

Introduction aux Systèmes Complexes

PhilippeCollard.com

Licence Informatique : Université de Nice - Sophia Antipolis

January 26, 2012

En construction ...

1. Jeudi 26 janvier 2011 : Introduction (i.e. ce cours !)
 2. jeudi 2 février 2011 : Programmation orientée Agents
 3. Jeudi 9 février 2011 : Automate Cellulaire
 4. Jeudi 16 février 2011 : Phénomène de percolation
 5. Jeudi 23 février 2011 : Jeux spatiaux
 6. Jeudi 8 mars 2011 : Modèle de Schelling
 7. Jeudi 15 mars 2011 : Modèle proies-Prédateurs
 8. Jeudi 22 mars 2011 : Intelligence collective (ANT)
 9. Jeudi 29 mars 2011 : Morphogénèse
 10. Jeudi xx avril 2011 : Chaos déterministe
- Jeudi 10 mars 2011 : Contrôle terminal (14h-16h)

Le cours ISC ...

Où + Quand + Comment (Évaluation)

- ▶ Jeudi 8h-10h cours (salle M3.7)
- ▶ Jeudi 10h-12h TPM (salle mac PV 313)
- ▶ Évaluation
 1. TPM (30%)
 2. Projet (30%)
 3. Contrôle terminal (40%) (début avril 2011 - 8h-10h)

Complexité ?

- ▶ Depuis maintenant de nombreuses années, chacun dans son propre domaine scientifique a pu céder à la tentation de qualifier de **complexes** des comportements ou des dynamiques **difficilement maitrisables ou compréhensibles**.
- ▶ Au-delà des divergences, et dans le but d'universaliser les types d'explications et les faits observés, on a donc naturellement rechercher à **unifier** toutes ces instances dans un même et unique paradigme.
- ▶ Aujourd'hui encore il n'existe **pas de consensus** sur une définition précise de ce que pourrait être un **Système Complexe**.

Une définition ?

Une définition

Comme cela est souvent le cas lorsque l'on veut caractériser un changement de paradigme, on s'exprime par la **négative** en référence aux acquis.

Voici une définition générale qui, bien que relativement imprécise, est communément exprimée dans la communauté scientifique.

Nous dirons d'un système composé d'éléments indivisibles qu'il est complexe si le comportement collectif observable lorsqu'on le considère comme un tout indivisible n'est pas réductible à celui de ses nombreux composants.

Remarque 1 : les éléments sont-ils indivisibles ?

Il faut regarder l'objet résultant de cette définition comme une sorte de **brique de base** dans laquelle un composant-indivisible peut à une échelle microscopique de plus bas niveau être lui-même décomposé en éléments constitutifs et où, de même, un tout-indivisible peut n'être qu'un parmi une multitude à une échelle macroscopique.
A l'image du faisceau de niveaux :

Molécule - Cellule - Tissu - Organe - Organisme -
Organisation sociale - Eco-système

un système complexe doit donc être pensé comme la compénétration à différentes échelles de niveaux microscopiques et macroscopiques.

Cependant, bien avant d'aborder le difficile problème de l'articulation entre ces différents niveaux, un premier objectif est de comprendre à une échelle donnée la relation micro-macro.

Remarque 2 : définition par la négation

- ▶ Cette définition exprimée par une négation donne une idée en "creux" de la complexité en l'opposant aux systèmes où justement le comportement collectif est réductible à celui de ses composants.
- ▶ Un tel système ne peut exister qu'à la condition que les relations entre ses composants soient **linéaires** au sens où le système-tout soit égale à la somme des parties-composants et où les effets globaux demeurent **proportionnels** aux causes locales.
- ▶ Par opposition, on dira que dans un système complexe les relations et les dynamiques sont **non-linéaires**.

- ▶ On dit qu'un système est linéaire quand il y a une sorte de **proportionnalité entre les causes et les effets**
- ▶ On ne peut tirer parti de la linéarité qu'à la condition d'accepter de restreindre notre champ d'investigation aux systèmes **compréhensibles, prédictibles, et directement concevables**
- ▶ Bien que dans le passé l'on ait du "**linéariser**" la réalité pour l'appivoiser, il faut garder à l'esprit que les dynamiques linéaires **sont l'exception dans le monde réel**

Quelques exemples ...

