

EXPLORER UN SYSTÈME (COMPLEXE) ET SES SENSIBILITÉS AVANT TOUTE ÉTUDE LOURDE

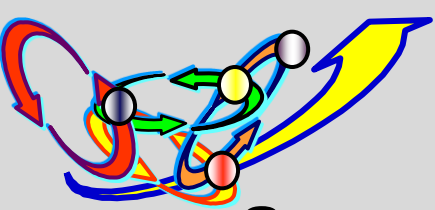
Contribution au

**« Vademecum pour l'étude d'un système complexe
par la systémique »**

V6

**Reprise et mise à jour de la présentation du Santa Café du 20 juin 2016
Avec intégration des questions et réponses de la séance du 9 janvier 2017**

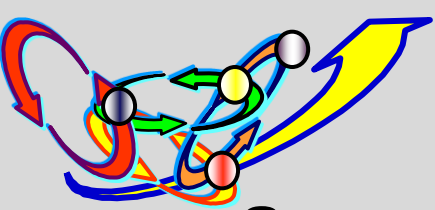
Patrick FARFAL



[*] Termes plutôt réservés aux Systèmes artificiels « techniques »

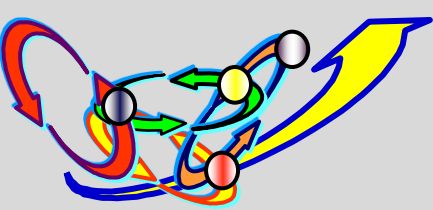
Sommaire

- ❑ Place dans le Vademecum
- ❑ Explorer le Système...
 - Explorer *LE* Système ?
 - Quel type de Système ? Et que veut-on faire ? (cf. ambition)
 - Identification des Sous-Systèmes ou des Sous-Ensembles [*] et de leurs frontières (interfaces [*])
 - Identification des Interactions (ou *Couplages* [*])
 - Toutes les interactions ? Combien ? Systèmes de Systèmes
 - Signaux faibles (systèmes non chaotiques, chaotiques, sujets à bifurcations)
 - Simplicité et complexité : règles simples vs émergences complexes
 - ❑ Explorer le Système et ses sensibilités : Caractérisation des Interactions
 - Qu'est-ce que caractériser une interaction ?
 - Interactions/ Causalités/ Influences
 - Quantifiables : linéaires, non-linéaires, en dynamique ; non quantifiables
 - Interactions avec l'environnement (perturbations [*])
 - Causalités/ Influences en cascade et/ou réciproques (boucles)
 - Intrication des interactions, dynamique temporelle, manque de robustesse, non stationnarité du système, ignorance des domaines de validité des modèles, effets des non-linéarités, couplage via les données, ignorance des signaux faibles



Sommaire

- ❑ **Attitudes à adopter**
 - **Ne pas confondre**
 - Oscillations/divergence, aléatoire, bifurcations, chaos
 - **Conduite à tenir**
 - Systèmes instables/ à comportement aléatoire/ à bifurcations/ chaotiques
- ❑ **Conclusions sur « Explorer le Système et ses sensibilités »**
- ❑ **Comment « faire avec » la complexité et l'imprévisibilité ?**
 - **Complexité**
 - Réduire les méconnaissances, en appliquant les méthodes et moyens de l'Ingénierie Système
 - Notamment par un recensement et une caractérisation des interactions, même cachées
 - Ne jamais perdre de vue la Finalité (délibérée ou de fait) pour comprendre
 - **Imprévisibilité**
 - S'en accommoder ou la contourner
 - L'apprécier en fonction du type de Système



Place dans le Vademecum (v6, 7 octobre 2016, avec amendements du GT JB, RP, PF du 7 novembre)

❑ I. COMPRENDRE LE PROBLÈME

- Fixer les objectifs de l'étude
- Définir l'ambition (limites dues aux difficultés inhérentes au système complexe étudié)
- Décrire soigneusement le système
- **Explorer le système avant toute étude lourde**
- Faire plusieurs schémas/ Les simplifier sans perdre l'intelligibilité
- Organiser la revue indépendante « Définition de l'étude »

❑ II. CONCEVOIR LE PLAN

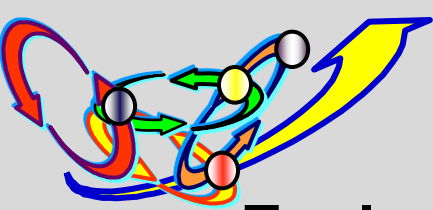
- Elaborer et concevoir la stratégie d'attaque
- Choisir ses outils

❑ III. METTRE LE PLAN À EXÉCUTION

- Choisir la méthode pertinente
- Expliciter ce que l'on doit comprendre impérativement
- Choisir un type de modèle
- Spécifier le modèle à partir du schéma
- Développer des scénarios et simuler
- Etablir des scénarios d'exploitation (analogues à des jeux de tests)
- Faire un grand nombre de simulations

❑ IV. EXAMINER LA SOLUTION OBTENUE

- Exploiter les résultats
- Vérifier la pertinence des résultats
- Organiser la revue de pairs « Fin de l'étude »



Explorer le Système...

On souhaite étudier le Système pour :

- Comprendre / Analyser / (Expliquer ?)
- Reproduire / Prévoir (le fonctionnement)
- Décider / Agir
- Agir / Réguler

□ Explorer *LE* Système ?

➤ Existant, plus ou moins inconnu

▪ Naturel

- Non biologique
- Biologique
- Social

Le « système du Monde » (Laplace)

Cellule

Ruche

▪ Artificiel

- Social
- Symbolique

Immigration/Intégration

Langue

➤ A faire (inconnu au départ)

▪ Artificiel

- Social
- « Technique »

Association

Avion

➤ Existant,

apparemment connu,

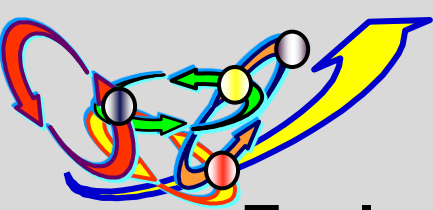
ou partiellement connu

▪ Artificiel « technique » Avion « crashé »

système de systèmes

On souhaite aborder le Système pour :

- Le concevoir
- Le réaliser
- Le mettre en œuvre
pour qu'il rende le service attendu



Explorer le Système...

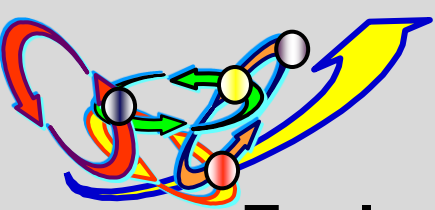
(*) en particulier les « Systèmes pour Faire » (Projet vs Objet)

(**) *Systèmes techniques* chez Bertrand Gille : archiviste et historien français (1920-1980) – historien des techniques (construction navale)

□ Différents types de Systèmes

Naturels	Non biologiques	Atomes, système solaire, temps (météo),...
Naturels	Biologiques	Cellules, organismes,...
Naturels	Sociaux	Organisations animales : ruches, colonies, essaims, meutes,...
Artificiels	Sociaux	Organisations humaines : équipes, entreprises, associations, villes... (*)
Artificiels	Symboliques	Langues, philosophie, religions, science, droit, art, ...
Artificiels (**) (« techniques »)	Auto-adaptatifs	Bâtiments, véhicules, systèmes d'information,...

vivants

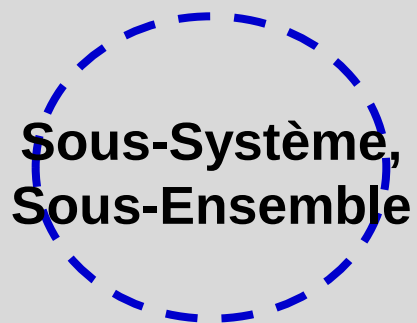
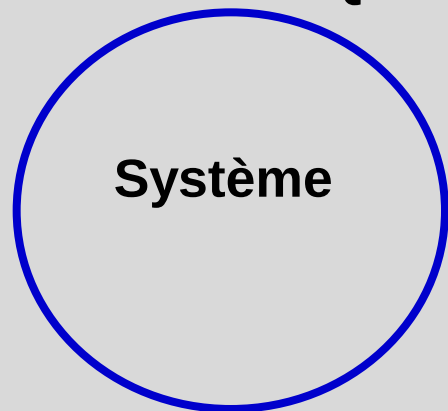


Explorer le Système...

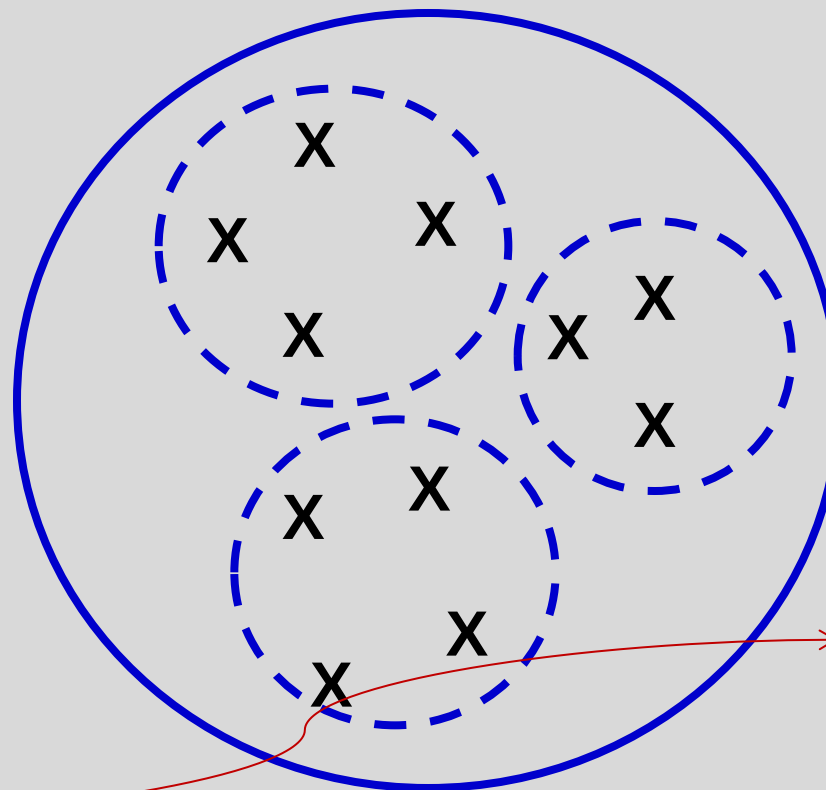
- Sous-Ensemble : terme d'Ingénierie Système, fréquent dans les *Systèmes Artificiels* (« techniques ») ; connotation organique
- Sous-Système : subdivision du Système, qui ne préjuge pas de sa réalisation (connotation fonctionnelle), donc utilisable *pour tout Système*

□ Identification des Sous-Systèmes ou des Sous-Ensembles

- Frontières – ou Membranes (déclinaison du *System of Interest*)
- Non indépendant de la suite (identification des interactions)
- Question des Interfaces dans les Systèmes artificiels techniques



Éléments
X X X X X



Quelle « Mission » (Finalité, délibérée ou de fait, i.e. intentionnelle ou non)
= Pour quoi/qui ?, Pourquoi ?

Quelles Fonctions ? = Quoi ?

Quels constituants ? = Comment, avec quoi ?

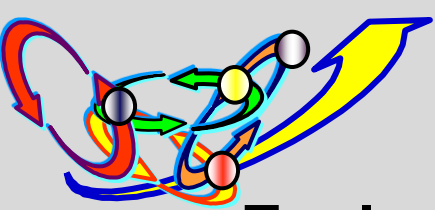
Classification par les échelles de temps ? (la dynamique)



Uniquement Hommes (organisations)
Sans Hommes (Avion, Missile)
Avec Hommes (Avion + Pilote humain, Centrale nucléaire)

Question du « Système d'Intérêt »

Impact de l'Homme (l'observateur) dans l'exploration du Système ?



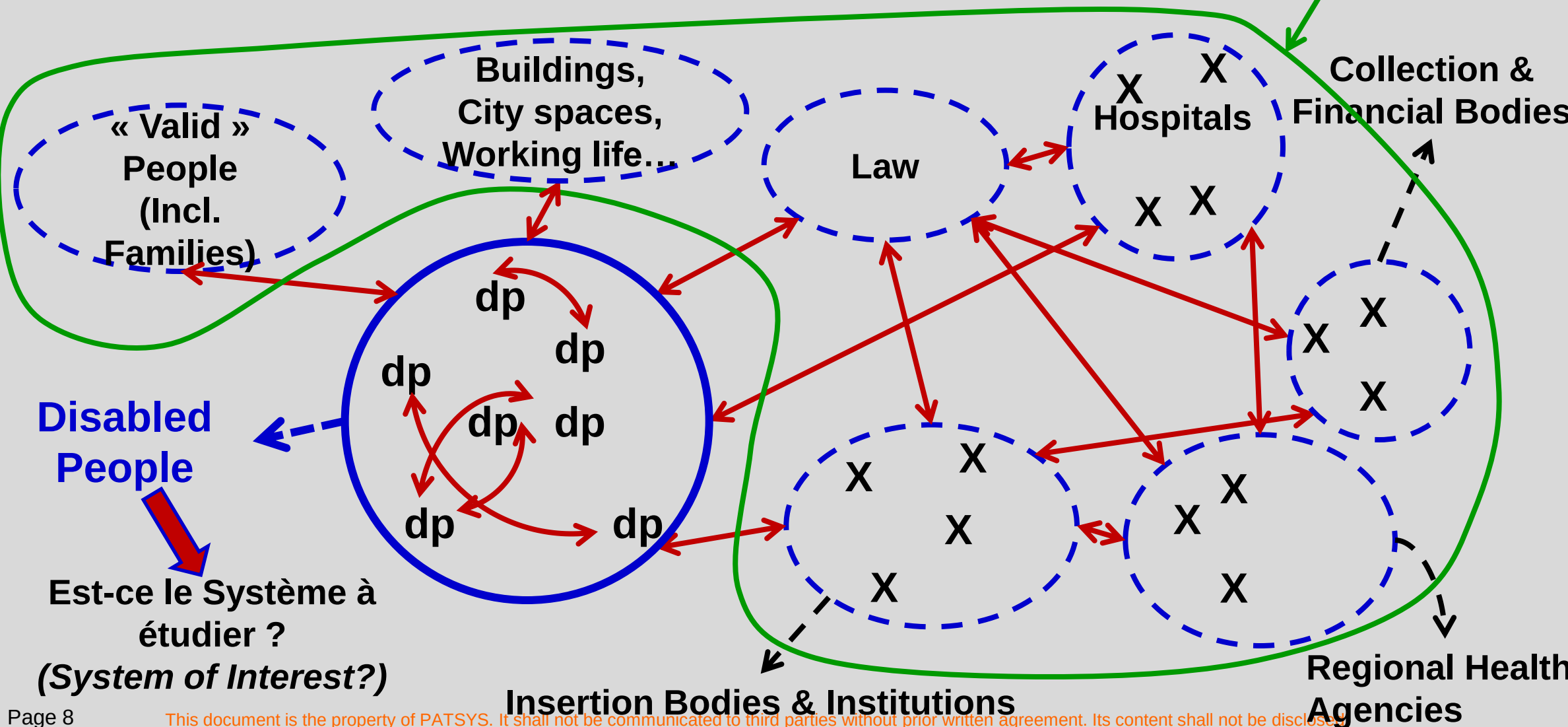
Explorer le Système...

