Structures dissipatives et physique des processus

Vers une grammaire unificatrice des formes, des flux et des temps

Document de travail

Juillet 2026

Introduction - De la chose au processus

La discussion menée autour de la constante de Planck généralisée, des structures dissipatives, de la diffusion-réaction et de l'équation de Schrödinger généralisée fait apparaître une intuition très forte : une physique des processus ne devrait pas commencer par les objets, mais par les transformations qui les font exister.

Dans une physique classique des objets, on décrit des corps, des masses, des positions, des forces et des trajectoires. Cette description reste indispensable. Mais elle ne suffit pas toujours à penser les formes qui naissent, se maintiennent, bifurquent et disparaissent. Un tourbillon, une flamme, une cellule, une galaxie ou même un atome, dans une lecture dynamique, ne sont pas seulement des objets : ce sont des stabilisations temporaires d'un devenir.

La structure dissipative devient alors une notion centrale. Elle désigne une forme qui se maintient parce qu'elle est traversée par des flux. Elle reçoit de l'énergie, de la matière, de l'information ou de la contrainte ; elle les transforme ; elle les dissipe ; et, par ce mouvement même, elle conserve une certaine forme.

On peut résumer cette intuition par deux formules simples :

$$une\ structure\ =\ un\ processus\ stabilisé$$

et :

$$une\ forme\ =\ un\ équilibre\ dynamique\ entre\ flux,\ diffusion,\ réaction\ et\ dissipation$$

Ces deux phrases donnent le fil conducteur du présent document. Il s'agit de montrer comment une structure dissipative peut devenir la brique élémentaire d'une physique des processus, et comment cette physique peut relier, dans un même langage, l'atome, le tourbillon, le système képlérien, la galaxie et l'Univers observable.

1. La physique des processus : une grammaire du devenir

Dans une physique des processus, la question fondamentale n'est plus seulement : « de quoi est fait le monde ? ». Elle devient : « qu'est-ce qui circule, qu'est-ce qui se transforme, qu'est-ce qui se stabilise, qu'est-ce qui se dissipe, et à quelle échelle ? »

Un processus peut être décrit par un ensemble de grandeurs fondamentales :

$$\left(a, V, T, M_{eff}, D, S_0, R(u)\right)$$

où :

- a est la taille caractéristique de la structure ;
- V est la vitesse de traversée, de circulation ou de propagation des flux ;
- T est le temps propre du processus ;
- M_{eff} est la masse effective engagée dans la forme ;
- D est le coefficient de diffusion ou de transport ;
- S_0 est l'action caractéristique du processus ;
- $R(u)$ est le terme de réaction, c'est-à-dire la transformation interne de la grandeur u.

Cette liste forme une véritable grammaire. Elle permet de passer d'une physique des objets à une physique des formes dynamiques. Un objet stable est alors relu comme un processus qui a trouvé un régime de cohérence.

$$forme = processus\ stabilisé$$

ou encore :

$$être = devenir\ temporairement\ organisé$$

Cette formulation donne à la physique des processus une résonance philosophique héraclitéenne : rien n'est absolument immobile ; cependant tout n'est pas chaos, car des régimes de stabilité locale émergent dans le flux.

2. La structure dissipative comme unité élémentaire

La structure dissipative est le candidat naturel pour devenir l'unité élémentaire d'une telle physique. Elle réunit en effet les opérations fondamentales que l'on retrouve dans de nombreux systèmes naturels : transport, diffusion, réaction, dissipation, amplification, saturation, bifurcation, stabilisation et émergence.

Elle peut être décrite comme une forme stable dans un flux instable. La flamme n'existe que parce que le combustible se transforme ; le tourbillon n'existe que parce que le fluide circule ; la cellule vivante n'existe que parce qu'elle échange de la matière et de l'énergie ; la galaxie n'existe que parce que gravitation, rotation, accrétion et dissipation composent un régime durable.

Le tableau suivant rassemble les éléments constitutifs d'une structure dissipative.

Élément	Sens physique	Rôle dans une physique des processus
Flux	Ce qui traverse la structure	Met la structure hors équilibre
Diffusion	Ce qui étale, mélange ou propage	Donne une tendance à la dispersion
Réaction	Ce qui transforme, amplifie ou détruit	Produit la dynamique interne
Dissipation	Ce qui convertit l'énergie organisée	Empêche l'accumulation indéfinie
Stabilisation	Ce qui maintient une forme temporaire	Crée une identité dynamique
Bifurcation	Changement de régime	Fait émerger une nouvelle forme
Temps propre	Rythme interne du processus	Donne une temporalité à la forme
Action	Mesure globale du processus organisé	Quantifie le coût dynamique du maintien

Ce tableau montre pourquoi la structure dissipative peut devenir une brique d'unification. Elle ne remplace pas les théories particulières, mais elle fournit un langage transversal.

