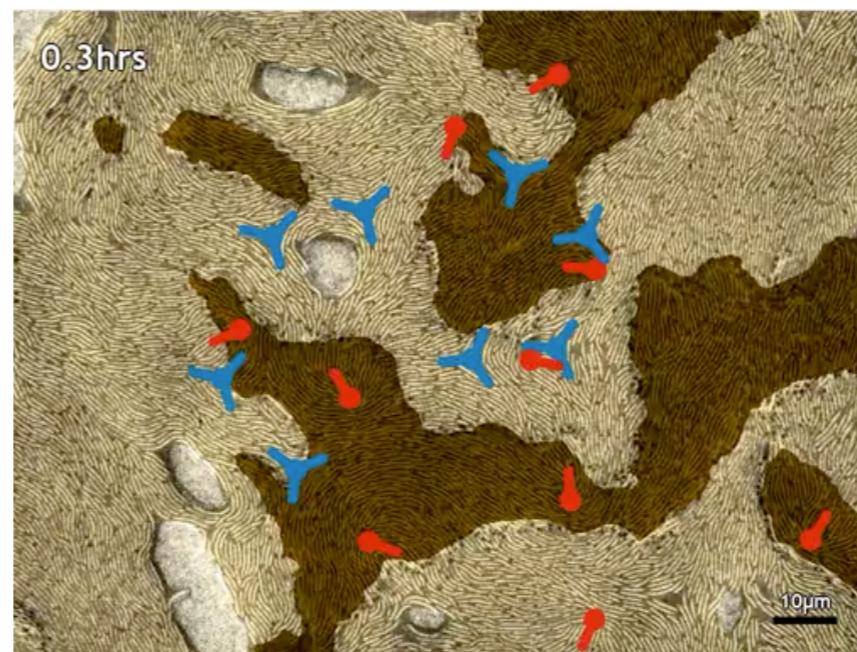
→ eq. stochastique du mouvement ↔ modèle "social" d'interactions

