

Systèmes multi-agents

CM°1. Système complexe

Maxime Morge <Maxime.Morge@univ-lyon1.fr>

Polytech Lyon
Université Claude Bernard Lyon 1

2025-2026

Déroulement

- Organisation
 - « Système multi-agents » (SMA) — partie 1
 - Prérequis :
 - ▶ « Algorithmique programmation objet » (APO)
 - Évaluation
 - ▶ 1/3 Contrôle continu : QCM(s) + TP(s) noté(s)
 - ▶ 2/3 Contrôle terminal : TT(s) en binôme
- Supports disponibles via <https://moodle.univ-lyon1.fr/course/view.php?id=8662> clé : SMA

Syllabus

Objectif : modélisation multi-agents

- ① CM1 : Système complexe
- ② TD1 : Simulation centrée individus
- ③ TP1 : Modélisation multi-agents (3h00)
- ④ TP2 : Programmation multi-agents (3h00)
- ⑤ TP3 : Méthode multi-agents pour la résolution du problème
- ⑥ CM2 : Théorie du choix social
- ⑦ TD2 : Théorie du choix social
- ⑧ TP4 : Modèle multi-agents de diffusion de l'information
- ⑨ TT1 : Problème de la patrouille multi-agents (1h30)

Simulation centrée individus

Modéliser

Modéliser consiste à construire une représentation simplifiée du monde.

À quoi ça sert ?

- comprendre et **expliquer** un processus
- confirmer des hypothèses sur les causes d'un phénomène
- prévoir une dynamique future

Simulation centrée individus

Modélisation informatique des processus complexes simulant une dynamique collective qui est le résultat des comportements des individus et de leurs interactions.

En quoi c'est dur ?

- pouvoir tester différentes actions (*What if?*)
- avoir un modèle crédible, i.e. descriptif
- calibrer le modèle sur des données réelles

Plan

① Modéliser

② Qu'est-ce qu'un modèle

Le modèle comme outil de communication et support du raisonnement
Systèmes complexes et modèles computationnels

③ Modélisation basée agents

Simulation sociale
Systèmes multi-agents
Simulation multi-agents

④ Conclusion

Qu'est-ce qu'un modèle ?

Model [Minsky, 1965]

To an observer B , an object A^ is a **model** of an object A to the extent that B can use A^* to answer questions that interest him about A .*

A^* = un ps. (diffusion de l'innovation), un système (e.g. social) ou un phénomène (e.g. ségrégation)

Le modèle est :

- **descriptif**, en reproduisant le phénomène (e.g. une courbe en "S" pour la diffusion d'une innovation)
- **explicatif** en dégagant des facteurs explicatifs
- **prescriptif** en prédisant le comportement dans un cas donné ("What if?")
- **normatif**, en donnant des indications sur la meilleure façon d'agir (« Comment faire pour que ... ? »).

Le modèle

Outil de communication et support du raisonnement

Un modèle est une abstraction d'un phénomène réel décrit dans un formalisme.

- Un modèle **discursif** est décrit en langue naturelle (SHS)
 - Pro : expressif
 - Cons : difficilement transmissibles (langue d'origine), ambigu⇒ un outil de communication
- Un modèle **mathématique**
 - Cons : moins expressif
 - Pro : formel, permet d'inférer de nouvelles connaissances⇒ un support du raisonnement
- Un modèle **informatique** décrit sous la forme de programme informatique des processus qui manipulent des données, i.e. des algorithmiques.
 - Pro : formel et génératif, i.e. produit des données que l'on peut comparer avec des données réelles

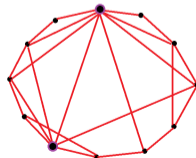
Système complexe

Système complexe

Un **système complexe** est un ensemble d'entités en interaction locale dont le comportement global ne peut pas être modélisé par des équations prédictives et solvables.

Par exemple, une colonie de fourmis, un marché économique ou une foule
Pourquoi complexe ?