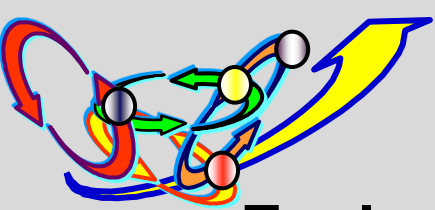
dp = disabled people

Environment
(Ecosystem of
Disabled
People)

□ Identification des Systèmes, des Sous-Systèmes ou des Sous-Ensembles

➤ Frontières – ou Membranes (déclinaison du *System of Interest*)



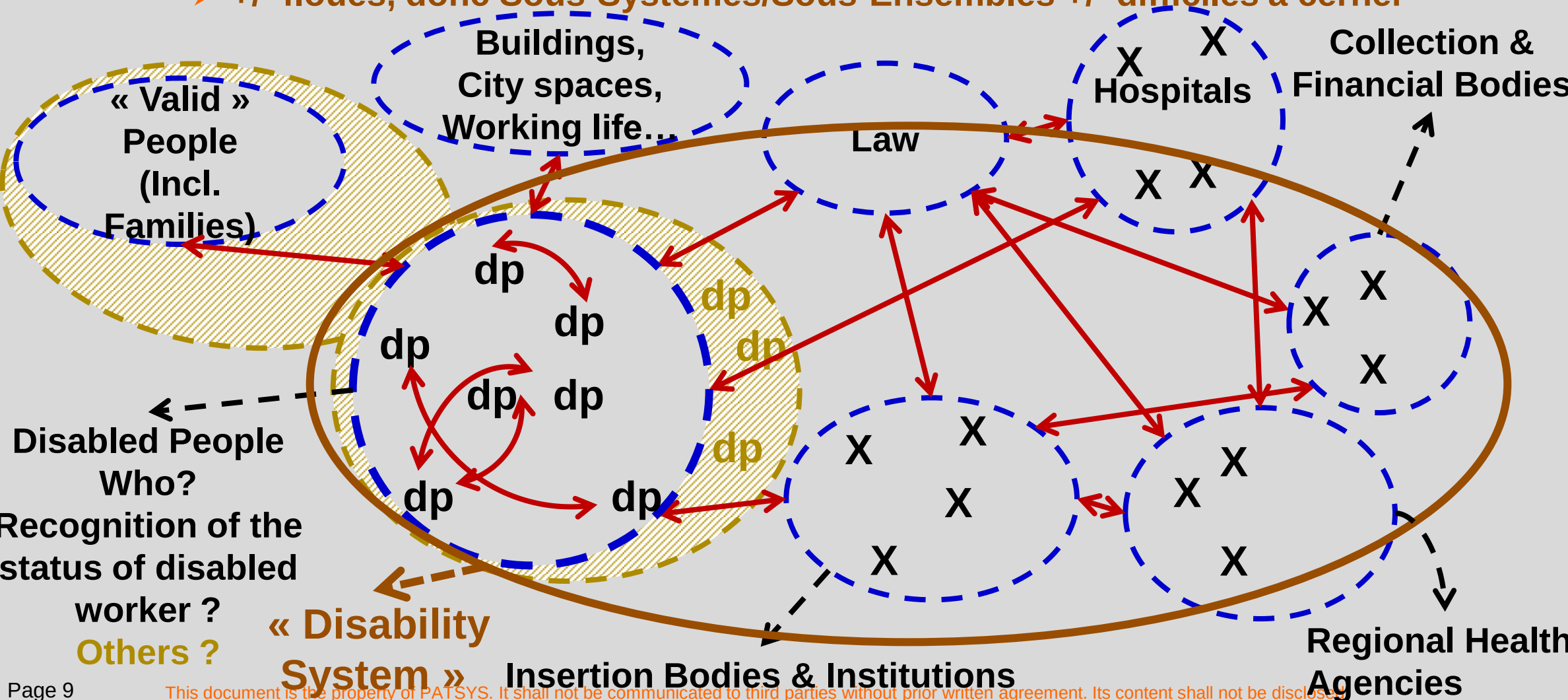


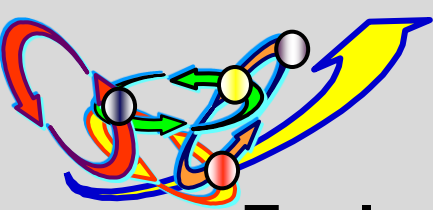
dp = disabled people

Explorer le Système...

□ Identification des Systèmes, des Sous-Systèmes ou des Sous-Ensembles

- Frontières : dépendent du Système considéré (*System of Interest*)
- +/- floues, donc Sous-Systèmes/Sous-Ensembles +/- difficiles à cerner



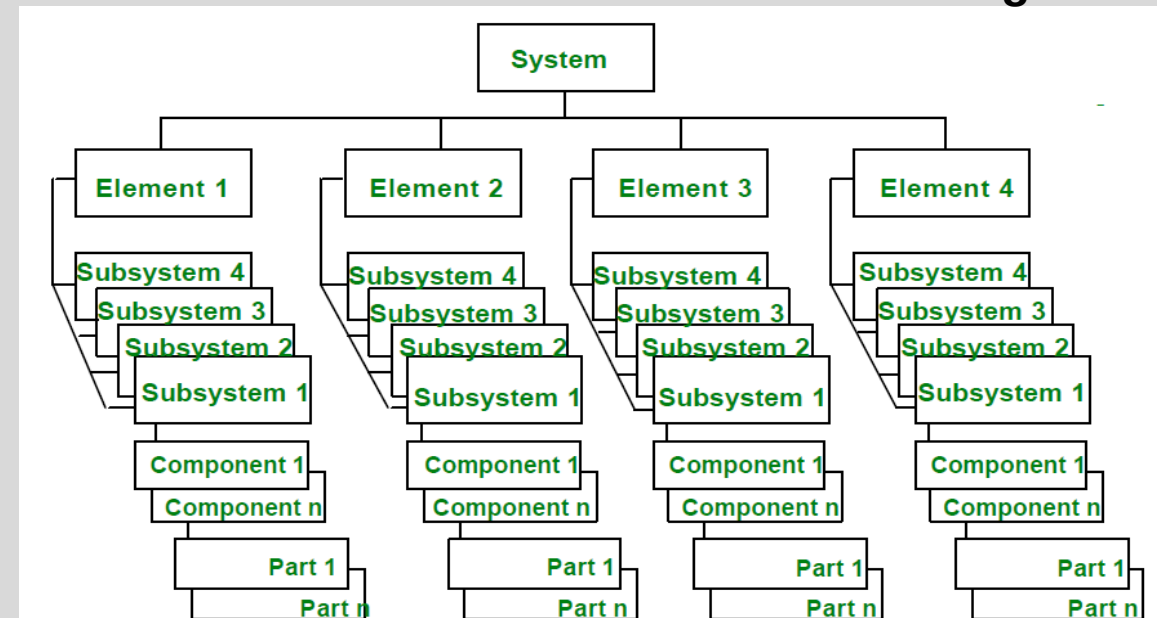
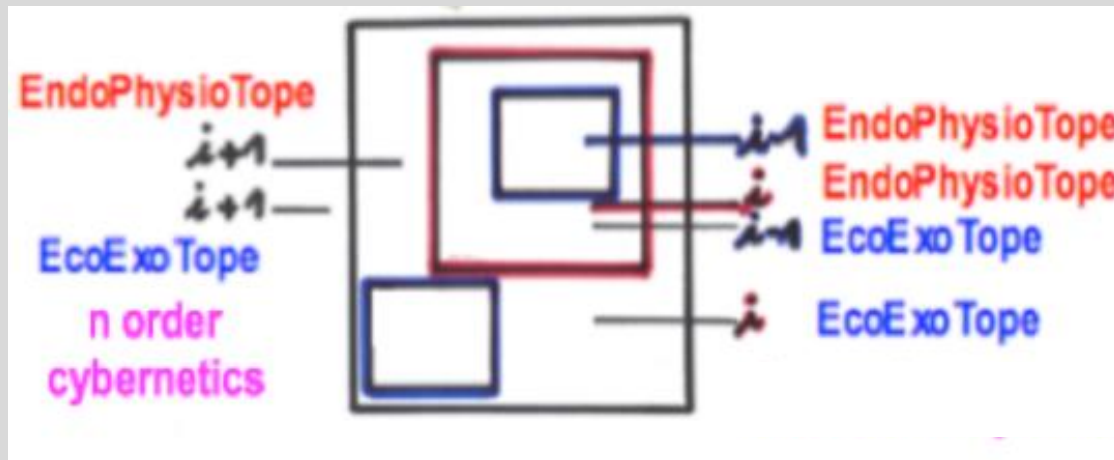


Explorer le Système...

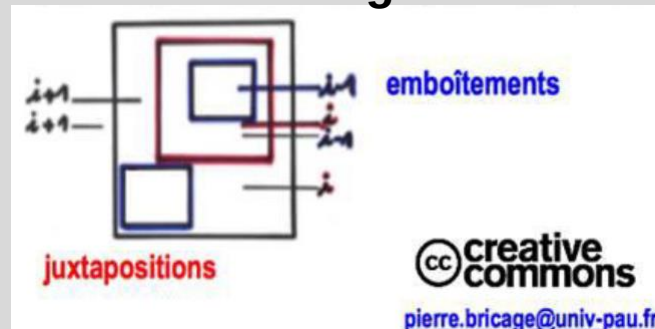
□ Identification des Sous-Systèmes ou des Sous-Ensembles

➤ Identification des Juxtapositions et Emboîtements

« Element » = Segment



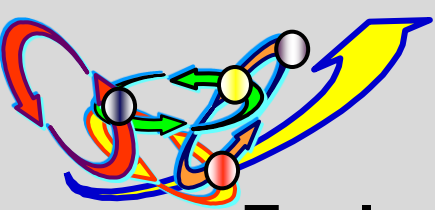
INCOSE SE Handbook: a « how to » guide for all engineers – Version 2.0 July 2000



CC creative commons

pierre.bricage@univ-pau.fr

Et autres...

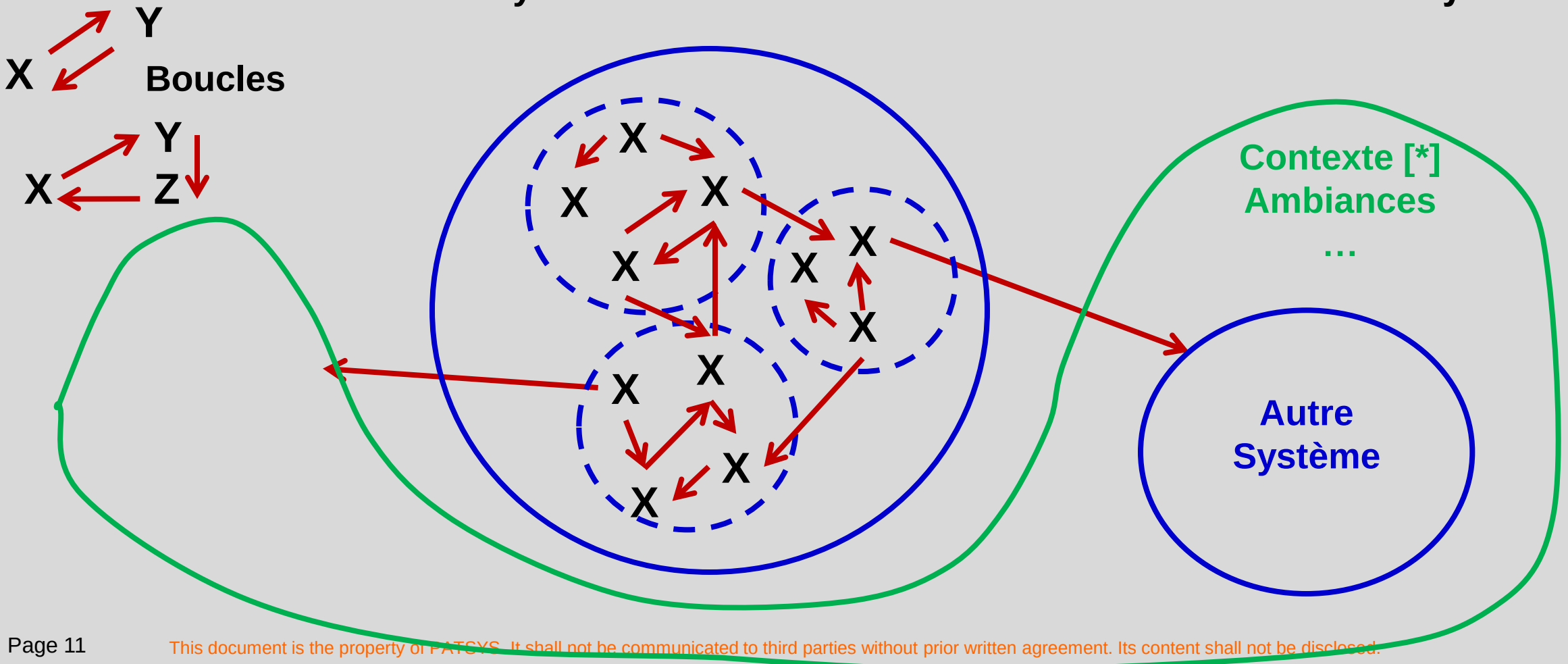


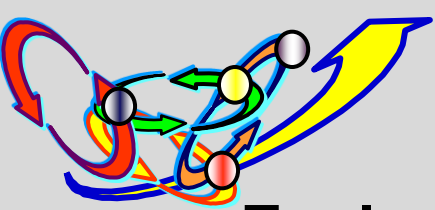
Explorer le Système...

[*] En fait, contexte = situation globale (Larousse) ; englobe l'*Utilisation* (à *quoi*, à *qui* cela sert-il ?) et l'*Environnement* (*dans quoi* cela évolue-t-il ?)

□ Identification des Interactions (ou *Couplages*)

- Entre Sous-Systèmes ou entre Sous-ensembles
- À l'intérieur des Sous-systèmes ou des Sous-ensembles
- Entre un Sous-système ou un Sous-ensemble et l'Environnement du Système





Explorer le Système...

□ Toutes les Interactions ?

- « *Donc toutes choses étant causées et causantes, aidées et aidantes, médiates et immédiates, et toutes s'entretenant par un lien naturel et insensible qui lie les plus éloignées et les plus différentes, je tiens impossible de connaître les parties sans connaître le tout non plus que de connaître le tout sans connaître particulièrement les parties.* »

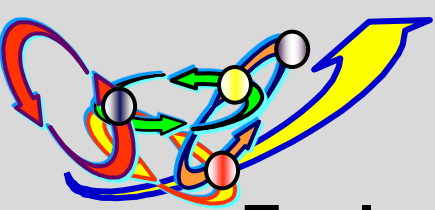
Blaise Pascal (1623-1662), Pensées, Part. I, Art. VI

- « *... cette faculté mentale qui permet de relier de manière rapide, appropriée et heureuse, des choses séparées et que nous appelons ingegno* » [mot italien sans équivalent exact en français]

Giambattista VICO, *De nostri temporis studiorum ratione*
(La Méthode des Etudes de notre temps) 1708

- « *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



Explorer le Système...

Interaction avec
l'environnement
fonctionnel d'un
équipement



1^{er} tir Ariane 5

4 juin 1996

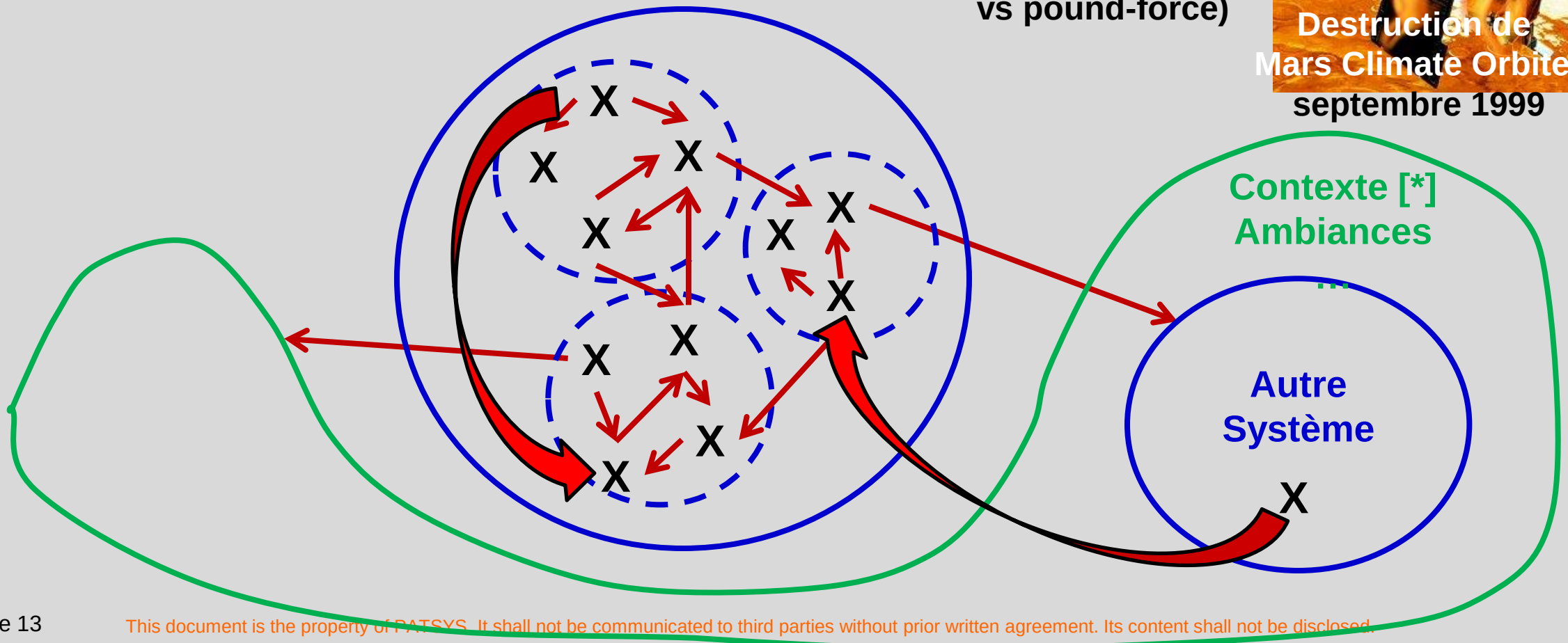
□ Toutes les Interactions ?

