

LES SYSTÈMES COMPLEXES

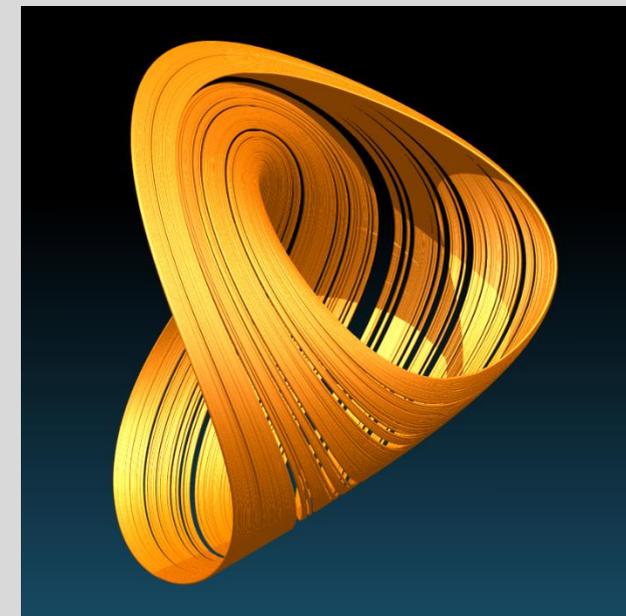
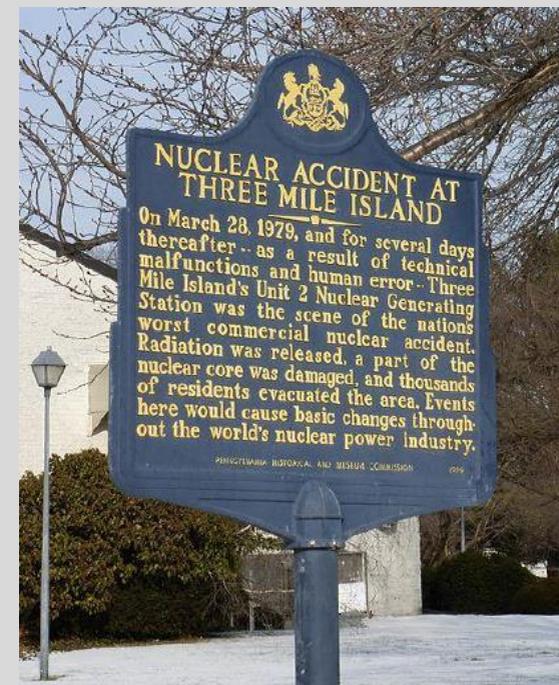
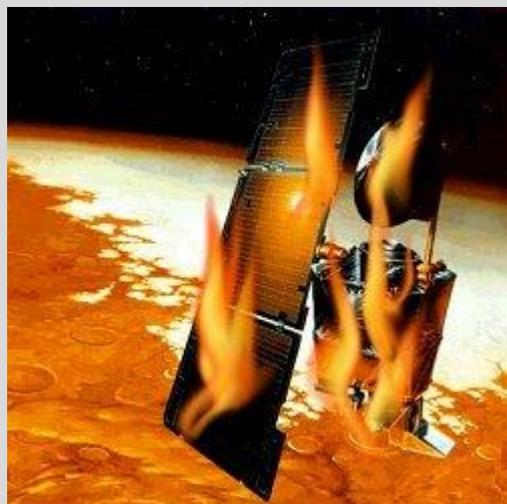
SONT IMPRÉVISIBLES...

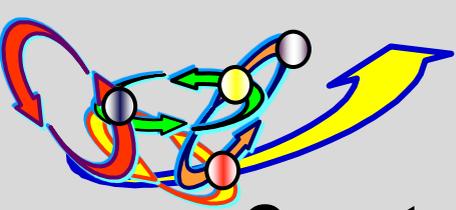
ET APRÈS ?

« Les prévisions sont difficiles, surtout quand elles concernent l'avenir »

(attribué à John Maynard Keynes)

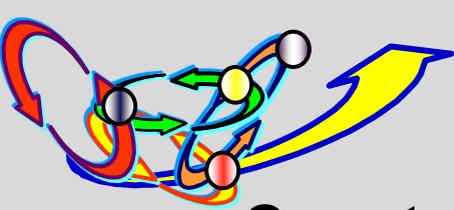
**Patrick FARFAL
PatSys**





Constats d'imprévisibilité 1





Constats d'imprévisibilité 2

- ❑ « **Les Systèmes Complexes sont fondamentalement imprévisibles** »
- ❑ « *Peut-on, si l'on connaît la définition d'un ensemble et les propriétés de ses éléments, prédire les événements qui peuvent survenir à cet ensemble ? En fait, notre univers est complexe. Une pièce avec un lustre, une poubelle, une boîte de pilules, un chien ; pour changer une ampoule grillée au lustre, il faudra peut-être déplacer une poubelle, en le faisant, on fera peut-être tomber une boîte de pilules, ce qui veut dire qu'il faudra balayer pour que le chien ne mange pas les pilules éparpillées, etc. Les éléments sont des parties du monde **normalement indépendantes et éloignées**, mais un événement anodin peut les lier intimement* »

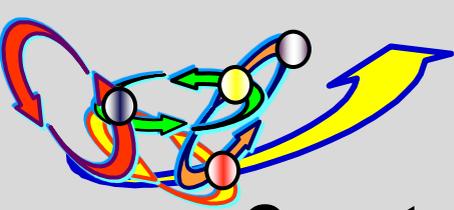
Gödel, Escher, Bach – Les brins d'une guirlande éternelle, Douglas Hofstadter

- ❑ **Cf. Pascal** : « *toutes [choses] s'entretenant par un lien naturel et insensible qui lie **les plus éloignées et les plus différentes** ...* »

Pensées, Part. I, Art. VI

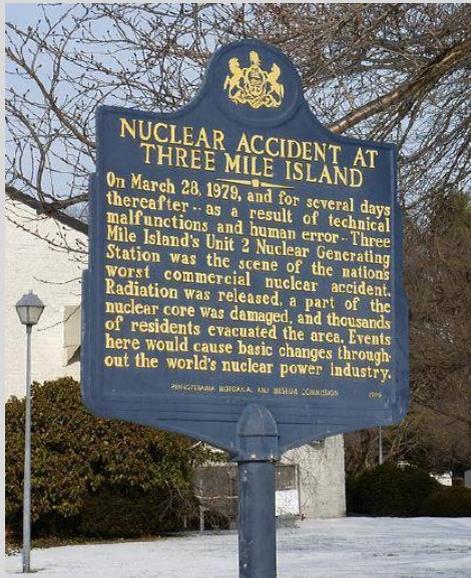
- ❑ **Les Systèmes complexes sont imprévisibles.**
Oui, mais des Systèmes simples aussi !





Constats d'imprévisibilité 3

- ❑ « Les Systèmes Complexes sont fondamentalement imprévisibles »
- ❑ La chaîne infernale de Bornéo (déjà ancienne) [*]



Usage massif de DDT pour éradiquer les moustiques

Destruction des prédateurs de moustiques :

les oiseaux, également prédateurs de chenilles

Les chenilles dévorent les toits de chaume

Les mouches entrent en quantité

On diffuse davantage de DDT

Les chats mangent les mouches et meurent

Les rats pullulent

La peste bubonique se répand

On parachute des chats d'une île voisine



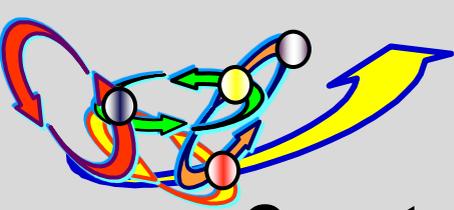
Destruction de
Mars Climate Orbiter



Echec d'un Trident D5

[*] Anne STEENHOUT, Systemica 2011, Bruxelles

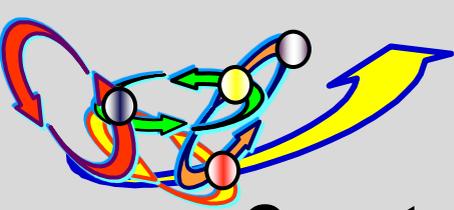
This document is the property of PATSYS. It shall not be communicated to third parties without prior written agreement. Its content shall not be disclosed.



