Formaliser une physique des processus

Du systeme Ω a la forme dynamique generee

Introduction

Une physique des processus ne cherche pas a abolir l'objet. Elle cherche plutot a le requalifier. L'objet n'est plus considere comme une substance premiere, fixe, fermee sur elle-meme. Il devient le support provisoire d'un devenir, c'est-a-dire une portion du reel que l'on delimite afin de suivre ses variables d'etat, ses contraintes, ses flux, ses transformations et les formes qu'il produit.

Dans une physique des objets, l'analyse commence souvent par une question simple : de quoi parle-t-on ? On repond alors : un corps, une particule, un fluide, une onde, une charge, un solide, un gaz, un champ. Cette question reste necessaire. On ne pense pas sans objet, car il faut bien un support aux variables que l'on mesure et aux equations que l'on ecrit. Mais elle n'est pas suffisante. Comprendre un systeme physique, ce n'est pas seulement nommer l'objet ; c'est comprendre comment cet objet devient, comment il se maintient, comment il se transforme et quelle forme il genere sous contraintes.

La phrase centrale de cette approche peut etre formulee ainsi :

L'objet reste le centre de l'analyse, mais le processus devient le centre de l'intelligibilite.

Autrement dit, l'objet est necessaire pour definir le domaine d'etude. Le processus est necessaire pour comprendre ce qui s'y passe. L'objet porte les variables d'etat ; les operateurs transforment ces variables ; la frontiere impose des contraintes ; la solution de l'equation donne la forme dynamique du systeme.

Ce texte propose une formalisation progressive de cette physique des processus. Il partira de la definition du systeme et de sa frontiere, puis des variables d'etat qui le caracterisent. Il montrera ensuite comment les conditions initiales et les conditions aux limites selectionnent les formes admissibles. Il definira enfin la loi de transformation comme une composition d'operateurs elementaires, capables de faire passer le systeme de l'etat initial $t = 0$ a un etat courant $t = T$. La forme sera alors comprise comme la trajectoire du systeme dans son espace des etats.

1. Definir le systeme : le domaine Ω

La premiere operation de toute modelisation consiste a definir le systeme. Dans le langage mathematique, on peut noter ce systeme :

$$\Omega$$

Le symbole Ω designe le domaine etudie. Ce domaine peut etre un volume de fluide, une piece mecanique, un circuit electrique, une cavite electromagnetique, une barre chauffee,

une cellule vivante, une zone atmospherique, un plasma, une structure aeronautique ou meme, par analogie, un systeme cognitif ou social.

Definir Ω, c'est toujours faire une coupe dans le reel. On decide que telle region, tel objet, tel assemblage ou tel milieu constitue le systeme a etudier. Cette coupe est une operation intellectuelle. Elle ne signifie pas que le systeme est absolument separe du reste du monde. Elle signifie simplement que l'on choisit un domaine pour pouvoir decrire ce qui s'y passe.

Un systeme physique peut donc etre compris comme une portion delimitee du reel. Mais cette portion n'est pas un objet mort. Elle est un domaine de transformation. Elle est traversee par des flux, soumise a des contraintes, decrite par des variables d'etat, gouvernee par des lois et capable de produire des formes.

On peut donc definir un systeme physique de maniere generale comme suit :

Un systeme physique est un domaine Ω, delimite par une frontiere $\partial\Omega$, decrit par des variables d'etat $q(x,t)$, soumis a des conditions initiales et aux limites, et transforme dans le temps par une loi composee d'operateurs elementaires.

Cette definition a l'avantage de rester valable pour de nombreux domaines de la physique. Elle s'applique a la mecanique, a la thermique, a la mecanique des fluides, a l'electromagnetisme, a la mecanique quantique, aux systemes reaction-diffusion et aux systemes complexes.

2. La frontiere : $\partial\Omega$ comme operateur de selection

Un systeme n'est jamais seulement defini par son interieur. Il est aussi defini par sa frontiere. On note cette frontiere :

$$\partial\Omega$$

La frontiere est essentielle, car elle determine comment le systeme communique avec l'exterieur. Elle peut etre une paroi, une surface, une membrane, un conducteur, une interface, un bord geometrique, une condition de contact, une entree, une sortie, une surface libre, une limite de confinement ou une limite fonctionnelle.

