

Complexité

Réflexions sur quelques concepts



Complexe ? Complicqué ?

Emergence(s)

Auto-organisation et évolution

Mesurabilité ? Prévisibilité ?

Plan 1/2

- Qu'est-ce qu'un système complexe ?
 - Généralités sur les systèmes
 - Recherche d'une définition
 - Critères *structurels* ou *comportementaux*
 - Proposition « *structurelle* »
- Propriétés générales des systèmes complexes
 - Dédution des propriétés comportementales
 - Systèmes complexes vs. compliqués
 - Propriétés et questions diverses
- Emergence
- Auto-organisation et évolution
- Mesurer la complexité

Plan 2/2

- Emergence
 - Différents concepts et leurs implications philosophiques
 - Emergence standard, radicale, forte, ontologique vs. épistémique
 - Application au *problème corps-esprit*
- Auto-organisation et évolution
 - Définition de l'A-O (Organisation ? Auto- ?)
 - Les mécanismes de l'A-O : adaptative vs. spontanée
 - Liens avec processus darwiniens étendus et processus essais/erreurs
 - Théorie et critique de l'évolution spontanée de Kauffman
- Mesurer la complexité
 - Objectifs
 - Complexité de la structure
 - Kolmogorov, Bennett, autres suggestions
 - Complexité du comportement
 - Complexité algorithmique, complexité effective

Quelques exemples de systèmes complexes et leurs propriétés émergentes

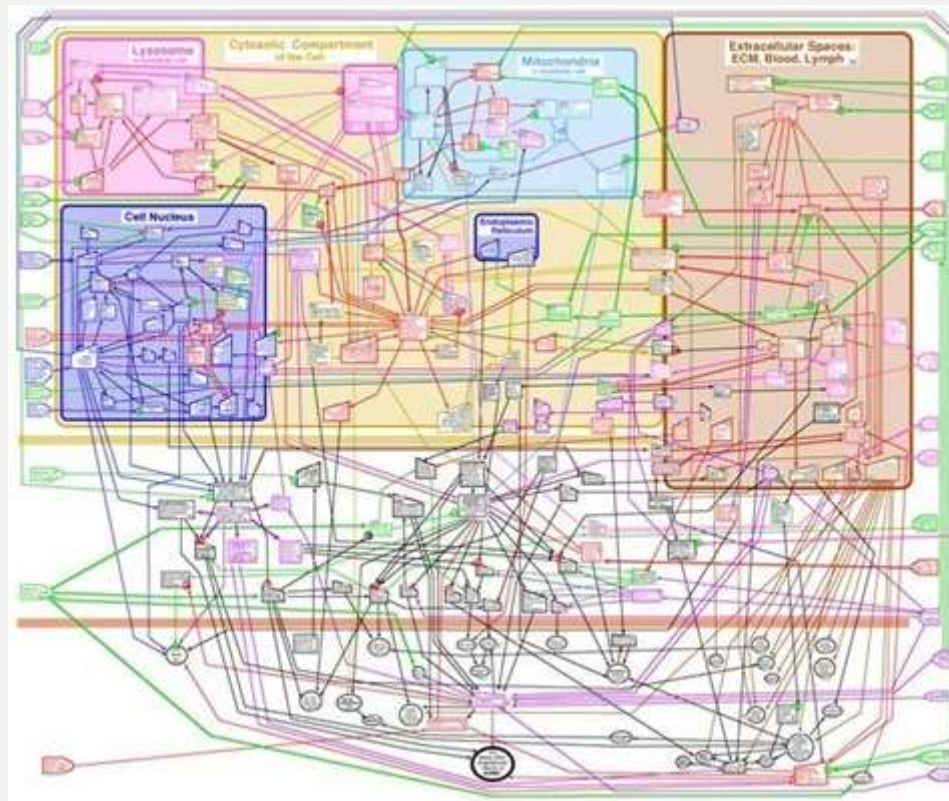
Systèmes naturels

- Organisme vivant → **nutrition, autodéfense, reproduction...**
- Un gros cerveau (homme, mammifère...) → **la pensée, l'émotion...**
- Un petit cerveau (abeille, fourmi) → **la recherche de nourriture...**
- Les fourmilières → **recherche efficace de nourriture, autodéfense...**
- Scène visuelle → **analyse et interprétation**
- Les systèmes climatiques ou météorologiques → **orages, cyclones, canicules...**
- Les systèmes planétaires, les 3 corps → **instabilités, attracteurs (étranges ou normaux)**
- La **turbulence**
- Dune de sable → **avalanches**

Systèmes artificiels ou hybrides

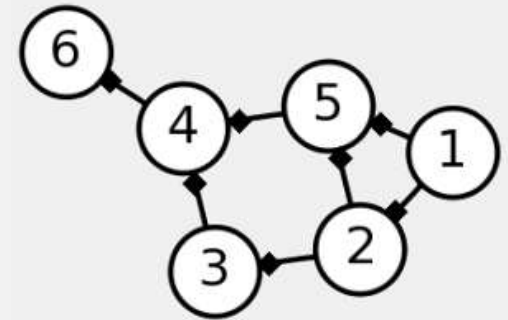
- Les systèmes micro- et macro-économiques → **crises, fixation des prix, migrations...**
- Les villes → **spécialisation, croissance et extension des quartiers, déplacements de population...**
- Automates cellulaires, dont Jeu de la Vie (JDLV) → **solutions à un problème posé, glisseurs et autres figures**
- Le jeu d'échecs ou de dames (joueurs compris) → **stratégies de maîtres, positions gagnantes**
- Les réseaux de neurones artificiels spécialisés → **comportements « intelligents » de robots, expertise**
- La chute d'un vase sur le carrelage → **aucune émergence**
- Un gaz dans un récipient → **pression, température**
- Un pendule à deux bras articulés (comportement chaotique) → **aucune émergence**
- Une assiette de spaghettis ? → **aucune émergence** (*mais est-ce un système complexe ?*)
- L'eau dans une casserole → **cellules de Bénard**
- Une phrase du langage → **le sens global de la phrase**

Quelques généralités sur les systèmes (dynamiques)



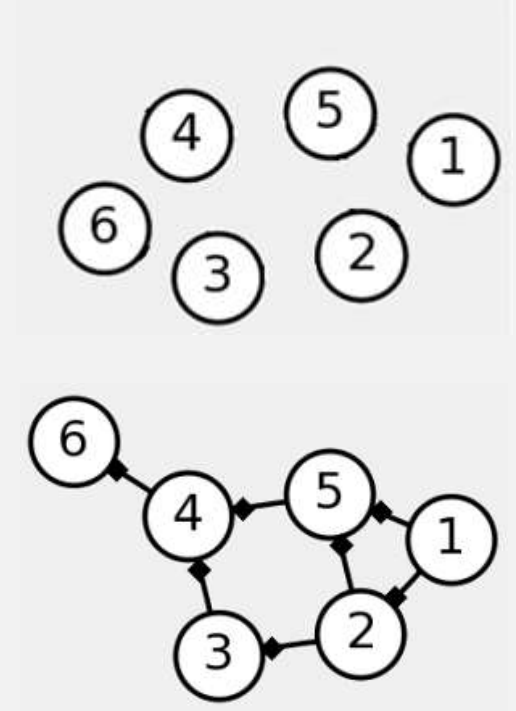
Qu'est-ce qu'un système ?

- C'est un ensemble fini composé de plusieurs éléments en *interaction dynamique*
- Il est caractérisé par plusieurs attributs :
 - Les *composants* (*éléments, parties, pièces, agents...*)
 - Nature, propriétés individuelles (attributs)
 - Modélisation, paramètres
 - Etats instantanés (*variables d'état*)
 - La *structure* des interrelations (graphe orienté)
 - Paramètres sur les liens (« *poids synaptiques* »)
 - Les *lois* d'interaction
 - Décrivent les *états futurs des composants* en fonction de l'état à l'instant t des composants en interaction (*fonctions de transition*) et de l'état de *l'environnement* (si le système est ouvert)
 - Ces lois comportent des *paramètres*
 - Fonctions de transition *discrètes* ($t \rightarrow t+1$) ou *différentielles* selon que t est discret ou continu
 - Les transitions peuvent inclure des *retards* ($t \rightarrow t+r$)



En résumé

- Un système ne peut *jamaïs* être caractérisé par la description de ses *seuls* composants
- Il faut nécessairement spécifier :
 1. Les *composants*
 2. La *structure* des interactions
 3. Les *lois* d'interaction
- Tout système, *complexe ou non*, est donc « plus » que la « somme » de ses parties
 - Les parties, *seules*, n'expliquent rien



On distingue...

- Systèmes naturels

- Systèmes *observés* dans la nature, dans la formation desquels *aucune volonté humaine* n'est intervenue
 - Organismes vivants, sociétés animales sauvage, météo, astronomie...



- Systèmes artificiels

- Systèmes *entièrement voulus* et réalisés par l'homme
 - Machines-outils, photocopieuses, logiciels...



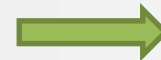
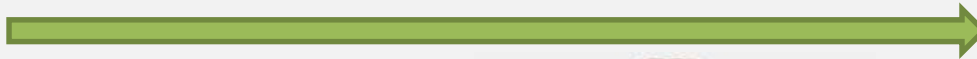
- Systèmes hybrides

- *Partiellement voulus* ou influencés par l'homme, mais *échappant à son contrôle total*
 - Systèmes sociaux : villes, entreprises
 - Systèmes mixtes homme/nature : climat, agriculture...
 - Internet
 - Economie
 - Logiciels adaptatifs (auto-apprentissage)
 - Robots échappant à leurs créateurs (= *fantasme à la mode* ?)



Echelles temporelles d'évolution

- L'évolution d'un système (*complexe ou non*) s'étend sur *plusieurs échelles temporelles*
 - *Variations lentes, intermédiaires, rapides, instantanées*
- Chaque niveau d'échelle installe une *structure* et des *paramètres* qui seront considérés comme *quasi-constants* (jouant un rôle *structurel*) pour les échelles plus fines
 - Exemple : le *cerveau* (*aussi : le climat, la géographie, les groupes sociaux...*)
 1. Evolution du cerveau à travers les *espèces* (*millénaires*)
 2. Evolution *culturelle* (*décennies, siècles*)
 3. Structuration générale de la *personnalité* d'un *individu* : « structure » mentale, expérience, vieillissement... (*décennies*)
 4. *Apprentissage*, connaissances nouvelles (*mois, années*)
 5. *Pensée courante*, perceptions, cognition (*secondes, minutes*)



Sous-systèmes, modules, organes

- De nombreux systèmes comportent des *sous-systèmes*
- Dans un système *organisé* (complexe ou non), ces sous-systèmes remplissent des *fonctions* jouant un *rôle spécifique* dans le fonctionnement global
 - Exemple : *organes* du corps, *modules* d'un logiciel, *groupes sociaux*...
- Ces sous-systèmes sont en *interaction mutuelle*
 - Mais cette interaction n'est *pas une interpénétration* au niveau des *composants* des sous-systèmes
 - Elle se fait au niveau d'une *interface* entre sous-systèmes
 - Exemple : un *logiciel* et ses *modules* : la communication se fait par des variables situées à un niveau *global relatif à chaque module* : les variables locales ne sont *pas visibles* des autres modules (*sauf exceptions*)
- Les interfaces peuvent être, soit des *composants représentatifs*, soit des caractéristiques globales (*émergentes*) de chaque sous-système
- Mais les frontières des sous-systèmes ne sont *pas toujours nettes*
 - Il peut y avoir, outre l'interface « officielle », des relations directes entre certains *composants individuels* d'un système à l'autre (*exemple : le cerveau*)
 - Si ces relations directes sont *trop nombreuses*, l'interpénétration augmente, la décomposition en sous-systèmes devient *moins pertinente* (*même exemple...*)



Qu'est-ce qu'un système *complexe* ?

