



Le comportement des systèmes loin de l'équilibre : hystérésis, bifurcations, catastrophes

Serge FINCK

Responsable des études prospectives Groupe PSI

psi@groupepsi.com

Résumé :

Les systèmes dynamiques loin de l'équilibre présentent des comportements complexes caractérisés par la non-linéarité et des instabilités pouvant engendrer des changements brusques d'état. L'article présente trois concepts clés permettant d'éclairer ces comportements : l'hystérésis, les bifurcations et les catastrophes. Des exemples d'application dans les domaines de la physique, de l'écologie et des sciences sociales montrent la robustesse de ces concepts, leurs articulations, et les transpositions qu'ils permettent entre des disciplines différentes.

Abstract: The Behaviour of Systems far from Equilibrium: Hysteresis, Bifurcations, Catastrophes

Dynamic systems far from equilibrium exhibit complex behaviours characterised by non-linearity and instabilities that can lead to sudden changes in state. The article presents three key concepts that shed light on these behaviours: hysteresis, bifurcations and catastrophes. Examples of applications in physics, ecology and social sciences demonstrate the robustness of these concepts, the articulations between them and the transpositions they enable between different disciplines.

Mots-clés : Systèmes loin de l'équilibre – Non-linéaire – Hystérésis – Théorie des bifurcations – Théorie des catastrophes – Équation logistique.

Key-words: Systems far from Equilibrium – Non-linear – Hysteresis – Bifurcation Theory – Catastrophe Theory – Logistic Equation.

INTRODUCTION

Les systèmes dynamiques loin de l'équilibre sont au cœur de nombreux phénomènes complexes difficiles à prédire. Contrairement aux systèmes proches de l'équilibre dans lesquels des perturbations entraînent des réponses souvent linéaires et réversibles, les systèmes dans des conditions hors de l'équilibre peuvent présenter des comportements non linéaires, des instabilités, des changements brusques de régime ou de structure et une dépendance à leur histoire. Des systèmes physiques ou chimiques comme les structures dissipatives montrent de tels comportements, des écosystèmes comme des forêts peuvent être l'objet de catastrophes. Les systèmes sociaux qui sont des systèmes ouverts, parcourus par des flux d'énergie (ressources, technologies), de matière (biens, populations) et d'information (connaissances, communications) peuvent manifester des comportements qui les amènent loin de l'équilibre, changer d'état ou bifurquer.

Parmi les concepts clés pour comprendre ces dynamiques complexes, on distingue notamment l'hystérésis, les bifurcations et les catastrophes. Ces trois concepts, bien que distincts, sont souvent liés. Par exemple, un système qui admet plusieurs états peut bifurquer, le passage de l'un à l'autre s'effectuant avec une hystérésis. De même, les catastrophes correspondent généralement à une bifurcation provoquant un saut d'état, souvent accompagné

d'hystérésis. L'article propose de présenter successivement ces trois concepts fondamentaux en les illustrant d'exemples d'application dans les domaines de la physique, de l'écologie et des sciences sociales, ce qui permettra une discussion sur les transpositions qu'ils permettent entre des disciplines différentes. En conclusion, nous reviendrons sur les questions que l'usage de ces concepts laissent en suspens.

1. HYSTÉRÉSIS

Le terme d'hystérésis (du grec *hústeresis*, « lacune, déficience, besoin », lui-même dérivé de *hústeros*, « suivant, tardif ») désigne l'idée générale d'un retard de l'effet sur la cause. Il décrit la propriété d'un système présentant des paramètres d'entrée (causes) et de sortie (effets), lorsque la variation d'un paramètre d'entrée dans un sens, puis dans un autre (une augmentation suivie d'une diminution, par exemple) détermine des trajectoires différentes du paramètre de sortie : le système manifeste un retard dans la réponse aux sollicitations extérieures, ce qui implique une forme de mémoire.

On doit au physicien James Alfred Ewing (1855-1935) l'introduction du terme d'hystérésis pour qualifier le comportement de matériaux ferromagnétiques dans lesquels subsiste une aimantation après la suppression du champ magnétique qui leur a été appliqué. Pour supprimer cette aimantation rémanente, il faut générer un champ magnétique de polarité inverse. Lorsque l'on représente la fonction reliant l'induction magnétique (M) générée par le champ magnétique appliqué (H), on constate qu'elle prend la forme d'une boucle fermée. Ainsi pour une valeur donnée de (H), l'induction magnétique (M) présente deux valeurs possibles selon que (H) augmente ou diminue : c'est le cycle d'hystérésis (fig. 1).