Dans une physique des objets, la frontiere est souvent vue comme une simple limite. Dans une physique des processus, elle devient beaucoup plus importante : elle est ce qui selectionne les formes possibles. Elle impose des relations sur les variables d'etat. Elle fixe certaines valeurs, certains flux, certaines symetries ou certaines contraintes.

On peut ecrire de maniere generale une condition aux limites sous la forme :

$$B(q) = 0 sur \partial\Omega$$

ou, plus generalement :

$$B(q, \nabla q, t) = g(t) sur \partial\Omega$$

Cette ecriture signifie que la frontiere impose une relation sur l'etat du systeme et parfois sur ses gradients. Par exemple, une paroi peut imposer une vitesse nulle a un fluide. Une extremite de corde peut imposer un deplacement nul. Une surface peut imposer une temperature fixe. Une interface peut imposer une continuite de flux. Un conducteur peut imposer un potentiel electrique. Une cavite peut imposer des modes electromagnetiques admissibles.

La frontiere n'est donc pas passive. Elle participe a la morphogenese du systeme. Elle selectionne, parmi toutes les formes mathematiquement possibles, celles qui sont compatibles avec le domaine et ses contraintes.

On peut resumer cette idee ainsi :

$$loi\ physique\ +\ frontiere\ =\ formes\ admissibles$$

Dans une corde vibrante, la loi d'onde ne suffit pas a produire les modes propres. Ce sont les extremites fixees qui selectionnent les sinusoides admissibles. Dans une cavite electromagnetique, les equations de Maxwell ne suffisent pas a donner les modes. Ce sont les parois conductrices qui imposent les conditions aux limites. Dans une particule quantique confinee dans une boite, l'equation de Schrodinger ne suffit pas. Ce sont les conditions $\psi(0) = \psi(L) = 0$ qui produisent la quantification des niveaux.

La phrase forte est donc :

La frontiere n'est pas l'enveloppe passive d'un objet ; elle est l'un des operateurs de selection de la forme.

3. Les variables d'etat : ce qui decrit le systeme

Une fois le systeme Ω defini, il faut dire ce qui permet d'en decrire l'etat. Ces grandeurs sont les variables d'etat. On les notera de maniere generale :

$$q(x, t)$$

La variable q peut etre scalaire, vectorielle ou tensorielle. Elle peut representer une temperature, une pression, une densite, une concentration, un champ de vitesse, un champ electrique, un champ magnetique, un deplacement, une deformation, une fonction d'onde, une densite de probabilite ou tout autre champ pertinent.

Dans un systeme simple de mecanique ponctuelle, les variables d'etat peuvent etre la position et la vitesse :

$$x(t), v(t)$$

Dans un systeme thermique, la variable d'etat principale peut etre le champ de temperature :

$$T(x, t)$$

Dans un fluide, on utilise souvent un champ de vitesse, une pression et une densite :

$$v(x,t), p(x,t), \rho(x,t)$$

En electromagnetisme, les variables centrales sont les champs electrique et magnetique, ainsi que les charges et les courants :

$$E(x,t), B(x,t), \rho(x,t), J(x,t)$$

En mecanique quantique, la variable d'etat est la fonction d'onde ou l'etat quantique :

$$\psi(x,t)$$

Ainsi, l'objet physique ne se comprend pas directement comme une chose. Il se comprend par les variables qui permettent de suivre son devenir. L'objet est le support ; les variables d'etat sont les coordonnees de son devenir.

Le tableau suivant resume cette distinction.