Constats d'imprévisibilité 4

- ❑ « **Les Systèmes Complexes sont fondamentalement imprévisibles** »
- ❑ **Domaine du handicap [*] : émergences inattendues et positives...**
 - **Télécommande TV inventée aux EU à la demande d'UNE personne handicapée ; personne ne la vend comme telle ! ! !**
 - **Accès aux fauteuils roulants dans les bus ⇒ multiplicité de poussettes !**
- ⇒ **La personne handicapée comme révélateur des besoins de la population (d'après Régis HERBIN, architecte)**
- ❑ **... et négatives**
 - **Chutes de personnes âgées aux changements de pente des trottoirs aménagés pour permettre le passage des fauteuils roulants**
 - **Excès de poussettes limitant l'accès des fauteuils roulants aux bus !**

[*] *Taking handicap into account : Systemic features*, Patrick Farfal - 9th Congress of the EUS-UES - Globalization and Crisis - Complexity and governance of systems, Valencia 2014

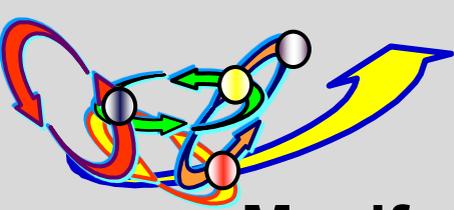


Constats d'imprévisibilité 5 : la problématique [*]

- ❑ Les Systèmes complexes sont imprévisibles
- ❑ Or nous devons faire des prévisions
- ❑ Comment ?
- ❑ Quelle qualité des prévisions ?

- ❑ Y a-t-il des causes d'imprévisibilité autres que les erreurs « triviales » (erreurs de méthode, insuffisances dans l'application des méthodes, erreurs fortuites...) ?

[*] questionnement dû à Michel Bloch, *Groupe Emergence*



Manifestations de l'imprévisibilité : Emergences

□ Systèmes vivants

➤ Emergences

- Auto-adaptation, Résilience
 - Evolution
- Emergences heureuses ?
Sujet difficile et potentiellement passionnel

□ Systèmes artificiels (y compris artificiels et vivants)

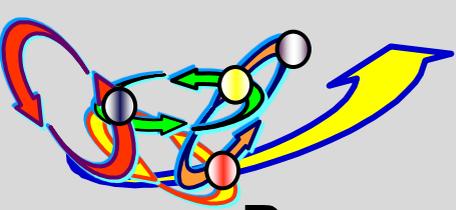
➤ Emergences – différents types [*]

- Délibérées et exprimables
- Délibérées et non ou difficilement exprimables
- Redoutées (pannes de conception)
- Heureuses (rares et suspectes, risquées, dans les Systèmes artificiels)

= Le besoin
Les émergences dérivent
de la finalité, de la structure,
et des interactions qui
relient structure et finalité

L'imprévisible

[*] inspiré de Jean-Pierre BOMBLED, *Emergence des systèmes « techniques » et « humains »*, GREC-O Le Mans, France, 10-11 janvier 2002

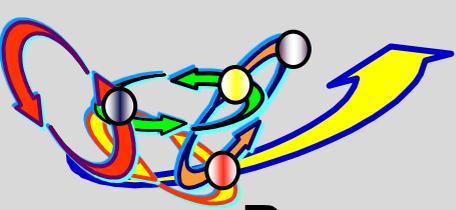


Pourquoi l'imprévisibilité dans les Systèmes artificiels ?

❑ Par ignorance et/ou mauvaise caractérisation des interactions = chaînes et boucles :

- interactions internes, souvent intriquées, externes, → **Trident D5 1989**
- à temps de réponse très divers – constantes de temps, retards
→ économie, finance
- du fait de la dispersion des caractéristiques (manque de robustesse)
- aux effets brouillés par ceux de la non-stationnarité (l'évolutivité) du Système ou par l'évolution de l'environnement
- par ignorance du domaine de validité des modèles, non-pertinence des extrapolations → **modèle de la dinde**





Pourquoi l'imprévisibilité dans les Systèmes artificiels ? 2

➤ du fait de non-linéarités

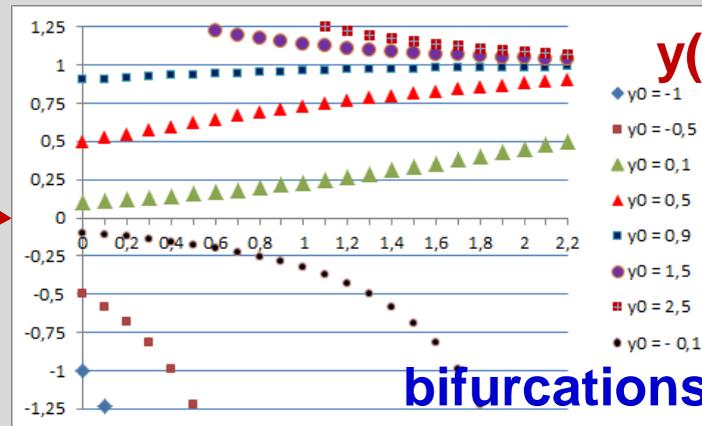
- Seuils
- Hystérésis

Pression fiscale ↗ Fraude fiscale ↗
 Pression fiscale ↘ Fraude fiscale ↘ **mais pas tout de suite !** Persistance du phénomène alors que sa cause principale a disparu (ou s'est atténuée)

▪ Bifurcations

$$y'(t) = y(t) - y^2(t)$$

Fonction
logistique



$$y(t) = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{y_0} - 1\right) e^{-t}}$$

bifurcations en $y_0 = 0$ et $y_0 = 1$

▪ Comportements chaotiques

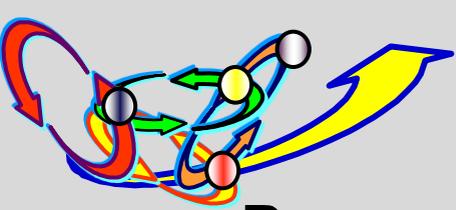
➤ via les données...

