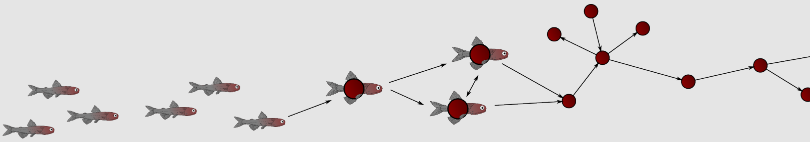
Réseaux Complexes et Dynamique de Systèmes Biologiques

Aziz.Alaoui@univ-lehavre.fr



Université du Havre
LMAH - ISCN - FNM-CNRS

23 avril 2012

Concept

"I know it when I see it"
("Je le sais quand je le vois")

Stephen Hawking

"I think the next century (21th) will be the century of complexity"
("Je pense que le prochain siècle (21) sera le siècle de la complexité")

Compliqué $\neq$ Complexe

- Système **compliqué** : peut être réduit pour être mieux compris
  ex : Moteur de voiture

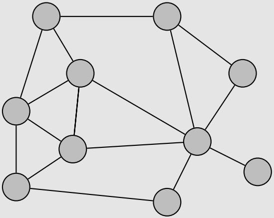
- Système **complexe** : ne peut être réduit sans perdre son intelligibilité
  $\rightarrow$ doit être considéré comme un tout.

Système complexe

Système d'entités en interaction

Le comportement du système ne peut être compris par la seule analyse conventionnelle de chacun de ses constituants

$\rightarrow$ émergence de propriétés, (processus d'auto-organisation)
$\rightarrow$ degré de liberté $< \sum$ degré de liberté de ses constituants



Quelques caractéristiques souvent associées à la notion de système complexe

- **Non-linéarité** :
  $\rightarrow$ un système complexe est plus que la somme de ses composants
  $\rightarrow$ petites perturbations $\Rightarrow$ grands effets (Dynamique non-linéaire et Chaos)

- **Rétroaction** :
  rétroaction positive ou négative du comportement collectif sur le comportement individuel

- **Systèmes ouverts** :
  en général loin de l'équilibre énergétique.

Caractéristiques

- **Mémoire** :
  les systèmes complexes sont des systèmes dynamiques qui évoluent et les états passés influencent l'état présent et à venir.
  $\rightarrow$ hysteresis
- **Poupées Russes** :
  Les composants d'un système complexe peuvent eux-même être des systèmes complexes
- **Bornes difficiles à déterminer** :
  décision prise par l'observateur.

- **Émergence** :

$\rightarrow$ Processus de formation de motifs (pattern) à partir de règles simples.

$\rightarrow$ Apparition de propriétés d'un niveau supérieur venant d'une dynamique collective de chacun des composants.

$\rightarrow$ Ces propriétés ne peuvent se déduire de la seule étude des propriétés de niveau inférieur

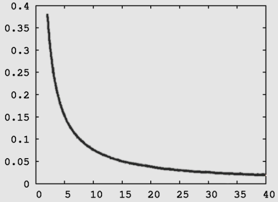
Propriétés émergentes

Propriétés du "tout" qui ne sont présentes dans aucune des parties constituantes du système

Comportement collectif

Boids

Exemple d'émergence : Lois de puissance



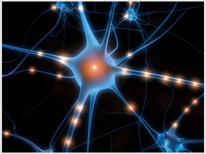
- tremblements de terre
- distributions des villes en fonction de leur population
- usage des mots dans une langue naturelle
- ...

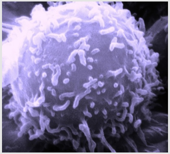
Quelques domaines d'applications

- Ecosystèmes artificiels et humains
  - dynamique urbaine
  - réseaux sociaux
- Ecosystèmes naturels
- Réseaux du vivant
  - système immunitaire
  - systèmes nerveux

$\rightarrow$ Point commun : comportement collectif

Système nerveux





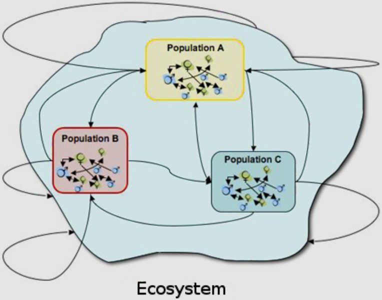
- Un neurone est une cellule très compliquée
- Le système nerveux est composé d'environ 100 milliard de neurones avec de nombreuses spécificités. Ces cellules interagissent par des synapses electriques ou chimiques

$\rightarrow$ *Les interactions entre ces milliards de cellules donnent naissance au système nerveux complexe, qui présente de nouvelles propriétés (émergentes)*

- Un lymphocyte est une cellule très compliquée
- Le système immunitaire est composé d'environ 10 milliard de lymphocytes avec de nombreuses spécificités. Ces cellules interagissent par reconnaissance moléculaire

$\rightarrow$ *Les interactions entre ces milliards de cellules donnent naissance au système immunitaire complexe, qui présente de nouvelles propriétés (émergentes)*

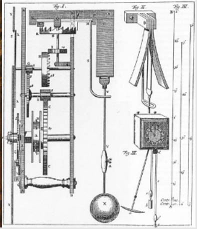
Écosystèmes



- Chaque population peut êle même être un écosystème compliqué ou complexe
- Les populations interagissent entre elles

$\rightarrow$ *Les interactions entre ces populations donnent naissance à un écosystème complexe, qui présente de nouvelles propriétés (émergentes), croissance, extinction, oscillations, ...*

Historique



Christian Huygens (1629-1695)
Horlogium oscillatorium (1673)

Synchronisation

- *syn* : commun
- *chronos* : temps

$\rightarrow$ avoir le même comportement au même moment

Il existe de nombreux types de synchronisation parmi lesquels :

- Synchronisation identique
- Synchronisation généralisée
- Synchronisation de phase
- ...