Domaine physique	Systeme Ω	Variables d'etat typiques	Formes possibles
Mecanique	corps ou systeme de corps	$x(t), v(t), p(t)$	trajectoire, orbite, oscillation
Thermique	solide, barre, volume	$T(x,t)$	profil thermique, relaxation
Fluides	volume fluide	$v(x,t), p(x,t), \rho(x,t)$	ecoulement, vortex, turbulence
Electromagnetisme	domaine spatial avec sources	$E(x,t), B(x,t), \rho(x,t),$	champ, onde, mode, rayonnement
Quantique	domaine de confinement	$\psi(x,t)$	etat propre, paquet d'onde, interference
Reaction-diffusion	milieu chimique ou biologique	$u(x,t), v(x,t)$	front, motif, tache, onde chimique

Ce tableau montre que l'objet reste present, mais il est requalifie. Il devient le domaine dans lequel des variables d'etat evoluent. Ce ne sont pas les noms des objets qui expliquent les formes ; ce sont les variables d'etat, leurs lois de transformation et leurs contraintes.

4. Les conditions initiales : l'etat du systeme a $t = 0$

La transformation commence toujours quelque part. Il faut donc definir l'etat initial du systeme. On l'ecrit generalement :

$$q(x,0) = q_0(x)$$

Cette condition initiale donne la configuration du systeme a l'instant $t = 0$. Elle peut etre une position et une vitesse initiales en mecanique, une temperature initiale dans une barre, une concentration initiale dans un milieu reaction-diffusion, une fonction d'onde initiale en mecanique quantique, ou un champ de vitesse initial dans un fluide.

Les conditions initiales jouent un role decisif. Une meme loi physique, appliquee au meme domaine, peut produire des formes differentes selon l'etat initial. En mecanique, la trajectoire d'un projectile depend de sa vitesse initiale. En fluides, la turbulence peut dependre des perturbations initiales. En reaction-diffusion, un motif peut dependre des fluctuations initiales. Dans un systeme non lineaire, une petite difference initiale peut produire une grande difference future.

La transformation du systeme peut alors etre representee par :

$$q_0 \rightarrow q(t) \rightarrow q(T)$$

Cela signifie que le systeme part d'un etat initial q_0, evolue vers un etat courant $q(t)$, puis atteint a l'instant T une configuration $q(T)$. Cette configuration peut etre un etat final, un etat transitoire, un etat stationnaire, un attracteur, un regime oscillant ou une structure emergente.

Dans une physique des processus, l'instant initial n'est pas un simple detail technique. Il est le point de depart de la trajectoire du systeme dans l'espace des etats.

5. La loi de transformation : une grammaire d'operateurs

La loi physique decrit comment les variables d'etat changent dans le temps. Sous forme generale, on peut l'ecrire :

$$\frac{\partial q}{\partial t} = L[q]$$

Ici, L designe la loi de transformation. Mais cette loi n'est pas forcement un bloc indivisible. Elle est souvent composee de plusieurs transformations elementaires. Chacune de ces transformations peut etre representee par un operateur.

On peut donc ecrire :

$$L = O_1 + O_2 + O_3 + \cdots$$

ou encore :

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \sum_i O_i[q]$$

Chaque operateur O_i correspond a une transformation elementaire : transport, diffusion, reaction, couplage, dissipation, propagation, memoire, projection, contrainte, source ou force.

Cette idee est centrale. Elle permet de lire les equations complexes non comme des formules opaques, mais comme des compositions de gestes elementaires du reel. Un operateur est la forme mathematique d'une transformation.

On peut alors dire :

Les operateurs sont les verbes mathematiques du reel : ils disent comment l'Univers transforme ses champs pour faire apparaitre des formes.

6. Les operateurs elementaires : l'alphabet du devenir

Les transformations elementaires peuvent etre decrites par des operateurs typiques. Ces operateurs forment une sorte d'alphabet de la physique des processus.

