



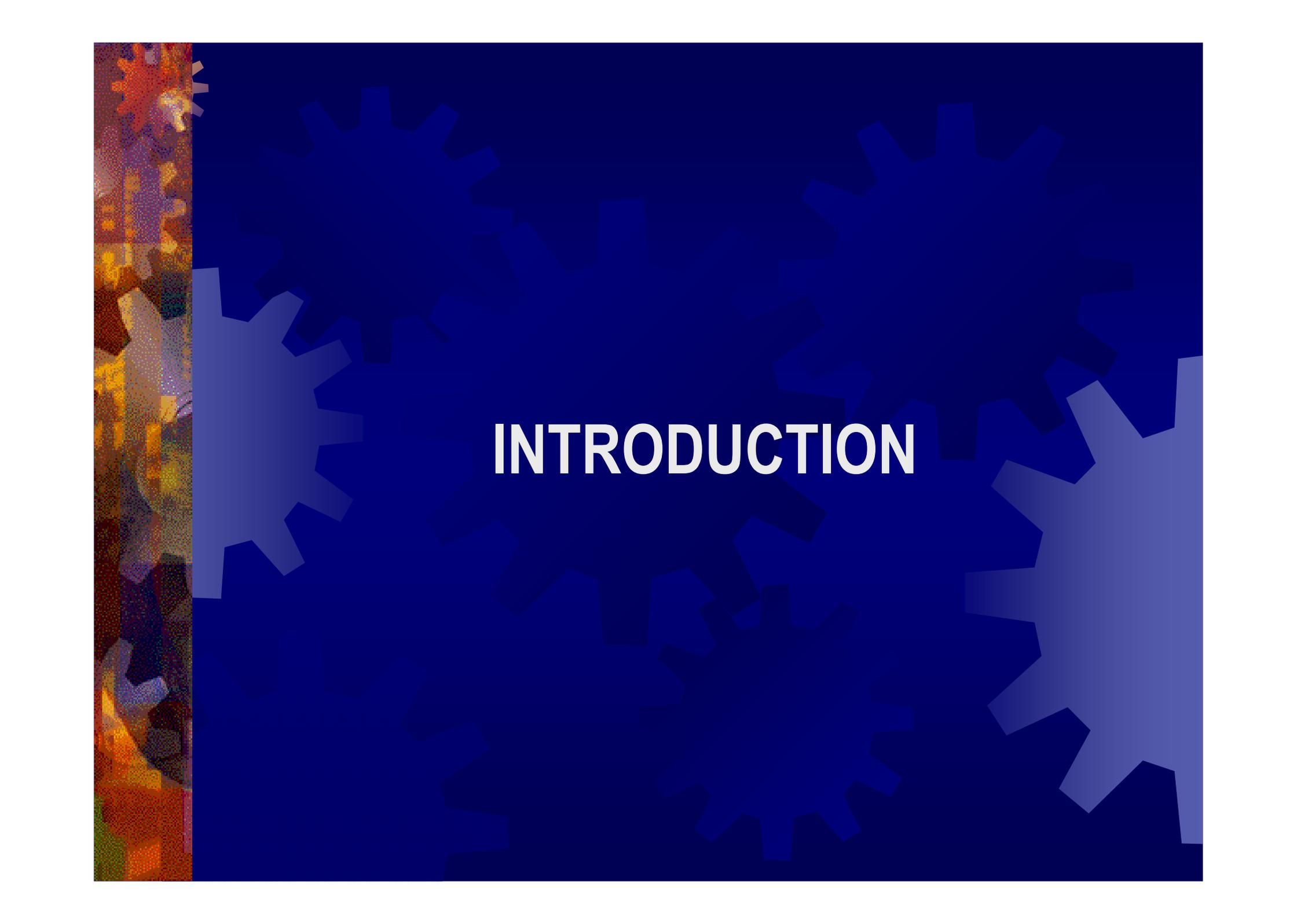
MODELISATION DE LA RESILIENCE : NECESSITE D'UNE APPROCHE COMPUTATIONNELLE

Odilon Yapo M, ACHIEPO

*Ingénieur Statisticien-Economiste
Doctorant en Informatique
Consultant Expert, Data Scientist*

Programme :

- **Introduction**
- **Le Graphe de Résilience**
- **L'Approche PLS**
- **Les Réseaux Bayésiens**
- **Les Systèmes Multi-Agents**
- **Conclusion**



INTRODUCTION



Caractéristiques de la résilience

- **Définition** : « aptitude de groupes ou de communautés à faire face à des contraintes ou à des perturbations extérieures dues à un changement social, politique ou environnemental » (Adger 2000)
- **Caractéristiques** : pas de déterminisme, imprévisibilité, nombreuses interaction



Caractérisation de la Résilience

- **Complexités Vs Complication (Jean-Louis Le Moigne) :** « *Un système compliqué, on peut le simplifier pour découvrir son intelligibilité. Un système complexe, on doit le modéliser pour construire son intelligibilité.* »
- Le phénomène de résilience est complexes mais non pas compliqués.

Qu'est-ce qu'un modèle ?

- **Minski (1965)** : *Un modèle A^* de A doit permettre à un observateur de répondre à des questions qui l'intéresse sur A*
- **Coquillard et Hill (1997)** : « *Un modèle doit reproduire le comportement du système réel, et ce, en fonction des objectifs fixés pour le cadre de l'étude* »

Approches de Modélisation

➤ Modélisation Mathématiques :