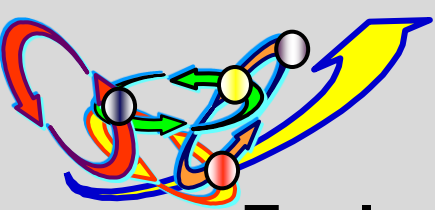
➤ Interactions cachées, inattendues

Interaction
(couplage) via les
données (newton
vs pound-force)



Destruction de
Mars Climate Orbiter
septembre 1999





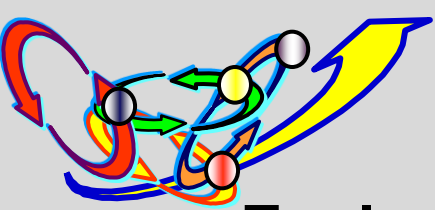
Explorer le Système...

□ Toutes les Interactions ?

➤ Autre exemple d'interaction cachée, inattendue



Parking d'un restaurant de pancakes situé à Meridian (Mississippi) effondré samedi 7 nov. 2015
La tranchée mesure 11 mètres de largeur et s'étend sur 100 mètres. ©Capture écran/NBC News



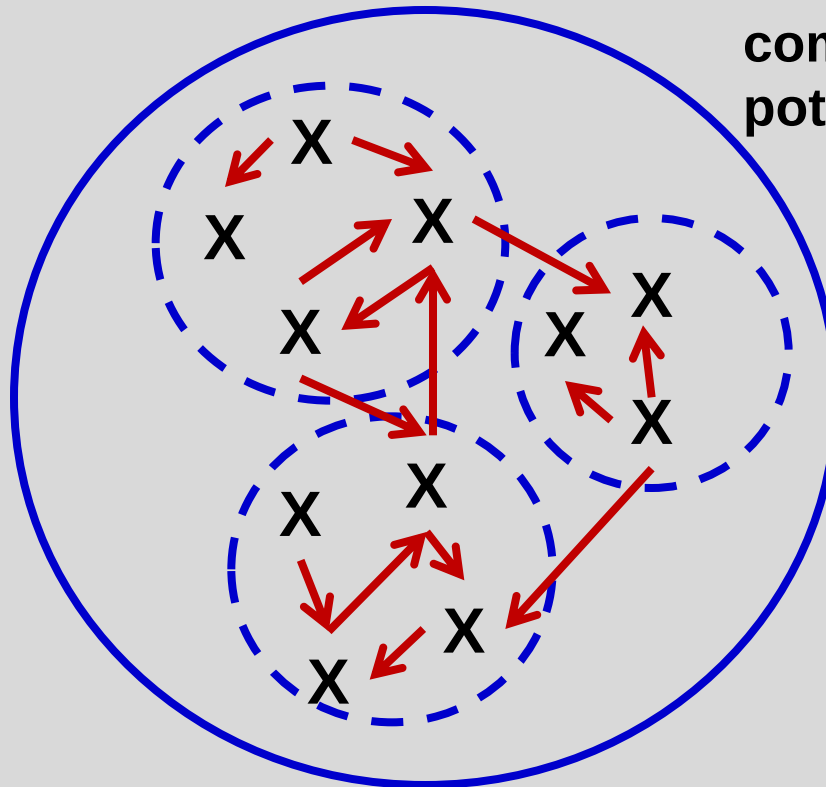
Explorer le Système...

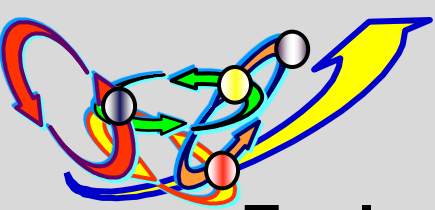
□ Toutes les Interactions ?

- Combien ?
- A priori $n(n-1) \sim n^2$

toutes possibles ?
toutes identifiables ? (cf. interactions cachées)
complexification par les boucles potentielles

n éléments X

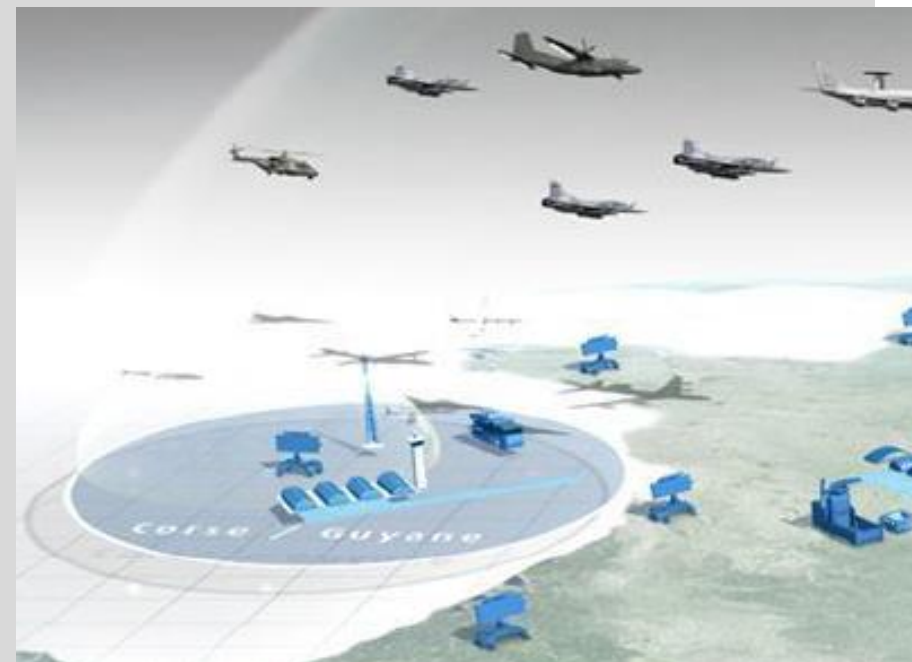
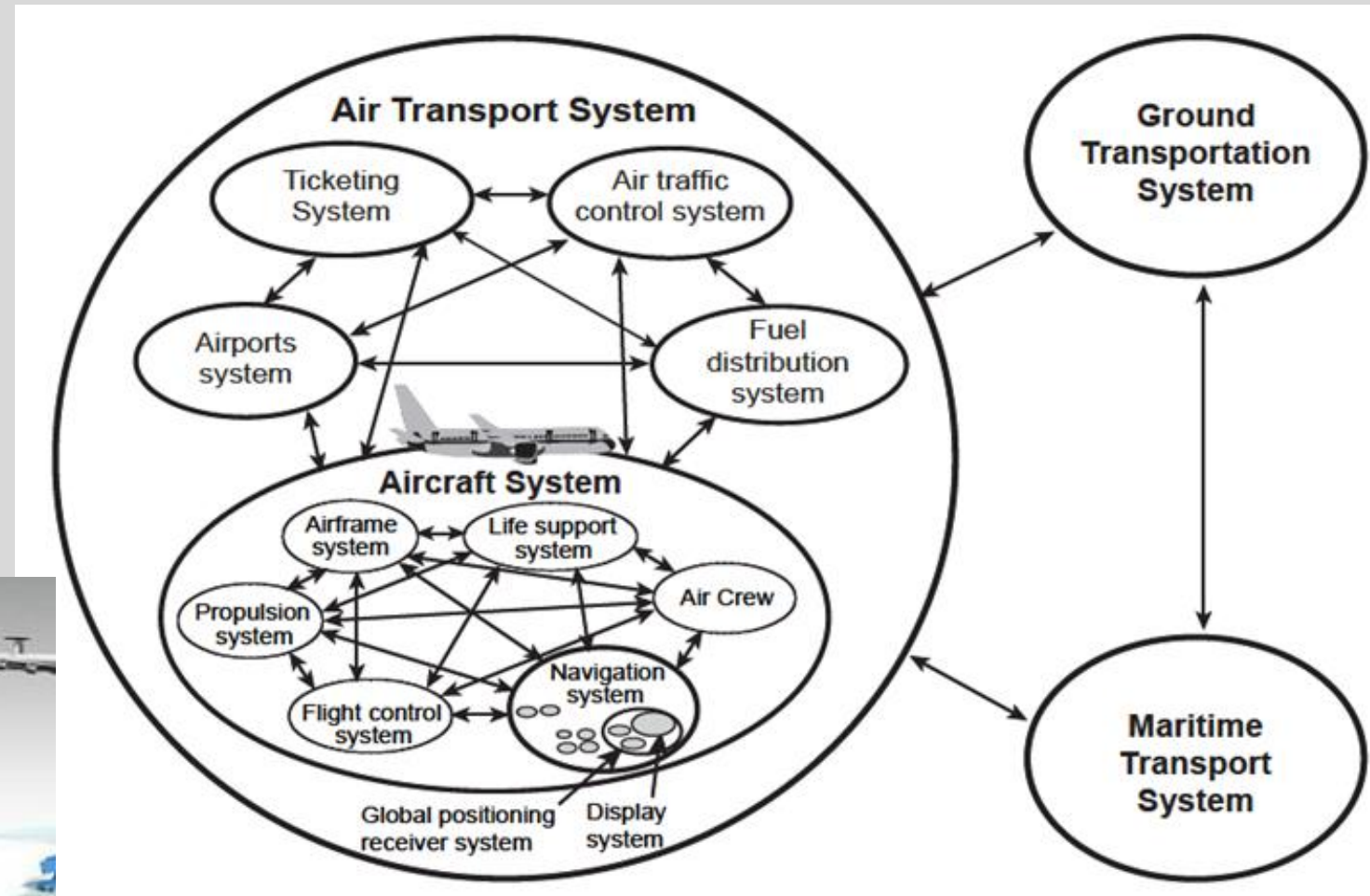
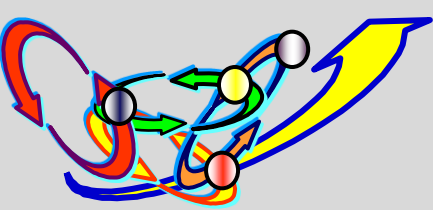


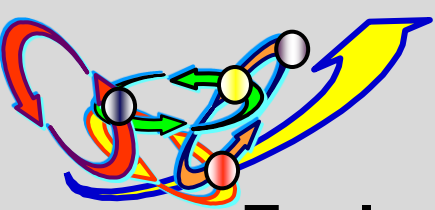


Explorer le Système...

□ Toutes les Interactions ? Systèmes de Systèmes

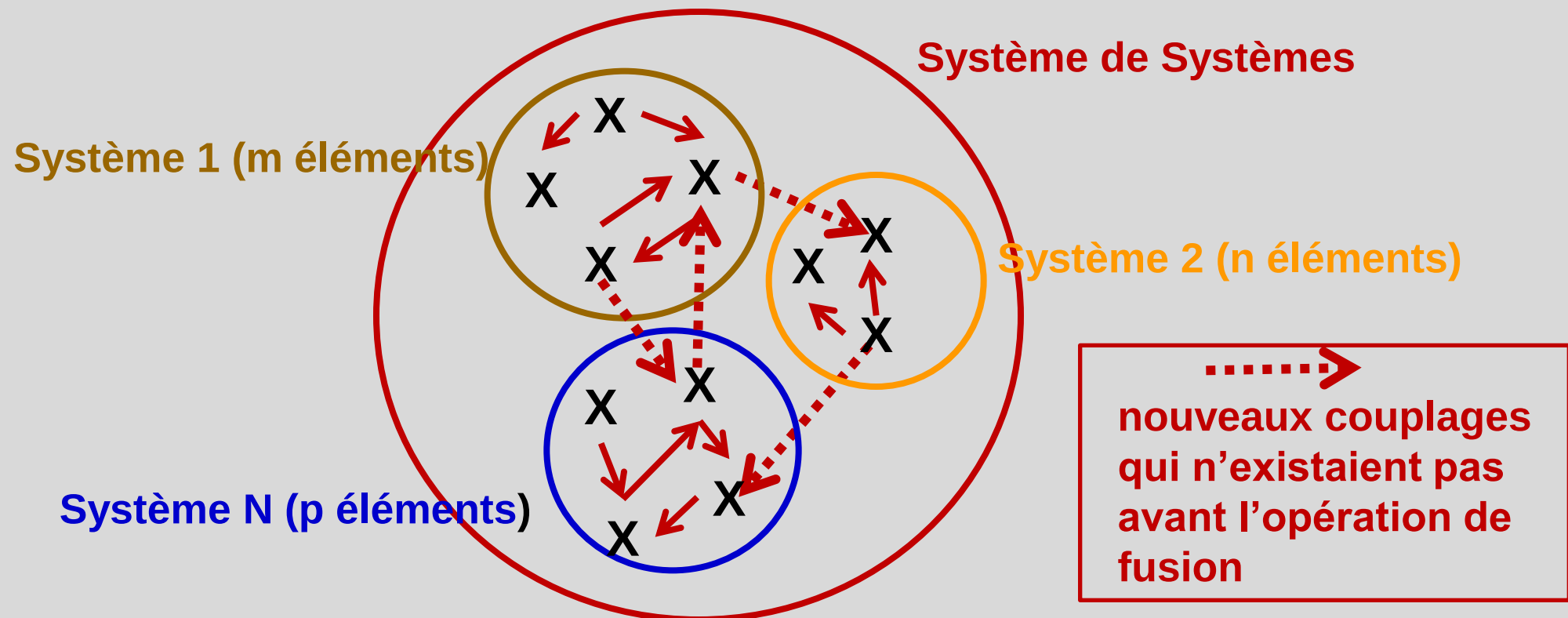
- Au sens propre, tout Système tant soit peu complexe est un Système de Systèmes
- Dans la pratique, on réserve le nom de « *Systèmes de Systèmes* » à des Systèmes qui **fédèrent des Systèmes existants** conçus :
 - à des époques différentes, donc à des stades différents de leur développement (conception, développement proprement dit, réalisation, mise en service, maintien en condition opérationnelle)
 - pour des Clients différents
 - donc avec des finalités voisines, ou connexes, mais pas nécessairement identiques
 - avec des spécifications d'environnement différentes, donc sans la contrainte nouvelle d'interopérabilité
 - par des équipes différentes
- En clair, ils n'ont pas été faits pour être en relation ; et on cherche à les faire interagir
 - Quid des Interfaces ?
 - Complexité supérieure
 - **Emergence de propriétés inattendues (gênantes ou non...)**

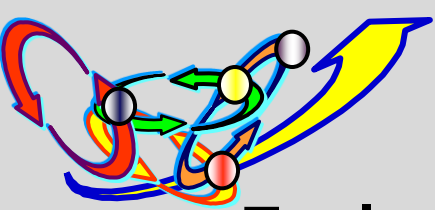




Explorer le Système...

