

Complexité, émergence, hasard, chaos, irréversibilité, ... dans les systèmes informatisés

Groupe Émergence, le 10 janvier 2011

J.Printz, Professeur Émérite du Cnam

Plan

- I. Peut-on définir la complexité ?**
- II. Peut-on quantifier la complexité ?**
- III. Peut-on maîtriser la complexité ?**
- IV. Fabriquer de la complexité ... rien de plus simple**
- V. Conclusion**

I. Peut-on définir la complexité ?

Qq. définitions

- **Pour la science, N° spécial, Décembre 2003**
 - Introduction par H.Zwirn, *La complexité science du XXI^e siècle*
- **Article Complexité de Wikipedia, ...**
- **Projet européen MCX-APC (E.Morin, J-L. Le Moigne)**
 - <http://www.mcxapc.org/> - voir leur petit lexique de la complexité
- **David Ruelle, *Hasard et chaos*, chap. 22**
 - Un objet (physique ou intellectuel) est complexe s'il contient de l'information difficile à obtenir
- **Michael Behe, *La boîte noire de Darwin*, 2006, Complexité irréductible,**
 - Est irréductiblement complexe, un système composé de plusieurs parties interagissantes qui contribuent à sa fonction de base et au sein duquel la suppression de n'importe laquelle des parties cause la perte de la fonction rendue par le système
- **Etc. ... Etc.**

Un point de méthode : Poser et résoudre les problèmes ? Notations

➡ Méthodologie façon Georges Polya

- **COMPRENDRE** LE PROBLÈME → Vision statique **descriptive**
 - ✓ Quelle sont les inconnues ? Quelles sont les données ? Quelles sont les conditions et/ou les contraintes aux limites ? Faire des schémas. **Introduisez la/les notations appropriées**
- **CONCEVOIR** UN PLAN → Vision **stratégique**
 - ✓ Connaissez-vous un problème analogue ? Pourriez-vous vous en servir ? Trouver la/les relations entre les données et les inconnues. Considérer des problèmes auxiliaires si vous ne pouvez trouver un rapport immédiat. Vous devez, en final, concevoir un plan et/ou une stratégie d'obtention de la solution
- **EXÉCUTER**, METTRE EN OEUVRE LE PLAN → Vision **processus**
 - ✓ Vérifier chaque détail du plan l'un après l'autre. Pouvez-vous voir clairement si ce détail est correct ? Pouvez-vous démontrer qu'il est correct ?
- **VALIDER** LA SOLUTION OBTENUE → **Retour au réel**
 - ✓ Pouvez-vous valider/vérifier les résultats ? Pouvez-vous valider le raisonnement, formellement (modèles), expérimentalement (heuristiques) ? Pouvez-vous obtenir les résultats différemment ? Pouvez-vous voir/comprendre les résultats d'un seul coup d'oeil ? Pouvez-vous vous servir du/des résultats ou de la méthode pour d'autres problèmes ?

L'acte le plus difficile est de bien poser le problème

Qu'est ce qu'une vérité « scientifique »

En mathématique, en physique, en biologie, en médecine, en sciences humaines ... ?

⇒ **D.Hilbert**, *Métamathématique et théorie de la démonstration*

⇒ **K.Popper**, *Logique de la découverte scientifique*

⇒ **Bien saisir la distinction :**

- Raisonnement **démonstratif**, fondé sur une axiomatique rigoureuse
 - ✓ Mais possibilité de preuves statistiques, sur le modèle des codes correcteurs d'erreurs (on modélise la découverte des erreurs)
- Raisonnement **plausible/inductif**, fondé sur des **hypotheses** qui pourront, in fine, s'avérées fausses
 - ✎ Exemple : la **mécanique quantique** ; Logiquement mal fondée ; von Neumann s'y est essayé, et a rapidement arrêté – Richard Feynmann : « Celui qui dit avoir compris la mécanique quantique, ne l'a pas comprise »
Et pourtant ... **ça marche**

La puissance des notations mathématiques ... Et leurs limites

Fonction de Dirichlet : Si x rationnel, $F(x)=1$; si x n'est pas rationnel, $F(x)=0$

$$F(x) = \lim_{m \rightarrow \infty} \left[\lim_{n \rightarrow \infty} \left[\left(\cos(m! \pi x) \right)^{2n} \right] \right]$$

Les équations de Maxwell en notation tensorielle : Voir le livre de Gell-Mann, page 102

Les représentations géométriques : les systèmes de coordonnées, les diverses géométries, les transformations géométriques, les projections géométriques qui ramènent le 3D en 2D en préservant certaines propriétés, Etc. ...

Mais également des absurdités quand on les manipule mal :



$S = 1 - 1 + 1 - 1 + 1 - 1 + \dots = 1$, ou encore 0, ou encore $\frac{1}{2}$; ou
 $-1 = i^2 = (\sqrt{-1})^2 = \sqrt{(-1)^2} = \sqrt{1} = 1$; voire pire avec les probabilités, le « Dieu » hasard, et/ou la notion de programme chez certains biologistes

Exemples de difficultés actuelles, non résolues : Après Planck et la formulation de la mécanique quantique, façon von Neumann, nous « savons » que ce que nous percevons de l'univers microscopique, atomique et sub-atomique, est discret. Or les mathématiques utilisées en physique théorique sont les mathématiques du continu !!!



Cf. les réflexions d'A.Connes, de R.Laughlin, de R.Penrose, de L.Smolín, ...



Quelques une de mes favorites ...

Dynamique de la croissance : les équations de la lutte pour la vie, de V.Volterra

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = k \times N \quad \text{La corne d'abondance}$$

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = (k - \varepsilon \times N) \times N \quad \text{Tu travailleras à la sueur de ton front}$$

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = (k - \varepsilon \times N - [\int_0^T c(T - \tau) \times N(\tau) d\tau]) \times N \quad \text{Souviens toi que tu dois mourir}$$

Dynamique de la confiance : le dilemme du prisonnier, de Rappaport et Chammah

		Joueur B	
		Attitude de coopération b1	Attitude d'agression b2
Joueur A	Attitude de coopération a1	Récompense de la coopération A et B reçoivent 5	Salaire de l'agression de B A reçoit -5, B reçoit 8
	Attitude d'agression a2	Salaire de la tentation de A (agression de B par A) A reçoit 8, B reçoit -5	Punition de l'agression réciproque A et B reçoivent -3

Et quelques autres ...

Les conséquences géométriques des différentes catégories d' ∞ : le dénombrable et le continu, ... qui permet de projeter du 2D sur du 1D, ou du 3D sur du 2D → géométrie descriptive (Gaspard Monge), géométrie projective (Victor Poncelet), ... et les correspondances *Point*→*Droite* et inversement (transformation par polaires réciproques, théorie des enveloppes, etc.) ; espace substrat de la théorie des catastrophes.

Les lois d'échelles, comme la loi de Zipf et le principe du moindre effort.

**L'étrangeté confondante des objets quantiques et du monde atomique/sub-atomique, et la rupture entre la logique de ce monde et du notre
⇒ Frontières micro / méso / macro scopique ... et importance du rôle de l'observateur.**

**L'efficacité déraisonnable des mathématiques (*Eugene Wigner, 1960*), mais aussi l'impossibilité de résoudre certains problèmes
⇒ Impossibilité de résoudre en radicaux les équations algébriques de degré ≥ 5 (*Niels Hendrick Abel, 1824*) ; π n'est racine d'aucune équation algébrique ; ...**

Notion de CC2I



La notion intuitive, grand public, de complexité agrège différents aspects :

- **Complexité** intrinsèque – Réductionnisme, dans le bon sens du terme
 - ✓ On sait ce qui est **dedans** et ce qui est **dehors** ; on sait délimiter → le **bord**
 - ✓ Nomenclature exhaustive, statique et dynamique, des entités et de leurs relations
- Complexité **Complication**
 - ✓ **Notations** utilisées pour formuler/décrire le problème (en informatique = programmer → syntaxe, symboles graphiques, ...)
 - ✓ **Technologies** et mécanismes sous-jacents, machines réelles
 - ✓ Procédures de **décisions/choix** rationnels (ou non !) de l'organisation
- Complexité **Incertitude** – problèmes mal posés
 - ✓ On ne sait pas prédire les comportements, mais on a un plan d'expérience
 - ✓ Exemple : Performance et fiabilité des **équipements** ; Performance et fiabilité des **acteurs** (maturité des acteurs et de l'organisation ; connaissances requises) ; **Risques** et aléas
- Complexité **Ignorance**
 - ✓ On ne sait même pas comment poser le problème, on a pas/peu de données, et on n'a aucun plan !!! Fuite dans l'idéologie ou la religion, ou fuite dans le méta (cf. le logicien Jean-Yves Girard), ou dans l'irrationnel et les sciences occultes, ...