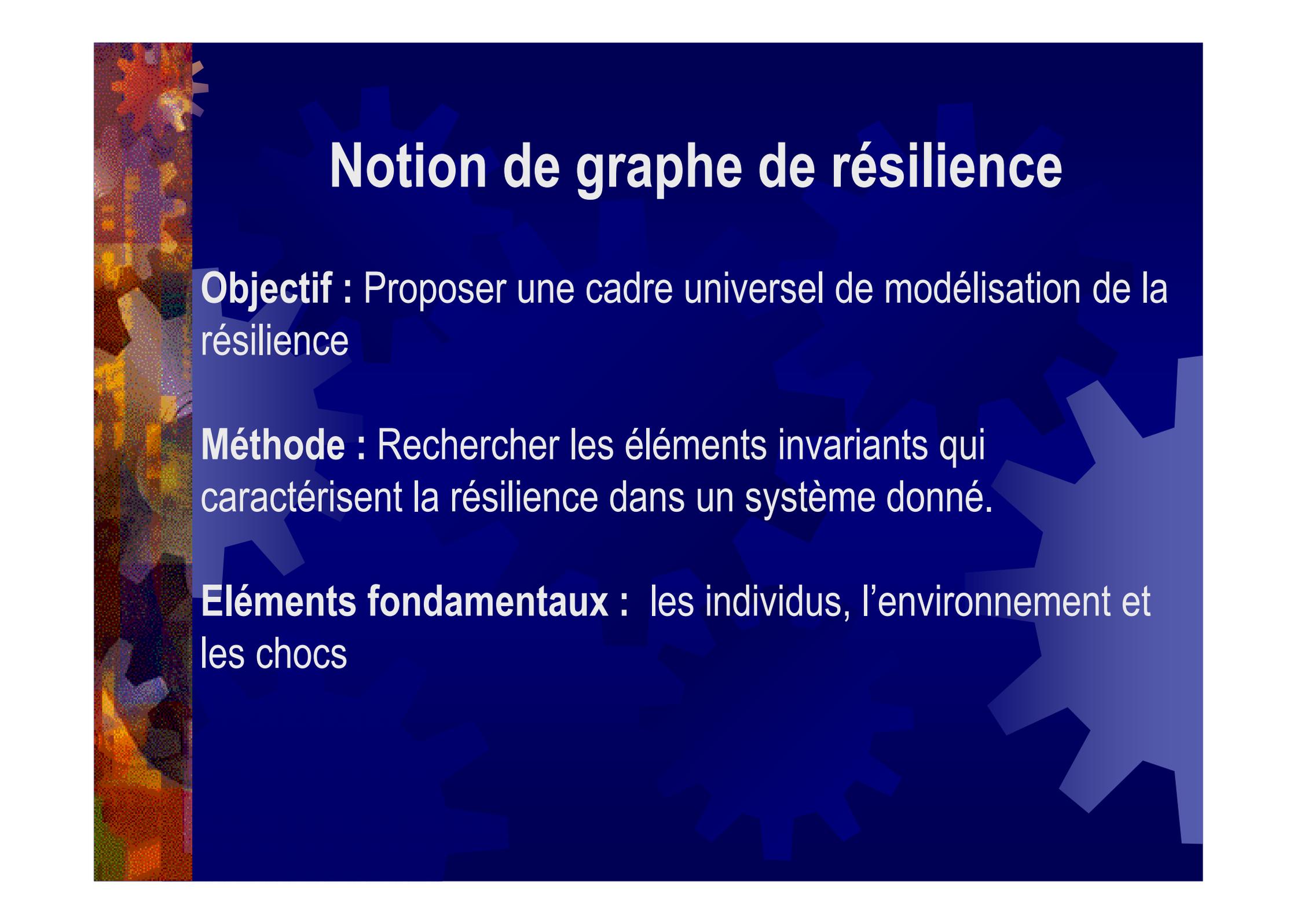
- ✓ Privilégie le formalisme mathématique
- ✓ Solutions calculables mathématiquement (formules)
- ✓ Adapté aux systèmes moins complexes (relativement)

➤ Modélisation Computationnelle :

- ✓ Privilégie la simulation informatique
- ✓ Solutions non calculables ou difficilement calculable mathématiquement
- ✓ Adapté aux systèmes complexes

The background is a dark blue field filled with various shades of blue gears of different sizes, some overlapping. On the left side, there is a vertical strip with a colorful, pixelated texture, featuring gears in shades of orange, yellow, and brown.

LE GRAPHE DE RESILIENCE



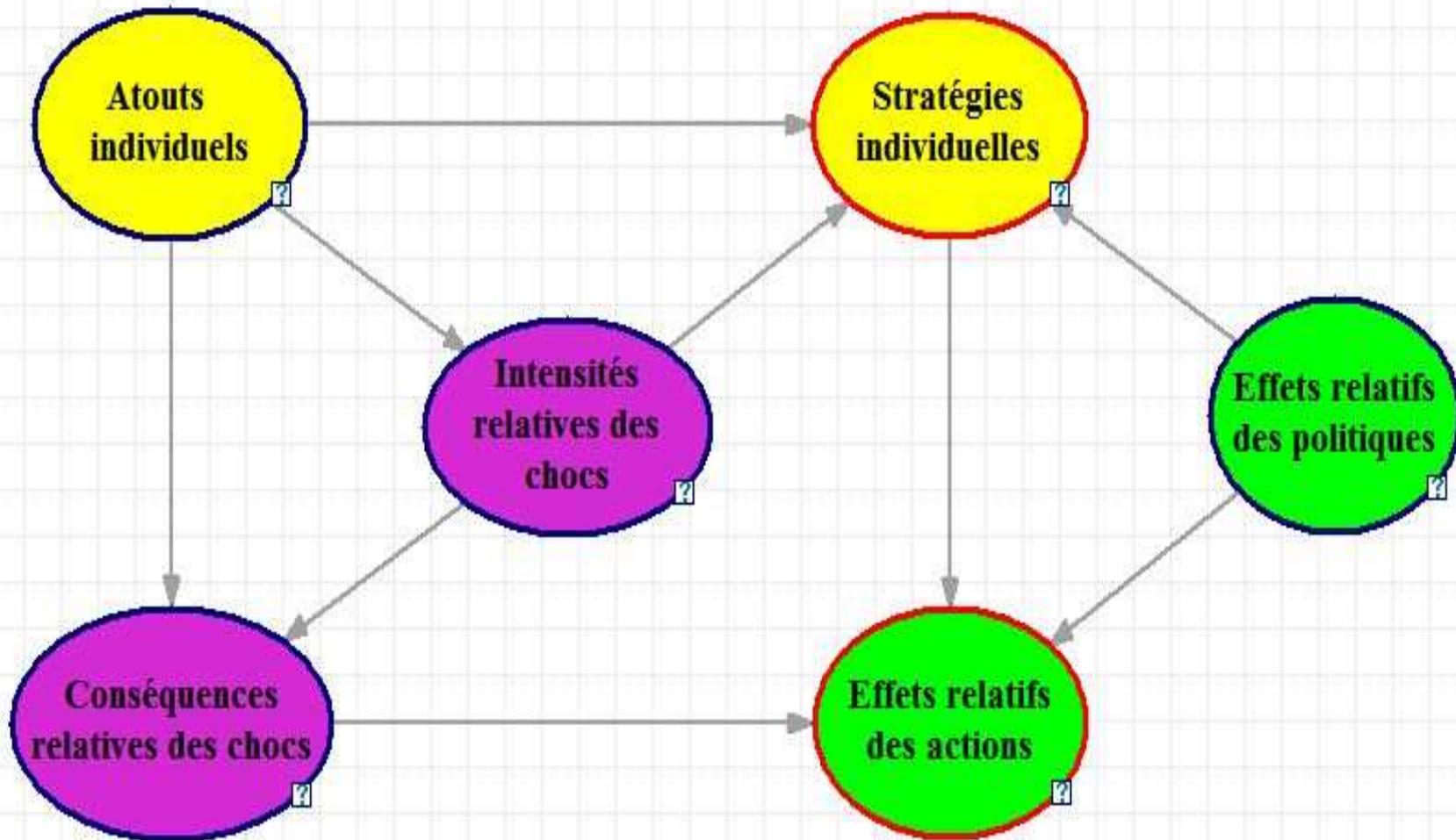
Notion de graphe de résilience

Objectif : Proposer un cadre universel de modélisation de la résilience

Méthode : Rechercher les éléments invariants qui caractérisent la résilience dans un système donné.