3. L'action généralisée comme action propre du processus

L'un des résultats essentiels de la discussion est la possibilité de définir une constante d'action généralisée pour une structure organisée. Dans la mécanique quantique, la constante de Planck réduite ħ est l'action élémentaire. Dans la relativité d'échelle de Nottale, cette constante est généralisée sous la forme :

$$S_0 = 2mD$$

où D est un coefficient de diffusion d'échelle.

Dans le cadre des structures dissipatives, on généralise cette relation en remplaçant la masse ponctuelle par une masse effective de structure :

$$S_0 = 2M_{eff}D$$

Si la structure possède une taille caractéristique a et un temps propre T, le coefficient de diffusion caractéristique peut s'écrire, avec la convention de Nelson :

$$D \simeq \frac{a^2}{2T}$$

En remplaçant D dans l'action généralisée, on obtient :

$$S_0 = 2M_{eff}\frac{a^2}{2T}$$

soit :

$$S_0 = M_{eff}\frac{a^2}{T}$$

Comme le temps propre est relié à la vitesse de traversée par :

$$T = \frac{a}{V}$$

on obtient également :

$$S_0 = M_{eff}aV$$

Cette équation est centrale. Elle dit qu'une structure dissipative possède une action propre déterminée par sa masse engagée, sa taille et la vitesse de circulation de ses flux. Cette action n'est pas nécessairement une constante universelle ; elle est une constante effective d'échelle, propre à la structure considérée.

On peut commenter cette formule ainsi :

- M_{eff} mesure l'inertie ou la matière engagée dans la forme ;
- a mesure l'extension spatiale de la forme ;
- V mesure l'intensité dynamique du flux ;
- S_0 mesure le coût d'action du maintien de la structure.

Ainsi :

$$S_0 = action\ propre\ d'un\ processus\ organisé$$

4. La masse effective et la dimension fractale

Une structure dissipative peut occuper un volume ordinaire ou un support fractal. On peut donc définir une masse effective par :

$$M_{eff} = \rho_D a^D$$

où D est une dimension effective ou fractale, et ρ_D une densité généralisée vérifiant :

$$[\rho_D) = ML^{-D}$$

Ainsi, $\rho_D a^D$ a bien l'unité d'une masse.

En injectant cette masse effective dans l'expression de l'action, on obtient :

$$S_0 = \rho_D a^D \frac{a^2}{T}$$

soit :

$$S_0 = \rho_D \frac{a^{D+2}}{T}$$

ou encore, avec $V = a/T$:

$$S_0 = \rho_D a^{D+1} V$$

Cette formule est une forme condensée de la physique des processus. Elle relie la géométrie de la structure, son temps propre, sa densité effective et son action.

5. L'équation de réaction-diffusion comme matrice du devenir

L'équation de réaction-diffusion est l'un des modèles les plus simples et les plus puissants pour penser une structure dissipative. Elle s'écrit :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = D\Delta u + R(u)$$

Le terme $D\Delta u$ représente la diffusion : l'étalement, la dispersion, le mélange ou la propagation de la grandeur u.

Le terme $R(u)$ représente la réaction : la production, la transformation, la destruction, l'amplification ou la saturation de cette même grandeur.

L'équation peut être lue comme une formule du devenir :

$$évolution = diffusion + transformation$$

Selon les domaines, u peut prendre des significations très différentes.

Domaine	Sens possible de u	Lecture du processus
Chimie	Concentration	Réaction et transport de matière
Biologie	Biomasse, densité cellulaire, signal	Croissance, différenciation, morphogenèse
Turbulence	Énergie, vorticité, enstrophie	Cascade, dissipation, intermittence
Neurosciences	Activité neuronale	Propagation et transformation d'un signal
Cosmologie	Densité, contraste, potentiel	Structuration gravitationnelle

Domaine	Sens possible de u	Lecture du processus
Systèmes sociaux	Information, opinion, tension	Diffusion et amplification collective

La force de cette équation est de proposer une structure formelle commune : une quantité se transporte et se transforme.