Peut-on les séparer et isoler un noyau dur de complexité intrinsèque ?

Fondements des sciences de l'information

Caractéristiques des problèmes

Peu de variables

Beaucoup de variables

Déterministe

Ordre simple

Physique classique et sciences de l'ingénieur correspondantes

- Calcul différentiel et intégral
- Équations différentielles et aux différences finies
- Géométrie analytique, géométrie descriptive, théorie des surfaces

Ordre complexe

Physique moderne et sciences de l'ingénieur correspondantes

- Programmation mathématique
- Programmation et algèbre linéaire
- Calcul tensoriel, analyse spectrale, opérateurs et espaces de Hilbert

Stochastique

Désordre simple

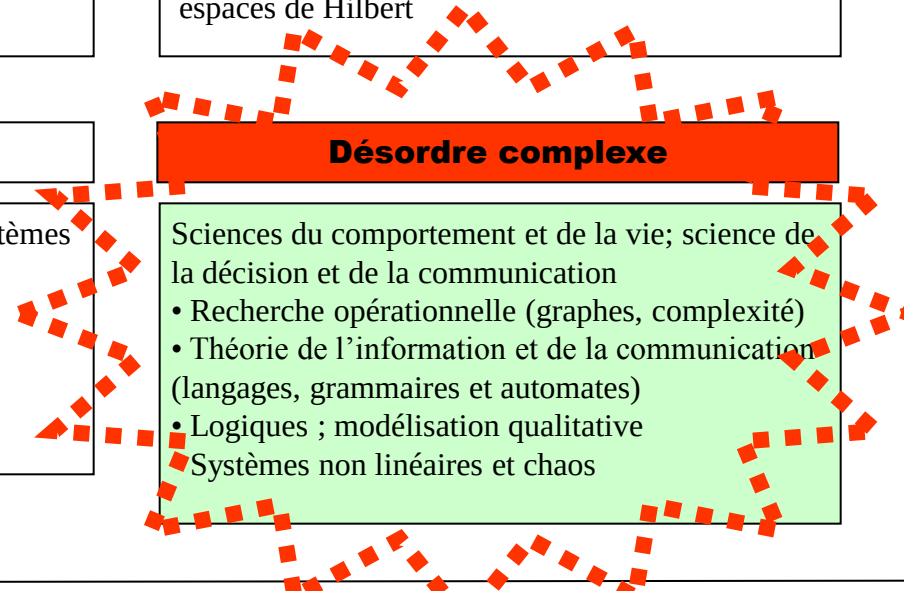
Physique statistique/Thermodynamique, systèmes dynamiques et sciences de l'ingénieur correspondantes

- Probabilités et statistiques
- Phases et transitions de phase
- Degrés de liberté et espace des phases

Désordre complexe

Sciences du comportement et de la vie; science de la décision et de la communication

- Recherche opérationnelle (graphes, complexité)
- Théorie de l'information et de la communication (langages, grammaires et automates)
- Logiques ; modélisation qualitative
- Systèmes non linéaires et chaos



Complexité et capacités humaines

➤ Postulat du déterminisme : **Pierre-Simon Laplace**

«Nous devons donc envisager l'état présent de l'univers comme l'effet de son état antérieur, et comme la cause de ce qui va suivre. **Une intelligence qui pour un instant donné connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent**, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux.»

Pierre-Simon Laplace, *Calcul des probabilités*, qui contient l'essai philosophique sur les probabilités.

➤ Le nombre « magique » 7 ± 2

(R.Miller, *The magical number 7 ± 2* , Psychological review, Vol. N°63, 1956)

Sur **3 niveaux**, cela donne $7 \times 7 \times 7 = 343$ possibilités, soit au total un nombre de concepts utilisables par un cerveau humain moyen : $7 + 49 + 343 = 399 \cong 400$ (par exemple un programme de 20.000 LS)

Du point de vue combinatoire, 3 niveaux correspondent à (ensemble des parties) $2^3 - 1 = 7$ comparaisons 1 à 1, 2 à 2 et 3 à 3 ; 4 niveaux = 15 donc non maîtrisable. Cf. les problèmes de programmation des chips multi-cores. En prenant la borne sup. à 10, on obtiendrait 1.100 concepts. A.Willes, qui a démontré le théorème de Fermat, est certainement au-delà de ce seuil ... (cf. chez Bull, la souche du compilateur PL1 gérée par 1 seule personne : R.Freighburghouse, à Boston ; un point extrême !!! Et en plus, il était sympathique)

➤ **Au-delà d'un certain niveau de complexité, plus personne n'y comprend rien ; pour conserver sa capacité d'appréhension, un seul recours : classer, organiser**

Les théories de la complexité

Présentation intuitive des principaux concepts (Cf. *Puissance et limites des systèmes informatisés*)

- ***Théorie de l'information (Shannon)***
- ***Complexité calculatoire (von Neumann)***
- ***Complexité descriptionnelle (Kolmogorov-Chaitin)***

Le problème de Shannon : complexité de l'information à transmettre

↪ **Comment coder l'information de la façon la plus économique :**

❑ Avec ou sans « bruit » et/ou erreurs $\Rightarrow$ Code Correcteur d'Erreur/**CCE**

de façon à optimiser la bande passante utile d'un canal

↪ **Théorie statistique fondée sur la fréquence d'emploi de telles ou telles séquences de symboles**

❑ Concept de quantité d'information

❑ Pour des messages de longueur L formés à partir d'un alphabet de N symboles :

$$I_{\text{message}} = L \times i = L \times \sum_{i=1}^N -p_i \log_2 p_i$$

Interprétation de la quantité d'information au sens de Shannon

✚ **Les événements rares** (*probabilité d'occurrence très faible*) **sont porteurs de beaucoup d'information**

□ Conséquences :

✚ Tous les **cas particuliers**, toutes les **optimisations** et « astuces », toutes les idiosyncrasies spécifiques à un locuteur sont **porteurs d'une grande quantité d'information** et de ce fait ont un coût de transmission plus important que les événements fréquents

Mais la **double panne** est également un événement rare $\Rightarrow$ d'où la **possibilité des CCE** $\rightarrow$ Cas des mémoires d'ordinateurs

□ D'où la règle empirique des bons programmeurs :

✚ **On ne fait des « astuces » qu'à son corps défendant !!!** Tôt ou tard, il faudra payer

Cf. la définition de D.Ruelle

✚ « Information difficile à obtenir » = coûteuse

Le problème de Von Neumann : calculer plus et plus vite → complexité calculatoire

↪ **Comment prévoir le nombre d'opérations et le volume de mémoire de travail** (*résultats intermédiaires de calcul*), **nécessaires à la résolution d'un problème donné :**