une coordination frappante dans la direction du vol



distribution de Maxwell-Boltzmann

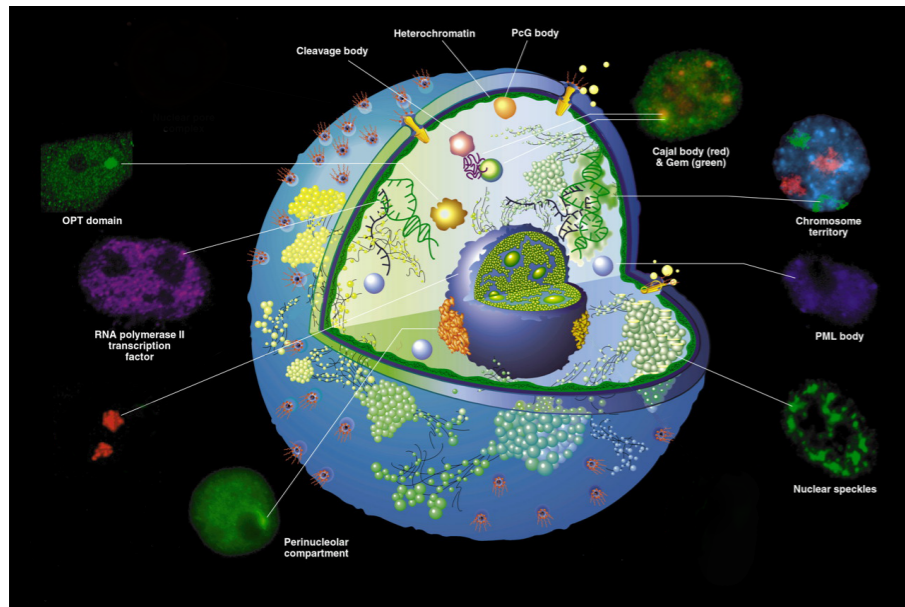
$$P(\vec{v})d\vec{v}$$



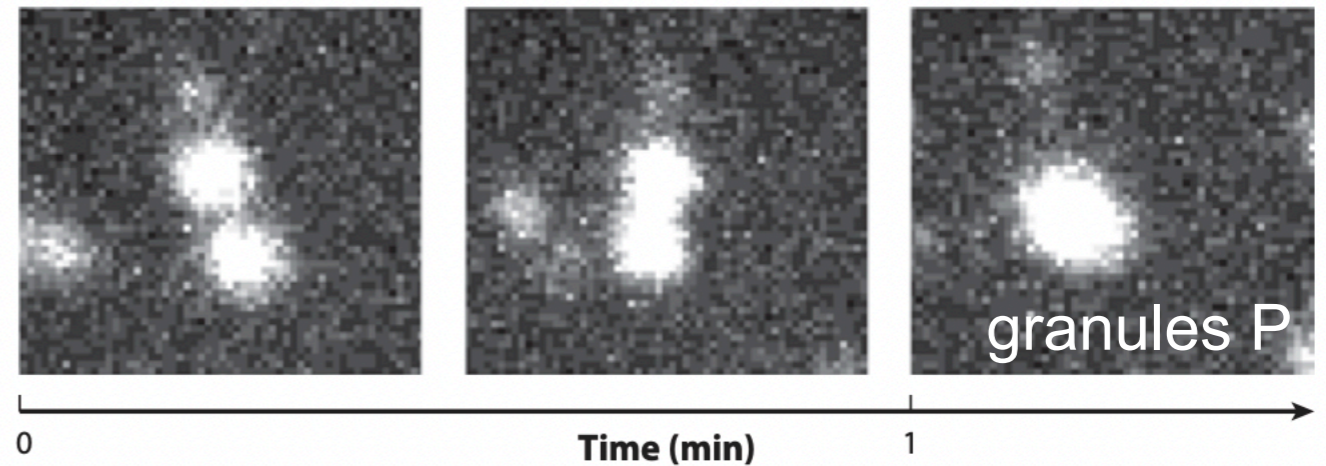
défauts topologiques

# auto-organisation sans membrane dans les cellules

plusieurs compartiments sans membranes

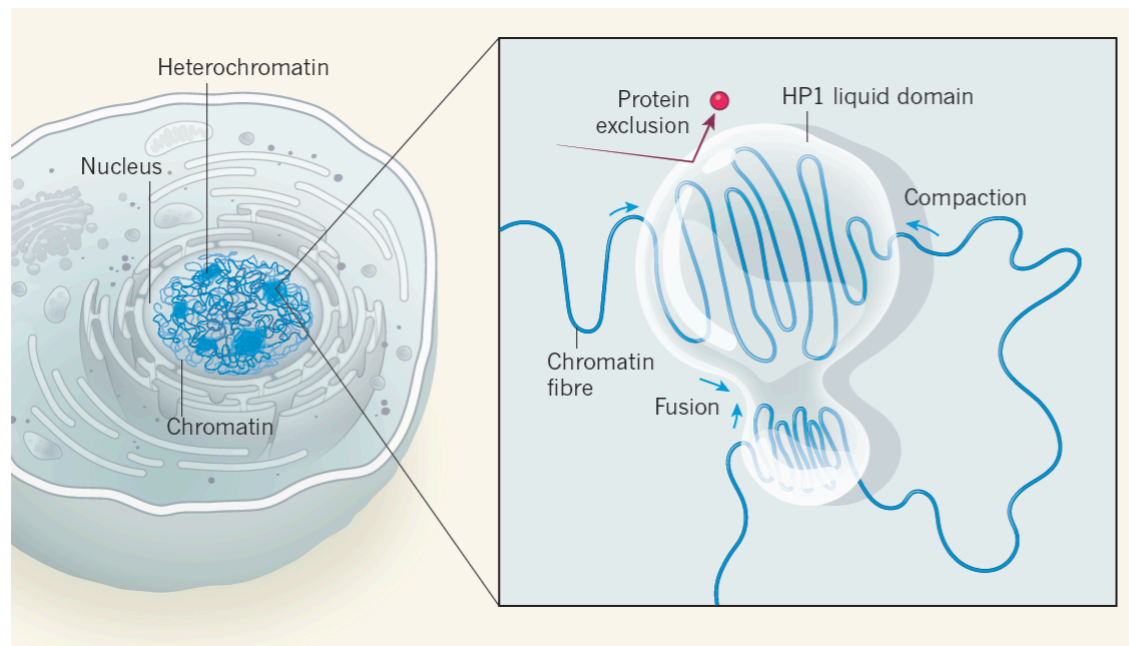


pôle de régulation post-traductionnelle: première exemple de gouttelettes



→ comme des liquides :

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



comportement de gouttelettes vivant ?