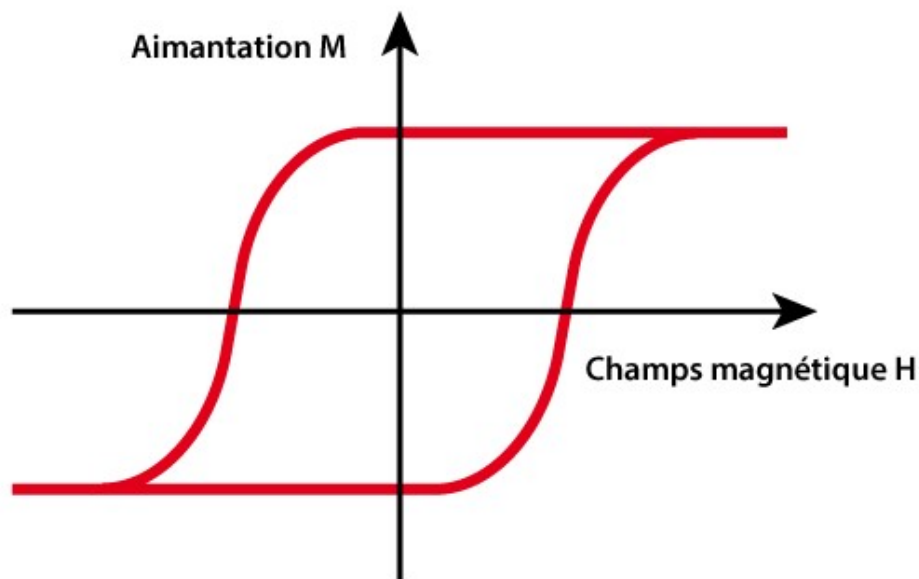


Fig. 1 – Cycle d'hystérésis se manifestant lors d'une variation cyclique de la cause (exemple de l'aimantation d'un matériau ferromagnétique)

Dans le cas d'un système pouvant présenter plusieurs états stables ou régimes de fonctionnement, le basculement d'un état (A) à un autre état (B) ne se fait que lorsque la valeur d'un ou de plusieurs paramètres d'entrée varie au-delà d'un certain seuil de perturbation ΔX_1 . Sous ce seuil critique, le système reste dans l'état d'équilibre premier, il ne change pas de configuration ou de structure. Lors du dépassement de ce seuil, le système change de régime, est déséquilibré puis fonctionne dans l'état (B). Le système ne rebasculera dans l'état (A) précédent (à condition que le processus de changement ne soit pas irréversible) que si la perturbation ou la modification de paramètre dépasse un seuil ΔX_2 . La différence entre les seuils ΔX_1 et ΔX_2 correspond à l'hystérésis. Ceci peut être visualisé par une balle représentant l'état du système se déplaçant dans un paysage comportant des vallées symbolisant les états

stables et des cols à franchir symbolisant les seuils critiques, les phases de non-équilibre entre deux états stables. C'est la métaphore du « ball-and-cup », dont Hugues Petitjean, dans ce même numéro, rappelle la portée heuristique (Petitjean 2025).