Une Propriété Emergente : La synchronisation

Définition

Synchronization

- *syn* : common
- *chronos* : time

→ partager le même comportement au même moment

Exemple - Désynchronisation

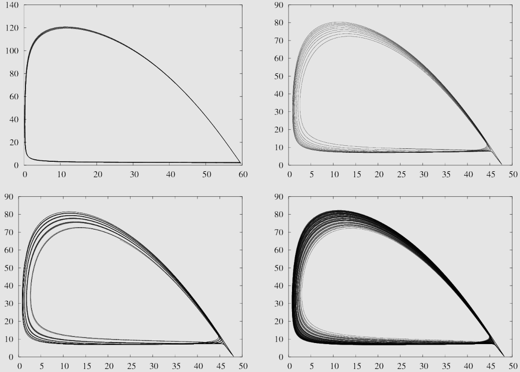
Soit un système modélisant un problème proie-prédateur :

$$\begin{cases} \dfrac{dX}{dT} & = & a_o X - b_o X^2 - \dfrac{v_o XY}{d_o + X} \\ \dfrac{dY}{dT} & = & -a_1 Y + \dfrac{v_1 XY}{d_1 + X} - \dfrac{v_2 YZ}{d_2 + Y} \\ \dfrac{dZ}{dT} & = & c_3 Z - \dfrac{v_3 Z^2}{d_3 + Y}, \end{cases} \tag{1}$$

- a_o : taux de croissance de la proie prey X
- b_o : force de compétition au sein de la population X
- v_o , ...

Exemple - Désynchronisation

Transition d'un comportement périodique du système proie-prédateur à un comportement chaotique



Transition vers un comportement chaotique (ou quasi périodique) par bifurcation de dédoublement de période pour $a_0 = 2.85$, $a_0 = 2.87$, $a_0 = 2.89$ et $a_0 = 2.90$

Exemple - Désynchronisation

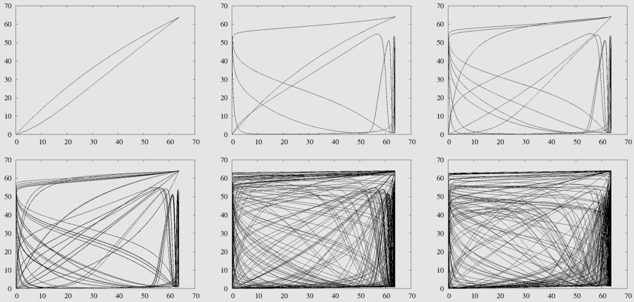
Couplage unidirectionnel

$$\left\{\begin{array}{lcl}
\dot{X}_1 & = & a_o X_1 - b_o X_1^2 - \dfrac{v_o X_1 Y_1}{d_o + X_1} \\
\dot{Y}_1 & = & -a_1 Y_1 + \dfrac{v_1 X_1 Y_1}{d_1 + X_1} - \dfrac{v_2 Y_1 Z_1}{d_2 + Y_1} \\
\dot{Z}_1 & = & c_3 Z_1 - \dfrac{v_3 Z_1^2}{d_3 + Y_1} \\
 & & \\
\dot{X}_2 & = & a_o X_2 - b_o X_2^2 - \dfrac{v_o X_2 Y_2}{d_o + X_2} - k(X_2 - X_1) \\
\dot{Y}_2 & = & -a_1 Y_2 + \dfrac{v_1 X_2 Y_2}{d_1 + X_2} - \dfrac{v_2 Y_2 Z_2}{d_2 + Y_2} \\
\dot{Z}_2 & = & c_3 Z_2 - \dfrac{v_3 Z_2^2}{d_3 + Y_2}
\end{array}\right. \tag{2}$$

Exemple - Désynchronisation

Les paramètres sont fixés de telle sorte que les systèmes individuels ont des comportements périodiques

$\rightarrow$ MAIS : Pas de synchronisation



Phénomène de synchronisation (au sens généralisé) pour de petites valeurs de k. Cependant, le phénomène de désynchronisation arrive en augmentant k. Pour certains intervalles de k, plus la force de couplage est importante et moins le système est synchronisé.

Exemple - Désynchronisation

Propriété chaotique émergente

- Le système couplé présente une dynamique chaotique tandis que chaque sous-système a une dynamique périodique (cycle limite) pour les mêmes valeurs de paramètres et les mêmes conditions initiales
- Ce phénomène est robuste pour de petites variations de paramètres.
- Propriété chaotique émergente imprévisible après étude séparée de chacun des constituants du système couplé

Exemple - Désynchronisation

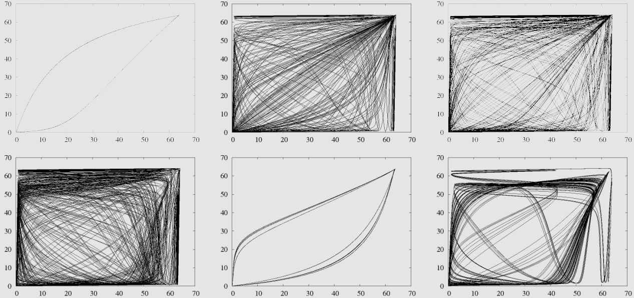
Couplage bidirectionnel

- beaucoup de systèmes biologiques sont consitués d'élément qui intéragissent bi-directionnellement (mutuellement)
- tous les sous systèmes s'influencent les uns les autres

$$\left\{\begin{array}{lcl}
\dot{X}_1 & = & a_o X_1 - b_o X_1^2 - \dfrac{v_o X_1 Y_1}{d_o + X_1} - k(X_1 - X_2) \\
\dot{Y}_1 & = & -a_1 Y_1 + \dfrac{v_1 X_1 Y_1}{d_1 + X_1} - \dfrac{v_2 Y_1 Z_1}{d_2 + Y_1} \\
\dot{Z}_1 & = & c_3 Z_1 - \dfrac{v_3 Z_1^2}{d_3 + Y_1} \\
 & & \\
\dot{X}_2 & = & a_o X_2 - b_o X_2^2 - \dfrac{v_o X_2 Y_2}{d_o + X_2} - k(X_2 - X_1) \\
\dot{Y}_2 & = & -a_1 Y_2 + \dfrac{v_1 X_2 Y_2}{d_1 + X_2} - \dfrac{v_2 Y_2 Z_2}{d_2 + Y_2} \\
\dot{Z}_2 & = & c_3 Z_2 - \dfrac{v_3 Z_2^2}{d_3 + Y_2}
\end{array}\right. \tag{3}$$

