

Attracteurs culturels, MEPP et entropie créatrice

Vers une thermodynamique fractale du champ symbolique, informée par simulation multi-agents

Résumé : Nous proposons une lecture thermodynamique des dynamiques culturelles en modélisant le champ symbolique comme une structure dissipative hors équilibre. À partir de trois sorties d'un simulateur multi-agents, nous reconstruisons un espace d'états réduit ((P,H,T)) où (P) représente la polarisation (gradient symbolique), (H) l'entropie d'opinion (diversité informationnelle) et (T) le turnover (dissipation locale par reconfiguration). Les trois trajectoires demeurent dans un régime global stable mais occupent des minima locaux distincts, suggérant des attracteurs culturels internes à un même bassin. Nous articulons ces résultats au principe de production maximale d'entropie (MEPP) et à l'entropie créatrice (thermodynamique fractale), en introduisant un EROI symbolique comme mesure d'efficacité de la cohérence collective produite par unité d'énergie conflictuelle investie. Nous proposons enfin un modèle différentiel minimal (ODE) pour relier dissipation, diversité et rigidification.

Mots-clés : structures dissipatives; MEPP; entropie créatrice; attracteurs culturels; polarisation; EROI symbolique; thermodynamique fractale.

1. Introduction

Les systèmes sociaux peuvent être décrits comme des systèmes hors équilibre qui canalisent et dissipent des flux — non seulement énergétiques et matériels, mais aussi **symboliques** (normes, récits, identités, représentations). La polarisation idéologique y joue un rôle ambivalent : parfois signe de conflictualité destructrice, parfois mécanisme de coordination et de stabilisation. Nous testons l'hypothèse qu'une polarisation accrue peut correspondre à une **reconfiguration dissipative** (au sens de la thermodynamique hors équilibre), et non à une instabilité intrinsèque.

2. Cadre théorique

2.1 MEPP : dissipation optimale sous contrainte

Le **Maximum Entropy Production Principle (MEPP)** soutient que, sous contraintes fixées, un système hors équilibre tend vers des configurations qui maximisent la production d'entropie compatible avec ces contraintes. ([PMC](#)) Dans sa forme canonique, la production d'entropie s'écrit ($\sigma = J \cdot X$), produit d'un flux (J) et d'une force thermodynamique (X). ([PMC](#))

2.2 Entropie créatrice et thermodynamique fractale

La notion d'**entropie créatrice** — dans la lignée des approches multi-échelles/fractales associées à Nottale et collaborateurs — insiste sur l'idée que l'entropie n'est pas seulement "désordre", mais **générativité** : diversification des possibles, exploration multi-échelles, et émergence de structures organisées. ([Éditions Ellipses](#)) Cette perspective est compatible avec la **relativité d'échelle** de Nottale, où des lois d'échelle et des dynamiques non différentiables (fractalités effectives) structurent l'évolution de systèmes complexes à différentes résolutions. ([World Scientific](#))

2.3 EROI symbolique

Nous définissons un **EROI symbolique** (rendement informationnel) comme :

$$EROI_s = \frac{\text{cohérence collective produite}}{\text{énergie conflictuelle investie}}$$

Intuitivement, plus une structure idéologique produit de cohérence (alignement, prévisibilité, coordination) pour un coût conflictuel donné, plus son ($EROI_s$) est élevé.

3. Données, indicateurs et espace de phase

3.1 Indicateurs (issus des sorties du simulateur)

Nous retenons trois observables synthétiques :

- **Polarisation (P)** : ($P = |\widetilde{o}_L| + |\widetilde{o}_R|$) (sommées des médianes d'opinion par sous-population).
- **Entropie (H)** : entropie d'opinion (diversité distributionnelle).

- **Turnover (T)** : turnover global (reconfiguration des constellations).

Ces variables définissent un espace $((P, H, T))$ interprété comme projection empirique d'un paysage attracteur.

3.2 Résultat empirique (en bref)

Les trois trajectoires partagent un régime global stable (Lyapunov moyen négatif, code de régime constant) mais se répartissent en deux familles :

- **A** : (P) plus faible, (H) plus élevé, (T) plus élevé.
- **B/C** : (P) élevé, (H) légèrement plus bas, (T) plus faible.
Ce motif est robuste selon des distances euclidiennes et Mahalanobis (covariance poolée).

