

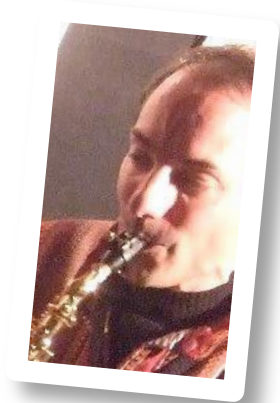
CNA, Grenoble, 30 Nov.-2 Dec, 2016

Observabilité des
systèmes de
grande dimension

Christophe Letellier



Irene Sendina-Nadal

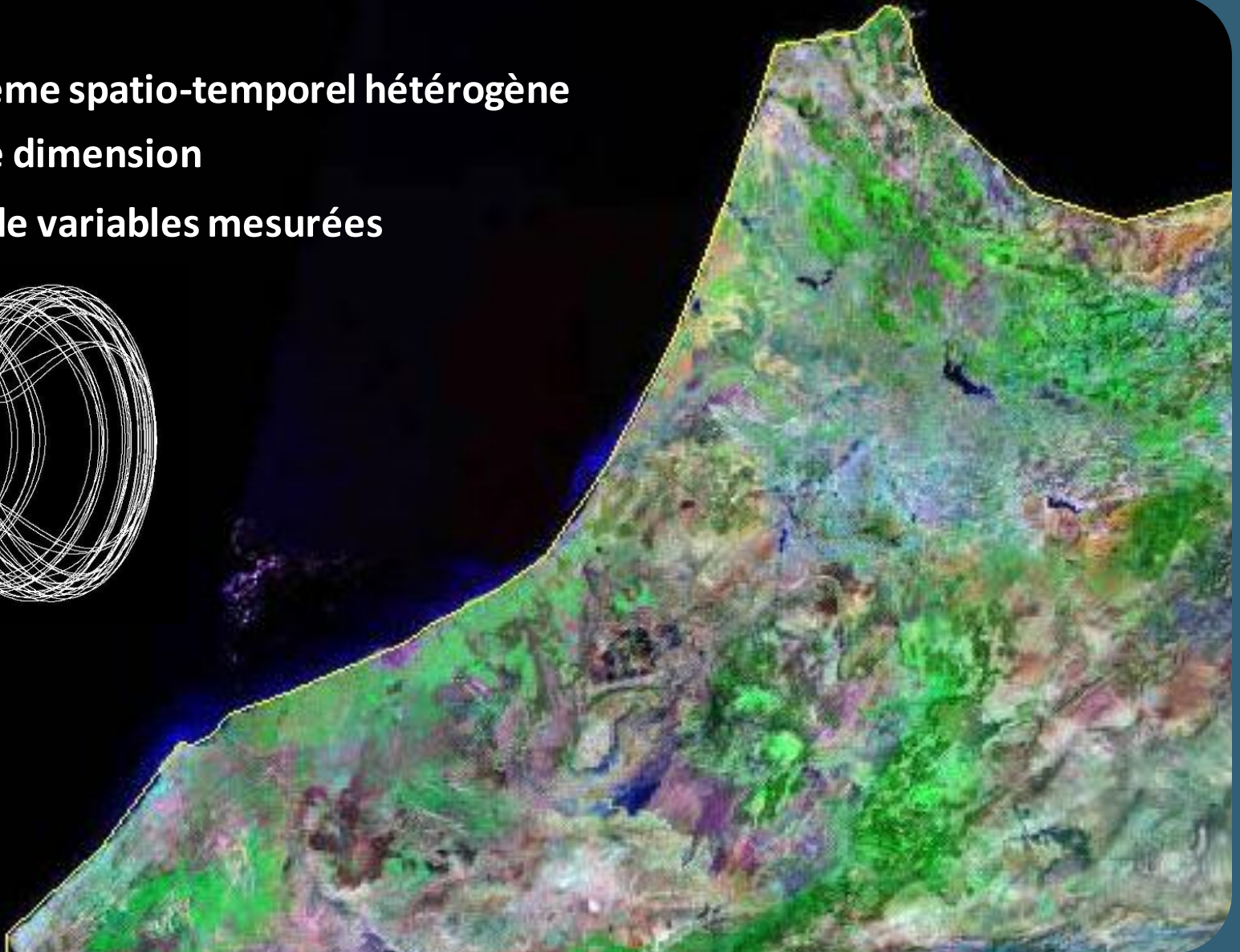
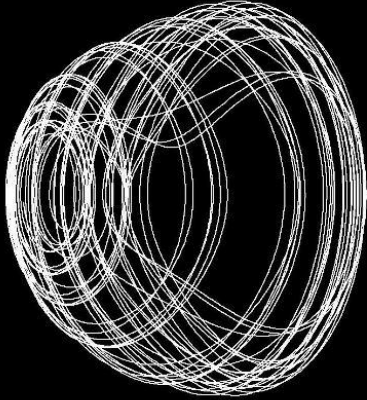


Sylvain Mangiarotti



Modélisation en géoscience

- **Système spatio-temporel hétérogène**
- **Large dimension**
- **Peu de variables mesurées**



Hétérogénéité des situations en géosciences

Cultures irriguées



Champs près de Wadi Rum – Jordanie

© ALTITUDE/Arthus-Bertrand Yann

➤ **synchronisées**

Cultures non irriguées



Champs – USA

© US GeoScience

➤ **Non synchronisées**

Observabilité et modélisation des réseaux

Observability of complex systems

Yang-Yu Liu^{a,b,c,d,e}, Jean-Jacques Slotine^{f,g,h}, and Albert-László Barabási^{a,b,c,d,e,i,1}

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
21 DECEMBER 2012

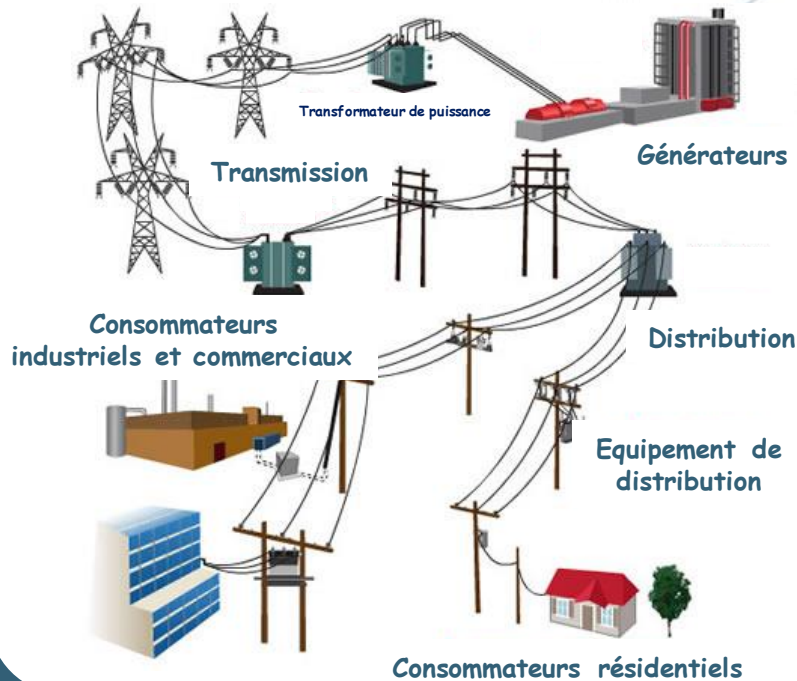
Network Observability Transitions

Yang Yang,¹ Jianhui Wang,² and Adilson E. Motter^{1,3}

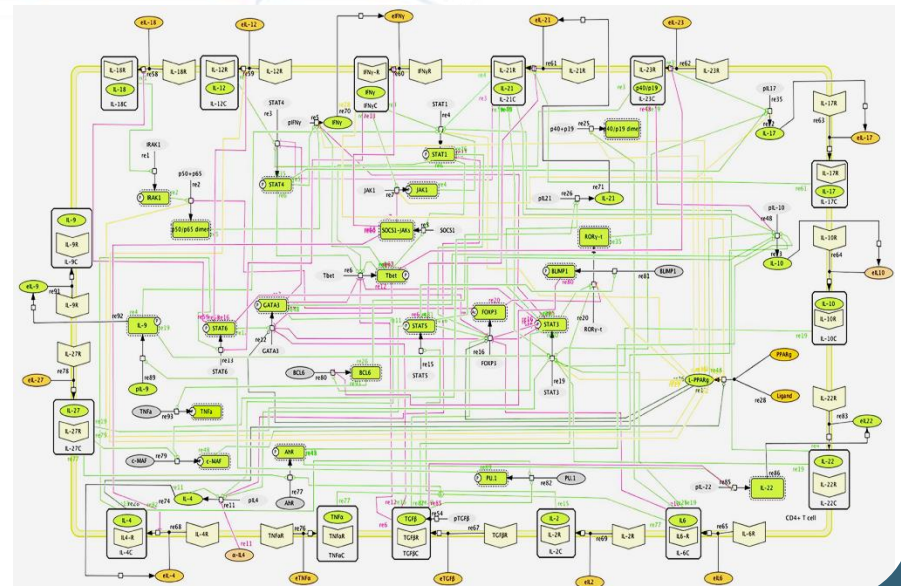
Réseaux sociaux



Réseaux de puissance



Réseau de différenciation cellulaire



Modélisation globale: une première motivation...



James Crutchfield

Complex Systems 1 (1987) 417–452

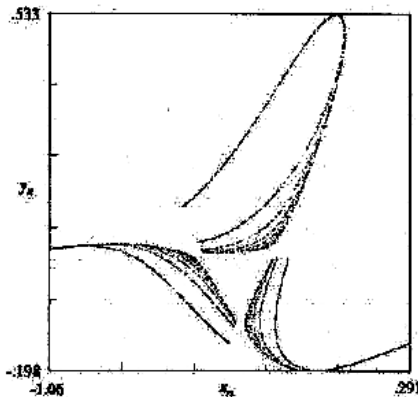
Equations of Motion from a Data Series*

James P. Crutchfield
Bruce S. McNamara†

*Physics Department, University of California,
Berkeley, CA 94720, USA*

Comment pouvons-nous obtenir les équations du mouvement directement à partir de données expérimentales ?