Éléments fondamentaux : les individus, l'environnement et les chocs

Structure du graphe de résilience





Modélisation Computationnelle à partir du Graphe de Résilience

➤ Approches Adaptées :

- ✓ Approche PLS (PLS Path Modelling)
- ✓ Réseaux Bayésiens (Systèmes Experts Probabilistes)
- ✓ Systèmes Multi-Agents

The background is a dark blue field filled with various shades of blue gears of different sizes, some overlapping. On the left side, there is a vertical strip of a colorful, pixelated image showing a cluster of gears in shades of orange, yellow, and brown.

L'APPROCHE PLS

Approche PLS

➤ **Avantage :**

- ✓ Paradigme graphique (modèle graphique)
- ✓ Basées sur des variables manifestes
- ✓ Estimation de variables latentes
- ✓ Connaissances experts et données

➤ **Inconvénients :**

- ✓ Convergence constatée mais non prouvée
- ✓ Plus orienté prévision de comportement

Approche PLS

➤ 2 Sous-modèles :

- ✓ Le modèle externe (relations entre chaque VL et ses VM)
- ✓ Le modèle interne ou structurel (relations entre les VL)

➤ Types de Relation :

- ✓ Relations de type linéaire (modèle interne comme structurel)

Spécification du modèle PLSPM

Spécification du modèle

Notons :

- ✓ A , les atouts et caractéristiques intrinsèques à un individu
- ✓ S , les stratégies personnelles de l'individu face à un choc
- ✓ C , les conséquences du choc sur l'individu
- ✓ I , l'intensité relative du choc sur l'individu
- ✓ P , les effets relatifs, sur l'individu, des différentes politiques avant le choc
- ✓ E , les effets relatifs, sur l'individu, des actions entreprises face au choc

Chacun de ces paramètres est une variable latente de résilience. Pour se faire, notons :

- ✓ $\Omega = \{A, S, C, I, P, E\}$, l'ensemble des variables latentes de résilience
- ✓ $X \in \Omega$ et $Y \in \Omega$, deux variables latentes quelconques de résilience
- ✓ N_X , le nombre de variables manifestes de la variable latente de résilience X
- ✓ X_j , la $j^{\text{ème}}$ variable manifeste de la variable latente X , $j \in [1, N_X]$

Le modèle PLSPM comporte deux types d'équations :

- Modèle externe : $X_j = \pi_j^X X + \varepsilon_j^X$ [6 équations]
- Modèle interne (structurel) : $Y = \sum_{X \in \Omega} \beta_Y^X X + \mu_Y$ où β_Y^X [4 équations]

Algorithme PLSPM

Algorithme d'estimation du PLSPM

Le modèle PLSPM comporte un jeu de relations complexes. Il s'agit d'une part des relations liant les variables manifestes aux variables latentes qu'elles permettent d'appréhender, et d'autre part des relations qu'entretiennent les différentes variables latentes. Le principe de l'algorithme PLSPM (Wolf 1982) est le suivant :

- 1) Fixer les poids initiaux du modèle externe :
$$\omega_0^x = (\omega_1^x, \dots, \omega_{N_x}^x)_{t=0}, \quad \forall X \in \Omega$$
- 2) Estimer les variables latentes en se basant sur le modèle externe, chaque variable latente étant estimée en utilisant les variables manifestes de son bloc :

$$\tilde{X} = \sum_{j=1}^{N_x} \omega_j^x X_j .$$

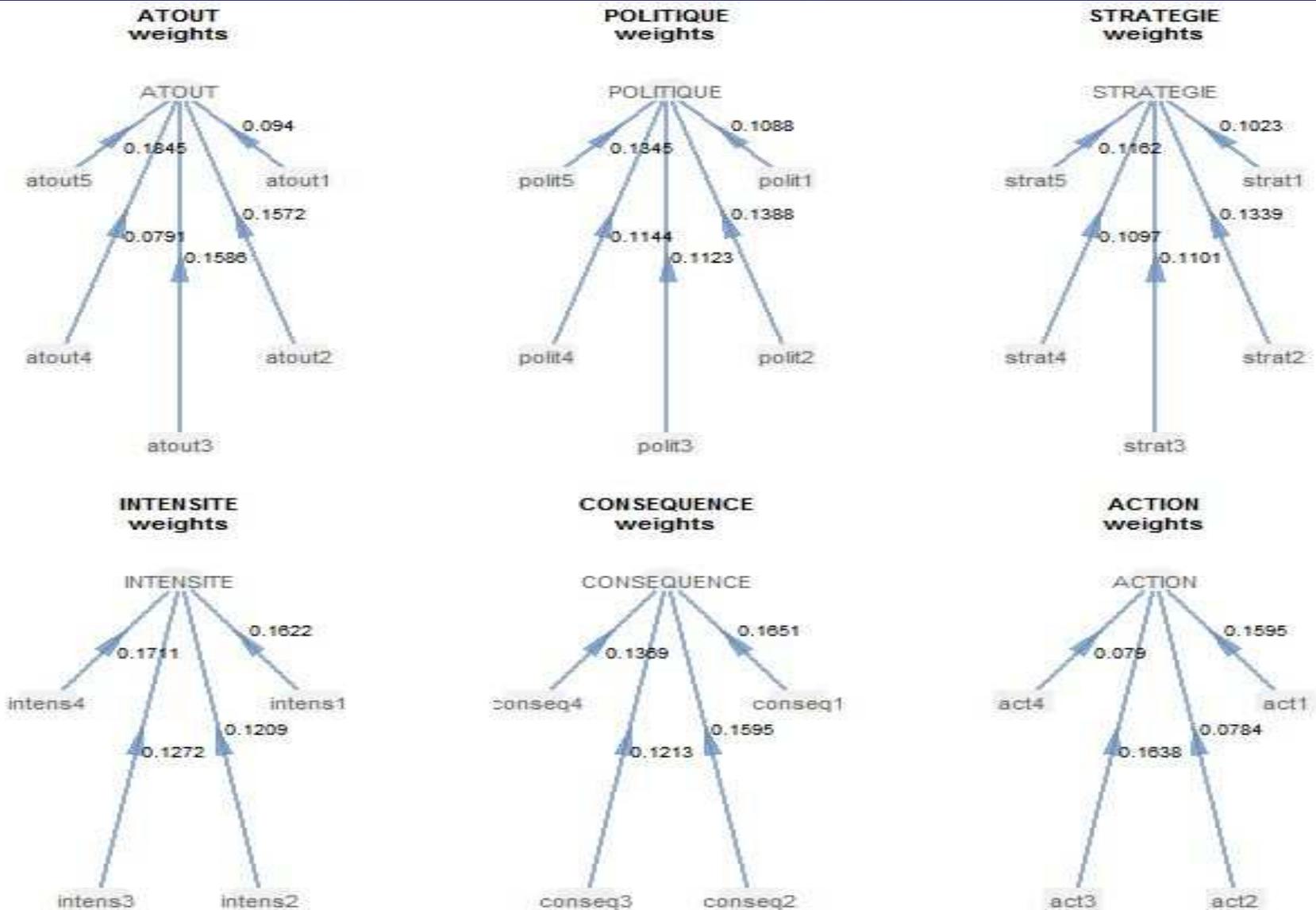
- 3) Estimer les variables latentes en se basant sur le modèle interne, chaque variable latente étant estimée en utilisant uniquement les autres variables latentes qui lui sont liées :