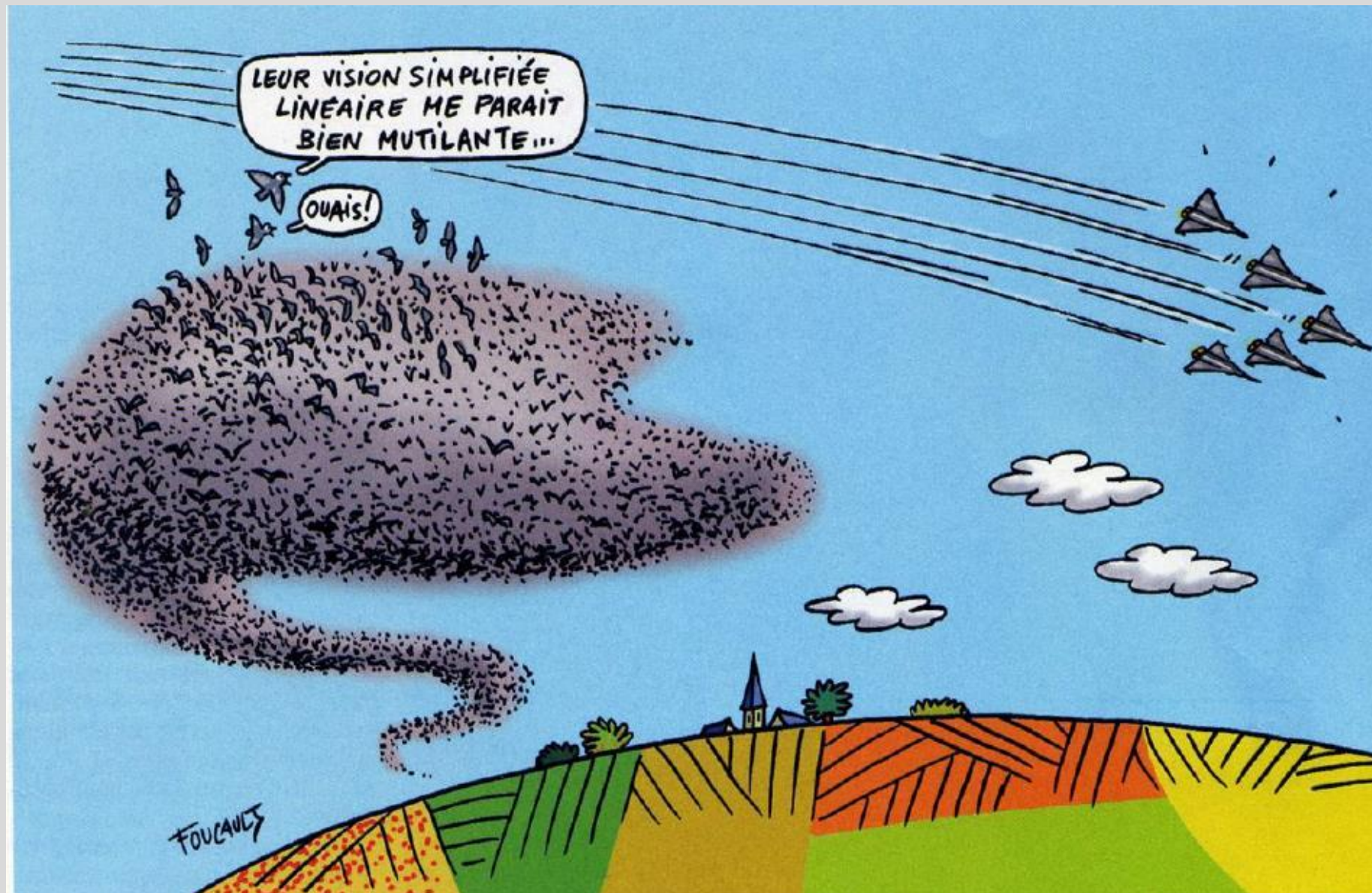
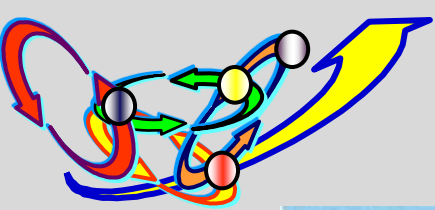
- ❑ **Toutes les Interactions ? Systèmes de Systèmes**
 - Combien d'Interactions ?
 - Entre N Systèmes : $N(N-1)$
 - Mais entre les éléments des divers Systèmes : $(m + n + p)(m + n + p - 1)$



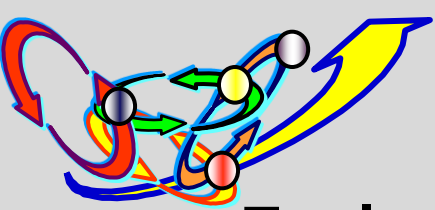


Explorer le Système

- ❑ **Simplicité et complexité : règles simples vs émergences complexes**
- ❑ **Simplicité des règles d'interaction au niveau local**
 - **Peuvent donner lieu à des émergences très complexes et/ou des comportements imprévisibles !**
 - **Volée d'oiseaux**
 - **Règles**
 - » respecter une distance avec ses voisins
 - » et avec tout autre obstacle
 - » aller à la même vitesse et dans la même direction que ses voisins
 - **Comportement**
 - ⇒ évolution naturelle, division autour d'un obstacle, puis regroupement
 - **Suite logistique $x_{n+1} = \mu x_n (1 - x_n)$**



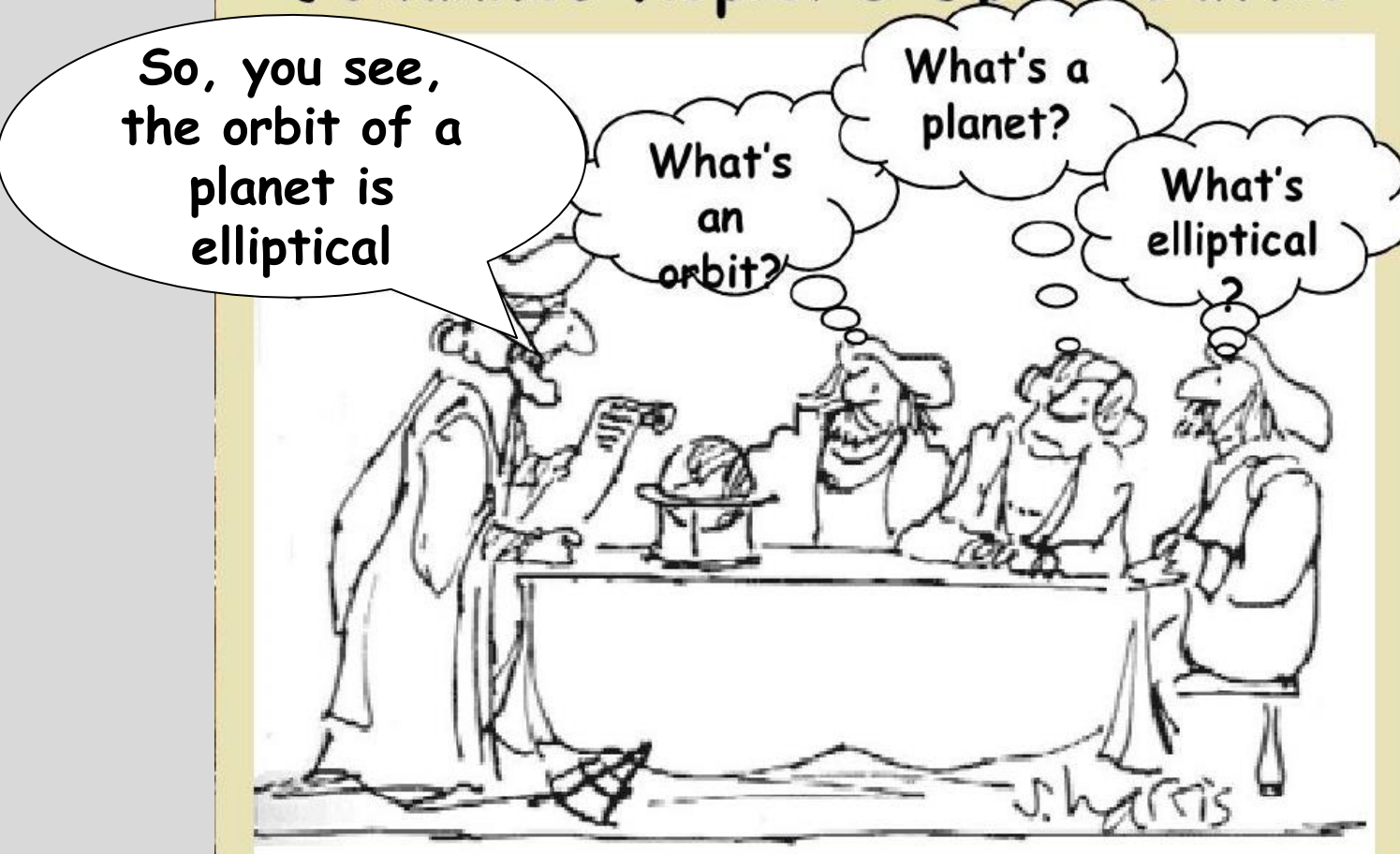
Source : Hilaire Giron (AFSCET & Président de l'Association des Amis de Teilhard de Chardin), *Evolution*



Explorer le Système et ses sensibilités

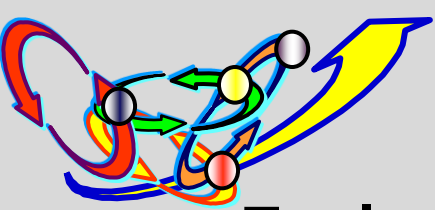
- ❑ Caractérisation des Interactions
- ❑ Qu'est-ce que caractériser une interaction ?

Johannes Kepler's Uphill Battle



Caractérisation de l'interaction
Soleil – planètes :
Trajectoires elliptiques

Premier « modèle » réaliste (modèle
d'observation de Kepler) = invariant
avant le modèle de compréhension
de Newton



Explorer le Système et ses sensibilités

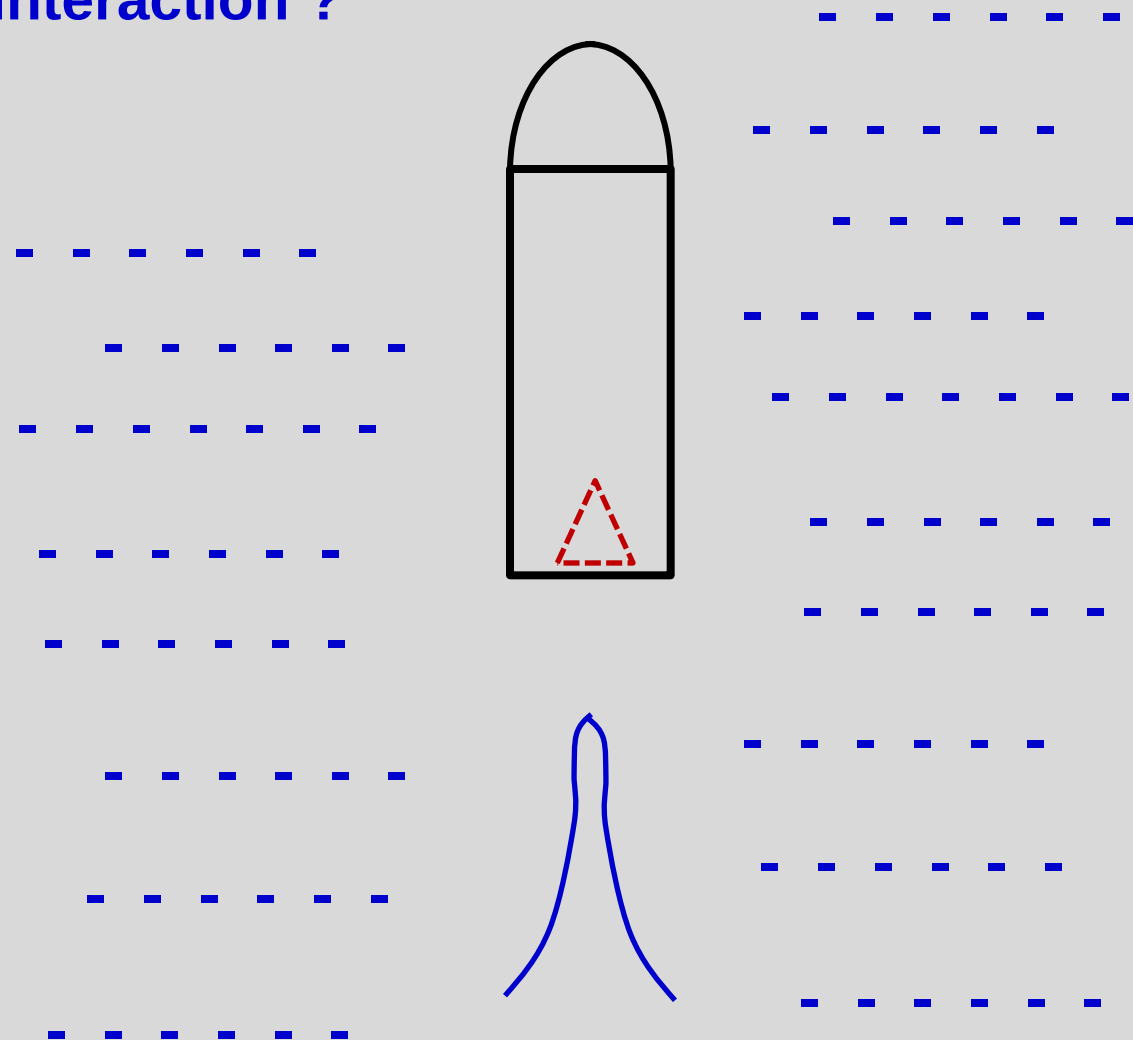
- ❑ Caractérisation des Interactions
- ❑ Qu'est-ce que caractériser une interaction ?

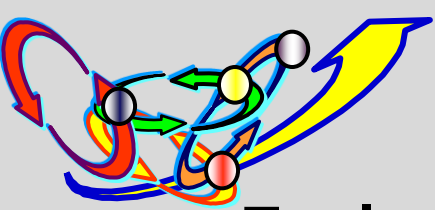


Echec du Trident D5 (1989)

Sous-estimation de l'effet du milieu marin sur le fond AR du missile
= mauvaise caractérisation du couplage entre le missile et son environnement

après les Polaris A1 (1960), A2, A3,
le Poseidon C3, le Trident C4...