4. Formalisation mathématique (ODE simplifiées)

4.1 Variables d'état et contraintes

On considère un champ symbolique réduit à trois variables :

$$x(t) = (P(t), H(t), T(t)).$$

On suppose des contraintes lentes (institutionnelles, technologiques, économiques) résumées par un paramètre (κ) (ou vecteur), et une "température sociale" (D) (*bruit/excitation*).

4.2 Production d'entropie symbolique (analogue MEPP)

On pose une **production d'entropie symbolique** :

$$\sigma_s = J_s X_s,$$

avec une force symbolique (X_s) proportionnelle au gradient de polarisation (P), et un flux (J_s) proportionnel à la reconfiguration (T) (les reconfigurations dissipent les tensions par redistribution des alignements) :

$$X_s = \alpha P, \quad J_s = \beta T \quad \Rightarrow \quad \sigma_s = \alpha\beta PT.$$

Cette définition est minimaliste mais fidèle à la structure ($\sigma = J \cdot X$). ([PMC](#))

4.3 Dynamique de polarisation

La polarisation croît sous l'effet d'un couplage endogroupe (homophilie / alignement) et décroît sous l'effet de mélange (ponts, interactions inter-camps, "bridging"). On propose :

$$\frac{dP}{dt} = a, \Phi(\kappa), P - b, M(\kappa), P - c, H, P + \eta_P(t),$$

où :

- $(\Phi(\kappa))$ résume les mécanismes d'amplification (alignement groupal, pénalité de distance, faibles ponts),
- $(M(\kappa))$ résume le mélange (bridges, exposition croisée),
- le terme $(-cHP)$ encode un effet de "dilution" : plus la diversité est grande, plus l'enfermement polarisant est contrarié,
- (η_P) est un bruit (faible).

4.4 Dynamique d'entropie : entropie créatrice vs rigidification

On modélise (H) comme résultant (i) d'une **production** via dissipation symbolique (MEPP), (ii) d'une **perte** par rigidification quand (P) devient trop grand, et (iii) d'un terme "créateur" multi-échelles (Nottale) qui représente l'ouverture de nouveaux degrés de liberté à certaines échelles :

$$\|1 \frac{dH}{dt} = \underbrace{\lambda, \sigma_s}_{\text{production}} - \underbrace{\mu}_{\text{rigidification}}^2 + \underbrace{\rho, \Psi(H; , H_{min})}_{\text{entropie créatrice}} - \delta(H - H_0).$$

$$\|1 \text{Choix simple pour } (\Psi) : \quad \|1 \Psi(H; , H_{min}) = \max(0, ; H - H_{min}),$$

ce qui signifie : en-dessous d'un seuil (H_{min}) le système perd sa capacité créatrice (exploration), au-dessus il dispose d'un surplus de diversité mobilisable. Cette lecture relie explicitement "diversité" et "générativité", dans l'esprit de l'entropie créatrice. ([Éditions Ellipses](#))

4.5 Turnover comme dissipation locale

On pose que le turnover augmente avec la tension à dissiper (ici (P)) mais diminue lorsque des structures rigides stabilisent les alignements (via (κ)) :

$$\|1 \frac{dT}{dt} = \epsilon P - \gamma T - \xi, \Omega(\kappa), T + \eta_T(t).$$

Là encore, ($\Omega(\kappa)$) agrège des mécanismes de stabilisation (p.ex. hiérarchisation d'influence, verrouillage des réseaux).

4.6 MEPP comme principe de sélection des attracteurs

Sous contraintes (κ), on peut interpréter la sélection d'un attracteur comme un optimum (local) de (σ_s) :

$$\backslash bigmx^*(\kappa) = \arg \max_{x \in \mathcal{A}(\kappa)} \sigma_s(x) = \arg \max_{x \in \mathcal{A}(\kappa)} P T,$$

où ($\mathcal{A}(\kappa)$) est l'ensemble des états accessibles/stables sous contraintes. Cela formalise l'idée : **plusieurs minima locaux** peuvent coexister dans un même bassin, et la trajectoire choisit celui qui maximise la dissipation compatible avec les contraintes. (PMC)

4.7 Lecture EROI symbolique dans le modèle

On peut relier ($EROI_s$) à des observables :

$$EROI_s \propto \frac{\text{cohérence}}{\text{conflit}} \approx \frac{1/T}{P} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{PT},$$

selon que l'on assimile la cohérence à une faible reconfiguration ($petit(T)$) et le coût conflictuel à (P). Dans cette approximation :

- attracteur hégémonique (B) : (P) élevé mais (T) faible ($\Rightarrow EROI_s$) relativement haut (cohérence "bon marché"),
- attracteur bilatéral (C) : (P) très élevé et (T) pas aussi bas ($\Rightarrow EROI_s$) plus coûteux,
- attracteur pluraliste (A) : (P) plus faible mais (T) plus haut ($\Rightarrow EROI_s$) modéré et distribué.

