

Modèles qualitatifs à événements discrets de systèmes écologiques et leur analyse

Maximilien Cosme

UMR DECOD

Institut Agro Rennes-Angers

maximilien.cosme@protonmail.com

11 juin 2026

Discrete dynamics in ecosystems

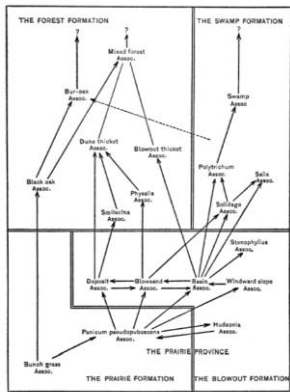
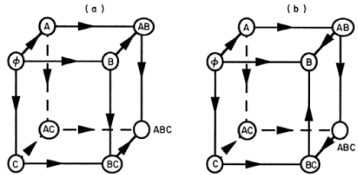
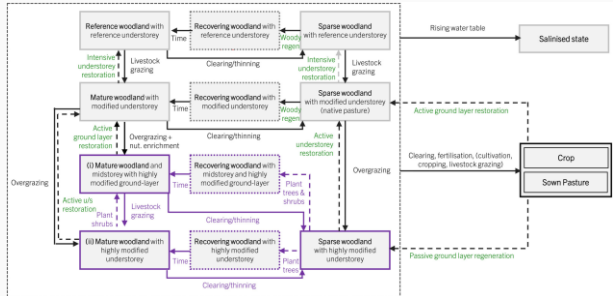


FIG. 7.—Prairies in central Illinois. After Gleason.

Gleason, 1907



Hang-Kwang & Pimm, 1993



Luxton et al., 2025

Le langage RR (*Reaction Rules*)

Le langage RR (en bref)

Définition d'un modèle

Variables : $A, B, C \in \{-, +\}$

Etats initiaux : $A+, B-, C-$

Règles :

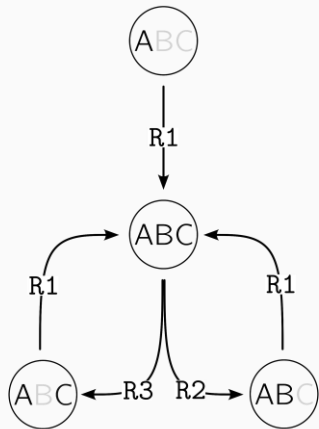
R1: $A+ \gg B+, C+$

R2: $B+ \gg C-$

R3: $C+ \gg B-$

(+ *contraintes*)

Labelled Transition System (LTS)



Qualitatif

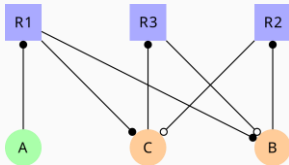
Temporellement implicite

Tir séquentiel

"Possibiliste"

+ un langage graphique, + une implémentation

EDEN = **E**cological **D**iscrete-**E**vent **N**etwork



Pommereau & Gaucherel, 2024

ecco



- Bibliothèque Jupyter
- Implémente les méthodes d'analyse du framework EDEN
- [Repo : https://github.com/fpom/ecco](https://github.com/fpom/ecco)
- [Site : https://ecco.ibisc.univ-evry.fr/](https://ecco.ibisc.univ-evry.fr/)

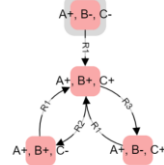


Franck Pommereau
(IBISC, Evry)

```
[9]: # compute the model
      %run -m ecco ABC.mrr

      # build the State-Transition Graph (STG)
      LTS = model()

      # compute explicit LTS
      LTS_explicit = LTS.explicit()
      LTS_explicit.draw(nodes_label="consts", layout="gv-dot",
                       ui=["graph", "inspect_nodes"])
```



size	consts	HASNO	HAS	CONTAINS	ISIN	EQUALS	component
node							
1	1 (A+, B-, C-)	(DEAD, HULL, hull)	()	()	()	(INIT)	0

Pourquoi un tir séquentiel des règles ?