➤ franchement imprévisibles



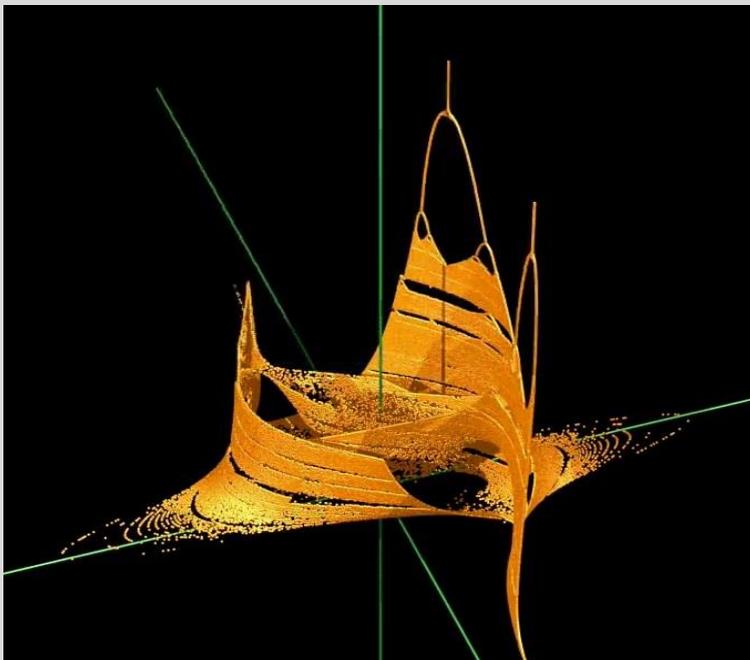
Mars Climate Orbiter 1998-99

Confusion pound-force / newton



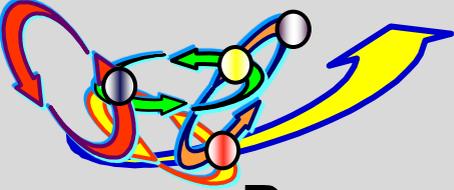
Pourquoi l'imprévisibilité dans les Systèmes artificiels ? 3

- **Par ignorance des signaux faibles**
 - Découverte (existence cachée, ou apparition) d'une boucle instable ou peu amortie et d'un signal excitateur faible (bruit) : oscillateur
 - **Pont de Tacoma**
 - Sensibilité extrême aux valeurs des paramètres ou aux conditions initiales
 - **Variation infime d'un paramètre (bifurcations, passage en « mode chaos »)**
 - **Variation infime ou méconnaissance d'une Condition Initiale (Chaos)**
 - ***Que faire quand le système est chaotique ? Ex. chaos économique***



$$\begin{aligned}dx/dt &= ky + mx(b-y^2) \\ dy/dt &= -x + sz \\ dz/dt &= px - qy\end{aligned}$$





Pourquoi l'imprévisibilité dans les Systèmes artificiels ? 4

❑ Signaux faibles



Hauteur : 142 m
Portée principale 853 m
Longueur totale : 1822 m
Largeur 19 mètres
Épaisseur tablier : 2,4 m
Largeur poutre : 11,9 m
Câbles $\varnothing = 43$ cm
Matériau pylônes et poutre : acier

❑ *Tacoma Narrows Bridge* (pont de Tacoma ou pont du détroit de Tacoma)

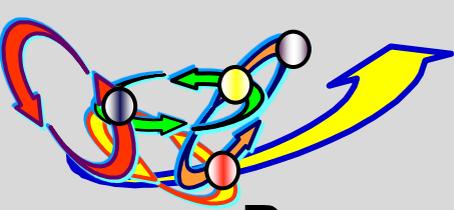
Inauguré le 1er juillet 1940, il s'est effondré le 7 novembre 1940

Vitesse du vent : 65 km/h (relativement faible)

❑ **Petite cause, grand effet**

❑ Et le système n'est pas chaotique, seulement non-linéaire !



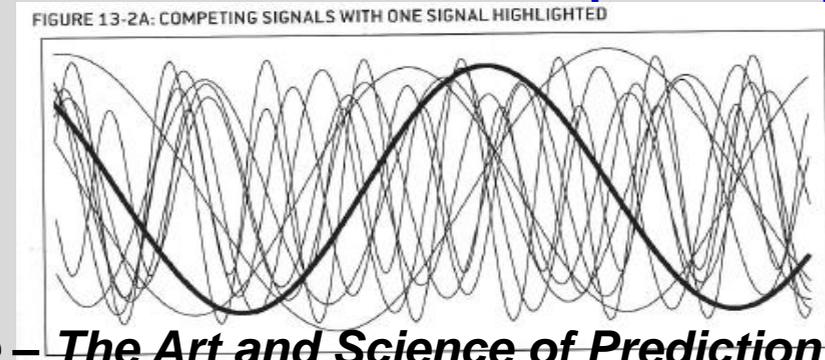
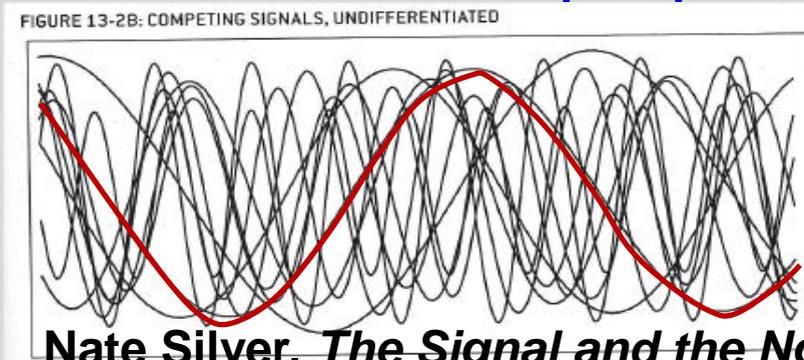


Pourquoi l'imprévisibilité dans les Systèmes artificiels ? 5 [*]

- ❑ **Signal faible** : « *information d'alerte précoce, de faible intensité, pouvant être annonciatrice d'une tendance ou d'un événement important* »

Igor Ansoff, 1975

- ❑ **Comment analyser une collecte de signaux dans un système à risques, pour retenir ceux qui méritent une instruction plus poussée, en amont de toute conséquence majeure ?**

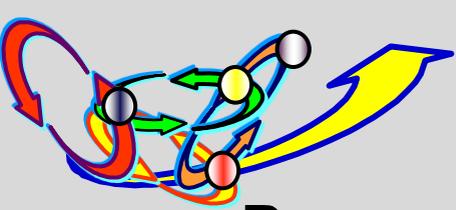


Nate Silver, *The Signal and the Noise – The Art and Science of Prediction*

- ❑ **Peut conduire à la découverte de relations qui n'étaient pas connues, ni visibles**
- ❑ **Signaux faibles = jugements de valeurs – une composante polémique pèse toujours sur leur accessibilité**
- ❑ **Les modèles classiques d'accident les écartent (rationnellement : gravité ou fréquence faibles)**
- ❑ **« L'information doit être traitée pour acquérir un sens. La règle d'or est alors la suivante : Quelle est la question à laquelle il faut répondre ? »**

Theodore Levitt, *Réflexions sur le management*

[*] d'après IMdR, *Détection et pertinence d'un signal faible dans le traitement d'un retour d'expérience*, Synthèse du rapport final, Projet de l'IMdR n° P12-1, 2010, et René Amalberti, *Porteurs d'alerte et signaux faibles : à la mode... et après ?* Tribunes de la sécurité industrielle, 2013 n° 01



Pourquoi l'imprévisibilité dans les Systèmes artificiels ? 6

- Un Système est déclaré complexe chaque fois que son appréhension nécessite un **apprentissage**, une adaptation (Michel Bloch, *Groupe Emergence*)

Méconnaissance \Rightarrow Imprévisibilité

↕
Apprentissage

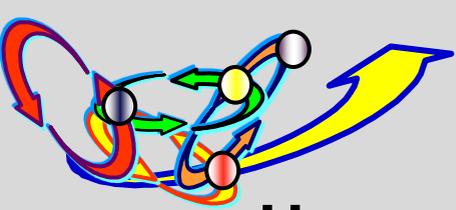
(Ce n'est pas le Système À FAIRE qui apprend, mais le Système POUR FAIRE)

- « *Un objet (physique ou intellectuel) est complexe s'il contient de l'**information difficile à obtenir.*** »