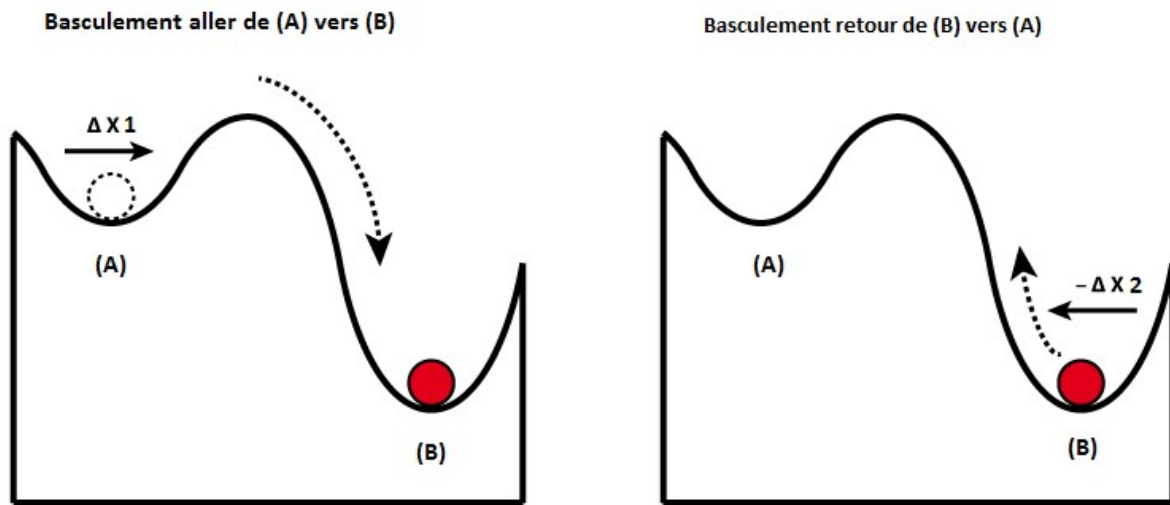


Fig. 2 – Hystérésis montrant la différence de seuil entre le basculement d'un état de départ (A) vers un état successif (B) et basculement retour vers l'état initial (A) (© www.groupepsi.com)

Les exemples ci-dessous issus des domaines de la physique, de l'écologie et des sciences sociales permettent d'illustrer la généralité du phénomène d'hystérésis.

1.1. L'hystérésis en physique

En physique, l'hystérésis apparaît dans des systèmes matériels qui sont l'objet de certains frottements interne, ou de retards, soit des dissipations d'énergie ou des non-linéarités dans leur comportement face à des modifications de grandeurs liées à l'environnement, tels que :

- L'hystérésis élastique ou mécanique : certains matériaux présentent un comportement élastique non linéaire. Par exemple, un caoutchouc étiré puis relâché ne reprend pas sa forme initiale selon le même chemin contrainte-déformation.

- L'hystérésis thermique : un exemple bien connu des élèves de lycée qui ont suivi les travaux pratiques de SVT est celui de l'eau très pure qui peut être refroidie en dessous de 0°C sans geler puis cristallise soudainement. A l'inverse, la glace ainsi obtenue peut être chauffée au-delà de 0°C sans fondre immédiatement. Ce retard du changement de phase est une forme d'hystérésis thermique liée à l'existence d'une barrière d'énergie entre les états stables « eau liquide » et « glace ». Une perturbation d'un ordre supérieur est nécessaire pour déclencher la transition dans un sens ou dans l'autre, d'où une différence entre le seuil amont et aval.

Pour application, on peut noter que des circuits électroniques à hystérésis ont été conçus afin de filtrer des signaux logiques (0 ou 1) bruités pour obtenir des signaux propres exploitables dans le traitement des données. Le comparateur à contre-réaction positive appelé « trigger de Schmitt » présente deux seuils de basculements : un seuil lorsque la tension d'entrée dépasse un seuil de référence haut et un seuil de référence bas lorsque la tension d'entrée diminue, stabilisant ainsi la tension de sortie entre deux états logiques bien définis.

1.2. L'hystérésis en écologie

En écologie et en sciences de l'environnement, l'hystérésis est un concept utile permettant de comprendre les changements d'état d'un système, c'est-à-dire quand il bascule d'un état d'équilibre vers un autre en passant par une phase transitoire. De nombreux écosystèmes peuvent exister sous plusieurs états stables différents, dits alternatifs, sous des conditions environnementales semblables. En effet, une perturbation suffisamment forte dans

l'environnement peut provoquer le basculement du système d'un état vers un autre. Dès lors que le système est entré dans ce nouvel état, il peut ne pas revenir spontanément à son état d'équilibre précédent, ou y revenir difficilement, même quand la perturbation est supprimée (Scheffer & al. 2001). Au-delà d'un certain seuil de perturbation, le système peut changer de structure : dans ce cas, revenir dans l'état antérieur nécessite de franchir un autre seuil souvent plus extrême, ce qu'exprime le schéma ci-dessus, figure 2.