Recherche d'une définition

Recherche d'une définition de la complexité

- Il existe de *nombreuses définitions**, qui ne retiennent pas les mêmes systèmes
 - Selon certaines, les S.C. doivent avoir « de *nombreux éléments* », ou des « *lois simples* », mais pas pour d'autres
 - Le caractère *imprévisible* est parfois exigé, mais pas toujours
- La définition que je cherche doit *inclure* tous les exemples donnés au début 
- Elle doit *exclure* tous les systèmes considérés comme *non complexes*, même les plus compliqués (*photocopieuses, horloges astronomiques...*)
- Elle doit être la plus « pure » possible, sans *redondances* ni *contradictions*

Citations diverses 1

- Un système dont l'évolution est *imprévisible*
- *Incertitude* et complexité sont liées
- Le *tout* est *plus* que la *somme des parties*
- Les éléments sont *interdépendants* (récursion)
- Toutes les choses sont *causantes et causées* (Pascal)
- La complexité est un tissu de constituants *hétérogènes inséparablement associés* : elle pose le *paradoxe de l'un et du multiple* (Morin)
- Un système complexe est un système qui *s'adapte*, capable d'*auto-organisation*

Citations diverses 2

- La définition de la complexité de MCX APC*, souligne la *diversité des constituants*, leur *indissociabilité* et *l'imprévisibilité* du système
- Cohen et Axelrod** définissent un "système adaptatif complexe" comme *"un monde où beaucoup d'agents s'adaptent tous les uns aux autres et où l'avenir est extrêmement difficile à prédire"*
- La complexité peut engendrer des *effets pervers* ou des *contradictions*
- « La complexité s'impose d'abord comme une *impossibilité de simplifier* ; [...] La complexité n'est pas complication. [...] Ce qui est compliqué peut se *réduire à un principe simple* comme un *écheveau embrouillé* ou un *nœud de marin* » (E. Morin)
- Un système complexe agit sans être contrôlé par une *autorité centrale*, il résulte du fonctionnement « *bottom-up* » de ses composants

Définition de Melanie Mitchell

- Elle s'appuie sur 4 exemples :
 - *Fourmilières*
 - *Système immunitaire*
 - *Neurones, cerveau*
 - *Créateurs de sites Web*
- Définition proposée par M.M.
 - « A system in which *large networks* of components with *no central control* and *simple rules* of operation give rise to *complex collective behavior*, sophisticated *information processing*, and *adaptation via learning or evolution* »
 - M.M. ajoute que l'adaptabilité est une option, mais qu'elle ne traitera que de systèmes adaptatifs

Synthèse des citations

- On relève plusieurs idées
 - *L'imprévisibilité (souvent prise comme "grande difficulté à prévoir" → imprévisibilité intuitive)*
 - Mais celle-ci ne peut pas être prise pour définition, car elle n'est *ni nécessaire ni suffisante* pour qu'un système soit complexe (*exemples : CP : température d'un gaz, NCNP : lancer de dé...*)
 - *L'impossibilité de simplifier (l'écheveau simplifiable de Morin)*
 - Cela ne *caractérise pas la complexité* : l'écheveau est simplifiable, mais pas *une suite de 1000 chiffres aléatoires* (parmi d'innombrables exemples de *complication irréductible*)
 - *Composants hétérogènes, composants nombreux*
 - Ne caractérise pas la complexité : *neurones (homogènes), automobile (hétérogène), systèmes à 3 corps*
 - *Adaptation, auto-organisation*
 - Ce sont en effet des propriétés de la plupart des systèmes complexes, mais il y a des *exceptions* (*gaz dans un récipient, automates cellulaires*)
 - *Le tout est "plus" que la "somme" des parties*
 - C'est une caractéristique universelle de *tous les systèmes*, *qu'ils soient complexes ou non*
 - *Absence d'autorité centrale*
 - C'est une conséquence du fonctionnement *bottom-up* de composants autonomes
 - Il est utile de le *rappeler dans la définition*, car ce fonctionnement pourrait être *forcé*
 - ❖ *Tout dépend de tout*, toutes les choses sont *causantes et causées*, éléments *interdépendants, indissociables, s'adaptant tous les uns aux autres, effets pervers, contradictions...*
 - Tout ces termes tournent autour du concept de *RETROACTION* (*voir plus loin*)
 - Ce concept me semble être une *caractéristique essentielle de la complexité*

Conclusion (provisoire)

- Il est *difficile* de trouver une définition satisfaisante
 - Car *la plupart des propriétés* évoquées ne sont *ni nécessaires, ni suffisantes* à la caractérisation d'un système complexe
 - Elles ne *discriminent pas* un système complexe de certains systèmes non complexes, mais *compliqués* ou *aléatoires*
- Il convient de définir les *objectifs* et les *contraintes* d'une « *bonne définition* »

Complexité *intrinsèque* vs. *extrinsèque*

- Complexité intrinsèque

- La complexité d'un système est *intrinsèque* si elle ne dépend que des *caractéristiques* de celui-ci

- Complexité extrinsèque

- La complexité est alors « *dans l'œil* » de l'observateur : *difficulté* de comprendre, de décrire ou de prévoir le comportement du système
- La qualification comme complexe peut alors *dépendre* du métier, du niveau d'expertise et/ou de la psychologie de l'observateur ou du concepteur

- Point de vue adopté ici

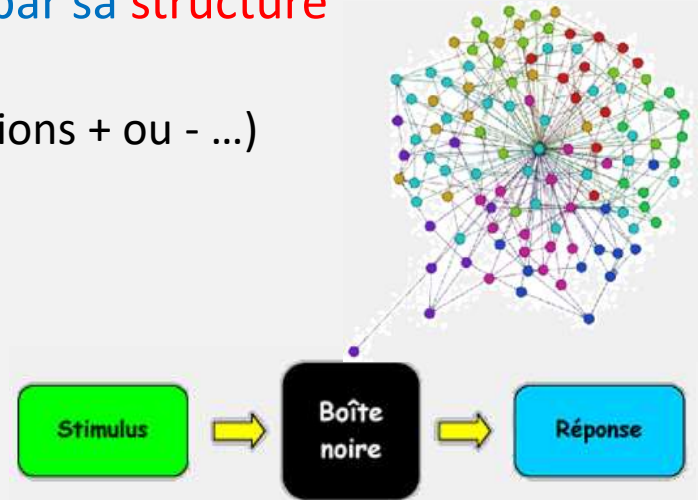
- *Définition d'un système complexe* : j'adopte résolument le point de vue *intrinsèque* : un système sera *défini* comme complexe en vertu de ses caractéristiques propres
- Cela a l'avantage de permettre une *qualification unique* d'un système comme complexe ou non, au lieu de faire *dépendre* cette définition d'un point de vue *subjectif*
- En revanche, les *propriétés secondaires*, n'entrant pas dans la définition, pourront être selon les cas, *soit intrinsèques, soit extrinsèques (comme par exemple l'imprévisibilité, qui dépend souvent de la compétence, l'outillage ou les connaissances du prévisionniste)*

Objectif

- Rechercher une définition *minimale*, la plus « pure » possible de la complexité, en séparant les *propriétés caractéristiques* des *propriétés induites* (qui se déduisent de la définition), ou des *propriétés fréquentes* mais *non nécessaires* (comme *l'imprévisibilité*)
- Conditions générales d'une « bonne » définition
 - *Toutes* les conditions invoquées dans une définition doivent être *nécessaires*
 - *Aucune* d'entre elles ne doit pouvoir être omise : une définition ne doit pas contenir de *redondances*
 - Ces règles générales réduisent les risques de *flou* ou de *contradiction*
- Conditions particulières à la complexité
 - Les critères retenus devront permettre de *retenir tous* les systèmes considérés comme complexes selon la liste donnée au début 
 - Ils devront à l'inverse *éliminer tous ceux* qui ne sont pas considérés comme complexes
 - Certains systèmes peuvent être difficiles à classer (*thermostats...*)

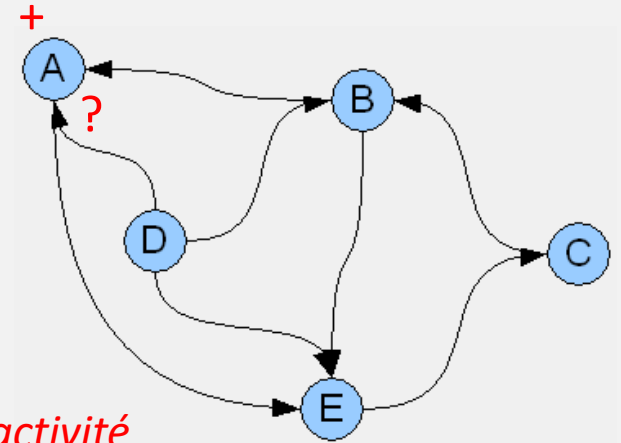
Structure ou comportement ?

- On définit les propriétés d'un système soit par sa **structure**
 - Nature et nombre des composants
 - Structure des interactions (densité, rétroactions + ou - ...)
 - Lois de fonctionnement...
 - Soit par son **comportement global**
 - Propriétés émergentes
 - Imprévisibilité
 - Adaptabilité
 - **Inconvénients** possibles d'une définition **comportementale**
 - Beaucoup des comportements usuellement invoqués sont **non spécifiques d'un système complexe** ; un système **non complexe** pourrait avoir **les mêmes**
 - En particulier : *Imprévisibilité, existence de propriétés globales, impossibilité de simplifier, le tout "plus" que la somme des parties, sophistication...*
 - De nombreux types de comportement sont des **conséquences** de structures particulières (*ex : rétroactions → imprévisibilité...*) (*voir plus loin*)
- Type de définition recherché
- Une caractérisation structurelle simple, dont les propriétés comportementales seraient des conséquences démontrables (moyennant si besoin, pour certains, des hypothèses complémentaires)



Les rétroactions au cœur de la complexité

- Beaucoup décrivent un système complexe comme ayant des *réactions imprévisibles*
 - Ces réactions sont souvent dues à des *effets indirects* venant du système lui-même
 - Toute *action* peut provoquer des *contradictions* si on ne tient pas compte de ces rétroactions qui viennent en *modifier les effets directs* évidents
 - *L'interdépendance* des éléments est due à la *rétroactivité*
- Ces types d'imprévisibilités ou de surprises sont dues à l'existence de *boucles de rétroactions*
 - Une modification d'un élément A « revient » sur cet élément en changeant, et parfois en inversant, cette modification
 - La valeur finale de A en devient imprévisible ou exigeant un *long calcul*
 - La multiplication de ces rétroactions, parfois sous-estimées, finit par rendre le *comportement global* du système *incompréhensible*
- *Tous les systèmes* listés au début comportent de nombreuses rétroactions
- Les systèmes *non complexes* (*horloges...*) n'en comportent pas ou très peu
- L'existence de *rétroactions* est donc bien une cause *structurelle* au cœur du *comportement* des systèmes complexes



Une proposition (à options)

- Définition (structurelle) : un système complexe est un *système dynamique, non contrôlé par son environnement*, dans lequel il existe un taux significatif ¹ de *boucles de rétroaction*
- Options (comportementales) au choix² : on peut vouloir exiger en outre qu'un tel système :
 1. Présente des *propriétés globales (émergentes)*
 2. Résulte d'un processus d'*auto-organisation*
 3. Soit *adaptatif* (à l'environnement, par *évolution* ou *apprentissage*)
 4. Soit *fonctionnel* (obtention d'un certain *résultat*)
- Certaines de ces « options » sont-elles des *propriétés démontrables* à partir de la définition ?
 - Oui, dans de nombreux cas (*systèmes naturels ou hybrides*)
 - *Slides suivantes : essais de démonstrations*

¹ Ce taux va influencer sur le *degré de complexité* du système

² Toutes exigées par Melanie Mitchell

Cette définition répond-elle aux objectifs ?

- ✓ La définition *retient* tous les exemples de systèmes complexes présentés au début 
- ✓ La définition *élimine* tous les systèmes non complexes, même compliqués (*horloges, automobiles...*)
- ✓ La définition ne contient pas de *redondances* ni de *propriétés induites*
- ✓ Toutes les propriétés exigées (2) sont *nécessaires*
 - ✓ *Non-contrôle par l'extérieur*
 - ✓ *Rétroactions significatives*

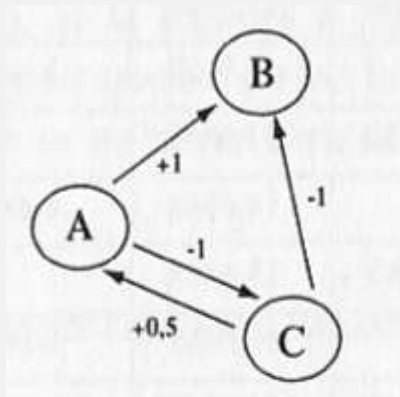
Déduction de certaines propriétés globales

A partir de la définition structurelle
et de considérations complémentaires
(comme annoncé dans la définition)

Peut-on déduire l'*imprévisibilité* à partir de l'existence de *rétroactions* ?

- Rétroactions → Imprévisibilité

- Un système comprenant des *rétroactions* multiples est naturellement *imprévisible* (ou très difficilement prévisible)
 - En effet, cela entraîne des comportements fortement *itératifs* ou *instables* (boucles) : chaque élément s'influence lui-même, et ainsi de suite
 - Cette imprévisibilité concerne plus le *détail des interactions* que les *propriétés globales émergentes* du système (*voir plus loin*)
- Prenons un exemple simple* et pourtant imprévisible :



- Augmentons A de 10 %

- Sans *boucles de rétroactions*, les valeurs de A, B et C seraient calculées en *1 itération*
- Avec ces rétroactions (pourtant élémentaires), il faut un *grand nombre d'itérations* pour converger vers des valeurs (dans ce cas, stables) de A, B et C
- Dans d'autres cas le système pourrait même être *instable* et *diverger*
- Tout cela le rend *imprévisible*, au moins *intuitivement*

Un système complexe *naturel* est-il *auto-organisé, adaptatif, émergent* ?