A = *Amoeba proteus*



P = *Paramecium caudatum*



T = *Tetrahymena pyriformis*

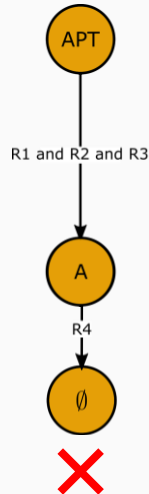
Weatherby et al., 1998

Reaction Rules (RR)

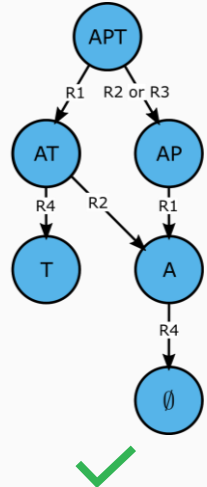
#	Si >> Alors	Interprétation
R1	A+ >> P-	Surprédation
R2	A+ >> T-	Surprédation
R3	P+ >> T-	Exclusion compétitive
R4	P- >> A-	Famine

De Goër de Herve et al., 2022

Parallèle

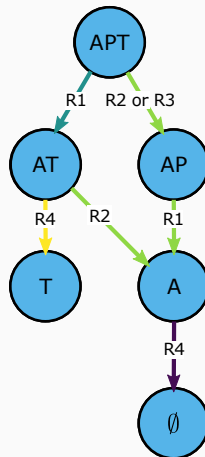


Séquentiel



Pourquoi le non-déterminisme ? (plutôt que le stochastique)

- Intéressant si données insuffisantes pour probabiliser
- Évènements rares/singuliers importants
- On accepte de sur-approximer les comportements du système



d'occurrences



Données de
Weatherby et al., 1998

Cas d'étude et outils d'analyse

1. Construire le modèle

Variables	
A	<i>Amoeba proteus</i>
B	<i>Blepharisma japonicum</i>
C	<i>Colpidium striatum</i>
E	<i>Euplotes patella</i>
P	<i>Paramecium caudatum</i>
T	<i>Tetrahymena pyriformis</i>

- Règles inférées à d'un sous-ensemble des données (Weatherby et al., 1998)
- Pour une inférence automatisée de modèles, voir Paulevé & Gaucherel, 2024

Règles		Interprétation
R1	A+ >> P-	Surprédation
R2	P- >> A-	Famine
R3	A+, P- >> B-	Surprédation
R4	A+, P- >> T-	Surprédation
R5	B+ >> T-	Surprédation
R6	E+ >> T-	Surprédation
R7	E+ >> E-	Famine
R8	C+ >> T-	Excl. compétitive
R9	P+ >> T-	Excl. compétitive
R10	C+ >> C-	Famine
R11	B+ >> C-	Surprédation
R12	A+, P- >> C-	Surprédation
R13	A+, P- >> E-	Surprédation
R14	P+ >> C-	Excl. compétitive
R15	T+ >> C-	Excl. compétitive

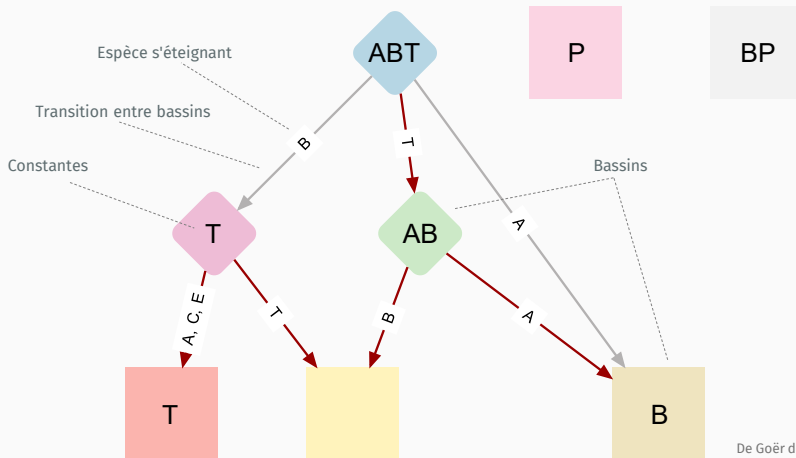


Toutes les observations sont prédites par le modèle : les données disponibles **ne réfutent pas** le modèle.

