

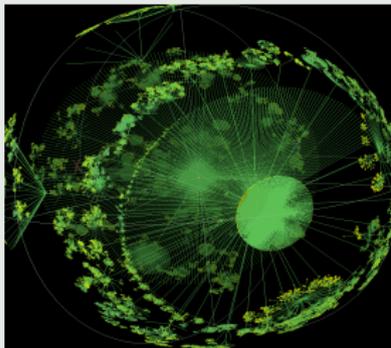
Une architecture de contrôle de systèmes complexes basée sur la simulation multi-agent.

Tomás NAVARRETE GUTIÉRREZ

Thèse pour l'obtention du Doctorat de l'Université de Lorraine
équipe MAIA
Vandœuvre-lès-Nancy, France
le 24 octobre 2012

Des systèmes complexes partout

Internet



Réseaux de transport



Économie



Les systèmes complexes sont

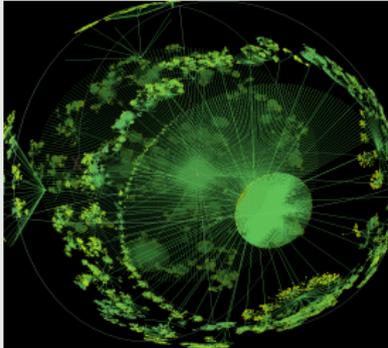
Les systèmes complexes sont composés d'un grand nombre d'entités hétérogènes

Les systèmes complexes sont composés d'un grand nombre d'entités hétérogènes interagissant localement

Les systèmes complexes sont composés d'un grand nombre d'entités hétérogènes interagissant localement et faisant émerger des niveaux multiples de structure et d'organisation.
[Chavalarias et al., 2009]

Des systèmes complexes

Internet



Réseaux de transport

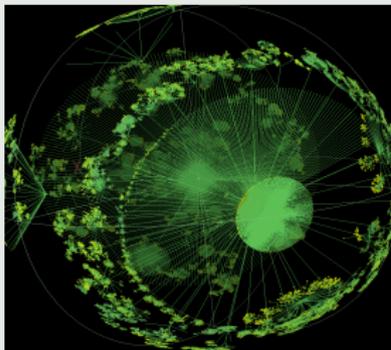


Économie



Des systèmes complexes parfois hors contrôle

Internet



Réseaux de transport

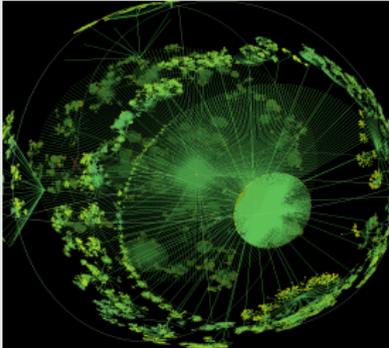


Économie



Des systèmes complexes parfois hors contrôle

Internet



Réseaux de transport



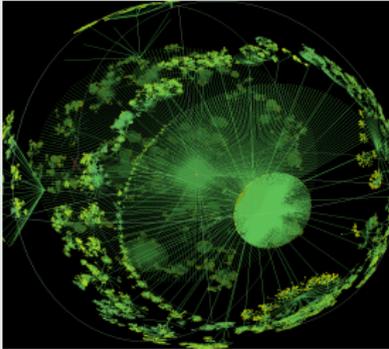
Économie



Perturbations réseau

Des systèmes complexes parfois hors contrôle

Internet



Réseaux de transport



Économie

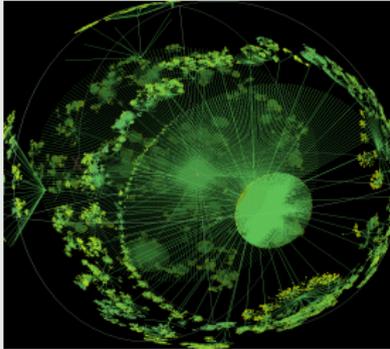


Perturbations réseau

Embouteillages

Des systèmes complexes parfois hors contrôle

Internet



Perturbations réseau

Réseaux de transport



Embouteillages

Économie



Crises financières

*Les systèmes complexes sont composés d'un grand nombre d'entités hétérogènes interagissant localement et faisant émerger des niveaux multiples de structure et d'organisation.
[Chavalarias et al., 2009]*

*Les systèmes complexes sont composés d'un grand nombre d'entités hétérogènes interagissant localement et faisant émerger des niveaux multiples de structure et d'organisation.
[Chavalarias et al., 2009]*

Comment éviter ou favoriser certains comportements ?

- 1 Contexte
 - Hypothèses de travail
 - Outils conceptuels
- 2 Proposition : Une architecture de contrôle basée sur la simulation multi-agents
 - Vue générale
 - Détails
 - Synthèse
- 3 Évaluation expérimentale
 - Preuve de concept
 - Statut des modèles dans l'architecture
- 4 Conclusions

- 1 Contexte
 - Hypothèses de travail
 - Outils conceptuels
- 2 Proposition : Une architecture de contrôle basée sur la simulation multi-agents
 - Vue générale
 - Détails
 - Synthèse
- 3 Évaluation expérimentale
 - Preuve de concept
 - Statut des modèles dans l'architecture
- 4 Conclusions

... qui rendent leur étude difficile.

... qui rendent leur étude difficile.

- **Actions locales produisent des résultats globaux**

... qui rendent leur étude difficile.

- **Actions locales produisent des résultats globaux**
 - Besoin de prendre en compte plusieurs points de vue au même temps

... qui rendent leur étude difficile.

- **Actions locales produisent des résultats globaux**
 - Besoin de prendre en compte plusieurs points de vue au même temps
- **Dynamiques non-linéaires**

... qui rendent leur étude difficile.

- **Actions locales produisent des résultats globaux**
 - Besoin de prendre en compte plusieurs points de vue au même temps
- **Dynamiques non-linéaires**
 - Modèles analytiques peu utiles :

... qui rendent leur étude difficile.

- **Actions locales produisent des résultats globaux**
 - Besoin de prendre en compte plusieurs points de vue au même temps
- **Dynamiques non-linéaires**
 - Modèles analytiques peu utiles :
 - Rendent compte d'un seul point de vue (global)
 - Pas de solutions explicites (nombre de variables)

... qui rendent leur étude difficile.

- **Actions locales produisent des résultats globaux**
 - Besoin de prendre en compte plusieurs points de vue au même temps
- **Dynamiques non-linéaires**
 - Modèles analytiques peu utiles :
 - Rendent compte d'un seul point de vue (global)
 - Pas de solutions explicites (nombre de variables)
- **Systèmes préexistants**

... qui rendent leur étude difficile.

- **Actions locales produisent des résultats globaux**
 - Besoin de prendre en compte plusieurs points de vue au même temps
- **Dynamiques non-linéaires**
 - Modèles analytiques peu utiles :
 - Rendent compte d'un seul point de vue (global)
 - Pas de solutions explicites (nombre de variables)
- **Systèmes préexistants**
 - Mécanismes de contrôle endogènes pas suffisants
 - Impossibilité d'arrêter un système en opération
 - Hors du cadre de l'ingénierie (de systèmes complexes)

Défis

Défis

- Plusieurs points de vue

Défis

- Plusieurs points de vue

Hypothèse : Gouvernance

- Relaxer la notion d'optimalité ...
- ... en utilisant plusieurs alternatives

Défis

- Plusieurs points de vue
- Systèmes préexistants

Hypothèse : Gouvernance

- Relaxer la notion d'optimalité ...
- ... en utilisant plusieurs alternatives

Défis

- Plusieurs points de vue
- Systèmes préexistants

Hypothèse : Gouvernance

- Relaxer la notion d'optimalité ...
- ... en utilisant plusieurs alternatives

Hypothèse : Exogénéité

- Contrôle extérieur

Défis

- Plusieurs points de vue
- Systèmes préexistants
- Besoin de modèles

Hypothèse : Gouvernance

- Relaxer la notion d'optimalité ...
- ... en utilisant plusieurs alternatives

Hypothèse : Exogénéité

- Contrôle extérieur

Défis

- Plusieurs points de vue
- Systèmes préexistants
- Besoin de modèles

Hypothèse : Gouvernance

- Relaxer la notion d'optimalité ...
- ... en utilisant plusieurs alternatives

Hypothèse : Exogénéité

- Contrôle extérieur

Hypothèse : Modèles multi-agents

- Utiles pour *modéliser* systèmes complexes

Implications des hypothèses de travail

Hypothèse : Gouvernance

- Multiples points de vue = plusieurs :
 - modèles
 - régimes
 - actions de contrôle
 - futurs

Hypothèse : Gouvernance

- Multiples points de vue = plusieurs :
 - modèles
 - régimes
 - actions de contrôle
 - futurs

Hypothèse : Exogénéité

- Boucle de contrôle

Hypothèse : Gouvernance

- Multiples points de vue = plusieurs :
 - modèles
 - régimes
 - actions de contrôle
 - futurs

Hypothèse : Exogénéité

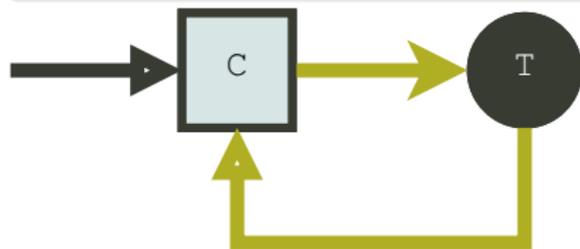
- Boucle de contrôle

Hypothèse : Modèles multi-agents

- Modélisation sans équations explicites
- Questions liées à la Modélisation & Simulation

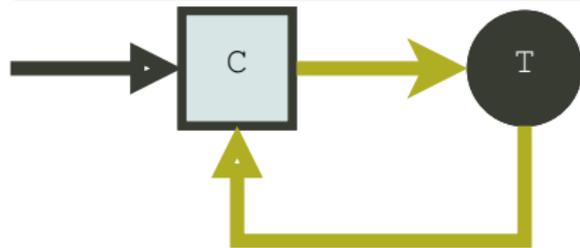
Boucle de rétroaction

Les sorties d'un système deviennent les entrées d'un autre système.



Boucle de rétroaction

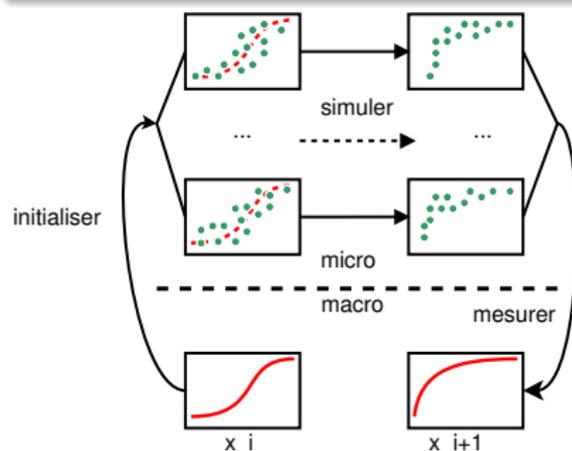
Les sorties d'un système deviennent les entrées d'un autre système.



Approche Equation-free

Modéliser au niveau macroscopique à l'aide de la simulation microscopique.

[Samaey, 2010]



Les modèles multi-agents sont des modèles simulés

Ensemble d'instructions, règles, équations ou contraintes pour générer le comportement d'entrée et sortie. [Zeigler et al., 2000]

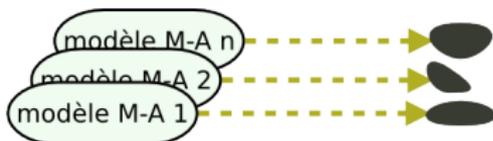
Les modèles multi-agents sont des modèles simulés

Ensemble d'instructions, règles, équations ou contraintes pour générer le comportement d'entrée et sortie. [Zeigler et al., 2000]

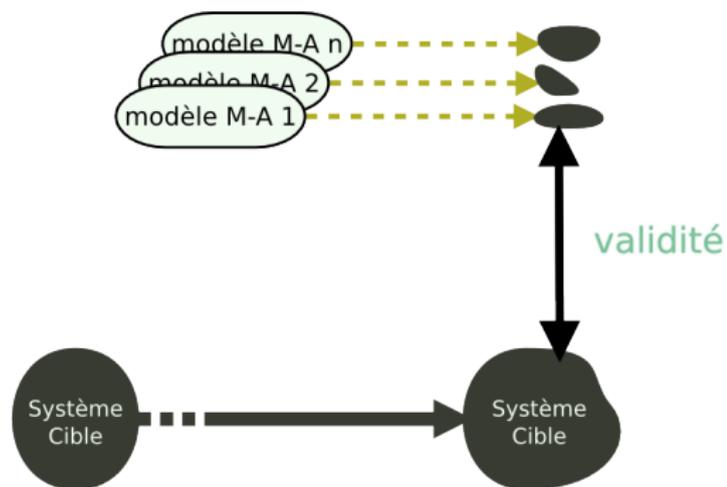
Rapport entre entités du système cible et entités du modèle

- **Validité.** Faire que le modèle se comporte comme le système cible

Intégration des Hypothèses



Intégration des Hypothèses



Les modèles multi-agents sont des modèles simulés

Ensemble d'instructions, règles, équations ou contraintes pour générer le comportement d'entrée et sortie. [Zeigler et al., 2000]

Rapport entre entités du système cible et entités du modèle

- **Validité.** Faire que le modèle se comporte comme le système cible

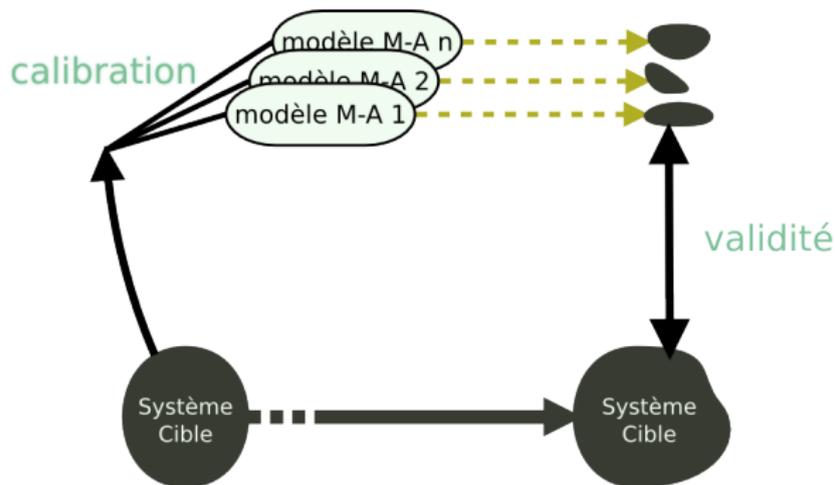
Les modèles multi-agents sont des modèles simulés

Ensemble d'instructions, règles, équations ou contraintes pour générer le comportement d'entrée et sortie. [Zeigler et al., 2000]

Rapport entre entités du système cible et entités du modèle

- **Validité.** Faire que le modèle se comporte comme le système cible
- **Calibration.** Affiner les paramètres du modèle pour le rendre valide.

Intégration des Hypothèses



Les modèles multi-agents sont des modèles simulés

Ensemble d'instructions, règles, équations ou contraintes pour générer le comportement d'entrée et sortie. [Zeigler et al., 2000]

Rapport entre entités du système cible et entités du modèle

- **Validité.** Faire que le modèle se comporte comme le système cible
- **Calibration.** Affiner les paramètres du modèle pour le rendre valide.