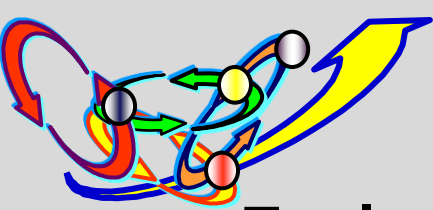




Explorer le Système et ses sensibilités

- ❑ **Caractérisation des Interactions**
- ❑ **Qu'est-ce que caractériser une interaction ?**
- ❑ **Quid si approche statistique ? (on ne connaît pas les relations de cause à effet)**
 - ⇒ **caractériser les corrélations**

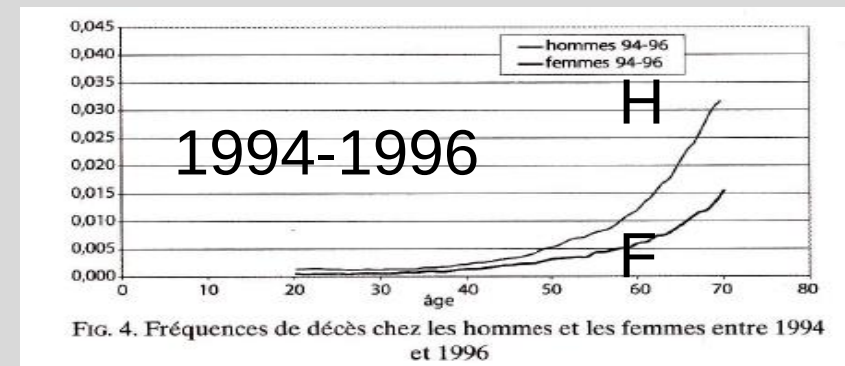
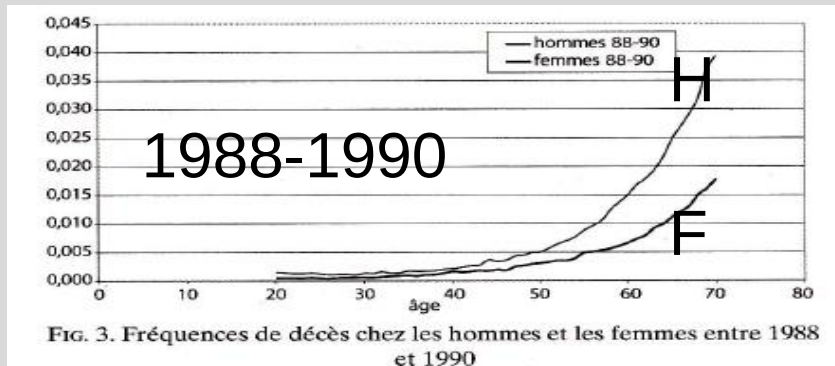
- ❑ **Ex. : Statistiques de décès H et F en Belgique**
 - **Que veut-on faire ? (= Objectif)**
 - **Etudier l'évolution dans le temps et avec l'âge des décès H et F, en comparer la fréquence et établir des corrélations...**
 - **... pour quoi ? (= Finalité de l'étude, ou Ambition)**
 - **Faire des prévisions à partir d'échantillons restreints**
 - **Classe du problème**
 - **Système à étudier, et d'abord à cerner (système d'Intérêt) : agents, relations**



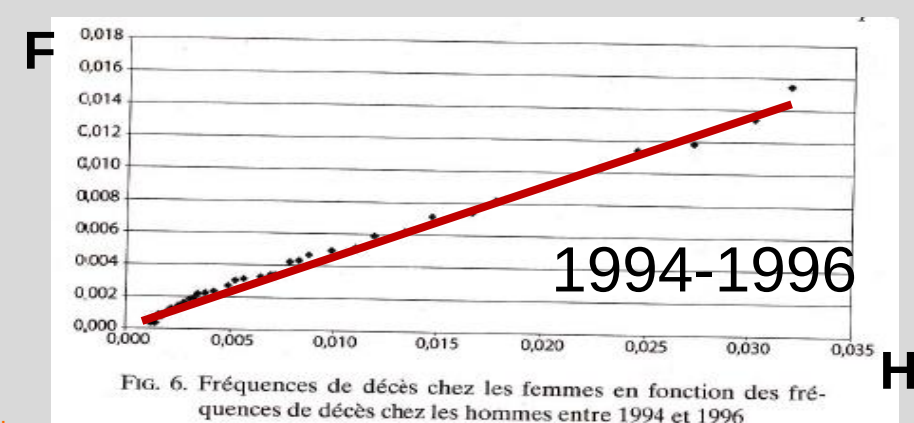
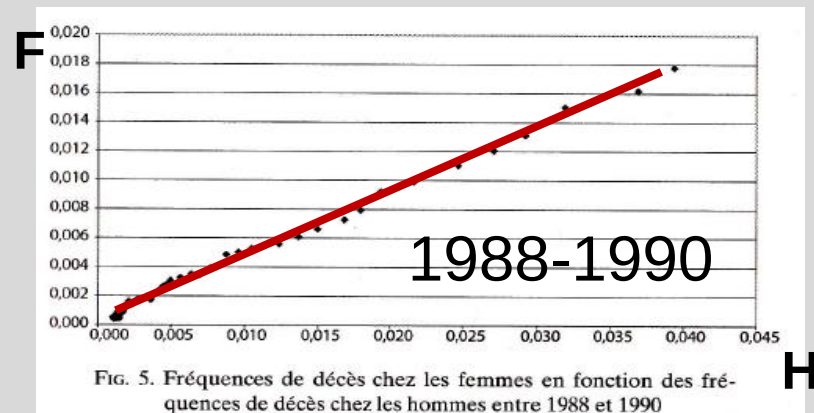
Explorer le Système et ses sensibilités

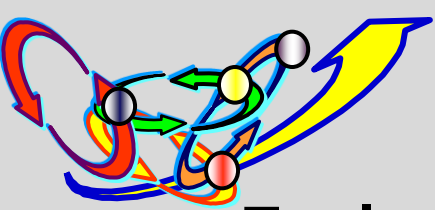
□ Ex. : Statistiques de décès H et F en Belgique

- Données : Institut National de Statistique belge
- Existe-t-il une étude antérieure ? Non
- Décrire et explorer soigneusement le Système, explorer ses sensibilités
 - Agents : Décès H et F, 20 à 70 ans
 - Périodes : 1988-1990 et 1994-1996



- Corrélation *fréquence des décès* $F = f$ (*fréquence des décès* H)





Explorer le Système et ses sensibilités

□ Caractérisation des Interactions

➤ Interactions/Couplages/Causalités/Influences

■ Quantifiables

- Linéaires
- Non-linéaires
- En dynamique
 - » Horizon temporel d'examen [*]
 - » Régime périodique ou non
 - » Stabilité ou instabilité
 - » Bifurcations, comportement chaotique (v. ci-après)

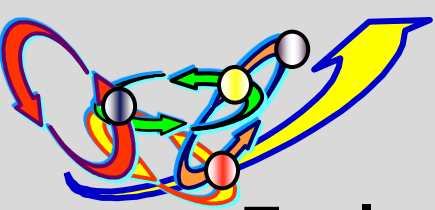
Modèle de Lotka-Volterra
x population des proies
y population des prédateurs
$$x' = + a x - b xy$$
$$y' = - c y + d xy$$

- Non quantifiables : X « influence » Y : comment ? Intensité, dynamique (temps)...
- Dont les perturbations (au sens de l'Automatique) : événements externes (Environnement)

➤ Causalités/Influences en cascade et/ou réciproques (boucles)

.../...

[*] Les Systèmes chaotiques sont prévisibles à court terme



Explorer le Système et ses sensibilités

□ Caractérisation des Interactions

➤ Causalités/Influences en cascade...

$X \rightarrow Y \rightarrow Z$

▪ **Vertueuses** [*]

▪ **Vicieuses** [*]

Aménagement des accès de bus (plateformes) pour permettre l'accès aux personnes en fauteuil roulant

⇒ **Accès des poussettes !**

⇒ **Invasion de poussettes interdisant l'accès de fauteuils roulants (boucle)**

Télécommande TV, inventée aux EU à la demande d'une personne handicapée

Personne ne la vend comme telle

[*] dans le cas des boucles, à distinguer bien sûr des boucles positives ou négatives

... et/ou réciproques (boucles) :

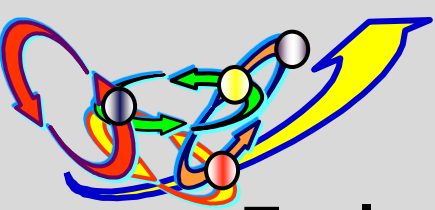
$X \rightarrow Y \rightarrow X$

$X \rightarrow Y \rightarrow Z \rightarrow X$



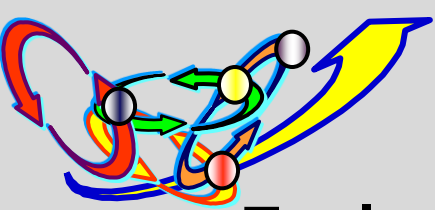
Pont-Neuf, Paris

Aménagement des trottoirs pour faciliter la traversée des rues par les personnes en fauteuil roulant
⇒ **Chutes de personnes âgées**



Explorer le Système et ses sensibilités

- ❑ **Exemple de causes en cascade : la chaîne infernale de Bornéo - déjà ancienne – (effets de l'ignorance des interactions)**
 - 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



Explorer le Système et ses sensibilités

□ Exemples d'ignorance et/ou de mauvaise caractérisation des interactions = chaînes et boucles...

- interactions internes, souvent intriquées, externes, plus ou moins visibles

→ *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 (interactions à dynamique lente vs évolution naturelle du Système)

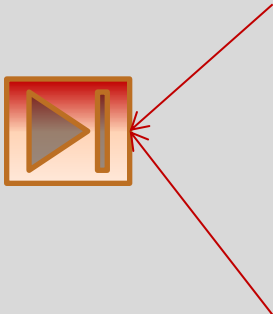
→ économie, politique

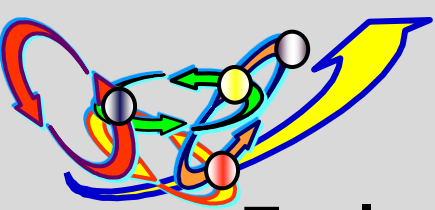
- par ignorance du domaine de validité des modèles, non-pertinence des extrapolations

→ modèle de la dinde

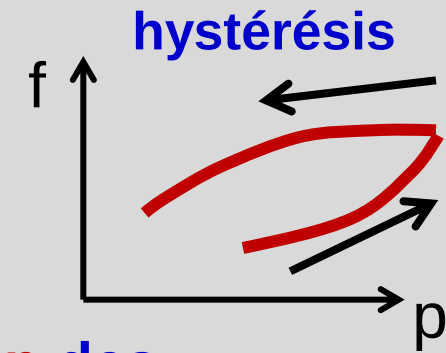


[*] Une solution ici et maintenant peut causer un problème demain ou ailleurs dans le système





Explorer le Système et ses sensibilités



Exemples d'ignorance ou de difficultés de caractérisation des interactions (suite)

du fait de non-linéarités

▪ Seuils

▪ Hystérésis

de toxicité
(médecine)
de tolérance
(sociologie)
d'imposition
(finance)

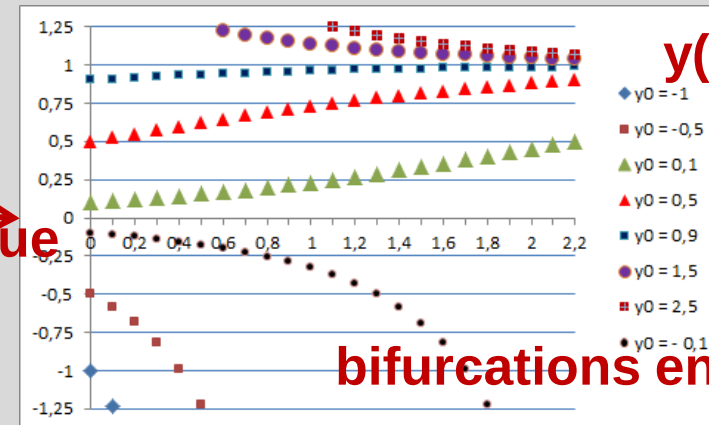
Pression fiscale ↗ Fraude fiscale ↗
Pression fiscale ↘ Fraude fiscale ↘ **mais pas tout de suite !** Persistance du phénomène alors que sa cause principale a disparu (ou s'est atténuée)

▪ Bifurcations

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

Fonction logistique

Grouchy...



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

▪ Comportements chaotiques

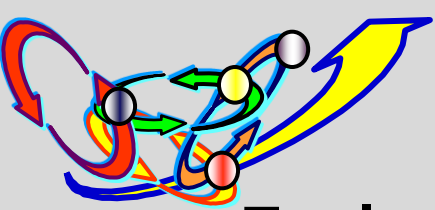
le temps qu'il fait

➤ via les données...

➤ franchement imprévisibles
(peut-être par des méthodes inductives ?)

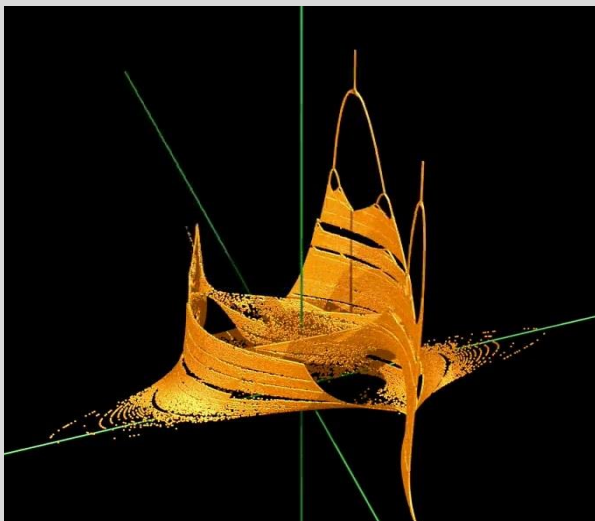


Mars Climate Orbiter 1998-99
Confusion pound-force / newton



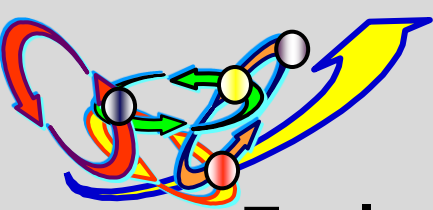
Explorer le Système et ses sensibilités

- ❑ Exemples d'**ignorance** des interactions (suite)
- ❑ Ignorance des signaux faibles
 - Révélation d'une interaction, voire d'une boucle instable ou peu amortie avec un signal excitateur faible (bruit) : oscillateur
 - Intelligence économique ; Pont de Tacoma (1940)...
 - 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*



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





Explorer le Système et ses sensibilités

- ❑ **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 ?**

FIGURE 13-2B: COMPETING SIGNALS, UNDIFFERENTIATED

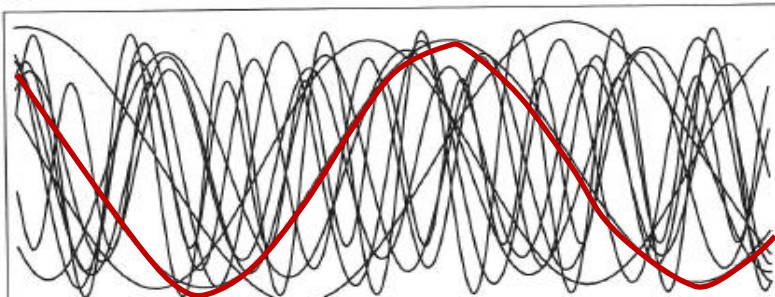
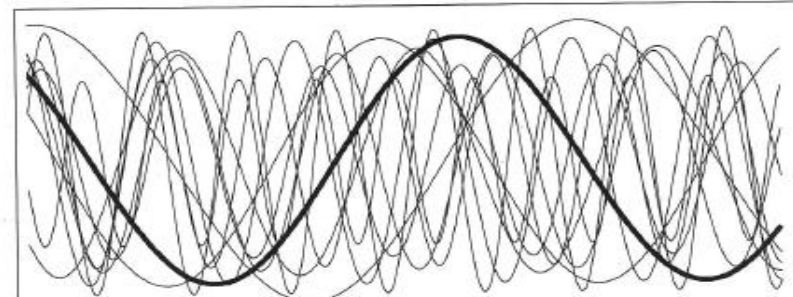


FIGURE 13-2A: COMPETING SIGNALS WITH ONE SIGNAL HIGHLIGHTED



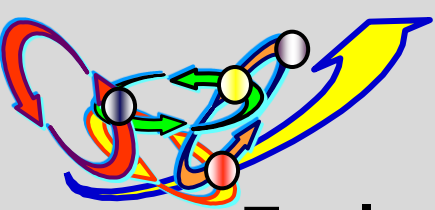
Nate Silver, *The Signal and the Noise – The Art and Science of Prediction*

- ❑ **Peut conduire à la découverte de relations qui n'étaient pas connues, ni visibles (interactions cachées)**
- ❑ **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) [*]**

[*] 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

« 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*

... Et qui la pose ?