3. Identifier les "macro-dynamiques"

Graphe de Transition Hiérarchique (HTG)

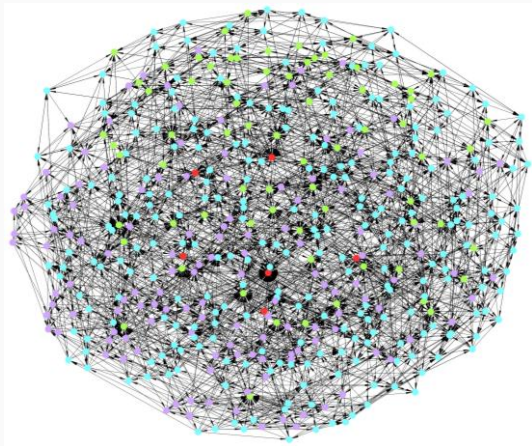
(Bérenguier et al., 2013)



De Goër de Herve et al., 2022

Oui mais...

En pratique, les graphes sont beaucoup plus grands (même agrégés) !



Besoin d'exploration :

- Ciblée
- Automatisée

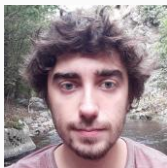
Exploration ciblée du graphe des états

Question

Le **mauvais** état (●) est-il atteignable ?

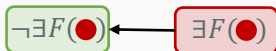
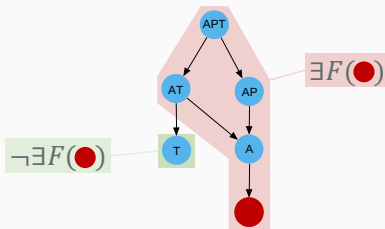