Il est donc crucial de prendre en compte ces dynamiques dans la gestion environnementale, sous peine d'ignorer des changements qui peuvent s'avérer irréversibles. Par exemple, des récifs coralliens peuvent basculer d'un état corail sain à un état dominé par les algues à la suite d'une perturbation liée à la température, une éruption volcanique ou une pollution ou encore une pêche trop intensive de poissons herbivores... et ne pas retourner à l'état de récif stade corallien même si la température ou la qualité de l'eau redeviennent favorables ou si la pêche a été réduite. Dans un autre contexte, la désertification de zones de savane comportant herbes et arbres ou des forêts illustre un processus d'hystérésis : une sécheresse prolongée, un feu de forêt... peuvent conduire à la perte de végétation et à l'érosion des sols si un seuil critique est atteint, et dans ce cas, même si les pluies reviennent à la normale, la recolonisation par la végétation peut être très lente, voire impossible, car le système sol-végétation aura basculé dans un autre état stable, celui de terre aride.

1.3. L'hystérésis en sciences sociales

Le concept d'hystérésis a été transposé en sciences sociales, notamment par Pierre Bourdieu (1930-2002). Celui-ci adopte le terme pour désigner un décalage dans l'évolution du comportement social des individus dans le temps. La théorie de l'action de Bourdieu est basée sur le concept d'*habitus*, qui recouvre un ensemble de perceptions, de dispositions sociales ou d'habitudes d'actions que les individus ont acquis sous l'influence de leurs conditions sociales (Bourdieu 1980). Comme il s'agit de processus sociaux qui se déploient sur le long terme, l'*habitus* change lentement. Ainsi, lors d'une crise économique ou lorsque l'environnement social change rapidement, l'*habitus* peut ne plus être bien adapté aux nouvelles circonstances, mais les individus continuent à penser et à agir en fonction de leurs anciens schémas cognitifs, déphasés par rapport aux nouvelles conditions objectives de l'espace social. Ce décalage temporel est appelé : « hystérésis de l'*habitus* ». L'exemple le plus connu, évoqué par Bourdieu, est celui des paysans du Béarn restés célibataires dans la seconde moitié du XX^e siècle parce qu'ils n'ont pas réussi à ajuster leur *habitus* aux nouvelles réalités du champ social (Bourdieu 2002) : beaucoup de paysans ont conservé les traditions et façons de vivre de la société rurale, la manière de concevoir le couple, alors que la société avait changé, notamment la mobilité sociale, le marché du travail et le départ de beaucoup de femmes vers les villes. Cette inadéquation avec une société modernisée montre l'effet d'une mémoire du système social rural dans laquelle le passé reste actif alors que l'environnement social a évolué.

On peut souligner au passage que l'usage que Bourdieu fait du terme (usage qui est davantage métaphorique qu'illustratif que vraiment mathématique) est lié à une approche de la société comme système qui tend à se reproduire, davantage qu'à changer : la reproduction sociale, notamment la reproduction des facteurs de la domination, est une conception importante dans son œuvre. L'hystérésis lui permet de montrer que les systèmes sociaux tendent à se maintenir, serait-ce au prix d'une inadaptation qui leur est fatale. Le concept permettrait ainsi d'illustrer également les phénomènes de résistance au changement dans les organisations. On rappellera donc pour la suite que les systèmes sociaux restent, certes, stables dans les limites de certains seuils de variation de leur environnement et de leur organisation, mais aussi qu'ils changent. Et ils changent pour basculer dans d'autres états d'équilibre dans lesquels ils se présentent à nouveau comme stables à l'observateur, mais cette stabilité ne doit pas faire oublier les processus critiques qui ont présidé au passage d'un état dans un autre.