A partir de données sur l'ensemble de l'attracteur: modélisation **globale**

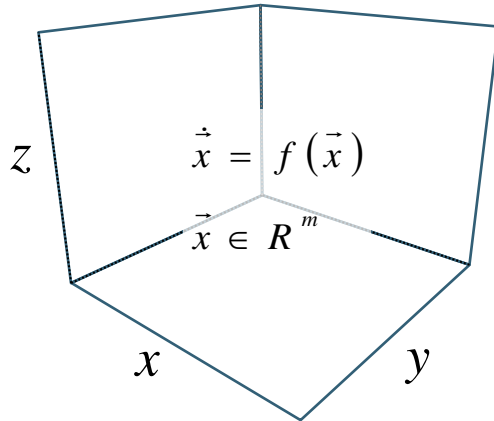


Un exemple : une section de Poincaré d'un clone de l'équation de van der Pol forcée

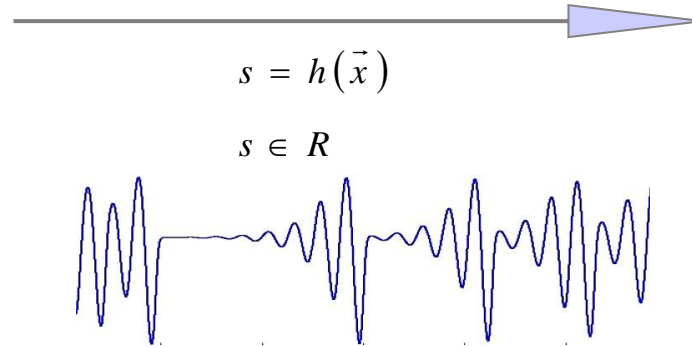
$$\begin{aligned}x_{n+1} &= y_n \\y_{n+1} &= 9.348 - 16.1432x_n - 26.3935y_n + 10.3878x_n^2 \\ &+ 34.6795x_ny_n + 24.3786y_n^2 - 3.13519x_n^3 \\ &- 7.14675x_n^2y_n - 21.6583x_ny_n^2 - 5.91889y_n^3.\end{aligned}$$

Plongement différentiel et modélisation globale

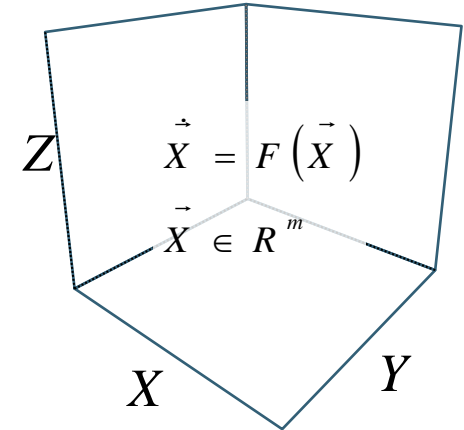
Espace des états original



Fonction de mesure



Espace reconstruit



Plongement différentiel

$$\begin{cases} X_1 = s \\ X_2 = \dot{s} \\ \vdots \\ X_m = s^{(m-1)} \end{cases}$$

Modèle canonique

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = X_2 \\ \dot{X}_2 = X_3 \\ \vdots \\ \dot{X}_m = F(X_1, X_2, \dots, X_m) \end{cases}$$

PHYSICAL REVIEW E

VOLUME 49, NUMBER 6

JUNE 1994

Global vector-field reconstruction by using a multivariate polynomial L_2 approximation on nets

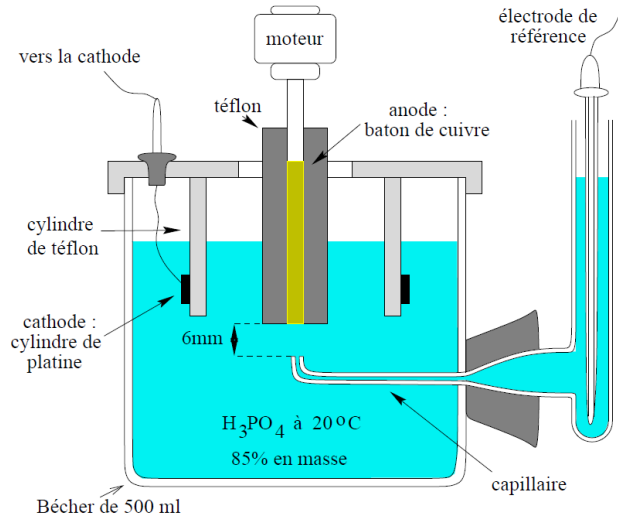
G. Gouesbet and C. Letellier



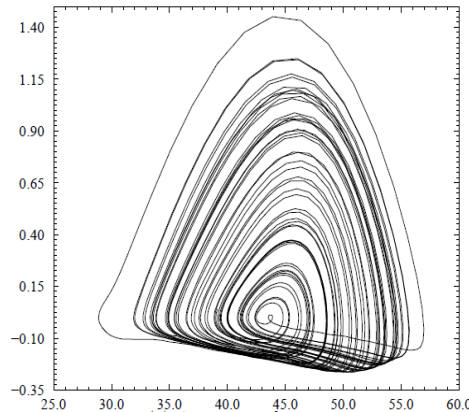
Modélisation globale à partir de données expérimentales

Electrolyse de cuivre dans de l'acide phosphorique

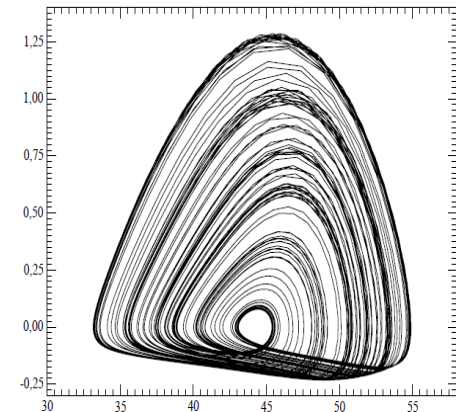
Expérience



Attracteur expérimental



Attracteur du modèle



⇒ Intégrer le modèle global fournit un portrait des états **topologiquement équivalent** au portrait reconstruit à partir des mesures

7016

J. Phys. Chem. **1995**, *99*, 7016–7027

Topological Characterization and Global Vector Field Reconstruction of an Experimental Electrochemical System

C. Letellier, L. Le Sceller, P. Dutertre, and G. Gouesbet

Laboratoire d'Energétique des Systèmes et Procédés, URA CNRS 230, INSA de Rouen, BP 08, 76 130 Mont-Saint-Aignan, France

Z. Fei and J. L. Hudson*

Department of Chemical Engineering, University of Virginia, Charlottesville, Virginia 22903

John Hudson



Logiciel pour une modélisation globale (accès libre)

PHYSICAL REVIEW E 86, 046205 (2012)

Polynomial search and global modeling: Two algorithms for modeling chaos

S. Mangiarotti,* R. Coudret, L. Drapeau, and L. Jarlan



Sylvain Mangiarotti

The screenshot shows the ATOMOSYD website interface. On the left is a navigation menu with the following items: ACCUEIL, A research group, Algorithms, Collaborators, Experimental data, News, Scientific Mediations, Some dynamical systems, and Qui Fait Quoi. The main content area features an article titled "GLOBAL MODELING PROCEDURE FOR R" dated 29/07/2012. The article text reads: "PoMoS & GloMo are two complementary routines developed by Sylvain Mangiarotti, R. Coudret, L. Drapeau & L. Jarlan at CESBIO to obtain a set of differential equations from "measured" time series. The abilities of these algorithms are discussed in [1]". Below the text are two bullet points: "• **PoMoS** (Polynomial Model Search) was written to obtain an approximating function combining the successive first n time derivatives to predict the $(n+1)$ th. It is based on an evolutionary algorithm combined to a least square technique." and "• **GloMo** (Global Modelling) allows to obtain a low-dimensional global model using a scalar time series [2]."

Modélisation globale : estimation de la fonction canonique

A partir de la variable y du système de Rössler

$y \triangleright x \triangleright z$

Fonction canonique **estimée par sélection** de sa structure:

$$\tilde{F}(X_1, X_2, \dots, X_{d_E}) = \sum_{p=1}^{N_k} K_p \psi^P \quad \text{où} \quad \psi^P = X_1^{l_1} X_2^{l_2} \dots X_{d_E}^{l_{d_E}}$$

La fonction canonique **cible** est de la **même forme** :

$$\begin{aligned} \tilde{F}_y(X, Y, Z) = & K_0 + K_1 X + K_2 Y + K_3 Z + K_4 X^2 + K_5 XY \\ & + K_6 XZ + K_7 Y^2 + K_8 YZ + K_9 Z^2 \end{aligned}$$

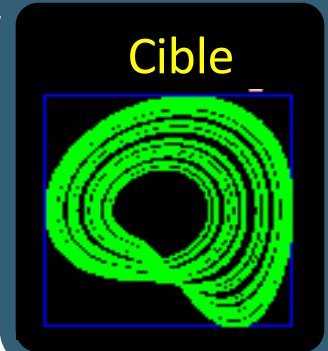
La qualité du modèle dépend peu des valeurs des paramètres de modélisation

Modélisation globale : estimation de la fonction canonique

Variable x du système de Rössler

$y \triangleright x \triangleright z$

La qualité du modèle dépend fortement de la structure sélectionnée



2^{ème} degré

3^{ème} degré

4^{ème} degré

9

10

11

9

10

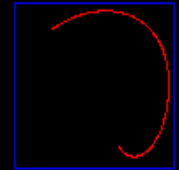
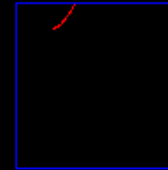
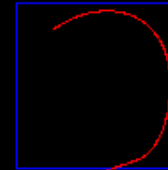
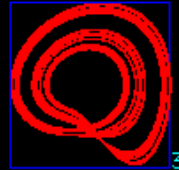
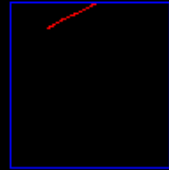
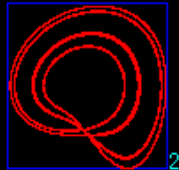
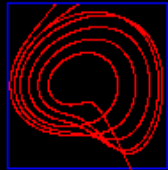
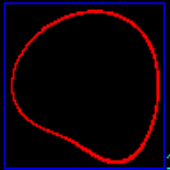
11

9

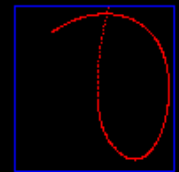
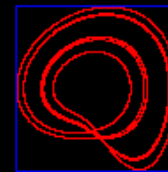
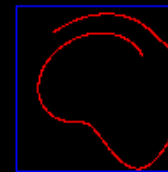
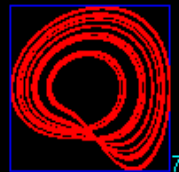
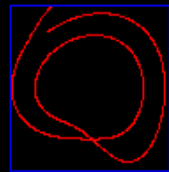
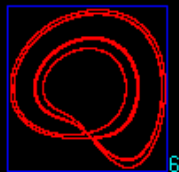
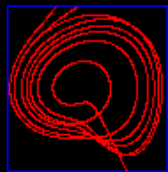
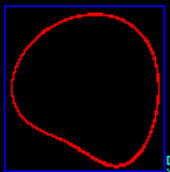
10

11

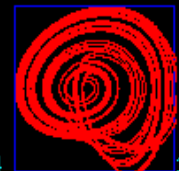
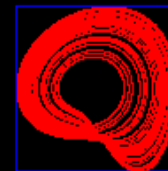
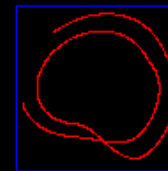
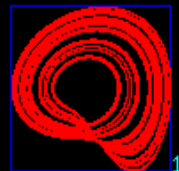
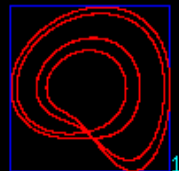
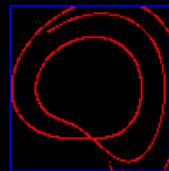
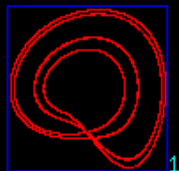
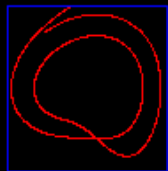
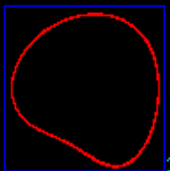
80