- 1 les boucles de rétroaction (*feedback*) positives (amplification) ou négatives (régulation), i.e. l'action en retour d'un effet sur sa propre origine
- 2 la structure d'interaction qui n'est pas nécessairement complète, i.e. toutes les entités n'interagissent avec toutes les autres le monde

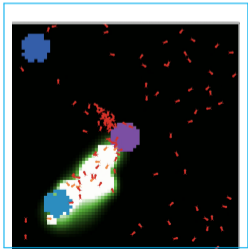


Système complexe

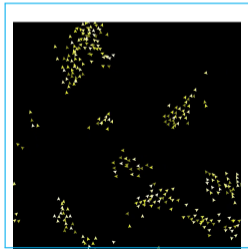
Émergence

Le comportement global d'un système complexe est **émergent**, car il découle des règles d'interaction et il est irréductible du tout vers ses parties.

- Des phénomènes d'**auto-organisation** émergent des interactions locales, e.g. agrégation d'insectes, banc de poissons ou nuée d'oiseaux [Reynolds, 1987]
- L'**intelligence collective** distribuée est un phénomène d'auto-organisation permettant la coopération, e.g. termites, abeilles ou fourmis



Morge



Application à grand succès



Simulation sociale

Simulation sociale

La **simulation sociale** est un domaine de recherche qui utilise les méthodes informatiques pour étudier les sciences sociales.

Exemple du modèle de ségrégation de Schelling [1971]

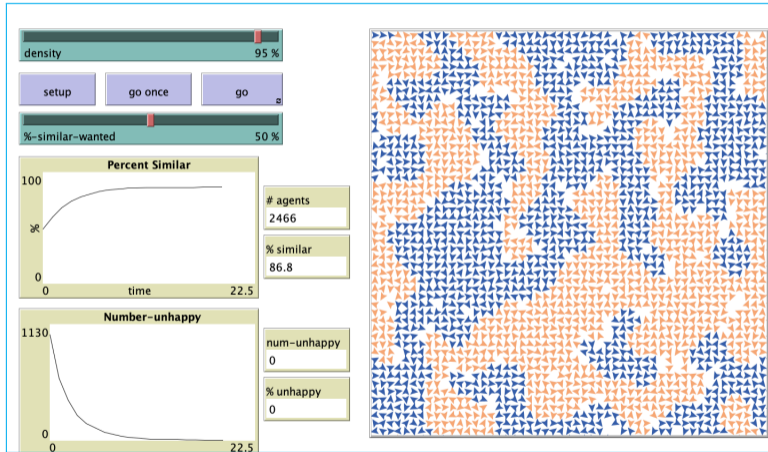
- Une cellule de la grille est un logement
- Un logement est libre ou occupé par un individu avec une ethnie
- Un individu a un seuil de tolérance à la différence
 - si son voisinage est sous ce seuil, l'individu garde son logement
 - sinon l'individu déménage vers une cellule vide choisie aléatoirement
- La grille est initialisée aléatoirement

Fait stylisé

Une population tolérante (qui accepte même d'être en minorité jusqu'à un certain point) évolue vers une structure ségrégative.

Simulation sociale

NetLogo est un langage de programmation et un IDE pour la simulations multi-agents



Sugarscape

Modèle multi-agents de société artificielle

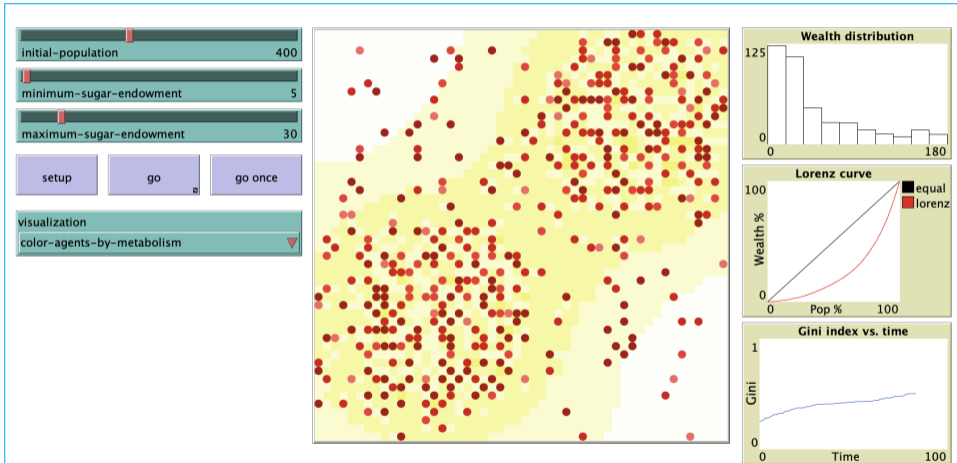
- Une ressource (le sucre) produit de façon continue et spontanée selon une répartition spatiale hétérogène
- Les agents sont répartis aléatoirement, explorent l'environnement, ramassent le sucre et font des réserves
- Une population hétérogène d'agents ayant une espérance de vie, une portée de la vision et un métabolisme
- À chaque itération, un agent
 - ① scrute son voisinage (portée de la vision) et se déplacent (ou pas) vers la cellule inoccupée la plus proche qui contient le plus de sucre
 - ② collecte et consomme (métabolisme) le sucre produit
 - ③ éventuellement meurt de faim ou de vieillesse (espérance de vie)