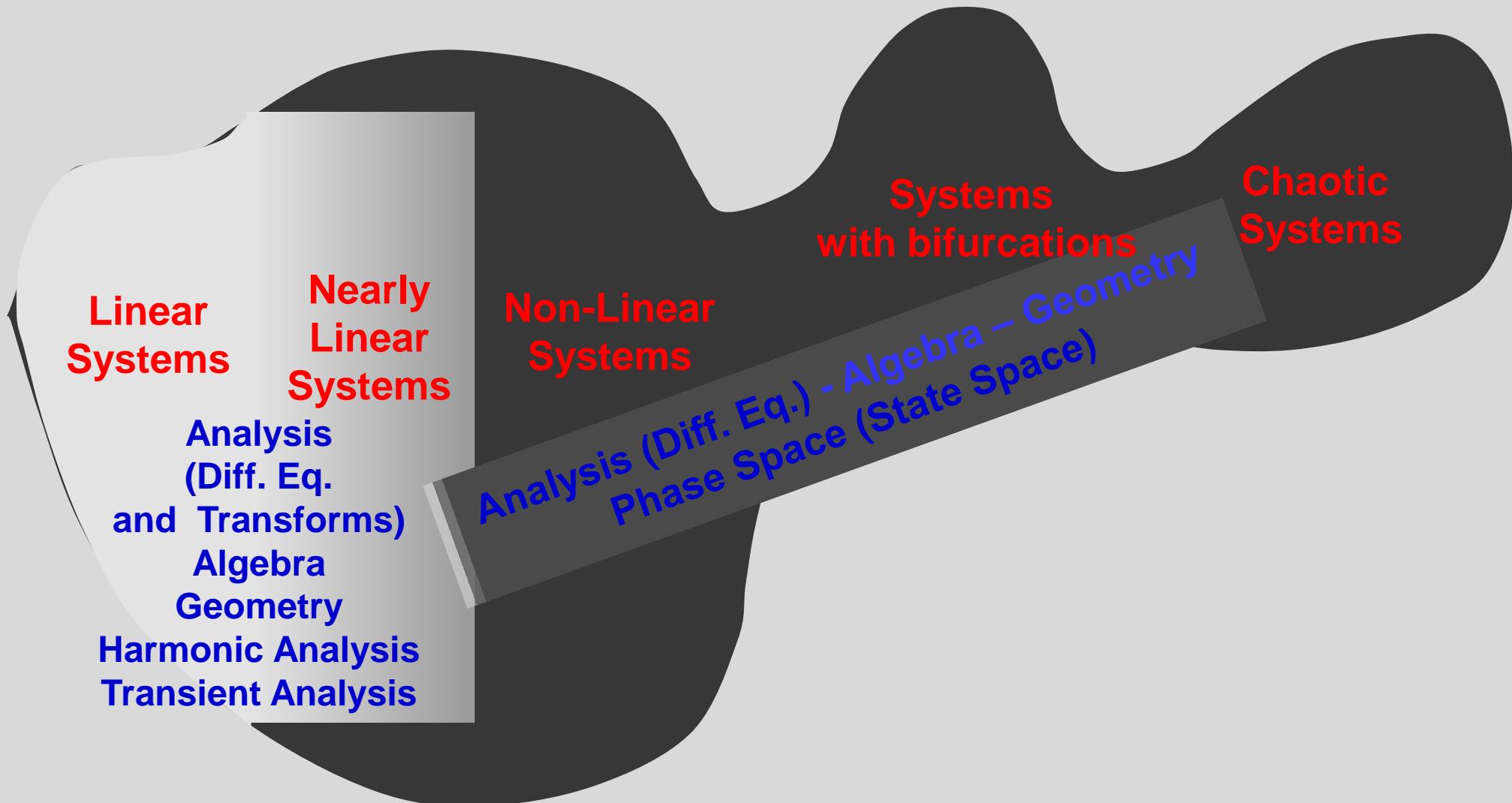
David Ruelle, *Hasard et Chaos*

- « *I shall not undertake a formal definition of “complex systems”. Roughly, by a complex system, I mean one made up of a large number of parts that interact in a **non-simple way.*** »

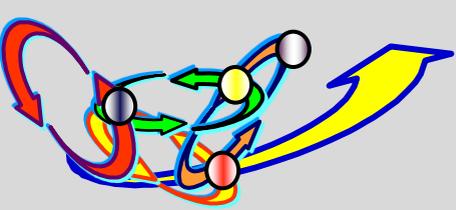
Herbert A. SIMON, *The Architecture of Complexity*, 2005



Un arsenal mathématique portant impressionnant

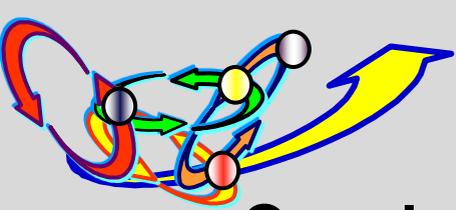


❑ **Mais quelle maîtrise ? (même dans les Systèmes linéaires)**



Les Systèmes complexes sont imprévisibles !





Méconnaissance \Rightarrow Imprévisibilité

Apprentissage

Conclusion (très provisoire) : Et après ?

- ❑ « Maîtriser » la Complexité ?
- « Manager » la Complexité ?
- ou
- « Organiser » la Complexité ?

Pour réduire les méconnaissances

- Identification et caractérisation de toutes les interactions ? (même cachées ?)
- Augmentation de robustesse (maîtrise des marges)
- Identification des comportements chaotiques ?

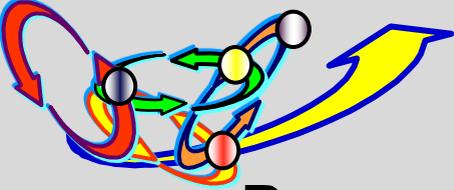
Est-ce suffisant ?

- ❑ **Peut-on rendre les systèmes plus robustes ?**
 - **C'est l'incessant travail d'amélioration des méthodes et moyens de l'Ingénierie Système**
 - **Interactions cachées ? Inattendues (Systèmes de Systèmes...) ?**
 - **Les applique-t-on de façon aussi rigoureuse aux Systèmes autres qu'artificiels (autres qu'« engineered »)?**
 - **Peut-on les appliquer de façon aussi rigoureuse ?**
- ❑ **Est-ce suffisant ?**
- ❑ **Peut-on « faire avec » l'imprévisibilité (bifurcations, chaos...) ?**
- ❑ ***I have a dream...* Je cherche un homme...**
- ❑ **J'aimerais trouver la personne qui rendrait robustes l'économie, le système bancaire... ; est-ce envisageable ? est-ce une utopie ?**



**Diogène
de Sinope**

-- 413 - -- 327



Les éléments en jaune ne sont pas de Jacques Neiryck

« Non-maîtrisés » ne signifie pas « à caractère non-opératoire »

Pour commencer à réfléchir...