5. Discussion : articulation MEPP–entropie créatrice

1. **Polarisation ≠ instabilité** : les simulations montrent qu'un régime polarisé peut rester globalement stable (Lyapunov négatif).
2. **MEPP (dissipation structurée)** : des attracteurs polarisés peuvent constituer des solutions dissipatives efficaces sous contraintes (réduction de (T) tout en maintenant une dissipation directionnelle via (P)). ([PMC](#))
3. **Entropie créatrice** : la stabilité d'un attracteur polarisé dépend de la conservation d'un socle ($H > H_{min}$) garantissant l'exploration multi-échelles et l'innovation symbolique. Lorsque (H) chute, la dissipation devient "stérilisante" (rigidification), ouvrant la voie à des transitions qualitatives. ([Éditions Ellipses](#))
4. **Relativité d'échelle / fractalité** : les mécanismes culturels opèrent à plusieurs échelles (individus, réseaux, institutions). La dynamique observée est compatible avec l'idée qu'une part du changement relève de réorganisations multi-échelles plutôt que de ruptures brutales uniques. ([World Scientific](#))

6. Limites et programme empirique

- **Identification paramétrique** : sans export explicite des paramètres (κ) (bridges, alignement, événements/injections), l'attribution causale demeure mécanistique plutôt que démonstrative.
- **MEPP** : le statut de MEPP est discuté et dépend des conditions d'application; l'article l'emploie comme **principe heuristique de sélection** plutôt que loi universelle. ([pure.mpg.de](#))
- **Validation** : un balayage paramétrique (grid + seeds) est requis pour détecter hystérésis, multi-stabilité, et vrais seuils bifurcatifs.

7. Conclusion

Les simulations soutiennent une vision où des **attracteurs culturels** distincts coexistent dans un même bassin stable, différant principalement par la polarisation (P) et la structure de dissipation (T) , tout en maintenant une entropie (H) élevée. L'intégration conjointe de MEPP et de l'entropie créatrice propose un schéma : **la polarisation peut être une solution dissipative**, tant qu'elle n'érode pas le capital de

diversité nécessaire à l'innovation symbolique. L'EROI symbolique fournit un langage unificateur pour comparer l'efficacité et le coût des configurations culturelles.

Références (format “revue” — style APA simplifié)

- Dyke, J., Kleidon, A., Robinson, A., & Woodward, F. I. (2010). *The Maximum Entropy Production Principle: a review of open issues*. (Max Planck Institute report). (pure.mpg.de)
 - Jaynes, E. T. (1957). Information theory and statistical mechanics. *Physical Review*, 106(4), 620–630. ([APS Links](#))
 - Martyushev, L. M., & Seleznev, V. D. (2006). Maximum entropy production principle in physics, chemistry and biology. *Physics Reports*, 426(1), 1–45. ([ScienceDirect](#))
 - Martyushev, L. M. (2010). The maximum entropy production principle: two basic questions. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 368, 3345–3354. ([PMC](#))
 - Martyushev, L. M., & Seleznev, V. D. (2013). The restrictions of the Maximum Entropy Production Principle. *arXiv preprint*. ([arXiv](#))
 - Nottale, L. (1993). *Fractal Space-Time and Microphysics: Towards a Theory of Scale Relativity*. World Scientific. ([arXiv](#))
 - Nottale, L. (2011). *Scale Relativity and Fractal Space-Time: A New Approach to Unifying Relativity and Quantum Mechanics*. World Scientific / Imperial College Press. ([World Scientific](#))
 - Queiros-Condé, D., Chaline, J., & Brissaud, I. (2023). *L'entropie créatrice: Thermodynamique fractale et quantique de l'Univers, de la Vie et des Sociétés*. Ellipses. (moliere.com)
-