Faits stylisés

- La répartition inégale des richesses résulte de l'inégalité de la répartition initiale des ressources et de l'inégalité des dispositions des agents
- Les riches deviennent encore plus riches et les pauvres encore plus pauvres

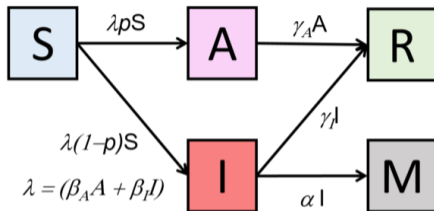
Sugarscape

Modèle explicatif des inégalités



CovidSim [Ferguson et al., 2020]

Modèle épidémiologique à base d'agents

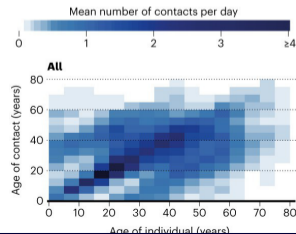
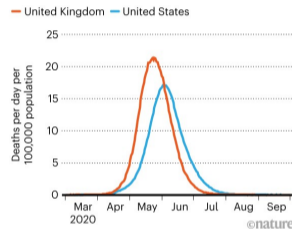


Paramètres :

- âge, sexe, état de santé, emploi, nb contacts des individus
- transports, interactions
- offres de soins
- R_0
- etc.

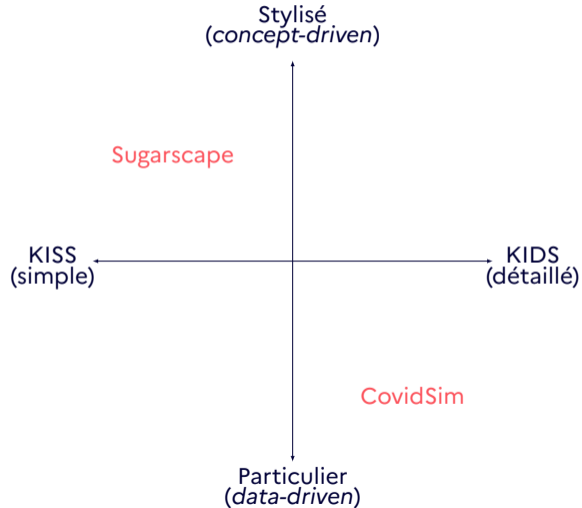
SIMULATION SHOCK

A model by Imperial College London in mid-March predicted a total of more than 500,000 UK deaths from COVID-19, and more than 2.2 million in the United States if no action was taken to stop the virus spreading in those countries.