Formule CTL

 $\exists F(\bullet)$


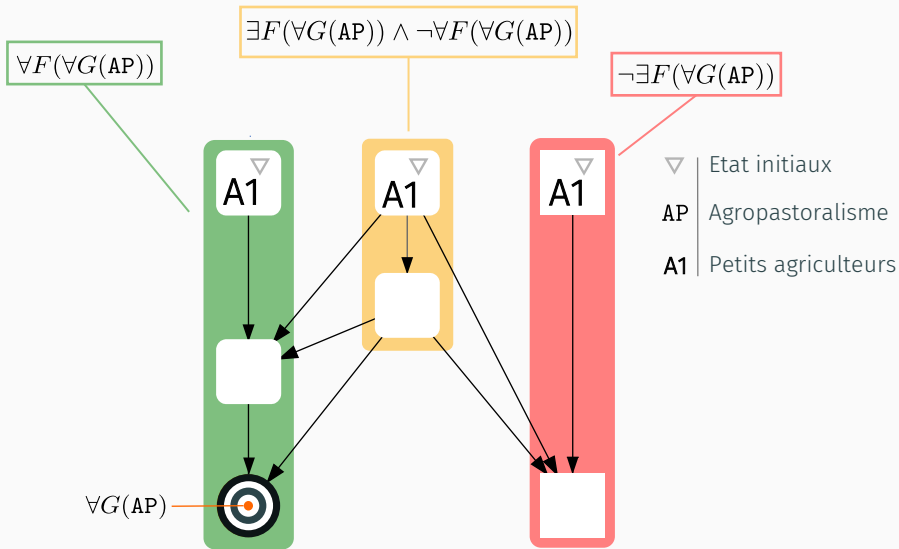
Colin Thomas

(symbolic) LTS



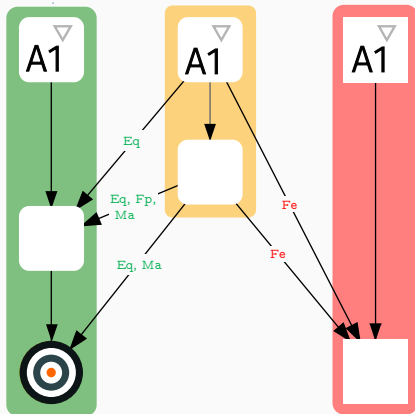
Graphe des composantes

Application : agroécologie



Application : agroécologie

Via quels événements ?



Dans quels scenarios ?

Jachère

ET

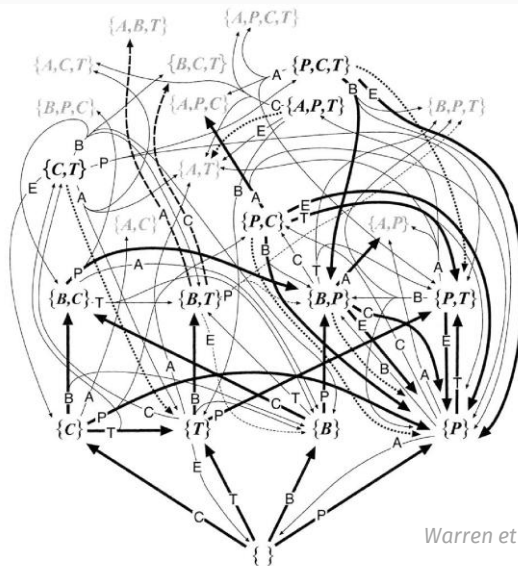
Soit Fourrage et bétail
Soit Activité extra-agricoles

Contrôle de l'erosion et sans jachère

ET

Soit Fourrage et bétail
Soit Activité extra-agricoles

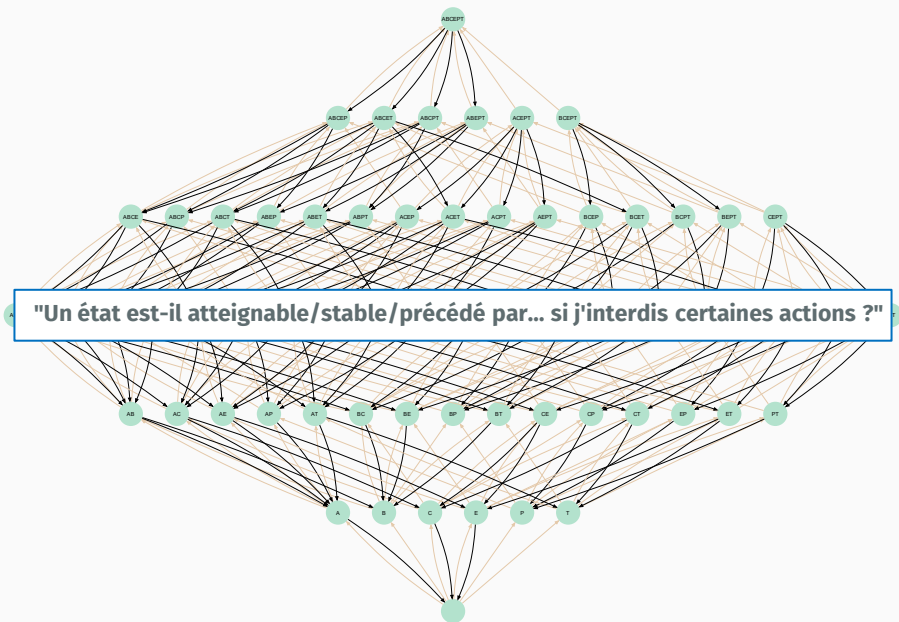
Et si on autorise les invasions d'espèces ?



