

Concepts importants dans les systèmes complexes

1) Théorie du chaos

- 1) Définition
- 2) Historique
- 3) Equations de E. Lorenz
- 4) Représentations graphiques du comportement d'un système
- 5) Attracteurs
- 6) Bassin d'attraction,
- 7) Bifurcation, point de basculement
- 8) Disciplines concernées
- 9) Prévisibilité ?
- 10) Apports de la théorie du chaos

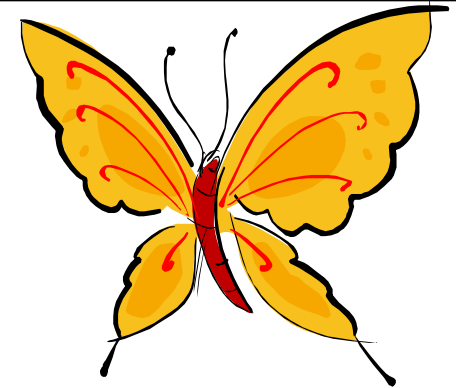
2) Simulation basée sur agents (ABS)

- 1) Objectifs et méthodes
- 2) Exemple : écosystème proie prédateur
- 3) Une réponse à la faiblesse des mathématiques
- 4) Forces de l'ABS
- 5) Quand l'ABS est-elle utile
- 6) Cas d'utilisation effective d'ABS

1) Théorie du chaos

1) Définition

- La théorie du chaos étudie les systèmes dynamiques :
 - **Extrêmement sensibles aux conditions initiales** : croissance exponentielle en fonction du temps de l'impact d'une modification des conditions initiales
 - **Fortement récurrents**
- **Objectif** des spécialistes de la théorie du chaos : **recherche d'un ordre caché dans un désordre apparent**
- **Exemple** : systèmes météorologiques
 - **Sensibilité aux conditions initiales** : effet papillon
 - **Forte récurrence** : évolution apparemment cyclique des conditions météorologiques