Exemple - Désynchronisation

Les paramètres sont fixés de telle sorte que les systèmes individuels ont des comportements périodiques



Pour un couplage bidirectionnel, les figures montrent x_1 par rapport à x_2. Le système synchronise (au sens généralisé) pour $k \leq 0.001$. Le processus de désynchronisation arrive plus rapidement sous l'effet de l'augmentation de k.

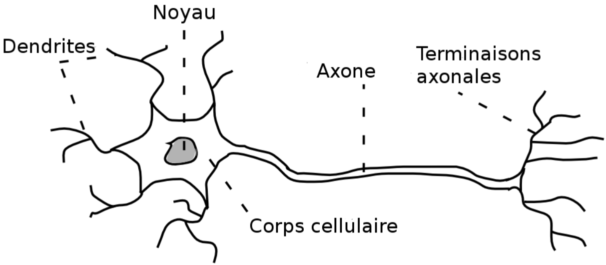
Systèmes Complexes

JSC-CST'2012

Tunis, 24 avril 2012

Neurone

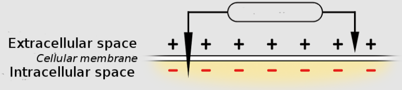
Cellule fondamentale du système nerveux qui conduit et transmet l'influx nerveux.



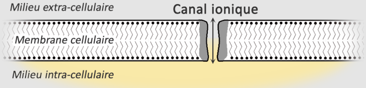
Membrane lipidique

$\Rightarrow$ différente composition ionique extérieure et intérieure

$\Rightarrow$ potentiel de membrane



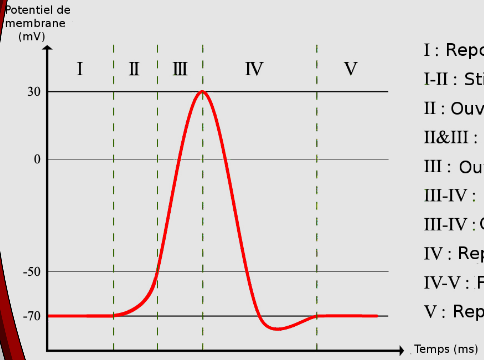
Canaux ioniques



- sodium (Na_+) : ouverts/fermés $\longrightarrow$ *périodes d'inactivité*
- potassium (K_+) : ouverts/fermés $\longrightarrow$ *retard*
- fuite (L) : ouverts

Potentiel d'action - Spike

Variation brusque du potentiel de membrane dûe aux déplacements d'ions de part et d'autre de la membrane suite à une stimulation.



I : Repos
I-II : Stimulation
II : Ouverture canaux sodiques
II&III : Dépolarisation
III : Ouverture canaux sodiques +
III-IV : Fermeture canaux sodiques
III-IV : Ouverture canaux potassiques
IV : Repolarisation & Hyperpolarisation
IV-V : Fermeture canaux potassiques
V : Repos

1952 A.L. Hodgkin et A.F. Huxley, proposent un premier modèle d'influx nerveux à partir de leurs expériences sur l'axone géant de calmar.

$$\begin{cases} -C\dot{V} = I_K + I_{Na} + I_L - I \\ \dot{m} = \alpha_m(1-m) - \beta_m m \\ \dot{n} = \alpha_n(1-n) - \beta_n n \\ \dot{h} = \alpha_h(1-h) - \beta_h h \end{cases}$$

- V : potentiel de membrane
- C : capacité
- $I_{K,Na,L}$: courant potassique, sodique, de fuite
- I : courant injecté

oscillations en salves  *dynamique lente-rapide*

1984 J.L. Hindmarsh et R.M. Rose proposent un modèle à 3 équations simplifiant HH

$$\begin{cases} \dot{x} = y + ax^2 - x^3 - z + I \\ \dot{y} = 1 - dx^2 - y \\ \dot{z} = r(s(x - x_c) - z) \end{cases}$$

- x : potentiel de membrane
- y : flux rapides
- z : flux lents

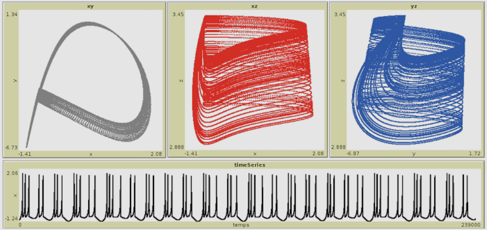
- I : courant appliqué
- $r << 1$: différence d'échelle de temps
- a, s, x_c, d : paramètres déterminés expérimentalement