- *Au commencement était le simple... puis des rencontres eurent lieu...* 
- Un système *naturel simple* non auto-organisé évolue *au hasard* et a tendance à *se dégrader* avec le temps puis à *disparaître*
 - En effet, *incapables de s'adapter à leur environnement*, de tels systèmes finissent par *disparaître* : sélection, instabilité, détérioration, blocage...
 - « Démonstration » par les *réseaux booléens aléatoires* (Kauffman) (*démo en Annexe*)
- Les systèmes complexes *naturels* que l'on *observe aujourd'hui* ont donc dû subir des *processus régulateurs* dans le passé pour se complexifier tout en restant *stables*
- Nous verrons *deux catégories* de *processus régulateurs* pour les systèmes *naturels*
 1. *Sélection par adaptation à l'environnement* (*processus « darwiniens »*)
 - *Evolution biologique, fourmilières...*
 2. *Action contraignante de lois physiques* (*processus « spontanés »*)
 - *Cellules de convection, tornades, climat*
 - *Systèmes astronomiques, 3-corps*
- Ces processus régulateurs constituent une *auto-organisation* (*voir plus loin*)
- Les systèmes naturels sont donc *adaptatifs* (*les darwiniens*) et *auto-organisés*
- La *stabilité* en environnement *changeant* constitue déjà une *propriété globale*, donc *émergente* (*voir plus loin*)

Systemes *compliqués* vs. *complexes*



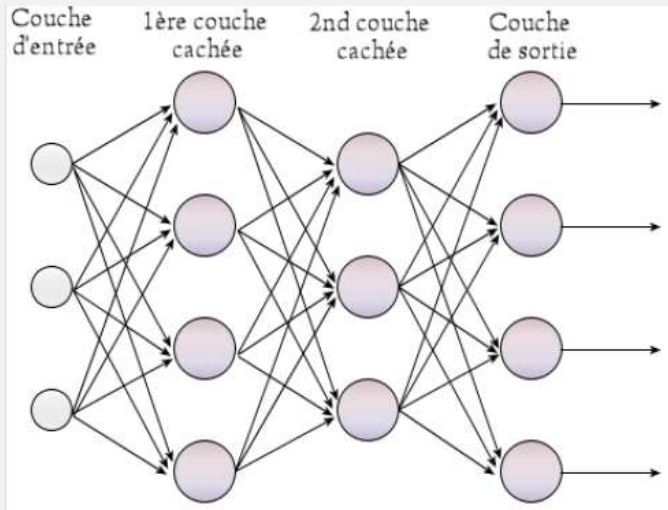
Systèmes compliqués vs. complexes

- Exemples de systèmes compliqués et leurs propriétés globales
 - Une automobile → *vitesse, consommation, autonomie, élégance*
 - Une locomotive → *vitesse, puissance*
 - Une photocopieuse trieuse ultra-rapide → *qualité, débit, silence de fonctionnement*
 - L'horloge astronomique de la cathédrale de Strasbourg → *heure, phases de la lune, position des astres, élégance*
- Prévisibilité des systèmes compliqués
 - On ne peut pas comprendre un système compliqué *en pièces détachées* (cf. « *le tout est plus que la somme des parties* »)
 - Mais, *à l'inverse d'un système complexe*, on peut *analyser* et *comprendre* un système compliqué dont on connaît *les composants, la structure et les lois d'interaction*
 - Pourquoi ? Absence de rétroactions → analyse séquentielle du système



Conséquences des rétroactions

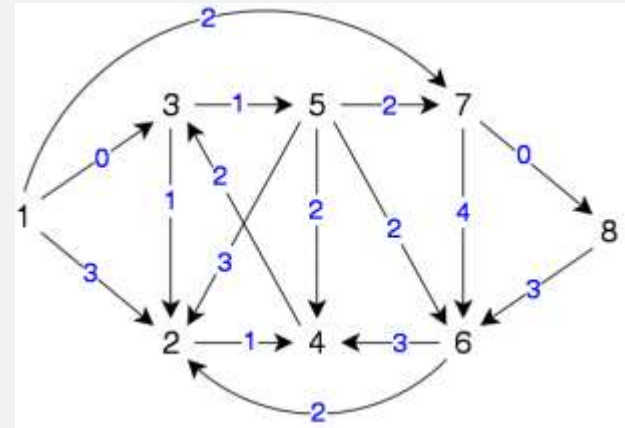
Sans rétroactions (compliqué)



Graphe progressif (ex. Perceptron)

- Parcours *séquentiel*
- Pas de dynamique intrinsèque
- Les nœuds portent des informations *stables* qu'il est possible d'interpréter
- *Prévisibilité* (hors aléas)

Avec rétroactions (complexe)



Graphe complexe (Rétroactions)

- Parcours *itératif*
- Dynamique intrinsèque
- Les valeurs numériques des nœuds sont *instables* et donc difficiles à interpréter
- *Imprévisibilité* (selon la taille)

Qu'est-ce qui distingue *complexe* et *compliqué* ?

- L'imprévisibilité ?
 - **Non** : un système simple aléatoire est imprévisible
 - Un système complexe peut être prévisible (*JDLV, météo à court terme*)
- Le nombre de composants ?
 - **Non**, on trouve tous les cas possibles
- Le nombre d'états possibles* ?
 - **Oui, en partie** : un système compliqué peut avoir de nombreux états, mais la combinatoire *réalisable* est souvent limitée par de nombreuses *contraintes* (*par exemple une montre*)
 - Ainsi, les *degrés de liberté* d'un système complexe sont plus élevés, car les *contraintes* sont *moins rigides* (*voir slides suivantes*)
- La présence de nombreuses *rétroactions* ?
 - **Oui**, cela semble être la principale différence
 - On a vu comment les *rétroactions* génèrent la *complexité* et *l'imprévisibilité*

Un cas intermédiaire ?

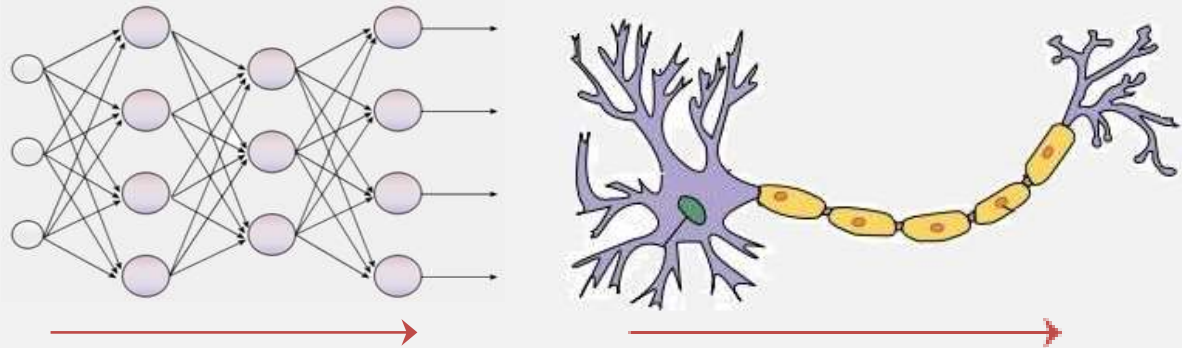
Les interactions multifactorielles

- Définition

- Lorsque *plusieurs liens entrants* sont combinés vers un même composant
- Mais le système n'a *pas de rétroaction*

- Exemples

- Le perceptron
- Un neurone



- Ce cas est limite entre complexe et compliqué
 - Calculs en une passe, mais combinatoire touffue
 - Mais en général il y a des rétroactions (*ex:cerveau*)

Distinction par la combinatoire ?

Deux exemples

- Une automobile possède de *très nombreuses pièces*
 - Beaucoup plus qu'un jeu d'échecs par exemple
- Chaque pièce peut prendre de *nombreuses positions*
 - Roues, engrenages divers, position des pistons, rapport BV...
- Mais ces positions ne sont *pas indépendantes*
 - L'ensemble de la transmission est ± *rigide*
 - Comme pour une horloge, il y a de nombreuses *contraintes*
 - L'ensemble des variables d'état de la voiture se ramène à un petit nombre de *paramètres indépendants*
- A l'inverse, dans le jeu d'échecs, *d'innombrables combinaisons* sont possibles
 - Entre *10^{39} et 10^{41} positions légales*, selon les estimations*
 - Et pourtant il y a beaucoup moins de pièces que dans une voiture !
 - Mais les contraintes (les règles) laissent de nombreux *degrés de liberté*



Distinction par le taux de rétroactions

- La plupart de ces systèmes « compliqués » ont un *taux de rétroactions nul ou très faible*
 - Il peut quand même y avoir quelques boucles de *régulation*
 - Cela ne suffit pas à caractériser la complexité
 - Un système *pièce – radiateur – thermostat* n'est pas encore complexe
 - *La frontière compliqué/complexe est floue* : plus le taux de boucles de rétroactions s'élève*, plus le système devient litigieux
 - *Transitions compliqué → complexe :*
 - *Automobile 1950 → 2050 ; Centrale thermique → centrale nucléaire*
- On pourrait penser à ce taux de rétroactions pour élaborer une *mesure de la complexité*
 - Mais de nombreux autres facteurs devraient entrer en jeu...
 - *Voir plus loin « Mesurer la complexité »*

Propriétés des systèmes complexes et questions diverses

Un système complexe est-il *imprévisible* et/ou *indéterministe* ?

- Certains auteurs incluent ces attributs dans leur définition
- Mais ces attributs ne sont *ni nécessaires, ni suffisants* :

<i>Attributs</i>	Déterministe	Indéterministe / Aléatoire
Prévisible	Jeu de la Vie Réseau neuronal simple	Pression d'un gaz Prévisions météo à court terme (Presque prévisible)
Imprévisible	Réseau de nombreux neurones formels Chaos déterministe	Prévisions météo à long terme

- Il faut distinguer imprévisibilité *micro ou macroscopique* :
ci-dessus imprévisibilité macro

Complexité des systèmes disparus ou artificiels

- Un système *disparu* pouvait-il être complexe ?
- Un système *artificiel* peut-il être complexe ?
- *(Voir en Annexe)*

Le rôle des rétroactions *positives* ?

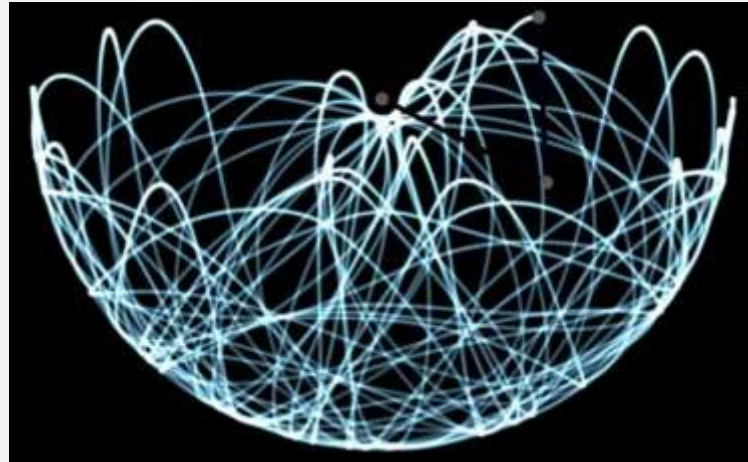
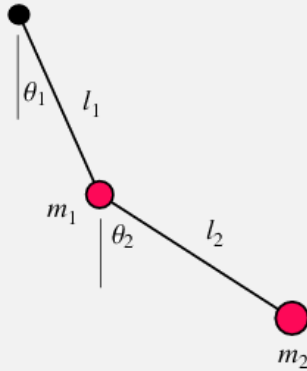
- **Systèmes régulés** (rétroactions *négatives* : contre-réaction)
 - Plus un système est *régulé*, et plus il est *prévisible*, moins il semble complexe
 - *Ex : un chauffage avec thermostat*
- Des **rétroactions positives** sont-elles donc nécessaires pour **caractériser la complexité** ? (*amplification, effet Larsen*)
 - *La plupart des systèmes complexes* cités au début  comportent en effet des boucles de *rétroaction positive*, des *amplifications*, qui se manifestent par :
 - Des *capacités d'apprentissage* (plus on sait, plus on acquiert)
 - Des *renforcements* (*synapses*, *phéromones*, *rendements croissants*, *spécialisations*)
 - Une plus grande *sensibilité aux conditions initiales*, ou même le *chaos*
 - Cependant certains systèmes *ne comportent pas* de rétroaction positive
 - *Gaz dans un récipient*
 - *Cellules de Bénard*
 - *Economie : formation des prix*

➤ L'existence de **rétroactions positives** n'est pas nécessaire, mais c'est un puissant moteur de **croissance**, **d'évolution** et de **sophistication** des systèmes

Un système à peu d'éléments peut-il être complexe ?