$$\hat{Y} = \sum_{x \rightarrow Y} e_x^Y \tilde{X}$$

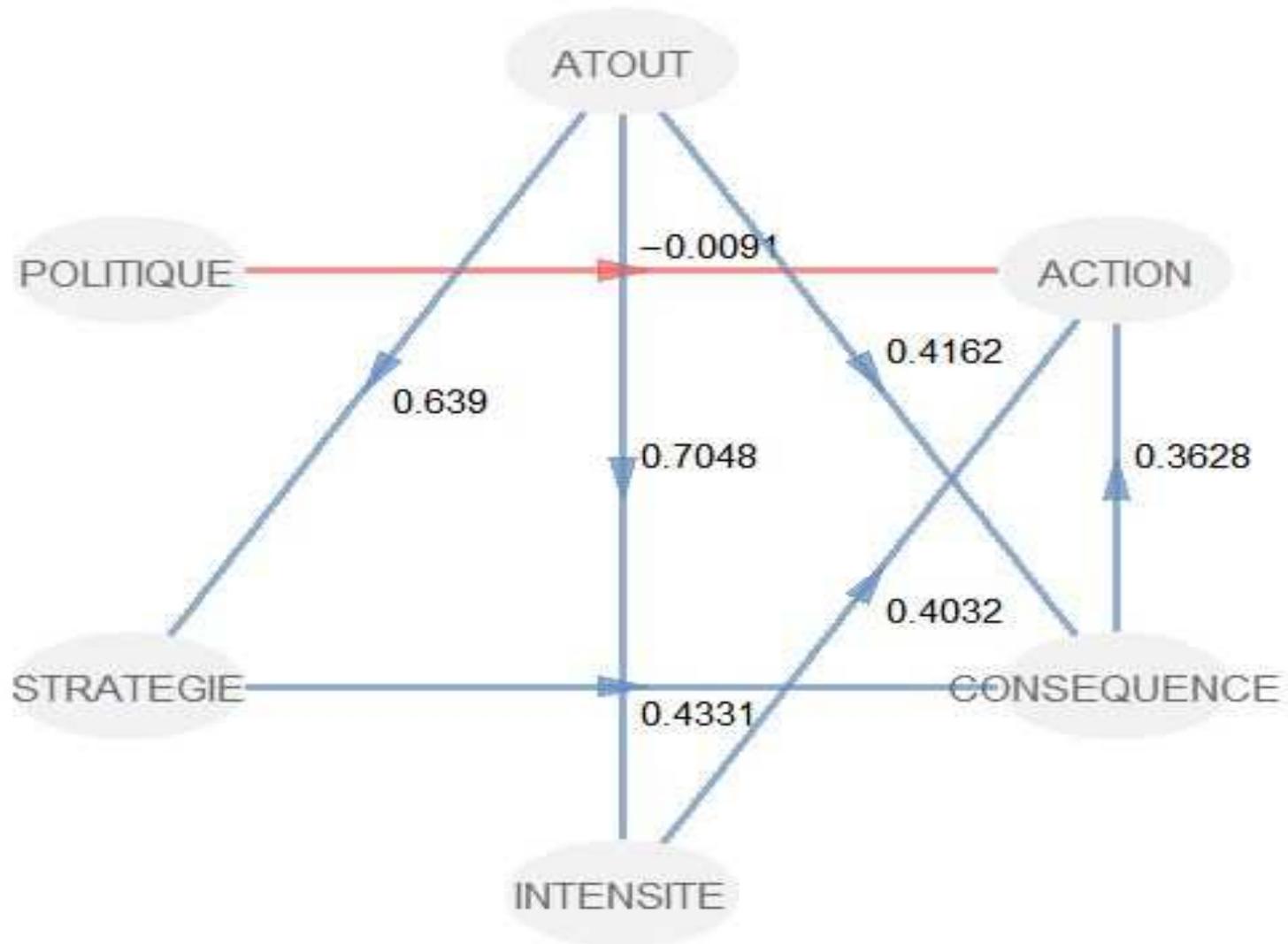
- 4) Répéter les étapes 2) et 3) jusqu'à convergence

En théorie, la convergence de l'algorithme est prouvée dans le cas de deux variables latentes, mais au-delà, cette convergence n'est pas prouvée mathématiquement. Toutefois, Cette convergence est constatée dans les applications réelles.

Exemple de Modèle Externe



Exemple de Modèle Structurel





Apport de l'Approche PLS dans l'Etude de la Résilience

- Vision globale et synthétique des relations complexes entrant dans la résiliences
- Estimation acceptable des variables latentes (concepts inobservables) entrant dans l'étude de la résilience
- Identifier des relations structurelles non pertinentes (révision des connaissances expertes sur la résilience)

The background is a dark blue field filled with various shades of blue gears of different sizes and orientations. On the left side, there is a vertical strip of colorful, pixelated gears in shades of orange, yellow, and brown. The text "LES RESEAUX BAYESIENS" is centered in the middle of the image in a bold, white, sans-serif font.