Système complexe

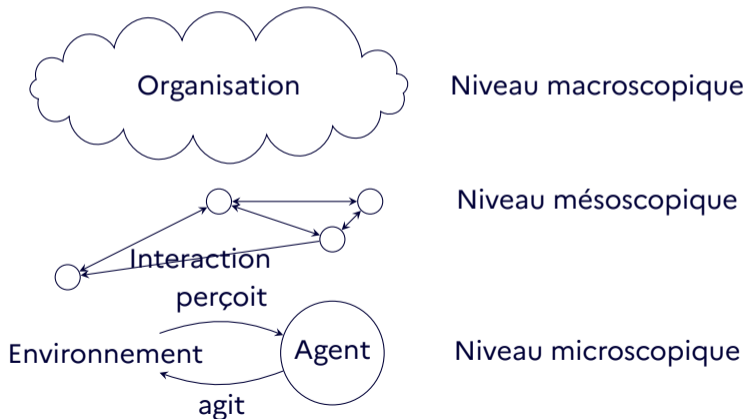
KISS -*Keep It Simple, Stupid* [Simon, 2019]



Systèmes multi-agents

Systèmes Multi-Agents (SMA)

Un **SMA** est composé de multiples entités autonomes, appelées **agents**, en **interaction**, situés dans un **environnement** qui prennent part à une **organisation**.

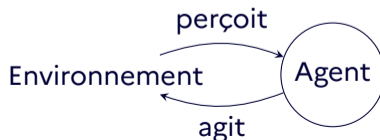


Agent \neq Objet

Agent

Un **agent** est une entité de calcul capable de percevoir et d'agir sur son environnement dont le comportement est le résultat de règles ou algorithmes qui lient ses perceptions et son état interne à ses actions.

- Un agent a un état interne (mémoire) et des opérations, comme un objet (encapsulation)
- Mais il est **autonome**, il agit de manière à atteindre les objectifs qui lui ont été fixés lors de la conception
- **Réactif** s'il agit par réflexe ou
- **Cognitif** (délibératif) s'il raisonne en manipulant une représentation explicite de ses buts, numérique (fonction d'utilité) ou symbolique (langage logique)



Environnement [Russel et Norvig, 2016]

Le lieu des actions individuelles ou collectives

Environnement

L'environnement est l'espace commun partagé par les agents, constitué d'objets, actifs ou passifs, qui peuvent être perçus, voire manipulés (e.g consommés) par les agents. Il est muni d'une topologie qui structure les relations entre agents (accointances) voire leur déplacement et l'accès aux ressources lorsque les agents et les objets sont situés.

Un environnement est :

- **accessible** si un agent a accès (\neq **partiellement**) à l'état de l'environnement
- **déterministe** si l'état du monde à l'instant suivant est complètement déterminé par l'état courant et par les actions effectuées par les agents (\neq **stochastique**)
- **épisodique** si à chaque étape, le prise de décision de l'agent dépend uniquement de l'étape elle-même et non pas des décisions prises au cours des étapes précédentes (\neq **séquentiel**)
- **dynamique** si l'environnement évolue pendant que l'agent décide quelle action accomplir (\neq **statique**) avec le temps (**semi**)

Interaction

Interaction

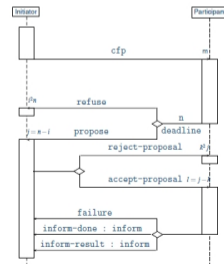
Une interaction est une influence mutuelle entre agents.

On distingue les interactions :

- indirectes (stigmergie), via des signaux, marqueurs chimiques, forces d'attraction/répulsion, etc.
- directes, via des échanges de message d'un expéditeur à un ou plusieurs destinataires

La communication :

- est associé à un langage muni d'une sémantique afin d'énoncer et d'interpréter ces messages
- est scénarisée par des protocoles
- permet de prendre une décision collective en votant, enchérissant, marchandant, argumentant
- permet aux agents de coopérer, i.e. en collaboration ou en compétition



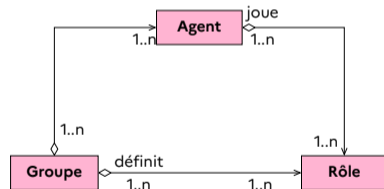
Organisation

Organisation

Une **organisation** est une structure sociale explicite ou le schéma stable émergeant de l'activité conjointe des agents.

Une organisation peut :

- contraindre les comportements individuels pour en réduire la complexité
- réduire l'étendue des interactions
- formuler des buts collectifs et des contraintes globales



Simulation multi-agents

EBM-Equation-Based Model

Un modèle à base d'équations (statistique, équation différentielle) formalise des relations entre grandeurs macroscopiques observables

ABM-Agent-Based Model

Un modèle à base d'agents réifie les comportements individuels, l'environnement et les interactions du niveau microscopique.