100



120



N_c

Modélisation globale : estimation de la fonction canonique

J. Phys. A: Math. Gen. 31 (1998) 7913–7927. Printed in the UK

PII: S0305-4470(98)93312-1

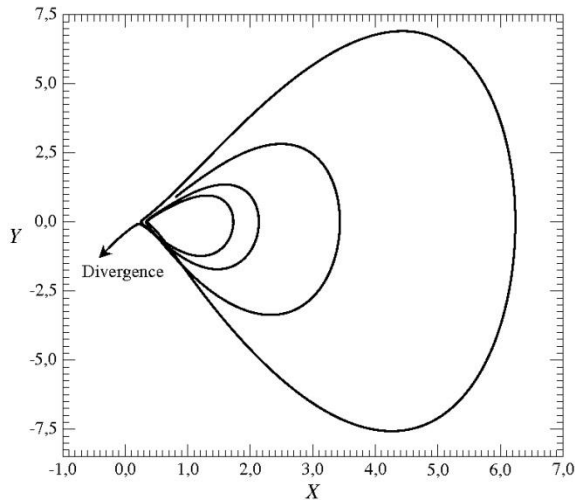
On the non-equivalence of observables in phase-space reconstructions from recorded time series

C Letellier†§, J Maquet†, L Le Sceller†, G Gouesbet† and L A Aguirre†

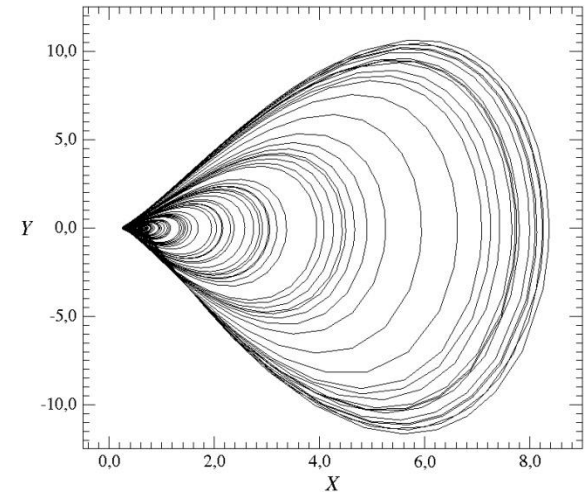
Variable z du système de Rössler

$y \triangleright x \triangleright z$

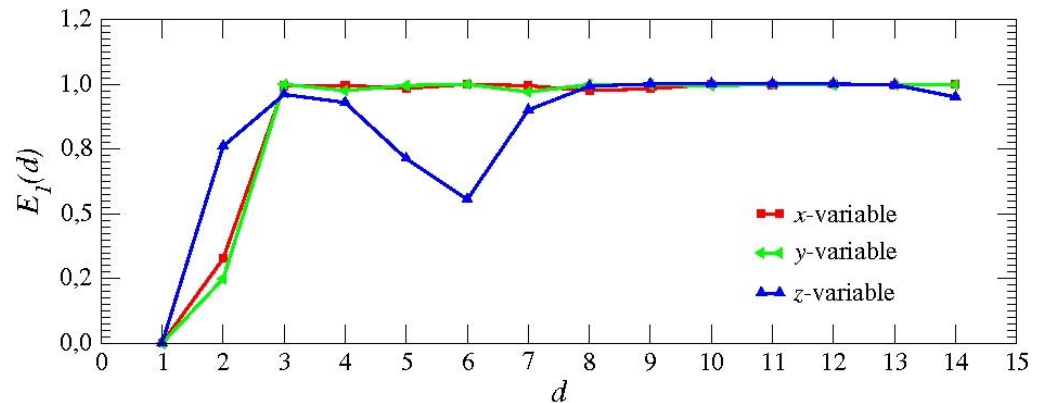
Pas de modèle stable avec un plongement différentiel 3D !



Un modèle stable a été facilement obtenu dans un **espace 4D**



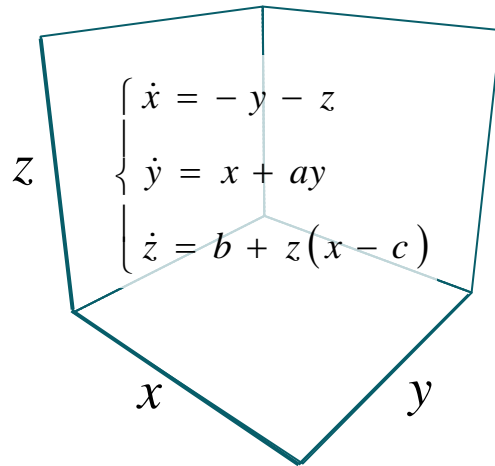
Estimation de la dimension de plongement



Conditions pour une observabilité complète

Espace des états original

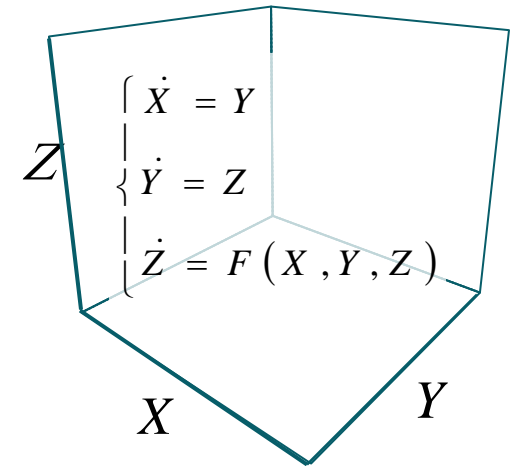
(Système de Rössler)


$$\begin{cases} \dot{x} = -y - z \\ \dot{y} = x + ay \\ \dot{z} = b + z(x - c) \end{cases}$$

Changement de coordonnées

$$\Phi_y = \begin{cases} X = y \\ Y = \dot{y} = x + ay \\ Z = \ddot{y} = ax + (a^2 - 1)y - z \end{cases}$$

Plongement différentiel


$$\begin{cases} \dot{X} = Y \\ \dot{Y} = Z \\ \dot{Z} = F(X, Y, Z) \end{cases}$$

Difféomorphisme si $\text{Det } J_\Phi \neq 0$

$$\text{Det } J_{\Phi_y} = \text{Det} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & a & 0 \\ a & a^2 - 1 & -1 \end{bmatrix} = 1$$

Vérifié lorsque le système de Rössler est observé à partir de la variable $y(t)$

⇒ Le système est **complètement observable**

Observabilité à partir de différentes variables

PHYSICAL REVIEW E 71, 066213 (2005)

J. Phys. A: Math. Gen. 31 (1998) 7913–7927. Printed in the UK

PII: S0305-4470(98)93312-1

Relation between observability and differential embedding

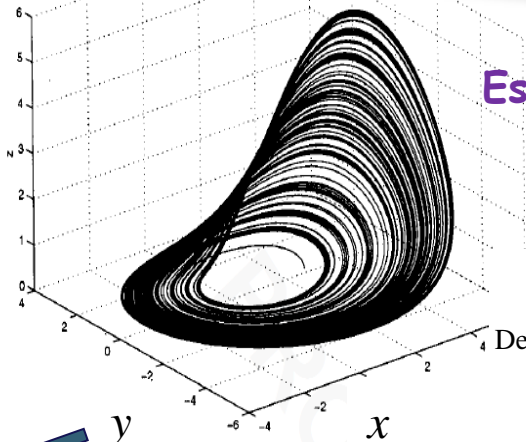
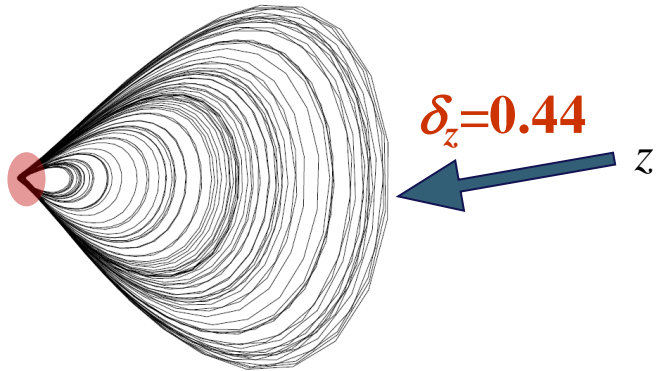
Christophe Letellier,¹ Luis A. Aguirre,² and Jérôme

On the non-equivalence of observables in phase-space reconstructions from recorded time series

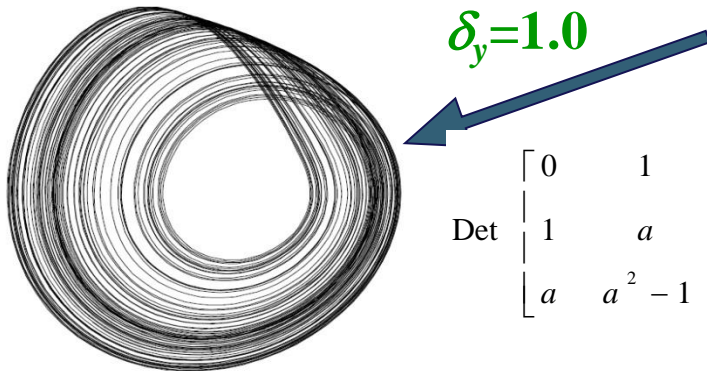
C Letellier^{†§}, J Maquet[†], L Le Sceller[†], G Gouesbet[†] and L A Aguirre[‡]
PHYSICAL REVIEW E 79, 066210 (2009)

Symbolic observability coefficients for univariate and multivariate analysis
Christophe Letellier¹ and Luis A. Aguirre²

$$\text{Det} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ z & 0 & x - c \\ b + 2z(x - c) & -z & -y - 2z + (x - c)^2 \end{bmatrix} = -z^2$$

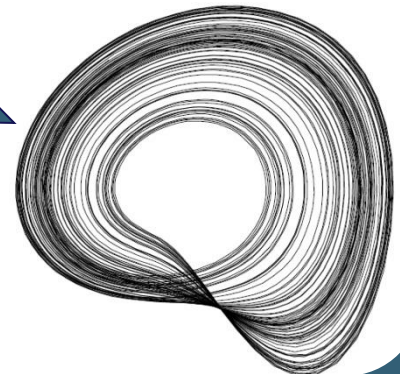


$$\text{Det} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \\ -1 - z & -a & c - x \end{bmatrix} = x - (a + c)$$



$$\text{Det} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & a & 0 \\ a & a^2 - 1 & -1 \end{bmatrix} = 1$$

$\delta_x = 0.88$



Variété singulière d'observabilité

PHYSICAL REVIEW E 86, 026205 (2012)

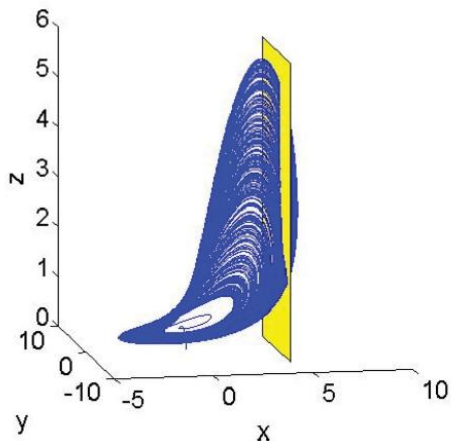
Influence of the singular manifold of nonobservable states in reconstructing chaotic attractors