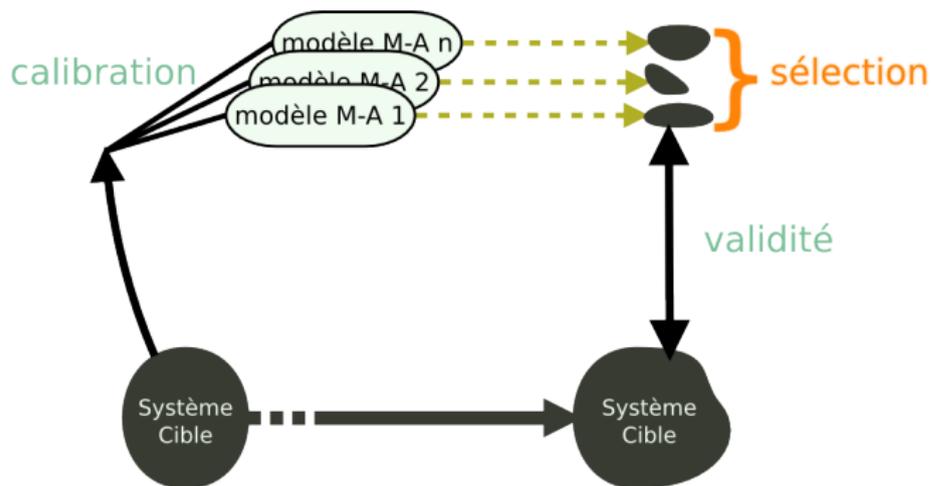
Les modèles multi-agents sont des modèles simulés

Ensemble d'instructions, règles, équations ou contraintes pour générer le comportement d'entrée et sortie. [Zeigler et al., 2000]

Rapport entre entités du système cible et entités du modèle

- **Validité.** Faire que le modèle se comporte comme le système cible
- **Calibration.** Affiner les paramètres du modèle pour le rendre valide.
- **Sélection.** Déterminer la pertinence des modèles.

Intégration des Hypothèses



Les modèles multi-agents sont des modèles simulés

Ensemble d'instructions, règles, équations ou contraintes pour générer le comportement d'entrée et sortie. [Zeigler et al., 2000]

Rapport entre entités du système cible et entités du modèle

- **Validité.** Faire que le modèle se comporte comme le système cible
- **Calibration.** Affiner les paramètres du modèle pour le rendre valide.
- **Sélection.** Déterminer la pertinence des modèles.

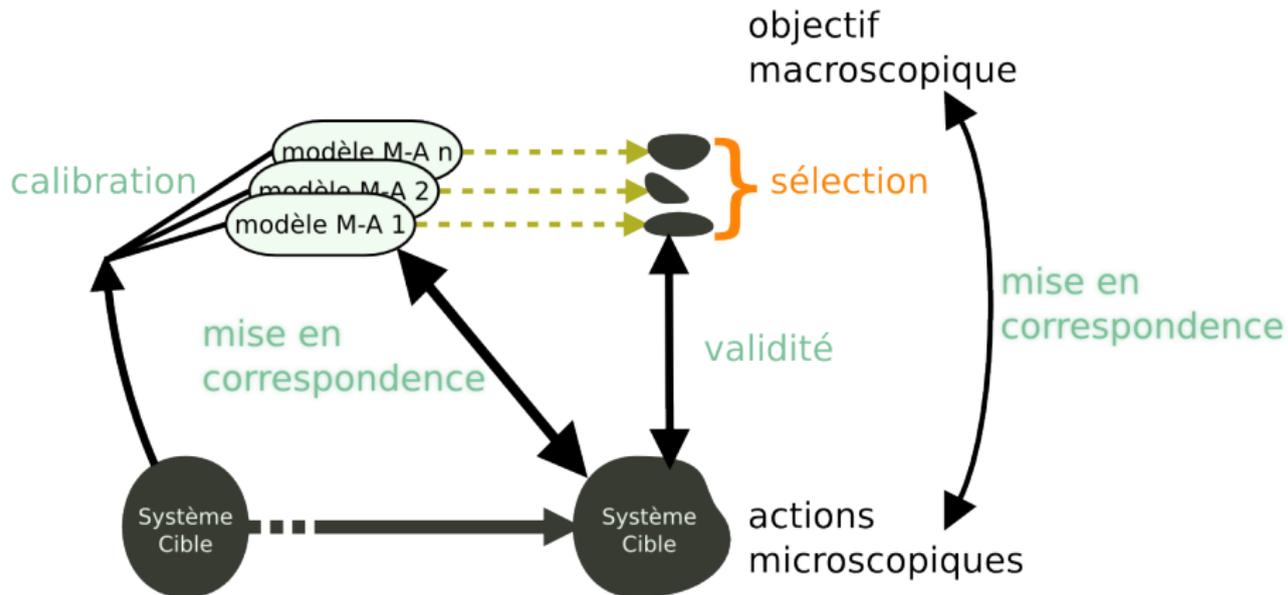
Les modèles multi-agents sont des modèles simulés

Ensemble d'instructions, règles, équations ou contraintes pour générer le comportement d'entrée et sortie. [Zeigler et al., 2000]

Rapport entre entités du système cible et entités du modèle

- **Validité.** Faire que le modèle se comporte comme le système cible
- **Calibration.** Affiner les paramètres du modèle pour le rendre valide.
- **Sélection.** Déterminer la pertinence des modèles.
- **Mise en correspondance.** Associer les entités du système cible aux agents.

Intégration des Hypothèses



Problématiques de la thèse

Générale : contrôle

Comment guider le comportement des systèmes complexes préexistants ?

Générale : contrôle

Comment guider le comportement des systèmes complexes préexistants ?

Particulière : Influence des hypothèses de travail

Est-ce possible d'identifier les influences de :

- validité
- calibration
- sélection
- mise en correspondance

dans le contrôle ?

- 1 Contexte
 - Hypothèses de travail
 - Outils conceptuels
- 2 Proposition : Une architecture de contrôle basée sur la simulation multi-agents
 - Vue générale
 - Détails
 - Synthèse
- 3 Évaluation expérimentale
 - Preuve de concept
 - Statut des modèles dans l'architecture
- 4 Conclusions

Principes

*Une architecture cohérente **exogène** intégrant la simulation **multi-agent** dans une **boucle de contrôle** utilisant l'approche **equation-free**.*