LES RESEAUX BAYESIENS

Réseaux Bayésiens

➤ **Avantage :**

- ✓ Paradigme graphique (modèle graphique)
- ✓ Raisonnement automatique
- ✓ Connaissances experts et/ou données
- ✓ Inférence causale (possible)

➤ **Inconvénients :**

- ✓ Raisonnement probabiliste
- ✓ Centré individu (apprentissage paramètre)
- ✓ Apprentissage structure difficile

Réseaux Bayésiens

➤ 2 Etapes :

- ✓ Spécification du graphe de dépendances
- ✓ Spécification (experte) ou apprentissage (à partir des données) des lois de probabilité (tables de probabilités)

➤ Approche :

- ✓ Spécification du modèle à l'aide d'outils logiciels interactif (GeNIes, etc.) ou par programmation (R, packages Deal, etc.)

Estimation des Réseaux Bayésiens

Estimation des paramètres

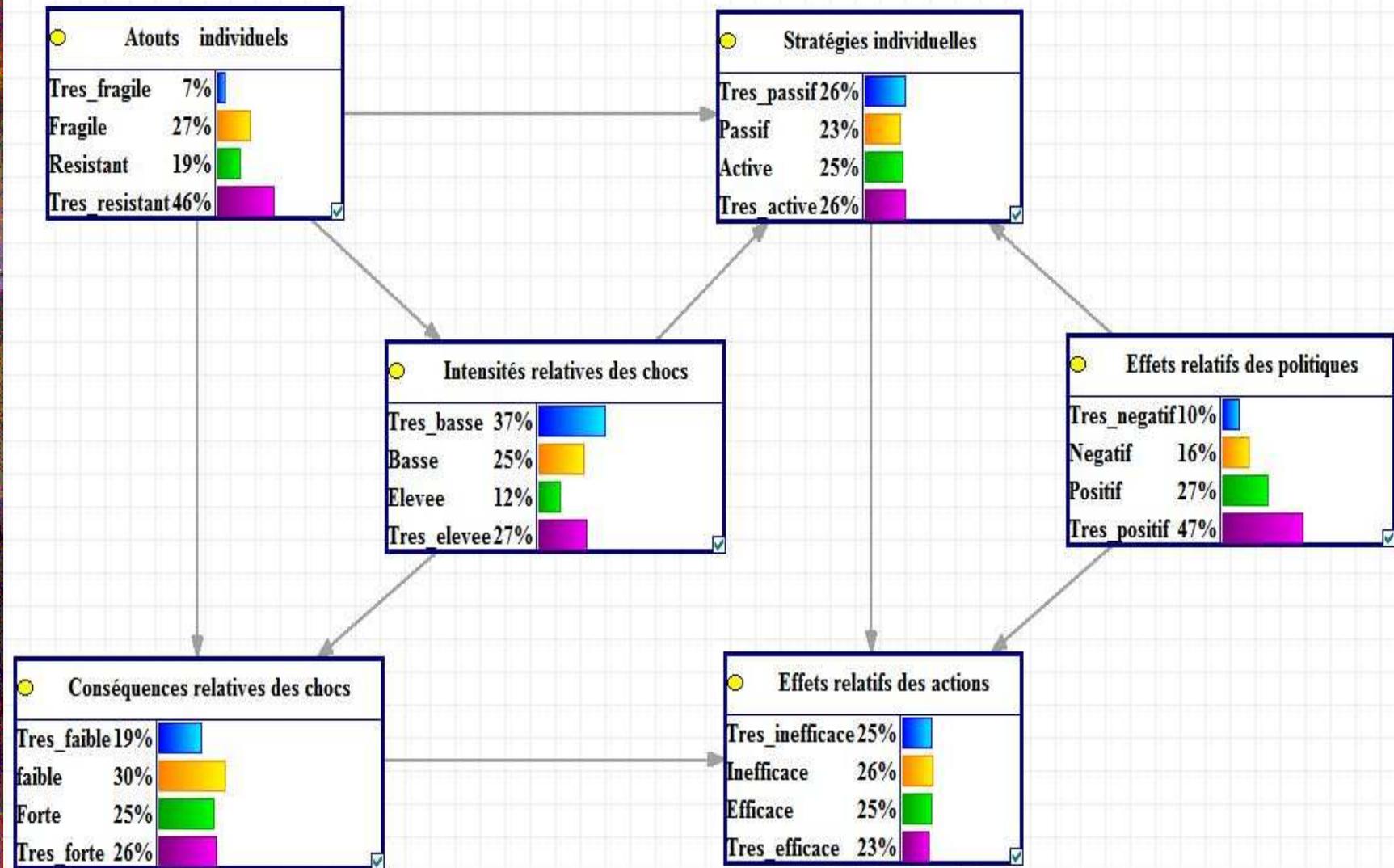
Notons :

- ✓ $\Omega = \{A, S, C, I, P, E\}$, l'ensemble des variables latentes de résilience discrétisées
- ✓ $X \in \Omega$ une variables latentes discrétisées quelconques de résilience
- ✓ n_X , le nombre de modalités de la variable latente discrétisé X ($n_X = 4$)
- ✓ x_i , la $i^{\text{ème}}$ modalité linguistique de la variable latente discrétisé variable latente X , $i \in [1, n_X]$
- ✓ $P(X = x_i)$, la probabilité que la variable latente discrétisée X prenne la modalité linguistique x_i
- ✓ $Par(X)$, l'ensemble des parents du nœud formé par la variable latente X dans le graphe de résilience
- ✓ $P(X = x_i | Par(X) = \tilde{x}_i)$, la probabilité que la variable latente X prenne la modalité linguistique x_i sachant que l'ensemble de ses parents a pris le vecteur de modalités linguistiques \tilde{x}_i
- ✓ Θ , une distribution de probabilités définies sur les variables latentes du graphe de résilience (nœuds du graphe)

Dans un Réseau Bayésien, tout nœud est conditionnellement indépendant de ses non-descendants connaissant ses parents. Cette propriété, connue sous le nom de condition de Markov permet d'estimer les probabilités jointes de tous les nœuds grâce au théorème de factorisation suivant :

$$\Theta = P(X_1 = x_1, \dots, X_k = x_k) = \prod_{k=1}^k P(X_k = x_k | Par(X_k) = \tilde{x}_k)$$

Exemple de Réseaux Bayésiens





Apport des Réseaux Bayésiens dans l'Etude de la Résilience

- Compréhension le comportement d'une variables latentes de résilience suite à une perturbation sur une ou plusieurs autres variables latentes de résilience
- Identifier les meilleurs politiques à mener grâce à la possibilité de simulation de multiples impacts