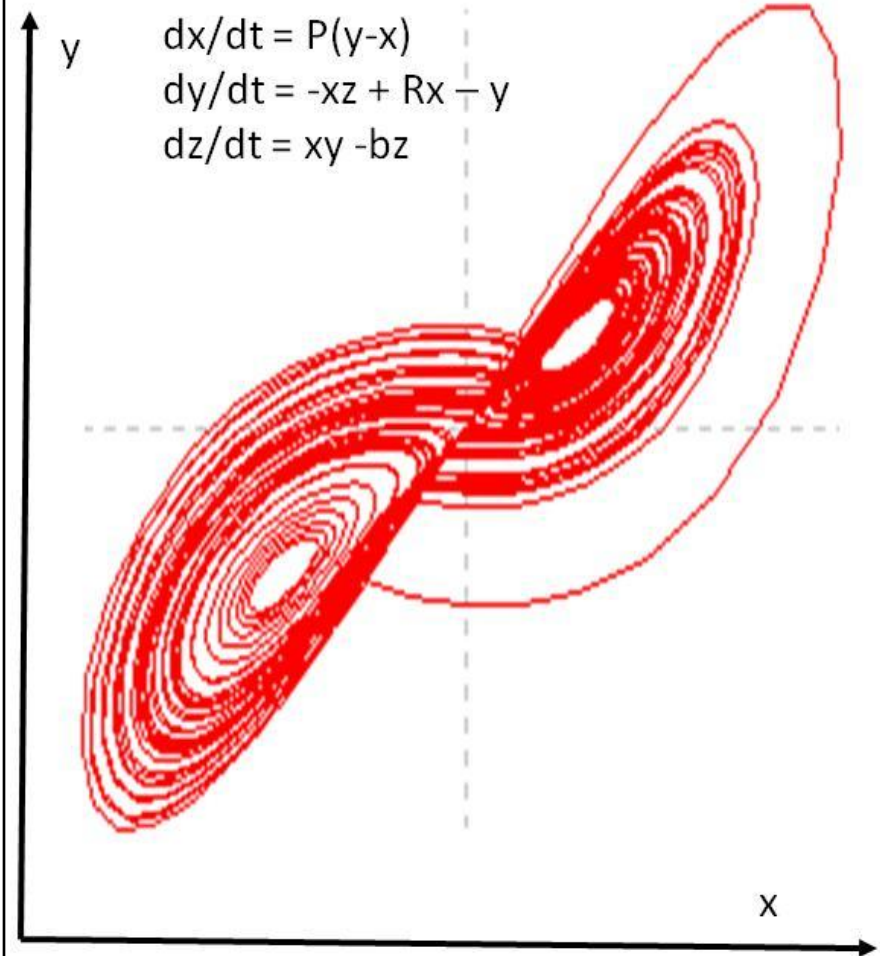
1) Théorie du chaos

- **Fin XIX^{ème} siècle :**
 - Henri Poincaré découvre un chaos caché dans un système de 3 corps et dans le système solaire
 - La découverte de H. Poincaré tombe dans l'oubli
- **Décennies 1960 et 1970**
 - **Edward Lorenz** constate l'extrême sensibilité aux **conditions initiales des systèmes dynamiques d'équations non linéaires** en faisant des simulations sur ordinateur d'une application de météorologie
 - **Vif succès médiatique** de la théorie du chaos dans les milieux scientifiques grâce aux progrès fulgurants des ordinateurs
 - **Généralisation parfois fantaisiste aux systèmes empiriques (physique, sociaux, économiques) parce qu'ils sont modélisés avec des équations non linéaires.**

1) Théorie du chaos

3) Equations de E. Lorenz

- Représentent le réchauffement d'un fluide dans un espace à 2 dimensions
- Seulement 3 variables : X, Y, Z.
 - X = amplitude de vitesse du fluide
 - Y = gradient de température du fluide
 - Z = distorsion du gradient de température
- Grand succès médiatique dans les milieux scientifiques
- Simulation :
<http://chaos.wlu.edu/106/programs/lorenzdes.html#activ>

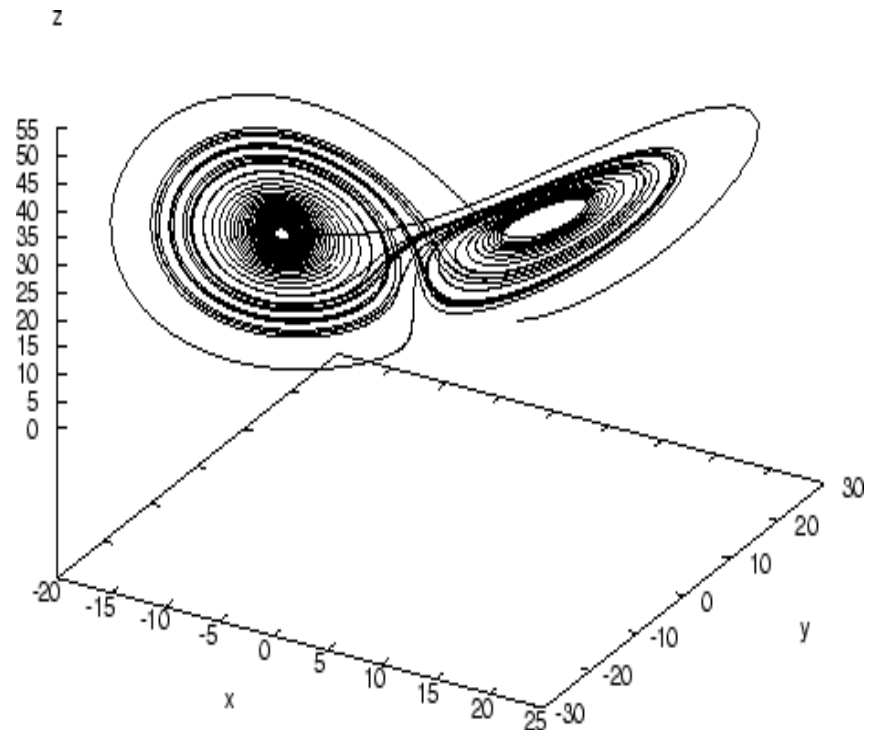


1) *Théorie du chaos*

4) Représentations graphiques du comportement d'un système

- Chaque point $X_1(t)$, $X_2(t)$, $X_3(t)$... dans l'espace des variables représente l'état du système à l'instant « t ».
- Trajectoire du point = évolution de l'état du système
- Difficulté de représentation graphique intelligible si nombre de variables > 3
 - Il faut alors choisir des sous-ensemble de 2 ou 3 variables pertinents pour le phénomène étudié

Représentation des équations de Lorenz dans l'espace X,Y,Z.