- Linéaire : $k \times N$

[semi-]logarithmique : $k \times \log(N)$ ou $k \times N \times \log(N)$

- Polynomial : $k \times (N)^\alpha$

- Exponentiel : $k \times (\alpha)^N$ et au delà $k \times (\alpha^N)^M \dots$

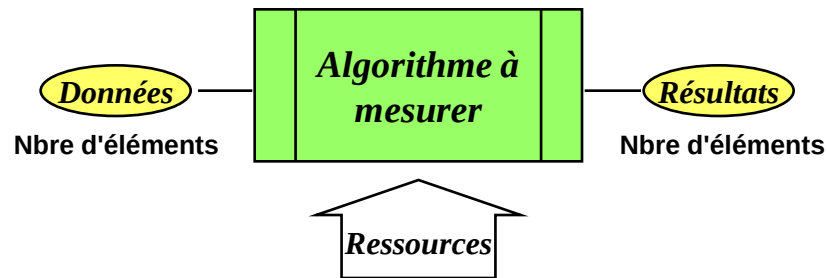
↪ **Concept de profondeur logique** (du à C.Bennett – R.Landauer) ; **calcul réversible** (cf. notion d'entropie d'un calcul)

Mesurer la complexité algorithmique

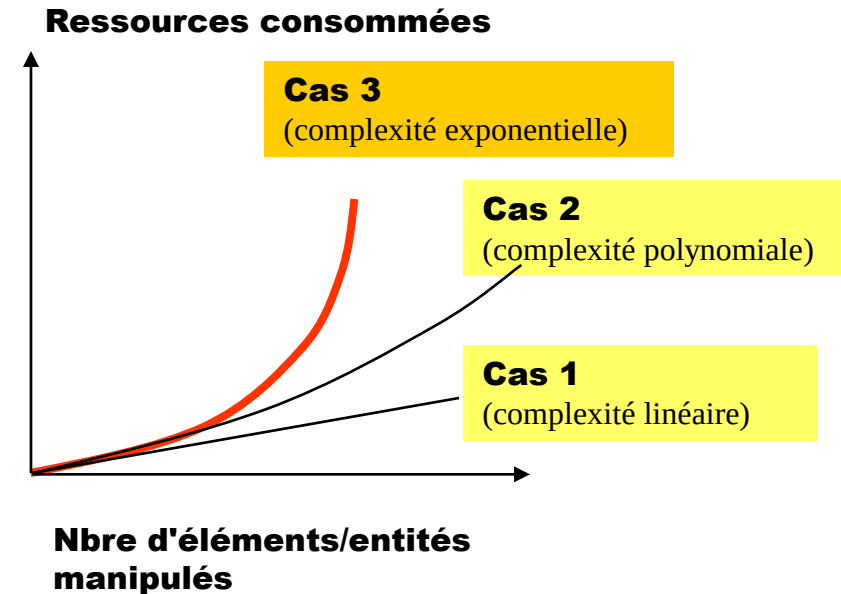
→ Performance des systèmes

On compte le nombre d'opérations nécessaires au calcul de la solution :

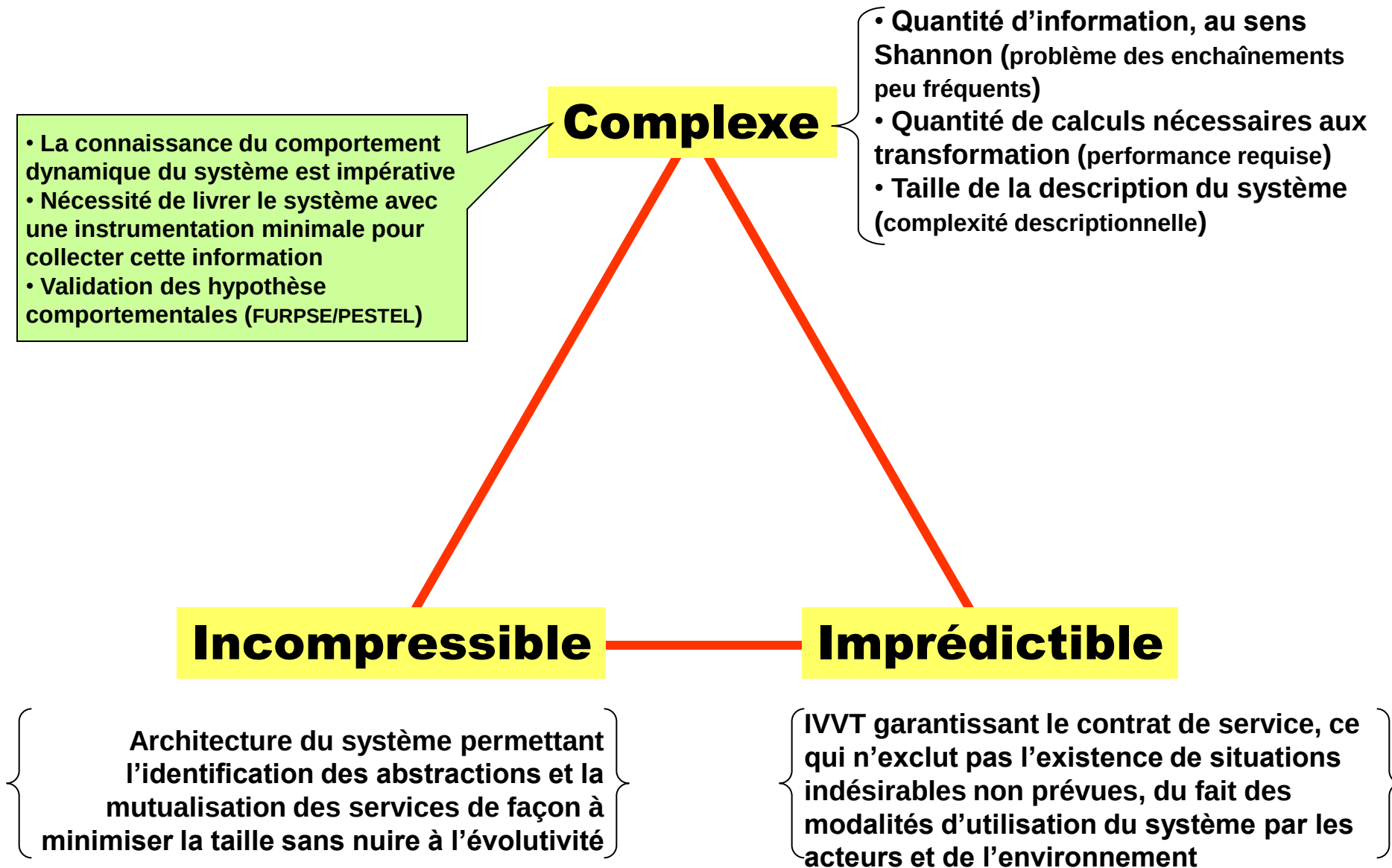
- Sur une **machine logique** étalon, type machine de Turing
- Sur une **machine réelle**



- Taille mémoire nécessaire
- Nbre d'instructions nécessaires
- Nbre d'E/S, ...



La complexité version Kolmogorov



Le problème de Kolmogorov-Chaitin : complexité descriptionnelle

↪ **Comment décrire un problème donné de la façon la plus concise possible :**

↪ Quel est le plus petit programme possible pour effectuer une transformation $F [\{Entrées\} \rightarrow \{Sorties\}]$

de façon à optimiser la capacité de stockage et/ou économiser la mémoire du programmeur (*Règle 7 ± 2*)

↪ **Théorie de l'aléatoire et/ou de l'absence de régularité :**

↪ Complexité **descriptionnelle universelle**

↪ Complexité **descriptionnelle relative** pour une classe de problèmes et/ou de machines

II. Peut-on quantifier la complexité ?

Tailles des textes décrivant les systèmes

Une remarque préalable

➤ Pour les **scientifiques** des sciences dures, il y a des pistes explorées depuis plus d'un siècle qui débouchent sur des « mesures » bien fondées, au sens de la théorie de la mesure

- 1ère trace avec les logiciens comme B.Russel, A.Turing et sa « machine », Von Neumann, ... mais on pourrait remonter à G.Leibniz

➤ Pour les **non scientifiques** ... ??? Exemple avec E.Morin

- Dans ses ouvrages, *La méthode* (Tome 3), *Introduction à la pensée complexe* (chapitre 6), ... on trouve une notion de « **computation** » qui dans son jargon a un rôle central :
 - ✓ « Qu'est-ce qui est important ... c'est la computation ... qui extrait des informations de l'univers » ; « Nous transformons les éléments et événements en signes » ; « La vie est une organisation computationnelle » ; Etc. ... Etc.
- Il y a là, à la fois une notion de **signe**, donc de textes déclaratifs faits à l'aide de ces signes ; et une notion de **transformation**, donc de « pas » ou de quantum élémentaire de transformation → Ce qu'un informaticien appellerait une « instruction » dont le « grain » sémantique va dépendre de la machine sous-jacente.