LES SYSTEMES MULTI-AGENTS



Systemes Multi-agents

➤ **Avantage :**

- ✓ Paradigme riche et facile à comprendre
- ✓ Englobe les Automates Cellulaires
- ✓ Expérimentation de situations difficiles à observer
- ✓ Outils principal de la sociologie computationnelle

➤ **Inconvénients :**

- ✓ Contexte de programmation informatique
- ✓ Conception non aisé pour systèmes complexe

Systemes Multi-agents

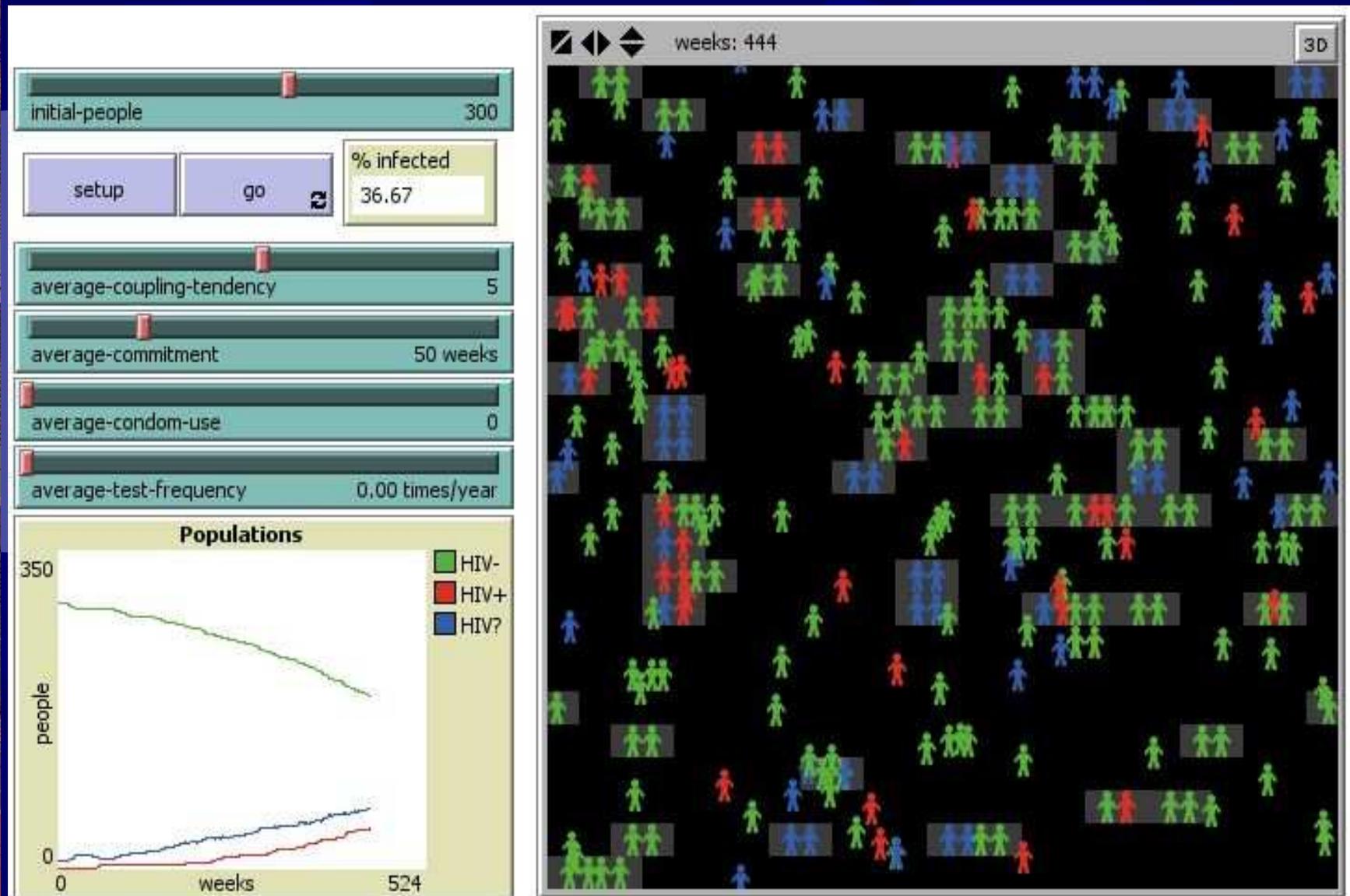
➤ 2 Etapes :

- ✓ Spécification des agents, de l'environnement et des différentes interactions par les règles de modifications
- ✓ Programmation de la spécification à l'aide d'un langage de programmation (NetLogo, Java, etc.)

➤ Spécificités :

- ✓ Conseillé d'utiliser un langage adapté (comme NetLogo)
- ✓ Utilisation essentiellement interactive du modèle