Pour mieux appréhender la complexité nous pouvons instancier la relation entre composants-élémentaires et tout-indivisible par quelques exemples extraits du monde réel: ce peut être des interactions entre

neurones, grains de matière (sable), insectes sociaux (fourmis), personnes, pages web, ...

d'où peuvent émerger un cerveau, ...

Quelques exemples ...

Pour mieux appréhender la complexité nous pouvons instancier la relation entre composants-élémentaires et tout-indivisible par quelques exemples extraits du monde réel: ce peut être des interactions entre

neurones, grains de matière, insectes sociaux, personnes, pages web, ...

d'où peuvent émerger :

un cerveau, une dune, une fourmilière, un groupe social, le réseau Internet, ...

Les macro-effets de nos micro-décisions

- ▶ Asks the question of the compliance between local micro-motives and the resulting macro-behaviour
- ▶ Today, this problematic is more relevant than ever when each one has many *a priori* on the global consequence of his own actions

Les macro-effets de nos micro-décisions

microMOTIVES and MACRObehavior : Thomas C. SCHELLING

L'informatique permet d'analyser et donc de mieux comprendre, grâce à des simulations, la relation entre les caractéristiques comportementales des individus qui constituent quelque agrégat social et les caractéristiques de l'agrégat

- ▶ Évident lorsque l'agrégat est une simple extrapolation de l'individu (allumer ses phares le soir;)
- ▶ Complexe quand le choix des individus dépend du choix de ses voisins
 - ▶ déduire le comportement global à partir des motivations de chacun ?
 - ▶ déduire les motivations individuelles à partir de l'observation d'un phénomène global ?

Dans les années 1970, Thomas Schelling a développé un modèle simple pour mettre en évidence un phénomène global de ségrégation dans une population d'individus

Il analyse comment la simple préférence individuel à ne pas faire partie d'une minorité dans son propre voisinage géographique, sans pour autant nécessairement favoriser l'émergence de son propre état, peut générer une **réaction-en-chaine** qui aura des conséquences dramatiques au niveau global de la population

Les agents ont seulement des préférences relatives à leur propre voisinage

- ▶ comportements locaux simples
- ▶ des comportements ségrégationnistes font émerger des groupes homogènes
- ▶ même si ce comportement local n'est pas nécessairement ségrégationniste, il peut faire émerger des groupes homogènes

Le modèle de Schelling

Ce modèle montre que dans un Système Complexe composé de nombreux composants en **forte interaction**, le comportement global collectif n'est pas nécessairement réductible (i.e. "est la somme de ...") aux comportements individuels de chaque composant

Ce modèle repose sur l'hypothèse que les voisinages **diversifiés** sont **instables** alors que les voisinages uniformes sont stables

Les macro-effets de nos micro-décisions

Most often, a person thinks in good faith that his action will produce compliant results for the community. For example, one can think that:

- (i) *intolerant* behaviours together lead to *aggregation*
- (ii) *tolerant* behaviours together lead to *mixing*

Complexe vs. Compliqué

combinatoire

Dans le langage courant les deux termes sont souvent utilisés de façon indifférenciée!

- ▶ La référence à l'**existence de nombreux éléments** n'est ni suffisante ni nécessaire à l'émergence de la complexité
- ▶ Bien que la **combinatoire** puisse rapidement engendrer des assemblages compliqués, cette caractéristique devrait pouvoir être maîtrisée par un dénombrement et une étude individuelle des constituants

Complexe vs. Compliqué

étymologie

Dans le langage courant les deux termes sont souvent utilisés de façon indifférenciée!