Cacher son ignorance dans le jargon ?!

Anti-théories, Données « même pas fausses », ...

↪ Usage de termes comme information, hasard, paradigme, programme, ...

- « Hasard », « programme », « information » chez les biologistes/médecins → Le livre céléberrissime de Jacques Monod, *Le hasard et la nécessité*, ou plus récemment, Jean-Claude Ameisen, *La sculpture du vivant*, ou encore Henri Atlan, *L'organisation biologique et la théorie de l'information*.
 - ✓ Dans la théorie de l'évolution (néo-darwiniste) le « hasard » est une espèce de Dieu, comme le « marché » pour certains économistes
- « Paradigme » chez les sociologues → Edgar Morin, avec sa « paradigmologie » ?! Avec ou sans « dialogique » et usage grotesque du théorème de Gödel
 - ✓ Problème du vrai et du faux, avec entre les deux l'« océan de l'insignifiance » (R.Thom)

L'information « textuelle » en biologie

↪ **Le génome (ADN et ARN) est construit sur un alphabet de 4 lettres : A, T, C, G**

↪ **Taille des génomes**

- Homme, chimpanzé, souris : 3,4 milliards de paires de bases (PB) → 1.000 livres de 400 pages
- Drosophile (*la mouche favorite des généticiens*) : 118 millions PB
- Bactérie *Escherichia coli* : 4,64 millions PB

↪ **Quant aux gènes eux-mêmes ...**

↪ **Le cerveau humain avec ses 100 milliards de neurones et 1 million de milliards de connexions (10^{15})**

L'information textuelle en mathématique

↪ Les mathématiciens se sont intéressés depuis longtemps à la taille des preuves de leurs théorèmes

- Considération esthétique : une « belle » preuve est une preuve courte qu'un mathématicien peut comprendre
 - ✓ D'où les controverses sur les preuves effectuées avec l'aide d'ordinateurs
- Le dernier théorème de Fermat : l'équation $x^n + y^n = z^n$ n'a pas de solution entière pour $n > 2$
- Taille de la preuve donnée par Andrew Wiles : **300 pages** + solide bagage en théorie des nombres et en géométrie algébrique ; plus de 5 ans de travail.
 - ✓ Seuls qq. dizaines de mathématiciens peuvent comprendre la preuve, dans le monde

L'information textuelle dans l'ordinateur

- ✚ **Dans un ordinateur, tout est texte** (*information linéaire, dans une mémoire linéaire*)
 - ✓ Mais le cerveau humain est à l'aise en 2D et en 3D
- ✚ **Tous les textes, exécutables ou non, sont fabriqués, directement ou indirectement, par des programmeurs (au sens large), y compris et surtout les tests**
 - ✓ Avec une variété de langages $\pm$ grande (c'est un codage de l'information)
- ✚ **Une mesure textuelle est intuitive, du point de vue cognitif, pour les acteurs humains, ce qui est le plus simple à la faire partager**
 - ✓ Mais qui agrège des éléments hétérogènes qui faussent/biaisent la mesure

Complexité textuelle : la taille brute de l'information

La « **matière** » informatique est du **texte**, écrit dans des langages qu'un **ordinateur** « comprend », qui décrit les **transformations** des données à effectuer, les **enchaînements** & les **interactions** du système avec son environnement (scripts de commande et/ou de paramétrage, tables de décisions, etc.) et les **données**



- **Taille des programmes :**
 - **Word** 4.0 : 256.000 lignes
 - **Excel** 4.0 : 850.000 lignes
 - Un **compilateur** de langage industriel : environ 250.000 lignes
 - Le calcul de nos **impôts** : environ 1 million de lignes (COBOL)
 - **Linux** : 2,3 millions de lignes
 - **Windows NT** : 3,8 millions de lignes
 - **GCOS7** : 4,5 millions de lignes (PL1) sur 10 ans et en 8 versions (soit 7 millions de lignes en maintenance) pour un effort de 2.600 hommes×an
 - Le **système de combat** du porte-avions Charles de Gaulle : environ 5 millions de lignes (Ada)
 - La « **guerre des étoiles** » du président Reagan : environ 10 millions de lignes (Ada)
 - Le **patrimoine d'AMADEUS** : environ 150 millions de lignes, avec une croissance de 10 millions de lignes par an
- **Taille des données :**
 - Potentiellement de très grande taille (e.g. foyers fiscaux, entreprises, assurance santé, bordereaux de sécurité sociale, etc.)
 - Très forte évolution des données du temps et de l'espace
 - Un énorme **risque d'incohérence** en cas de duplication non maîtrisée

Rappel : ces textes sont **conçus, écrits & manipulés** par des **hommes** (les architectes, les programmeurs et les opérateurs) et non par des robots (la présence d'erreurs est inévitable)

Peut-on, et comment, « mesurer » la complexité textuelle des programmes

⇒ **Constat : Il n'y a pas de mesure absolue de la complexité**

- C'est une notion relative qui dépend du niveau d'organisation que l'on observe (« puissance » du langage), et des capacités de l'acteur (humain, machine) qui observe
 - ✓ Le meilleur exemple est l'ordinateur lui-même, depuis le transistor jusqu'à ...

⇒ **Quel sens donner à l'expression : « plus complexe » ?**

- Plus grande taille du code, en nombre d'instructions
- Plus grande taille des tests, mesurée via un niveau de couverture
- Plus coûteux, plus long à réaliser, à intégrer, à modifier, ...
- Densité des différentes matrices de couplages utilisées en intégration
- Plus grand graphe, plus grand nombre cyclomatique, ...

Pourquoi ne pas utiliser la taille des tests qui sont l'analogue des « preuves » en mathématique ?

III. Peut-on maîtriser la complexité ?

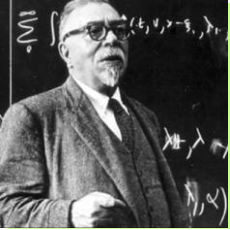
Architecture et ingénierie des systèmes complexes



Von Neumann et l'ordinateur, sans oublier Turing



- **Calculer beaucoup plus vite pour pouvoir résoudre numériquement les équations non linéaires, les seules « intéressantes » ...**
- **Le modèle d'architecture dit de « von Neumann »**
- **Le langage interne à la machine (binaire) et le langage externe (le plus proche possible de l'humain)**
- **La théorie des automates fiables**
- **Etc. ... Etc.**



N.Wiener et la cybernétique

↪ Le problème de N.Wiener, au MIT, dans les années 1940 :

- RADAR + Mécanique du vol des avions et trajectographie (i.e. l'endroit le plus probable où doit se trouver l'avion) + Balistique des tirs de DCA + Communications par le RTC + Calculateurs + Rétroaction/régulation (capteurs/effecteurs) = **Systeme de défense anti-aérienne**

↪ La cybernétique est fondamentalement une théorie de la régulation

- ✓ Cf. son livre majeur, *Cybernetics, or Control and communication in the animal and the machine*, Hermann et MIT Press, 1948

Le tout est plus grand que la somme des parties ...