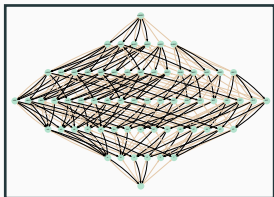
Warren et al. 2003

FIG. 3. The assembly graph including all recorded transitions. Major transitions are the same as for Fig. 2, but here there may be more than one community resulting from a given invasion, indicated by branching arrows. As before, dashed lines indicate transitions based on only two replicates, and which, hence, can only be tentatively assigned as major or minor transitions. Other conventions and abbreviations are as in Fig. 2.

Comment extraire l'information pertinente ?



Expression et vérification de propriétés dynamiques



Dans une communauté **ouverte**...

On doit distinguer les événements (e.g. extinctions vs. invasions, espèce impactante vs impactée...)

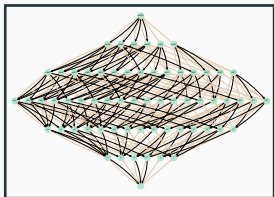
Exemple 1: Espèces catalytiques

L'espèce envahit, modifie la communauté, puis s'éteint.

Exemple 2: communauté "Humpty-Dumpty"

La communauté ne peut être assemblée par invasions successives à partir de ses espèces constituantes

Expressing and verifying dynamical properties



Dans une communauté **ouverte**...

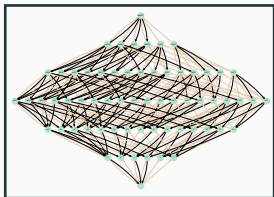
On doit distinguer les événements (e.g. extinctions vs. invasions, espèce impactante vs impactée...)

Exemple 1: Espèces catalytiques

$$\underbrace{\exists[\text{inv.}] \wedge [\text{sp:r}]}_{\text{sp invades}} X \underbrace{(\exists \neg[\text{inv.}]) F}_{\text{disassembly}} \underbrace{(\exists \neg[\text{inv.}] \wedge [\text{sp:l}] \wedge \neg[\text{sp:r}]}_{\text{sp changes the community}} X \underbrace{(\exists \neg[\text{inv.}]) F}_{\text{disassembly}} \underbrace{(\exists \neg[\text{inv.}] \wedge [\text{sp:r}]}_{\text{sp goes extinct}} X \top))$$

- Dans le modèle des protistes, les espèces **A**, **B**, **E**, **C** et **T** sont catalytiques.
- Dans l'expérience, l'espèce **C** n'était pas catalytique.

Expressing and verifying dynamical properties



Dans une communauté **ouverte**...

On doit distinguer les événements (e.g. extinctions vs. invasions, espèce impactante vs impactée...)

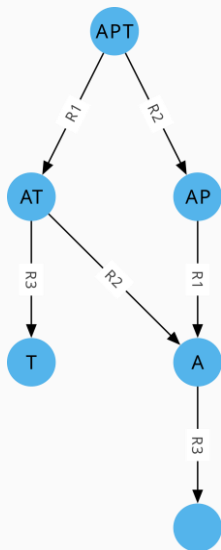
Exemple 1: Espèces catalytiques

$$\underbrace{\exists_{[inv.] \wedge [sp:r]} X}_{\text{sp invades}} \underbrace{(\exists_{\neg [inv.]} F)}_{\text{disassembly}} \underbrace{(\exists_{\neg [inv.] \wedge [sp:l] \wedge \neg [sp:r]} X)}_{\text{sp changes the community}} \underbrace{(\exists_{\neg [inv.]} F)}_{\text{disassembly}} \underbrace{(\exists_{\neg [inv.] \wedge [sp:r]} X \top)}_{\text{sp goes extinct}}))$$