- De nombreux auteurs définissent un système complexe comme ayant, entre autres, de « *nombreux éléments* »
 - Mitchell, Holland, Le Moigne, Zwirn...
- Mais ces auteurs s'intéressent à des systèmes particuliers
 - *Biologie, fourmilières, villes, climat, économie, immunité...*
 - Ils basent donc leurs définitions sur ces types d'exemples
- Pourtant d'autres auteurs incluent des systèmes « légers »
 - *Problème des 3 corps, jeu de la vie, pendule double, échecs ...*
 - Ces systèmes correspondent à la *définition proposée ici* : ils comportent des boucles de rétroaction significatives
 - De plus ils peuvent être très riches et *imprévisibles*

Le pendule double



- C'est le *plus petit exemple possible* de système complexe (2 éléments mobiles, 2 dimensions)
 - *Cependant la Terre intervient comme troisième élément*
- Il comporte une *rétroaction*, parfois *positive* selon l'état dynamique (*bras en phase*)
- Il est *chaotique*, *imprévisible*
 - Cette rétroaction est donc *significative*, comme exigé par la définition
- Dans le contexte que je propose, le *pendule double* est donc bien un *système complexe*

Homogénéité vs. Hétérogénéité des composants ?

- La complexité implique-t-elle, soit *l'homogénéité*, soit *l'hétérogénéité*, des composants ? *Non, ex. :*
- Composants *homogènes* (mais non identiques !)
 - *Neurones, cellules, fourmis, molécules d'eau ou de gaz, agents économiques modélisés...*
 - Cette homogénéité permet l'applicabilité de lois d'interaction *simples* et *générales*
 - De nombreux systèmes listés au début ont des composants homogènes 
- Composants *hétérogènes*
 - *Organes d'un animal, éléments d'un écosystème, agents météorologiques, pièces d'une voiture...*
 - La plupart des *grands systèmes intégrés* ont des composants hétérogènes, dédiés à des fonctions spécifiques
 - C'est aussi le cas de la plupart des *systèmes artificiels*, comportant des sous-systèmes spécialisés



Conséquences de l'homogénéité

- Lorsqu'un système possède des composants suffisamment *homogènes*, cela permet :
 - Une *distribution* des informations
 - Dans un *réseau neuronal* ou un *cerveau*, les informations ne sont pas localisés dans un composant identifiable
 - D'où une plus grande *résilience* et une plus grande *plasticité*
 - Un composant *banalisé* défaillant peut être remplacé par un autre
 - Cette plasticité permet une plus grande *aptitude à l'évolution*
 - Des composants *banalisés* et de fine *granularité* facilitent les *évolutions progressives* et le développement vers la *spécialisation*
 - Des composants homogènes permettent des lois d'évolution *génériques* (*simples* et *peu nombreuses*)
- Mais si les composants homogènes ne sont pas organisés en sous-systèmes, le système global acquiert une énorme *combinatoire* (en fonction de sa taille), *difficile à contrôler* et éventuellement *instable*
 - D'où l'utilité, dans les grands systèmes, d'avoir une structuration en *sous-systèmes*

Systèmes à composants hétérogènes

- Exemples

- *Organismes* biologiques
- *Grands systèmes naturels* : *écosystèmes, climat...*
- *Systèmes artificiels* ou *hybrides*, complexes ou non

- Décomposition en sous-systèmes

- Mais ces systèmes hétérogènes sont souvent le sommet d'une *hiérarchie* de sous-systèmes emboîtés
- A la base de cette hiérarchie, on trouve en général des composants atomiques *homogènes* (*molécules, cellules...*)
- Si l'on ne tient pas compte de cette hiérarchie, le système global est finalement un système à un *grand nombre de composants homogènes organisés*

Avantages de l'hétérogénéité

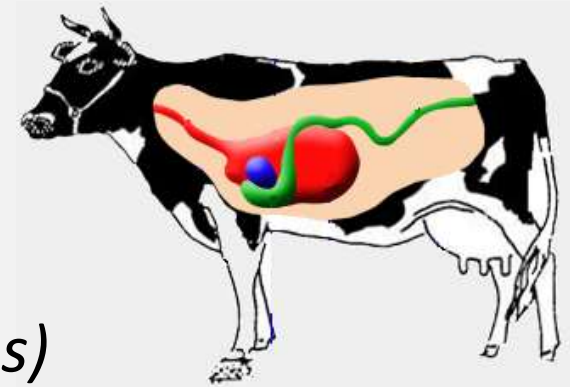
- Les systèmes à composants hétérogènes permettent *d'identifier* clairement les *informations* et les *fonctions*
- Ils s'imposent dans les *systèmes artificiels*
 - Exception : *les réseaux neuronaux*, à composants homogènes
- Leurs composants sont *moins nombreux* que des composants homogènes et leur *combinatoire* est plus réduite
 - Car ils résultent en général de la spécialisation de sous-ensembles regroupant de *nombreux composants* de niveau inférieur
- Sans sous-systèmes *fonctionnellement identifiables*, un grand système à composants homogènes risquerait de devenir *instable* et de ne pas *survivre*
 - La flexibilité à l'extrême multiplie la *combinatoire* et risque de *diverger* et de devenir *incontrôlable*
 - Les grands systèmes naturels *évoluent spontanément vers l'hétérogénéité* (sous systèmes spécialisés)
 - (*Voir pus loin : « auto-organisation »*)

Quelques citations...

- Melanie Mitchell *
- « Many, if not all, complex systems in biology have a fine-grained architecture, in that they consist of *large numbers of relatively simple elements* that work together in a highly parallel fashion [...] Several advantages are conferred by this type of architecture, including *robustness*, *efficiency* and *evolvability* »
- John Holland **
- « The study of emergence is closely tied to this ability to specify a large, complicated domain via a *small set of "laws"* »
 - En effet des lois simples et *peu nombreuses* sont peu spécifiques et impliquent des *composants homogènes*
- Pour moi
- Ces commentaires sont basés sur un large échantillon de systèmes complexes mais ne s'appliquent pas à tous (*slides précédentes*)
- Cependant ils éclairent le rôle fondamental, même dans des grands systèmes hétérogènes, joué par des *sous-systèmes à composants homogènes (le cerveau...)*

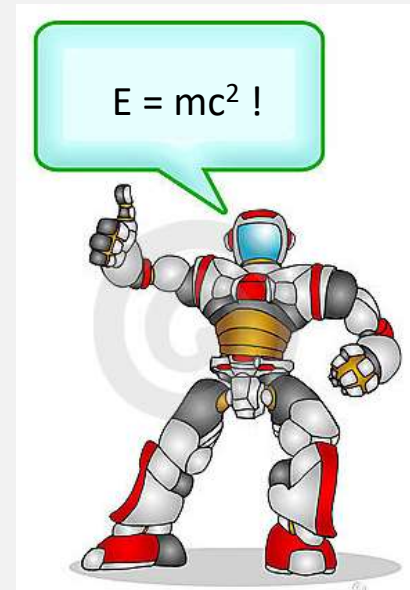
Une contradiction apparente

- Une *vache* est-elle constituée de composants *homogènes* ou *hétérogènes* ?
- Cela dépend de la *granularité* sous laquelle on observe ce système
 - *Organes* : *hétérogènes*
 - *Cellules* : *homogènes (mais organisées)*
- Quel que soit le point de vue, le fonctionnement du système est *le même*

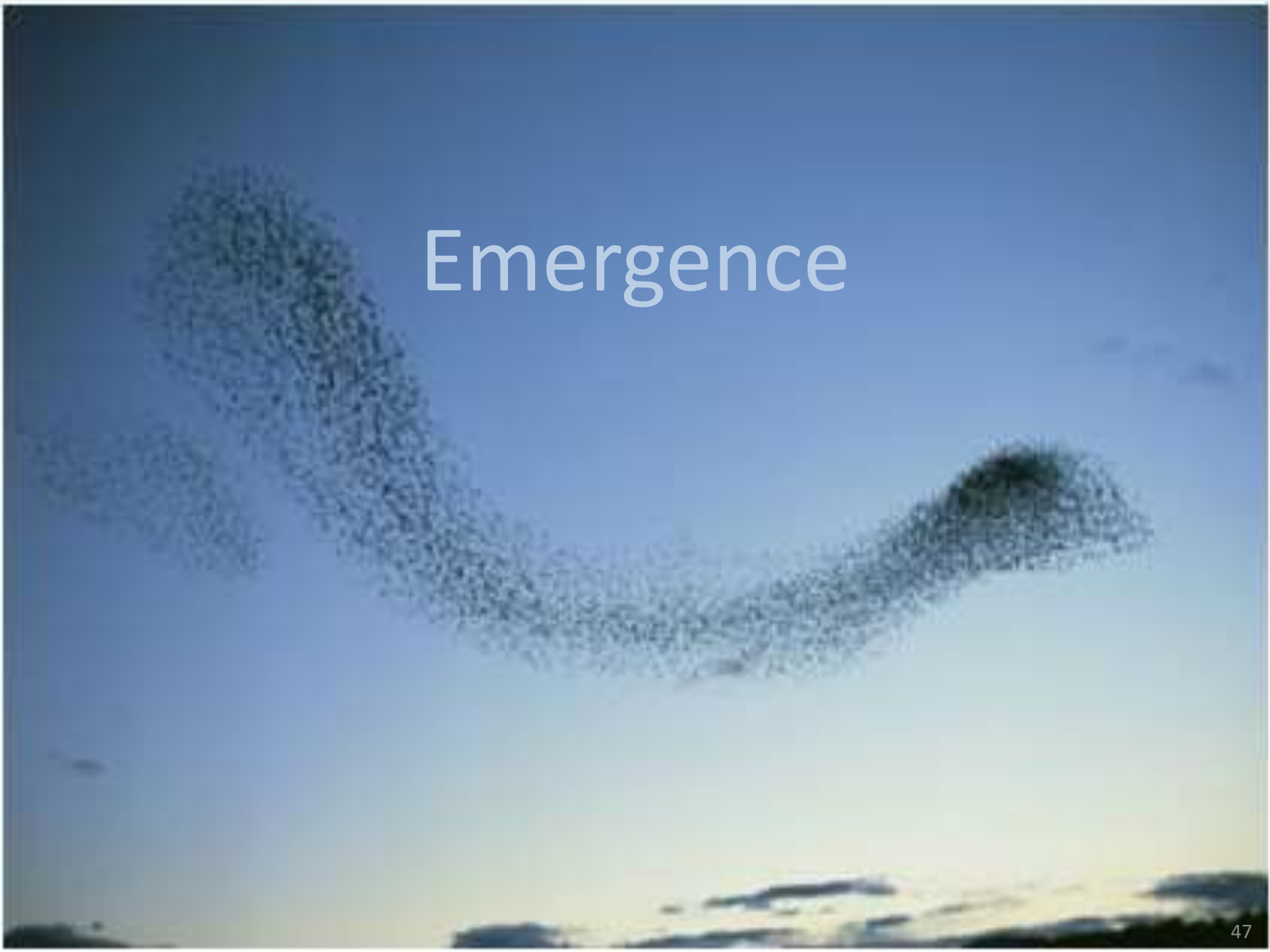


Complexité des systèmes **disparus** ou **artificiels**

- Un système **disparu** pouvait-il être complexe ?
 - Pour certains, un système **disparu** avant que **l'homme** ait créé le concept de complexité, n'était **pas complexe** à son époque
 - Selon moi, la complexité est une propriété **intrinsèque** d'un système, de même que le nombre et la nature de ses composants (et par exemple, leurs **poids**)
 - Si l'on n'admettait pas la complexité d'un système disparu, il faudrait aussi dire que les corps disparus n'avaient **pas de masse**, ou qu'un animal n'était **pas vivant** avant que l'homme n'élabore ce concept
 - Un système aujourd'hui complexe l'était déjà autrefois, car il en avait déjà la **structure** et le **comportement**, mais... **sans le savoir !**
- Un système **artificiel** peut-il être complexe ?
 - Prenons 2 systèmes identiques ou équivalents (naturels ou artificiels)
 - Ils ont ± la **même structure** et le **même comportement**
 - Donc si l'un est complexe, l'autre l'est aussi, automatiquement
 - Ainsi une **simulation fidèle** (artificielle) d'un système naturel complexe est également un système complexe
 - Exemples : **Deep Blue**, ou le cerveau d'un **robot humanoïde**



Emergence

A large flock of birds, possibly starlings, is captured in flight against a clear blue sky. The birds are arranged in a loose V-shape, with a denser cluster at the top left and a more dispersed group extending towards the bottom right. The lighting suggests a bright day, with the sky transitioning from a deep blue at the top to a lighter, almost white glow near the horizon where some clouds are visible.