Approche *bottom-up* qui permet :

- d'étudier les liens entre les niveaux microscopique, macroscopique et mésoscopique
- d'intégrer les facteurs explicatifs présents au niveau individuel
- de représenter l'hétérogénéité des entités, de leurs caractéristiques permanentes (préférences, motivations, etc.) et de leurs expériences (connaissances, expériences)

Modèle à base d'équations

Exemple du modèle de prédation [Lotka, 1920; Volterra, 1928]

Modèle de prédation

Modèle de la dynamique de systèmes biologiques dans lesquels des prédateurs et des proies interagissent :

$$\sigma(s, i) = \begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} &= x(t) (\alpha - \beta y(t)) \\ \frac{dy(t)}{dt} &= y(t) (\delta x(t) - \gamma) \end{cases}$$

où $x(t)$ (resp. $y(t)$) représente l'effectif des proies (resp. prédateurs) en fonction du temps.

Les paramètres du modèle sont :

- α , le taux de reproduction des proies
- β , i.e. le taux de mortalité des proies
- δ , i.e. le taux de reproduction des prédateurs
- γ , i.e. le taux de mortalité des prédateurs

Modèle à base d'agents

Modèle de prédation

Modèle centré individus de la dynamique de systèmes biologiques dans lesquels des loups et des moutons interagissent :

- des moutons errent au hasard dans un paysage en mangeant de l'herbe pour récupérer de l'énergie
- des loups essayent d'attraper des moutons pour récupérer de l'énergie

Les paramètres du modèle sont :

- la quantité d'énergie pour chaque parcelle d'herbe mangée par un mouton
- la quantité d'énergie pour chaque mouton mangé par un loup
- le taux de reproduction des moutons/loups

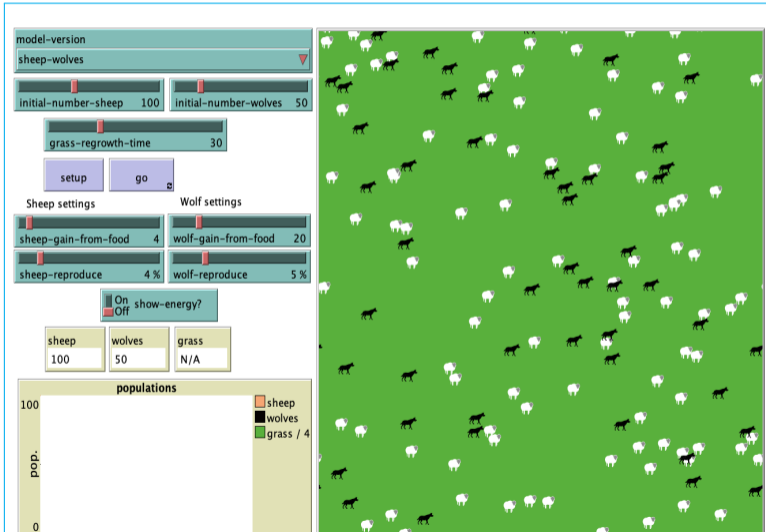
Fait stylisé de l'EBM/ABM

Un mouvement harmonique dans l'évolution des populations

L'ABM est plus réaliste : des paramètres hétérogènes/spatiaux (déplacement, vision)

Modèle à base d'agents

Démonstration du modèle de prédation [Wilensky, 2005]



Modèle à base d'agents

Initialisation du modèle de prédation [Wilensky, 2005]

```

breed [ sheep a-sheep ]           ; Les tortues sont de 2 espèces
breed [ wolves wolf ]
turtles-own [ energy ]           ; Chacune ayant un niveau d'énergie
to setup ; Configuration
  clear-all ; réinitialiser
  ask patches [ set pcolor green ] ; de l'herbe partout
  create-sheep initial-number-sheep ; créer des moutons
  [
    set shape "sheep"              ; facilement visualisable
    set color white
    set size 1.5
    set label-color blue - 2
    set energy random (2 * sheep-gain-from-food) ; en forme
    setxy random-xcor random-ycor ; dispersés
  ]
  create-wolves initial-number-wolves ; créer des moutons
  [
    set shape "wolf"              ; facilement visualisable
    set color black
    set size 2 ; easier to see
    set energy random (2 * wolf-gain-from-food) ; en forme
    setxy random-xcor random-ycor ; dispersé
  ]
  reset-ticks                      ; démarrer l'horloge
end