6. Le terme de réaction : amplification, saturation et non-linéarité

La diffusion seule tend à lisser. La réaction seule peut amplifier, détruire ou saturer. La structure apparaît lorsque les deux se composent.

Un terme de réaction linéaire s'écrit :

$$R(u) = \lambda u$$

Mais une structure dissipative réelle est souvent non linéaire. On peut écrire :

$$R(u) = \lambda u^p$$

ou, plus généralement, une forme production-saturation :

$$R(u) = \lambda u^p - \mu u^q, q > p$$

Le premier terme, λu^p, représente l'amplification ou l'auto-entretien. Le second, $-\mu u^q$, représente la saturation, la dissipation ou l'épuisement.

À l'équilibre non nul, on impose :

$$R(u_*) = 0$$

c'est-à-dire :

$$\lambda u_*^p = \mu u_*^q$$

Si $u_* \neq 0$, alors :

$$u_*^{q-p} = \frac{\lambda}{\mu}$$

et donc :

$$u_* = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{1/(q-p)}$$

Cette formule donne l'amplitude stationnaire de la structure. Elle exprime l'idée qu'une forme stable naît d'un équilibre entre amplification et saturation.

On peut résumer la logique ainsi :

$$instabilité \rightarrow amplification \rightarrow saturation \rightarrow forme\ stable$$

Ce schéma est fondamental dans une physique des processus, car il montre que la forme n'est pas donnée ; elle se produit, puis se régule.

7. Temps de diffusion, temps de réaction et nombre de Damköhler

Une structure dissipative possède au moins deux temps caractéristiques :

- un temps de diffusion ou de transport T_D ;
- un temps de réaction ou de transformation T_R.

Le temps de transport est donné, à l'échelle a, par :

$$T_D \simeq \frac{a}{V}$$

ou, sous forme diffusante :

$$T_D \simeq \frac{a^2}{D}$$

si D est connu.

Le temps de réaction est lié au taux de réaction :

$$T_R = \frac{1}{\lambda}$$

Le rapport entre ces deux temps est le nombre de Damköhler :

$$Da = \frac{T_D}{T_R}$$

Lorsque :

$$Da \sim 1$$

on a :

$$T_D \sim T_R$$

Cette condition signifie que la diffusion et la réaction sont accordées. C'est une idée très importante : une structure dissipative stable apparaît lorsque les temps de transport et les temps de transformation se synchronisent.

On peut donc écrire :

$$une\ structure\ stable\ est\ une\ synchronisation\ de\ temps\ caractéristiques$$

Si la réaction est trop lente, la structure se disperse. Si elle est trop rapide, elle devient explosive ou instable. Si elle est accordée au transport, une forme peut émerger et se maintenir.

8. Du réel u à l'amplitude complexe ψ

Le passage d'une équation de réaction-diffusion à une équation de Schrödinger généralisée suppose de passer d'une variable réelle u à une amplitude complexe ψ. La relation la plus simple est :

$$u = |\psi)^2$$

On peut écrire :

$$\psi = \sqrt{u}e^{iS/S_0}$$

Ici, u est la densité observable : quantité de matière, d'énergie, de vorticité, de concentration ou d'activité.

La phase :

$$\theta = \frac{S}{S_0}$$

porte une information supplémentaire : cohérence, rythme, mémoire dynamique, orientation du flux.

Dans cette lecture :

Grandeur	Nature	Sens physique
u	Réelle et positive	Densité observable
$\sqrt{u}$	Amplitude	Intensité de la structure
S	Action	Organisation dynamique
S_0	Action d'échelle	Unité d'action de la structure
$\theta = S/S_0$	Phase	Rythme et cohérence
ψ	Complexe	Densité + phase + organisation

Le passage à ψ enrichit donc la description. L'équation de réaction-diffusion décrit la densité ; l'équation de Schrödinger généralisée décrit une densité porteuse d'une phase.