Jay Wright Forrester

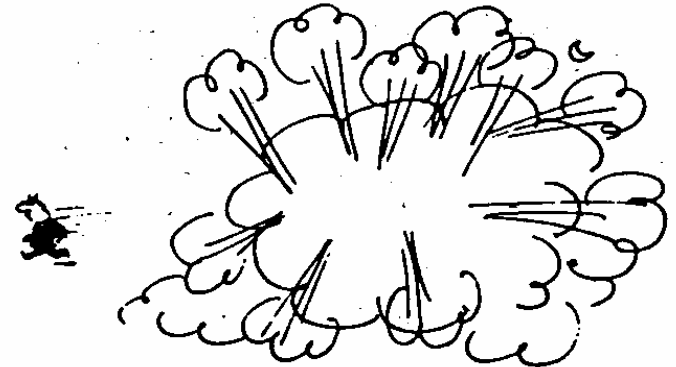
« If you had the right environment you would get the science, but you could easily have the science in an environment that did not make it effective »

Vous avez dit « Émergence » ?



Philip Warren Anderson

« More is different »



L'ingénierie des systèmes complexes

↪ **Naît dans les années 50-60 sous l'impulsion de Jay Forrester et du projet SAGE**

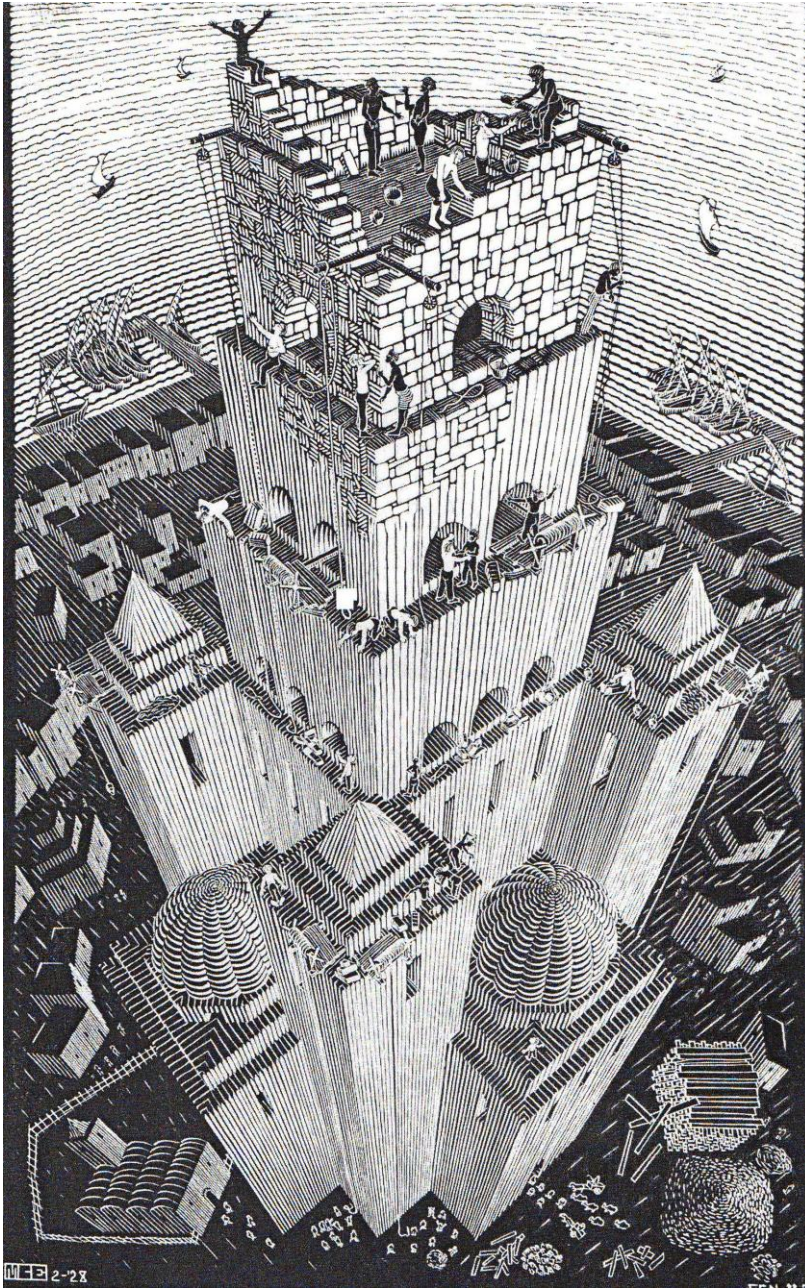
✓ RAND

✓ MIT Lincoln lab. + Sloan School of management, IBM Whirlwind, etc.

↪ **Transmission $\pm$ informelle en France via Jacques Stern à la SESA (STRIDA) et Pierre Thellier à ECA-Automation/Syseca (SENIT)**

↪ **Se perfectionne avec les grands projets spatiaux** (*NASA System Engineering handbook*) **dont Honeywell-Bull bénéficie et hérite dans les années 70**

✓ Cycle de vie ; revues de pairs ; etc. ... etc.



Architecture

Dessin de M.C.Esher

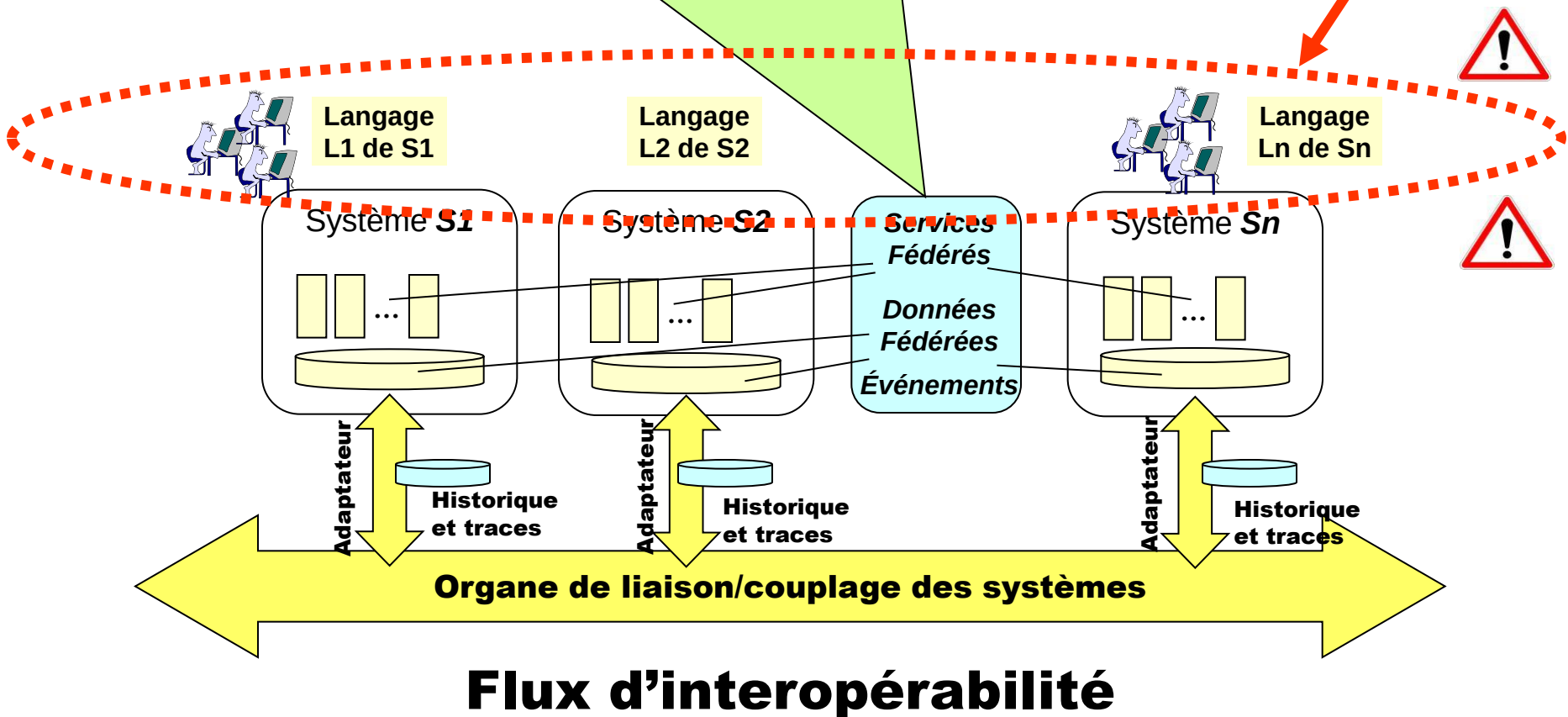
IV. Fabriquer de la complexité ... rien de plus simple