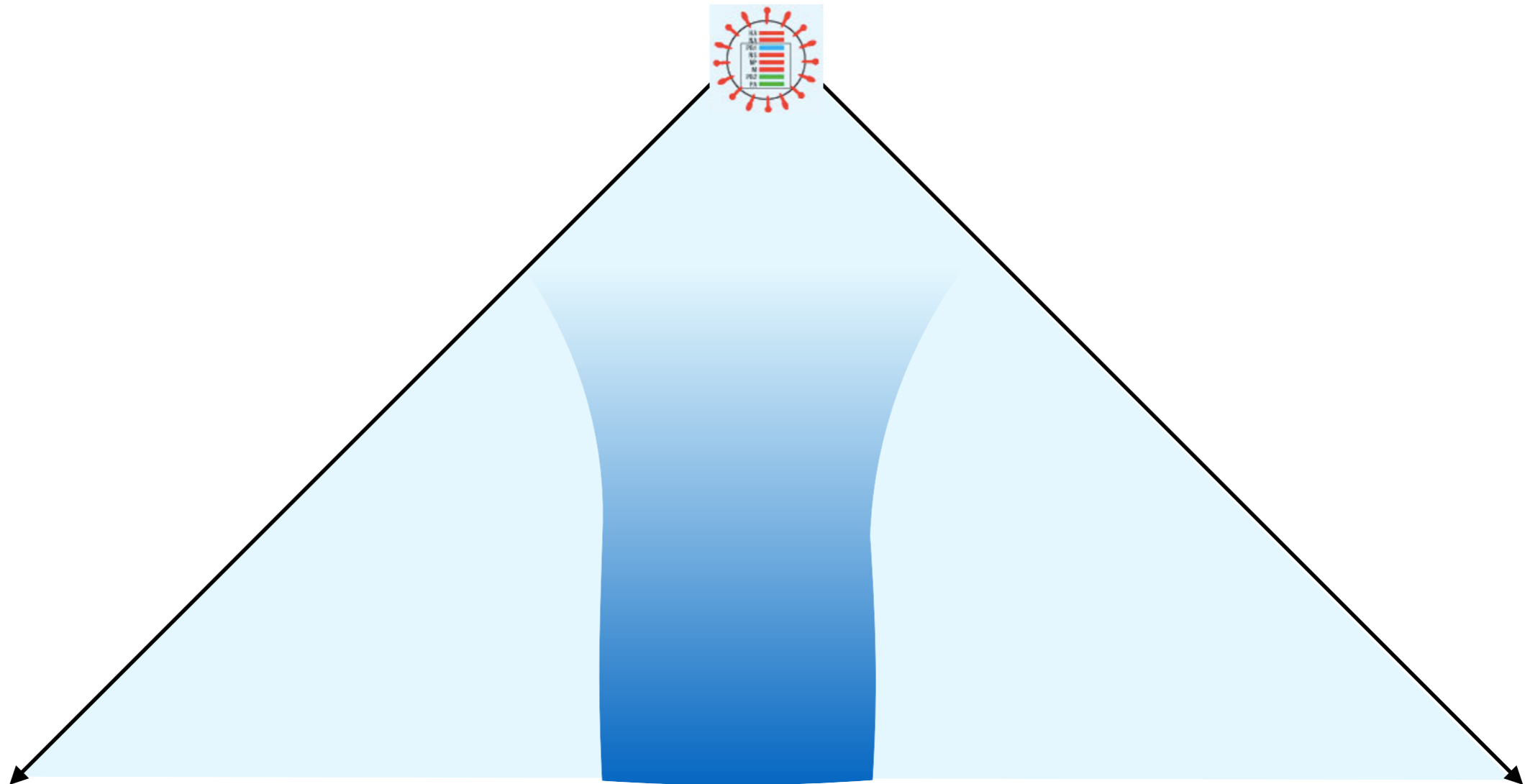
quels critères dans la cellule pour formation de gouttelettes ?