□ Inspiré de Jacques Neiryck, *Le Savoir-Croire*

« Phénomènes »

Quantifiables

Modélisables

Reproductibles

Déterministes

Prévisibles

Notre sujet d'étude ?
La banane de l'imprévisibilité

Sensation esthétique
Droit

Economie

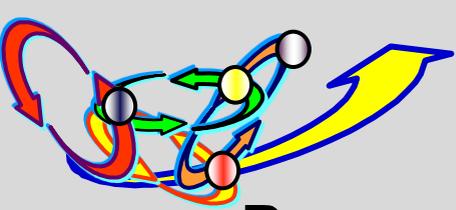
Cosmologie

Phénomènes quantiques

Phénomènes à bifurcations, chaotiques, catastrophiques

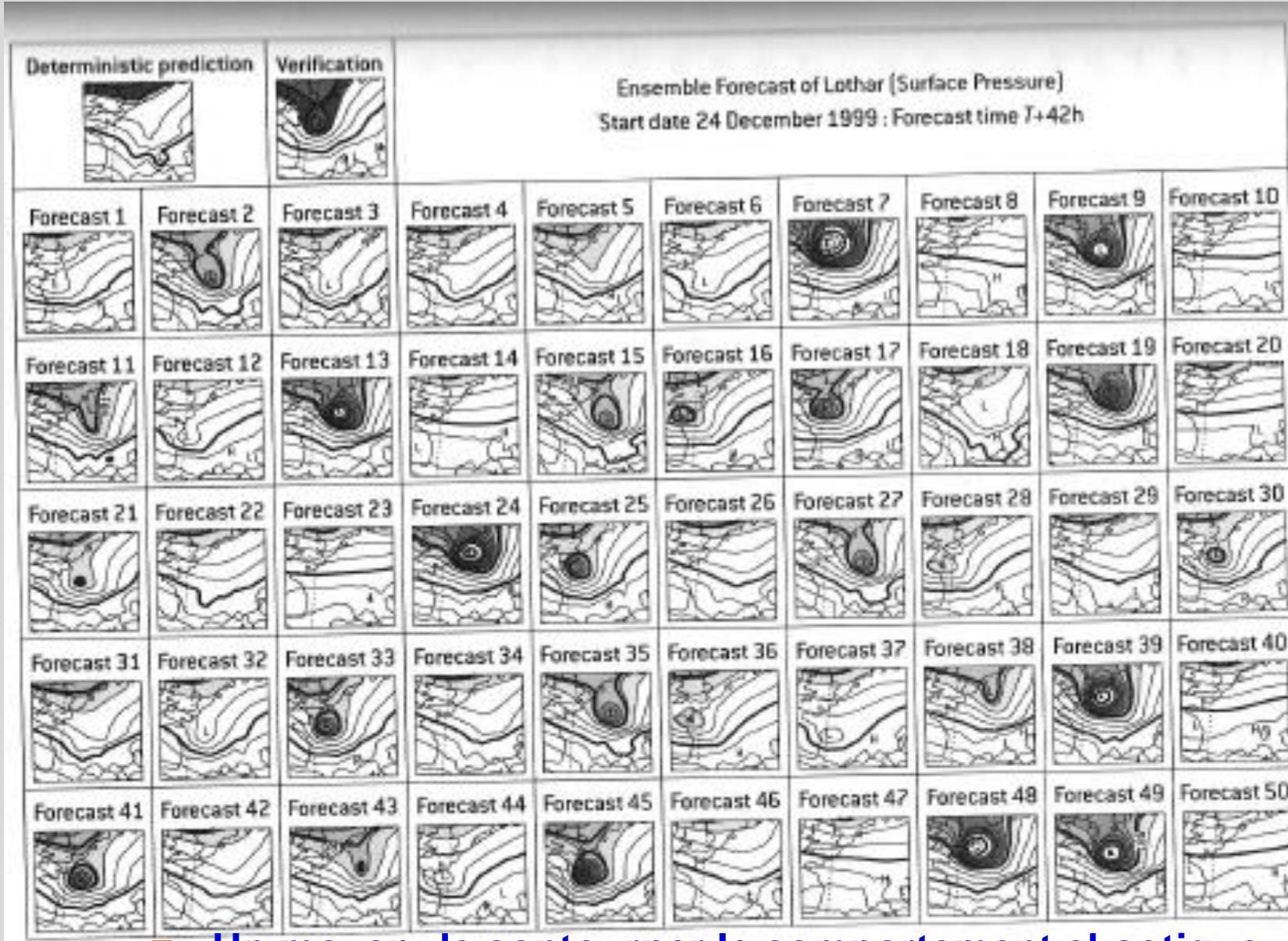
Phénomènes à interactions mal caractérisées ou cachées

« Maîtrisés » ?



DIVERGENT WEATHER FORECASTS WITH SLIGHTLY DIFFERENT INITIAL CONDITIONS

Pour continuer à réfléchir...



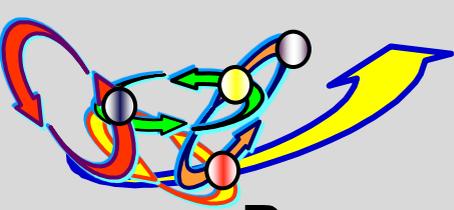
Légers changements dans les « conditions initiales » (pression à Hanovre, vent à Stuttgart) ; 50 simulations :

dans certains cas, tempête à Paris

Un moyen de contourner le comportement chaotique : Prévisions météorologiques [*]

[*] Nate Silver, *The Signal and the Noise – The Art and Science of Prediction*

This document is the property of PATSYS. It shall not be communicated to third parties without prior written agreement. Its content shall not be disclosed.



Pour continuer à réfléchir... suite

❑ Objectifs d'une prévision

- Agir ?
- Expliquer ? (le modèle « prévoit » un résultat qui explique a posteriori)

❑ Qu'est-ce qu'une méthode de prévision ?

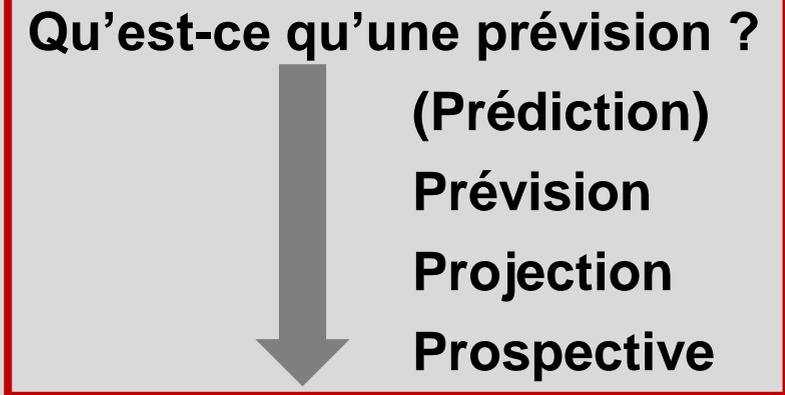
- Extrapolation ?
- Intuition ?
- Comparaison avec un système connu ?

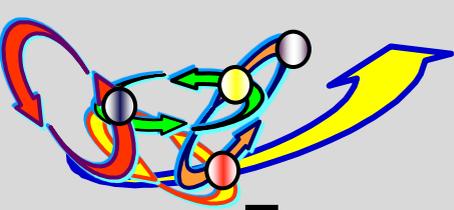
❑ Résultat attendu d'une prévision

- Qualitatif ? Quantitatif ?
- Expression déterministe ? Résultat macroscopique ? Tendance ? En moyenne ? En probabilité ? Avec intervalle de confiance ?
- Granularité
 - En étendue : « quel sera l'état du nuage ? » vs « va-t-il pleuvoir ? »
 - Horizon temporel : systèmes chaotiques prévisibles à court terme

❑ Freins

- Méconnaissance des systèmes, insuffisance de données significatives
- Chaos, hasard sauvage...
- Facteur humain (dont facteur politique : modèles « de droite », « de gauche »)
- Interactions entre prévisions et réel : élections, économie, bourse