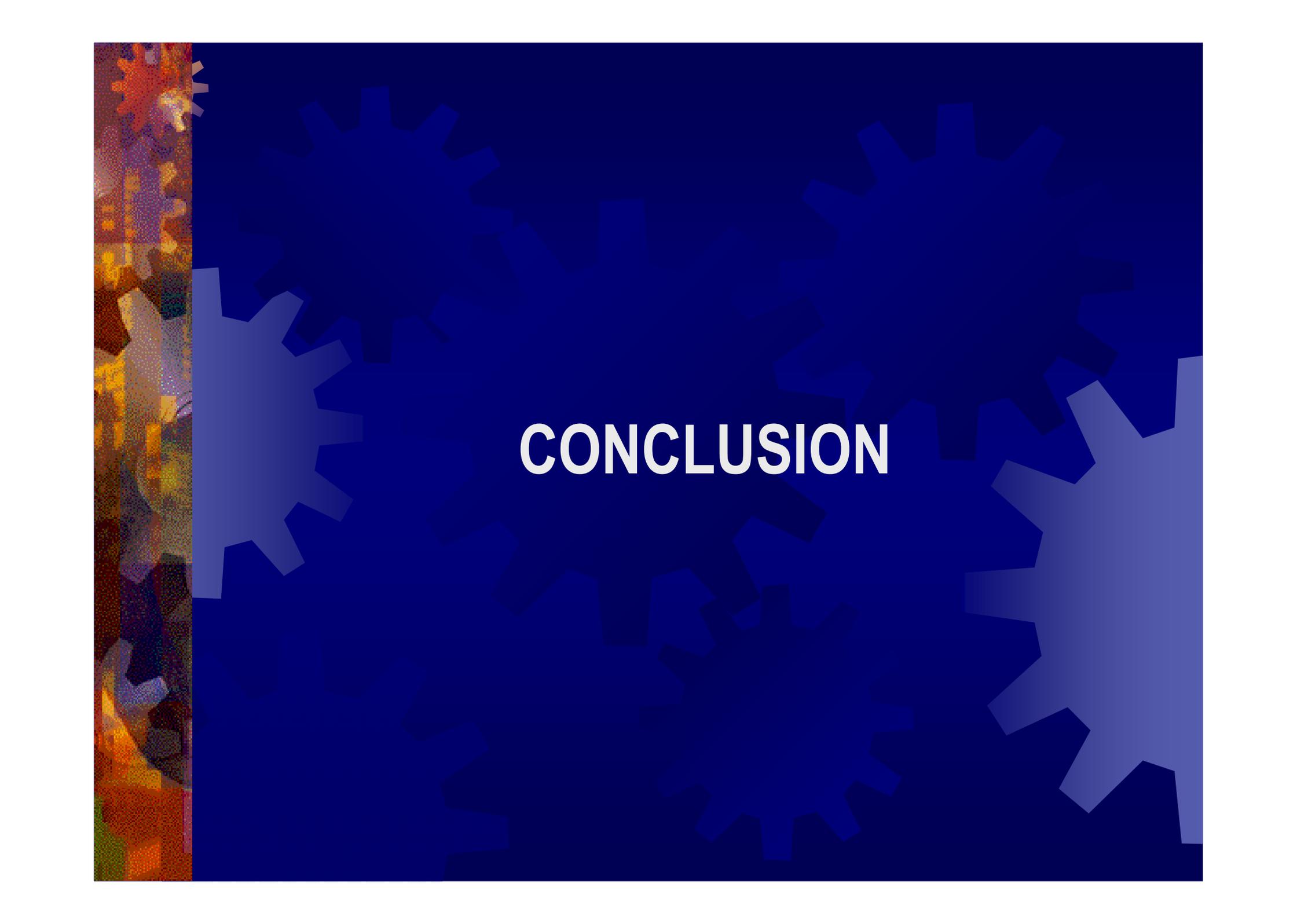
Exemple de Systèmes Multi-Agents





Apport des Systèmes Multi-Agents dans l'Etude de la Résilience

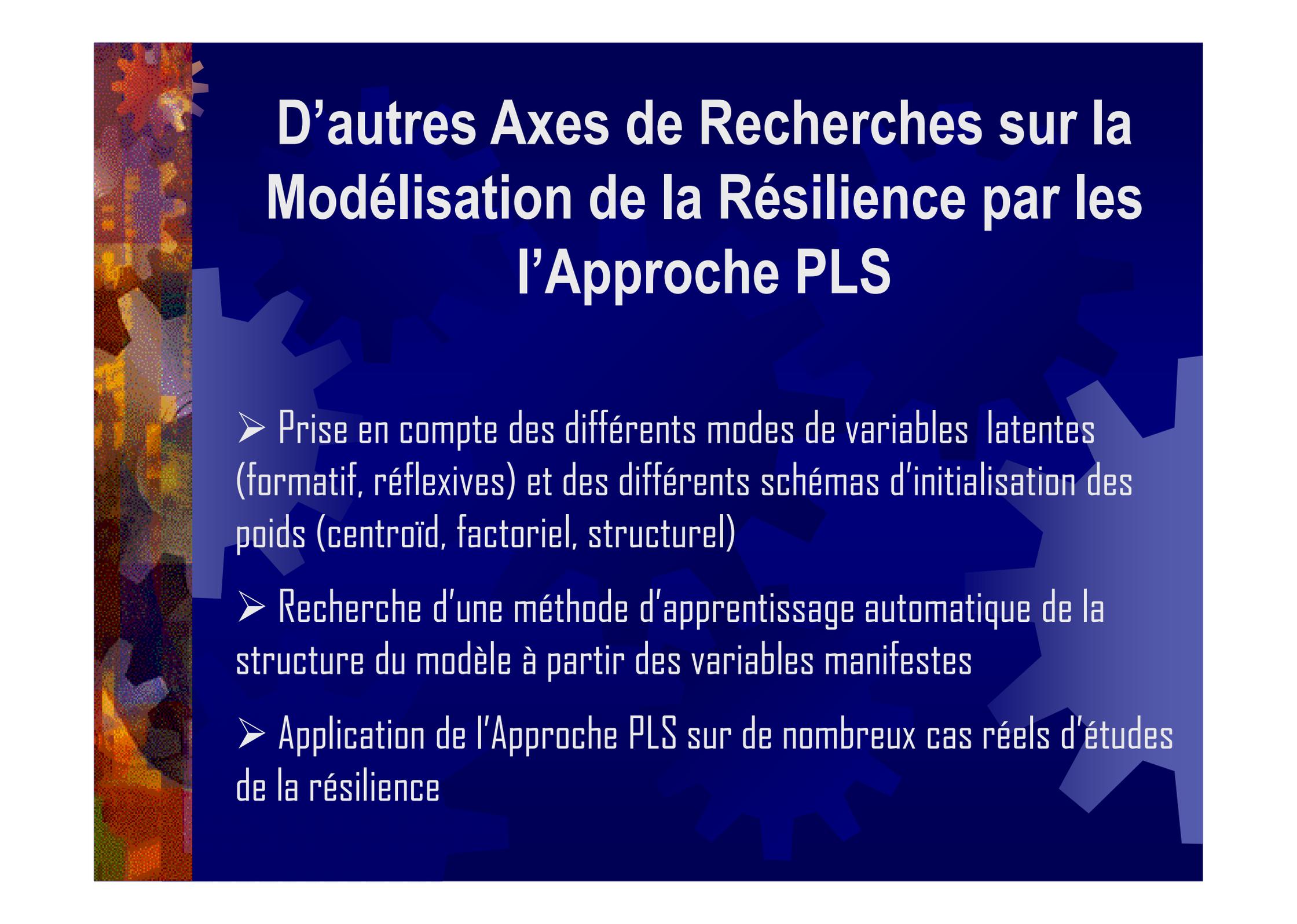
- Compréhension de la dynamique comportementale des agents à partir d'une situation initiale
- Etudier l'impact des perturbation sur les agents et leur environnement d'évolution
- Identifier les meilleurs politiques à mener pour contrôler éventuellement la résilience grâce à la possibilité de simulation multiples et d'observation de leurs effets sur l'évolution des agents