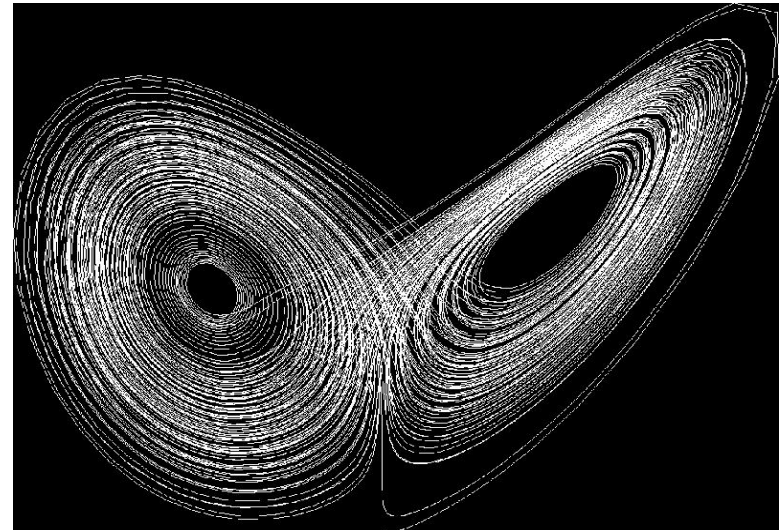
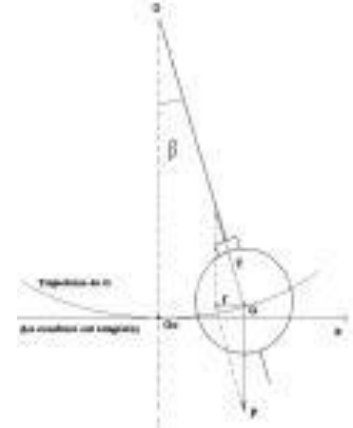


5) Attracteur

1) Théorie du chaos

- Un attracteur est un domaine de convergence des évolutions (trajectoires) d'un système.
- Un système peut avoir plusieurs attracteurs
- Types d'attracteurs :
 - Ponctuel : bille dans un bol
 - Cyclique : pendule
 - **Etrange** : trajectoire chaotique au sein d'un bassin d'attraction. Ils sont fréquents :
 - Mathématiques : équations dynamiques non linéaires
 - Météo
 - Systèmes économiques

<http://chaos.wlu.edu/106/programs/lorenzdes.html#activ>



1) *Théorie du chaos*

6) Bassin d'attraction

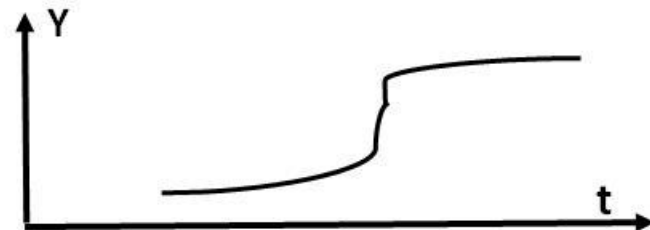
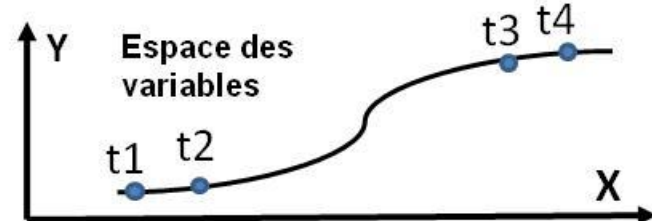
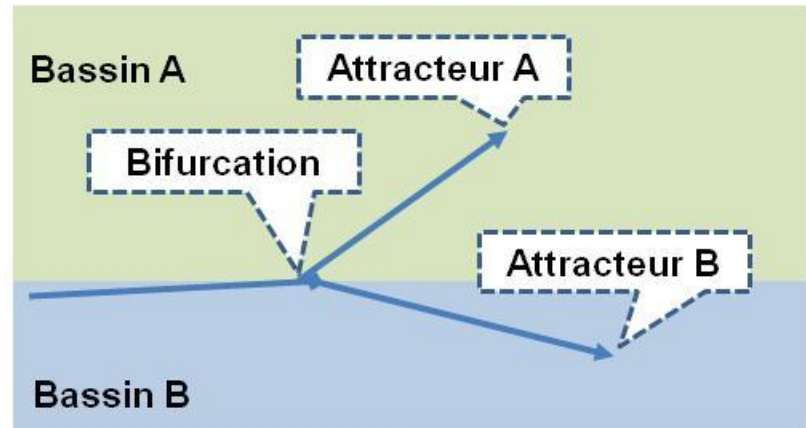
- **Un bassin d'attraction est associé à un attracteur**
 - **Ensemble des états dans l'espace des variables tels que le système converge vers l'attracteur**
- **Trajectoire d'un ballon lancé dans un paysage montagneux :**
 - **Fond d'une vallée = attracteur**
 - **Vallée = bassin d'attraction**