Quelques définitions de la littérature

- Henri Atlan
 - « Des structures et/ou des fonctions apparaissent à un niveau macroscopique sans que la seule observation des *propriétés des constituants* permette de les *prédire* »
- Wikipedia
 - « Emergence is a process whereby larger entities, patterns, and regularities arise through interactions among smaller or simpler entities that themselves do not exhibit such properties »
 - « In philosophy, emergence typically refers to *emergentism*. Almost all accounts of emergentism include a form of *epistemic* or *ontological irreducibility* to the lower levels »
- Définitions intuitives (divers auteurs)
 - « Le sophistiqué issu du simple »
 - « Le complexe issu du simple »
 - « Le simple issu du complexe »
 - « L'ordre issu du chaos » (*Holland*)
 - « Le tout est plus que la somme des parties » (*tous*)

A quoi s'applique l'émergence ?

- On parle souvent de *propriétés émergentes* d'un système
- L'émergence peut qualifier des *fonctions*, des *entités*, des *données* ou des *formes*
 - Fonctions : *Reproduction, Nutrition, Pensée...*
 - Entités : *Organisme, Foule, Armée...*
 - Données : *Température ou pression d'un gaz, fixation des prix...*
 - Formes : *Cellules de convection, tornades, zébrures, cristaux...*
- Elle se caractérise par son aspect exclusivement *global* et son *irréductibilité* aux *composants* du système

Les différents concepts d'émergence

1. Au sens originel du terme : apparition progressive

- Une propriété, une régularité émergent lentement, progressivement, à partir du désordre
- Point de vue directement lié au processus d'*auto-organisation*

2. Propriété globale d'un système dynamique

- Propriété globale du système, sans relation avec les composants, mais qui résulte du jeu de leurs interactions
- N'implique pas nécessairement d'*imprévisibilité* ni de *mystère*
- S'applique aussi bien aux systèmes *non complexes* (*montre* → *heure...*)

3. Propriété globale irréductible aux niveaux inférieurs

- Ne peut *s'expliquer* ni *se prédire* à partir des niveaux inférieurs
- L'accent est mis sur l'imprévisibilité et le mystère, avec *deux variantes majeures* de l'irréductibilité
 - Soit en ne prenant en compte que les *composants seuls* (Atlan) (« *standard* »)
 - Soit les *composants + la structure* (ce que j'appellerai « *émergence radicale* »)

Emergence « standard » vs. « radicale »

- Emergence « standard »

- Elle se définit par l'irréductibilité aux composants, sans prendre en compte leurs interactions
- Cette irréductibilité peut être due à l'*ignorance réelle* de la structure ou des interactions, ou résulter de leur non prise en compte *par principe* (*définition d'Henri Atlan*)
- Comme on l'a vu, cette irréductibilité est *toujours vérifiée*, puisque l'on *ignore* les relations entre composants
- Toute *propriété globale* est alors *émergente* au sens standard

- Emergence « radicale » *

- Irréductibilité, même en prenant en compte toute la structure et les lois d'interactions
- Cette irréductibilité peut avoir plusieurs acceptions
 - Irréductibilité *épistémique* : connaissances insuffisantes pour effectuer la réduction
 - Irréductibilité *ontologique* : la réduction est impossible par principe
- C'est seulement l'émergence *radicale ontologique* qui introduit un véritable *mystère* philosophique, un dualisme

Faut-il choisir entre ces deux acceptions ?

- Ces deux notions existent dans la littérature, je me suis contenté de les distinguer et de les nommer
- L'émergence standard est la simple observation du fait qu'il existe des propriétés globales d'un système
- L'émergence radicale pose des problèmes de portée plus philosophique, ou plus fondamentale

Emergence épistémique vs. ontologique

- L'émergence *radicale* peut être *épistémique* pour deux raisons possibles
 - Le *système* n'est pas suffisamment connu
 - *Connaissance incomplète des composants, de la structure ou des lois*
 - *Exemples : cerveau, climat, écosystèmes, économie...*
 - *L'agent* (homme ou machine) opérant la déduction n'est pas suffisamment capable
 - *Puissance de calcul et de raisonnement*
 - *Capacité de mémoire*
- L'émergence peut aussi être *ontologique*
 - Même avec des connaissances *complètes* et un agent *parfait*, la déductibilité resterait *impossible* : la propriété émergente est alors *imprévisible* ou même *inexplicable*
 - *Systèmes chaotiques*
 - *Systèmes indéterministes, comportant des relations aléatoires ou des rencontres fortuites*
 - *Lois de la physique encore inconnues, ou intervention surnaturelle*
- Cas intermédiaire : émergence *probabiliste*
 - Si le système est indéterministe mais régi par des probabilités, il peut exister des propriétés émergentes s'exprimant en termes probabilistes
 - *Une propriété émergente *stable* peut résulter *statistiquement* d'un système aléatoire : l'ordre surgit du désordre (ex : température ou pression d'un gaz)*
 - *On peut parfois *prédire* plusieurs possibilités émergentes alternatives, avec leurs *probabilités* respectives (ex : prédire la pluie ou le beau temps, avec coefficients de confiance)*

Le problème corps-esprit

Un exemple d'émergence « ontologique radicale »

- Position du problème

- L'esprit, la conscience, sont-ils ontologiquement *réductibles au corps* ? (essentiellement au cerveau, dont on connaîtrait ici par hypothèse la *structure* détaillée et les *interactions* neuronales)



- Le physicalisme

- Ceux qui croient à cette réductibilité sont les *physicalistes*, pour lesquels la *pensée émergerait du cerveau* par application des *lois de la physique*, sans qu'il soit besoin d'introduire des propriétés non physiques, ou une intervention extérieure
- Comme tout le monde ignore par quel processus la pensée émerge du cerveau, les physicalistes considèrent l'esprit comme une propriété *émergente épistémique* du cerveau

- Le dualisme

- Pour les autres, la pensée ne pourrait s'expliquer que par *quelque chose de plus*, de *radicalement nouveau* par rapport à la *connaissance physique* du cerveau
- Dans ce cas, cette nouveauté radicale, *négarion du physicalisme*, constituerait un *dualisme corps-esprit* (*cartésien ou revêtant des formes plus contemporaines**)
- L'esprit serait alors une propriété *émergente ontologique*, fondamentalement irréductible

Emergence et causalité

Emergence forte

- (voir en Annexe)

Résumé : 2 axes de classification

- 1^{er} axe
 - Emergence « standard »
 - Une propriété émergente triviale n'est pas réductible aux seuls *composants* du système (*c'est le cas pour toute propriété globale*)
 - Emergence « radicale »
 - Une propriété émergente radicale n'est pas non plus réductible au *système complet* (composants, structure, lois)
- 2^{ème} axe
 - Emergence épistémique
 - La non-réductibilité provient des insuffisances *d'information* ou de *capacité* de l'agent qui tente la réduction
 - Emergence ontologique probabiliste
 - Le système obéit aux lois de la nature, mais il *imprévisible* car *chaotique* ou soumis à des *aléas*
 - Emergence ontologique radicale
 - Le système est *irréductible, même en principe* : il existe des *éléments supplémentaires*, en plus de la structure et des lois, pour rendre compte de son comportement émergent (lois inconnues, fluide, etc.)

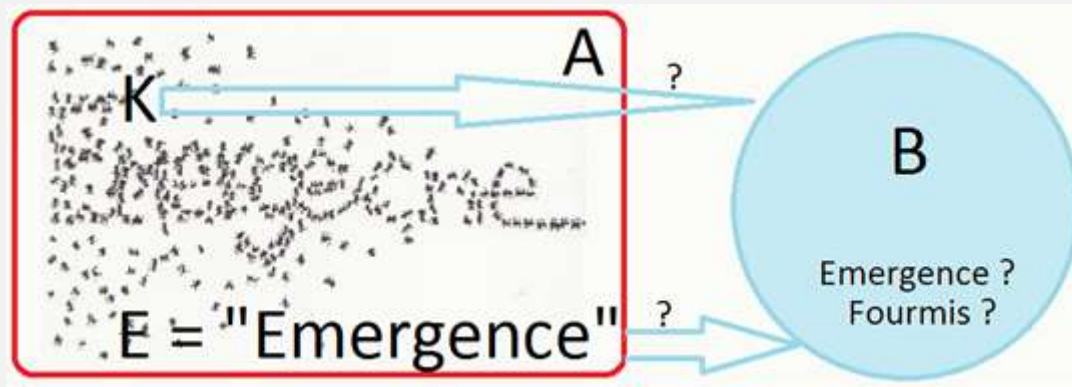
Un système complexe a-t-il toujours des propriétés émergentes ?

- Systèmes artificiels
 - Oui : ils ont été *créés pour* avoir de telles propriétés
- Systèmes naturels
 - Les systèmes naturels *observables* sont *stables**, sinon ils auraient *disparu*
 - Cette stabilité résulte du *fonctionnement régulé* de leurs composants
 - On peut considérer cette *stabilité* comme une propriété *émergente*
 - Elle est *globale*
 - Elle ne *se réduit pas* à la connaissance des composants du système
- Les systèmes complexes ont donc des propriétés émergentes
 - Il n'est donc pas nécessaire d'inscrire de telles propriétés dans la *définition* de la complexité
 - Mais il s'agit ici, soit de l'émergence *standard*, soit de l'émergence *radicale épistémique* (*si l'on connaît mal la structure du système*)
 - Pour un physicaliste, *l'émergence radicale ontologique n'existe pas*

Emergence et causalité

- Une propriété émergente d'un système **A** peut *causer des effets* sur un système **B** (sur ses composants *et* sur ses propriétés émergentes)
- Exemples
 - *Cœur et organes* : la « *fonction ventriculaire* » (FV) est une propriété *émergente* du cœur : cette fonction a un *effet sur de nombreux autres organes*
 - La *beauté* est une propriété émergente d'un *tableau* : elle peut avoir des effets sur les *neurones* et sur *l'émotion* d'un spectateur
 - La *température* d'un corps peut se communiquer à un autre corps
 - *L'heure* est une propriété émergente d'une montre
- Que se passe-t-il au niveau des composants ?
 - Il est parfois *difficile* de déterminer si ce sont les *composants* de **A**, ou ses *propriétés émergentes*, qui provoquent l'effet sur **B** (*voir slides suivantes*)
 - Cependant, d'un point de vue macroscopique, *tout se passe comme si* la causalité venait *exclusivement des propriétés émergentes* de **A**
 - C'est en regardant *l'heure*, et non les *composants de ma montre*, que je me mets à courir !
 - Il faut *accepter* le point de vue macroscopique et *oublier les composants* lorsqu'on n'en a pas besoin : sinon il devient *impossible de raisonner* à un niveau *macroscopique*

L'émergence est-elle un *épiphénomène* ?



- Ce serait le cas si la causalité d'une propriété émergente **E** d'un système **A** sur un système **B** ne provenait pas directement de **E**, mais des actions des composants sous-jacents **K** de **A** sur **B**
 - Car alors **E** ne jouerait *aucun rôle causal*, ce serait une propriété *épiphénoménale* de **A**
 - Exemple (*Libet*) : la *conscience* **E** de la décision de **A** d'appuyer sur un bouton **B** est une propriété *émergente épiphénoménale* d'une décision neurologique **K** *déjà prise inconsciemment* par **A**
- Cette question est très débattue chez les philosophes, et en particulier ceux de l'esprit : *la conscience est-elle un épiphénomène ? Existe-t-il un libre arbitre ?*
- Mais d'autres exemples vont *à l'encontre de cette hypothèse*
 - Le cas du *cœur* : si le cœur **A** pompe mal le sang (*insuffisance cardiaque* : **E**), les reins **B**, mal irrigués, vont se détériorer. Mais les cellules **K** du myocarde, responsables de **E**, n'ont *aucune interaction* avec **B** : c'est **E**, la *propriété émergente*, qui *cause directement* les problèmes de **B**

Emergence forte

("Downward Causation")

- Cette « causalité descendante » est la *relation causale* qu'aurait une propriété émergente d'un système envers les *composants* de ce *même système*
 - Cette définition semble *paradoxe* car elle introduirait une *double causalité* sur les composants, l'une *bottom-up*, structurelle, et l'autre *top-down*, indirecte
 - Alors, soit les deux causalités seraient en conflit, et la causalité bottom-up, directe, l'emporterait, soit il n'y aurait pas conflit mais redondance, et le concept serait inutile
- Pourtant il existe de nombreux exemples d'une telle causalité
 - C'est la *prise de conscience* d'un risque déjà existant qui détermine une *décision appropriée* ; donc ici une *propriété émergente du cerveau active des neurones* de ce même cerveau
 - On peut tenter d'échapper à ce paradoxe en disant que certains neurones – ceux qui déterminent la prise de conscience – agissent *directement* sur d'autres neurones – ceux de la décision ; mais pourtant sans la *conscience explicite* du risque, *la décision n'aurait pas lieu*
- *Mark Bedau** critique ce type de causalité paradoxale, défendue par certains philosophes de l'esprit (comme *Jaegwon Kim*)
 - Ceux-ci croient par exemple en *l'influence causale de la pensée sur les activations neuronales*, en plus de l'inverse
 - Bedau distingue l'*émergence faible* (proche de l'émergence *radicale épistémique*), et l'*émergence forte*, la même *plus* la propriété de « *causalité descendante* »
 - Il ramène cette causalité à l'effet d'interactions n'impliquant *que les composants*, réduisant ainsi le concept d'émergence forte à une propriété sophistiquée de l'émergence faible

D'où viennent ces propriétés émergentes ?