Systèmes Complexes

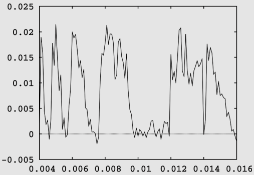
JSC-CST'2012

Tunis, 24 avril 2012

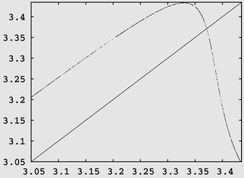
Portraits de phase



Plus grand exposant de Lyapunov

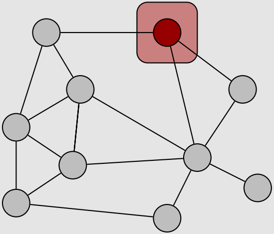


Maxima de Lorenz



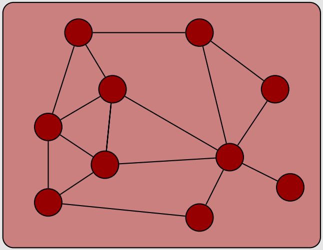
Système complexe

Entités $\Leftrightarrow$ Neurone HR



Système complexe

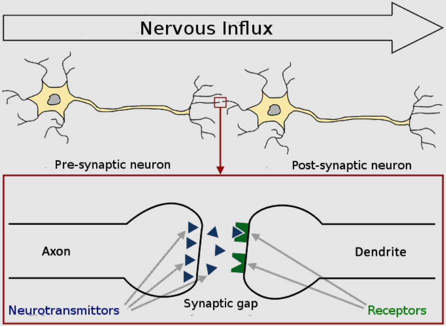
Interactions ⇔ Synapses
Réseau ⇔ Neurones couplés



Synapses

La transmission d'un signal entre les neurones se fait par l'intermédiaire de synapses.

- synapses électriques (jonctions communicantes)
- synapses chimiques (à neurotransmetteurs)



Systèmes Complexes

JSC-CST'2012

TUNIS, 24 AVRIL 2012

Couplage

$$\begin{cases} \dot{x}_i &= ax_i^2 - x_i^3 + y_i - z_i - \sum_{j=1}^{n} c_{ij} h(x_i, x_j) \\ \dot{y}_i &= (a+\alpha)x_i^2 - y_i \\ \dot{z}_i &= r(sx_i + c - z_i) \end{cases}$$

$C = c_{ij}$: matrice d'adjacence

couplage linéaire

- synapse électrique $\longrightarrow$ fonction linéaire

$$h(x_i, x_j) = \epsilon(x_i - x_j)$$

couplage non-linéaire

- synapse chimique $\longrightarrow$ fonction non-linéaire

$$h(x_i, x_j) = (x_i - V_{syn}) g_{syn} \frac{1}{1 + exp(-\lambda(x_j - \Theta_{syn}))}$$

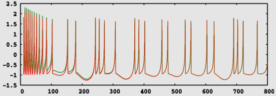
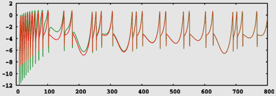
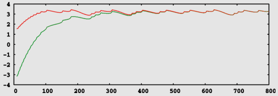
Synchronisation complète

Même comportement au même moment.

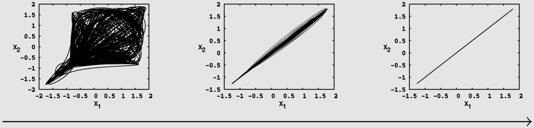
$$\lim_{t \to \infty} \| X_i - X_j \| = 0$$

Déterminer la force de couplage nécessaire pour obtenir la synchronisation complète de n neurones en réseau

Series temporelles $(t, (x_1, x_2)), (t, (y_1, y_2)), (t, (z_1, z_2))$

(x_1, x_2)



force de couplage

Couplage non-linéaire :
même degré entrant pour que la synchronisation complète ait lieu.

Systèmes Complexes

JSC-CST'2012

Tunis, 24 avril 2012

Graphe complet

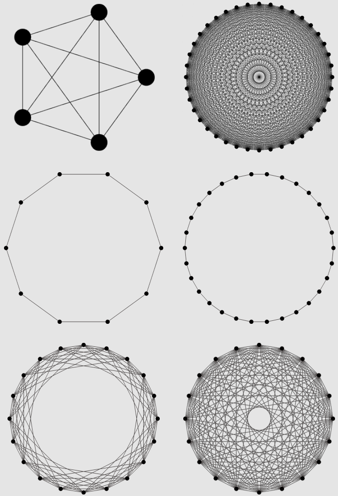
Tous les nœuds du graphe sont reliés deux à deux par une arête

Graphe en anneau

Chaque nœud du graphe est relié à ses deux plus proches voisins

Graphe régulier

Chaque nœud du graphe est relié à ses k plus proches voisins de gauche et de droite



Pas de synchronisation

Émergence de propriétés

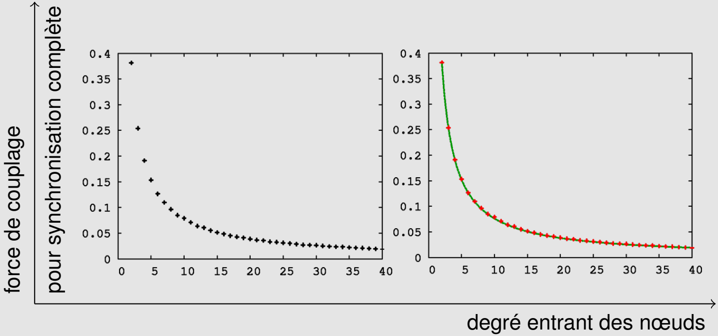


Tableau récapitulatif des lois obtenues

Couplage	Unidirectionnel		Bidirectionnel	
	linéaire	non-linéaire	linéaire	non-linéaire
Complet			$\epsilon_n = \frac{2\epsilon^\star}{n}$	$g_{syn}^{(d)} = \frac{g_{syn}^\star}{d}$
Anneaux	$\epsilon_n = \epsilon^\star n$		$\epsilon_n = \frac{\epsilon^\star}{20} n^2$	$g_{syn}^{(d)} = \frac{g_{syn}^\star}{d}$
Réguliers	$\epsilon_d = \frac{n\epsilon^\star}{d^2}$	$g_{syn}^{(d)} = \frac{g_{syn}^\star}{d}$	$\epsilon_d = \frac{26.5}{d^3} + \frac{17.6}{d^2}$	$g_{syn}^{(d)} = \frac{g_{syn}^\star}{d}$