For want of a nail, the shoe was lost

***« For want of a Nail the Shoe was lost;
for want of a Shoe the Horse was lost;
and for want of a Horse the Rider was lost,
being overtaken and slain by the Enemy,
all for want of Care about a Horse-shoe Nail. »***

Benjamin Franklin, *Poor Richard's Almanack*, 1758

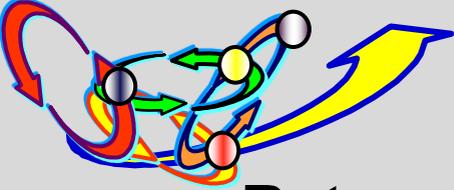
« Real systems need to deal with unexpected and even weird events. »

**Kristie L. Bellman, Aerospace Corp.,
*Complex Systems Design & Management 2014***

***« En fait, les astronomes ne sont pas plus compétents que les météorologues,
mais ils ont mieux choisi le sujet de leur étude. »***

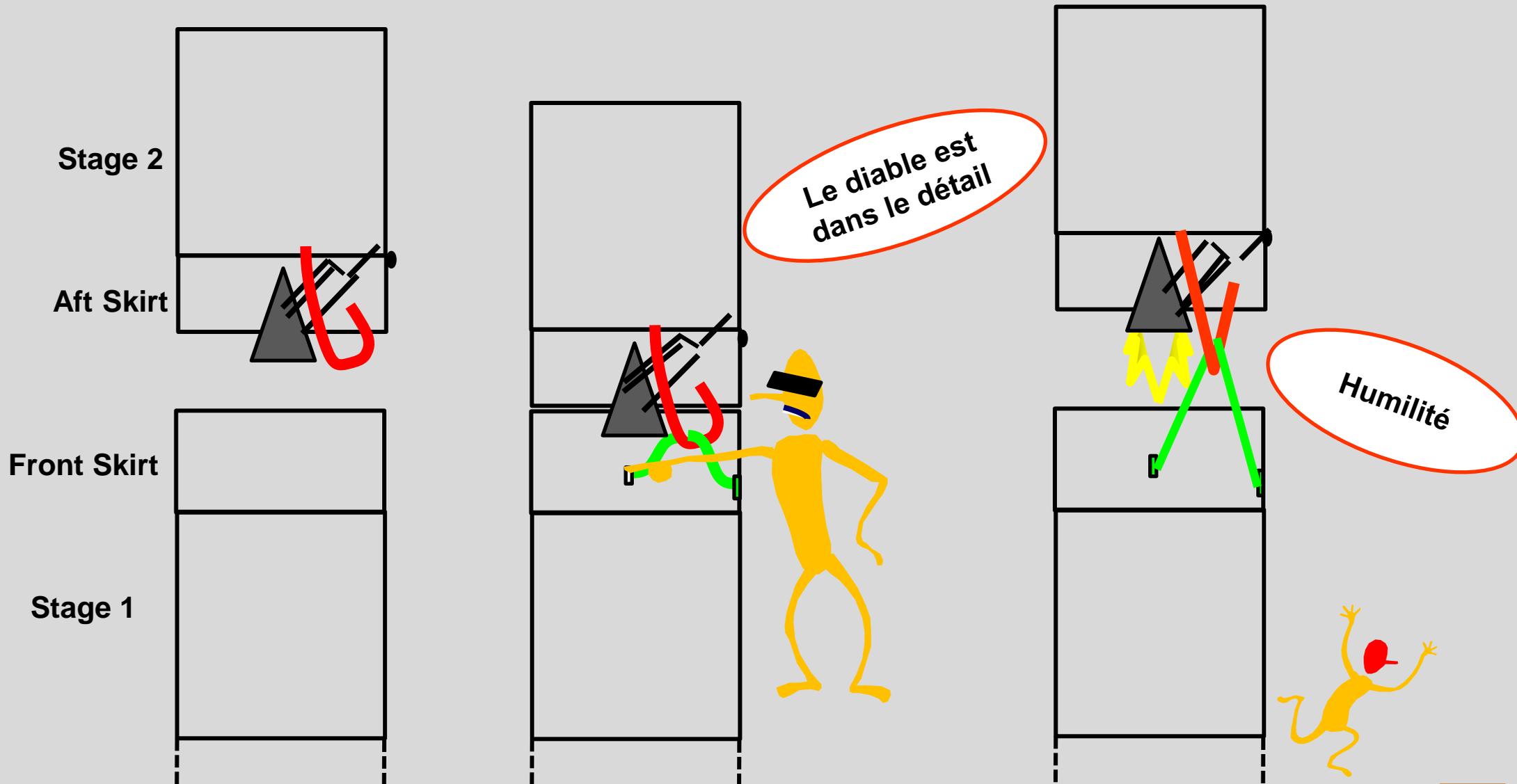
Jacques Neiryck, *Le savoir-croire*

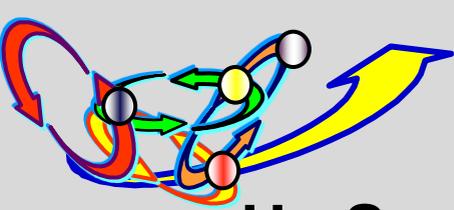
Merci de votre attention



Retour d'Expérience sur l'imprévisibilité fondamentale

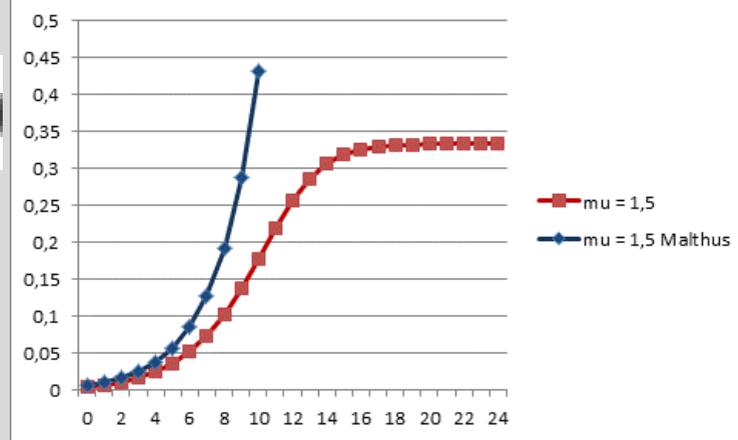
- Erreurs résiduelles franchement imprévisibles (mais porteuses de leçons)