- Dans les systèmes *naturels*, ces propriétés résultent d'une *auto-organisation* pouvant être due à différents mécanismes
 - *Auto-organisation*, slides suivantes

Auto-organisation

(à la source de l'émergence)



Qu'est-ce que l'auto-organisation ?

Auto-organisation et évolution

Les mécanismes de l'auto-organisation

Qu'est-ce que l'auto-organisation ?

Qu'est-ce qu'une organisation ?

Quelles acceptions pour ce préfixe ?

Définition de Henri Atlan

- « L'auto-organisation est un *mécanisme* ou un ensemble de mécanismes par lesquels des *structures* sont produites au niveau *global* d'un système à partir d'*interactions* entre ses *constituants* à un niveau d'intégration inférieur. Les interactions entre constituants sont elles-mêmes *produites localement* sans aucune référence à une structure globale préconçue. Au contraire, celle-ci est une *propriété émergente* du système et non une propriété imposée de l'*extérieur* du système » *
- Il s'agit donc d'un *processus historique* : la *genèse* d'un système complexe. Un système n'est pas auto-organisé « en soi », mais parce qu'il a subi un processus organisateur
- Cette définition pose *plusieurs questions*, en particulier :
 - Quels types de *structures* ? (*qu'est-ce qu'une organisation* ?)
 - Quels types de *mécanismes* ?
 - Quel rôle joue l'*environnement extérieur* du système ?

Qu'est-ce qu'une organisation ?

- Selon le Larousse
 - Manière dont quelque chose se trouve *structuré, agencé* ; la structure elle-même : *L'organisation complexe du cerveau.*
 - *Groupement, association*, en général d'une certaine ampleur, dont les *buts* sont définis par un qualificatif : *Une organisation syndicale.*
- Il s'agit d'une *structure* ou d'une *forme* répondant ou non à un *but*
- On distinguera *deux types d'organisation*
 - *Organisations fonctionnelles* (*une entreprise, un cœur...*), répondant à un *but*
 - *Organisations non-fonctionnelles* (*un pelage zébré, un cristal...*), ne répondant pas nécessairement à un but
 - Cette distinction est importante et aura des conséquences sur la *nature* des organisations et sur les mécanismes de leur *genèse*

Notion de fonction

- Définition du Larousse (extrait)
 - Ensemble d'opérations concourant au même *résultat* et exécutées par un organe ou un ensemble d'organes (*fonctions de nutrition, de relation, de reproduction, etc.*)
 - *Rôle* joué par un élément *dans un ensemble*, *destination* d'un appareil ; activité, rôle, destination de quelque chose : *Quelle est, dans le moteur, la fonction des bougies*

Deux types d'organisations 1/2

- 1. Organisation fonctionnelle

- C'est un système *dynamique* ayant la capacité d'exercer une ou plusieurs *fonctions*
 - *Actions* sur l'environnement, réponses *systématiques* à des *stimuli*
 - Ces fonctions peuvent être *voulues* ou *naturelles* (alors simplement *observées*)
- *Finalité apparente ou réelle ?*
 - La plupart des fonctions semblent répondre à un *but* ou un *objectif*
 - C'est vraiment le cas pour tous les systèmes *artificiels*
 - Pour les systèmes *naturels*, ceci est un *abus commode et courant de langage*, de connotation finaliste mais *sans intention finaliste*
 - Exemple : le cœur est parfaitement organisé « *pour* » pomper le sang



- Exemples → *la plupart des systèmes cités au début*

- Une entreprise (→ *produit et vend des prestations ou des produits*)
- Une fourmilière (→ *maintient sa structure, sa nourriture, sa continuité*)
- Les reins (→ *filtrent le sang*)
- Un organisme vivant (→ *survie, reproduction, nutrition...*)
- Un sous-système de sécurité (→ *humain ou immunitaire : maintient l'intégrité du système global*)

Deux types d'organisations 2/2

- 2. Organisation non-fonctionnelle (ou formelle)

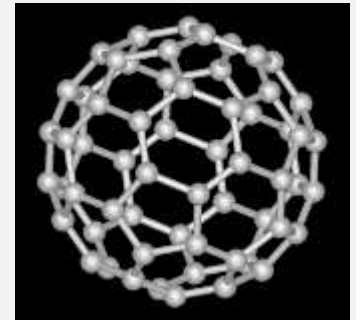
- C'est une *apparence d'organisation*, du point de vue de l'observateur humain (*forme* ou *structure* statique)
- Ce type d'organisation n'implique en général *aucune fonction dynamique*
 - A la différence des *organes* ou des *sous-systèmes*

- Exemples

- *Formes de cristaux, fullerènes*
- *Flocons de neige*
- *Motifs de pelages animaux*

- Ces cas sont en général issus d'une *évolution spontanée*, intrinsèque au système

- ✓ A partir de *microstructures* préexistantes
- ✓ Par application de *lois physico-chimiques*



Quelles acceptions du préfixe "auto-" ?

- Il qualifie la manière dont l'organisation s'est *élaborée*, et non la manière dont elle *fonctionne*
- *Deux acceptions* sont possibles et font parfois débat (*voir plus loin*)

– Auto-organisation adaptative (mais non supervisée)

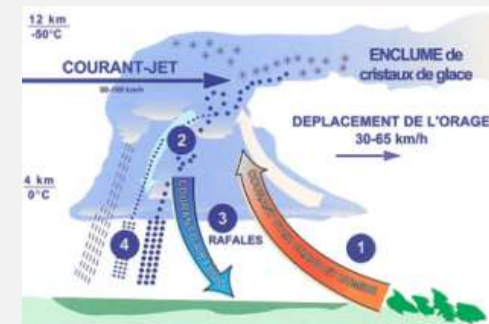
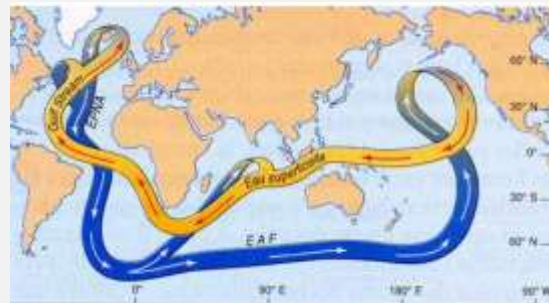
- Adaptation aux variations de l'environnement (sans contrôle extérieur)
 - Adaptation aux *changements* de l'environnement, mais sans volonté, planification ou contrôle (humain ou spirituel) : processus *bottom-up*
 - Par *sélection* ou par *apprentissage*
 - Organismes issus de la *sélection naturelle*, sans intervention humaine
 - *Auto-organisations partielles* : systèmes hybrides, sociaux
 - *Entreprises, villes...* : certaines évolutions sont volontairement planifiées, d'autres échappent au contrôle

– Auto-organisation non adaptative (intrinsèque et spontanée)

- Indépendance des variations de l'environnement
 - Le système évolue spontanément vers une organisation par l'effet de *ses seules caractéristiques*, *indépendamment* des *variations* de son environnement, par le jeu de ses seules interactions internes
 - L'environnement peut jouer un rôle, mais *régulier* (en général, fourniture *d'énergie* et/ou de *matière*)

Echelles d'auto-organisation *temporelle et structurelle*

- L'évolution d'un système se déroule selon plusieurs *échelles temporelles et structurelles*
- A chaque échelle correspond une A-O différente
 - Longues périodes, grandes évolutions structurelles
 - Evolution des espèces
 - Eléments du climat global de la Terre (*Gulf Stream,...*)
 - Périodes courtes, adaptation ponctuelle des structures
 - Apprentissages
 - Formation d'un orage
- Ces différentes A-O mettent en jeu des *mécanismes différents*
 - Evolution adaptative
 - Evolution spontanée
- Exemples : *évolution du cerveau – évolution climat / météo*



Une définition de l'auto-organisation

- La discussion précédente peut conduire à une définition plus détaillée :
 - Se référant aux concepts d'*organisation*
 - Distinguant les mécanismes : *adaptatif vs. spontané*
 - Distinguant l'auto-organisation (un *processus*) et l'organisation qui en résulte (une *propriété émergente*)
- Une proposition :
 - « *Un système est auto-organisé s'il a été capable de modifier sa structure de manière à faire émerger des propriétés globales objectives (formes ou fonctions), soit spontanément, soit en s'adaptant à son environnement, mais sans être guidé ou contraint par une volonté ou une organisation extérieure. L'organisation résultante constitue une propriété émergente du système* »

Les mécanismes de l'auto-organisation



A-O et évolution

A-O adaptative vs. spontanée

Evolution des systèmes complexes

Adaptative ou spontanée ?

- Les systèmes complexes *naturels* sont en général issus d'un processus *d'évolution naturelle* à partir de systèmes plus simples
- Sans cette évolution, de nombreux systèmes complexes naturels seraient *instables* ou seraient *incapables de s'adapter* aux changements de leur *environnement*
- On recherche ici les *mécanismes de cette évolution*
- Le mécanisme le plus classique est une évolution par *adaptation à l'environnement*
 - *Apprentissage, renforcements/affaiblissements*
 - *Ou variations et sélection (à la Darwin)*
- Mais dans certains cas un système peut s'auto-organiser *spontanément, automatiquement*, sans adaptation à son environnement, par des *mécanismes intrinsèques*
- Une *tendance récente* consiste à *privilégier l'auto-organisation spontanée*, pour répondre à certaines critiques sur l'évolution darwinienne (*Kauffman**)

Exemples de types d'évolution

- Adaptative par apprentissage ou renforcements
 - Villes et quartier
 - Fourmilières (?)
 - Réseaux de transport
 - Mémorisation de savoirs, de savoir-faire
 - Logiciels d'IA « apprenants » (jeux, pattern recognition...)
 - Processus essais-erreurs (*si le système apprend de ses erreurs*)
- Adaptation par sélection
 - Evolution des espèces
 - Processus essais-erreurs (*si les erreurs sont éliminées*)
- A-O non adaptative, spontanée (et intrinsèque)
 - Cristaux
 - Pelages tachetés ou zébrés
 - Cellules de convection
 - Tornades



Evolution adaptative

Darwinisme généralisé

- Les 3 fondements de l'évolution darwinienne et pseudo-darwinienne

- **Variations**

- aléatoires / contraintes / orientées / planifiées

- **Transmission**

- génétique / épigénétique / culturelle

- **Sélection**

- confrontation à l'environnement → survie ou extinction

- Extension à tous les processus essais / erreurs

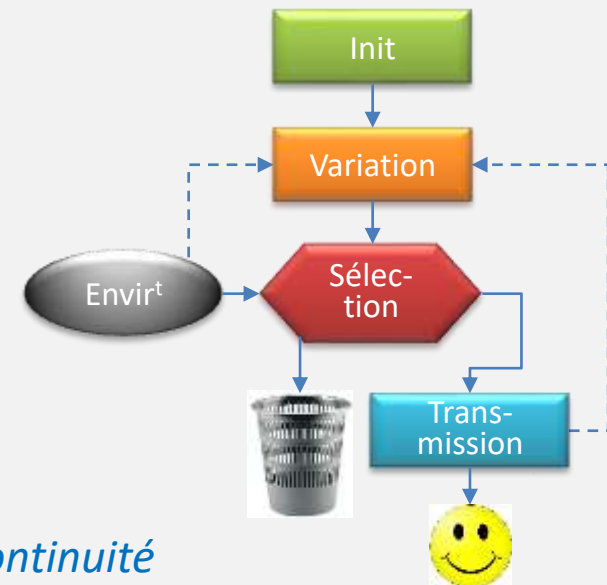
- **Variations** → Essais

- **Sélection** → Erreurs

- **Transmission** → après chaque itération, *hérédité* ou *continuité*

- Hérédité : *systèmes vivants*

- Continuité : *systèmes stellaires, météorologiques, logiciels itératifs...*



Processus essais / erreurs

- Ce type de processus peut s'appliquer à de nombreux cas d'évolution adaptative de systèmes (*naturels ou artificiels*)

Génération des essais

lors de l'évolution d'un système essais / erreurs

- Selon les systèmes et les périodes, les *essais (variations)* se font de manière *aléatoire* ou *orientée*



- Variations aléatoires (type Darwin) : *Exploration*

- Mutations, phénomènes fortuits → *Evolution des espèces, symbioses, recherche de nourriture en cas de pénurie...*