```

Modèle à base d'agents

Simulation du modèle de prédation [Wilensky, 2005]

```
to go                                     ; Simulation du modèle
  if not any? turtles [ stop ]          ; arreter si aucune tortue
  ask sheep [                             ; demander à chaque mouton de
    move                                 ; se déplacer
    reproduce-sheep                     ; se reproduire aléatoirement
  ]
  ask wolves [                           ; demander à chaque loup de
    move                                 ; se déplacer
    set energy energy - 1                ; se fatiguer
    eat-sheep                            ; manger
    death                                ; éventuellement mourir
    reproduce-wolves                     ; ou se reproduire
  ]
  tick                                  ; incrémenter l'horloge
end
```

Modèle à base d'agents

Procédures du modèle de prédation [Wilensky, 2005]

```

to move                                     ; Se déplacer
  rt random 50                             ; tourner à droite
  lt random 50                             ; tourner à gauche
  fd 1                                     ; avancer d'un pas
end
to eat-grass                               ; Manger de l'herbe
  set pcolor brown
  set energy energy + sheep-gain-from-food ; ça revigore
end
to eat-sheep                               ; Manger un mouton
  let prey one-of sheep-here               ; attraper un mouton
  if prey != nobody [                     ; si possible
    ask prey [ die ]                       ; le tuer
    set energy energy + wolf-gain-from-food ; ça revigore
  ]
end
to reproduce-sheep ;                       ; Se reproduire comme un mouton
  if random-float 100 < sheep-reproduce [   ; aléatoirement
    set energy (energy / 2)                ; partager l'énergie
    hatch 1 [ rt random-float 360 fd 1 ]    ; éclore et bouger
  ]
end
...

```

À emporter

Simulation centrée individus

Modélisation informatique des processus complexes simulant une dynamique collective qui est le résultat des comportements des individus et de leurs interactions.

Système complexe

Un **système complexe** est un ensemble d'entités en interaction locale dont le comportement global ne peut pas être modélisé par des équations prédictives et solvables.

Systèmes Multi-Agents (SMA)

Un **SMA** est composé de multiples entités autonomes, appelées **agents**, en **interaction**, situés dans un **environnement** qui prennent part à une **organisation**.

- À venir :
 - Analyse et construire une simulation multi-agents avec Netlogo (TP)
 - Résolution centrée individus (CM)

- Ferguson, N., Laydon, D., Nedjati Gilani, G., Imai, N., Ainslie, K., Baguelin, M., Bhatia, S., Boonyasiri, A., Cucunuba Perez, Z., Cuomo-Dannenburg, G., et al. (2020). Report 9 : Impact of non-pharmaceutical interventions (NPIs) to reduce COVID19 mortality and healthcare demand.
- Lotka, A. J. (1920). Analytical note on certain rhythmic relations in organic systems. Proceedings of the National Academy of Sciences, 6(7), 410-415.
- Minsky, M. (1965). Matter, mind and models. IFIP Congress, 45-49.
- Reynolds, C. W. (1987). Flocks, herds and schools : A distributed behavioral model. Proceedings of SIGGRAPH, 21(4), 25-34.
- Russel, S., & Norvig, P. (2016). Artificial Intelligence : A Modern Approach Global Edition.
- Schelling, T. C. (1971). Dynamic models of segregation. Journal of mathematical sociology, 1(2), 143-186.
- Simon, H. A. (2019). The sciences of the artificial. MIT press.
- Volterra, V. (1928). Variations and fluctuations of the number of individuals in animal species living together. ICES Journal of Marine Science, 3(1), 3-51.

Wilensky, U. (2005). NetLogo Wolf Sheep Predation model.
[<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/WolfSheepPredation>].