Madalin Frunzete,¹ Jean-Pierre Barbot,¹ and Christophe Letellier²

➤ Introduction d'un voisinage de la variété singulière d'observabilité

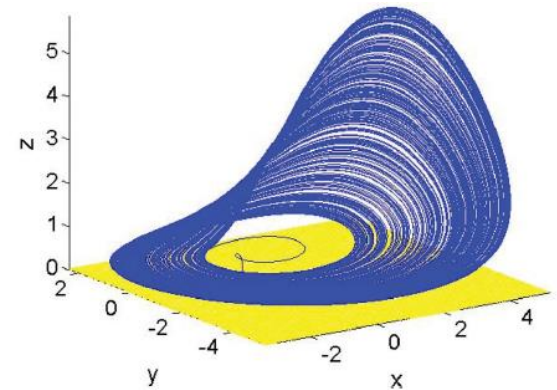
$$\mathcal{U}_{\mathcal{M}_s^{\text{obs}}} = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid |\text{Det } \mathcal{J}_{\Phi_s}| < \epsilon\}$$

➤ Estimation de la probabilité d'avoir $x \in \mathcal{A} \cap \mathcal{M}_s^{\text{obs}}$



$$\mathcal{M}_x^{\text{obs}} = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid x = a + c\}$$

$$\eta_x^{\mathcal{M}} = 0.86$$



$$\mathcal{M}_z^{\text{obs}} = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid z = 0\}$$

$$\eta_z^{\mathcal{M}} = 0.10$$

$$\mathcal{M}_y^{\text{obs}} = \emptyset$$

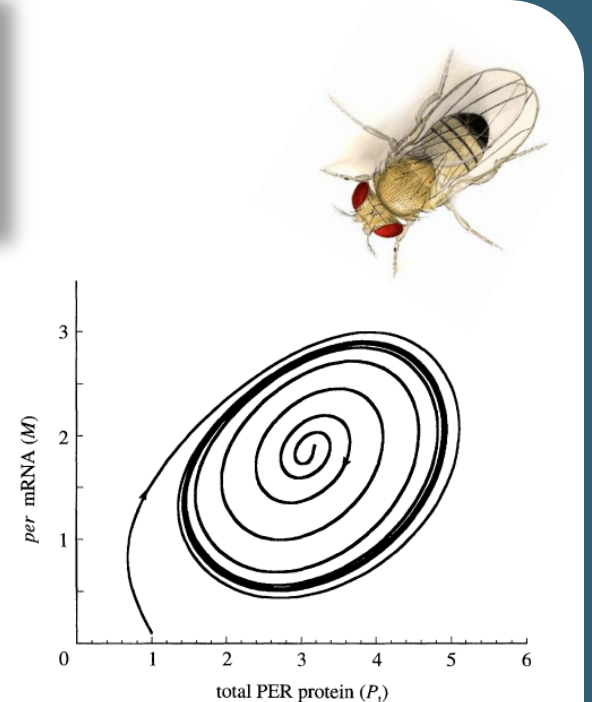
$$\eta_y^{\mathcal{M}} = 1.00$$

Pour n'est-ce pas si simple ?

A model for circadian oscillations in the *Drosophila* period protein (PER)

ALBERT GOLDBETER

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{v_s K_I^4}{K_I^4 + x_5^4} - \frac{v_m x_1}{K_m + x_1} \\ \dot{x}_2 = k_s x_1 - \frac{V_1 x_2}{K_1 + x_2} + \frac{V_2 x_3}{K_2 + x_3} \\ \dot{x}_3 = \frac{V_1 x_2}{K_1 + x_2} + \frac{V_4 x_4}{K_4 + x_4} - x_3 \left(\frac{V_2}{K_2 + x_3} + \frac{V_3}{K_3 + x_3} \right) \\ \dot{x}_4 = \frac{V_3 x_3}{K_3 + x_3} - x_4 \left(\frac{V_4}{K_4 + x_4} + k_1 + \frac{v_d}{K_d + x_4} \right) \\ \dot{x}_5 = k_1 x_4 - k_2 x_5 \end{cases}$$



Calculs analytiques de déterminants

$$\begin{cases} \Delta_{x_1^5} = \frac{256 v_s^4 K_I^{16} k_1^3 V_3^2 K_3^2 V_1 K_1}{(K_I^4 + x_5^4)^8 (K_3 + x_3)^4 (K_1 + x_2)^2} x_5^{12}; \\ \Delta_{x_2^5} \text{ and } \Delta_{x_3^5} \text{ too complicated to be computed by Maple within less than 1 min;} \\ \Delta_{x_4^5} = \frac{4 V_3^4 K_3^4 V_1^3 K_1^3 k_s^2 v_s K_I^4}{(K_3 + x_3)^8 (K_1 + x_2)^6 (K_I^4 + x_5^4)^2} x_5^3 \\ \Delta_{x_5^5} = - \frac{k_1^4 V_3^3 K_3^3 V_1^2 K_1^2 k_s}{(K_3 + x_3)^6 (K_1 + x_2)^4}. \end{cases}$$



Coefficients d'observabilité symbolique

A partir de la matrice jacobienne symbolique du système

$$\begin{cases} \dot{x} = -y - z \\ \dot{y} = x + ay \\ \dot{z} = b + z(x - c) \end{cases}$$

Système de Rössler

$$\tilde{J}_f = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ \bar{1} & 0 & \bar{1} \end{bmatrix}$$

Matrice Jacobienne symbolique

$$\tilde{O}_{x^3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ \bar{1} & 1 & \bar{1} \end{bmatrix}$$

Matrice d'observabilité
symbolique

- Calcul du déterminant de la matrice d'observabilité symbolique

$$\text{Det } \tilde{O}_{x^3} = 1 \otimes (1 \otimes \bar{1} - 1 \otimes 1)$$

- Calcul du nombre de termes de chaque type (linéaire, polynomial, rationnel)

$$N_1 = 4, N_{\bar{1}} = 1, \text{ et } N_{\bar{\bar{1}}} = 0$$

- Coefficient d'observabilité symbolique

$$\eta_{x^3} = \frac{4}{5} + \frac{1}{5^2} = 0.84$$

Coefficients d'observabilité symbolique

Matrice jacobienne symbolique du système

$$\tilde{\mathcal{J}}_f = \begin{bmatrix} \bar{1} & 0 & 0 & 0 & \bar{1} \\ 1 & \bar{1} & \bar{1} & 0 & 0 \\ 0 & \bar{1} & \bar{1} & \bar{1} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{1} & \bar{1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Matrice d'observabilité symbolique lorsque la variable x_2 est mesurée

$$\tilde{\mathcal{O}}_{y^5} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \bar{1} & \bar{1} & 0 & 0 \\ \bar{1} & \bar{1} & \bar{1} & \bar{1} & \bar{1} \\ \bar{1} & \bar{1} & \bar{1} & \bar{1} & \bar{1} \\ \bar{1} & \bar{1} & \bar{1} & \bar{1} & \bar{1} \end{bmatrix}$$

1 élément constant $\bar{1}$ élément polynomial ($d \geq 1$) $\bar{1}$ élément rationnel

Comptage des termes constants, polynomiaux and rationnels apparaissant dans le déterminant $\det \tilde{\mathcal{O}}_{y^5}$

$$\eta_s = \frac{N_1}{N_1 + N_{\bar{1}} + N_{\bar{\bar{1}}}} + \frac{N_{\bar{1}}}{(\max(N_1, 1) + N_{\bar{1}} + N_{\bar{\bar{1}}})^2} + \frac{N_{\bar{\bar{1}}}}{(\max(N_1, 1) + N_{\bar{1}} + N_{\bar{\bar{1}}})^3}$$

$$\eta_{x_2^5} = 0.08 \text{ avec } N_1 = 7, N_{\bar{1}} = 42 \text{ and } N_{\bar{\bar{1}}} = 42;$$

Coefficients d'observabilité symbolique

$$\eta_{x_1^5} = 0.17$$

$$\eta_{x_2^5} = 0.08$$

$$\eta_{x_3^5} = 0.02$$

$$\eta_{x_4^5} = 0.17$$

$$\eta_{x_5^5} = 0.30$$

Classement de l'observabilité fourni par les variables du système

$$x_5 \triangleright x_1 \simeq x_4 \triangleright x_2 \triangleright x_3$$

Observabilité complète obtenue lorsque nous mesurons simultanément x_2 , x_3 et x_5 :

$$\eta_{x_2^2 x_3 x_5^2} = 1$$

➤ Confirmé par le déterminant analytique : $\Delta_{x_2^2 x_3 x_5^2} = k_s k_1$

➤ Mais attention : $\eta_{x_2^2 x_3^2 x_5} = 0.70$

➤ Toutes les combinaisons sont **automatiquement** testées (en quelques secondes) par les coefficients symboliques



Murilo Baptista



Ezequiel Bianco-Martinez

PHYSICAL REVIEW E 91, 062912 (2015)

Symbolic computations of nonlinear observability

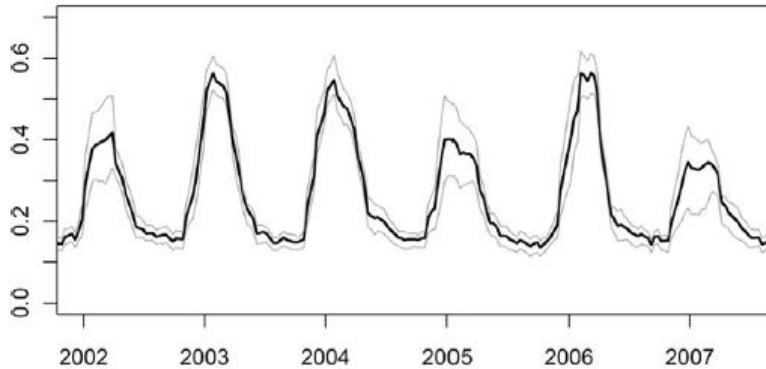
Ezequiel Bianco-Martinez,¹ Murilo S. Baptista,¹ and Christophe Letellier²



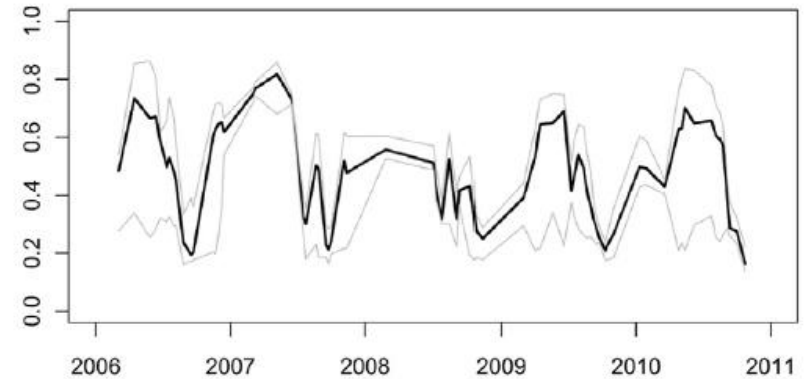
Synchronisation « naturelle »