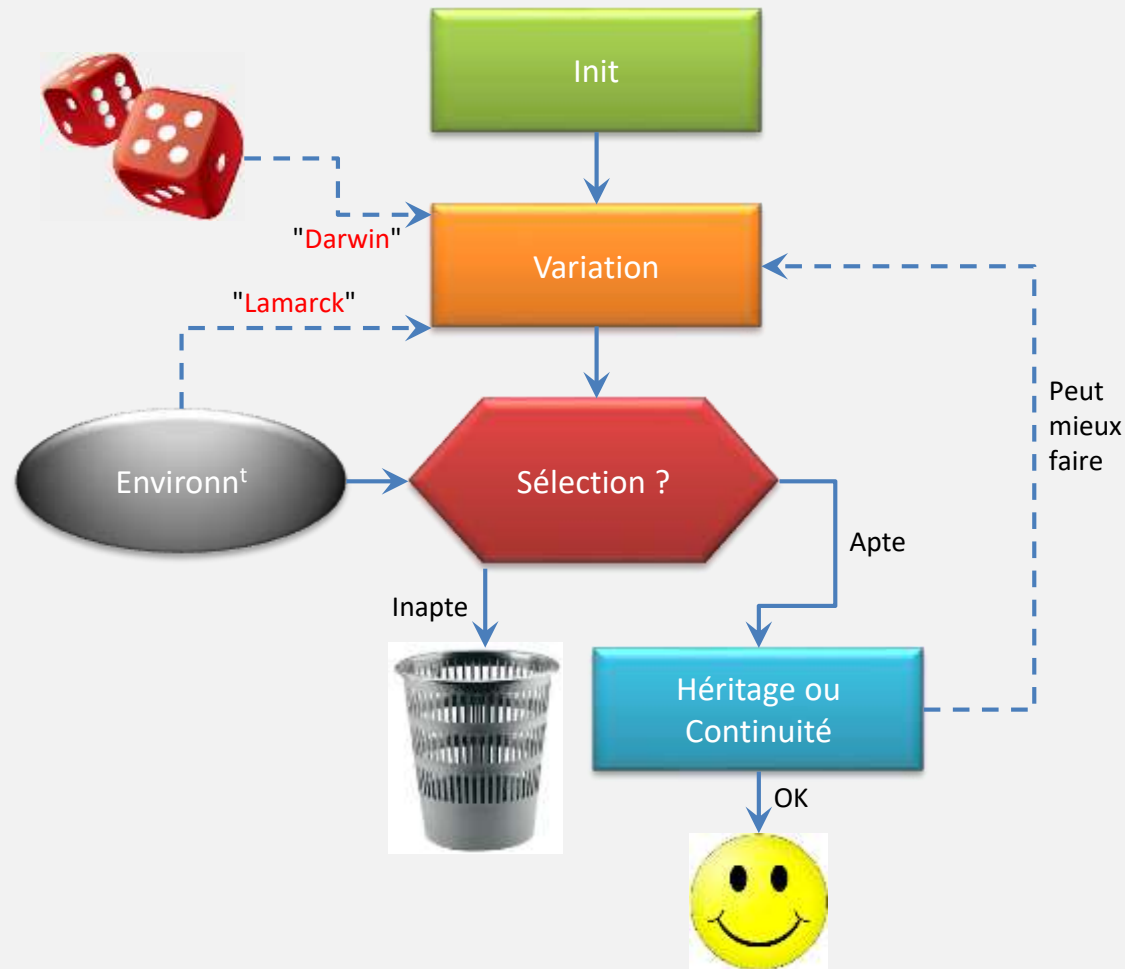


- Variations orientées : *Exploitation des acquis*

- Recherche naturelle d'une *amélioration* (type Lamarck)
→ *évolution culturelle, renforcements (par ex, croissance de niches écologiques, retours croissants, épigénétique ?)*
- Algorithmes d'*optimisation* (méthodes du gradient, de Newton...)
- Variations sous *contraintes* → *lois de la physique, exaptations*
- Par une *volonté* extérieure (homme, dieu, une « force »)
→ *apprentissage, « intelligent design »*
 - Dans ce dernier cas, on ne parlera plus d'*auto*-organisation

Organigramme du darwinisme étendu

Auto-organisation adaptative



Alternance de phases dans l'évolution

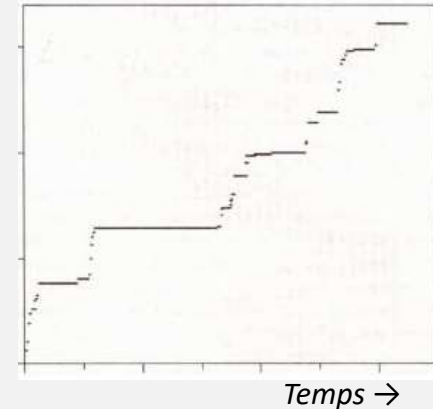
- **Explosion vs. Régulation** (*par ex : équilibres ponctués*)

- **Explosion** (*grands embranchements, renforcements rapides*)

- Domination des *rétroactions positives* et des ruptures
- Rôle du *hasard*
- Permet une grande *créativité*
- Risque *d'instabilité*, de *mort*

- **Régulation** (*éliminations par sélection, perfectionnements*)

- Domination des *rétroactions négatives*
- *Consolidation* de nouvelles structures



- **Ces alternances sont dictées par la nécessité**

- Les phases explosives créent la *variété*, mais deviendraient *instables* et seraient *éliminées* par la sélection sans les phases de consolidation
- La seule consolidation n'engendrerait que des structures *pauvres*, *inadaptées* et *condamnées* par les changements de l'environnement

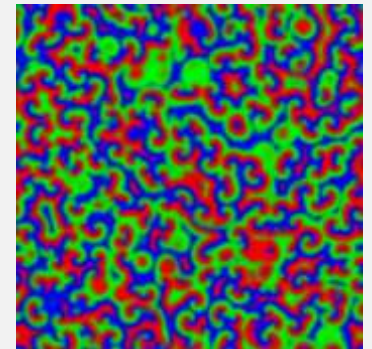
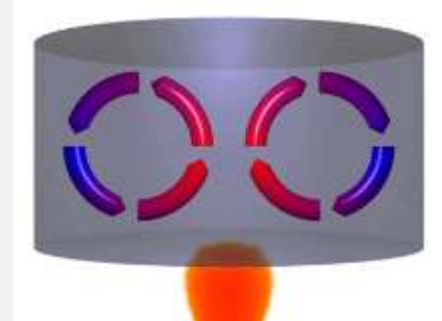
Evolution spontanée

Principes

- Indépendance des *variations* de l'environnement
- Application *directe* des lois de la physique
 - *Sans phénomènes adaptatifs* (ni sélection, ni apprentissage) le système n'évolue que par ses *lois internes*
 - Cependant le système peut exploiter les *ressources* de l'environnement
 - Fourniture d'énergie (*mécanique, chaleur...*)
 - Fourniture de matière (*nourriture, cristaux...*)
 - Il met donc en jeu les *lois naturelles* applicables
 - *Physique, chimie, magnétisme, thermodynamique...*

Exemples d'évolution spontanée

- Application des lois de la physique
 - Tornades, turbulence (mécanique, gravitation)
 - Galaxies systèmes planétaires (gravitation, inertie)
 - Cellules de convection
- Phénomènes physico-chimiques
 - Pelages zébrés ou tachetés
 - Réaction de Belusov-Zhabotinski
- Amplification macroscopique de microstructures préexistantes
 - Formes de cristaux
 - Flocons de neige
 - Fullerènes
- Rappel
 - L'auto-organisation qualifie la *genèse* et non la structure actuelle de ces phénomènes



Généralisation de l'évolution spontanée

- Pour *Stuart Kauffman** et d'autres auteurs, le mécanisme *fondamental* de toute organisation naturelle, y compris les organismes vivants, est *spontané* et ne fait pas appel à des phénomènes de sélection ou d'apprentissage : il existerait une *tendance naturelle à l'auto-organisation* ("Order for Free")
- Ces mécanismes existent (on l'a vu), mais *quel rôle jouent-ils vraiment* dans l'évolution ?
 - Mise au point des petits détails dans l'évolution d'espèces particulières ?
 - Ou création de grandes structures ? (ainsi les arbres seraient une conséquence de la tendance thermodynamique à maximiser l'évaporation naturelle : ils seraient là « pour » optimiser cette évaporation ; mais *comment* ?)
- Selon Kauffman, cette généralisation *remet en cause* les principes jusque là admis de *l'évolution darwinienne* par le *tout-sélection*
 - « *Le compte n'y est pas* » : l'accumulation de petites variations ne pourrait pas conduire à la complexité et la diversité que l'on observe en un *temps aussi court* (d'après Kauffman en particulier, calculs à l'appui ; aussi Schützenberger)
 - Une loi *fondamentale, unique, préexistante* serait *préférable* : elle expliquerait la vie sur Terre plus par la *nécessité* que par le *hasard*

Critique de cette généralisation

- Il s'agit d'*analogies* et d'*extrapolations* hardies
- Il n'y a pas de *soutien expérimental* à ces extrapolations pour les *grandes structures*
 - SK reconnaît par ailleurs que jusqu'à présent les arguments expérimentaux sont "*maigres*"; il se base sur des phénomènes simples déjà listés plus haut (*comme la réaction de Belusov-Zhabotinski*)
- Pour nous convaincre, SK emploie des *arguments réfutables*
 - Ex : Il existe une loi quasi-déterministe en *embryologie* : le nouveau-né sera conforme à son programme génétique : l'évolution répondrait donc bien à des *lois quasi-déterministes*
 - Objection : mais justement, dans ce cas il y avait un *programme à l'avance*; or dans l'évolution des espèces, il n'y a *pas de programme* !
- A défaut de preuve expérimentale, il faudrait au moins imaginer des *scénarios crédibles*, détaillés *étape par étape*, du processus évolutif spontané, comme Darwin l'avait initié pour l'évolution
 - Jusqu'à présent, on n'en a pas proposé (*à ma connaissance*)

En résumé

Les trois origines de l'auto-organisation

- Origine volontaire
 - Dans l'auto-organisation *artificielle*, les processus adaptatifs ont été conçus et réalisés par l'homme
 - Logiciels d'IA à auto-apprentissage, pouvant dépasser leur maître
- Origine itérative de type Essais/Erreurs (A-O par l'expérience)
 - Systèmes *naturels* : variation/sélection, apprentissage, renforcement
 - Evolution des espèces
 - Croissance des niches écologiques
- Origine par application de lois quasi-déterministes (A-O spontanée)
 - Systèmes *naturels ou artificiels*
 - Pelages zébrés ou mouchetés
 - Cellules de convection
 - Réaction de Belusov-Zhabotinsky
 - Mais dans le cas des systèmes naturels connus
 - On n'a pas mis en évidence de preuve expérimentale ni *d'argument convaincant* pour expliquer ainsi l'évolution de *grands systèmes naturels*

Mesurer la complexité



Degrés de complexité ?

Avertissement

- Cette partie sur la mesure est une **ébauche**
- Elle ne correspond pas à une réflexion ou une documentation approfondie
- Je la propose cependant car je serais intéressé par des critiques ou des suggestions

Qui et pourquoi ?



- Une question fondamentale de la mesure :
 - *QUI* veut mesurer et *pour quoi faire* ?
- Il y a *plusieurs réponses possibles*, par exemple :
 - *Un analyste de systèmes* : A quel point le système est difficile à analyser ? A décrire ?
 - *Un prévisionniste* : A quel degré le système a-t-il un comportement prévisible ? Quelle est sa sensibilité aux conditions initiales ?
 - *Un spécialiste de la simulation* : Quelle est la complexité du modèle à réaliser ? Quelle sera sa fidélité ? Quelle sera la performance d'un tel simulateur ?
 - *Un concepteur de systèmes* : le système prévu sera-t-il capable d'avoir des propriétés émergentes ? A quel degré de sophistication, de performance ?

Que veut-on mesurer ?

- Une mesure, c'est vouloir qualifier par un nombre unique
- Or, il y a plusieurs attributs que l'on peut vouloir mesurer :
 - Complexité de la structure
 - La structure de ce système est-elle complexe à *décrire* ?
 - L'analyse de cette structure montre-t-elle des *interactions* complexes ? (et en particulier, quel est le degré de *rétroactions*, positives ou négatives ?)
 - Complexité du comportement : qu'est-ce qu'un comportement complexe ?
 - Une grand *imprévisibilité microscopique* ?
 - Une grand *imprévisibilité macroscopique* (comportements émergents)
 - Une grande *sensibilité* aux conditions initiales ?
 - Degré de difficulté pour simuler le système
 - Difficulté à *réaliser* et/ou *exploiter* une simulation du système, pour une précision donnée des résultats, à un horizon temporel donné
 - *Performance* d'un tel simulateur
 - Richesse des propriétés émergentes
 - Une simple *forme*, ou un comportement *sophistiqué*, voire *génial* ?