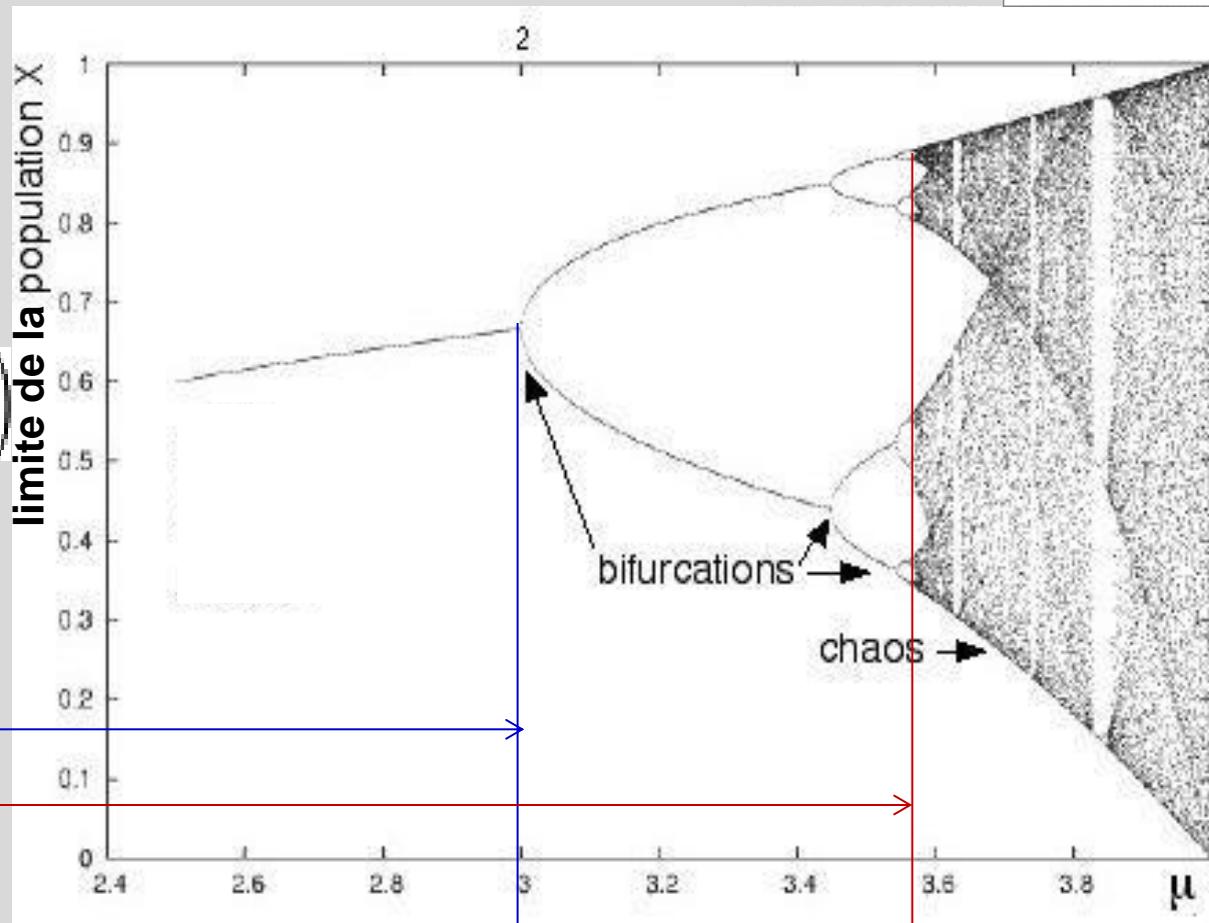
Un Système chaotique simple

$$x_{n+1} = \mu x_n (1 - x_n)$$



Suite Logistique

$$x_{n+1} = \mu x_n (1 - x_n)$$



Route vers le chaos la plus courante : *succession de bifurcations fourches* (séquence de Feigenbaum)

$\mu = 3$

$\mu = 3,5699456\dots$

Point fixe attractif

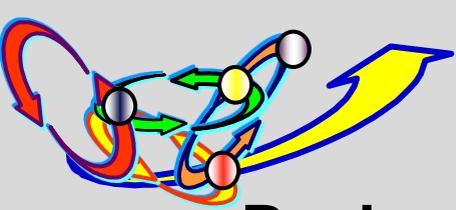
Attracteur (orbite périodique)

En $\mu = 3,5699456\dots$

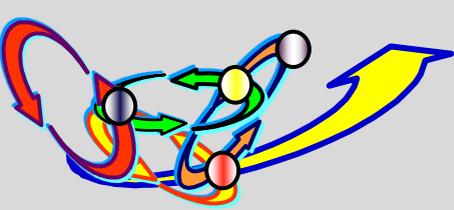
Attracteur de Feigenbaum fractal (non étrange)



L'apparition du chaos mathématique n'est nullement liée seulement à la complexité !



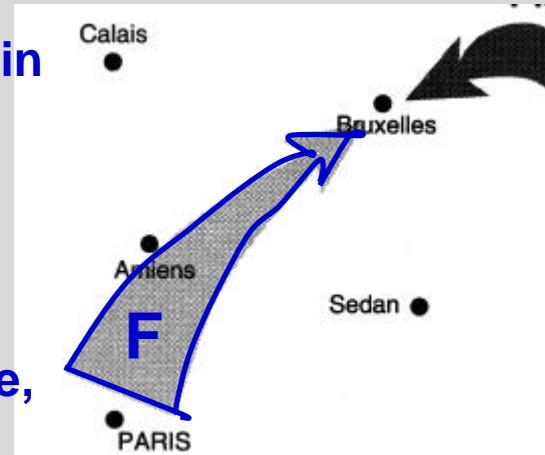
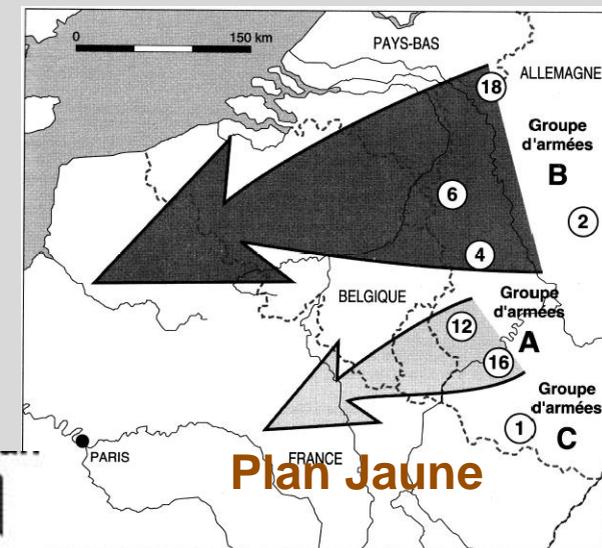
Back-up



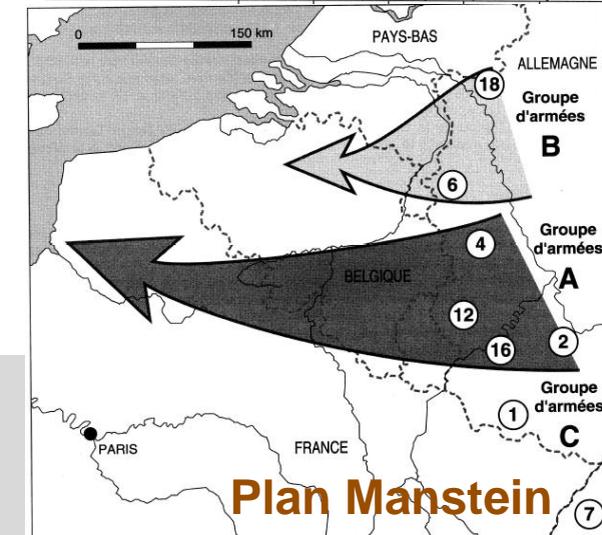
« Sa Majesté le Hasard » Clausewitz

Le Plan Manstein *

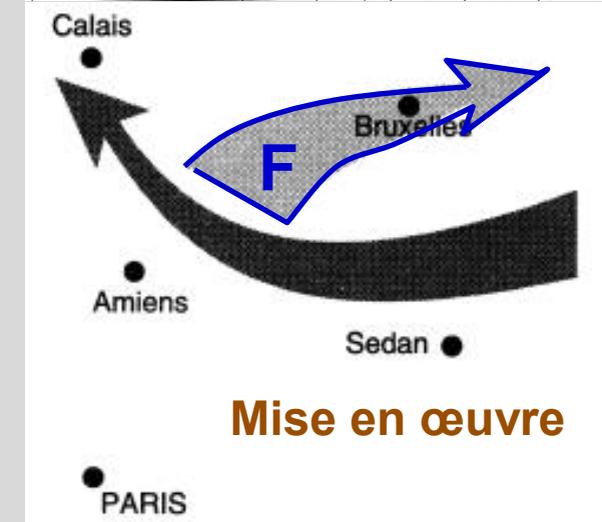
- ❑ Octobre 1939 : Rédaction du Plan Jaune, réédition du Plan Schlieffen de 1914
- ❑ Plan critiqué par le Général von Manstein
- ❑ Plan Manstein remis le 31 octobre 1939
- ❑ Décision d'attaquer reportée ~30 fois jusqu'au 10 mai 1940
- ❑ 10 janvier 1940 : **atterrissage forcé d'un avion allemand**, porteur du Plan Jaune, en Belgique ; une partie tombe aux mains des Belges
- ❑ 16 janvier : abandon du Plan Jaune
- ❑ 7 février 1940 : Manstein convainc le général Halder
- ❑ Agacé, le Haut Commandement mute Manstein sur le front de l'est
- ❑ Manstein, présenté à Hitler, **comme tous les généraux mutés**, lui expose ses idées le 17 février 1940
- ❑ 24 février 1940 : adoption du Plan Manstein