✓ Canopée de la végétation

Différence normalisée de l'indice de végétation



Province de Safi, Maroc



Haute-Garonne, France

➤ synchronisées

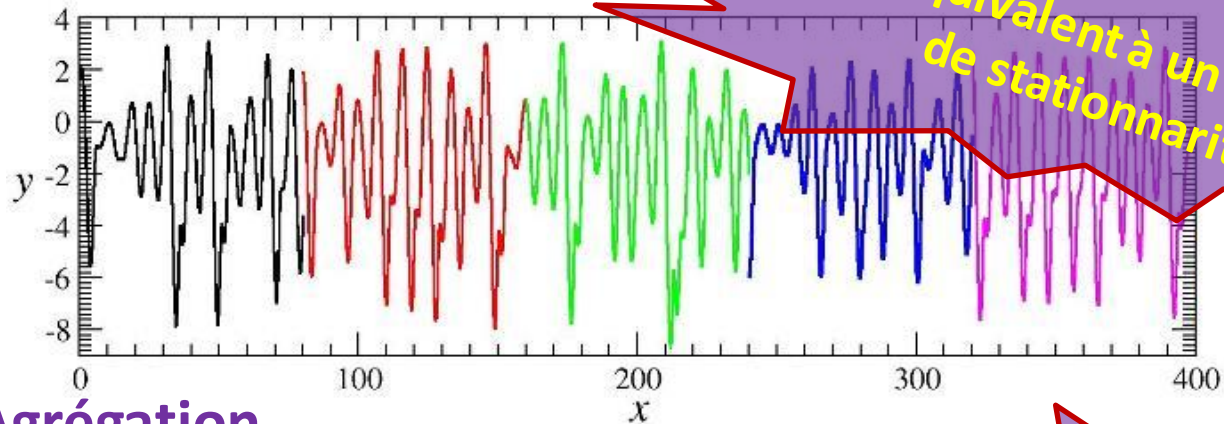
➤ Non synchronisées

- Dynamiques locales synchronisées : l'association ou l'agrégation est un problème plutôt trivial
- Dynamiques locales non synchronisées : l'association comme l'agrégation pose quelques problèmes

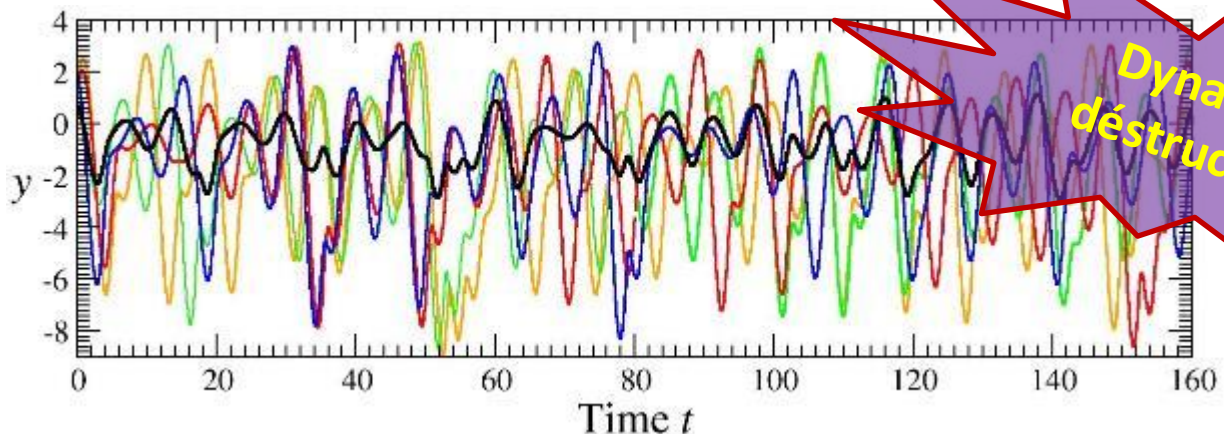
Synchronisation « naturelle »

✓ Association et agrégation de dynamiques **non synchronisées**

➤ Association



➤ Agrégation



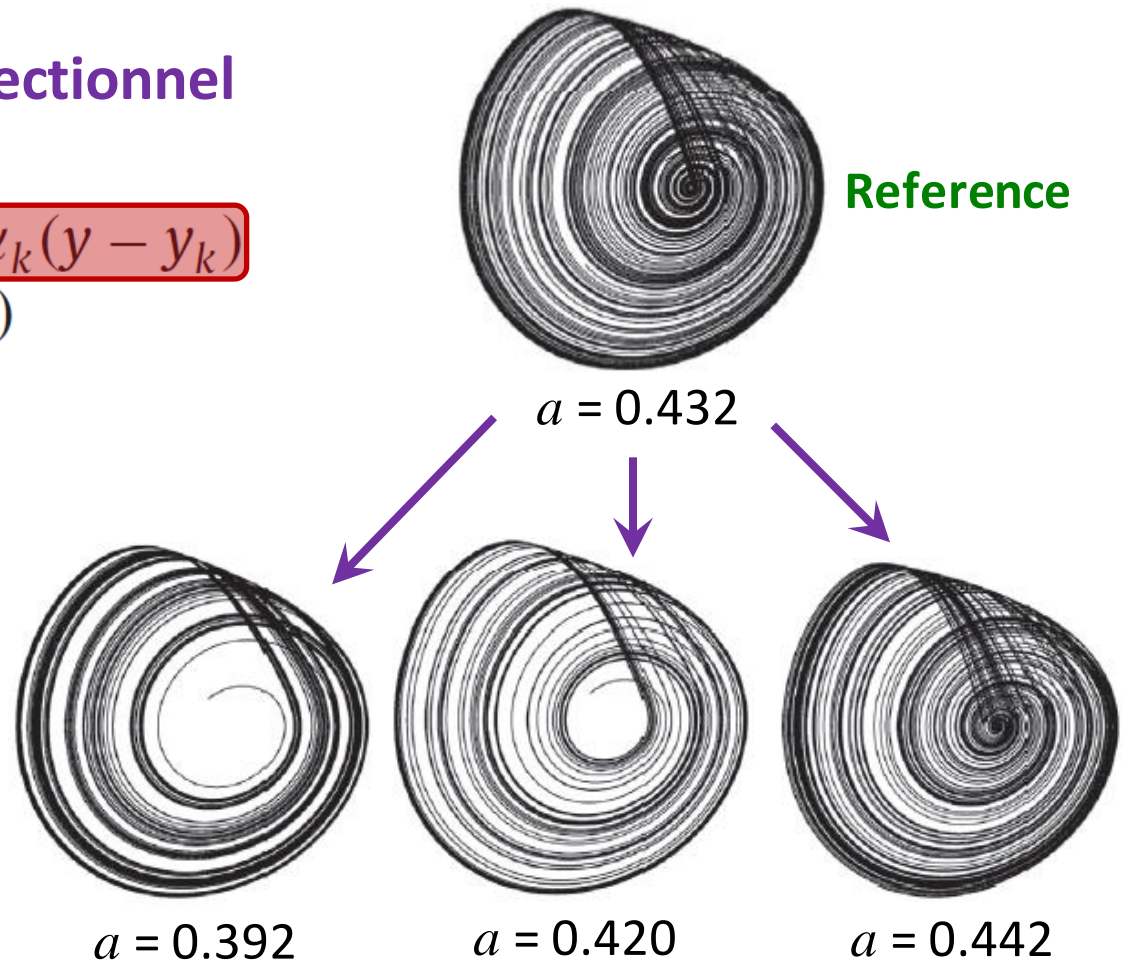
Un réseau *in silico* !

- ✓ Trois systèmes de Rössler (dynamiques locales) couplés à une dynamique (un système de Rössler) pilotant les autres...

➤ Couplage unidirectionnel

$$\begin{cases} \dot{x}_k = -y_k - z_k \\ \dot{y}_k = x_k + a_k y_k + \alpha_k (y - y_k) \\ \dot{z}_k = b + z_k (x_k - c) \end{cases}$$

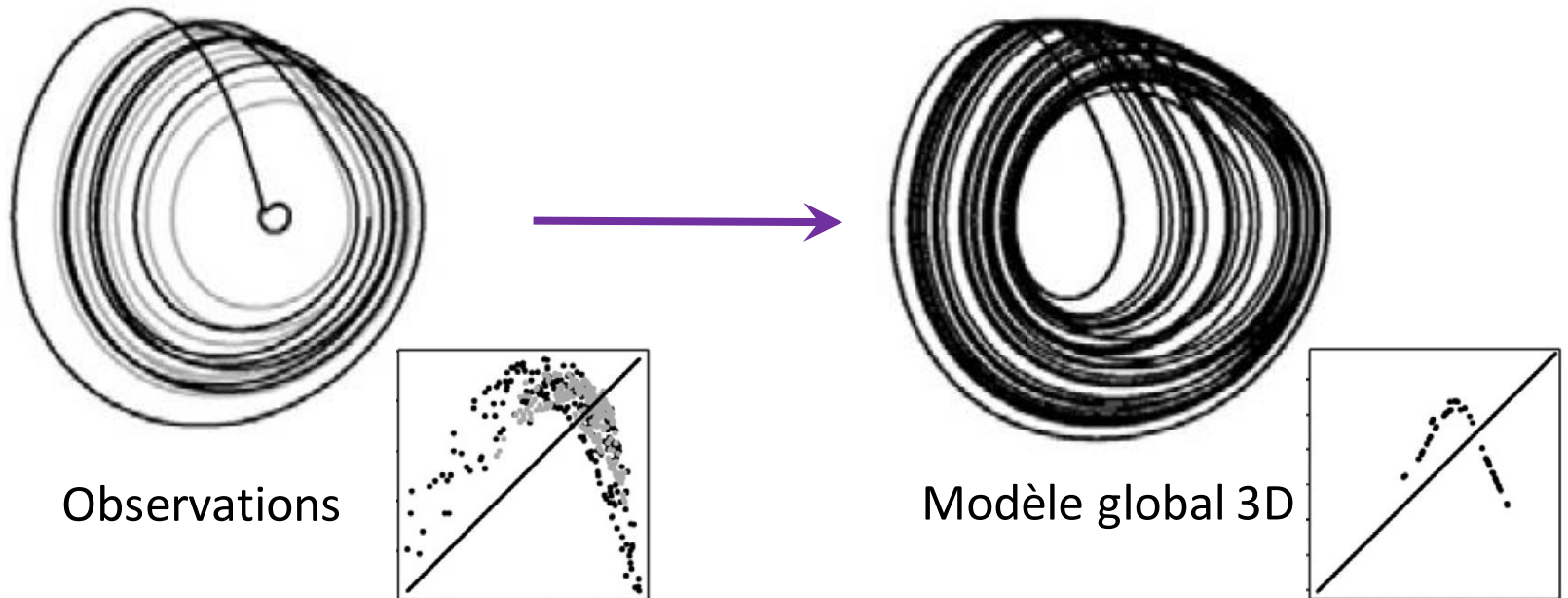
$$b = 2 \text{ et } c = 4$$



Un réseau *in silico* !

✓ Trois systèmes de Rössler (dynamiques locales) couplés à une dynamique (un système de Rössler) pilotant les autres...