- ▶ On peut également faire appel à l'étymologie, *com-plicare vs. com-plexus*, afin de mieux saisir le sens de chaque terme, *plier-ensemble vs. lier-ensemble*
- ▶ Dans la relation *micro-macro*, on pourra établir la distinction entre la simplicité du *plier-déplier* et l'inextricabilité du *lier-délier*

Complexe vs. Compliqué

Réductionnisme

On retrouve là le point de vue **réductionniste** de *Descartes* (1596-1650) qui affirmait

" Quand je vois un problème très compliqué, je divise ses difficultés en petites parties et une fois que je les ai toutes résolues, j'ai résolu le tout"

Lorsque l'on ne peut plus totalement "diviser" un système en parties indépendantes, on glisse du **compliqué** vers le **complexe** : les comportements **résultants** deviennent **émergents** et l'inter-dépendance des composants s'exprime alors dans un réseau d'interactions non-linéaires qui est à la source de la complexité

Discours de la Méthode

Pour bien conduire sa raison et chercher la vérité dans les sciences on pose quatre principes pour la construction d'un savoir scientifique (1637)

Comment suivre la méthode ?

- ▶ Avancer dans la connaissance au moyen de **déductions**
- ▶ Jusqu'aux intuitions des principes

La méthode de Descartes

Démarche analytique

► l'évidence :

*Le **premier** était de ne recevoir jamais aucune chose pour vraie que je ne la connusse évidemment être telle ; c'est-à-dire, d'éviter soigneusement la précipitation et la prévention, et de ne comprendre rien de plus en mes jugements que ce qui se présenterait si clairement et si distinctement à mon esprit, que je n'eusse aucune occasion de le mettre en doute*

► l'analyse :

*Le **second**, de diviser chacune des difficultés que j'examinerais, en autant de parcelles qu'il se pourrait, et qu'il serait requis pour les mieux résoudre*

La Méthode ...

Démarche analytique

- ▶ la synthèse et le raisonnement :

Le troisième, de conduire par ordre mes pensées, en commençant par les objets les plus simples et les plus aisés à connaître, pour monter peu à peu comme par degrés jusques à la connaissance des plus composés, et supposant même de l'ordre entre ceux qui ne se précèdent point naturellement les uns les autres

- ▶ le dénombrement :

Et le dernier, de faire partout des dénombrements si entiers et des revues si générales, que je fusse assuré de ne rien omettre

La Méthode et la complexité

Approche Bottom-Up

Nous pourrions dire aujourd'hui que ces principes rejettent l'idée même de complexité en ce sens qu'ils affirmaient qu'elle pouvait se réduire au simple

- ▶ La *Méthode* basée sur un mécanisme de **décomposition-recomposition** donne les clés pour cela même si elle nécessite de se confronter à une combinatoire élevée
- ▶ La compréhension du système va **des composants vers le système** pris dans sa globalité (*design bottom-up vs. top-down*) ; elle permet de résoudre les problèmes **sécables** en éléments simples que sont justement ceux que l'on peut qualifier de compliqués

Pour autant, il ne faudrait pas en conclure trop hâtivement que **complexité et simplicité** sont deux termes antinomiques

Complexité vs. simplicité

Pour autant, il ne faudrait pas en conclure trop hâtivement que complexité et simplicité sont deux termes antinomiques

- ▶ Ce n'est pas la simplicité des composants ou des comportements locaux qui constitue le critère de différenciation entre complication et complexité mais la nature de la relation causale entre niveaux *micro* et *macro*
- ▶ Pour *Descartes*, les relations de *causes à effets* sont simples et directes alors que dans un système complexe elles sont inextricables du fait de l'inter-dépendance des constituants et de la non-linéarité des relations

Complexité vs. simplicité

Pour autant, il ne faudrait pas en conclure trop hâtivement que complexité et simplicité sont deux termes antinomiques

Le simple n'est donc pas opposable au complexe car ces notions se complètent ; la simplicité peut être à la fois source et conséquence d'une dynamique complexe

L'archétype des systèmes où la simplicité peut engendrer la complexité sont les automates cellulaires

Complexité vs. Prédicibilité

Problématique

La connaissance des états passés et présents d'un système permet-elle de prédire et anticiper le futur à plus ou moins longue échéance ?