Tableau récapitulatif des lois obtenues

Couplage	Unidirectionnel		Bidirectionnel	
	linéaire	non-linéaire	linéaire	non-linéaire
Complet			$\epsilon_n = \frac{2\epsilon^\star}{n}$	$g_{syn}^{(d)} = \frac{g_{syn}^\star}{d}$
Anneaux	$\epsilon_n = \epsilon^\star n$		$\epsilon_n = \frac{\epsilon^\star}{20} n^2$	$g_{syn}^{(d)} = \frac{g_{syn}^\star}{d}$
Réguliers	$\epsilon_d = \frac{n\epsilon^\star}{d^2}$	$g_{syn}^{(d)} = \frac{g_{syn}^\star}{d}$	$\epsilon_d = \frac{26.5}{d^3} + \frac{17.6}{d^2}$	$g_{syn}^{(d)} = \frac{g_{syn}^\star}{d}$

n : nombre de neurones dans le réseau
d : degré entrant des nœuds dans le réseau
ϵ_n : force de couplage pour synchronisation complète de n neurones avec couplage linéaire
$\epsilon^\star$: force de couplage pour synchronisation complète de 2 neurones avec couplage linéaire bidirectionnel

Systèmes Complexes

JSC-CST'2012

Tunis, 24 avril 2012

Tableau récapitulatif des lois obtenues

Couplage	Unidirectionnel		Bidirectionnel	
	linéaire	non-linéaire	linéaire	non-linéaire
Complet			$\epsilon_n = \frac{2\epsilon^\star}{n}$	$g_{syn}^{(d)} = \frac{g_{syn}^\star}{d}$
Anneaux	$\epsilon_n = \epsilon^\star n$	$g_{syn}^{(d)} = \frac{g_{syn}^\star}{d}$	$\epsilon_n = \frac{\epsilon^\star}{20} n^2$	$g_{syn}^{(d)} = \frac{g_{syn}^\star}{d}$
Réguliers	$\epsilon_d = \frac{n\epsilon^\star}{d^2}$	$g_{syn}^{(d)} = \frac{g_{syn}^\star}{d}$	$\epsilon_d = \frac{26.5}{d^3} + \frac{17.6}{d^2}$	$g_{syn}^{(d)} = \frac{g_{syn}^\star}{d}$

n : nombre de neurones dans le réseau
d : degré entrant des nœuds dans le réseau
g_{syn}^n : force de couplage pour synchronisation complète de n neurones avec couplage non-linéaire
$g_{syn}^\star$: force de couplage pour synchronisation complète de 2 neurones avec couplage non-linéaire bidirectionnel

Ainsi, *l'étude du phénomène de synchronisation complète au sein de réseau a permis de mettre en évidence l'émergence de lois soulignant une certaine* **auto-organsiation***.*

Cependant, *les conditions d'apparition du phénomène de synchronisation complète sont biologiquement trop peu réalistes.*