Forme : Pattern générique

- Dynamique (flux d'exécution)
- Boîtes grises

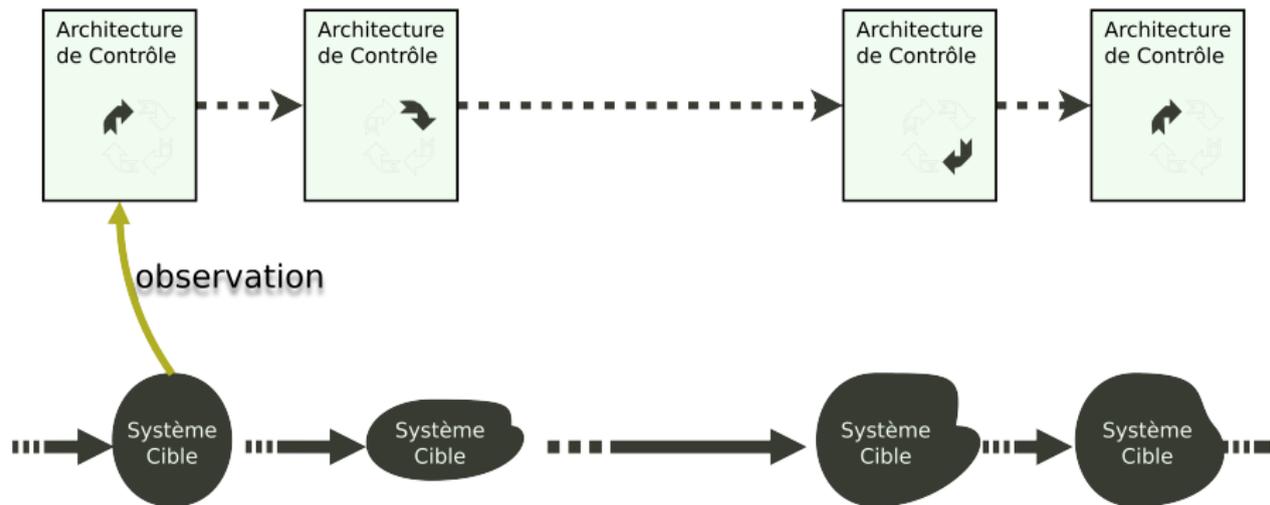
Forme : Pattern générique

- **Dynamique (flux d'exécution)**
- Boîtes grises

Vue générale : flux d'exécution

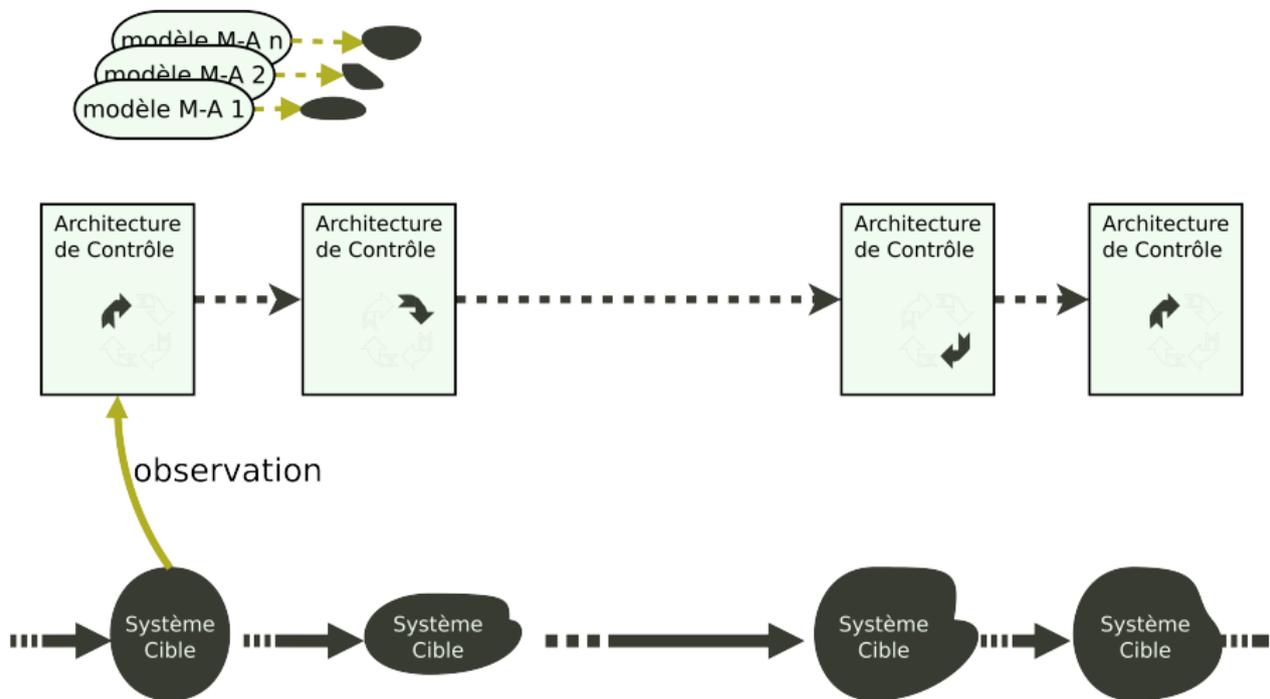


Vue générale : flux d'exécution



Vue générale : flux d'exécution

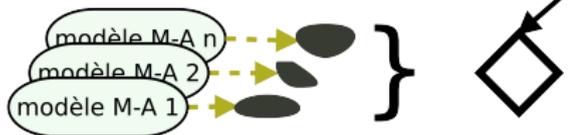
estimer état futur



Vue générale : flux d'exécution

estimer état futur

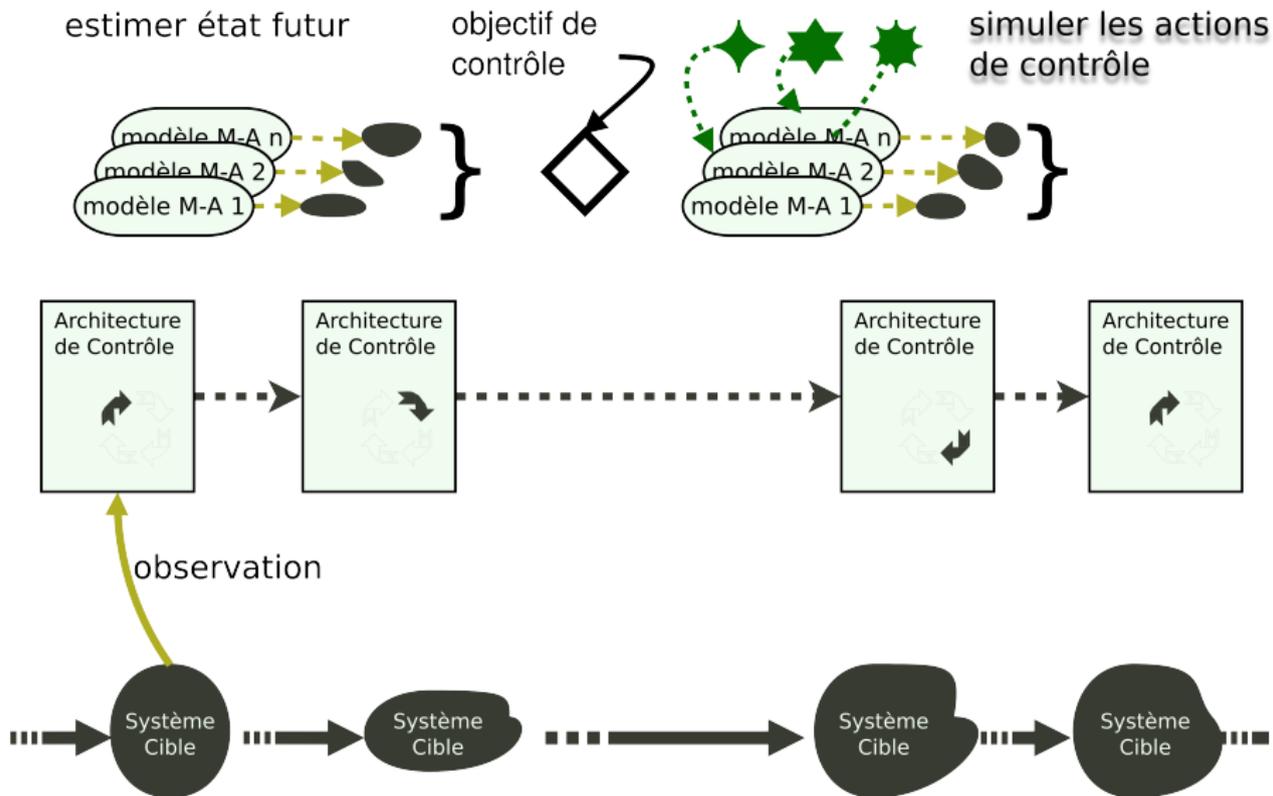
objectif de
contrôle



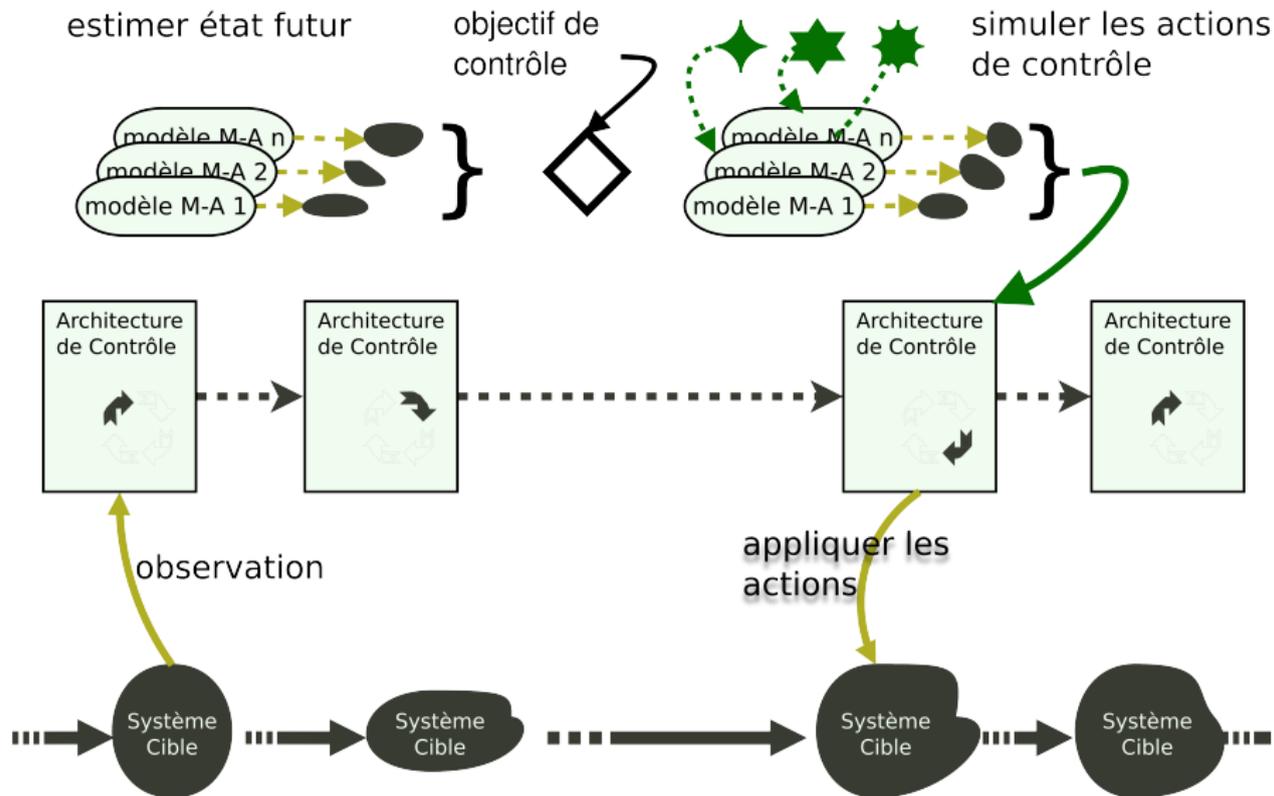
observation



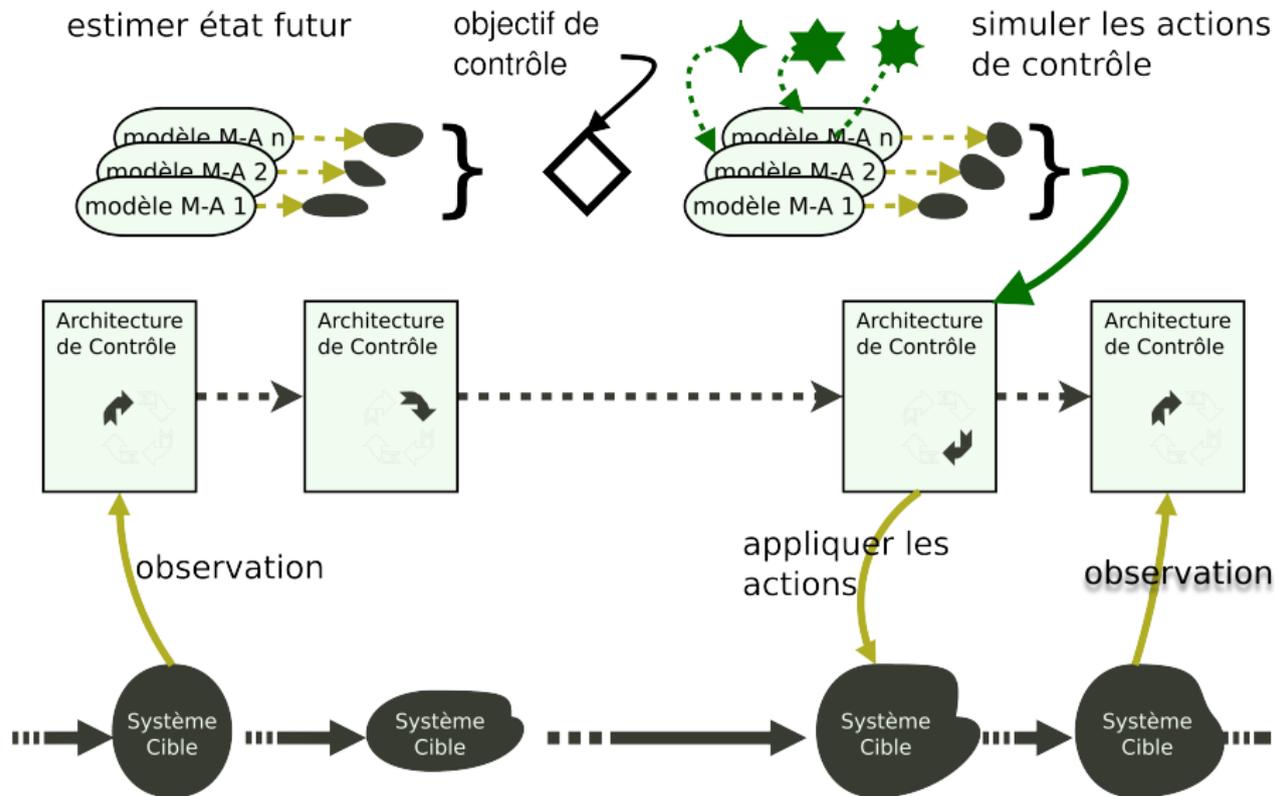
Vue générale : flux d'exécution



Vue générale : flux d'exécution



Vue générale : flux d'exécution



Forme : Pattern générique

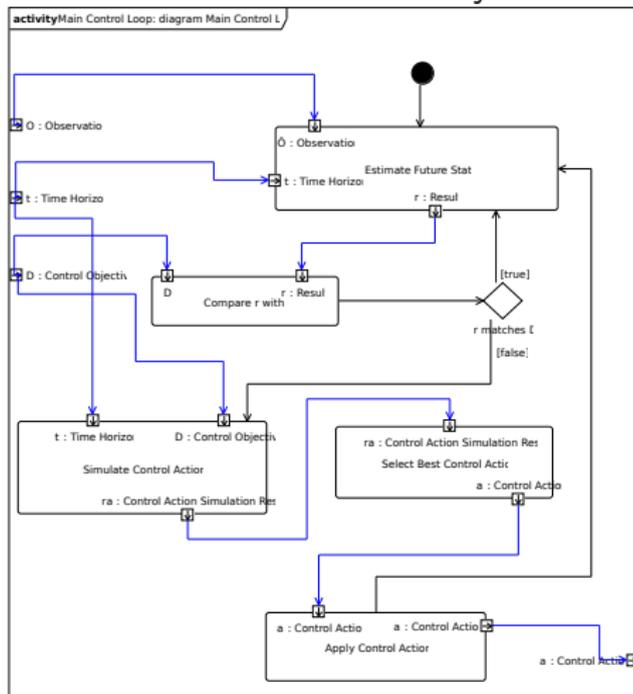
- Dynamique (flux d'exécution)
- Boîtes grises

Vue générale : forme l'Architecture

Forme : Pattern générique

- Dynamique (flux d'exécution)
- Boîtes grises

Formalisé à l'aide de SysML



- Deux systèmes indépendants : l'architecture C et le système cible T .

- Deux systèmes indépendants : l'architecture C et le système cible T .
- **Objectif de contrôle.** Eviter ou favoriser un comportement.

Détails : éléments de l'architecture

- Deux systèmes indépendants : l'architecture C et le système cible T .
- **Objectif de contrôle.** Eviter ou favoriser un comportement.
- **Estimation de l'état futur.** Obtenue à partir de la simulation multi-agents

- Deux systèmes indépendants : l'architecture C et le système cible T .
- **Objectif de contrôle.** Eviter ou favoriser un comportement.
- **Estimation de l'état futur.** Obtenue à partir de la simulation multi-agents
- **Observation du système cible.** Nécessaire pour identifier si l'objectif de contrôle est atteint

- Deux systèmes indépendants : l'architecture C et le système cible T .
- **Objectif de contrôle.** Eviter ou favoriser un comportement.
- **Estimation de l'état futur.** Obtenue à partir de la simulation multi-agents
- **Observation du système cible.** Nécessaire pour identifier si l'objectif de contrôle est atteint
- **Simulation des actions de contrôle.** Les effets des actions de contrôle appliquées au système cible sont obtenues à partir de simulation multi-agents

- Deux systèmes indépendants : l'architecture C et le système cible T .
- **Objectif de contrôle.** Eviter ou favoriser un comportement.
- **Estimation de l'état futur.** Obtenue à partir de la simulation multi-agents
- **Observation du système cible.** Nécessaire pour identifier si l'objectif de contrôle est atteint
- **Simulation des actions de contrôle.** Les effets des actions de contrôle appliquées au système cible sont obtenues à partir de simulation multi-agents
- **Application des actions de contrôle.** Des actions de contrôle concrètes seront appliquées au système cible

Détails : blocs de l'Architecture

Forme : Pattern générique

- Dynamique (flux d'exécution)
- Boîtes grises

Observer *Système Cible*

Fourni des observations sur le système cible

Estimer état futur

Simulation multi-agents pour estimer l'état futur du système cible

Simuler actions de contrôle

Simulation multi-agents pour estimer les effets des actions de contrôle

Appliquer actions de contrôle

- Modèles simulables
- Modèles validés
- Actions de contrôle spécifiées
- Moyens d'appliquer les actions de contrôle
- Moyens d'observer le système cible

Proposition adaptée au contexte :

- principes directement liés aux difficultés du contrôle
- intègre les principes dans une architecture cohérente

Proposition adaptée au contexte :

- principes directement liés aux difficultés du contrôle
- intègre les principes dans une architecture cohérente

Deux Questions

Proposition adaptée au contexte :

- principes directement liés aux difficultés du contrôle
- intègre les principes dans une architecture cohérente

Deux Questions

- 1 Hypothèses assez flexibles pour implémenter la proposition ?

Proposition adaptée au contexte :

- principes directement liés aux difficultés du contrôle
- intègre les principes dans une architecture cohérente

Deux Questions

- 1 Hypothèses assez flexibles pour implémenter la proposition ?
- 2 Comment évaluer les influences des différentes hypothèses de travail ?

Proposition adaptée au contexte :

- principes directement liés aux difficultés du contrôle
- intègre les principes dans une architecture cohérente

Deux Questions

- 1 Hypothèses assez flexibles pour implémenter la proposition ?
 - Illustration dans un cas concret.
- 2 Comment évaluer les influences des différentes hypothèses de travail ?

Proposition adaptée au contexte :

- principes directement liés aux difficultés du contrôle
- intègre les principes dans une architecture cohérente

Deux Questions

- 1 Hypothèses assez flexibles pour implémenter la proposition ?
 - Illustration dans un cas concret.
- 2 Comment évaluer les influences des différentes hypothèses de travail ?
 - Illustration des questions dans notre architecture.

- 1 Contexte
 - Hypothèses de travail
 - Outils conceptuels
- 2 Proposition : Une architecture de contrôle basée sur la simulation multi-agents
 - Vue générale
 - Détails
 - Synthèse
- 3 Évaluation expérimentale
 - Preuve de concept
 - Statut des modèles dans l'architecture
- 4 Conclusions

Objectif : illustration

- dans un cas concret

- 1 Système Cible
- 2 Implémentation de l'Architecture
- 3 Dispositif expérimental
- 4 Résultats et conclusions

Système cible : domaine

Domaine d'application : réseaux p2p de partage de fichiers

Réseau où chaque client est aussi un serveur.

Exemples : eDonkey, BitTorrent, KADemlia

Système cible : domaine

Domaine d'application : réseaux p2p de partage de fichiers

Réseau où chaque client est aussi un serveur.

Exemples : eDonkey, BitTorrent, KADemlia

Phénomène collectif : Free-riding

Système cible : domaine

Domaine d'application : réseaux p2p de partage de fichiers

Réseau où chaque client est aussi un serveur.

Exemples : eDonkey, BitTorrent, KADemlia

Phénomène collectif : Free-riding

- Profiter d'un système sans collaborer

Système cible : domaine

Domaine d'application : réseaux p2p de partage de fichiers

Réseau où chaque client est aussi un serveur.

Exemples : eDonkey, BitTorrent, KADemlia

Phénomène collectif : Free-riding

- Profiter d'un système sans collaborer
- Free-riding dans les réseaux p2p

Système cible : domaine

Domaine d'application : réseaux p2p de partage de fichiers

Réseau où chaque client est aussi un serveur.

Exemples : eDonkey, BitTorrent, KADemlia

Phénomène collectif : Free-riding

- Profiter d'un système sans collaborer
- Free-riding dans les réseaux p2p
 - Profiteur : téléchargement des fichiers sans en partager en retour.

Système cible : domaine

Domaine d'application : réseaux p2p de partage de fichiers

Réseau où chaque client est aussi un serveur.

Exemples : eDonkey, BitTorrent, KADemlia

Phénomène collectif : Free-riding

- Profiter d'un système sans collaborer
- Free-riding dans les réseaux p2p
 - Profiteur : téléchargement des fichiers sans en partager en retour.
 - Présence importante de profiteurs sur un réseau peut dégrader sa performance [Krishnan et al., 2004].

Système cible : domaine

Domaine d'application : réseaux p2p de partage de fichiers

Réseau où chaque client est aussi un serveur.

Exemples : eDonkey, BitTorrent, KADemlia

Phénomène collectif : Free-riding

- Profiter d'un système sans collaborer
- Free-riding dans les réseaux p2p
 - Profiteur : téléchargement des fichiers sans en partager en retour.
 - Présence importante de profiteurs sur un réseau peut dégrader sa performance [Krishnan et al., 2004].
- Lié aux phénomènes de la famille « tragédie des communaux »

Description

- Pairs connectés dans un réseau avec une topologie.
- Comportement « libre marché » : pair partage s'il a intérêt à le faire.
- Intérêt : fonction de la proportion des ses voisins dans le réseau qui partagent et d'une générosité propre.

Système cible : description

Description

- Pairs connectés dans un réseau avec une topologie.
- Comportement « libre marché » : pair partage s'il a intérêt à le faire.
- Intérêt : fonction de la proportion des ses voisins dans le réseau qui partagent et d'une générosité propre.

Système cible simulé

- Simulateur : « PeerSim »
- Environnement contrôlé (besoin expérimental)
- Expérimentation directe difficile (technique, Hadopi)

Caractéristiques d'un pair « pair_i » [Feldman et al., 2006]

- État booléen : Partage_i
- Générosité : θ_i
- Profondeur d_i du voisinage utilisé
- Fonction de décision.