Explorer le Système et ses sensibilités

□ Exemple de signal faible (Système non chaotique)



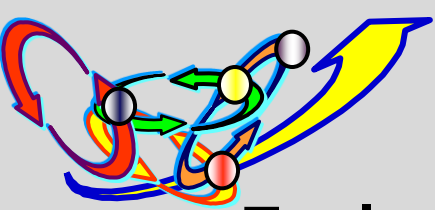
Hauteur : 142 m
Portée principale 853 m
Longueur totale : 1822 m
Largeur 19 mètres
Épaisseur tablier : 2,4 m
Largeur poutre : 11,9 m
Câbles $\varnothing = 43$ cm
Matériau pylônes et poutre : acier

- *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

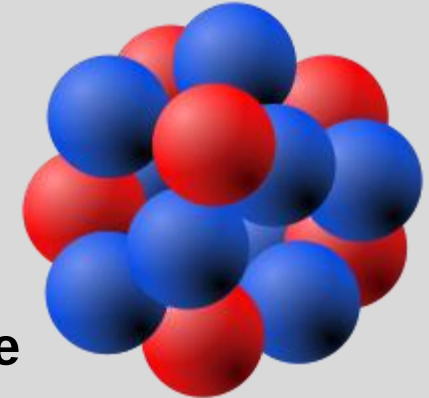
Vitesse du vent : 65 km/h (relativement faible)

- **Petite cause, grand effet**
- **Et le système n'est pas chaotique, seulement peu amorti et non-linéaire !**





Explorer le Système et ses sensibilités



□ Exemple de signal faible

□ Liaisons nucléaires

- En physique classique (pré-relativiste), on « voudrait » que
masse des Z protons + masse des $A - Z$ neutrons = masse du noyau $M(A, Z)$

$$Z m_p + (A - Z) m_n = M(A, Z)$$

en vertu du principe de conservation de la masse (invariant système)

- Or $Z m_p + (A - Z) m_n > M(A, Z)$, la différence est le *défaut de masse* $B(A, Z)$

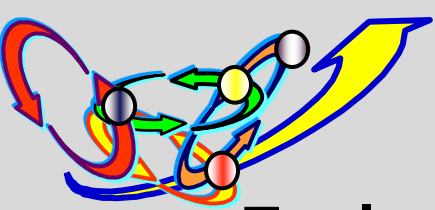
- Ex. pour ${}^4_2\text{He}$

- masse constituants $2 m_p = 2.0146 \text{ u}$, $2 m_n = 2.0174 \text{ u}$ total = 4.0320 u
- masse atome = 4.0026 u
- masse électrons $2 m_e = - 0.0010 \text{ u}$ total noyau = 4.0016 u
- défaut de masse : 0,00304 u ($0,75 \cdot 10^{-3}$)

- « *Information... de faible intensité* »* : ... *le défaut de masse*
- « *...pouvant être annonciatrice d'une tendance ou d'un événement important* »* : ... *l'adoption du principe de conservation masse-énergie (théorie de la Relativité : révision de l'invariant)*

- * voir définition d'Igor Ansoff

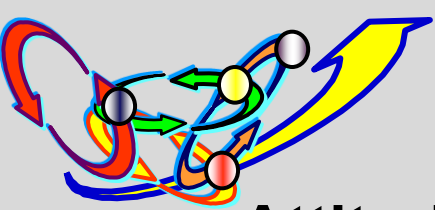




Explorer le Système et ses sensibilités

□ Signaux faibles

- Problématique pas limitée à l'acception d'Igor Ansoff :
- Bruits, excitations faibles...
 - déclenchant une divergence du Système (même non chaotique)
⇒ effet de la sensibilité naturelle de tout Système aux conditions initiales
- Bifurcations
 - la variation infime d'un paramètre du Système le fait changer de comportement
⇒ sensibilité extrême à la valeur d'un paramètre
- Chaos
 - la variation infime d'une condition initiale fait changer le comportement
⇒ sensibilité extrême aux conditions initiales



Sensibilité « extrême » : une infime variation de paramètre ou de CI provoque un changement de comportement (changement de dynamique)

Attitudes à adopter dans l'exploration du Système

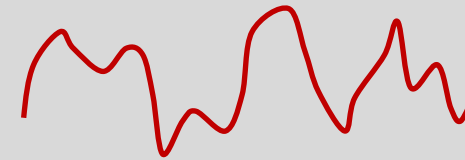
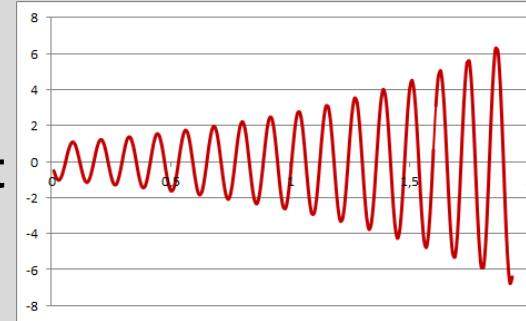
❑ Ne pas confondre

➤ Systèmes instables à comportement oscillatoire et divergent

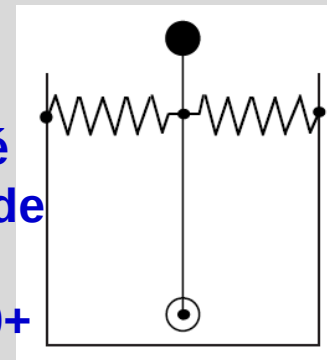
➤ Systèmes à comportement aléatoire

➤ Systèmes à bifurcation : sensibilité extrême à un paramètre - **Eq. Duffing** : $y''(t) + \alpha y(t) + x^3(t) = 0$

➤ Systèmes chaotiques : sensibilité **extrême** à une condition initiale, comportement apparemment aléatoire, mais en réalité fondamentalement déterministe



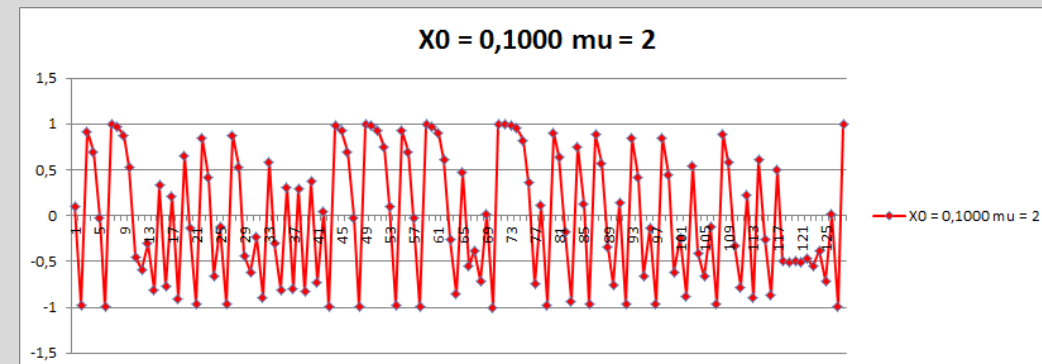
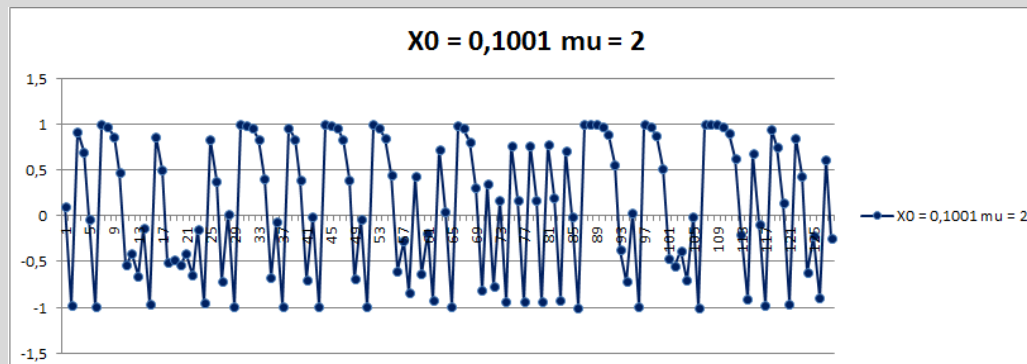
Systèmes cahoteux

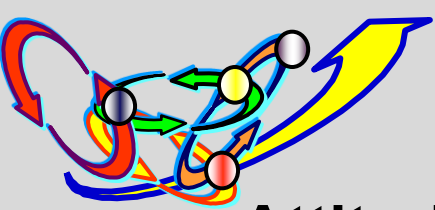


Pendule inversé dans le champ de pesanteur
Bifurc. qd $\alpha \nearrow 0+$

Aspect aléatoire alors que le Système reste déterministe

$$x_{n+1} = \mu x_n^2 - 1$$





Attitudes à adopter dans l'exploration du Système

□ Conduite à tenir

➤ Systèmes instables

- Réduire l'instabilité (au moins sur l'horizon considéré) = diminuer la vitesse de divergence, limiter l'amplitude des cycles limites... (attracteurs)
- Corriger l'instabilité (« contrôler » au sens de l'Automatique) : créer une boucle de régulation

➤ Systèmes à comportement aléatoire

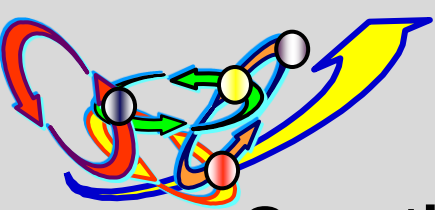
- Les caractériser (processus stochastiques) : moyennes, écarts-types, corrélations...

➤ Systèmes à bifurcation

- Identifier le paramètre influent et sa valeur critique
- S'en écarter si possible

➤ Systèmes chaotiques

- Les identifier comme tels
- Déterminer l'horizon de prévisibilité

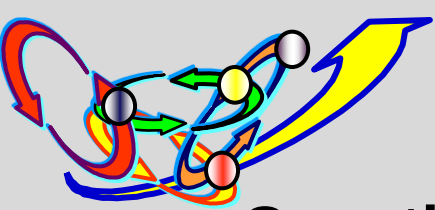


Questions/réponses et Conclusion sur « Explorer le Système et ses sensibilités »

- ❑ **Q (JB) : Et l'entropie comme moyen d'exploration d'un Système ?**
- ❑ **R : Pas d'ouvrages (seulement des articles, sans doute) sur la question, hormis « Thermodynamique de l'évolution »**
- ❑ **Une remarque en écho (RP) : la stabilité des structures dissipatives (ex. systèmes sociaux)**
- ❑ **Remarque (JB) : Les sondages et prévisions ? Difficulté quand on ne dispose pas de références passées [*]**
- ❑ **Suggestion (CS) : identifier les invariants (donc l'insensibilité) ; ex. l'inertie de la démographie**
- ❑ **Q (J Pia) : règles simples et stabilité ?**
- ❑ **Suggestions (je cite ce que JPB m'a fait passer par écrit) :**
 - **Systèmes « de fait » (des gens dans le métro) vs systèmes organisés (footballeurs, entreprise)**
 - **Systèmes**
 - **Compacts (poumons)**
 - **Répartis (squelette, muscles)**
 - **Filiformes (nerfs, veines, artères)**

[*] La question relève plutôt de la modélisation que de l'exploration du Système

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.

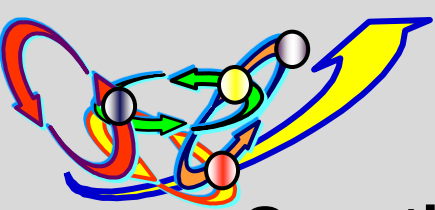


Questions/réponses et Conclusion sur « Explorer le Système et ses sensibilités » - 2

□ Suggestions (JPB) - suite :

- Systèmes finalisés ou non
- Systèmes construits sur des domaines régis par des lois stables (dont la connaissance ne provoque pas le changement : ex. la Physique)
- ... et ceux dont les « lois » subodorées, soupçonnées..., une fois connues, entraînent la modification de ces « lois » (ex. psychologie, économie, sociologie, politique, gestion des personnes)

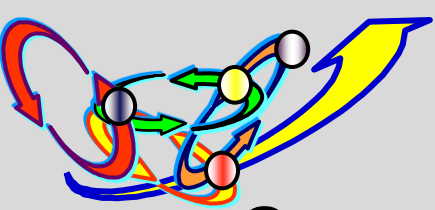
□ Complément d'étude ? Plus tard !



Questions/réponses et Conclusion sur « Explorer le Système et ses sensibilités » - 3

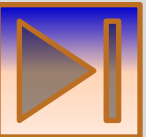
□ A mon sens, explorer le Système et ses sensibilités, c'est :

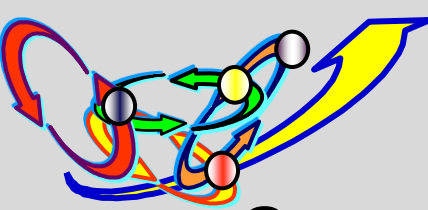
- Étudier la variabilité dans les interactions internes et externes (quand on les caractérise, on sait que ce n'est pas à vie)
- Ce qui débouche sur les questions de robustesse et de résilience
- L'évolutivité (la non-stationnarité) participe aussi de cette sensibilité (le scorpion, être peu complexe, résiste mieux à une agression nucléaire que l'homme : après les premiers tirs nucléaires autour d'Alamogordo, les seules créatures vivantes dans le désert étaient les scorpions)
- C'est une étude supplémentaire à part entière, qui nécessite et complémente le préalable que j'ai exposé hier... Un jour peut-être je ferai un additif



Comment « faire avec » la complexité et l'imprévisibilité ?

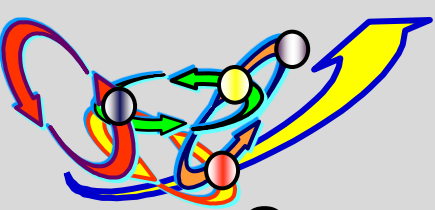
- ❑ L'exploration du Système révèle sa complexité (et son imprévisibilité)
- ❑ Complexité
- ❑ Comment réduire les méconnaissances ? Comment *explorer les Systèmes de façon plus poussée* ? (cf. David RUELLE, « **information difficile à obtenir** »)
 - C'est l'incessant travail d'amélioration des méthodes 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 « techniques » (autres qu'« *engineered* »)?
 - Peut-on les appliquer de façon aussi rigoureuse ?
- ❑ La « Maîtrise » de la Complexité passe *a minima* par un recensement et une caractérisation des interactions, même cachées
- ❑ Nécessité de prendre conscience de la Finalité (délibérée)
 - Cf. les pilotes qui se battent contre un pilote automatique parce qu'ils en ignorent (on ne leur en a pas appris) la finalité





Comment « faire avec » la complexité et l'imprévisibilité ?

- ❑ **Complexité (suite)**
- ❑ **Est-ce suffisant ?**
- ❑ **Hiérarchisation (cf. identification des Sous-systèmes), Emboîtements et Juxtapositions, Architecture = cas des systèmes artificiels techniques**
 - **Simple mise en ordre ?**
 - **Etablissement d'une Architecture, délibérée ou supposée**
 - « Organisation fondamentale d'un Système représenté d'une part par ses constituants, leurs interrelations, leurs relations avec l'environnement et d'autre part par les principes guidant sa conception et son évolution »
 - Nécessite de « délimiter ses frontières et de caractériser son contexte » (les frontières peuvent varier en fonction du contexte, « en intégrant ou excluant des éléments plus ou moins liés aux composants du Système »)
 - C'est une « Représentation, à un niveau d'abstraction et de granularité donné, d'un Système sous forme d'une structure identifiant les éléments constitutifs du Système et leurs interactions » [*]
 - **Contribue à la**
 - « Maîtrise » (ou au « Management » ou « Domptage » de la Complexité ?)
 - Diminution de la Complexité ?
 - Diminution de l'effort à déployer pour « faire avec » la Complexité ?



Comment « faire avec » la complexité et l'imprévisibilité ?