CONCLUSION

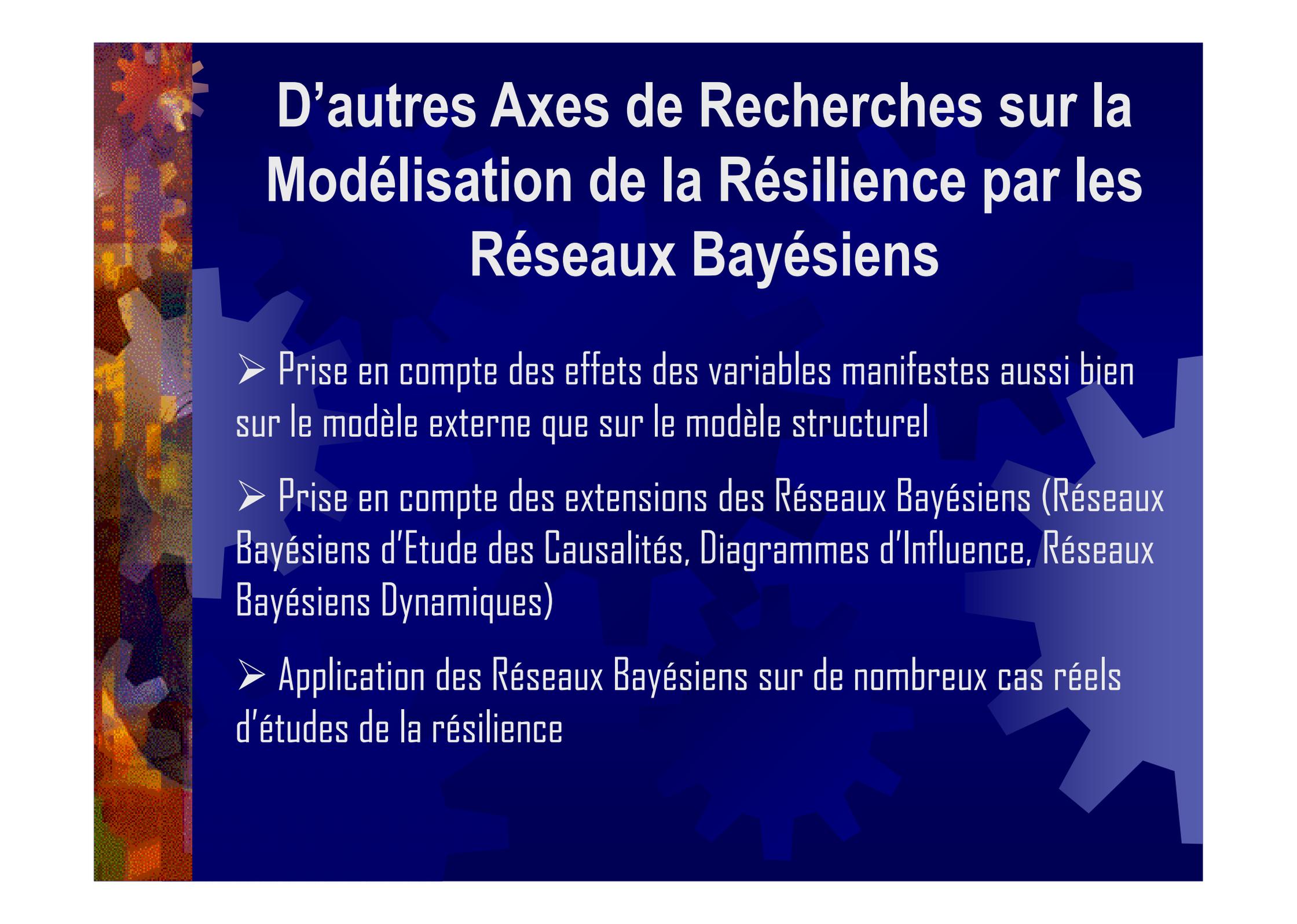
Graphe de Résilience

- Le graphe de résilience doit être considéré comme une première tentative de proposition d'un cadre universel de modélisation de la résilience
- Recherche d'un consensus sur les concepts invariants liés à l'étude de la résilience, indépendamment du domaine d'étude et du sujet abordé
- Amélioration éventuelle du graphe de résilience en vue d'une standardisation
- Les techniques de Modélisation (PLSM, RB, SMA) sont complémentaires et non des alternatives



D'autres Axes de Recherches sur la Modélisation de la Résilience par les l'Approche PLS

- Prise en compte des différents modes de variables latentes (formatif, réflexives) et des différents schémas d'initialisation des poids (centroïd, factoriel, structurel)
- Recherche d'une méthode d'apprentissage automatique de la structure du modèle à partir des variables manifestes
- Application de l'Approche PLS sur de nombreux cas réels d'études de la résilience



D'autres Axes de Recherches sur la Modélisation de la Résilience par les Réseaux Bayésiens

- Prise en compte des effets des variables manifestes aussi bien sur le modèle externe que sur le modèle structurel
- Prise en compte des extensions des Réseaux Bayésiens (Réseaux Bayésiens d'Etude des Causalités, Diagrammes d'Influence, Réseaux Bayésiens Dynamiques)
- Application des Réseaux Bayésiens sur de nombreux cas réels d'études de la résilience



D'autres Axes de Recherches sur la Modélisation de la Résilience par les Systèmes Multi-Agents

- Etudes sur les lois mathématiques et/ou logiques d'évolution des agents et de leur environnement (modification des atouts individuels, etc.)
- Application des Systèmes Multi-Agents sur de nombreux cas réels d'études de la résilience



MERCI POUR VOTRE
ATTENTION

BIBLIOGRAPHIE

- ✱ Adger, Social and ecological resilience: are they related ? 2000
- ✱ Antoine Cornuejols, Laurent Miclet, Apprentissage Artificiel, Concept et Algorithme, 2^{ème} édition, Eyrolles, 2010
- ✱ Emmanuel Jakobowicz, Contributions aux modèles d'équations structurelles à variables latentes, Thèse, 2008
- ✱ F. Bousquet, O. Barreteau, C. Mullon, J. Weber, Modélisation d'Accompagnement : Systèmes Multi-Agents et Gestion des Ressources Renouvelables.
- ✱ GeNies, Decision Systems Laboratory, University of Pittsburgh
- ✱ Jacques Feber, Les système multi-agents : vers une intelligence collective, 1995
- ✱ Koné Brama, Cissé Guéladio, et al, Vulnérabilité et résilience des populations riveraines liées à la pollution des eaux lagunaires de la métropole d'Abidjan, Côte d'Ivoire
- ✱ Philippe LERAY, Réseaux bayésiens : apprentissage et modélisation de systèmes complexes, HDR, 2006
- ✱ P. Naim, P. Leray, et al, Réseaux Bayésiens, 3^{ème} édition,, Eyrolle, 2000
- ✱ R Core Team (2013). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <http://www.R-project.org/>.
- ✱ Wilensky, U. (1999). NetLogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/> . Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.