Caractéristiques d'un pair « pair_i » [Feldman et al., 2006]

- État booléen : Partage_i;
- Générosité : θ_i ;
- Profondeur d_i du voisinage utilisé
- Fonction de décision.

Fonction de décision pair_i

si *générosité* \geq *coût* **alors**

Partage \leftarrow Vrai;

sinon

Partage \leftarrow Faux;

fin

Caractéristiques d'un pair « pair_i » [Feldman et al., 2006]

- État booléen : Partage_i;
- Générosité : θ_i ;
- Profondeur d_i du voisinage utilisé
- Fonction de décision.

Fonction de décision pair_i

si *générosité* \geq *coût* **alors**

Partage \leftarrow Vrai;

sinon

Partage \leftarrow Faux;

fin

Le *coût* de partager pour pair_i est l'*inverse de la proportion* de voisins partageurs.

Système cible : implémentation

Topologie générée avec algorithme Watts & Strogatz
[Watts and Strogatz, 1998]

Système cible : implémentation

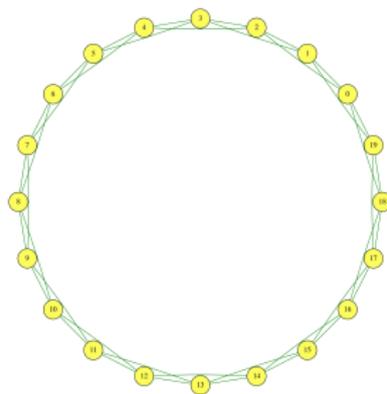
Topologie générée avec algorithme Watts & Strogatz
[Watts and Strogatz, 1998]

- Plusieurs familles de réseaux

Système cible : implémentation

Topologie générée avec algorithme Watts & Strogatz
[Watts and Strogatz, 1998]

- Plusieurs familles de réseaux

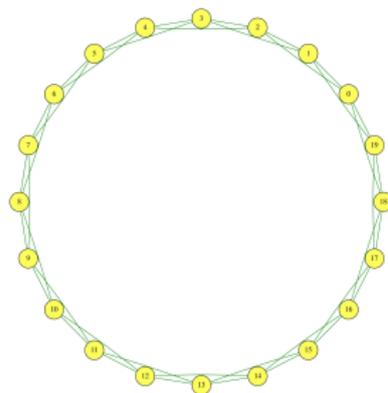


$$p = 0$$

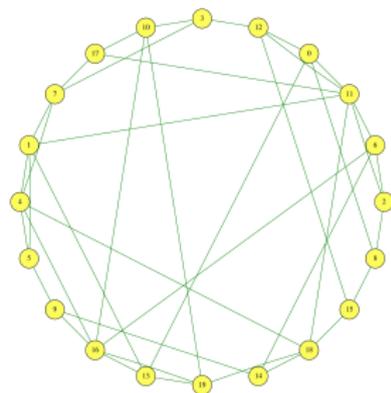
Système cible : implémentation

Topologie générée avec algorithme Watts & Strogatz
[Watts and Strogatz, 1998]

- Plusieurs familles de réseaux



$p = 0$

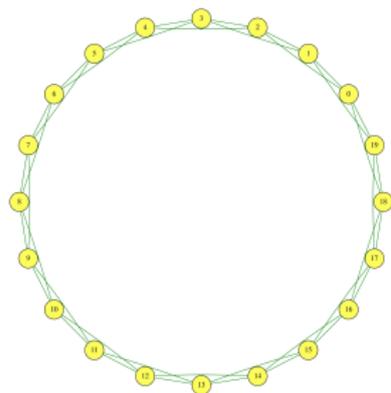


$p = 1$

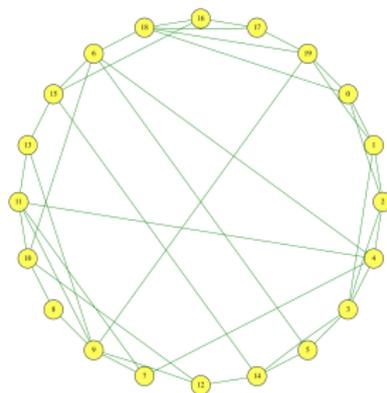
Système cible : implémentation

Topologie générée avec algorithme Watts & Strogatz
[Watts and Strogatz, 1998]

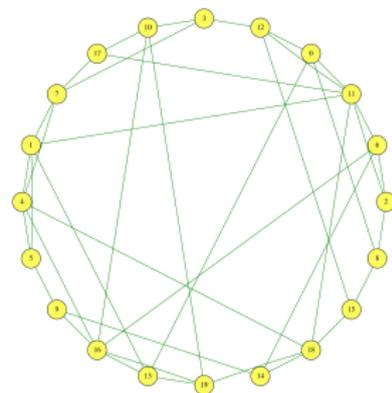
- Plusieurs familles de réseaux



$p = 0$



$p = 0,25$

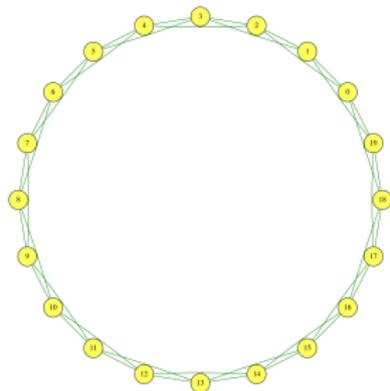


$p = 1$

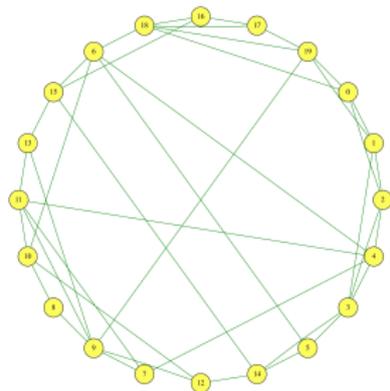
Système cible : implémentation

Topologie générée avec algorithme Watts & Strogatz
[Watts and Strogatz, 1998]

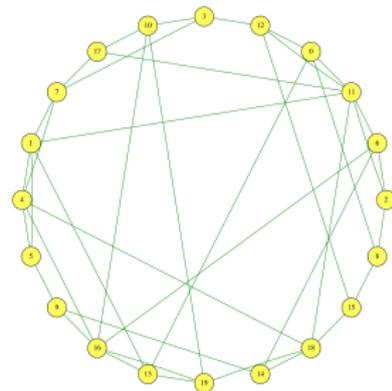
- Plusieurs familles de réseaux
- Réseaux p2p (et autres) ont des caractéristiques « Petit Monde »



$p = 0$



$p = 0,25$



$p = 1$

Comportement global du système cible

- Décrit le système cible ✓
- Caractérisé les pairs
 - variables ✓
 - comportement ✓
- Décrit la topologie ✓

Comportement global du système cible

- Décrit le système cible ✓
- Caractérisé les pairs
 - variables ✓
 - comportement ✓
- Décrit la topologie ✓
- Dynamique ?

Comportement global du système cible

- Décrit le système cible ✓
- Caractérisé les pairs
 - variables ✓
 - comportement ✓
- Décrit la topologie ✓
- Dynamique ?
- Free-riding → Proportion globale des pairs qui partagent

Comportement global du système cible

- Décrit le système cible ✓
- Caractérisé les pairs
 - variables ✓
 - comportement ✓
- Décrit la topologie ✓
- Dynamique ?
- Free-riding → Proportion globale des pairs qui partagent
- **N** pairs dans le réseau
- **X** proportion de pairs qui partagent

Comportement global du système cible

- Décrit le système cible ✓
- Caractérisé les pairs
 - variables ✓
 - comportement ✓
- Décrit la topologie ✓
- Dynamique ?
- Free-riding → Proportion globale des pairs qui partagent
- **N** pairs dans le réseau
- **X** proportion de pairs qui partagent
- Question : x_{init}

Comportement global du système cible

- Décrit le système cible ✓
- Caractérisé les pairs
 - variables ✓
 - comportement ✓
- Décrit la topologie ✓
- Dynamique ?
- Free-riding → Proportion globale des pairs qui partagent
- **N** pairs dans le réseau
- **X** proportion de pairs qui partagent
- Question : $x_{init} \rightarrow x_{final}$

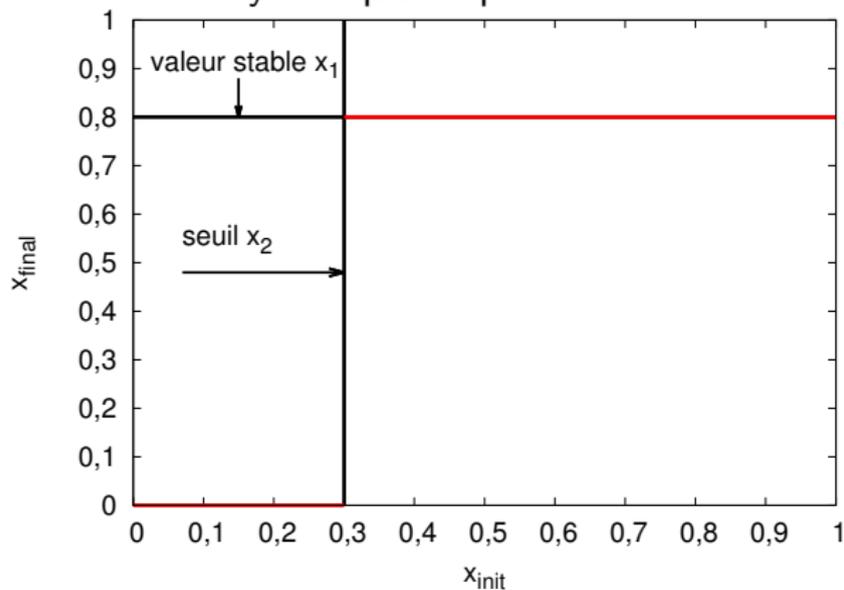
Comportement global du système cible

- Décrit le système cible ✓
- Caractérisé les pairs
 - variables ✓
 - comportement ✓
- Décrit la topologie ✓
- Dynamique ?
- Free-riding → Proportion globale des pairs qui partagent
- **N** pairs dans le réseau
- **X** proportion de pairs qui partagent
- Question : $x_{init} \rightarrow x_{final}$
- $X \geq 0,50 \rightarrow$ Majorité de partageurs

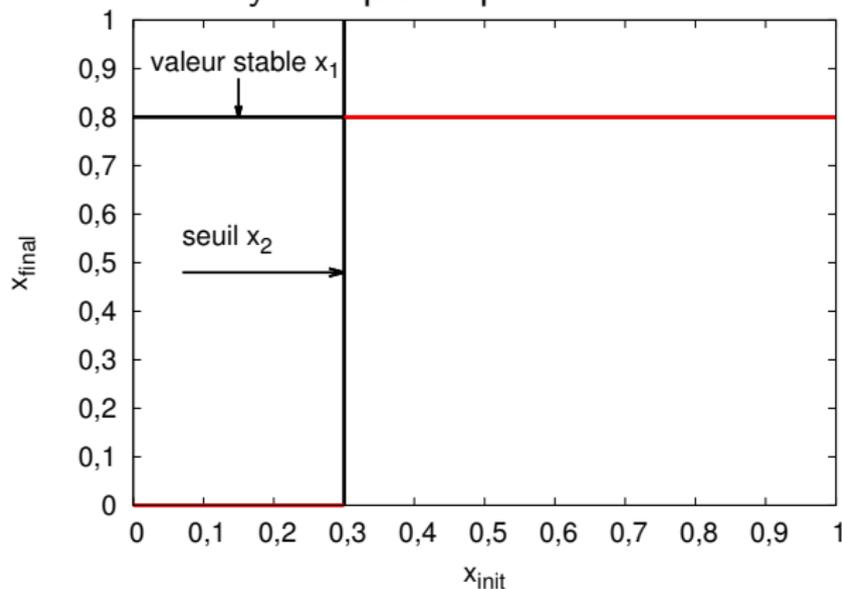
Comportement global du système cible

- Décrit le système cible ✓
- Caractérisé les pairs
 - variables ✓
 - comportement ✓
- Décrit la topologie ✓
- Dynamique ?
- Free-riding → Proportion globale des pairs qui partagent
- **N** pairs dans le réseau
- **X** proportion de pairs qui partagent
- Question : $x_{init} \rightarrow x_{final}$
- $X \geq 0,50 \rightarrow$ Majorité de partageurs
- $X < 0,50 \rightarrow$ Majorité de profiteurs

Dynamique de point fixe



Dynamique de point fixe



- Distribution uniforme de générosité
- Pas de topologie
- Connaissance globale ($d = \infty$)
- Complètement synchrone

Étude préliminaire [Navarrete Gutiérrez et al., 2011]

Étude préliminaire [Navarrete Gutiérrez et al., 2011]

- Modèle multi-agent
- Ajoutant la dimension spatiale (topologie)

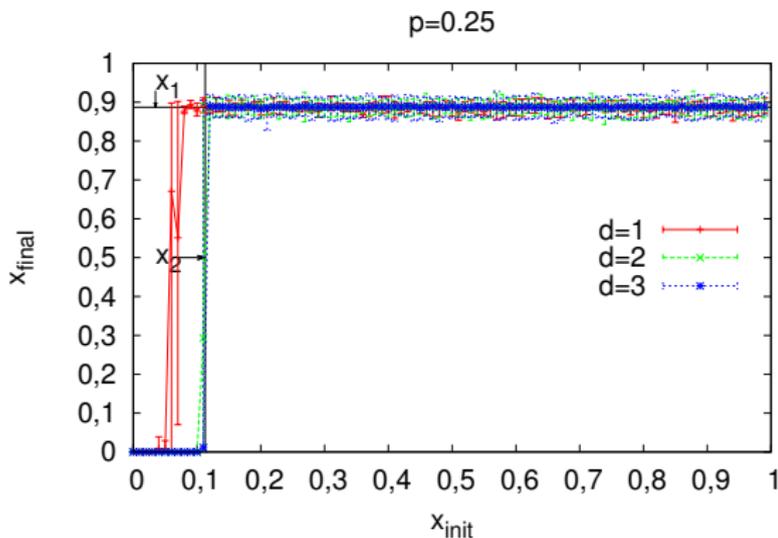
- **Ensemble d'agents.** $\hat{A} = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$
- **Comportement.** « libre marché ».
- **Caractéristiques des agents :**
 - La générosité $\theta_M = \{\theta_{a_1}, \theta_{a_2}, \dots, \theta_{a_n}\}$
 - L'état de partage $Partage_M = \{partage_{a_1}, partage_{a_2}, \dots, partage_{a_n}\}$
 - Profondeur de voisinage $\hat{d} = \{d_{a_1}, d_{a_2}, \dots, d_{a_n}\}$.
- **Un graphe des interactions agent-agent.** $G_M = (\hat{A}, E_M)$
 - nœud = agent de \hat{A}
 - E = liens entre agents

Étude préliminaire [Navarrete Gutiérrez et al., 2011]

- Modèle multi-agent
- Ajoutant la dimension spatiale (topologie)

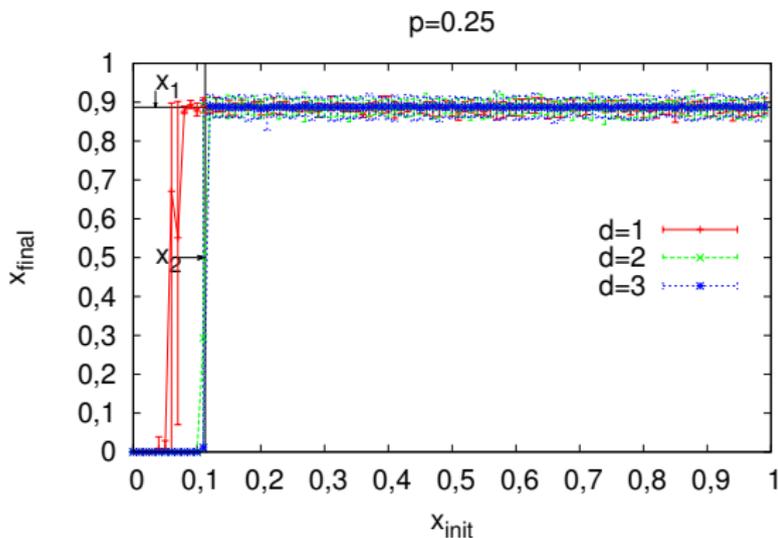
Étude préliminaire [Navarrete Gutiérrez et al., 2011]

- Modèle multi-agent
- Ajoutant la dimension spatiale (topologie)



Étude préliminaire [Navarrete Gutiérrez et al., 2011]

- Modèle multi-agent
- Ajoutant la dimension spatiale (topologie)
- Même dynamique



Éviter un système cible avec une majorité de « profiteurs »

Éviter un système cible avec une majorité de « profiteurs » $D : x_{final} \geq 0,50$

Éviter un système cible avec une majorité de « profiteurs » $D : x_{final} \geq 0,50$

Démarche expérimentale :

Un système cible avec majorité de profiteurs +
Architecture de contrôle → Système cible avec majorité de
partageurs

Éviter un système cible avec une majorité de « profiteurs » $D : x_{final} \geq 0,50$

Démarche expérimentale :

Un système cible avec majorité de profiteurs +
Architecture de contrôle → Système cible avec majorité de
partageurs

- Conditions initiales du système cible ?