**Interopérabilité et alignement
de l'informatique avec les
métiers supportés**

La traduction en termes d'architecture du besoin d'interopérabilité

Méta-data : Référentiel de l'interopérabilité
Traduction des langages L1, L2, ... , Ln les uns dans les autres

Niveau sémantique



Le paradoxe de la sémantique

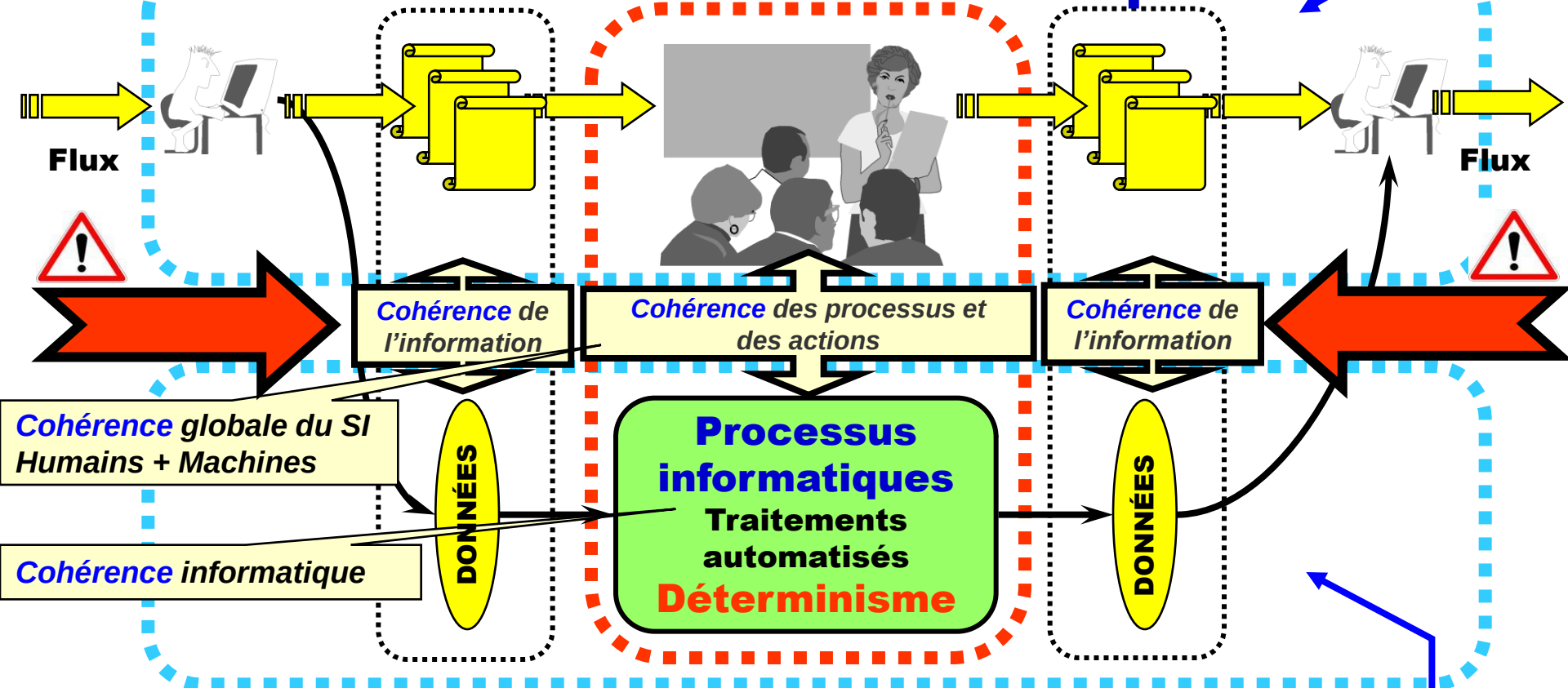
- ✚ **Il est impossible d'exprimer la sémantique sans faire appel à une notation particulière (signes, langages, système formel, ...)**
 - ✓ La connaissance de la notation ne garantit pas que l'on va correctement capter le sens du problème à résoudre - Aspects linguistiques
- ✚ **Comprendre un problème revient à définir une machine étalon associée à ce problème et à programmer le problème, i.e. la sémantique, dans le langage de cette machine ⇒ En construire la théorie**
 - ✓ Convention syntaxe/sémantique + pragmatique
- ✚ **Peut-on raisonnablement dire que la taille de ce programme, ou de ses tests, ou des deux, dénote la complexité du problème ?**