□ L'exploration du Système révèle (sa complexité et) son imprévisibilité

□ Imprévisibilité

- Inévitable dans la plupart des Systèmes, hyper-complexes ou non
- Réduite dans les Systèmes artificiels (« techniques ») : *on fait tout pour ça*
- La suite logistique, **non complexe**

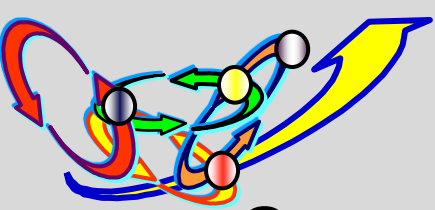
$$x_{n+1} = \mu x_n (1 - x_n)$$

est chaotique pour

$3,5699456... < \mu < 3,83...$ et d'autres intervalles

(présente une sensibilité **extrême** aux conditions initiales et est donc imprévisible)

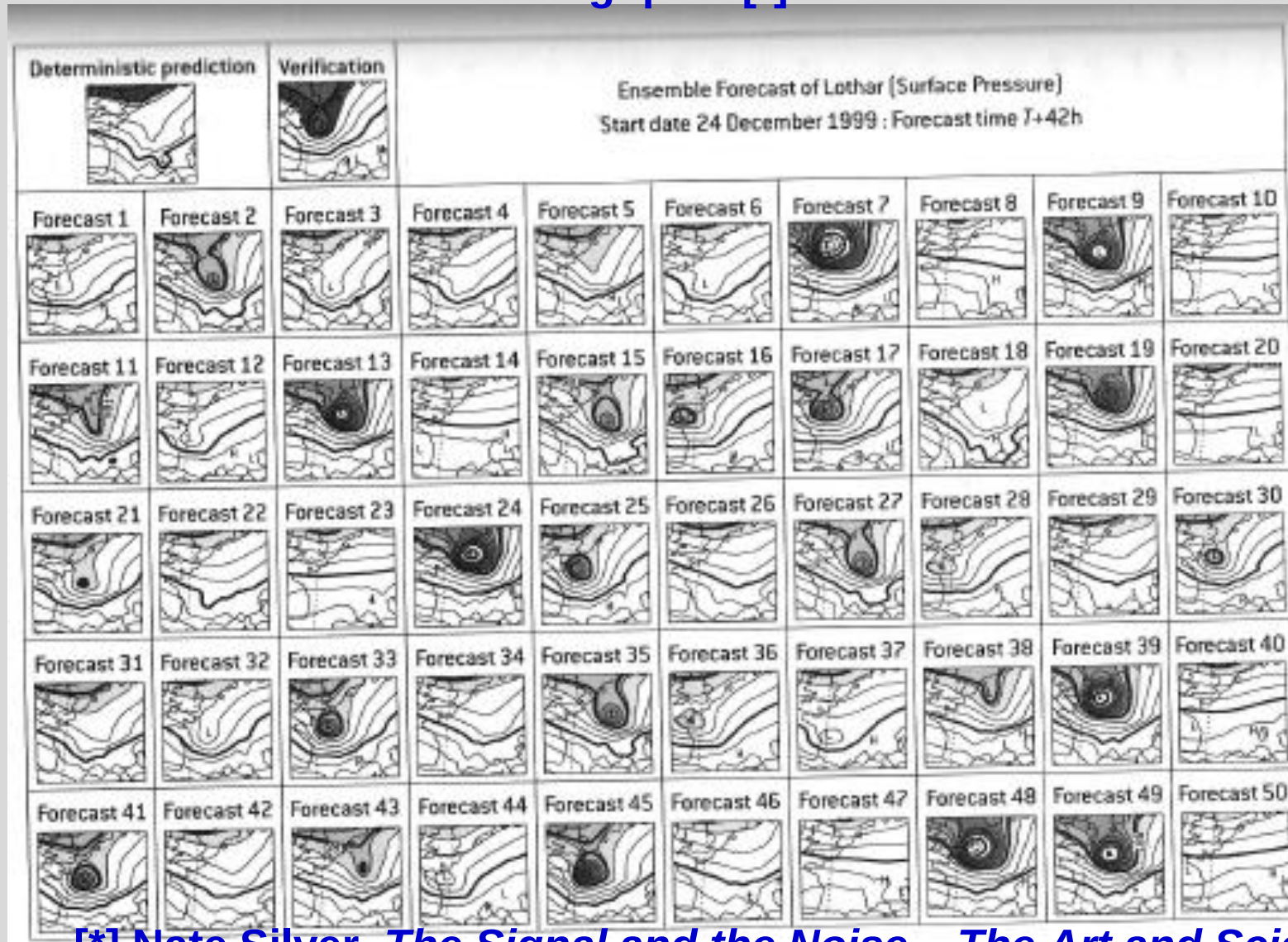
- Que faire face à l'imprévisibilité ? Comment « faire avec » ?
 - **Cas du Chaos : le Chaos n'est pas n'importe quoi**



: DIVERGENT WEATHER FORECASTS WITH SLIGHTLY DIFFERENT INITIAL CONDITIONS

Comment « faire avec » la complexité et l'imprévisibilité ?

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

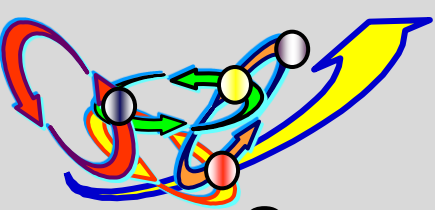


Légers changements dans les « conditions initiales » (pression à Hanovre, vent à Stuttgart) ; 50 simulations :

dans certains cas, tempête à Paris

Le Chaos n'est pas n'importe quoi

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



Comment « faire avec » la complexité et l'imprévisibilité ?

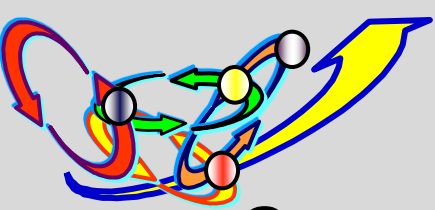
□ Imprévisibilité

➤ Comportements turbulents



La Vologne près de Gérardmer

➤ Existence d'un confinement des turbulences : le chaos n'est pas n'importe quoi

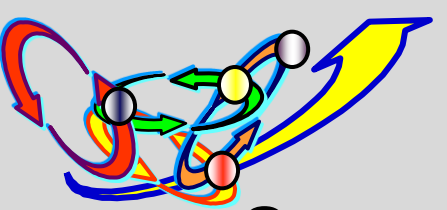


Comment « faire avec » la complexité et l'imprévisibilité ?

□ Imprévisibilité pas nécessairement paralysante

- **Systèmes Artificiels** : on fait tout pour maîtriser la complexité et réduire l'imprévisibilité (les avions ne se crashent pas si souvent)
- **Systèmes Artificiels Vivants**
 - **Economie** : prévisible à ~6 mois (*dixit Christian Sautter*)
 - **Mégadonnées (*Big Data*) et Extraction (*Data Mining*)** : recherche de relations insoupçonnées entre variables en réponse à des questions sur des événements, des individus ou des tendances, dans des masses de données immenses réparties, à faible densité en information, hétérogènes, en différé ou en temps réel [*]
 - **Signaux faibles** : méthodes statistiques de prévision (si fiables) : applicables à tous systèmes ? Et qui doit observer les signaux faibles ?
- **Systèmes Naturels non Vivants**
 - **Système planétaire** : prévisible à qqs dizaines de M années ? (*Jacques Laskar, contesté par Ivar Ekeland*)
 - **Temps** : prévisible à ~10/11 jours

[*] d'après Michel Bloch, *Mégadonnées (Big data) et Complexité - Session introductive, Colloque GREC-O, 24-25 juin 2015, Pôle Universitaire Léonard de Vinci, Paris - La Défense*



Les éléments en jaune ne sont pas de Jacques Neirynck

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

Comment « faire avec » la complexité et l'imprévisibilité ?

- Imprévisibilité en fonction du type de Système (inspiré de Jacques Neirynck, *Le Savoir-Croire*)

« Phénomènes »

Quantifiables et/ou Modélisables

Reproductibles

Déterministes

Prévisibles

L'imprévisibilité

Sensation
esthétique

Droit

Economie

(modélisable à court terme)

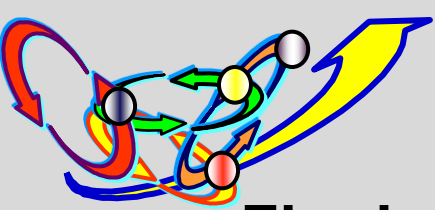
Cosmologie

Phénomènes
quantiques

Phénomènes
à bifurcations,
chaotiques,
catastrophiques

Phénomènes à interactions mal
caractérisées ou cachées

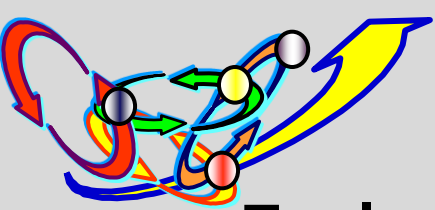
« Maîtrisés » ?



Fin de l'exploration



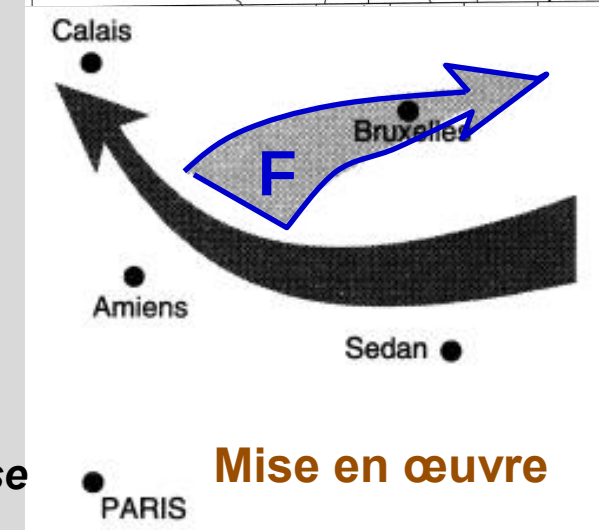
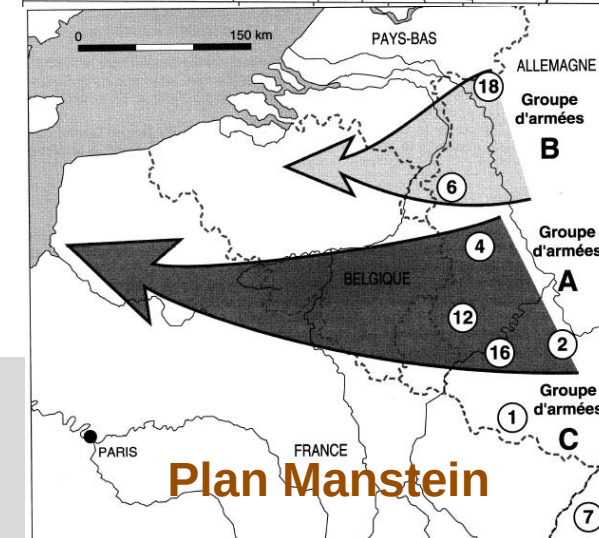
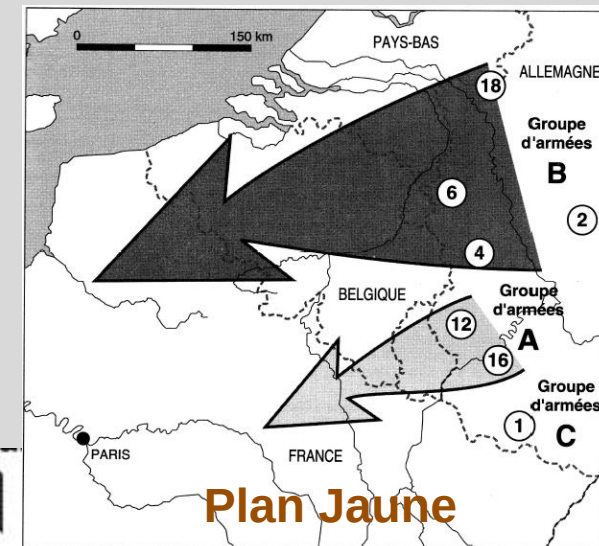
Merci de votre attention



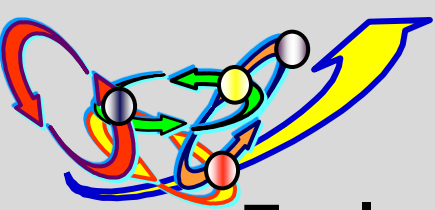
« Sa Majesté le Hasard »
Clausewitz

Explorer le Système et ses sensibilités - Exemple de bifurcation : Le Plan Manstein *

- ❑ Octobre 1939 : Rédaction du Plan Jaune, réédition du Plan Schlieffen allemand 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



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



« Sa Majesté le Hasard » Clausewitz

Explorer le Système et ses sensibilités - Exemple de bifurcation : Le Plan Manstein *

❑ Octobre 1939 : Rédaction du Plan Jaune, réédition du Plan Schlieffen allemand 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

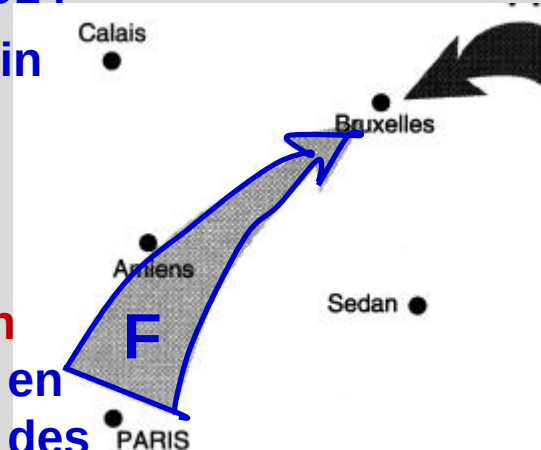
❑ 7 février 1940 : Manstein convainc le général Halder

❑ Agacé, le Haut Commandement mute Manstein sur le front de l'est

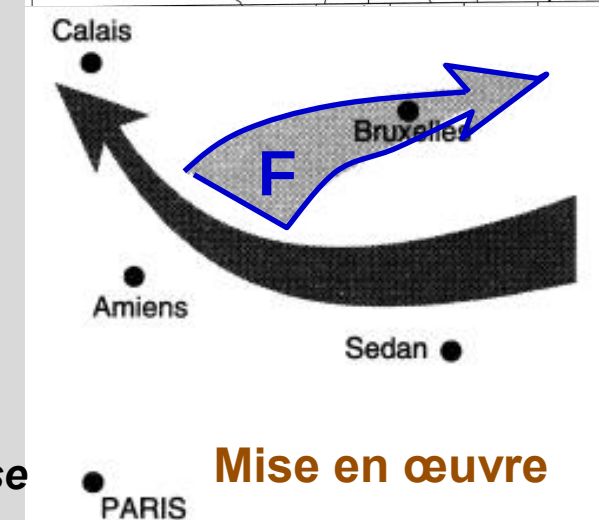
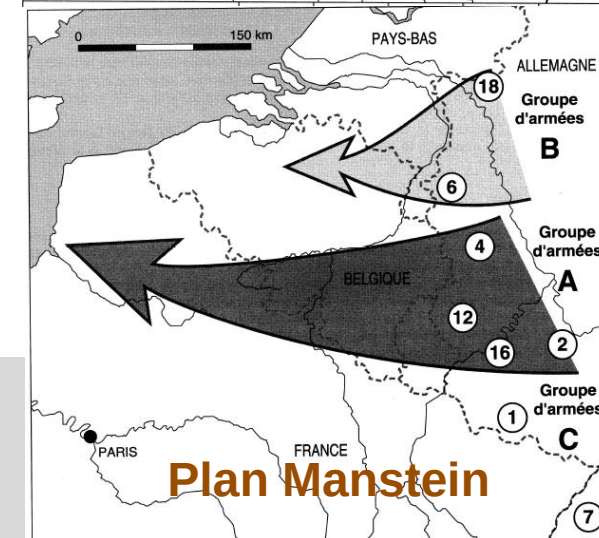
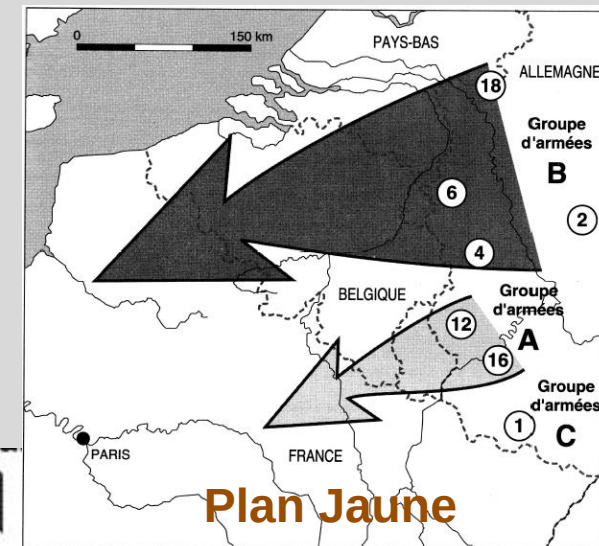
❑ Manstein, présenté à Hitler, **comme tous les généraux mutés**, lui expose ses idées le 17 février 1940

❑ 24 février 1940 : adoption du Plan Manstein

❑ La suite, vous la connaissez...



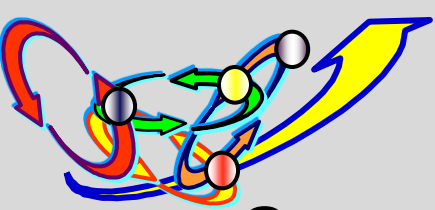
Critique du Plan Jaune
par Manstein



Mise en œuvre

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





Comment « faire avec » la complexité et l'imprévisibilité ?