Transformation elementaire	Operateur typique	Sens intuitif
Variation temporelle	∂_t	Ce qui change localement dans le temps
Gradient	∇	Ce qui cree une pente ou une direction de variation
Divergence	$\nabla \cdot$	Ce qui entre, sort ou se disperse depuis un volume
Rotationnel	$\nabla \times$	Ce qui tourne, circule ou cree une boucle
Laplacien	$\Delta = \nabla^2$	Ce qui diffuse, lisse ou homogenise
Transport convectif	$v \cdot \nabla$	Ce qui est transporte par un mouvement
Source ou reaction	$R(q)$	Ce qui est produit ou transforme localement
Dissipation	$-\ \gamma q, \mu \Delta q$	Ce qui amortit, disperse ou transforme en chaleur
Interaction conservative	$-\ \nabla V$	Ce qui attire, repousse ou oriente selon un potentiel
Propagation ondulatoire	$\partial_t^2 - c^2 \Delta$	Ce qui se propage comme une onde
Memoire	$\int_0^t K(t - \tau) q(\tau) d\tau$	Ce par quoi le passe agit sur le present
Projection ou actualisation	$P_i \psi$	Ce qui selectionne un etat parmi des possibles

Ce tableau doit etre commente avec soin. Le gradient ∇ indique une pente : un systeme evolue souvent parce qu'il existe une difference de potentiel, de pression, de temperature, de concentration ou d'energie. La divergence $\nabla \cdot$ est liee aux bilans : elle dit ce qui sort ou entre d'un volume. Le rotationnel $\nabla \times$ decrit la circulation et les boucles, ce qui est essentiel en electromagnetisme et en mecanique des fluides. Le laplacien Δ est l'operateur typique de la diffusion : il lisse les differences et tend a homogeniser un champ. Les termes de reaction ou de source produisent ou transforment localement. Les termes de memoire rappellent que le passe peut rester actif dans le present.

Une loi physique complexe est donc rarement une seule transformation. Elle est une composition d'operateurs. La forme finale depend de cette composition, mais aussi du domaine, de la frontiere et des conditions initiales.

7. Les equations de Maxwell : un champ comme composition d'operateurs

Les equations de Maxwell sont un exemple remarquable. L'objet physique est le champ electromagnetique, decrit par les variables :

$$E(x,t), B(x,t), \rho(x,t), J(x,t)$$

Les equations sont :

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$$

Ces equations se decomposent naturellement en transformations elementaires.

Equation	Type de relation	Transformation associee
$\nabla \cdot E = \rho/\varepsilon_0$	contrainte de champ	la charge est source du champ electrique
$\nabla \cdot B = 0$	contrainte de structure	le champ magnetique n'a pas de source isolee
$\nabla \times E = -\partial_t B$	couplage dynamique	une variation de B engendre une circulation de E
$\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \varepsilon_0 \partial_t E$	couplage dynamique	un courant ou une variation de E engendre une circulation de B
$\partial_t \rho + \nabla \cdot J = 0$	conservation	la charge electrique se conserve

Ce tableau montre comment separer l'objet et les transformations. L'objet est le champ electromagnetique. Les transformations sont la source, la contrainte, la circulation, le couplage, la conservation et la propagation.

Lorsque l'on se place dans le vide, sans charge ni courant, les deux equations dynamiques se referment en boucle. La variation de B engendre une circulation de E, et la variation de E engendre une circulation de B. Cette boucle donne naissance a une onde electromagnetique.

On obtient alors une equation d'onde :

$$\left(\partial_t^2 - c^2\Delta\right)E = 0$$

et de meme pour B. La lumiere apparait comme une forme propagative nee du couplage dynamique entre les champs electrique et magnetique.

La phrase forte est :

Maxwell montre que l'electromagnetisme n'est pas seulement une theorie des charges et des forces ; c'est une theorie du champ comme processus auto-couple capable de produire la lumiere.

8. Les equations de Navier-Stokes : l'ecoulement comme forme generee

La mecanique des fluides fournit un autre exemple majeur. L'objet physique est le fluide, mais il n'est pas compris comme une chose uniforme. Il est decrit par des champs :

$$v(x,t), p(x,t), \rho(x,t)$$

L'equation de conservation de la masse est :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0$$

Pour un fluide incompressible, elle devient :

$$\nabla \cdot v = 0$$

Cette equation est une contrainte : le champ de vitesse ne doit pas creer localement de compression ou de dilatation du fluide.