La machinerie informationnelle : intégration de l'information

Monde M1

Sphère de contrôle du langage naturel

Processus métiers de l'entreprise



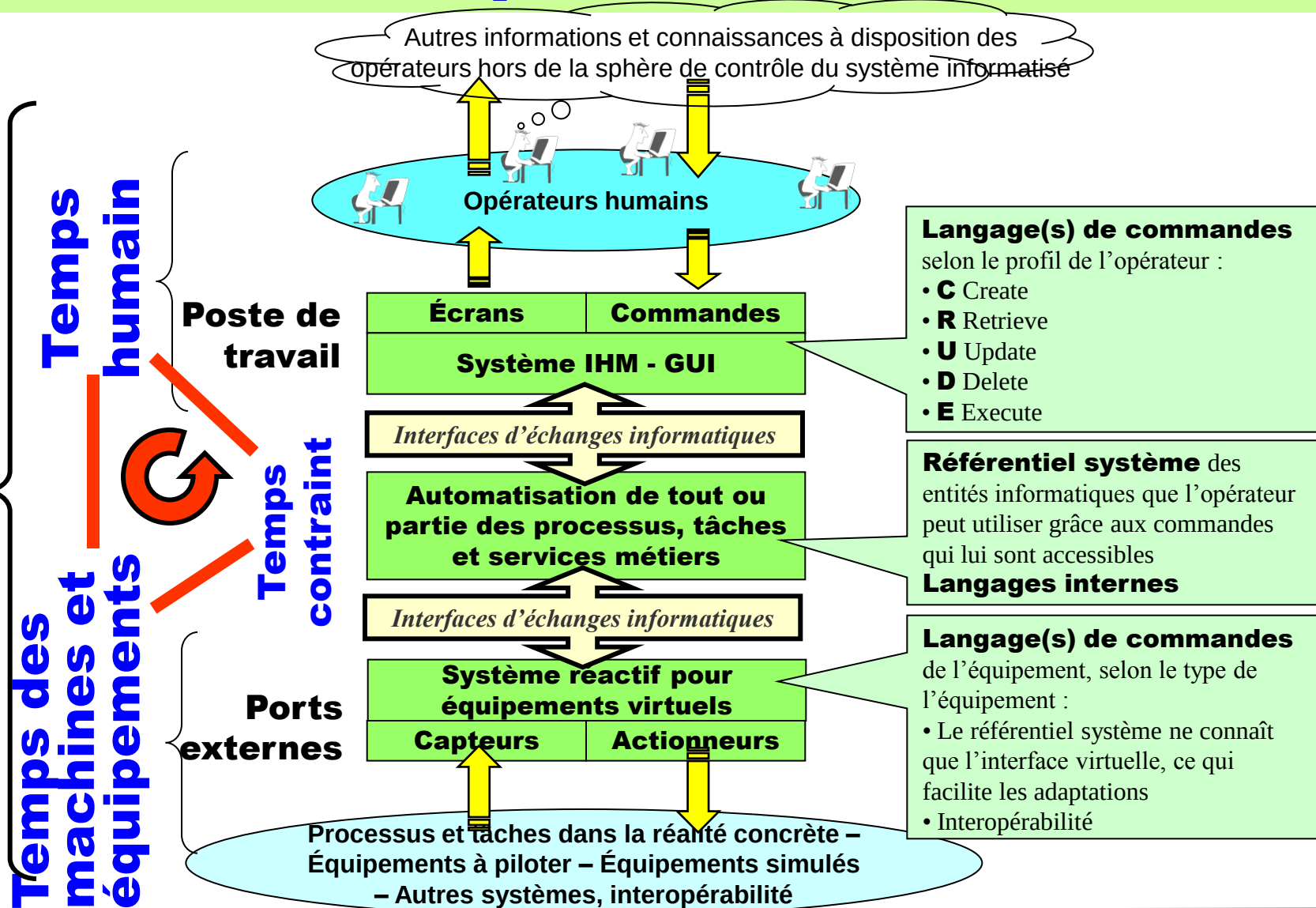
Monde M2

Sphère de contrôle des langages informatiques

La frontière des mondes M1 et M2

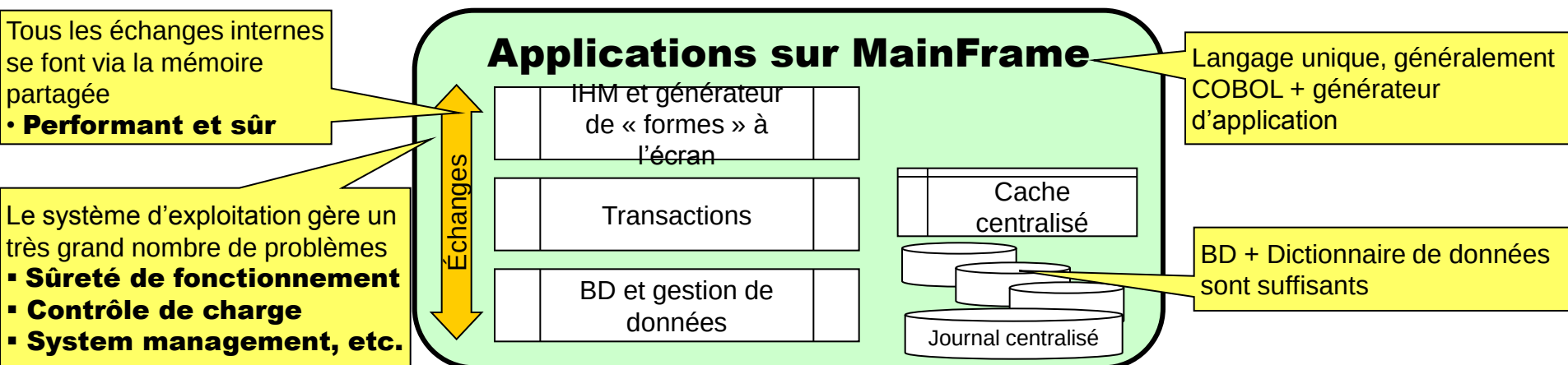
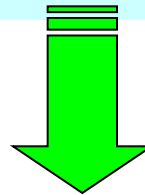
IHM/GUI et Capteurs Actionneurs

Caractéristiques des orchestrations



Informatique centralisée versus distribuée → Bon sens, simple

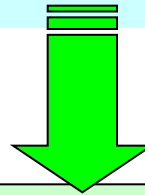
Tout est géré en un lieu unique et en temps différé



Univers déterministe, conforme au postulat de P-S. de Laplace

Informatique distribuée → Contre intuitive, Haute complexité

Tout explose, en milliers, voire millions d'interactions



Application répartie sur un grand nombre de machines *hétérogènes*

Une vraie **gestion de configuration** devient **indispensable**

Est organisée en

Client léger IHM

Cache

Échanges

Serveurs de transactions

Journal TP

Échanges

Serveurs de données (CRUD)

Cache des requêtes

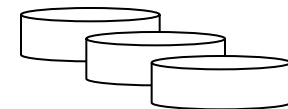
Cache BD

Journal BD

Langages ad hoc orienté IHM type VB ou SMALLTALK

Transactions métiers – Services métiers Nouveaux langages

Transactions sur les données via les requêtes aux serveurs



***Univers incertain* qui baigne dans un champ sémantique informationnel**

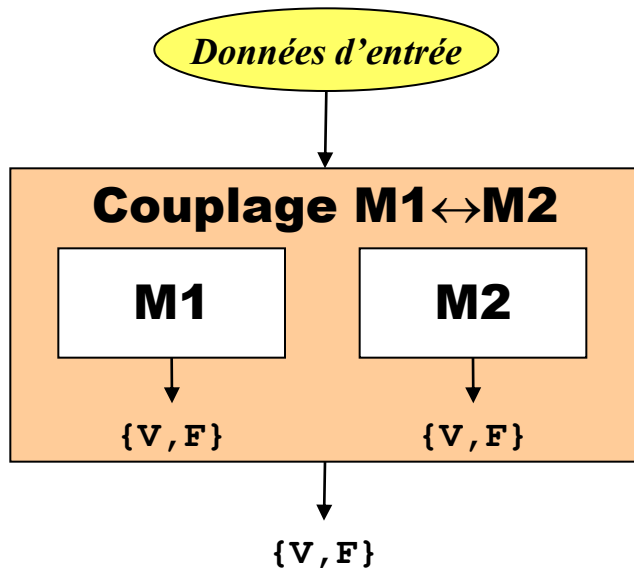
Une limitation fondamentale des systèmes distribués

↪ **Peut-on observer l'état du système dans sa globalité ?**

- De toute évidence, **un tel état existe**
- Mais il est **inobservable**, et encore moins contrôlable
 - ✓ Cf. Analogie avec les relations d'incertitude d'Heisenberg. Le simple fait d'observer change l'état ...

 **La nature du mécanisme permettant d'obtenir l'état de tel ou tel équipement du système fait que quand cet état sera connu de l'observateur, le système observé aura déjà changé d'état.**

Couplage de modules et valeurs de vérité émergentes



⇒ Pour 2 modules M1 et M2 il y a 16 fonctions logiques telles que

$$f_n(\{V, F\}, \{V, F\}) \rightarrow \{V, F\}$$

⇒ Pour n modules, le nombre de fonctions est :