9. Vers une équation de Schrödinger généralisée

Dans la mécanique quantique ordinaire, l'équation de Schrödinger s'écrit :

$$i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\psi + U\psi$$

Dans la physique des processus que nous construisons, on remplace ħ par S_0 et la masse ponctuelle par une masse effective M_{eff} :

$$iS_0\frac{\partial\psi}{\partial t} = -\frac{S_0^2}{2M_{eff}}\Delta\psi + U_{eff}\psi + termes\ non\ linéaires$$

Si :

$$S_0 = 2M_{eff}D$$

alors :

$$\frac{S_0^2}{2M_{eff}} = 2M_{eff}D^2$$

En divisant par $2M_{eff}$, on retrouve une forme où le coefficient de diffusion joue un rôle central :

$$iD\frac{\partial\psi}{\partial t} = -D^2\Delta\psi + \frac{U_{eff}}{2M_{eff}}\psi + \cdots$$

Le terme de réaction $R(u)$ peut devenir un potentiel effectif ou une non-linéarité. Si $R(u) = \lambda u$, alors l'énergie associée au taux de réaction est :

$$E_R = S_0\lambda$$

Si la réaction est non linéaire, par exemple :

$$R(u) = \lambda u^p - \mu u^q$$

alors, avec $u = |\psi)^2$, elle conduit à des termes de type :

$$\alpha|\psi)^{2(p-1)}\psi - \beta|\psi)^{2(q-1)}\psi$$

L'équation généralisée devient alors :

$$iS_0\frac{\partial\psi}{\partial t} = -\frac{S_0^2}{2M_{eff}}\Delta\psi + U_{eff}\psi + \alpha|\psi)^{2(p-1)}\psi - \beta|\psi)^{2(q-1)}\psi$$

Cette équation n'est pas nécessairement une mécanique quantique microscopique. Elle est plutôt une équation d'organisation : elle décrit une structure dissipative dotée d'une densité, d'une phase, d'une action et de non-linéarités internes.

10. La structure dissipative comme base d'unification

La structure dissipative permet de penser ensemble des domaines très différents sans prétendre les réduire les uns aux autres. Un atome, un tourbillon, un système képlérien, une galaxie et l'Univers observable n'ont pas la même nature matérielle. Mais ils peuvent être décrits par les mêmes catégories dynamiques : masse effective, taille, vitesse, temps, diffusion, réaction, action.

Le tableau suivant résume cette lecture.

Structure	Grandeurs caractéristiques	Action interprétée
Atome	m_e, rayon de Bohr, vitesse de Bohr, temps de Bohr	Action quantique réduite : ħ
Tourbillon	Masse fluide engagée, taille du vortex, vitesse du flux, temps de retournement	Action turbulente de structure
Système képlérien	Masse orbitante, rayon orbital, vitesse orbitale, temps orbital réduit	Action gravitationnelle d'échelle
Galaxie	Masse galactique, rayon galactique, vitesse de rotation, temps dynamique	Action galactique effective
Univers observable	Masse cosmique, horizon observable, vitesse limite c, temps cosmologique	Action cosmologique globale

Ce tableau ne dit pas que tout est identique. Il dit plutôt que des formes très différentes peuvent être comparées par une même structure de processus.

On peut résumer cette idée par la relation :

$$structure = \left(M_{eff}, a, V, T, D, R(u), S_0\right)$$

C'est précisément cette forme qui peut servir de base d'unification.

11. La loi de temps propre des processus

Dans la discussion précédente, nous avons associé à chaque structure un temps de réaction T_R supposé accordé au temps de diffusion ou de transport :

$$T_R \simeq T_D \simeq \frac{a}{V}$$

Cette hypothèse est une condition d'équilibre dynamique :

$$Da \sim 1$$

En traçant T_R en fonction de l'échelle caractéristique a, on obtient une loi d'échelle approximative :