➤ **Couplage unidirectionnel + Association sur la variable y**

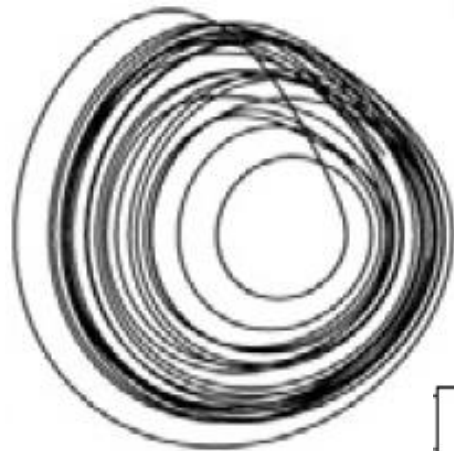


➤ **la dynamique locale 3D est correctement reproduite**

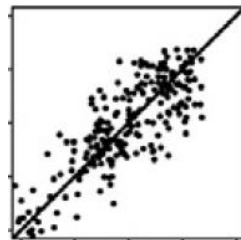
Un réseau *in silico* !

✓ Trois systèmes de Rössler (dynamiques locales) couplés à une dynamique (un système de Rössler) pilotant les autres...

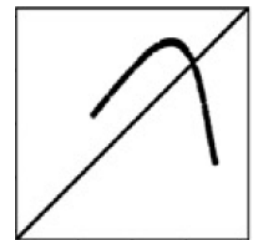
➤ **Couplage unidirectionnel + Agrégation sur la variable y**



Observations



Modèle global 3D

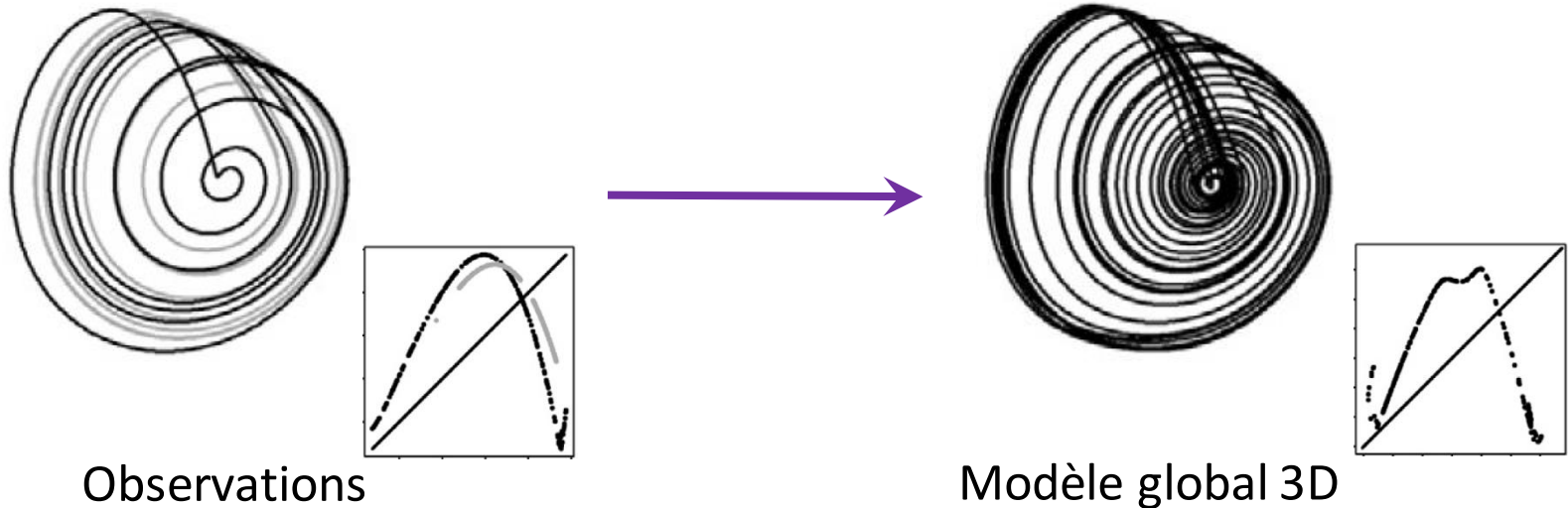


➤ **la dynamique locale 3D est correctement reproduite**

Un réseau *in silico* !

✓ Trois systèmes de Rössler (dynamiques locales) couplés à une dynamique (un système de Rössler) pilotant les autres...

➤ Sans couplage + Association sur la variable y

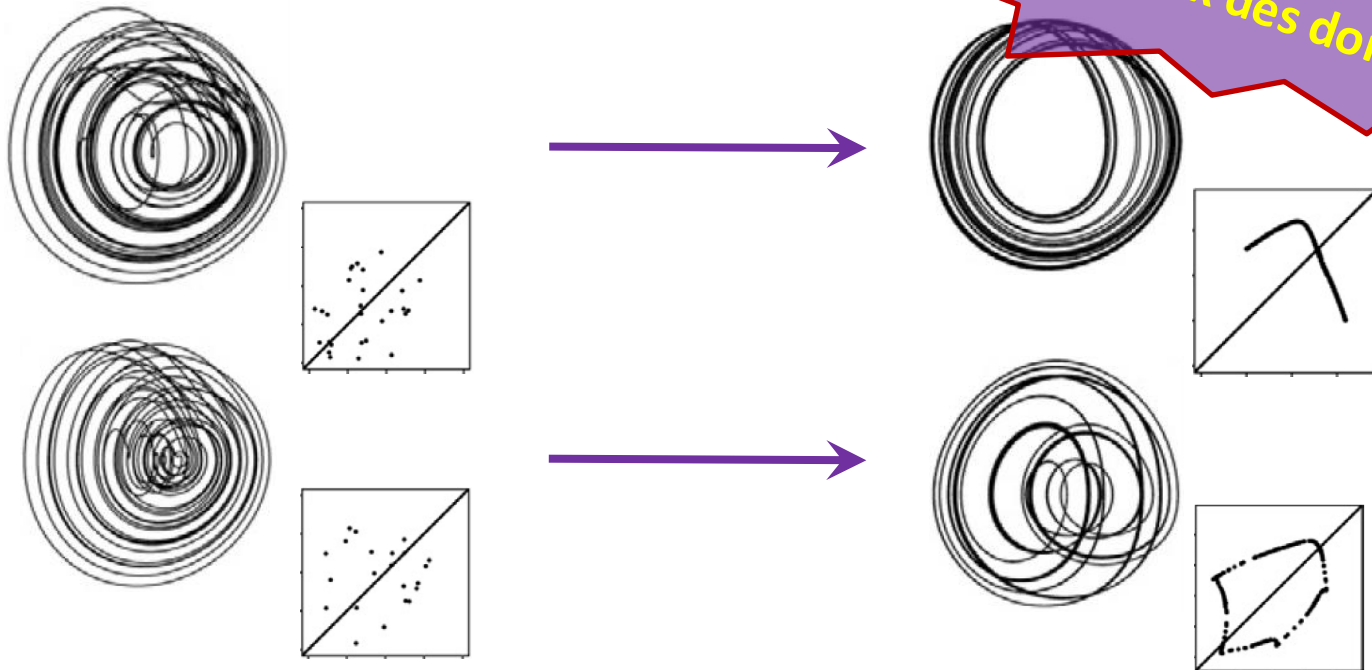


➤ la dynamique locale 3D est correctement reproduite

Un réseau *in silico* !

✓ Trois systèmes de Rössler (dynamiques locales) couplés à une dynamique (un système de Rössler) pilotant les autres...

➤ Sans couplage + Agrégation sur la variable y



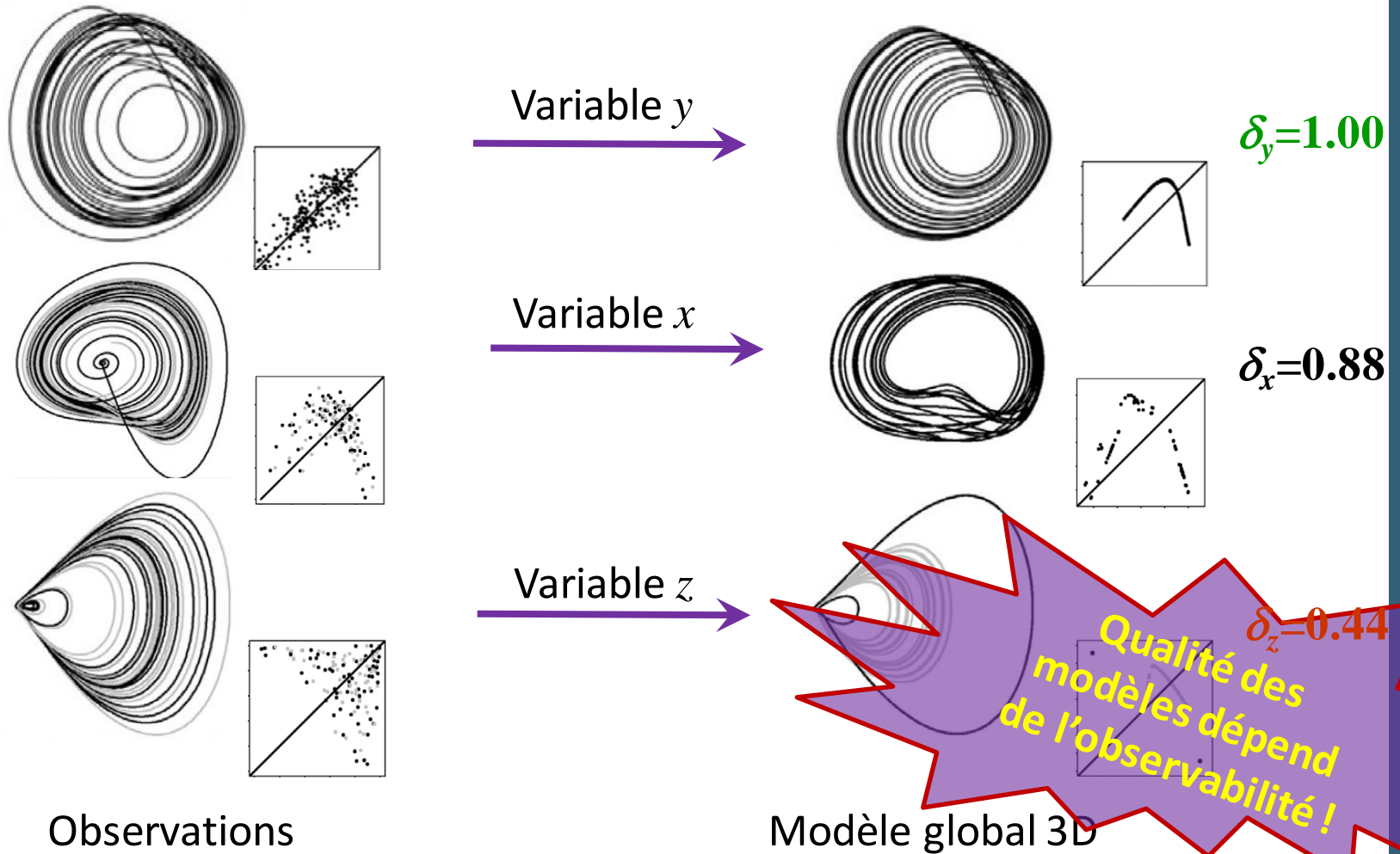
Observations

Modèle global 3D

➤ La dynamique locale 3D n'est pas toujours reproduite

Un réseau *in silico* !