Systèmes Complexes

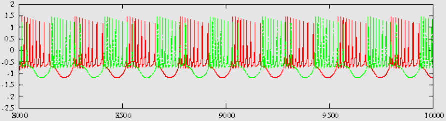
JSC-CST'2012
Tunis, 24 avril 2012

oscillation en salve - burst

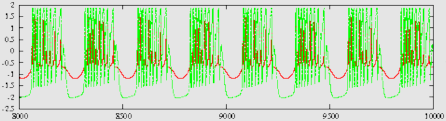
Synchronisation de bursts

Même nombre de bursts débutant deux-à-deux au même moment

force de couplage



bursts dissociés



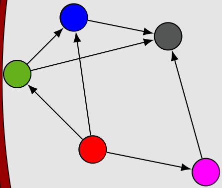
synchronisation de bursts

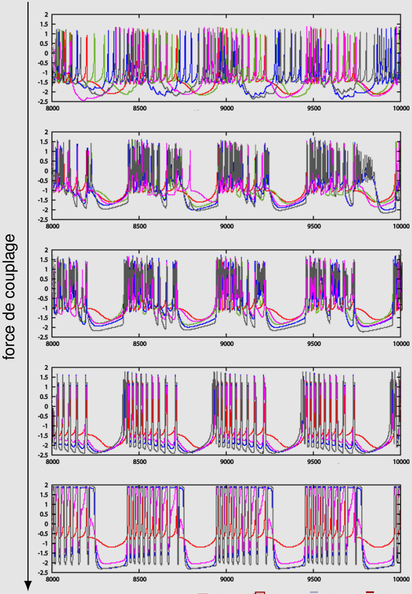
Systèmes Complexes

JSC-CST'2012

Tunis, 24 avril 2012

Nœuds de degrés entrants différents

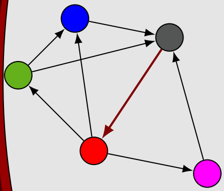


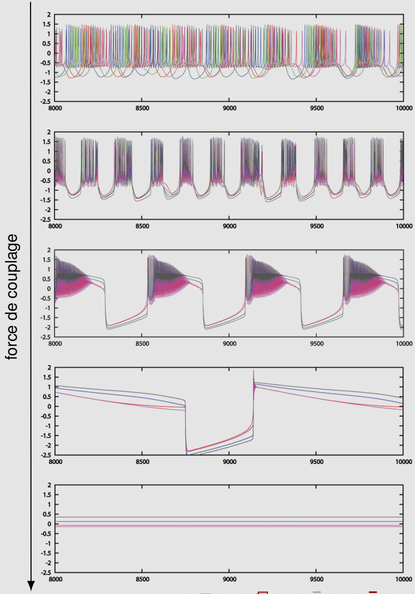


Exemple en Neuroscience

Comportement de Réseaux

Présence de cycles ⇒ instabilité bursts



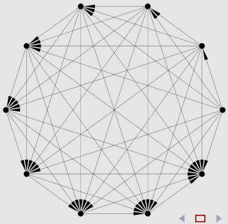


Conditions sur les réseaux étudiés

1. Il existe un nœud du graphe à partir duquel on peut rejoindre tous les autres nœuds
2. Aucun cycle

Chaîne

Complet unidirectionnel



Synchronisation de bursts

Algorithme de détection de la synchronisation de bursts

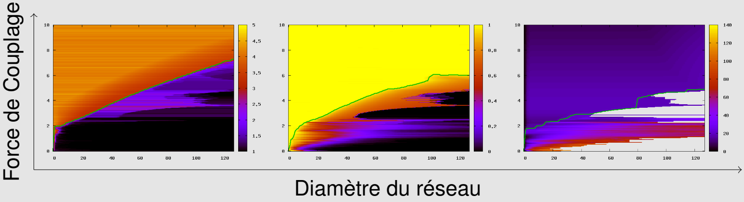
4 Détection de la synchronisation de bursts
↓
3 Détection des bursts associés
↓
2 Détection des débuts de bursts
↓
1 Détection des spikes

Systèmes Complexes

JSC-CST'2012

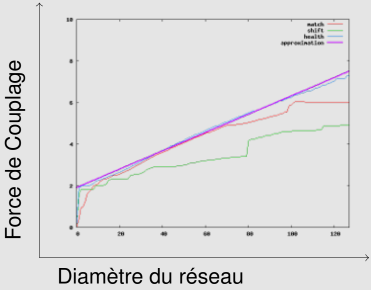
Tunis, 24 avril 2012

Diamètre d'un réseau : Plus grande distance entre 2 noeuds du réseau



- Ratio : (plus grande des "petites distances") / (plus petite des "grandes distances")
- Ratio : (nombre de bursts) / (nombre de groupe de bursts associés)
- Moyenne des distances entre les spikes les plus éloignés d'un groupe de bursts associés

Synchronisation de bursts



Résultat des observations numériques :
La force de couplage pour obtenir la synchronisation de bursts semble être linéairement dépendante du diamètre du réseau

Dernière observation : Importance de la densité

Exemple en Epidémiologie

La maladie et le vecteur

- Épidémie île de La Réunion 2005-2006 ; épisode en Italie en 2007
- Maladie vectorielle ré-émergente (pas de traitement spécifique)
- Arbovirus : **Ar**thropode **bo**rne **virus**
- Vecteur : *Aedes Albopictus* (moustique tigre)

Facteurs de (ré-)émergence

- Capacité d'adaptation aux zones non tropicales
- Adaptation du virus au vecteur (mutation génétique)
- *etc.*

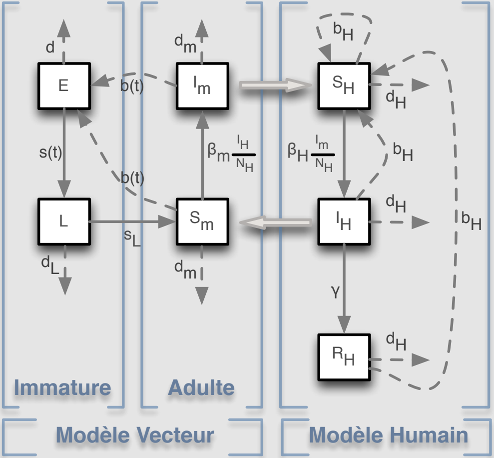
Vecteur

- Oeufs : E, Larves L ;
- Femelles adultes $A \Longrightarrow$ Modèle de type SI Susceptibles : S_m, Infectés : I_m $A = S_m + I_m$

Humain

- Humains $N_H \Longrightarrow$ Modèle de type SIR Susceptibles : S_H, Infectés : I_H, Retirés : R_H $N_H = S_H + I_H + R_H$

Diagramme de transmission de la maladie

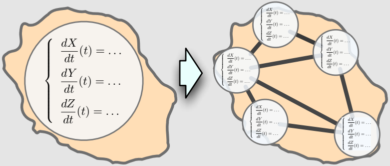


$$\frac{dI_m}{dt}(t) = \beta_m \frac{I_H(t)}{N_H(t)} S_m(t) - d_m I_m(t)$$

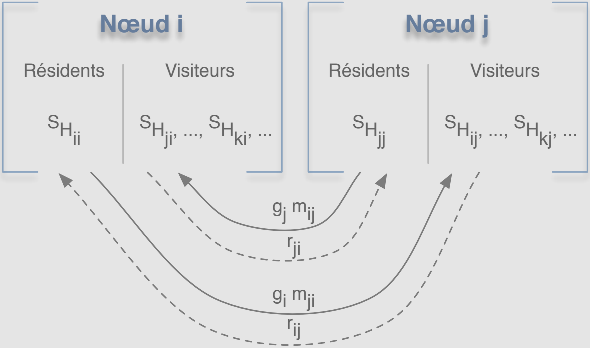
Définition (R. Levins, 1969)

Une métapopulation est un groupe de populations d'individus d'une même espèce, séparées spatialement (ou temporellement) et qui réagissent réciproquement à un niveau quelconque.

- Habitats/noeuds/*patch* (une ville, un village, un quartier, un immeuble, *etc.*)
- Mobilité des populations



- Mobilité humaine :
  - déplacements journaliers (quelques km)
  - identification origine/destination (N_{ij})
- Mobilité des moustiques :
  - rayon d'action limité (quelques centaines de mètres)
  - définition d'un voisinage local (rayon d'interaction)



$$\frac{dS_{Hii}}{dt} = d_H(N_{H_i}^r - S_{Hii}) - g_i S_{Hii} + \sum_{k=1}^{n} r_{ik} S_{Hik} - \beta_{Hi} \frac{Im_i}{N_{H_i}^p} S_{Hii}$$

$$\frac{dS_{Hij}}{dt} = -d_H S_{Hij} + g_i m_{ji} S_{Hii} - r_{ij} S_{Hij} - \beta_{Hj} \frac{Im_j}{N_{H_j}^p} S_{Hij}$$