$$2^{2^n}$$

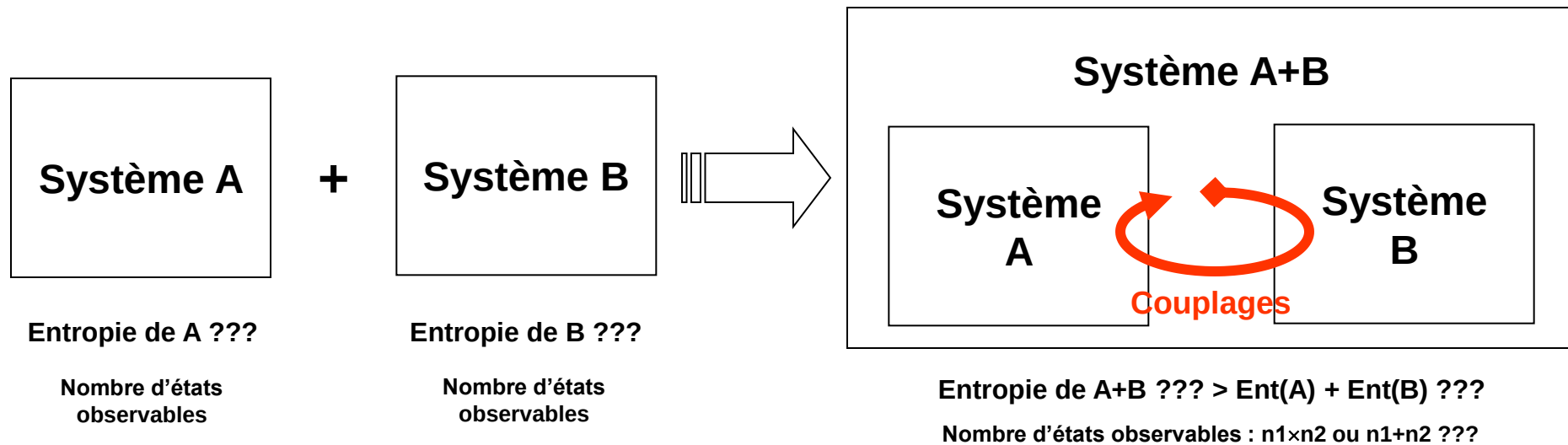
⇒ Si la logique est modale, avec une valeur de vérité correspondant à indéfini, on a un nombre de fonctions égal à :

$$3^{3^n}$$

 **Moralité : il suffit de changer le mode de couplage**
(sans modifier la programmation) pour observer des comportements émergents en cas de défaillance

Désordre informationnel et entropie

⚠ En termes de complexité, l'interopérabilité n'est ni plus ni moins que la stricte application de la loi de l'entropie croissante, résultant du « mélange » irréversible de 2 systèmes → le système est dissipatif.



➤ Mais on est **absolument certain** que Volume/effort de test pour le système A + B est > au Volume/effort de chacun d'eux ⇒ Il faut valider le couplage
Le **Volume/effort de test est l'équivalent d'une entropie**
➤ En cas de réversibilité, il y a un coût additionnel → Le système devient conservatif (cf. Prigogine)

Pour conclure

Que penser de la complexité ?

↪ **La complexité n'est ni une fatalité** devant laquelle il faut renoncer ou s'agenouiller, **ni une nouvelle religion** ou un changement de paradigme.

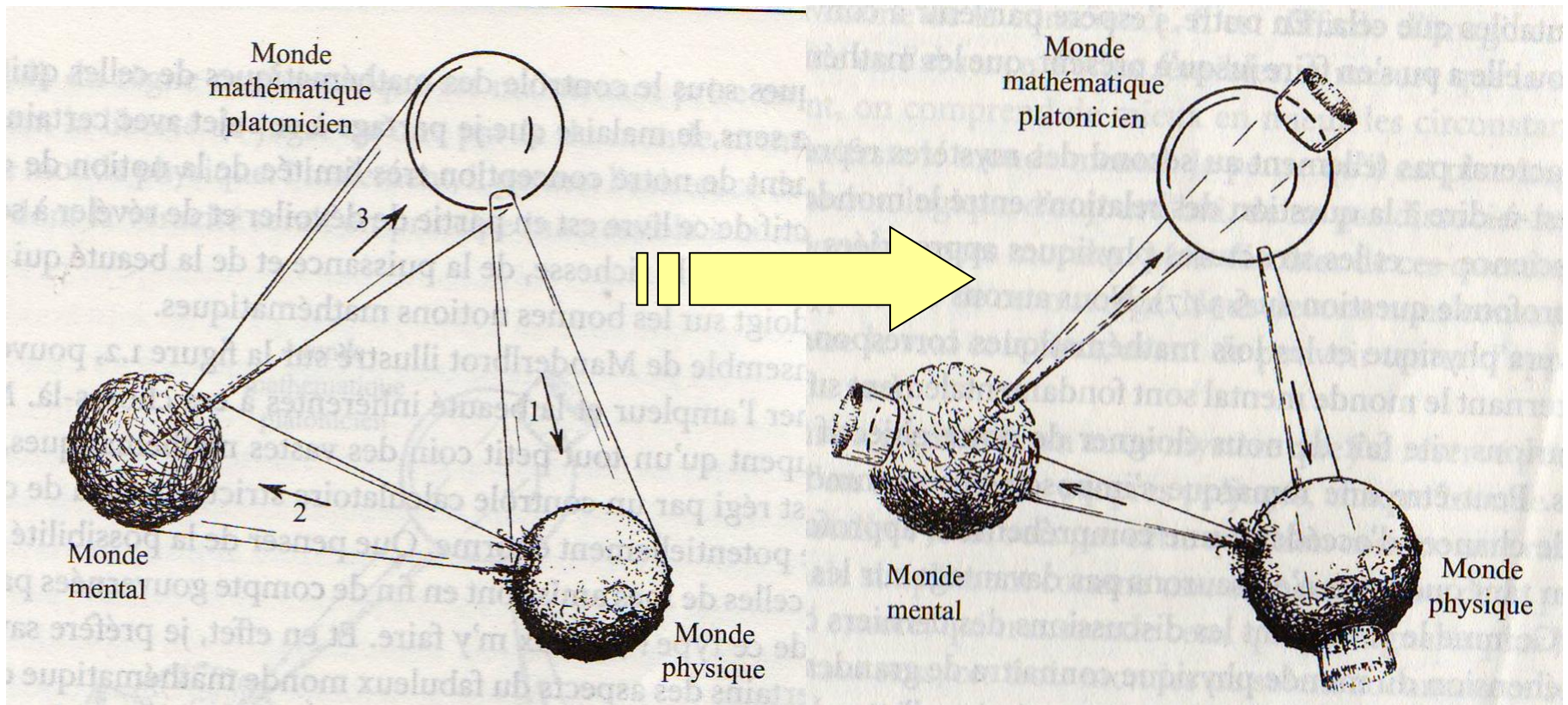
Elle est simplement le signe que le monde de nos connaissances, le 3ème monde de K.Popper, est un monde ouvert où rien n'est jamais définitif et dans lequel des opportunités émergent en permanence.

- ✓ Pour survivre et nous adapter, nous aurons besoin de plus de sciences, plus de connaissances et non de moins, pour nourrir les 3 milliards d'habitants de plus en 2030-50, pour ...

↪ **Seule la bêtise, l'ignorance, l'arrogance, les idéologies, la résignation, le manque de courage, ... sont responsables des maux qui nous accablent**

- ✓ Il nous faut sortir au plus vite du positivisme naïf et du scientisme étroit qui ont été à la source de la dévastation éthique du XXème siècle comme l'eugénisme ou l'ingénierie sociale, en évitant l'écueil de l'irrationnel dont le principe de précaution est le signe visible et inquiétant

Les 3 mondes de K.Popper revisités par R.Penrose



Source : R.Penrose, *À la découverte des lois de l'univers*

Le temps des architectes

⇒ Il est urgent et vital, pour la sûreté de nos systèmes, aujourd'hui tous informatisés, de **former de vrais architectes** de systèmes, en qualité et en quantité, pour autant que **nos sociétés en acceptent le risque**, comme elles l'ont fait depuis Copernic, Kepler, Galilée, Newton, ... , Pasteur, Flemming, ...

⇒ **Sans architecte**, il y aura quand même une architecture faite de « **bricolages** » arbitraires et incompréhensibles, un **fatras** de projets **sans règle** et **sans cohérence**, un **vrai risque sociétal**

✓ Tout le contraire de la simplicité nécessaire à l'intelligence des situations et au partage des connaissances qui exigent de **bonnes notations**

⇒ Il faut **refuser la montée de l'irrationnel** ; bien que complexe, le monde est et reste **raisonnable**



C.E.S.A.M.E.S.

**Association à but non lucratif constituée sous le régime de la
loi du 1 Juillet 1901**

Siège social : 41, rue Barrault – 75013 PARIS

SIRET : 518 815 741 00013 – NAF : 9499 Z

Site Web : www.cesames.net
Contact : contact@cesames.net