- ▶ Lorsque la dynamique est stochastique, on ne peut formuler la réponse à cette question que sous la forme d'une probabilité d'atteindre un état donné
- ▶ Le cas d'un système totalement *déterministe* peut, quant à lui, sembler plus simple car l'on peut alors affirmer que le futur immédiat est "écrit"
- ▶ De nos jours, suivant en cela *Pierre Simon de Laplace (1749-1827)*, l'informatique avec ses programmes séquentiels nous a habitué à associer *déterministe et prédictibilité*

Complexité vs. Prédicibilité

Contexte historique (1)

Dès 1795, Laplace énonçait : *Nous pouvons considérer l'état actuel de l'univers comme l'effet de son passé et la cause de son futur. Une intelligence qui à un instant déterminé devrait connaître toutes les forces qui mettent en mouvement la nature, et toutes les positions de tous les objets dont la nature est composée, si cette intelligence fut en outre suffisamment ample pour soumettre ces données à analyse, celle-ci renfermerait dans une unique formule les mouvements des corps plus grands de l'univers et des atomes les plus petits ; pour une telle intelligence nul serait incertain et le propre futur comme le passé serait évident à ses yeux*

En d'autres termes, si nous savions exactement *tout sur tout*, nous serions capables, "*les mêmes causes produisant les mêmes effets*", de tout prédire

Complexité vs. Prédicibilité

Contexte historique (2)

Un peu plus tard, *James C. Maxwell 1831-1879*, considérant qu'une identité parfaite entre les causes n'étant pas réaliste dans l'observation ou l'expérimentation, relativisait cette affirmation en précisant que *Des causes similaires produisent des effets similaires*

Depuis, nous savons, notamment par les travaux de *Henri Poincaré 1854-1912*, que l'*incommensurabilité cause-effet* existe ; c'est le cas par exemple quand une loi déterministe amplifie de faibles différences initiales et ainsi rend impossible toute prédiction sur le long terme

Complexité vs. Prédicibilité

Chaos déterministe

- ▶ Dans un système complexe *déterministe et chaotique* l'on doit tout d'abord poser une différence entre des lois de la dynamique qui sont bien déterministes et les conditions initiales de leur application qui ne peuvent être exprimées qu'avec une relative précision
- ▶ En fait, il n'y a pas de déterministe absolu et que c'est la notion *d'horizon de prédictibilité* qui permet de différencier les systèmes selon qu'ils sont stables ou chaotiques

De même qu'il est difficile de prédire le niveau global à partir de la seule connaissance des comportements locaux, il est pour des raisons identiques hasardeux de faire l'inverse

- ▶ Ce problème se posera par exemple lorsqu'il s'agit de procéder à l'*ingénierie* d'un système complexe artificiel. Dans ce cas, où l'on ne connaît que les spécifications fonctionnelles, les notions de prédictabilité et de finalité se rejoignent.
- ▶ En biologie la question du "pourquoi" est formulée en terme de finalité à se reproduire et donc à perdurer ; pour chaque comportement ou dynamique naturel on se pose la question de son utilité (*fitness*) vis-à-vis de la sélection naturelle
- ▶ De même pour un système artificiel on peut s'interroger sur son intérêt relativement à une fonction d'utilité

Si une fonction d'utilité existe comme partie intégrante de la spécification d'un problème technologique à résoudre, il s'agit de "programmer" le comportement local de chaque composant en fonction de son propre état et celui de ses "voisins" dans le réseau d'interaction C'est un problème très difficile car dans un SC la relation de cause à effet n'est pas intelligible

- ▶ Connaissant la spécification fonctionnelle du problème, il s'agit de "concevoir" les règles-mécanismes de bas niveau
- ▶ Une solution est de **mimer** via une *heuristique évolutionnaire* les mécanismes de la **évolution naturelle**, pression de sélection et variations, pour explorer le champ des possibles et maximiser la fonction d'utilité

Confluence spatio-temporelle

Dimension temporelle

Dans les systèmes vivants, les objets complexes ne prennent leur sens que dans une perspective spatio-temporelle

Un être vivant a toujours un rapport au **temps** :

- ▶ long et lointain passé phylogénique
- ▶ récente histoire ontogénique
- ▶ ou bien encore possibles futurs

Confluence spatio-temporelle

Dimension spatiale

Un être vivant a toujours un rapport à l'**espace** :