Exemple 2: Communauté "Humpty-Dumpty"

$$\exists F(\mathbf{ABC}) \wedge \neg(\exists_{[\neg inv. \wedge D:r]} F(\mathbf{ABC}))$$

Merci à D. Kuperberg

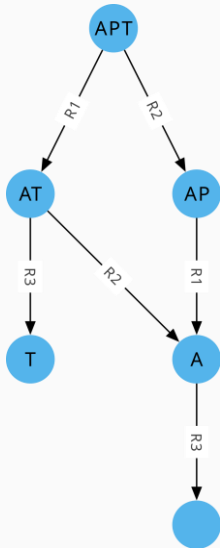


Questions (qualitatives) à notre portée :

1. "Puis-je atteindre l'état s ?"
2. "Et si j'interdis certaines actions ?"
3. "Quels événements me font perdre l'atteignabilité de s ?"

Quelles **séquences d'événements** me mènent à cet état (ou à ce point de bascule) ?

Des relations "cachées" dans le graphe des états



Relations remarquables entre événements

- R1 **précède** R3
- **Si** R2 arrive avant R3, on a un **futur différent**
- R1 et R2 sont **indépendants**

Du modèle RR au réseau de Petri

Modèle RR

variables:

A+: Amoeba proteus
 P+: Paramecium caudatum
 T+: Tetrahymena pyriformis

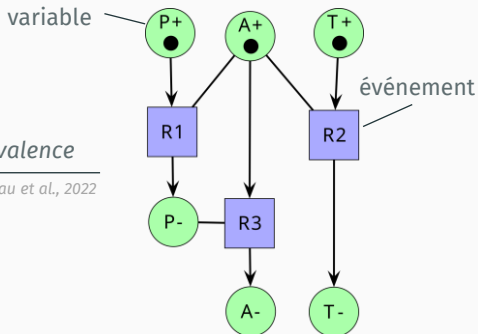
règles:

R1 : A+ >> P-
 R2 : A+ >> T-
 R3 : P- >> A-

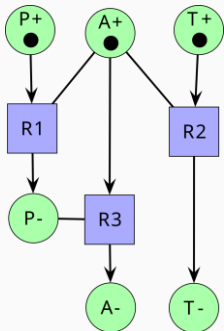
équivalence

Pommereau et al., 2022

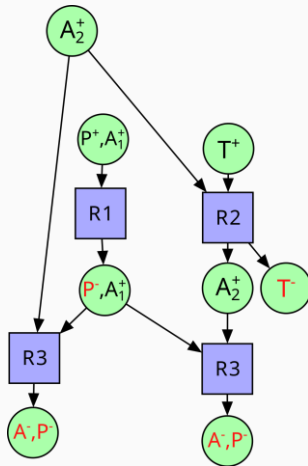
Réseau de Petri étendu



Réseau de Petri étendu



Unfolding

Préfixe fini complet du
dépliage du réseau de Petri

Relations entre événements

Causalité

Il existe un chemin entre deux nœuds.

$\Rightarrow R1$ cause $R3$

Conflit

Deux chemins ont une même condition.

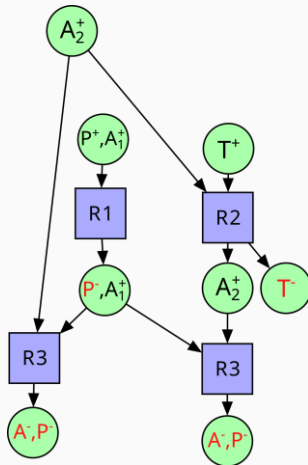
$\Rightarrow R2$ et $R3$ sont en conflit pour A_2^+

Concurrence

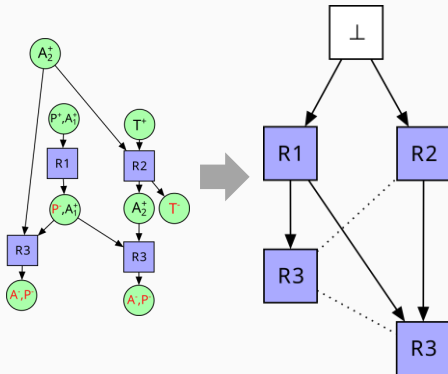
Relation ni causale ni conflictuelle.