- d_{ij} : distance entre les nœuds *i* et *j*
- d_{max} : rayon d'action maximal des moustiques
- ψ : activité des moustiques en fonction de d_{ij}

$$\psi(d_{ij}) = \begin{cases} \dfrac{d_{max} - d_{ij}}{d_{max}} & \text{si } d_{ij} < d_{max} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\frac{dS_{Hii}}{dt} = d_H(N_{H_i}^r - S_{Hii}) - g_i S_{Hii} + \sum_{k=1}^{n} r_{ik} S_{Hik} - \sum_{k=1}^{n} \beta_{Hi} \psi(d_{ik}) \frac{Im}{N_H}$$

$$\frac{dS_{mi}}{dt} = s_L L_i - d_m S_{mi} - \sum_{k=1}^{n} \beta_{mi} \psi(d_{ik}) \frac{S_{mi}}{N_{H_k}^p} I_{H_k}^p$$

Humain

$$\frac{dS_{Hii}}{dt} = d_H(N_{H_i}^r - S_{Hii}) - g_i S_{Hii} + \sum_{k=1}^{n} r_{ik} S_{Hik} - \sum_{k=1}^{n} \beta_{H_i}\psi(d_{ik}) \frac{Im_k}{N_{H_i}^p} \ldots$$

$$\frac{dS_{Hij}}{dt} = g_i m_{ji} S_{Hii} - d_H S_{Hij} - r_{ij} S_{Hij} - \sum_{k=1}^{n} \beta_{H_j}\psi(d_{ik}) \frac{Im_k}{N_{H_j}^p} S_{Hij}$$

$$\frac{dI_{Hii}}{dt} = -d_H I_{Hii} - g_i I_{Hii} + \sum_{k=1}^{n} r_{ik} I_{Hik} + \sum_{k=1}^{n} \beta_{H_i}\psi(d_{ik}) \frac{Im_k}{N_{H_i}^p} S_{Hii} - \ldots$$

$$\frac{dI_{Hij}}{dt} = g_i m_{ji} I_{Hii} - d_H I_{Hij} - r_{ij} I_{Hij} + \sum_{k=1}^{n} \beta_{H_j}\psi(d_{ik}) \frac{Im_k}{N_{H_j}^p} S_{Hij} - \gamma_H I_{\ldots}$$

$$\frac{dR_{Hii}}{dt} = \gamma_H I_{Hii} - d_H R_{Hii} - g_i R_{Hii} + \sum_{k=1}^{n} r_{ik} R_{Hik}$$

$$\frac{dR_{Hij}}{dt} = g_i m_{ji} R_{Hii} + \gamma_H I_{Hij} - d_H R_{Hij} - r_{ij} R_{Hij}$$

Vecteur

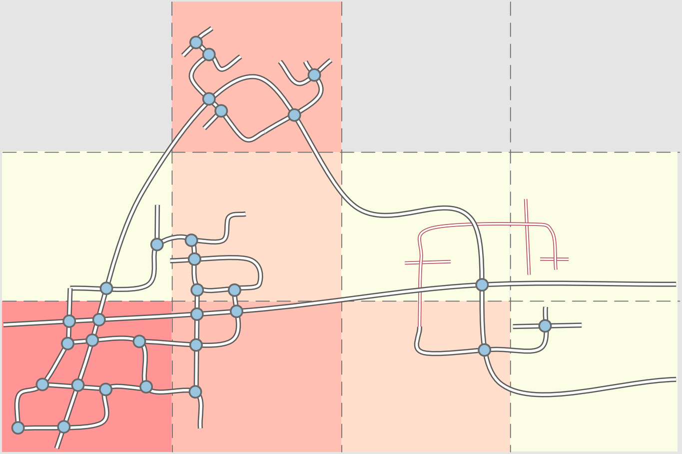
$$\frac{dS_{mi}}{dt} = s_L L_i - d_m S_{mi} - \sum_{k=1}^{n} \beta_{mi} \psi(d_{ik}) \frac{S_{mi}}{N_{H_k}^p} I_{H_k}^p$$

$$\frac{dI_{mi}}{dt} = \sum_{k=1}^{n} \beta_{mi} \psi(d_{ik}) \frac{S_{mi}}{N_{H_k}^p} I_{H_k}^p - d_m I_{mi}$$

$$\frac{dE_i}{dt} = b(S_{mi}(t) + I_{mi}(t)) \left(1 - \frac{E_i(t)}{K_{E\,i}}\right) - (s + d) E_i(t)$$

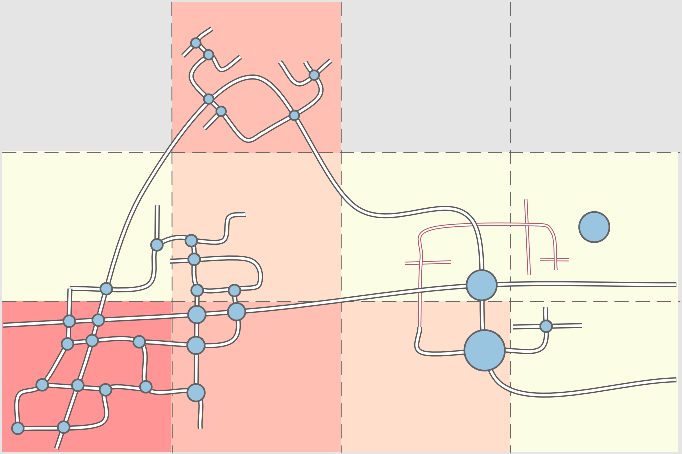
$$\frac{dL_i}{dt} = sE_i(t) \left(1 - \frac{L_i(t)}{K_{L\,i}}\right) - (s_L + d_L) L_i(t)$$