L'equation de quantite de mouvement de Navier-Stokes peut s'ecrire :

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v\right) = -\nabla p + \mu\Delta v + f$$

Chaque terme correspond a une transformation elementaire.

Terme	Transformation	Sens physique
$\partial_t v$	evolution locale	la vitesse change au point considere
$v \cdot \nabla v$	transport convectif	le fluide transporte sa propre vitesse
$-\nabla p$	gradient de pression	la pression accelere le fluide
$\mu\Delta v$	diffusion visqueuse	la viscosite diffuse et dissipe la quantite de mouvement
f	forcage exterieur	forces de volume, gravite ou autres actions
$\nabla \cdot v = 0$	contrainte	incompressibilite

Terme	Transformation	Sens physique
conditions aux limites	selection de forme	parois, entrees, sorties, vitesses imposees

Une fois encore, l'equation complexe se lit comme une composition de transformations. L'ecoulement produit depend de la geometrie, des parois, des vitesses imposees, des gradients de pression, de la viscosite et du regime dynamique. Un profil de Poiseuille, une couche limite, un vortex, un sillage ou une turbulence sont des formes generees par cette composition d'operateurs sous conditions aux limites.

La phrase forte est :

La mecanique des fluides est la morphogenese des ecoulements sous contraintes de frontiere, de pression, de viscosite et d'inertie.

9. Objet, variable, transformation, forme : les quatre niveaux de lecture

Pour eviter la confusion entre objet et transformation, il est utile de distinguer quatre niveaux.

Niveau	Question	Exemple Maxwell	Exemple Navier-Stokes
Objet physique	De quoi parle-t-on ?	champ electromagnetique	fluide
Variables d'etat	Comment decrit-on l'etat ?	E, B, ρ, J	v, p, ρ
Transformations	Quels processus agissent ?	source, induction, propagation, conservation	transport, pression, viscosite, dissipation
Formes generees	Qu'est-ce qui apparait ?	onde, mode, rayonnement	profil, vortex, turbulence

Ce tableau resume l'esprit de la methode. L'objet n'est pas supprime. Il reste le support des variables d'etat. Mais la comprehension vient des transformations. Le champ electromagnetique devient intelligible par les transformations de Maxwell. Le fluide devient intelligible par les transformations de Navier-Stokes.

La phrase centrale est :

L'objet est ce qui porte le devenir ; la transformation est ce qui fait advenir la forme.

10. Le probleme complet : domaine, loi, conditions initiales et frontiere

On peut maintenant assembler les pieces du raisonnement. Un probleme physique complet peut etre ecrit sous la forme suivante :

$$\{\partial_t q = L[q]\ dans \Omega, q(x,0) = q_0(x)\ condition\ initiale, B(q, \nabla q, t) = g(t)\ sur \partial\Omega.\ )$$

Cette formulation dit tout l'essentiel.

La premiere ligne donne la loi de transformation dans le domaine Ω. La deuxieme ligne donne l'etat initial du systeme. La troisieme ligne donne les conditions aux limites imposees par la frontiere $\partial\Omega$. La solution $q(x,t)$ est alors la forme dynamique du systeme.

On peut aussi exprimer cette idee sous forme conceptuelle :

$$\Omega, \partial\Omega, q_0, L, B \rightarrow q(x,t)$$

Le domaine, la frontiere, l'etat initial, la loi et les contraintes produisent la forme dynamique.

Cette equation conceptuelle est le coeur de la physique des processus. Elle montre que la forme ne vient jamais de la loi seule. Elle vient de la rencontre entre une loi, un domaine, une frontiere, un etat initial et des contraintes.

11. La forme comme trajectoire du systeme dans le temps

Vous avez propose une idee tres importante : la forme est la trajectoire du systeme dans le temps. Cette phrase doit etre comprise dans un sens large.