➤ Couplage unidirectionnel + Association



➤ la dynamique locale n'est pas toujours reproduite

Un modèle simple de cancer

Interactions entre les populations de cellules sur un seul site tumoral

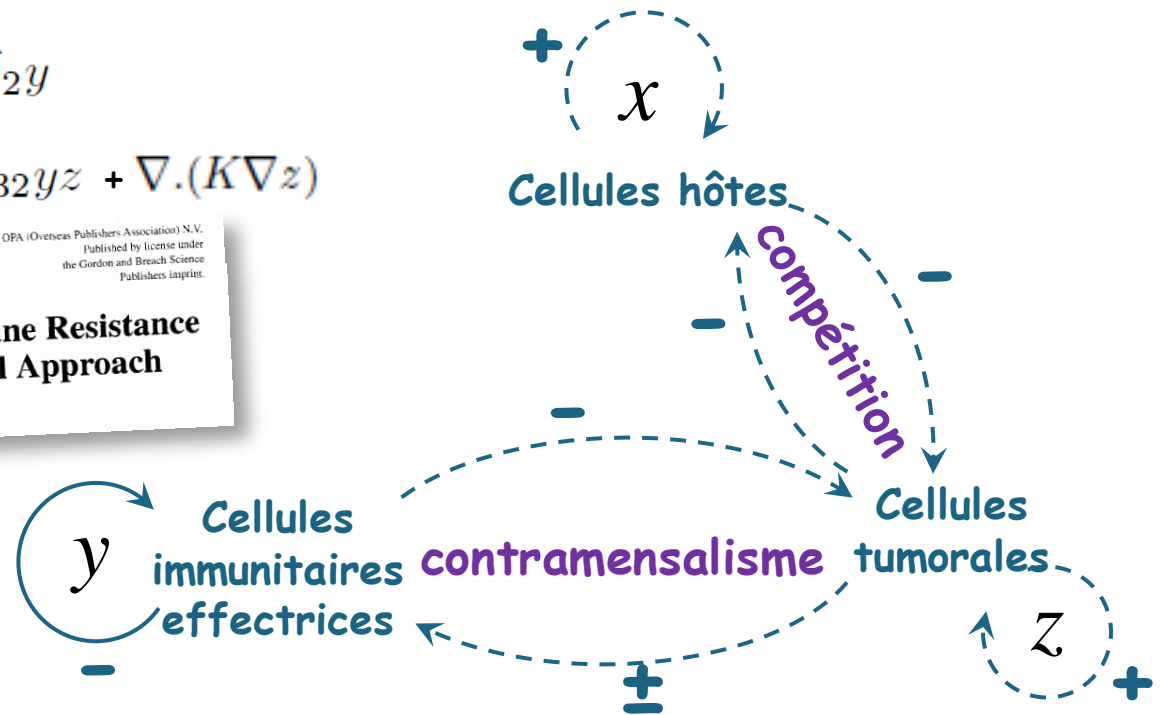
$$\begin{cases} \dot{x} = \rho_1 x(1 - x) - \alpha_{13} xz \\ \dot{y} = \frac{\rho_2 yz}{1 + z} - \alpha_{23} yz - \delta_2 y \\ \dot{z} = z(1 - z) - xz - \alpha_{32} yz + \nabla \cdot (K \nabla z) \end{cases}$$

Journal of Theoretical Medicine, Vol. 3, pp. 79-100
Reprints available directly from the publisher
Photocopying permitted by license only

© 2001 OPA (Overseas Publishers Association) N.V.
Published by license under
the Gordon and Breach Science
Publishers imprint.

A Mathematical Tumor Model with Immune Resistance and Drug Therapy: an Optimal Control Approach

L.G. DE PILLIS^{a,**} and A. RADUNSKAYA^{b,‡}



OIKOS 77:2 (1996)

371

Contramensal interactions between species

Simon Hodge and Wallace Arthur, The Ecology Centre, Univ. of Sunderland, Sunderland, UK SR1 3SD.

Observabilité d'un modèle de cancer

Journal of Theoretical Biology 322 (2013) 7–16



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Journal of Theoretical Biology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/yjtbi



What can be learned from a chaotic cancer model?

C. Letellier^{a,*}, F. Denis^b, L.A. Aguirre^c

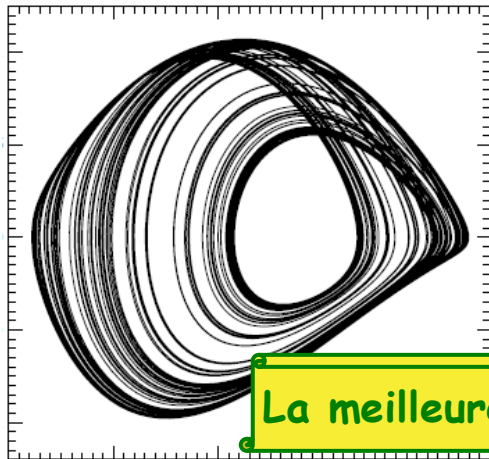
$$\eta_{x^3} = 0.56$$

>

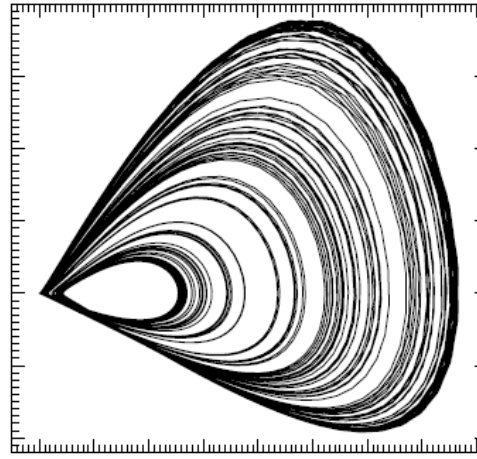
$$\eta_{z^3} = 0.36$$

>

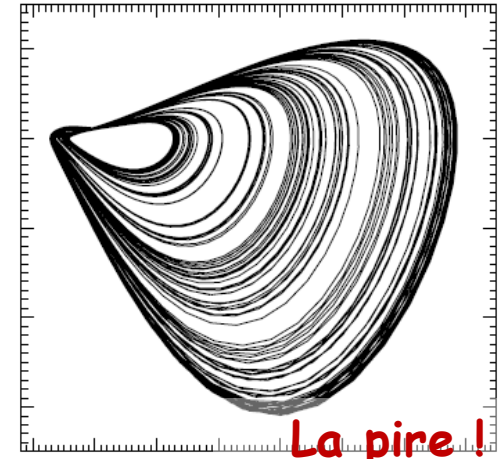
$$\eta_{y^3} = 0.30$$



Cellules hôtes



Cellules tumorales



Cellules immunitaires

Il devrait être plus efficace de suivre l'environnement de la tumeur plutôt que la tumeur elle-même !

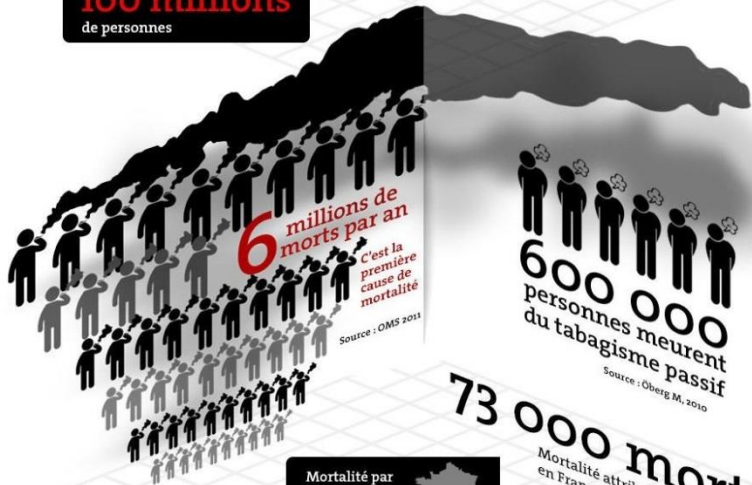
Cancer du poumon

Le Monde

Source : Richard Peto, World cancer report 2014



Au XXe siècle, on estime que le tabac a causé la mort de **100 millions** de personnes



Mortalité par cause en France en 2012

- 35,6 % - cancer du poumon
- 4,1 % - maladies infectieuses
- 11 % - maladies respiratoires
- 24,7 % - maladies cardio-vasculaires
- 24,7 % - autres cancers



Source : OMS 2012, Hill 2012

73 000 morts
Mortalité attribuée au tabac en France en 2004



Non fumeur



Fumeur



Smoking causes fatal lung cancer

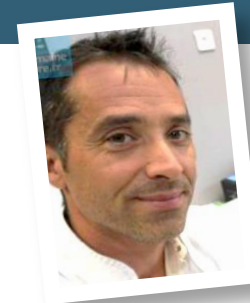
Suivi par questionnaire hebdomadaire à domicile

Support Care Cancer
DOI 10.1007/s00520-013-1954-9

ORIGINAL ARTICLE

Detecting lung cancer relapse using self-evaluation forms weekly filled at home: the sentinel follow-up

Fabrice Denis • Louise Viger • Alexandre Charron •
Eric Voog • Christophe Letellier



Fabrice Denis



Louise Viger



- Raisonement : puisque les cellules hôtes fournissent une meilleure observabilité que le cellules tumorales, ne pourrions-nous pas suivre l'environnement plutôt que la tumeur elle-même ?

Environnement = état global du patient
auto-évalué hebdomadairement

1. poids
2. Perte d'appétit
3. Fatigue
4. Peine
5. Toux
6. Essoufflement

- Une cohorte de 43 patients traités pour un cancer du poumon

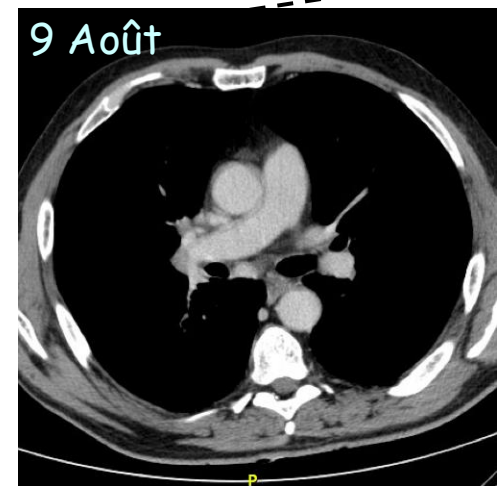
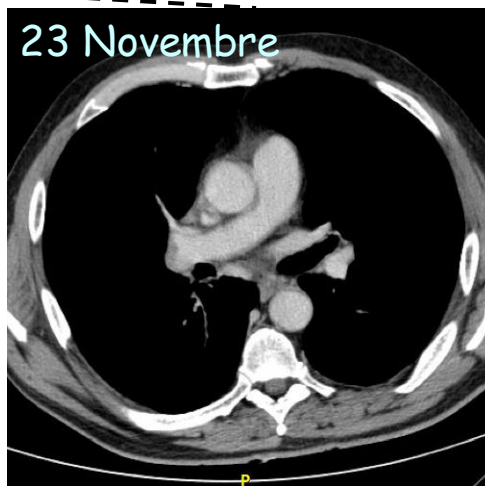
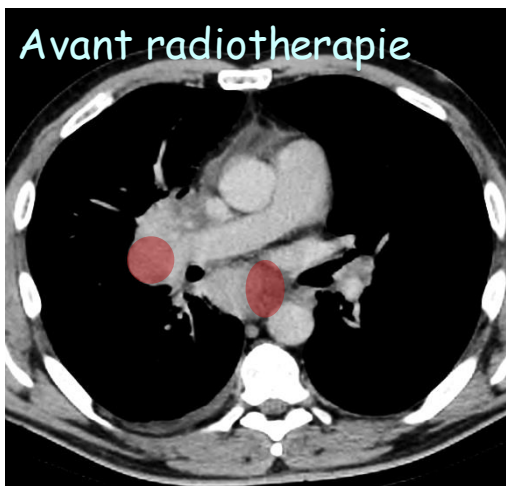
1. Carcinome pulmonaire (stade 3-4)
2. Accès internet