- ▶ les composants-agents sont situés dans un espace géographique, où chacun occupe un lieu particulier
- ▶ l'espace des constituants n'est pas nécessairement celui du tout
- ▶ Bien que la spatialisation d'un système artificiel puisse apparaître de prime abord comme une source de contraintes, cela crée en fait des degrés de liberté qui peuvent enrichir la dynamique et permettre de mieux exploiter la complexité

Confluence spatio-temporelle

Dimension spatio-temporelle

Afin de mieux capturer la relation micro-macro il est important de pouvoir l'observer à différentes échelles spatio-temporelles

- ▶ Programmation des comportements locaux selon la plus fine granularité spatio-temporelle du simulateur
- ▶ Observation à une échelle bien supérieure des comportements ou structures émergentes
- ▶ Spatialité et temporalité sont intimement liées car tout mouvement dans un système situé est nécessairement associé à l'écoulement du temps

Confluence spatio-temporelle

Coïncidences spatio-temporelle

Spatialité et temporalité sont intimement liées car tout mouvement dans un système situé est nécessairement associé à l'écoulement du temps

- ▶ Coïncidences temporelles
 - ▶ conduit à considérer l'ensemble des lieux occupés par les agents nomades à un instant donnée
 - ▶ observation de formes macroscopiques émergentes (procession, sulcature, ...)
- ▶ Coïncidences spatiales
 - ▶ conduit à considérer l'ensemble des agents présents en lieu donné au cours du temps
 - ▶ échange d'information au niveau locale (mécanisme de stygmergie chez les fourmis)

Confluence spatio-temporelle

Variabilité

la variabilité caractérise ce qui peut changer

- ▶ Cela concerne classiquement la possibilité de modifier au cours du temps la valeur d'une variable par une action d'écriture
- ▶ Pour un système plongé dans un espace physique, cela peut aussi être la conséquence de déplacements géographiques
- ▶ Le plus souvent, il s'agit d'une information portée par un agent soumis à une double évolution dans le temps et dans l'espace

Confluence spatio-temporelle

Variabilité : exemples

- ▶ Variabilité temporelle : concentration de phéromone présente en un lieu donné = information spatio-temporelle **sédentaire** qui se résorbe par évaporation et augmente lors de chaque nouveau dépôt par une fourmi
- ▶ Variabilité spatiale : position d'une fourmi ou bien d'un agent dans le modèle de ségrégation spatiale de Schelling

Confluence spatio-temporelle

Variabilité : exemples

Un même agent peut être le support d'informations variables de natures différentes (par exemple un **agent-véhicule**)

- ▶ la quantité de carburant contenue dans le réservoir diminue lors des déplacements et cela est la conséquence d'un changement de position (variabilité spatiale)
- ▶ Si le véhicule est immobile durant plusieurs années dans un garage, la quantité de carburant reste constante alors que sa valeur vénale diminue (variabilité temporelle)

Cet exemple illustre le fait que la réalité conduit souvent à considérer la variabilité sous son double aspect spatio-temporel

Confluence spatio-temporelle

Localité

Des lieux comme des instants peuvent être qualifiés de **proches ou d'éloignés** : pour chaque dimension, il existe donc une notion de proximité

- ▶ La dimension temporelle induit une relation d'ordre qui permet de comparer deux instants mais aussi de situer chacun par rapport au temps présent
- ▶ Dans les systèmes complexes naturels il existe des limites aux capacités de perception, d'action, de mémorisation et de calcul qui conduisent à exprimer un **principe de localité**

On ne peut pas percevoir et agir au-delà d'un certain horizon spatiale, on ne peut pas se souvenir et prédire au-delà d'un certain horizon temporel

Confluence spatio-temporelle

Localité

- ▶ Le principe de localité qui pourrait *a priori* apparaitre comme une contrainte est en fait une des composantes intrinsèques des systèmes naturels en tant qu'ils sont le lieu où s'exprime l'emprise de la complexité
- ▶ Il serait dommageable de ne pas s'efforcer d'assimiler ce principe lors de la conception de modèles et de la programmation de simulateurs de systèmes artificiels