l'évolution génère de **la diversité**

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

évolution = événements rares

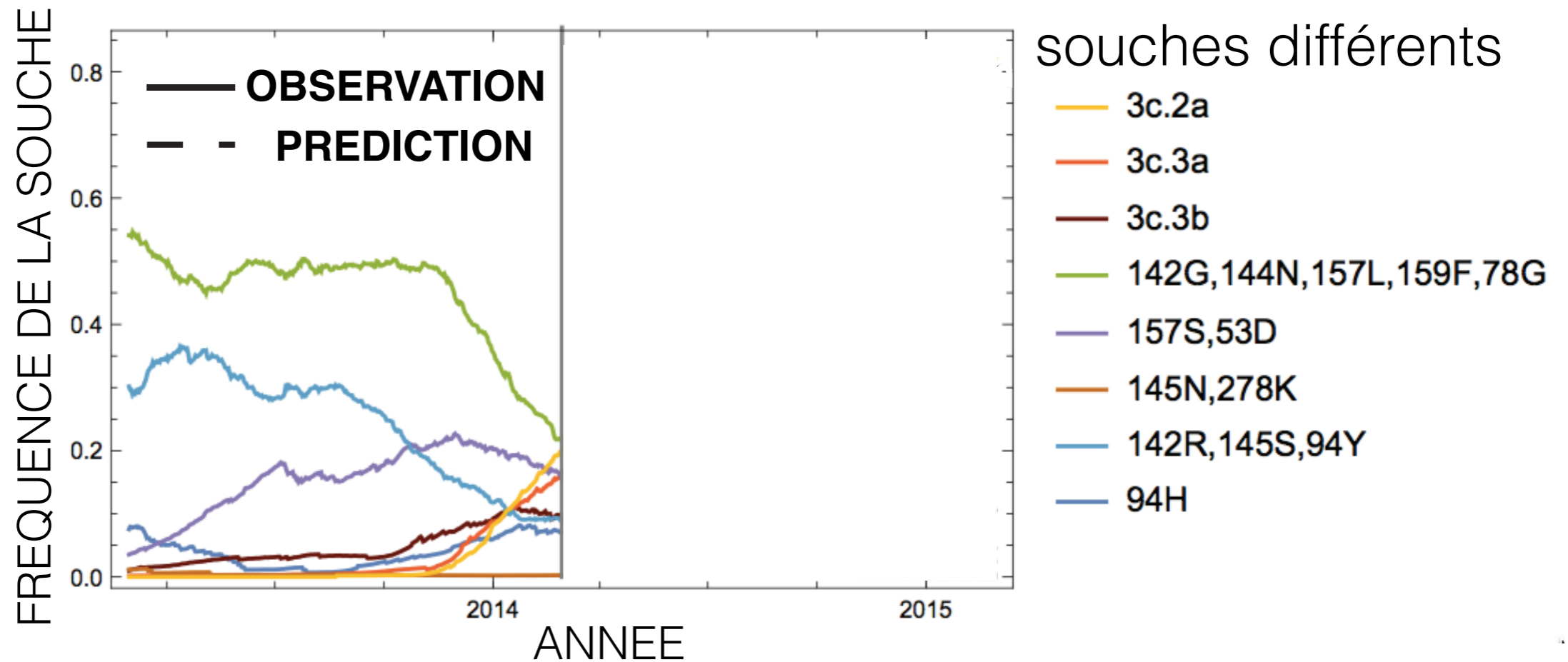


co - évolution = événements rares *constraints*

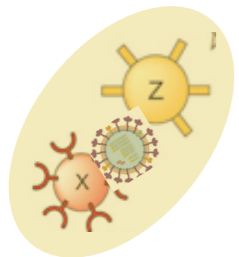
**les chemins de l'évolution sont-ils reproductibles / prévisibles?**

# 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

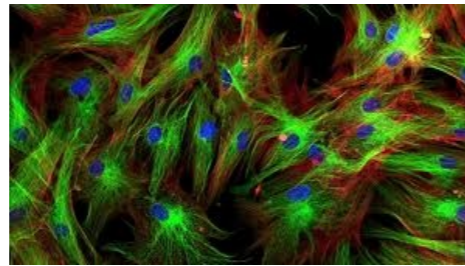
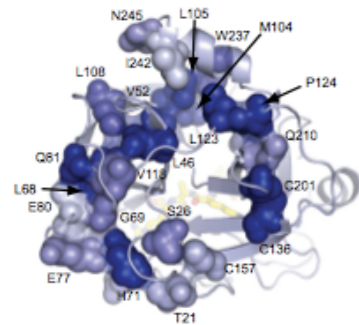
# la vie à travers les échelles

*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?