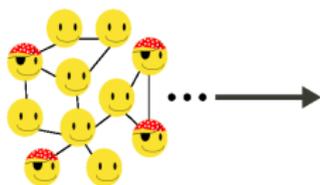
Éviter un système cible avec une majorité de « profiteurs » $D : x_{final} \geq 0,50$

Démarche expérimentale :

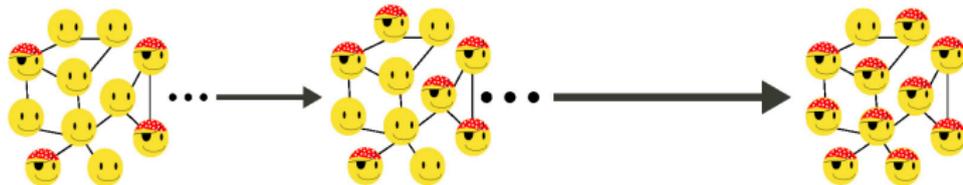
Un système cible avec majorité de profiteurs +
Architecture de contrôle → Système cible avec majorité de
partageurs

- Conditions initiales du système cible ?
- Configuration de l'architecture ?

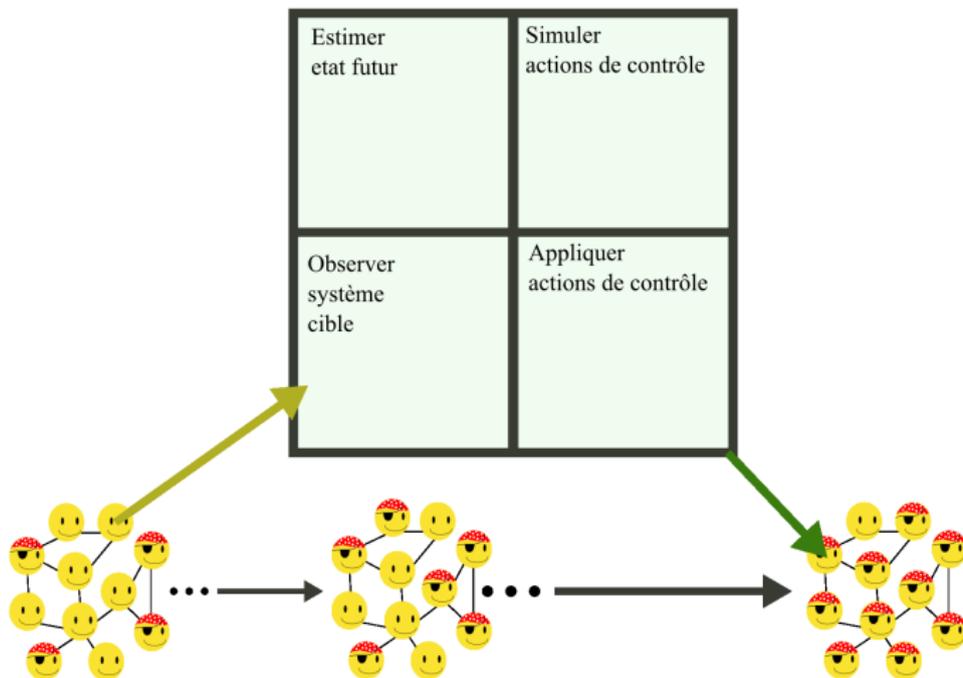
Démarche Expérimentale



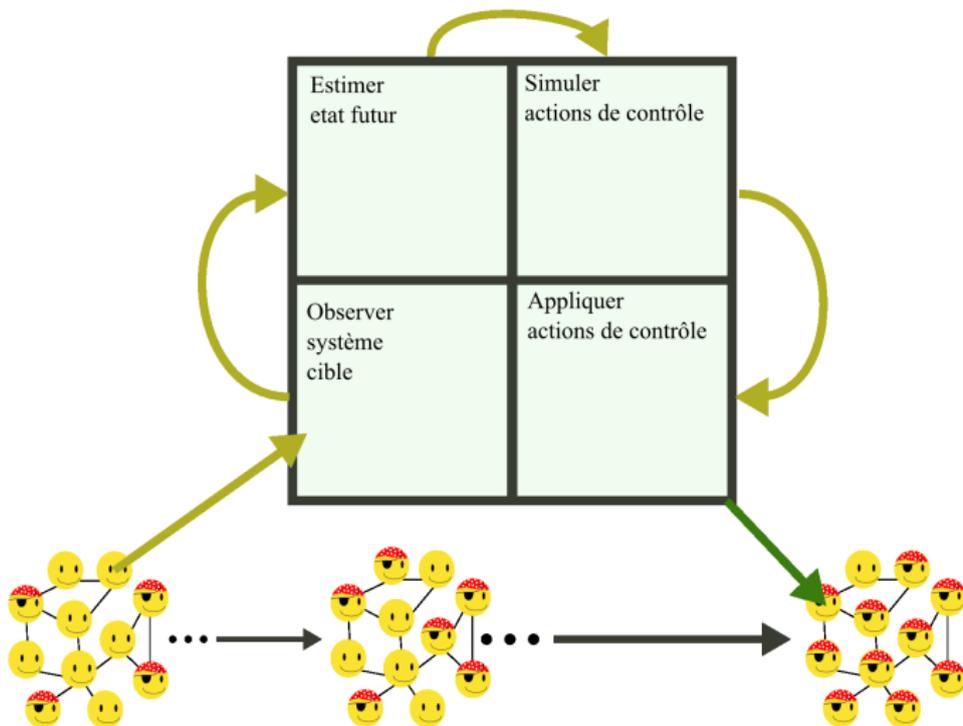
Démarche Expérimentale



Démarche Expérimentale



Démarche Expérimentale



Conditions initiales retenues

- Deux valeurs de N
1000, 10000
- Cinq valeurs de p
0, 0,25, 0,50, 0,75, 1
- Profondeur $d = 1$
- Niveau de contribution initial
 $x_{init} = 0,018$

Conditions initiales retenues

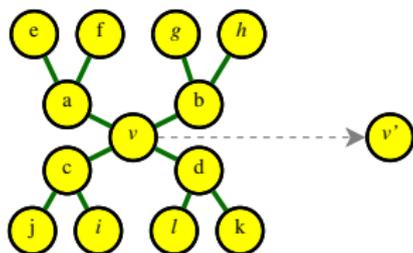
- Deux valeurs de N
1000, 10000
- Cinq valeurs de p
0, 0,25, 0,50, 0,75, 1
- Profondeur $d = 1$
- Niveau de contribution initial
 $x_{init} = 0,018$

	% de cas ou $x_{final} \geq 0,50$				
	$p = 0$	$p = 0,25$	$p = 0,50$	$p = 0,75$	$p = 1$
N=1000	0,1%	46,8%	4,1%	0	0
N=10000	0	19,5%	0	0	0

- 1 **Observer le système cible.** Obtenir un sous graphe *aléatoire* G_{est} échantillonnant q pairs, du système cible T .

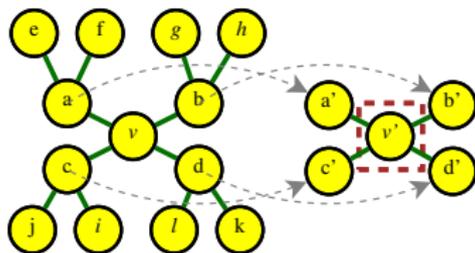
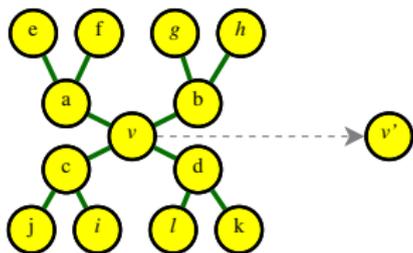
Échantillonnage exemple avec $q = 2$

Échantillonnage exemple avec $q = 2$



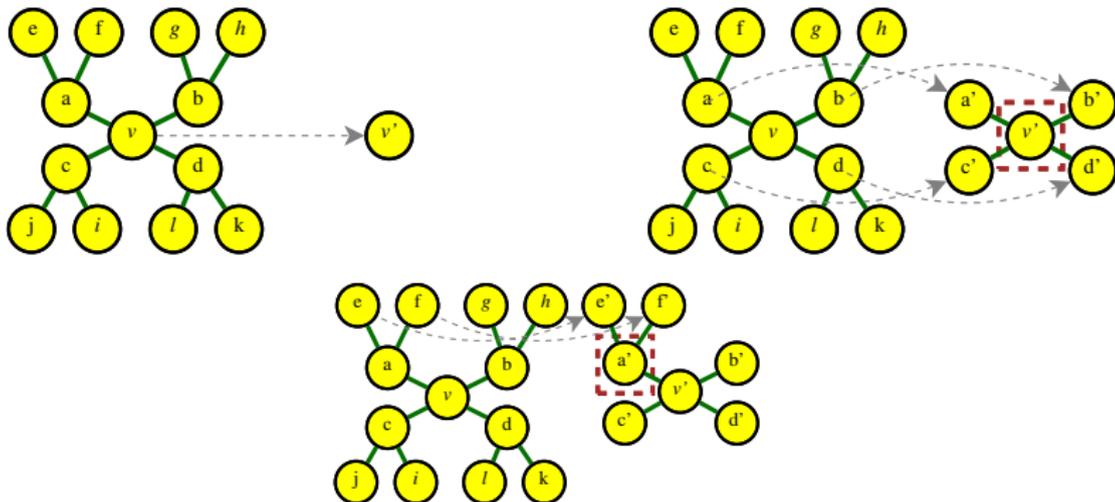
- 1 Choisir nœud aléatoire v du système cible et ajouter au échantillon.

Échantillonnage exemple avec $q = 2$



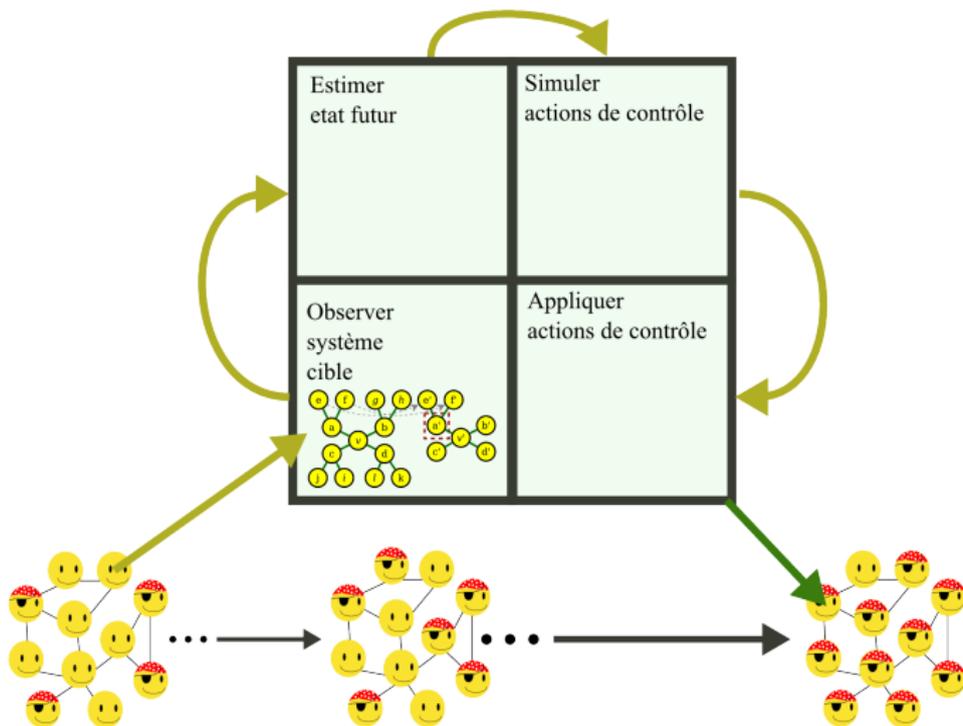
- 1 Choisir nœud aléatoire v du système cible et ajouter au échantillon.
- 2 Ajouter les voisins de v au modèle.

Échantillonnage exemple avec $q = 2$



- 1 Choisir nœud aléatoire v du système cible et ajouter au échantillon.
- 2 Ajouter les voisins de v au modèle.
- 3 Choisir un voisin aléatoire a' de v et ajouter ses voisins au échantillon.

Blocs définis - Système cible défini

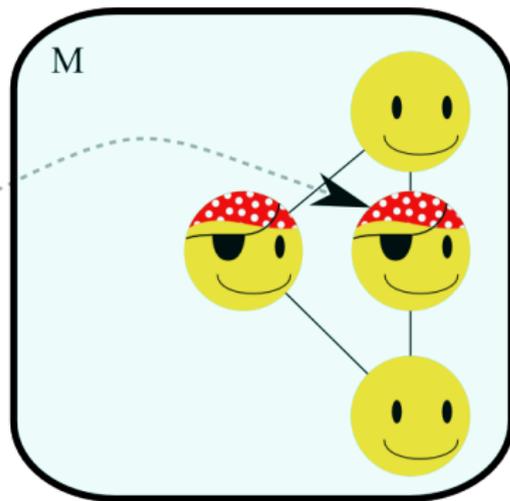
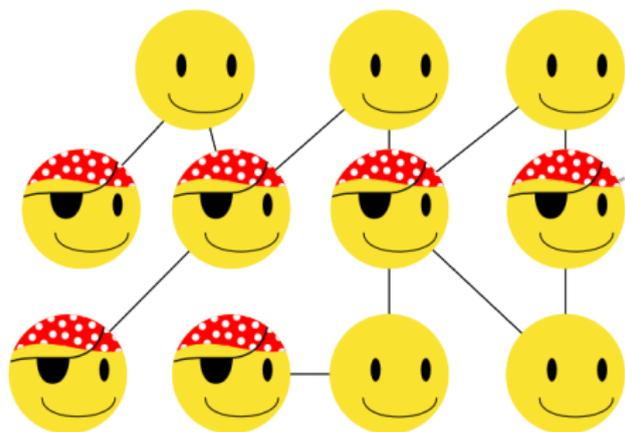


- 1 **Observer le système cible.** Obtenir un sous graphe *aléatoire* G_{est} échantillonnant q pairs, du système cible T .