1) Théorie du chaos

7) Bifurcation, point de basculement

- **Point de bifurcation :**
 - Alternative de deux trajectoires sous l'influence d'une petite cause.
 - Système à la frontière de deux bassins d'attraction
- **Point de basculement (tipping point)**
 - Evolution très rapide de l'état d'un système sur sa trajectoire
 - Accélération de la convergence vers un attracteur
 - Pas d'alternative de trajectoire



1) *Théorie du chaos*

8) Disciplines concernées par la théorie du chaos

Exemples de systèmes relevant de la théorie du chaos

- **Sciences formelles (mathématiques)**
 - **Systemes d'équations dynamiques non linéaires** (un système est non linéaire si l'un de ses termes est un produit de 2 variables)
 - Exemple : équations de E. Lorenz
- **Sciences empiriques**
 - **Météorologie.** Variables : pression, température, vitesse du vents...
 - **Ecosystèmes.** Variables : effectifs des populations, ressources disponibles...
 - **Systemes économiques**
 - **Biologie**
 - **Neurologie**

Les systèmes relevant de la théorie du chaos sont-ils prévisibles ?

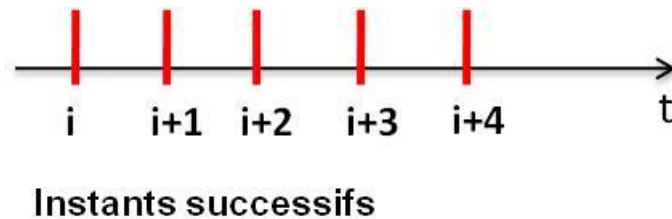
- Pour les **mathématiciens** :
 - ils sont totalement **prévisibles** mêmes dans leurs comportements apparemment **chaotiques** : systèmes formels dont les conditions initiales sont précisément définies.
 - d'où l'expression « chaos déterministe »
- Pour les **physiciens** ce sont des systèmes empiriques (météorologiques, économiques) :
 - **Prévisibles** quant à leur convergence vers des attracteurs
 - **Imprévisibles** quant à leurs positions au sein des attracteurs:
 - Les exigences de précision pour une prévision croissent exponentiellement avec sa portée.
 - Impossibilité de définition rigoureuse de conditions initiales
 - Impossibilité dénombrer l'ensemble des conditions initiales

- **Enrichissement de la connaissance des systèmes formels et empiriques représentés par des équations dynamiques non linéaires :**
 - Extrême sensibilité aux conditions initiales qui était souvent sous-estimée (les exigences de précision sur les conditions initiales croissent exponentiellement avec la portée des prévisions)
 - Existence d'un ordre représenté par les bassins d'attraction et attracteurs là où on ne voyait qu'un désordre.
- La démarche spontanée du scientifique devient :
 - Quelles trajectoires ?
 - Quels attracteurs et bassins d'attractions ?
 - Quelles bifurcations ?
 - Quels points de basculement ?

2) Simulation basée sur agents

1) Objectifs et méthodes

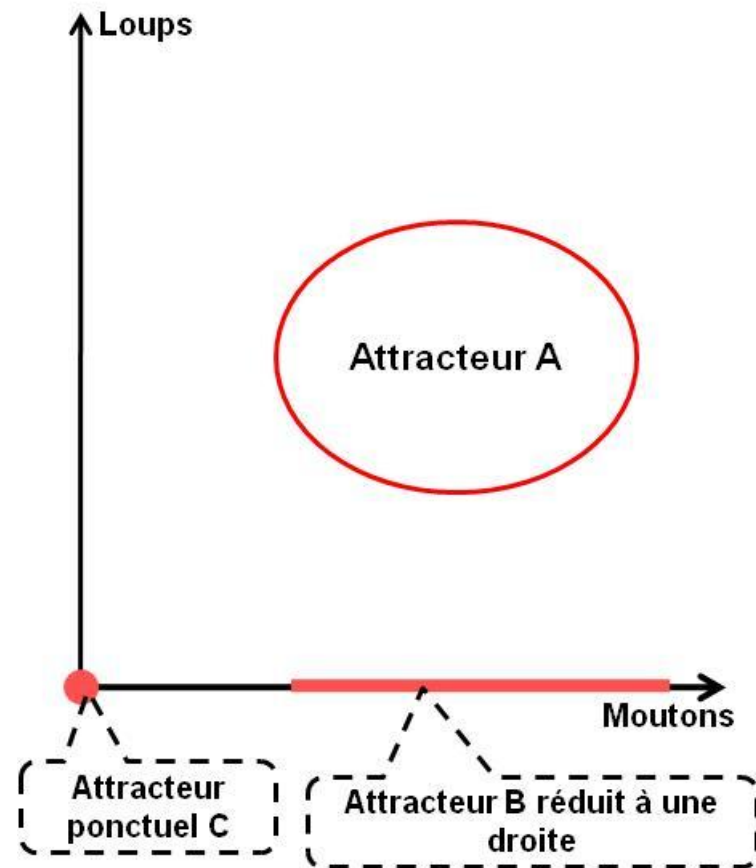
- **Objectifs** : étudier le comportement dynamique des systèmes complexes
- **Méthode itérative** : l'état **complet** du système à l'instant « t_{i+1} » est calculé en fonction de l'état **complet** à l'instant « t_i » :
 - ✓ les états des agents
 - ✓ les interactions
- **Méthode holistique** parce qu'elle prend en compte à chaque instant « t_i » l'état **complet du système**
- **Succès dû au développement de l'informatique**