Critique du Plan Jaune par Manstein

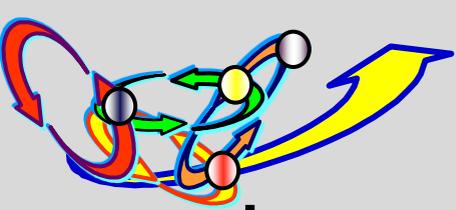


Plan Manstein



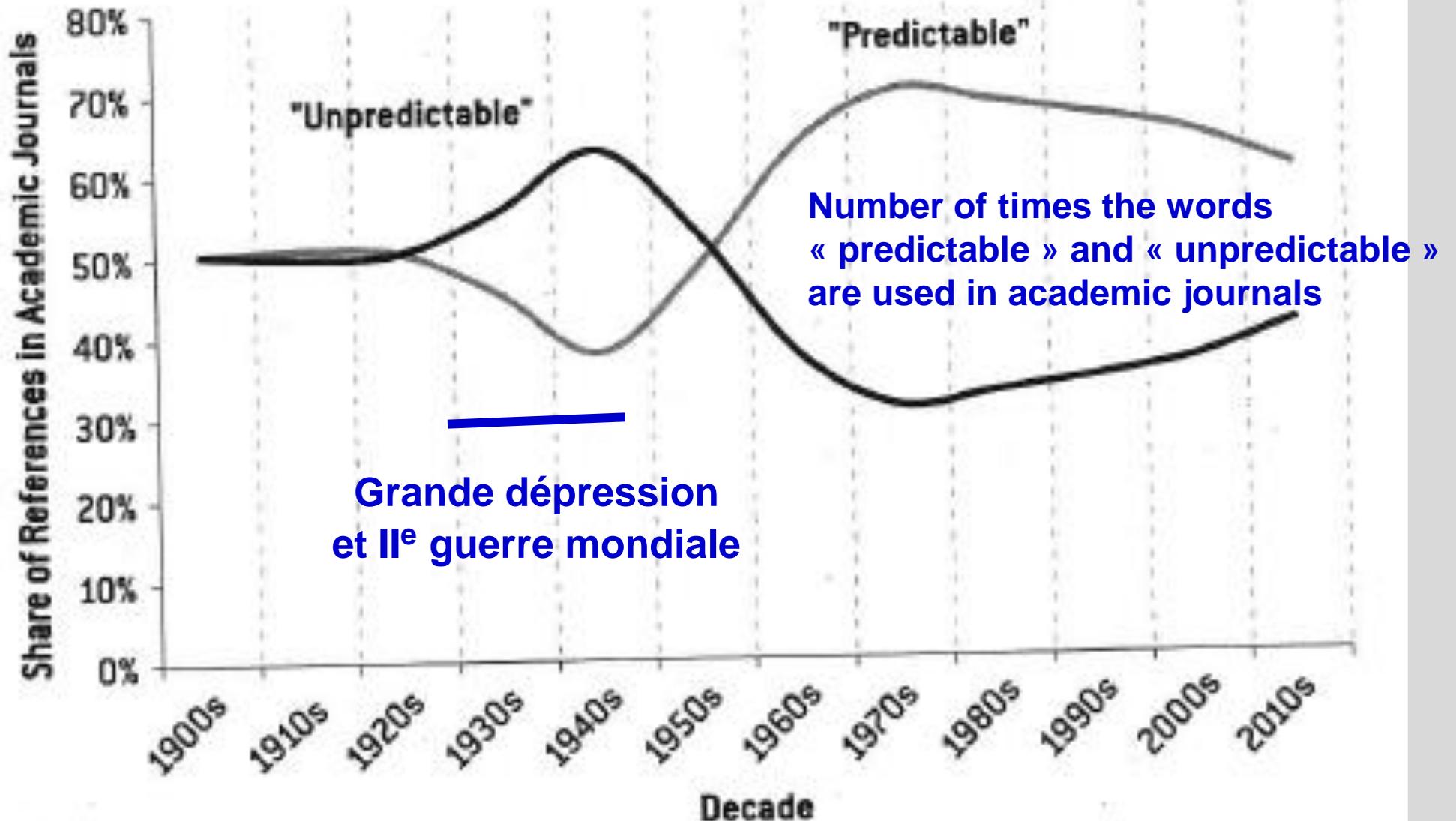
Mise en œuvre

* Gil Fiévet, *De la stratégie – L'expérience militaire au service de l'entreprise*

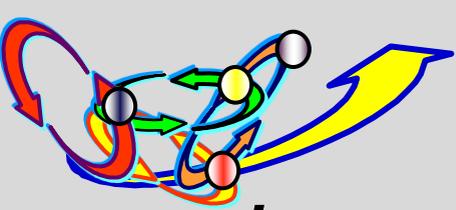


La perception de la prévisibilité

FIGURE C-2: THE PERCEPTION OF PREDICTABILITY, 1900–2012



Nate Silver, *The Signal and the Noise – The Art and Science of Prediction*



Les systèmes complexes sont imprévisibles... Et après ?

- ❑ **L'imprévisibilité se manifeste par des émergences :**
 - **auto-adaptation, évolution, pour les systèmes vivants**
 - **émergences non désirées, heureuses ou non, suspectes dans le premier cas, potentiellement catastrophiques (car « pourtant tout avait été fait ») et appelant une correction dans le second, pour les systèmes artificiels**
- ❑ **Face à ce constat, faut-il se contenter d'une déclaration définitive : « les systèmes complexes sont fondamentalement, par nature, imprévisibles » : par ignorance de certaines interactions, par mauvaise caractérisation des interactions (les boucles intriquées, à constantes de temps très éloignées, en économie ou en finance, ou plus simplement les dispersions des caractéristiques), du fait de comportements chaotiques, par ignorance des signaux faibles... ?**
- ❑ **Ou adopter l'attitude de l'ingénieur face à un système artificiel : on fait tout pour qu'il n'y ait pas d'émergences non désirées, tout en sachant que le système est robuste jusqu'à un certain point, dans la mesure où l'on a fait un effort considérable pour prévoir son comportement dans un contexte (utilisation, environnement) donné ; c'est la question de la maîtrise des marges, plus généralement de la maîtrise des risques. Mais justement, comment identifier et caractériser, en économie, par exemple – système à la fois artificiel et vivant -, les interactions multiples, à court terme, à moyen terme, à long terme, ces dernières étant d'ailleurs brouillées par l'évolutivité naturelle et inévitable – la non-stationnarité – du système économique ?**