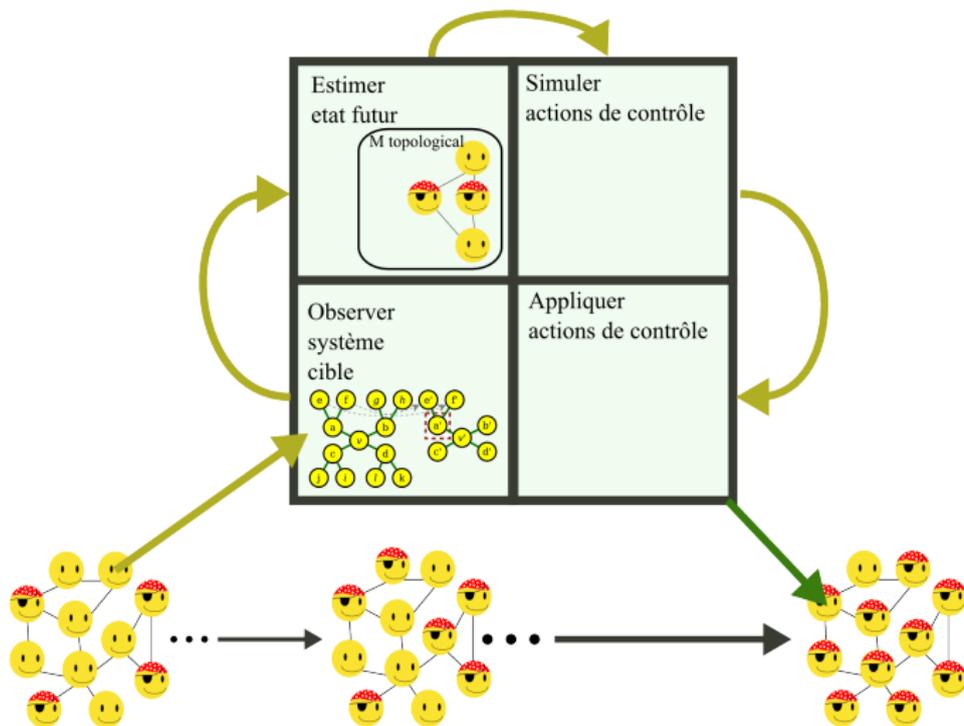
- 1 **Observer le système cible.** Obtenir un sous graphe *aléatoire* G_{est} échantillonnant q pairs, du système cible T . $q = 6$

- 1 **Observer le système cible.** Obtenir un sous graphe *aléatoire* G_{est} échantillonnant q pairs, du système cible T . $q = 6$
- 2 **Estimer l'état futur.** Initialiser *un* modèle $M_{topologique}$ avec G_{est} pour estimer l'état futur du niveau de contribution $r_{M_{topologique}}$. Comparer $r_{M_{topologique}}$ avec l'objectif de contrôle D et décider si des actions de contrôle sont nécessaires.

Le sous graphe = Modèle



Blocs définis - Système cible défini

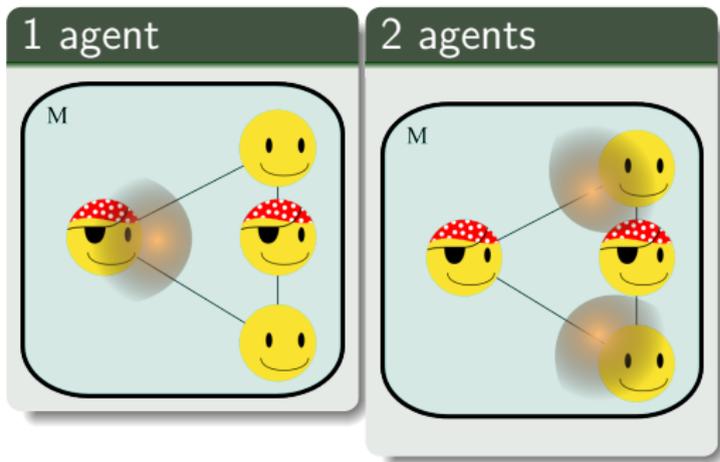


- 1 **Observer le système cible.** Obtenir un sous graphe *aléatoire* G_{est} échantillonnant q pairs, du système cible T . $q = 6$
- 2 **Estimer l'état futur.** Initialiser *un* modèle $M_{topologique}$ avec G_{est} pour estimer l'état futur du niveau de contribution $r_{M_{topologique}}$. Comparer $r_{M_{topologique}}$ avec l'objectif de contrôle D et décider si des actions de contrôle sont nécessaires.

- 1 **Observer le système cible.** Obtenir un sous graphe *aléatoire* G_{est} échantillonnant q pairs, du système cible T . $q = 6$
- 2 **Estimer l'état futur.** Initialiser *un* modèle $M_{topologique}$ avec G_{est} pour estimer l'état futur du niveau de contribution $r_{M_{topologique}}$. Comparer $r_{M_{topologique}}$ avec l'objectif de contrôle D et décider si des actions de contrôle sont nécessaires.
- 3 **Simuler actions de contrôle.** Simuler l'application des actions de contrôle avec le modèle $M_{topologique}$ (précédent).

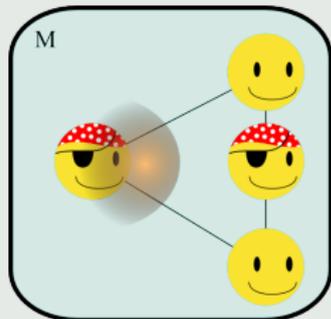
Actions de contrôle : modifier l'environnement

Faire croire que tous ses voisins partagent

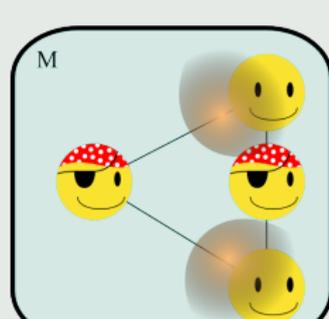


Faire croire que tous ses voisins partagent

1 agent



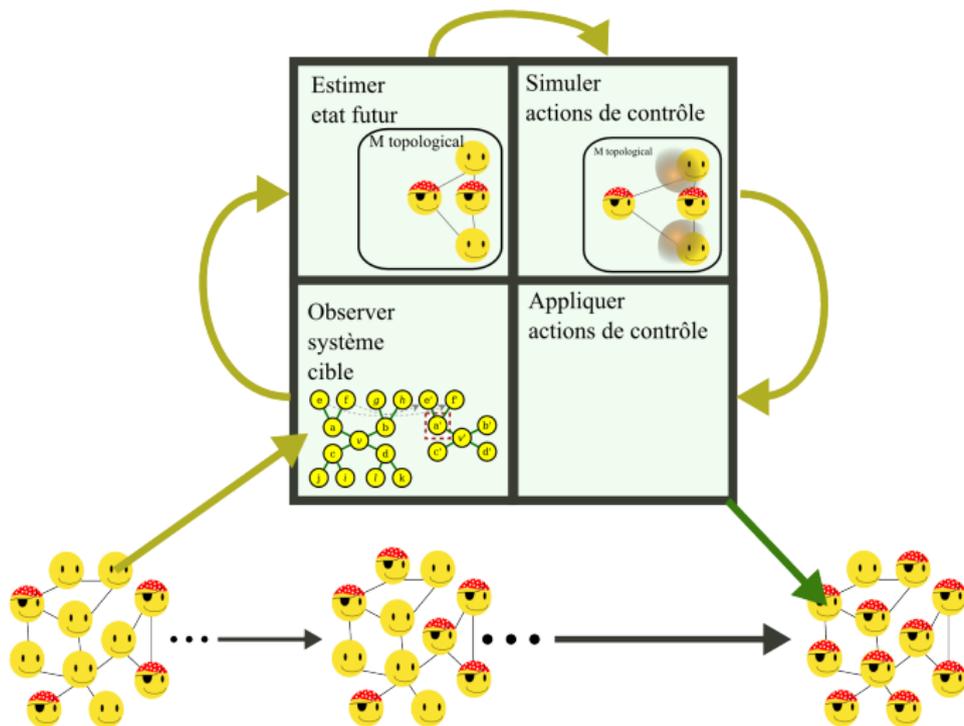
2 agents



Agents à choisir ?

- HITS
- Betweenness
- Aléatoire

Blocs définis - Système cible défini

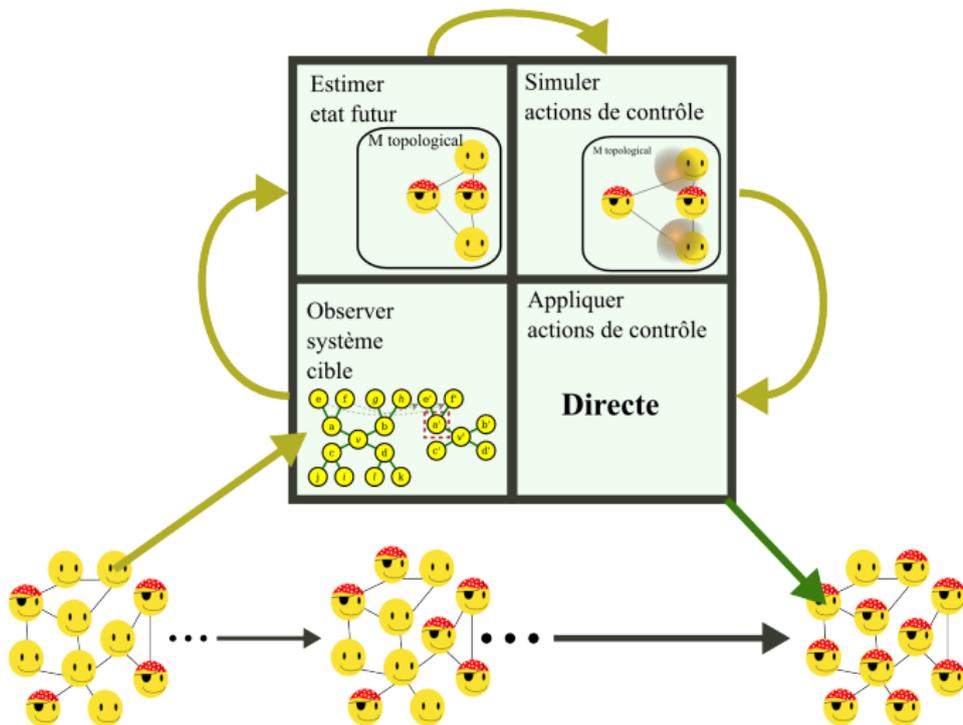


- 1 **Observer le système cible.** Obtenir un sous graphe *aléatoire* G_{est} échantillonnant q pairs, du système cible T . $q = 6$
- 2 **Estimer l'état futur.** Initialiser *un* modèle $M_{topologique}$ avec G_{est} pour estimer l'état futur du niveau de contribution $r_{M_{topologique}}$. Comparer $r_{M_{topologique}}$ avec l'objectif de contrôle D et décider si des actions de contrôle sont nécessaires.
- 3 **Simuler actions de contrôle.** Simuler l'application des actions de contrôle avec le modèle $M_{topologique}$ (précédent).

- 1 **Observer le système cible.** Obtenir un sous graphe *aléatoire* G_{est} échantillonnant q pairs, du système cible T . $q = 6$
- 2 **Estimer l'état futur.** Initialiser *un* modèle $M_{topologique}$ avec G_{est} pour estimer l'état futur du niveau de contribution $r_{M_{topologique}}$. Comparer $r_{M_{topologique}}$ avec l'objectif de contrôle D et décider si des actions de contrôle sont nécessaires.
- 3 **Simuler actions de contrôle.** Simuler l'application des actions de contrôle avec le modèle $M_{topologique}$ (précédent). **1...10 pairs à détourner** 1 modèle = nombre d'agents à détourner. Sélectionner l'action de contrôle qui fait augmenter le plus le niveau de contribution.

- 1 **Observer le système cible.** Obtenir un sous graphe *aléatoire* G_{est} échantillonnant q pairs, du système cible T . $q = 6$
- 2 **Estimer l'état futur.** Initialiser *un* modèle $M_{topologique}$ avec G_{est} pour estimer l'état futur du niveau de contribution $r_{M_{topologique}}$. Comparer $r_{M_{topologique}}$ avec l'objectif de contrôle D et décider si des actions de contrôle sont nécessaires.
- 3 **Simuler actions de contrôle.** Simuler l'application des actions de contrôle avec le modèle $M_{topologique}$ (précédent). **1...10 pairs à détourner** 1 modèle = nombre d'agents à détourner. Sélectionner l'action de contrôle qui fait augmenter le plus le niveau de contribution.
- 4 **Appliquer les actions de contrôle.** *Détourner les pairs correspondants aux agents détournés dans le modèle*

Blocs définis - Système cible défini



	$p = 0$	$p = 0,25$	$x_{final} \geq 0,50$ $p = 0,50$	$p = 0,75$	$p = 1$
N=1000					
nominal	0,1%	46,8%	4,1%	0	0
aléatoire	0,8%	95,5%	68,8%	13%	0
betweenness	0,8%	96,2%	65,3%	0,4%	0
hits	0,9%	91,7%	64,1%	0,4%	0
N=10000					
nominal	0	19,5%	0	0	0
aléatoire	0	57,8%	0	0	0
betweenness	0	57,0%	0	0	0
hits	0	42,9%	0	0	0

Synthèse de la première démarche expérimentale

Synthèse de la première démarche expérimentale

Sur le domaine

Sur le domaine

- Validé que c'est dû au mécanisme de contrôle.