2) Simulation basée sur agents

2) Exemple : écosystème proie/prédateur (loup/mouton)

- **Trois attracteurs:**
 - **A : Coexistence dynamique des loups et moutons**
 - **B : Extinction des loups et maintien des moutons**
 - **C : Extinction totale des loups et mouton**



2) Simulation basée sur agents

3) Une réponse à la faiblesse des mathématiques

- **La simulation basée sur des agents (ABS) est une réponse à la faiblesse des mathématiques classiques :**
 - **Impossibilité de mise en équation due à :**
 - **Variété des agents et de leurs règles de comportement.** A chaque instant tous les agent peuvent être différents.
 - **Evolution des règles de comportement des agents** en fonction de leur vécu (historique des stimuli émis et reçus)
 - **Non linéarité des règles de comportement**
 - **Lois des grands nombres non applicables**
 - **Equations non linéaires insolubles**

2) Simulation basée sur agents

4) Forces de l'ABS

- Les alternatives à l'ABS sont les simulations basées sur des **agrégats d'agents**
- Forces de l'ABS vis-à-vis des alternatives :
 - **Adéquation au système réel** : les agents, les interactions, les émergences
 - **Flexibilité** : facilité de modification du nombres des agents, de leurs règles de comportements, analyse d'impact des règles de comportement des agents
 - **Simulation des cas extrêmes** : emballement, extinctions... La simulation basées sur des agrégats tend au contraire à lisser les phénomènes

2) Simulation basée sur agents

5) Quand l'ABS est-elle utile ?

- 1) Les interactions des agents et leurs règles de comportements sont **complexes, non-linéaires ou discontinues**
- 2) Les agents
 - 1) ont des **capacités de mémorisation, d'adaptation, d'apprentissage**
 - 2) sont influencés par leurs vécu, par les autres agents
- 3) Les agents sont **hétérogènes**
- 4) **La structure des interactions est complexe** et hétérogène (grappes, cliques, connecteurs...)

2) Simulation basée sur agents

6) Cas d'utilisation effective de l'ABS

Simulation des marchés

- ✓ **Simulation du marché Nasdaq.**
Etude d'impact d'une augmentation du nombre de décimales dans les transactions.
Résultats contraire à l'intuition : augmentation des écarts de prix entre offres de vente et d'achat.
- ✓ **Simulation du marché des services d'accès à l'Internet**
Résultats : émergence des business models basés uniquement sur les revenus de publicité
- ✓ **Simulation de l'embourgeoisement d'une zone résidentielle**
Quatre type d'agents : étudiant, professionnel, non professionnel, senior
Résultat : explication des processus d'embourgeoisement d'un quartier, impact sur les loyers, impact des investissements
- ✓ **Simulation du marché de la fourniture d'eau pour l'habitat**
Résultat : tarification pour réduire la consommation totale d'eau (tarifs progressifs, création d'une bourse d'échanges d'eau à tarif réduit)

2) Simulation basée sur agents

7) Cas d'utilisation effective de l'ABS (suite)

- **Simulation de mouvements des agents:**
 - trafic routier, (TRANSIMS)
 - mouvements des personnes dans un supermarché (TRANSTORE) , dans un parc à thèmes
 - mouvement de foules en panique
- **Simulation des contagions :**
 - propagation des maladies,
 - propagation des engouements
- **Simulation des organisation humaines**
 - impact des règles d'attribution des primes aux managers d'une entreprise