Suivi par questionnaire hebdomadaire à domicile

➤ Patient **sans rechute**

Homme, 63 ans
Fumeur, 90 kg, non sportif
Traité par radiothérapie
Probabilité de rechute = 75 %

jj/mm	23 11	30 11	07 12	15 12	21 12	28 12	04 01	11 01	18 01	25 01	02 02	08 02	15 02	22 02	01 03	08 03	15 03	22 03	29 03	05 04	12 04	19 04	26 04	03 05	10 05	17 05	24 05	31 05	07 06	14 06	21 06	28 06	05 07	13 07	19 07	26 07	02 08	09 08				
aa	12	12	12	12	12	12	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
POIDS	89	89.5	90	91	91	92	92	91.5	91.5	91.5	91.5	91.5	91.5	92	92	92	93	93.5	93.5	94	95	95	95.5	96	95	95	95.5	95	95	95	96.5	97	97	96	96	97	95					
DELTA POIDS	0	-0.5	-1	-2	-2	-3	-3	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2	-2	-1	-1	-1	-1.5	-2	-2.5	-3.5	-3.5	-4	-4.5	-3.5	-3	-3.5	-3	-2	-1.5	-3	-3	-2	-1	-0.5	-1	0					
APPETIT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FAIBLESSE	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
DOULEUR	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
TOUX	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ESSOUFFLEMENT	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
DEPRIME	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

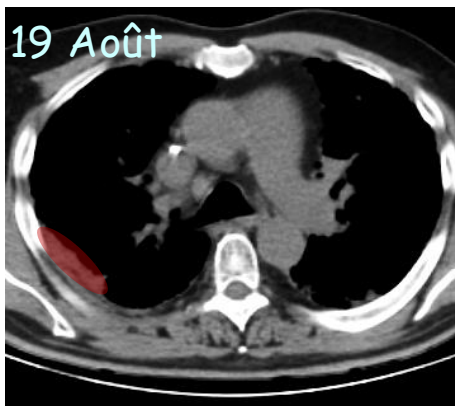


Suivi par questionnaire hebdomadaire à domicile

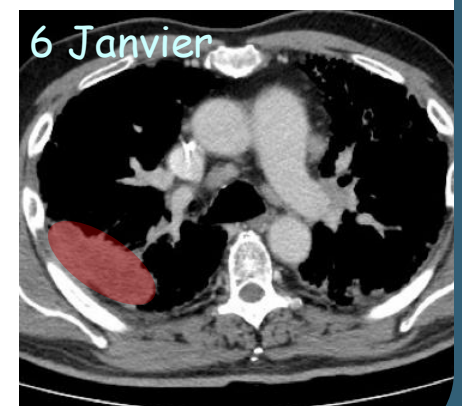
➤ Patient **avec rechute**

Homme, 65 ans
Fumeur, 86 kg, non sportif
Traité par chimiothérapie
Probabilité de rechute = 75 %

jj/mm	19/08	26/08	02/09	09/09	19/09	23/09	30/09	07/10	14/10	21/10	28/10	04/11	11/11	18/11	25/11	16	12	05/01	
aa	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	1	3	14	
POIDS	86	86.9	87.2	86.9	87.2	87.4	87.8	87.5	87.9	88.1	88.1	87.7	87.5	88.3	87.5	86.2	86.6	85.3	86
DELTA POIDS	0	-0.9	-1.2	-0.9	-1.2	-1.4	-1.8	-1.5	-1.9	-2.1	-2.1	-1.7	-1.5	-1.4	-0.3	0.7	0.6	-1.3	-1.6
APPETIT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FAIBLESSE	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
DOULEUR	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	2	3	3	3	3
TOUX	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
ESSOUFFLEMENT	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
DEPRIME	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1



➤ 2 mois avant l'imagerie de routine



Suivi par questionnaire hebdomadaire à domicile

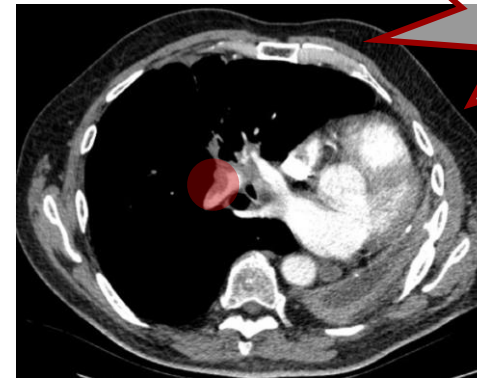
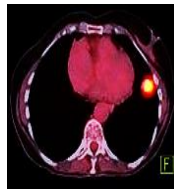
➤ Table de confusion

	rechute	Sans rechute
Sentinel positifs	13	3
Sentinel négatifs	0	25

Autres maladies

j l m	24/03	30/03	07/04	13/04	22/04
aa	15	15	15	15	15
POIDS	92	92	92	88	88
DELTA POIDS	0	0	0	0	0
APPETIT	0	0	2	2	2
FAIBLESSE	0	2	2	2	2
DOULEUR	0	0	0	0	0
Toux	0	0	0	0	0
essoufflement	2	3	3	3	3
DEPRIME	0	0	0	0	0
FIEVRE	0	0	0	0	0
VISAGE	0	0	0	0	0
PEAU	0	0	0	0	0
VOIX	0	0	0	0	0
CRACHATS	0	0	0	0	0

	24/03	30/03	07/04	13/04	22/04
POIDS	92	92	92	88	88
DELTA POIDS	0	0	0	0	0
APPETIT	0	0	2	2	2
FAIBLESSE	0	2	2	2	2
DOULEUR	0	0	0	0	0
Toux	0	0	0	0	0
essoufflement	2	3	3	3	3
DEPRIME	0	0	0	0	0
FIEVRE	0	0	0	0	0
VISAGE	0	0	0	0	0
PEAU	0	0	0	0	0
VOIX	0	0	0	0	0
CRACHATS	0	0	0	0	0



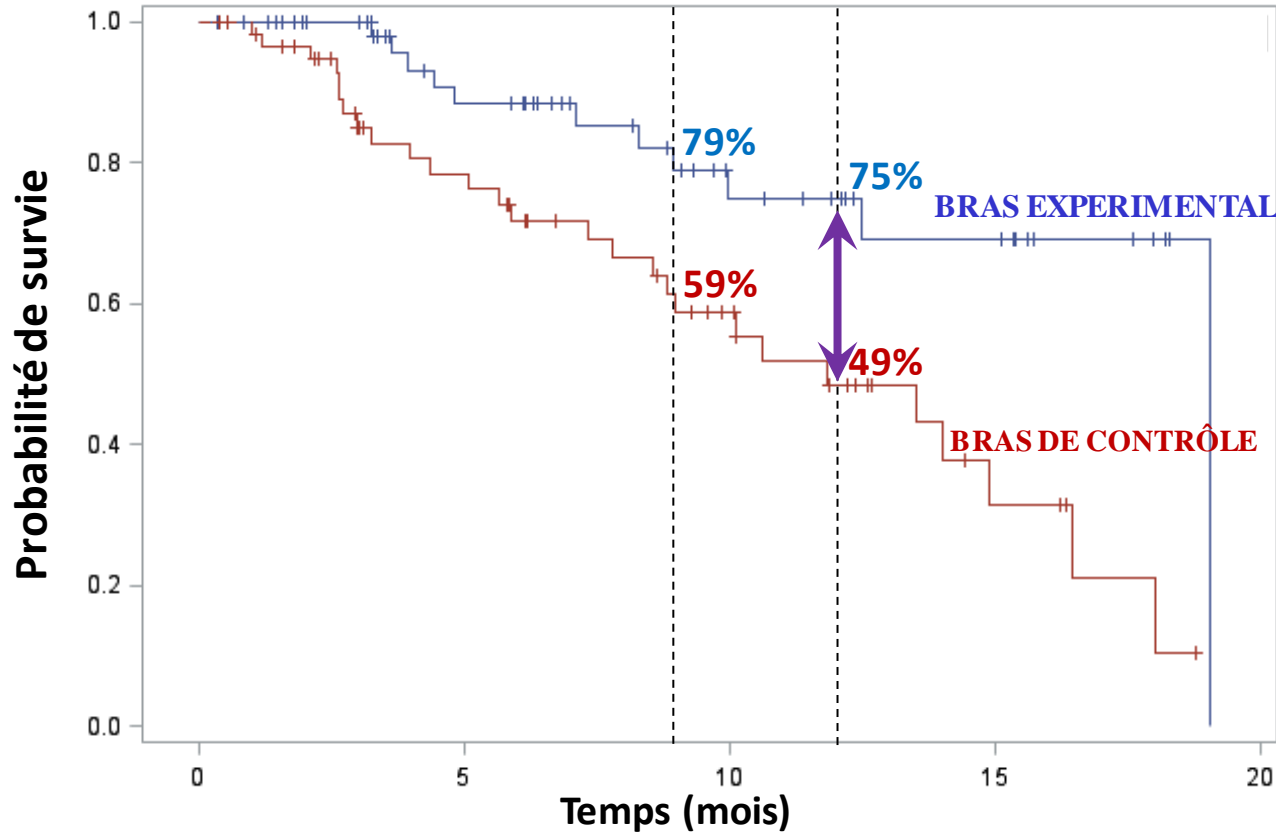
Embolie pulmonaire

- Sensibilité 100% 85%
- Spécificité 89% 96%

- Détection des rechutes de cancer anticipée de cinq semaines par rapport au suivi par imagerie de routine !
- Fiabilité équivalente à un suivi de routine !

Suivi par questionnaire hebdomadaire à domicile

- Etude clinique de phase III (121 patients): courbe de survie



- Plus de 20% de survie gagnée à 12 mois...
- 2 fois plus de décès dans le bras de contrôle ! (hazard ratio = 0.325)

Conclusions

➤ Estimation de l'observabilité des réseaux

- Nous avons optimisé le calcul de nos coefficients d'observabilité symbolique en limitant le nombre de cas à considérer
- Validé dans le cas d'un système rationnel de dimension 13 constituant déjà un réel défit !

➤ Modélisation de réseaux

- Réduction inévitable de la dynamique lorsqu'il y a synchronisation
- Le modèle « complet » ne peut être obtenu qu'en présence d'un défaut de synchronisation

➤ Prétraitement des données (association – agrégation)

- Fort risque de perturbation de la dynamique en cas de défaut de synchronisation
- L'agrégation est beaucoup plus risquée que l'association
- Influence dépend de l'observabilité !