Sur le domaine

- Validé que c'est dû au mécanisme de contrôle.
 - Expériences avec :
Conditions initiales + 10 partageurs

Sur le domaine

- Validé que c'est dû au mécanisme de contrôle.
 - Expériences avec :
Conditions initiales + 10 partageurs
- Nous avons réussi à contrôler **dans certains cas**

Sur le domaine

- Validé que c'est dû au mécanisme de contrôle.
 - Expériences avec :
Conditions initiales + 10 partageurs
- Nous avons réussi à contrôler **dans certains cas**
- Avec actions de contrôle $< 1\%$, observations $< 1\%$ de T

Sur le domaine

- Validé que c'est dû au mécanisme de contrôle.
 - Expériences avec :
Conditions initiales + 10 partageurs
- Nous avons réussi à contrôler **dans certains cas**
- Avec actions de contrôle $< 1\%$, observations $< 1\%$ de T
- Confirme la validité des hypothèses de travail

Sur le domaine

- Validé que c'est dû au mécanisme de contrôle.
 - Expériences avec :
Conditions initiales + 10 partageurs
- Nous avons réussi à contrôler **dans certains cas**
- Avec actions de contrôle $< 1\%$, observations $< 1\%$ de T
- Confirme la validité des hypothèses de travail

Les hypothèses sont assez flexibles

- Première implantation →
Éléments de réponse dans le cas p2p
- Hypothèses simplificatrices
 - Un seul modèle
 - Validité du modèle
 - Initialisation

Sur le domaine

- Validé que c'est dû au mécanisme de contrôle.
 - Expériences avec :
Conditions initiales + 10 partageurs
- Nous avons réussi à contrôler **dans certains cas**
- Avec actions de contrôle < 1%, observations < 1% de T
- Confirme la validité des hypothèses de travail

Les hypothèses sont assez flexibles

- Première implantation →
Éléments de réponse dans le cas p2p
- Hypothèses simplificatrices
 - Un seul modèle
 - Validité du modèle
 - Initialisation
- Expliquent les résultats négatifs ?

Hypothèses de travail et questions ...

...liées à la Modélisation & Simulation

- *Validité* :
 - *replicative* - Modèle reproduit comportement ?
 - *prédictive* - Modèle prédit comportement ?
 - *structurelle* - Modèle explique comportement ?

- *Calibration* : Quelles valeurs pour les paramètres ?

...liées aux hypothèses de Multi-Agent & Gouvernance

- *Mise en correspondance* : Comment associer les agents aux entités du système ?

- *Sélection* : Quel modèle choisir ?

Quels moyens pour améliorer ?

Question	Bloc(s) concernés	Moyen(s) dans architecture
Validité	Estimation état futur & Simulation actions	critère pour comparer observations / estimations
Calibration	Observation & Estimation état futur & Simulation actions	taille échantillon, méthode d'initialisation de modèles
Mise en correspondance	Application d'actions	HITS, Betwenness
Sélection	Simulation d'actions Estimation de l'état futur	plusieurs actions de contrôle estimations de l'état futur plusieurs horizons temporels

Objectif : Identifier l'influence de

- validation
- calibration
- mise en correspondance
- Sélection

Objectif : Identifier l'influence de

- **validation**
- **calibration**
- **mise en correspondance**
- Sélection

Validité & Calibration & Mise en Correspondance - Dispositif Expérimental

Démarche expérimentale

Evolution du système cible + Architecture = Évolution
prédite du système cible

Validité

- Observation du système cible
 - Différentes tailles d'échantillon ($q = \{1,10,20,100\}$)

Validité et Calibration

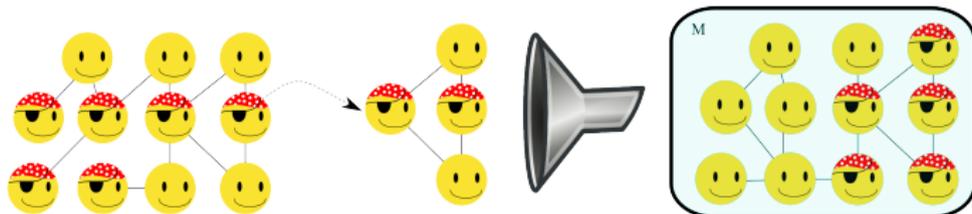
- Observation du système cible
 - Différentes tailles d'échantillon ($q = \{1,10,20,100\}$)
- Méthodes d'initialisation
 - Directe
 - Indirecte

Utiliser les observations pour initialiser les modèles

- Prendre échantillon
- Traitement statistique de l'échantillon
- Générer un modèle à la taille du système cible

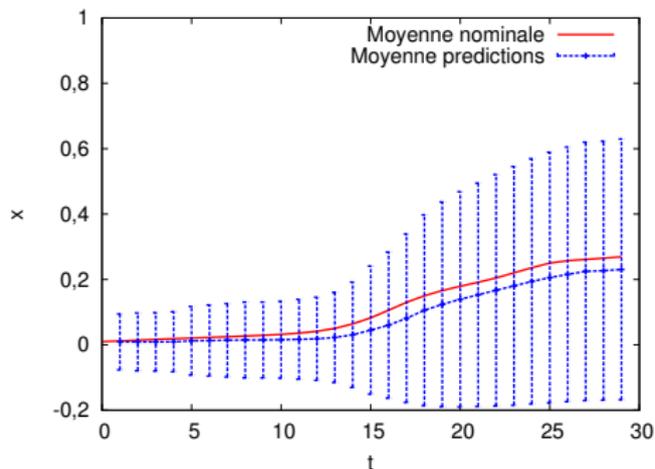
Utiliser les observations pour initialiser les modèles

- Prendre échantillon
- Traitement statistique de l'échantillon
- Générer un modèle à la taille du système cible

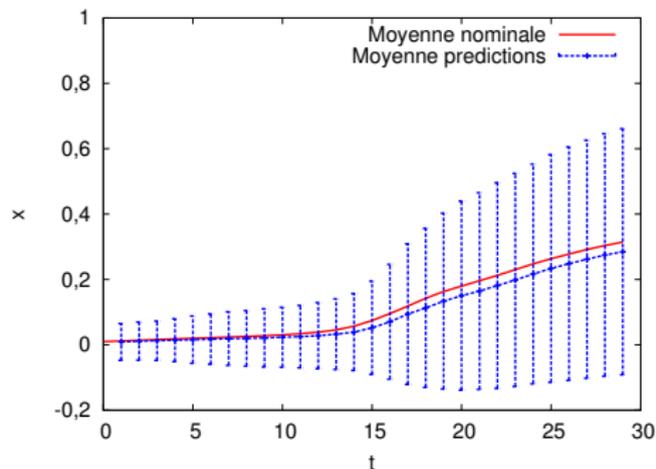


Résultats Système cible A

$$q = 1$$



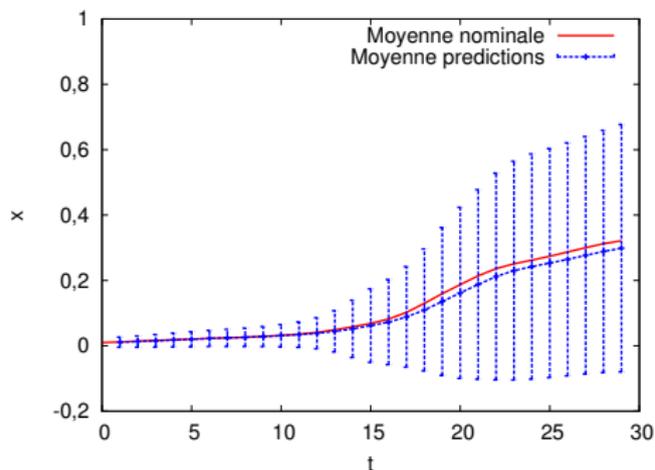
directe



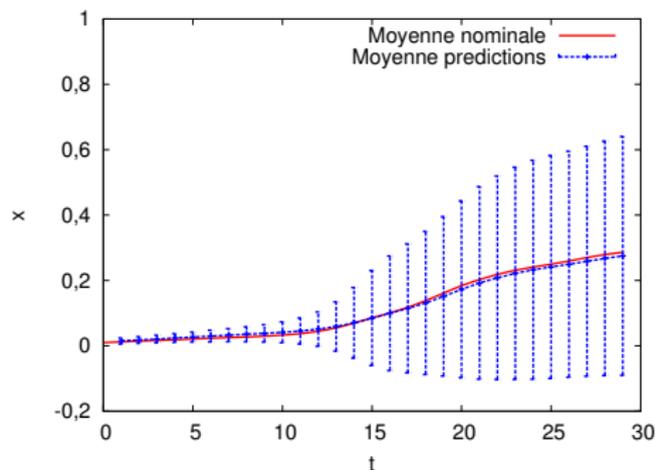
indirecte

Résultats Système cible A

$$q = 100$$



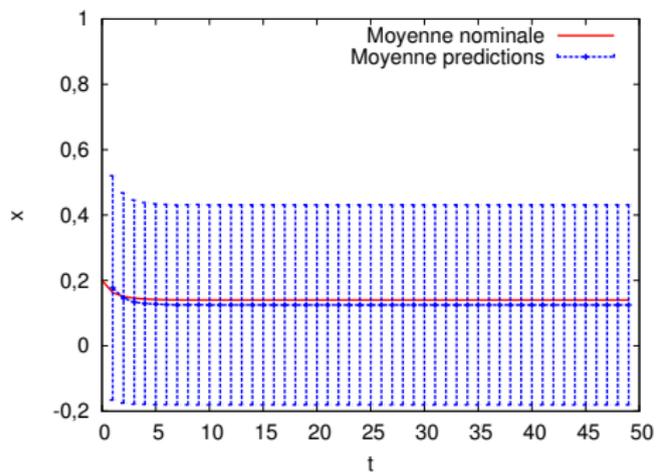
directe



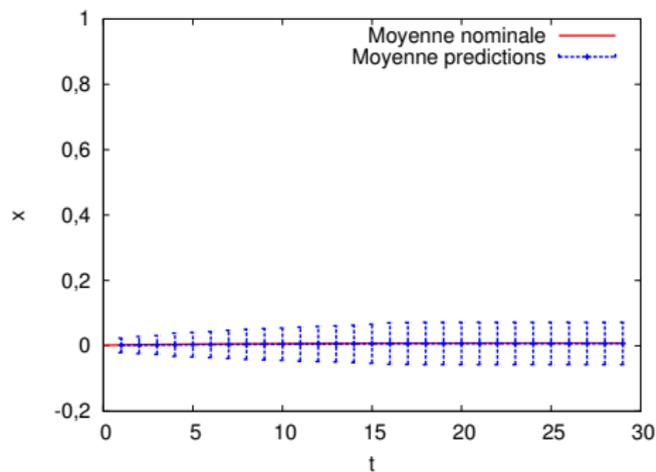
indirecte

Résultats Système cible B

$$q = 1$$



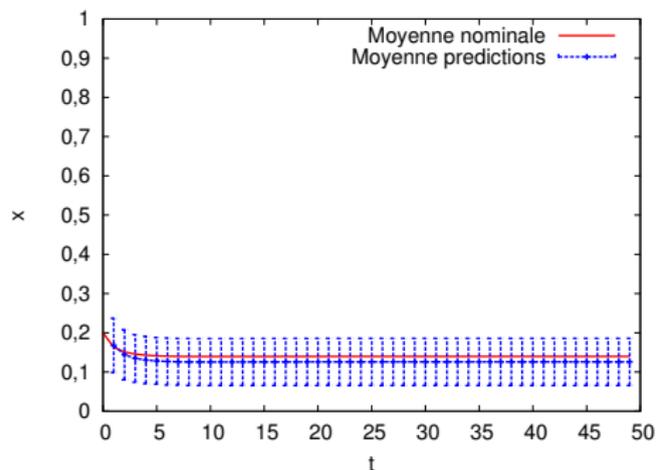
directe



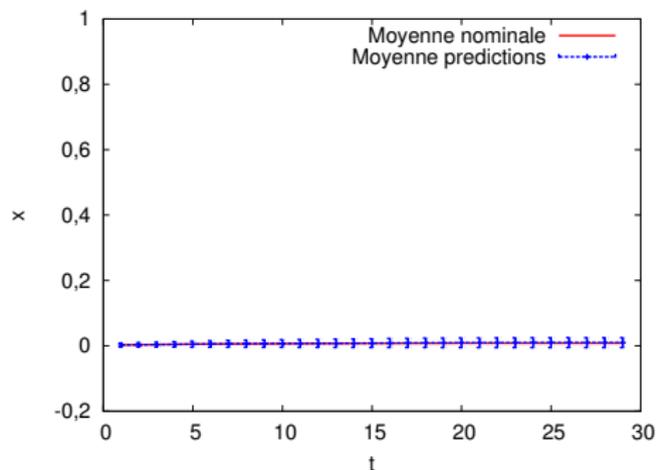
indirecte

Résultats Système cible B

$$q = 100$$



directe



indirecte

Par rapport au domaine

- Validité : Erreur proportionnelle mais bonne dynamiques correctes
- Calibration : Pas de différence importante entre méthodes avec grande taille d'échantillon
- Mise en correspondance dans initialisation indirecte
 - Caractéristiques locales (importance, degré, position)
 - Approche hybride (grandeurs globales + caractéristiques locales)

Choix dans l'architecture

- Définir critère pour comparer prédictions (local, global)
- Multi-agent modèles off-line pour déterminer le seuil d'observation

Objectif : Identifier l'influence de

- validation
- calibration
- mise en correspondance
- **Sélection**

Objectif : Identifier l'influence de

- validation
- calibration
- mise en correspondance
- **Sélection**

Parameter	Systeme cible A
N	1000
θ	$U(0, \theta_{max})$
d	1
G	W&S (p, k, N)
Conditions Initiales	
θ_{max}	10
G	$p = 0.25, k = 10, N = 1000$
x_{init}	0.01

Démarche expérimentale

Systeme cible avec majorité de profiteurs + Architecture de contrôle → Systeme cible avec majorité de partageurs

Observation

- différentes tailles d'échantillon q

Estimation de l'état futur

- Initialisation directe 10 Modèles $M_{topologique}$
- Critère : delta de prédiction précédente vs. observation actuelle

Simulation d'actions de contrôle

- Modèle : sélectionné dans bloc antérieur
- Critère : action de contrôle avec l'augmentation de X plus importante

$$x_{final} \geq 0.50$$

t_a	max. peers to trick	q				
		1	5	20	50	100
1	10	99%	95%	94%	89%	64%
15	10	85%	86%	84%	75%	100%
15	30	N.A.	100%	100%	100%	97%

Par rapport au domaine

- Approche expérimentale → éléments de réponse

Par rapport au domaine

- Approche expérimentale → éléments de réponse

Choix dans l'architecture

- Trade-off : amélioration des prédictions vs. mise en correspondance
- Plusieurs modèles → critère pour départager
- Construction incrémentale

- 1 Contexte
 - Hypothèses de travail
 - Outils conceptuels
- 2 Proposition : Une architecture de contrôle basée sur la simulation multi-agents
 - Vue générale
 - Détails
 - Synthèse
- 3 Évaluation expérimentale
 - Preuve de concept
 - Statut des modèles dans l'architecture
- 4 Conclusions

Conclusions

- Question générale abordée : Contrôle de systèmes complexes préexistants

- Question générale abordée : Contrôle de systèmes complexes préexistants
 - Nous avons proposé une architecture de contrôle de systèmes complexes exogène, avec une approche equation-free avec des simulations multi-agents.

- Question générale abordée : Contrôle de systèmes complexes préexistants
 - Nous avons proposé une architecture de contrôle de systèmes complexes exogène, avec une approche equation-free avec des simulations multi-agents.
- Question particulière abordé : Influence des hypothèses de travail dans le contexte de la gouvernance

- Question générale abordée : Contrôle de systèmes complexes préexistants
 - Nous avons proposé une architecture de contrôle de systèmes complexes exogène, avec une approche equation-free avec des simulations multi-agents.
- Question particulière abordé : Influence des hypothèses de travail dans le contexte de la gouvernance
 - La conception modulaire de l'architecture permet d'explicitier et implémenter des réponses pour les questions de validité, calibration, mise en correspondance et sélection des modèles

Court et moyen termes

- Application dans d'autres domaines applicatifs

Long terme

Court et moyen termes

- Application dans d'autres domaines applicatifs
- Explorer l'utilisation de contrôleur « PID » dans l'architecture

Long terme

Court et moyen termes

- Application dans d'autres domaines applicatifs
- Explorer l'utilisation de contrôleur « PID » dans l'architecture
- Étudier différentes possibilités de faire évoluer les modèles au sein de l'architecture.