$\Rightarrow R1$ et $R2$ sont concurrents

Préfixe fini complet du
dépliage du réseau de Petri



Structure d'événements



- Calcul des **configurations minimales** : ensemble des plus courts chemins entre deux états.
- Calcul des **configurations doomed** : ensemble d'événements à partir duquel tous les futurs possibles mènent inévitablement vers un certain état.

Aguirre-Samboní, 2023

Explorations récentes et à venir

- Modèles traditionnels et réseaux booléens à seuil
- Inférence de modèles
- Approche "théorie des jeux" (ATL)
- Probabilités, temps, multivalué

"Booléaniser" les modèles continus traditionnels

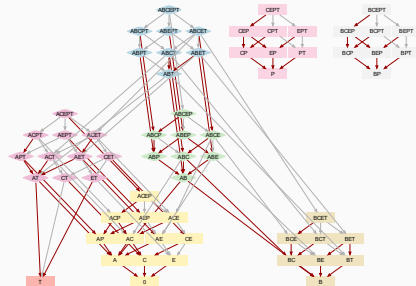
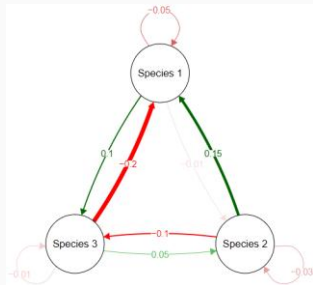
Lotka-Volterra généralisé

$$\frac{1}{N_i} \frac{dN_i}{dt} = r_i + \sum_{j=1}^n \beta_{i,j} N_j$$



Réseau booléen à seuil

$$X_i(t+1) = \begin{cases} 1, & \sum_j E_{ji} X_j(t) \geq 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$



Voir aussi sémantique Most Permissive (Paulevé, Haar...)

Inférence de modèles : utiliser toutes les données dispo !

Received: 4 July 2024 | Accepted: 27 May 2025

DOI: 10.1111/2041-210X.70090

RESEARCH ARTICLE



Methods in Ecology and Evolution

Inference of ecological networks and possibilistic dynamics based on Boolean networks from observations and prior knowledge

Loïc Paulevé¹ | Cédric Gaucherel²

Mais la plupart des modèles développés proviennent de **données textuelles** !

➤ Le rêve : inférer des modèles à partir d'une **bibliographie**.

La gestion écosystémique comme jeu (ATL)

CTL : type "existe-t-il un chemin vers l'état s ?"

Mais existe-t-il une **stratégie** garantissant d'atteindre s ?

*La gestion écosystémique se conçoit moins comme l'établissement d'un équilibre permanent que comme un **jeu continu**, dont l'objectif est de **saisir les opportunités et d'éviter les aléas**, dans la mesure du possible.*

*Les transitions entre états sont déclenchées par des 'événements' naturels ou par des 'actions' de gestion. **Très souvent, une combinaison des deux peut s'avérer nécessaire.***

Début de travail avec Léo Exibard pour étudier les stratégies de gestion des pâturages en Islande avec ATL.



2024

A Multivalued, Spatialized, and Timed Modelling Language for Social-Ecological Systems

Franck Pommereau¹, Cédric Gaucherel²

2015



Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Theoretical Computer Science

www.elsevier.com/locate/tcs

Minimal probabilistic P systems for modelling ecological systems

Roberto Barbuti, Pasquale Bove, Paolo Milazzo*, Giovanni Pardini

- "Un état est **logiquement atteignable**, mais est-ce **vraisemblable** ?"
- Partenariat ?