Répartition de la population humaine



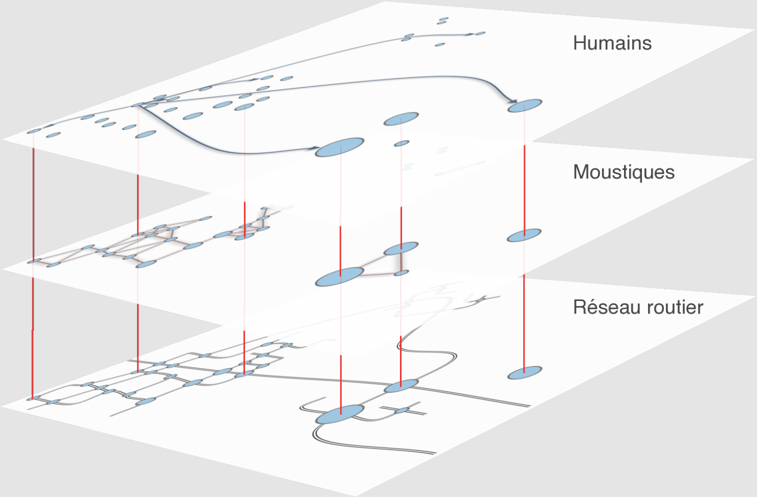
Utilisation de 2 sources de données : INSEE & réseau routier

Répartition de la population humaine



Ajustement : répartition uniforme à l'échelle du km^2

Réseau : $\simeq$ 18000 noeuds ; $\simeq$ 150000 arêtes (mobilité des moustiques) ; $\simeq$ 750000 arcs (mobilité humaine)



Impact de la mobilité humaine

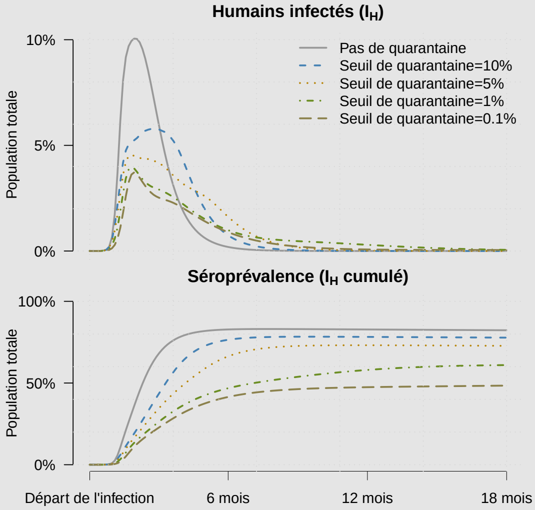
[poster,text=

Systèmes Complexes

JSC-CST'2012

Tunis, 24 avril 2012

Un scénario de quarantaine



Plan

Conclusion

- Notion sur les systèmes complexes et les réseaux d'interaction
- Emergence ... Synchronisation
- Exemple en Neuroscience
- Exemple d'écosystèmes
- Exemple en épidémiologie

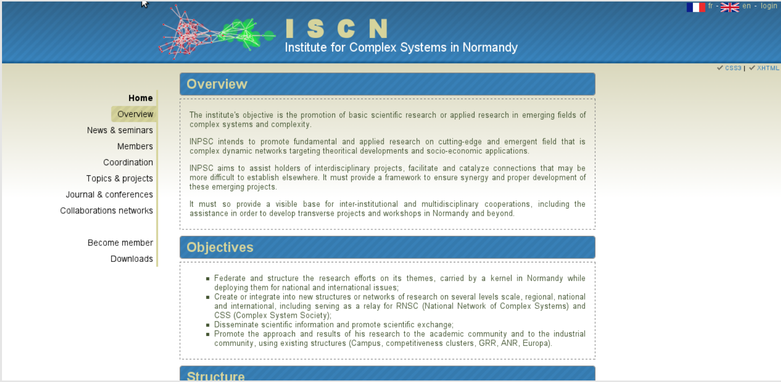
Synchronisation au sein de réseaux constitués de neurones Hindmarsh-Rose

- Cas neurones non identiques
- Cas de couplages non identiques
- Dynamique
- Grands réseaux
- Preuves théoriques des résultats numériques
- Synchronisation de clusters

Conférences

- SOMC 2012 Bruxelles :
  http ://litis.univ-lehavre.fr/ bertelle/somc2012/
- ICCSA 2009, June 29-July 02, 2009, Le Havre, France
- international conf., EPNACS 1 à 3, CoSSoM'06, ESM, MAPPS 1 et 2, EPNADS'05, MCS'05, ...

... Un Institut Normand des Systèmes Complexes ... **http ://www.isc-n.fr**


fr - en - login

I S C N

Institute for Complex Systems in Normandy

✓ CSS3 | ✓ XHTML

Home
- Overview
- News & seminars
- Members
- Coordination
- Topics & projects
- Journal & conferences
- Collaborations networks
- Become member
- Downloads

Overview

The institute's objective is the promotion of basic scientific research or applied research in emerging fields of complex systems and complexity.

INPSC intends to promote fundamental and applied research on cutting-edge and emergent field that is complex dynamic networks targeting theoritical developments and socio-economic applications.

INPSC aims to assist holders of interdisciplinary projects, facilitate and catalyze connections that may be more difficult to establish elsewhere. It must provide a framework to ensure synergy and proper development of these emerging projects.

It must so provide a visible base for inter-institutional and multidisciplinary cooperations, including the assistance in order to develop transverse projects and workshops in Normandy and beyond.

Objectives

- Federate and structure the research efforts on its themes, carried by a kernel in Normandy while deploying them for national and international issues;
- Create or integrate into new structures or networks of research on several levels scale, regional, national and international, including serving as a relay for RNSC (National Network of Complex Systems) and CSS (Complex System Society);
- Disseminate scientific information and promote scientific exchange;
- Promote the approach and results of his research to the academic community and to the industrial community, using existing structures (Campus, competitiveness clusters, GRR, ANR, Europa).

Structure

http ://isc-n.fr/

MERCI !

Conclusion

Thank You !