Long terme

Court et moyen termes

- Application dans d'autres domaines applicatifs
- Explorer l'utilisation de contrôleur « PID » dans l'architecture
- Étudier différentes possibilités de faire évoluer les modèles au sein de l'architecture.

Long terme

- Approche systématique de l'application de notre architecture sur un système cible donné.

Court et moyen termes

- Application dans d'autres domaines applicatifs
- Explorer l'utilisation de contrôleur « PID » dans l'architecture
- Étudier différentes possibilités de faire évoluer les modèles au sein de l'architecture.

Long terme

- Approche systématique de l'application de notre architecture sur un système cible donné.
- Utiliser plusieurs instances et les faire coopérer.

Merci de votre attention.



Chavalarias, D., Bourguine, P., Perrier, E., Amblard, F., Arlabosse, F., Auger, P., Baillon, J.-B., Barreteau, O., Baudot, P., Bouchaud, E., Ben Amor, S., Berry, H., Bertelle, C., Berthod, M., Beslon, G., Biroli, G., Bonamy, D., Bourcier, D., Brodu, N., Bui, M., Burnod, Y., Chapron, B., Christophe, C., Clément, B., Coatrieux, J.-L., Cointet, J.-P., Dagrain, V., Dauchot, K., Dauchot, O., Daviaud, F., De Monte, S., Deffuant, G., Degond, P., Delahaye, J.-P., Doursat, R., D'Ovidio, F., Dubois, A. M., Dubruelle, B., Dutreix, M., Faivre, R., Farge, E., Flandrin, P., Franceschelli, S., Gaucherel, C., Gaudin, J.-P., Ghil, M., Giavitto, J.-L., Ginelli, F., Ginot, V., Houllier, F., Hubert, B., Jensen, P., Jullien, L., Kapoula, Z., Krob, D., Ladieu, F., Lang, G., Lavelle, C., Le Bivic, A., Leca, J.-P., Lecerf, C., Legrain, P., L'Hôte, D., Loireau, M., Mangin, J.-F., Monga, O., Morvan, M., Muller, J.-P., Negrutiu, I., Peyreiras, N., Pumain, D., Radulescu, O., Sallantin, J., Sanchis, E., Schertzer, D., Schoenauer, M., Sebag, M., Simonet, E., Six, A., Tarissan, F., and Vincent, P. (2009).

French Roadmap for complex Systems 2008-2009.

<http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00392486>

-  Feldman, M., Papadimitriou, C. H., Chuang, J., and Stoica, I. (2006). Free-riding and whitewashing in peer-to-peer systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 24(5) :1010–1019.
-  Krishnan, R., Smith, M., Tang, Z., and Telang, R. (2004). The impact of free-riding on peer-to-peer networks. In *System Sciences, 2004. Proceedings of the 37th Annual Hawaii International Conference on*, page 10.
-  Navarrete Gutiérrez, T., Siebert, J., Ciarletta, L., and Chevrier, V. (2011). Impact des dimensions spatiale et temporelle dans la modélisation d'un phénomène collectif de type « free-riding ». *Revue d'Intelligence Artificielle, Editions Hermès*, 25(5) :625–651.
-  Samaey, Y. K. G. (2010). Equation-free modeling. *Scholarpedia*, 5(9) :4847.
-  Watts, D. and Strogatz, S. (1998).

Collective Dynamics of 'small-world' networks.

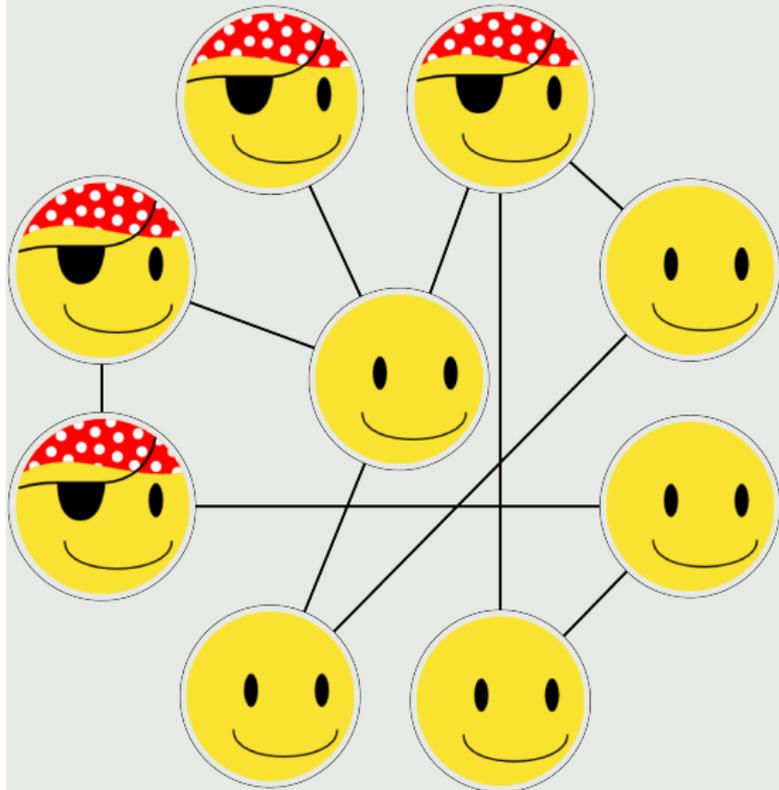
Nature, 393 :440–442.

 Zeigler, B., Praehofer, H., and Kim, T. (2000).

Theory of modeling and simulation : Integrating discrete event and continuous complex dynamic systems.

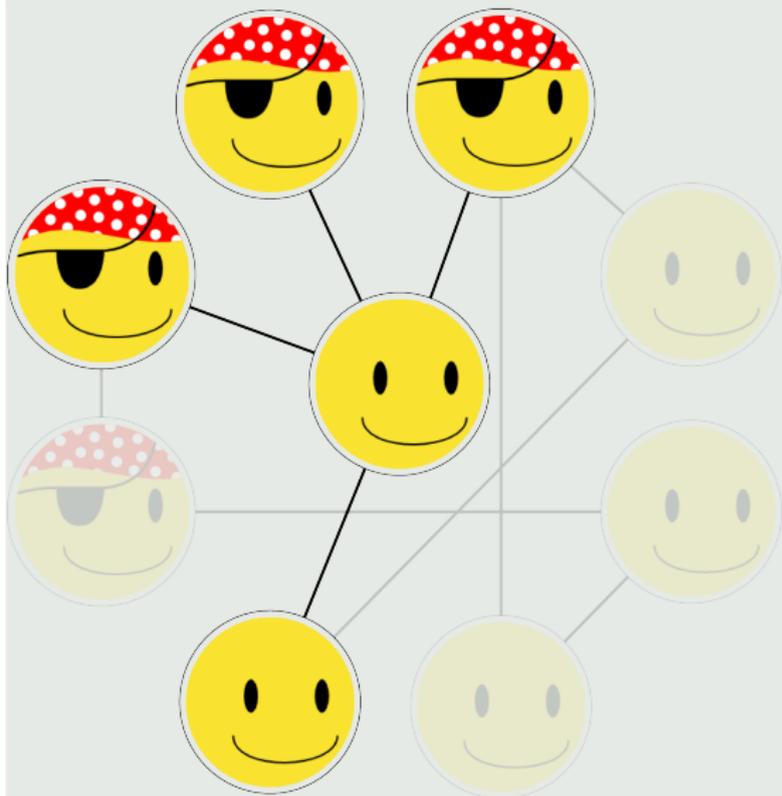
Academic Press.

Exemple avec les voisins les plus proches $d = 1$



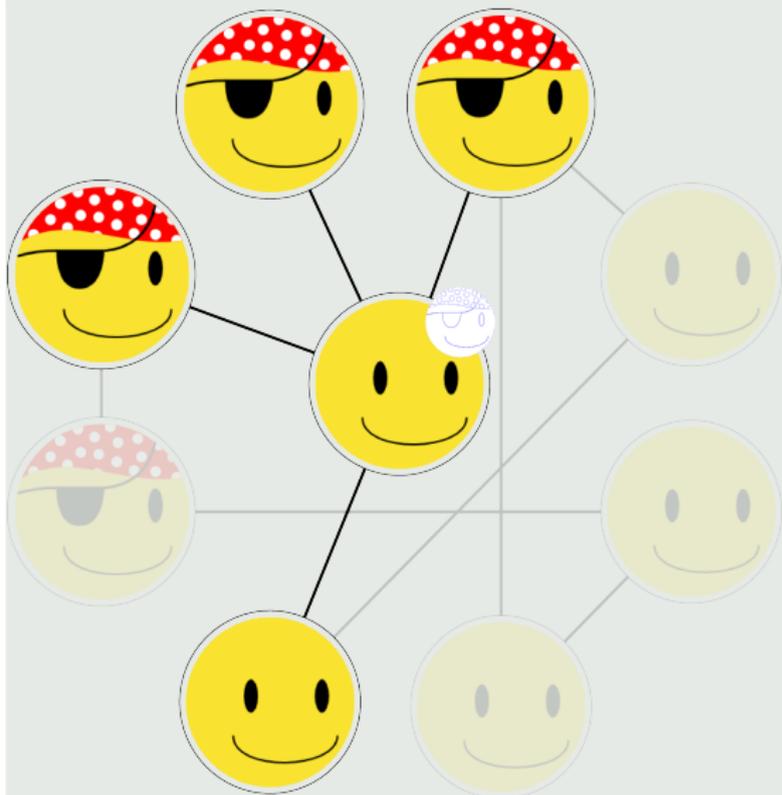
- $N = 9$
- $x_{init} = \frac{5}{9}$

Exemple avec les voisins les plus proches $d = 1$



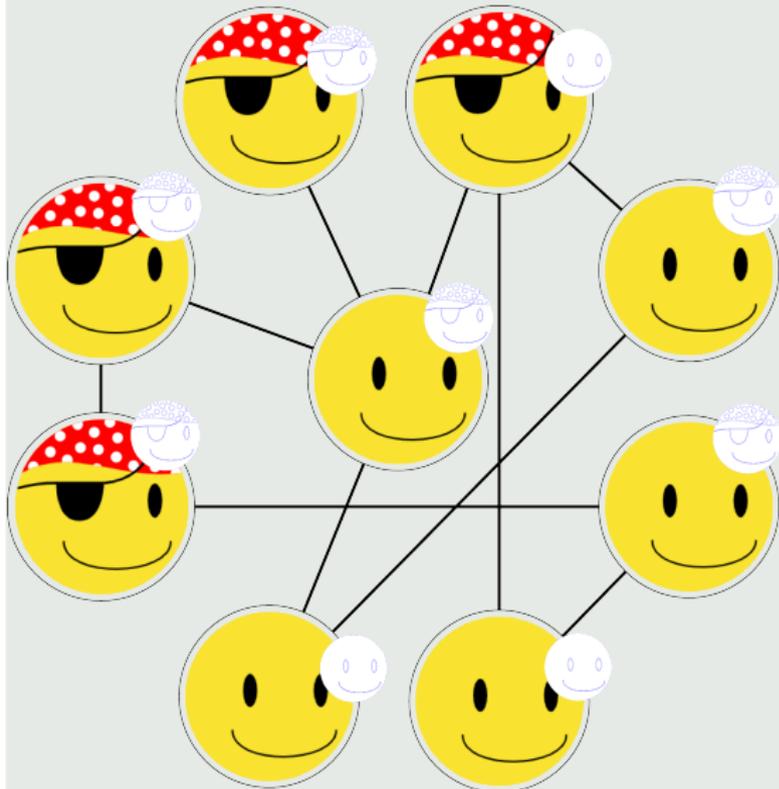
- $N = 9$
- $x_{init} = \frac{5}{9}$
- Pour l'agent au milieu (a_0) :
 - $\theta_0 = 3$
 - $x = \frac{1}{4}$
 - coût $\leftarrow 4$
 - $\theta_0 \leq$ coût

Exemple avec les voisins les plus proches $d = 1$



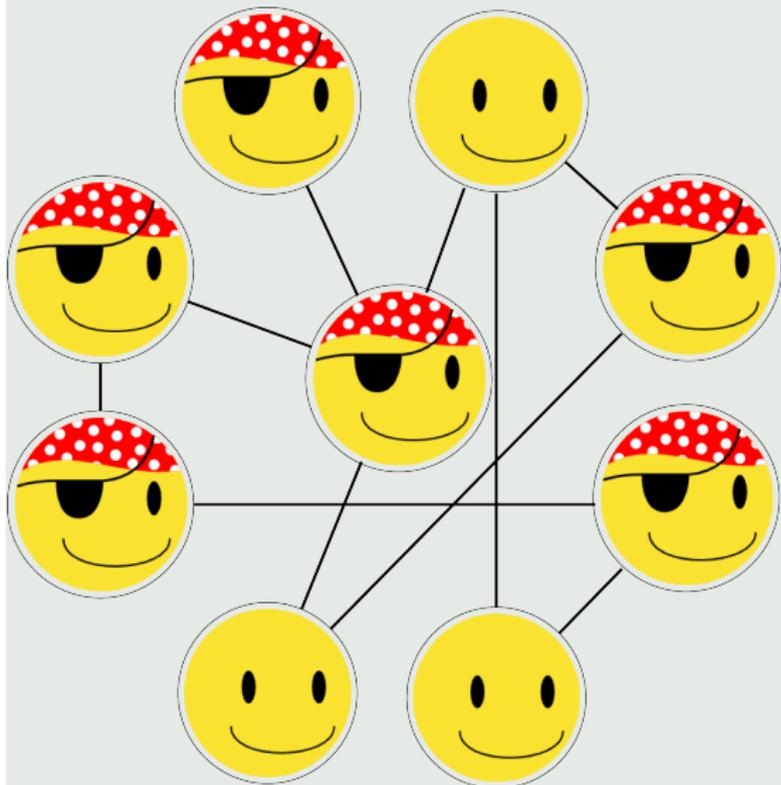
- $N = 9$
- $x_{init} = \frac{5}{9}$
- Pour l'agent au milieu (a_0) :
 - $\theta_0 = 3$
 - $x = \frac{1}{4}$
 - coût $\leftarrow 4$
 - $\theta_0 \leq \text{coût}$
 - $\text{partage}_0 \leftarrow \text{Faux}$

Exemple avec les voisins les plus proches $d = 1$



- $N = 9$
- $x_{init} = \frac{5}{9}$
- Pour l'agent au milieu (a_0) :
 - $\theta_0 = 3$
 - $x = \frac{1}{4}$
 - coût $\leftarrow 4$
 - $\theta_0 \leq \text{coût}$
 - $partage_0 \leftarrow \text{Faux}$
- ... ainsi de suite

Exemple avec les voisins les plus proches $d = 1$



- $N = 9$
- $x_{init} = \frac{5}{9}$
- Pour l'agent au milieu (a_0) :
 - $\theta_0 = 3$
 - $x = \frac{1}{4}$
 - coût $\leftarrow 4$
 - $\theta_0 \leq \text{coût}$
 - $partage_0 \leftarrow \text{Faux}$
- ... ainsi de suite
- $x_{final} = \frac{3}{9}$