Les mesures classiques de complexité

Kolmogorov, Bennett

- Ces mesures concernent des *données statiques*
 - Suites de nombres, images, messages... 
 - Elles se définissent comme la *taille* du plus petit programme, ou son *temps d'exécution*, nécessaire pour *générer* les données considérées
- Elles ne s'adressent pas au comportement dynamique d'un système (même si tout système peut être *codé* en une suite de symboles)
- Appliquées à la *description* d'un système complexe, elles ne pourraient que mesurer la *complexité statique de sa structure*
 - Mais pour deux structures de *même complexité descriptive*, l'une pourrait être celle d'un *système complexe*, l'autre celle d'un *système simple*

– Exemple :



Complexité statique vs. dynamique ?

- Complexité statique (structure)

- Les mesures *Kolmogorov* ou *Bennett* ne rendent pas compte des propriétés *dynamiques* qui sont l'essence des systèmes complexes
- Une proposition plus adaptée tiendrait compte des *taux de rétroaction* (positives, négatives) et de leur *intensité*
 - Il faudrait réfléchir et « peser » les différents éléments :
 - *Nombre* et *taux* de boucles de rétroaction positives et négatives
 - *Coefficients* des relations de rétroactions, comparées aux autres coefficients
 - Mais une telle mesure serait difficile à *établir* et à *corrélér* avec la véritable complexité dynamique du système

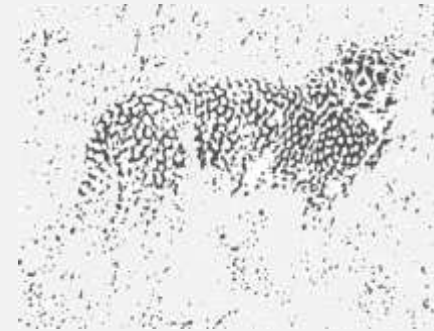
- Complexité dynamique (comportement)

1. Peut-on valoriser *directement* un *processus* complexe?
2. Ou peut-on *adapter* les mesures *K* ou *B* au *comportement* d'un système complexe ?
 - Mais pour cela, il faudrait d'abord *coder* ce comportement en une suite statique

Peut-on ramener le *comportement* d'un système complexe à une *suite numérique* ?



- Oui : *par exemple*, on peut lancer une simulation le système sur une suite de données d'entrée et faire une *analyse statistique* de l'ensemble (*données, résultats*) ; on peut en extraire une suite numérique
- Mais une telle suite codée *statique* ne restitue que très indirectement les *éléments essentiels* du système
 - Son *comportement dynamique*
 - Ses *propriétés émergentes*
- Une mesure de la complexité *K* ou *B* tirée d'un tel codage risque d'être *peu signifiante* ou tout au moins *difficile à interpréter*
 - *Exemple : voir plus loin la « complexité effective » (Gell-Mann, Lloyd)*



Complexité d'un simulateur

- Un système complexe n'est pas en lui-même un logiciel, mais certains de ses comportements peuvent être *simulés* par un logiciel
 - On peut simuler le comportement de ses *propriétés émergentes* lorsqu'on modifie certains paramètres de son environnement
 - On peut alors appliquer les mesures de type *Kolmogorov* ou *Bennett* : *longueur* ou *nombre d'étapes* d'exécution d'un logiciel de simulation *minimal* reproduisant les *mêmes propriétés émergentes*
 - Ce logiciel serait le *simulateur* le plus simple, compatible avec une *précision donnée*
- **Potentiel de cette approche**
 - Cette approche est la seule (*à ma connaissance*) qui s'attaque directement au comportement dynamique du système étudié
 - Sa mise en pratique exige la réalisation d'un simulateur
 - Une *mesure parfaite* exigerait une *précision parfaite* du simulateur, ce qui est rarement atteignable
 - Sinon la tolérance de précision autorise un simulateur plus simple, mais *au détriment* de la mesure de la *complexité réelle* du système étudié

Autres méthodes ?

- Proposition de *Gell-Mann & Lloyd* : « *Effective complexity* » *
 - On ramène, par *codage*, la *structure* ou le *comportement* du système à une *suite numérique*. On calcule la complexité de *Kolmogorov* sur le seul sous-ensemble « *significatif* » ou « *régulier* » de cette suite (le reste étant un *bruit aléatoire*) : on obtient ainsi la « *complexité effective* » *
 - Mais ce critère est vague et subjectif : *codage non défini*, séparation *subjective* et mal définie de la partie « significative » (*cette séparation est-elle possible ?*)
 - *Aucun exemple* n'est donné, contre-exemples possibles
- Autres méthodes basés sur la complexité du *comportement*
 - *Nombreux critères* envisageables, difficiles à quantifier...
- On peut vouloir mesurer la complexité par *l'analyse fine de la structure* : nombre d'éléments, de niveaux, interactions, rétroactions, coefficients...
 - Analyse trop complexe, *non maîtrisable* !
 - Car *l'imprévisibilité* du comportement connaissant la structure est précisément une des caractéristiques de la complexité
- La mesure de la complexité d'un système reste un *problème ouvert*, probablement *sans réponse unique*

Citation de Hervé Zwirn

*« Une définition qualitativement et quantitativement adéquate de la complexité [...] reste à trouver, si elle existe. Elle devrait être capable de prendre en compte à la fois l'intrication des composants du système, le nombre de niveaux, les capacités d'adaptation et la richesse des propriétés émergentes auxquelles il est susceptible de donner naissance. Savoir si une telle mesure est possible ou même simplement logiquement non contradictoire est une question ouverte. » **

Annexes

Prévisibilité des systèmes complexes

Acceptions de la prévisibilité d'un système



- Granularité de la prévisibilité, qui peut concerner :
 - Le comportement du *système global*, ses propriétés émergentes
 - *Prévisions macroscopiques*
 - Ou l'évolution détaillée des états de ses *composants*
 - *Prévisions microscopiques*
 - Lorsqu'on dit qu'un système complexe est imprévisible, sans préciser, il peut y avoir *ambiguïté* ou *confusion* :
 - En général un tel système est *imprévisible* au niveau des *microscopique*, mais est fréquemment $\pm$ *prévisible* au niveau *macroscopique*
- Précision (ou degré) de la prévisibilité
 - Prévisions plus ou moins précises, *intervalles de confiance*
 - Prévisions aléatoires *probabilisées*
 - *Exemple* : « Il y a une probabilité de 60% pour qu'il pleuve demain »

Discussion sur la prévisibilité

- Soit un savoir* **A** et une autre **B**
 - Par exemple **A** = connaissance des *composants* d'un système, **B** = observation d'une *propriété émergente* de ce système
- La *prévisibilité* de **B** à partir de **A** par un agent **H** dépend de deux conditions
 - La *prévisibilité théorique*
 - Existe-t-il des relations *causales* de **A** vers **B** ?
 - Un agent infiniment intelligent et ayant une parfaite connaissance de **A** pourrait-il faire *en principe* cette déduction ?
 - Les *capacités* de calcul et de raisonnement de **H**
 - **H** est-il un *humain* ou une *machine* ?
 - Quelles sont les connaissances et les capacités de **H** ?

Nature des imprévisibilités

- La prévisibilité dépend de l'agent qui prévoit
 - Agent humain non spécialiste
 - Expert
 - Logiciel de simulation
- La prévisibilité dépend du comportement du système
 - Système déterministe vs aléatoire, degré d'aléa
 - Stabilité du système dans le temps
 - Dépendance aux conditions initiales, de régulière à chaotique
 - Tendance à des comportements divergents
 - Horizon temporel de la prévision
- L'imprévisibilité est épistémique ou ontologique
 - Epistémique
 - L'agent manque des capacités et/ou des connaissances suffisantes pour simuler le système
 - Ontologique
 - Même un agent de puissance illimitée et connaissant tout le système ne pourrait pas prévoir son comportement (par exemple si le système comporte des interactions aléatoires)

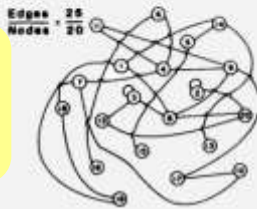
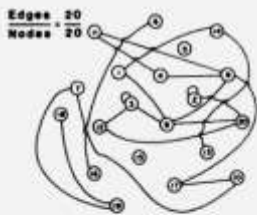
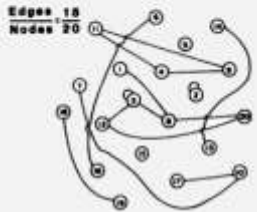
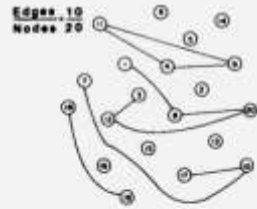
Approches de la prévision

- *Prévision macroscopique*, propriétés émergentes
 - *Simulation* (approche bottom-up)
 - Ou *comparaison* avec des observations globales passées
 - Soit sur le système lui-même
 - Soit sur des systèmes analogues
 - Exemple : comportement prévisible d'un humain en général (*la psychologie*) ou d'un humain particulier (*je connais bien Paul*)
- *Prévision microscopique*, évolution des éléments dans le temps
 - Seule la *simulation* peut être utilisée
 - Un système complexe de grande taille est en général *imprévisible* dans ce sens
 - Cette imprévisibilité résulte de la combinatoire explosive des propagations d'interactions, qui augmente de manière incontrôlable avec le *nombre d'éléments* du système, le nombre de *boucles de rétroactions* et l'*horizon temporel* de la prévision
 - Mais aussi complexe soit-il, il peut être prévisible au sens *macroscopique*

Rappels sur les réseaux booléens aléatoires

Application à l'évolution des systèmes naturels

- Théorie de Stuart Kauffman (*démontrée expérimentalement*)
 - Soit un réseau booléen aléatoire orienté, de nombre de nœuds N , chaque nœud ayant en moyenne K liens entrants
 - Dès que $K > 2$, le réseau devient complètement connecté et présente un comportement *chaotique*, le nombre d'attracteurs croissant de manière exponentielle avec N
- Application à l'instabilité de l'évolution purement aléatoire
 - L'évolution, tout au moins biologique, a été déterminée par des *rencontres* (et donc des *interactions*), *aléatoires*, de plus en plus nombreuses, entre les éléments constitutifs d'un futur système plus organisé (*ex : soupe prébiotique, fourmis*)
 - De manière plus générale, cette évolution graduelle *par croissance de la taille N et de l'interactivité K* des systèmes a dû être à la base de *tous les systèmes complexes naturels*
 - En modélisant ce processus par un réseau aléatoire de taille croissante, N et K sont également des grandeurs *croissantes*
 - Mais la limite $K = 2$ est extrêmement *contraignante* et a peu de chances de s'imposer naturellement ; après un certain nombre de rencontres, on a très probablement (et assez rapidement) $K > 2$: c'est ce qu'on *observe* dans les systèmes complexes naturels
 - En application des résultats de Kauffman, des systèmes ainsi constitués *aléatoirement* deviendraient *chaotiques* et n'auraient aucune chance d'aboutir à une organisation quelconque ; ils n'auraient *pas la capacité de s'adapter* aux variations de l'environnement et seraient rapidement *détruits*
- En conséquence
 - L'évolution ne peut s'être produite de façon *aléatoire* sans que des *processus régulateurs contraignants* (*sélection naturelle ou lois physiques*) ne soient intervenus



Des buts non finalistes ?

- Dans les *systèmes artificiels*, le but est *voulu par l'homme*, la fonction en découle
 - On échappe au problème philosophique du *finalisme*, il y a *organisation* et non *auto-organisation* (sauf programmée)
 - Dans les *systèmes naturels fonctionnels*, la fonction est *constatée a posteriori* et *nommée* par l'homme (on pourrait parler de « *but objectif* »)
 - Exemple : le *cœur* a pour *fonction* de pomper le sang : c'est ce qu'il fait, efficacement : c'est ce qu'on *constate*
 - Sans cette fonction, aucun mammifère ne pourrait *survivre*. Cette fonction est indispensable à une *fonction plus large* : la *viabilité de l'organisme*, donc sa reproduction (modèle darwinien)
 - Dans un système fonctionnel, les fonctions des *sous-systèmes* sont *subordonnées* à la *fonction globale* du système
 - Pour les *systèmes naturels*, cette fonction globale se ramène en général à celle de la *survie*, sans laquelle ils seraient *éliminés* et on ne pourrait donc pas les observer
 - La fonction globale est elle-même *exigée par l'environnement*, *sous peine de mort* (naturelle)
 - Elle *conditionne* à son tour l'évolution de toutes les *sous-fonctions*, en général par la sélection
- 👉 Cette *apparente finalité* est donc celle *a posteriori* de la *sanction*, et non celle *a priori* de la *volonté*
- Il est *difficile de distinguer* ces deux types de finalité *dans le langage d'un observateur*
 - L'automobile est organisée « *pour* » transporter des personnes
 - Le cœur est organisé « *pour* » pomper le sang (*comment le dire autrement ?*)
 - Même lorsqu'on rejette le finalisme de la nature, on est donc contraint d'*accepter cette confusion dans le langage*, tout en la *rejetant* pour l'interprétation philosophique
 - Cet apparent finalisme est donc nécessaire pour éviter de parler de manière ampoulée