En mecanique ponctuelle, la trajectoire est une courbe dans l'espace :

$$x(t)$$

Mais pour un systeme de champs, la trajectoire n'est pas seulement une ligne. Elle est l'evolution complete d'une configuration spatiale :

$$\{q(x,t)\}_{t\in[0,T)}$$

Cela signifie que la forme est toute l'histoire organisee du champ entre l'instant initial et l'instant courant. Un profil thermique qui se lisse, un fluide qui developpe un vortex, un champ electromagnetique qui se propage, une concentration chimique qui produit un motif, une fonction d'onde qui evolue dans un potentiel : toutes ces situations sont des trajectoires dans un espace des etats.

La forme peut donc etre spatiale, temporelle ou spatio-temporelle. Elle peut etre une trajectoire, un profil, un mode, une onde, un vortex, un motif, un attracteur ou une distribution de champ.

La phrase forte est :

La forme n'est pas un objet pose devant nous ; elle est la trajectoire d'un systeme dans le temps, sous l'action d'operateurs de transformation et sous la selection de sa frontiere.

12. Les archetypes physiques dans ce formalisme

Un archetype physique est alors un cas particulier tres simple de cette formulation generale. Dans un archetype physique, le domaine est simple, la frontiere est simple, la loi est simple, l'etat initial est simple, et la solution est calculable.

On peut l'ecrire ainsi :

$$\Omega simple, \partial\Omega simple, Lsimple, q_0 simple \Rightarrow q(x,t) calculable$$

La corde vibrante fixee aux deux extremites est un archetype. Le domaine est un segment $[0, L)$. La loi est l'equation d'onde. Les conditions aux limites imposent $u(0,t) = u(L,t) = 0$. Les formes propres sont des sinusoides.

La particule dans une boite est un autre archetype. Le domaine est $[0, L)$, la loi est l'equation de Schrodinger, les conditions aux limites imposent $\psi(0) = \psi(L) = 0$, et les formes propres sont :

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$$

avec des energies discretes :

$$E_n = \frac{n^2 h^2}{8mL^2}$$

Ce cas est exemplaire : la frontiere produit une quantification. La forme de l'etat quantique est selectionnee par le domaine.

Un archetype physique est donc une forme elementaire du devenir calculable. Il permet de comprendre, dans une situation idealisee, comment la loi et la frontiere engendrent une forme.

13. Les systemes reels : composition d'operateurs et frontieres complexes

Un systeme reel est plus difficile qu'un archetype, car il combine plusieurs operateurs, plusieurs zones, plusieurs echelles, plusieurs contraintes et plusieurs frontieres. La loi L n'est plus simple. Elle peut etre composee d'operateurs mecaniques, thermiques, fluides, electromagnetiques, chimiques et dissipatifs.

On peut ecrire :

$$L = L_{mecanique} + L_{thermique} + L_{fluide} + L_{electromagnetique} + L_{controle} + \cdots$$

Cette composition explique pourquoi les systemes industriels, biologiques ou climatiques sont difficiles. Ils ne relevent pas d'un seul archetype, mais d'un assemblage de processus.

La methode consiste alors a identifier les zones du systeme, les variables dominantes, les operateurs principaux et les interfaces entre zones. Dans une zone, la diffusion thermique peut dominer. Dans une autre, la flexion mecanique. Dans une autre, l'ecoulement fluide.

Dans une interface, le contact ou l'echange thermique. Dans une cavite, les modes propres. Dans une couche limite, l'instabilite.

On peut resumer cette approche par :

$$systeme\ reel\ =\ assemblage\ d'archetypes\ physiques\ couples$$

Le danger est de choisir le mauvais archetype, ou de l'appliquer hors de son domaine de validite. Il faut donc toujours associer a chaque archetype ses hypotheses : linearite, petites perturbations, milieu homogene, regime stationnaire, faible nombre de Reynolds, absence de couplage fort, etc.

La phrase forte est :

Comprendre un systeme reel, c'est reconnaitre les archetypes physiques qui travaillent en lui, puis comprendre comment leurs interfaces produisent une forme globale.

14. Applications industrielles : de la geometrie a la simulation

Cette formalisation eclaire tres bien la conception industrielle. Un logiciel de conception comme CATIA definit d'abord la geometrie, c'est-a-dire le domaine Ω et sa frontiere $\partial\Omega$. Il cree la forme geometrique : surfaces, volumes, epaisseurs, perçages, cavites, profils, assemblages, interfaces.