$$T_R \sim a^z$$

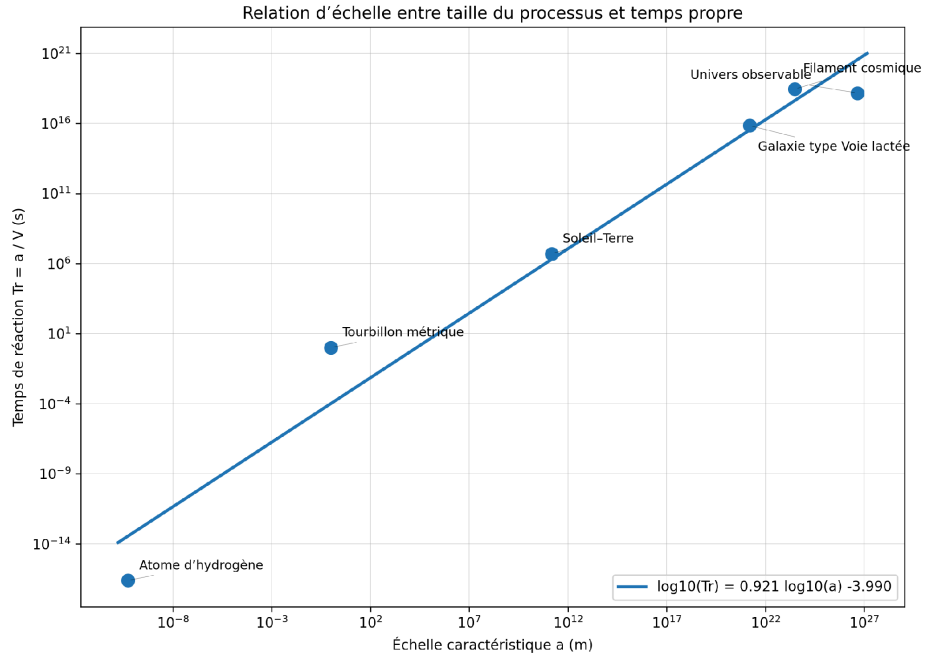
La régression obtenue sur les structures étudiées donnait :

$$log_{10}(T_R) = 0,92057 log_{10}(a) - 3,98970$$

ou, sous forme puissance :

$$T_R \simeq 1,024 \times 10^{-4} a^{0,92057}$$

avec a en mètres et T_R en secondes.



Régression log-log du temps de réaction en fonction de l'échelle caractéristique.

Le graphique montre l'alignement approximatif des structures retenues en échelle logarithmique. La pente proche de 1 suggère une loi de temps de traversée plutôt qu'une diffusion pure à coefficient constant.

Cette loi doit être interprétée avec prudence, car les points retenus appartiennent à des domaines physiques très différents. Mais elle suggère une idée forte : le temps de réalisation d'un processus dépend de la taille du système.

changer d'échelle, c'est changer de temporalité

L'atome possède un temps propre extrêmement court ; le tourbillon métrique un temps de l'ordre de la seconde ; le système planétaire un temps de traversée de plusieurs semaines ; la galaxie un temps de rotation de centaines de millions d'années ; l'Univers observable un temps cosmologique.

La physique des processus devient donc aussi une physique des temporalités.

12. Synthèse générale : une ontologie dynamique

Le cœur de ce raisonnement peut être formulé en une phrase :

la structure dissipative est l'atome conceptuel d'une physique des processus

Il ne s'agit pas d'un atome matériel, mais d'une brique de compréhension. Une structure dissipative est le lieu où une forme apparaît dans un flux, où une transformation devient stable, où une temporalité s'organise, où une action caractéristique peut être définie.

Elle permet de relier plusieurs familles de processus :

Famille de processus	Expression dans la structure dissipative
Propagation	Transport par les flux
Diffusion	Étalement et mélange
Réaction	Transformation interne
Dissipation	Perte et conversion d'énergie
Instabilité	Déclenchement d'une forme
Saturation	Limitation de la croissance
Stabilisation	Maintien d'un régime
Bifurcation	Passage vers une nouvelle forme
Émergence	Apparition d'une organisation
Phase	Cohérence dynamique de la structure

Cette grille permet de relire la nature non comme un empilement d'objets, mais comme une hiérarchie de processus stabilisés.

Une physique des substances demande : « de quoi est fait le monde ? »

Une physique des processus demande : « comment les formes se maintiennent-elles dans le devenir ? »

La réponse proposée ici est : par l'accord entre flux, diffusion, réaction, dissipation, temps propre et action.

Conclusion - L'être comme stabilité locale du devenir

La structure dissipative offre une base d'unification parce qu'elle exprime une idée simple et profonde : une forme est une dynamique stabilisée. Elle a une taille, une masse effective, un flux, un temps propre, une diffusion, une réaction, une phase et une action.

La constante de Planck généralisée S_0 devient alors l'action propre de cette structure.

L'équation de réaction-diffusion décrit sa fabrication et son maintien. L'équation de Schrödinger généralisée ajoute la phase et la cohérence. Le nombre de Damköhler exprime l'accord entre transformation et transport. La loi $T_R \sim a^z$ inscrit chaque forme dans une temporalité d'échelle.

On peut donc conclure par cette formulation :

une forme est un processus stabilisé, doté d'une action, d'un temps propre et d'une phase

C'est là que la physique des processus trouve sa puissance : elle ne nie pas les objets, mais elle les réinscrit dans le flux dont ils sont les formes provisoires.