- ❑ L'exploration du Système révèle sa complexité et son imprévisibilité
- ❑ Complexité
- ❑ « *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 objet (physique ou intellectuel) est complexe s'il contient de l'**information difficile à obtenir**.* »

David Ruelle, *Hasard et Chaos*

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

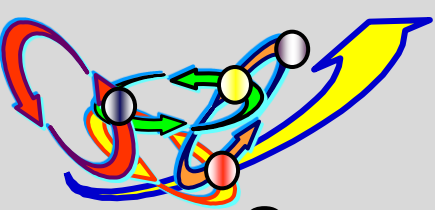
Méconnaissance $\Rightarrow$ Imprévisibilité

↙
Apprentissage
↘

(Systèmes Artificiels : ce n'est pas le Système À FAIRE qui apprend, mais le Système POUR FAIRE)

- ❑ Distinguer Complexe de Massif (Yaneer BAR-YAM)

Santé publique, finance : massif ; Médical : hautement complexe

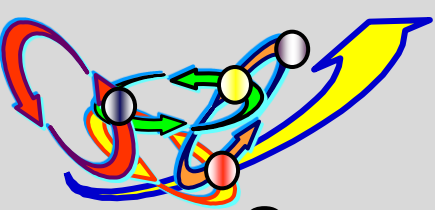


Comment « faire avec » la complexité et l'imprévisibilité ?

voir aussi



- ❑ **Complexité (suite)**
- ❑ **Distinctions (inspiré de Jacques PRINTZ)**
 - **Complexité intrinsèque** . **structure, organisation, interactions**
 - **Complexité-complication** . **diversité des technologies, normes**
 - **Complexité-incertitude/risque** . **performances vs risques, maturité**
 - **Complexité-ignorance** . **interactions cachées**
- ❑ **Distinctions de Nancy LEVESON - types de complexité liés à la SdF [*]**
 - **Interactive Complexity**
accidents ... in the interactions among components, where none of the individual components have failed
 - **Non-Linear Complexity**
cause and effect... not related in an obvious or direct way
 - **Dynamic Complexity**
related to changes over time... these changes move the system to states of higher risk
 - **Decompositional Complexity**
arises when the structural decomposition of the system is not consistent with the functional decomposition



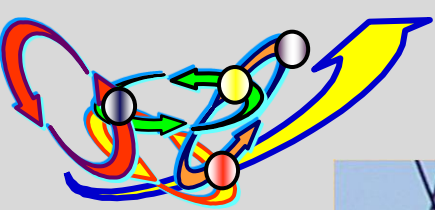
Comment « faire avec » la complexité et l'imprévisibilité ?

- ❑ **Complexité (suite)**
- ❑ **Considérations de Nancy LEVESON [*]**

Complexity is subjective; it is not in the system itself but in the minds of observers or users of the system. What is complex to one person or at one point in time may not be to another.

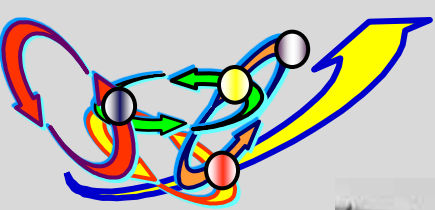
Treating complexity as one indivisible property is not very useful in creating tools to deal with it. Some have tried to define complexity in terms of one or two properties of a system (for example, network interconnections). While useful for some problems, it is not for others.

[*] *Complexity and Safety*, Complex Systems Design & Management , Paris, 7-9 déc. 2011



Complexe ou compliqué ?





Complexe ou compliqué ?



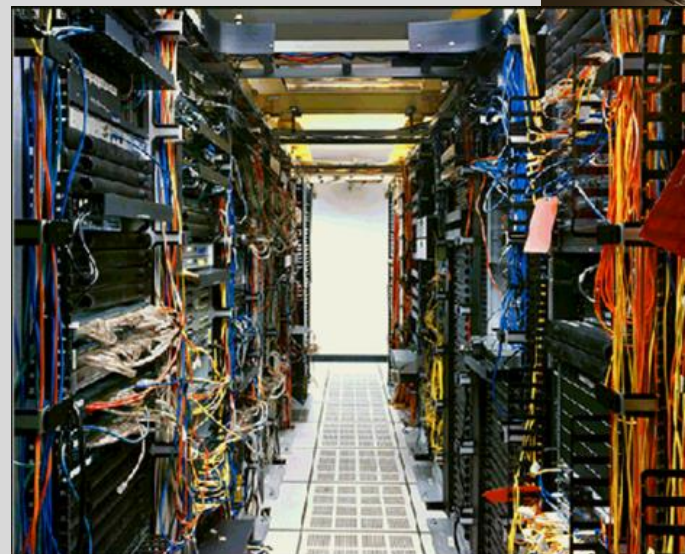
Câblage avion



**Le comput ecclésiastique
Horloge astronomique de la
cathédrale de Strasbourg**

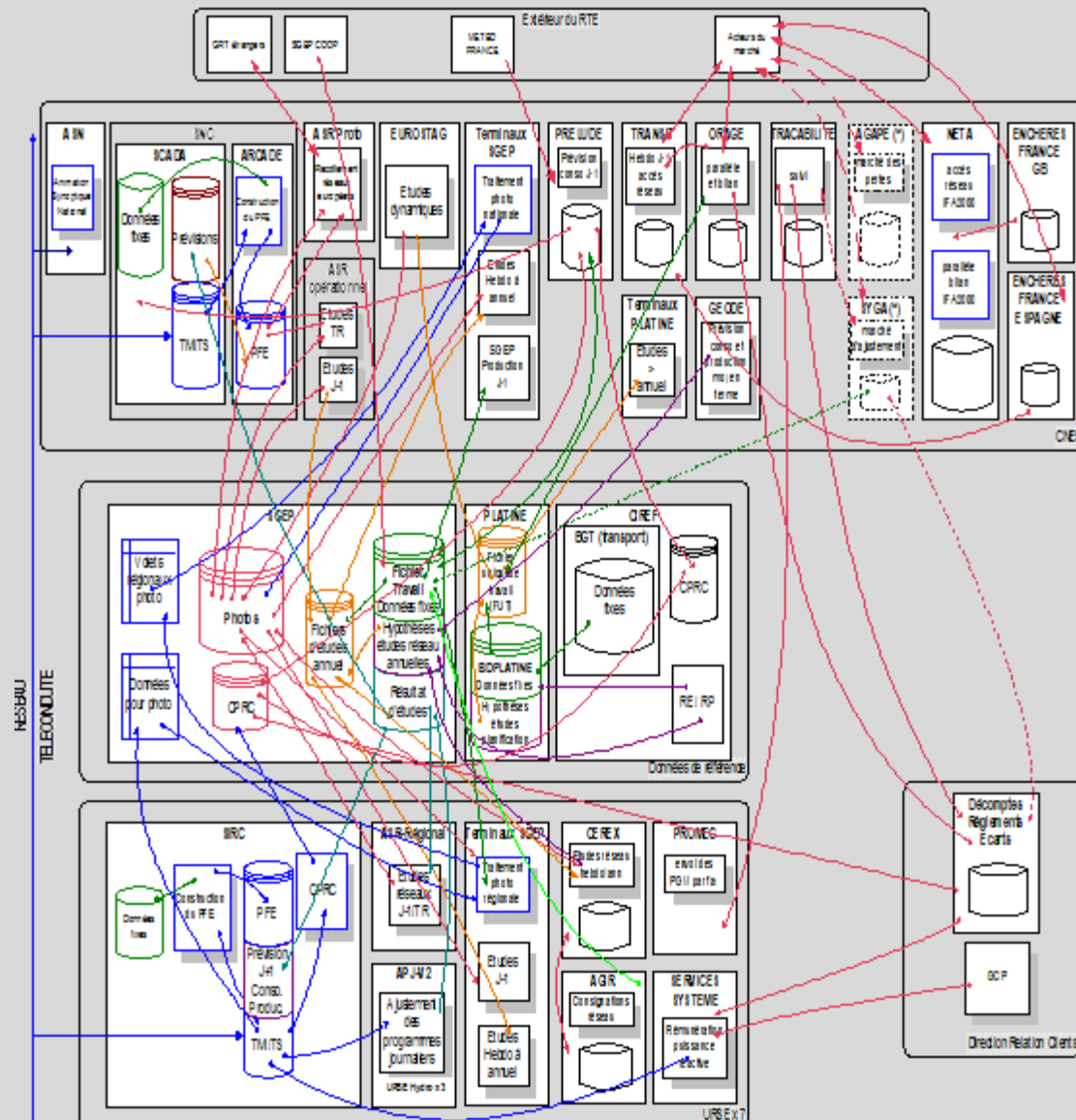


**Boîte de vitesses
automatique d'une
Lexus IS**

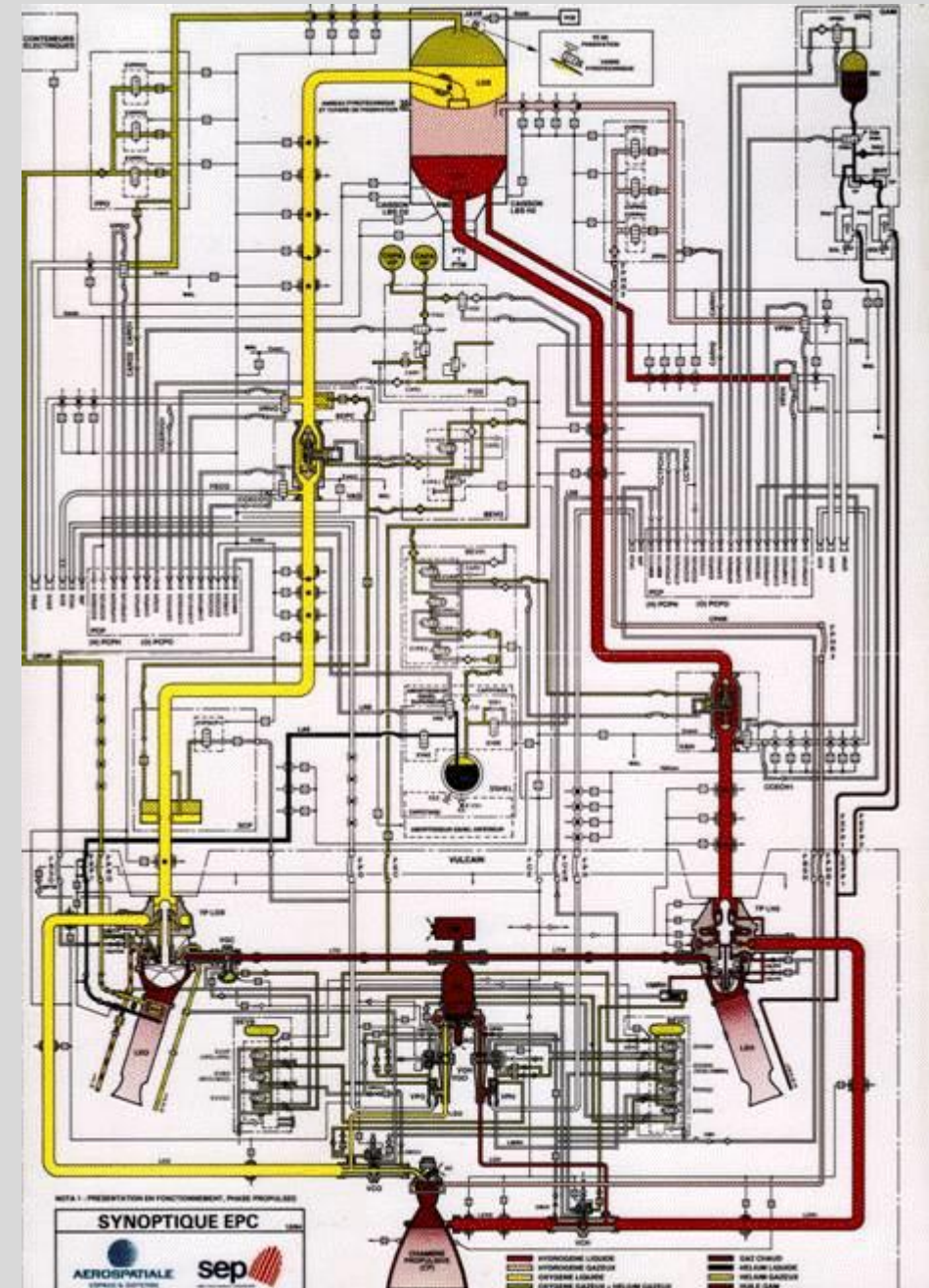


**Centre
de Données
(Data Center)**

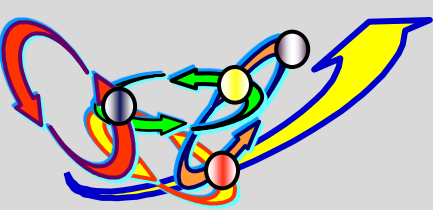
Complexe ou compliqué ?



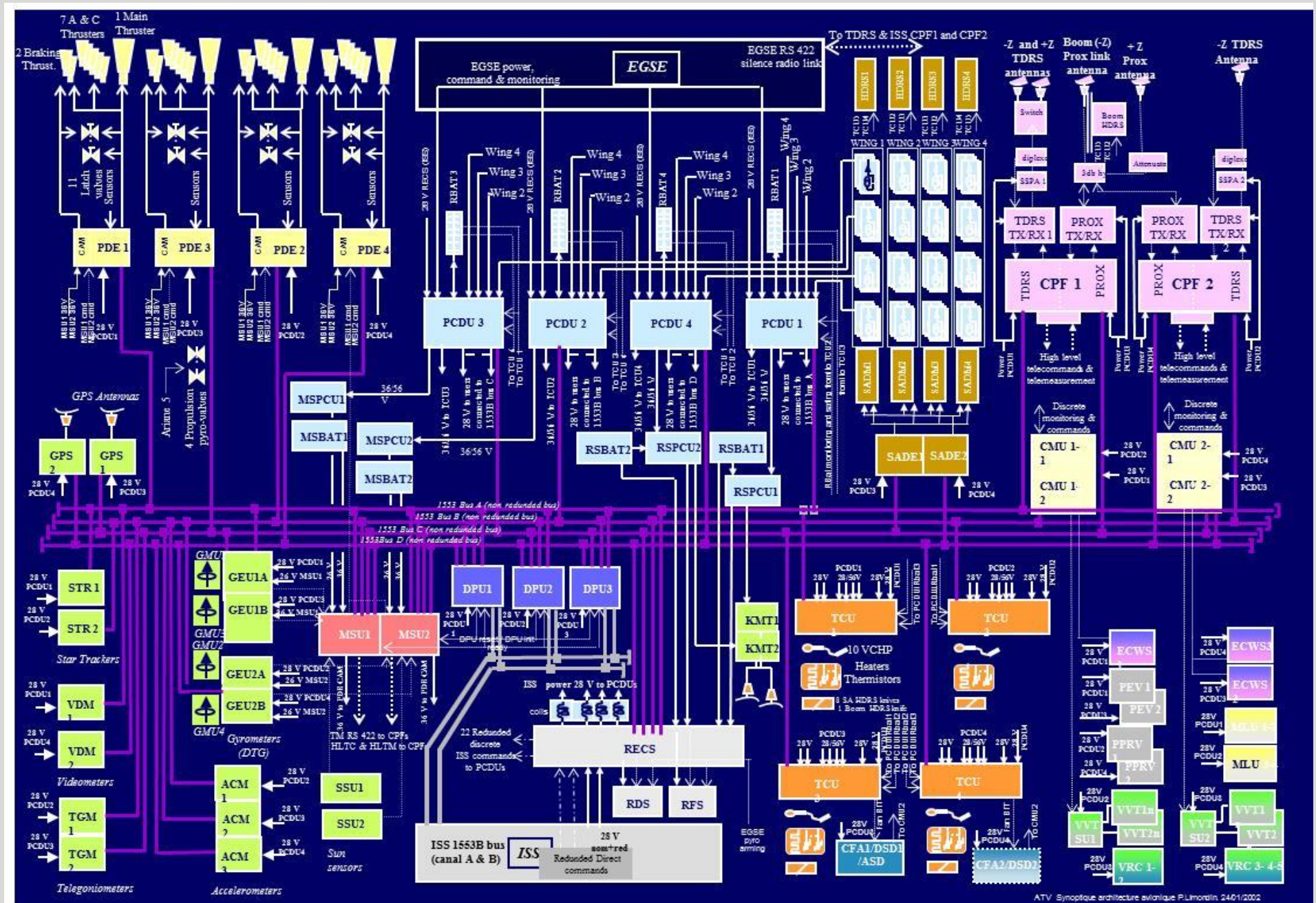
Le Système d'Information du RTE français vers la fin des années 90 (interactions entre applications et/ou systèmes constitutifs internes et externes)



Le moteur Vulcain d'Ariane 5



Complexe ou compliqué ?



L'Avionique de l'Automated Transfer Vehicle