Mais une geometrie n'est pas encore un comportement physique. Pour comprendre ce que cette forme va devenir sous contraintes, il faut lui appliquer des lois physiques. C'est le role des logiciels de simulation : elements finis, volumes finis, dynamique des fluides, thermique, electromagnetisme, fatigue, vibrations, contact, multiphysique.

On obtient alors :

$$geometrie\ +\ materiaux\ +\ lois\ physiques\ +\ conditions\ aux\ limites\ \rightarrow\ champs\ calcules$$

Ces champs peuvent etre des contraintes, des deformations, des temperatures, des vitesses, des pressions, des frequences propres, des modes de vibration, des flux ou des zones critiques.

La simulation numerique est donc une maniere de calculer la trajectoire du systeme dans son espace des etats lorsque le probleme est trop complexe pour etre resolu analytiquement.

Les problemes scolaires ou de classes preparatoires sont des archetypes calculables. Les problemes industriels sont des compositions d'archetypes dans des geometries complexes. Les methodes numeriques permettent de passer de l'un a l'autre.

On peut dire :

La physique de prepa montre la grammaire pure des processus ; la simulation numerique montre les phrases complexes que cette grammaire produit dans le reel.

15. Le role de l'IA dans cette physique des processus

L'intelligence artificielle peut jouer un role important dans ce cadre. Elle ne remplace ni la loi physique, ni la simulation, ni le jugement de l'ingenieur. Mais elle peut aider a explorer l'espace des formes possibles, reconnaitre les archetypes dominants, accelerer les simulations et interpreter les resultats.

Dans un cycle industriel, l'IA peut intervenir a plusieurs niveaux. Elle peut aider a generer des geometries possibles en fonction d'un cahier des charges. Elle peut proposer des variantes plus legeres, plus resistantes, plus economes en matiere ou mieux adaptees a une fabrication donnee. Elle peut aussi aider a identifier les zones critiques d'un systeme, a suggerer les operateurs physiques dominants, a detecter des conditions aux limites incoherentes ou a interpreter les cartes de contraintes, de flux, de temperature ou de vitesse.

On peut representer le cycle ainsi :

$$intention\ humaine + IA\ generative + lois\ physiques + simulation + diagnostic + optimisation \rightarrow$$

Mais il faut garder une hierarchie claire :

L'IA propose, la physique selectionne, l'ingenieur juge.

Une IA peut generer une forme seduisante mais physiquement invalide. Une simulation peut donner un resultat precis mais fonde sur de mauvaises hypotheses. L'humain reste necessaire pour definir le besoin, choisir les contraintes pertinentes, valider les hypotheses, arbitrer les compromis et assumer la decision.

Dans ce cadre, l'IA devient un catalyseur de morphogenese industrielle. Elle accelere l'exploration des possibles, mais la viabilite de la forme reste determinee par les lois physiques et par les conditions aux limites.

Conclusion generale

La physique des processus ne supprime pas l'objet. Elle le remet a sa juste place. L'objet est le domaine Ω, avec sa frontiere $\partial\Omega$. Il est represente par des variables d'etat. Ces variables sont soumises a des conditions initiales et a des conditions aux limites. Leur evolution est gouvernee par une loi de transformation L, elle-meme composee d'operateurs elementaires.

La forme n'est donc pas donnee d'avance. Elle est produite par le systeme en devenir. Elle est la trajectoire des variables d'etat dans le temps, sous l'action des operateurs et sous la selection de la frontiere.

On peut resumer tout le modele par :

$$\Omega, \partial\Omega, q_0, L, B \rightarrow q(x,t)$$

ou encore :

$$domaine + frontiere + etat\ initial + operateurs + contraintes \rightarrow forme\ dynamique$$

La phrase finale pourrait etre :

Un systeme physique est un domaine contraint dont les variables d'etat sont mises en devenir par une composition d'operateurs ; la forme est l'histoire de ce devenir.