1.4. Discussion

Le concept d'hystérésis, identifié initialement en physique, a pu être transposé en écologie et en sciences sociales pour rendre compte plus généralement des dynamiques à mémoire et des retards dans l'ajustement des systèmes aux changements, c'est-à-dire du basculement d'un état d'équilibre vers un autre. La recherche actuelle tente d'étendre le concept à des systèmes très complexes comme le climat ou l'économie, qui ont un nombre élevé d'éléments, d'acteurs et de boucles de rétroaction. Ces systèmes peuvent présenter de multiples formes d'hystérésis simultanément ou des transitions qui ne sont pas simplement binaires. Par exemple un écosystème peut comporter plusieurs états stables alternatifs, ce qui peut générer un espace d'hystérésis multi-dimensionnel qu'il s'agit de comprendre en vue d'anticiper les basculements irréversibles de l'état du système.

Appliqué aux sciences humaines et sociales, le concept pose une question intéressante, qui est celle du périmètre de l'observation. Comme nous le soulignons en présentation de ce numéro (Petitjean & Finck 2025), faisant écho à

une remarque ancienne de Crowford S. Holling (1973), la recherche scientifique a tendance à s'intéresser préférentiellement à ses objets quand ils sont à l'équilibre, aisés à observer, à modéliser et à quantifier. L'hystérésis manifeste la tendance d'un système à maintenir son homéostasie, mais si on limite l'observation à l'intervalle entre les seuils au-delà desquels il peut basculer, voire s'effondrer, on oublie que l'hystérésis annonce qu'en réalité, ils sont sur le point de changer. La dynamique des systèmes s'intéresse précisément à ces changements, certes plus difficiles à modéliser.

L'étude des modifications des variables du système doit permettre, idéalement, de prévoir les seuils d'hystérésis et ainsi de prévenir un basculement, ce qui est plus facile que de tenter de rebasculer le système dans l'état précédent. En sociologie, les études restent à mener pour comprendre l'articulation entre l'hystérésis individuelle de l'habitus et les transformations structurelles collectives qui peuvent produire à travers par exemple des crises synchronisées dans différents champs sociaux une hystérésis généralisée (une stabilité maintenue du groupe social) ou au contraire une réadaptation plus rapide (à l'occasion de crises, par exemple). Ainsi beaucoup de questions théoriques relatives à l'hystérésis restent ouvertes, par exemple : comment des hystérésis multiples interagissent dans un monde interconnecté, comment les individus arrivent néanmoins à s'adapter culturellement à travers les générations en ne tenant plus compte de l'ancien habitus. Ces questions montrent que l'hystérésis n'est pas un concept figé mais est un sujet de recherche en soi, visant à comprendre la dépendance au passé dans les systèmes complexes et les basculements d'un état d'équilibre à un autre.

2. BIFURCATIONS

Les bifurcations désignent les changements qualitatifs soudains dans le comportement d'un système lorsqu'un paramètre de contrôle qui varie de façon continue dépasse une certaine valeur critique et provoque un changement majeur dans l'organisation du système à long terme. Avant la bifurcation, le système se trouve dans un régime stable. Lors de la bifurcation le système bascule dans un mode de fonctionnement qui le fait quitter l'état d'équilibre. Il va alors basculer soit vers un autre état d'équilibre, soit vers un comportement dans lequel apparaissent des cycles périodiques ou des oscillations, soit vers un comportement chaotique.

Par exemple, en augmentant progressivement le débit d'eau dans une canalisation, on observe d'abord l'écoulement stable d'un filet d'eau, puis, au-delà d'un seuil critique, l'écoulement bifurque vers un régime turbulent chaotique.

L'étude des bifurcations est un domaine important des mathématiques appliquées car elle permet de classifier les transitions entre comportements dynamiques. Chaque bifurcation correspond souvent à un « point de non-retour » : une fois le paramètre passé le seuil critique, le système adopte un nouveau comportement. La théorie mathématique des bifurcations distingue plusieurs types de bifurcations dans les systèmes dynamiques continus : en selle-nœud, transcritique, en fourche, ou bifurcation de Hopf. Sans entrer dans le détail, nous examinons ici les points essentiels de cette théorie et ses applications les plus connues.

2.1. L'équation logistique et ses bifurcations

Une application importante de la théorie des bifurcations concerne la modélisation de la croissance des populations. L'équation logistique a été formulée par Pierre-François Verhulst (1804-1849) au XIX^e siècle pour modéliser cette dynamique. C'est une équation différentielle (analytique et continue) dans laquelle la croissance de la population est proportionnelle au nombre d'individus, mais avec une capacité limitée liée aux ressources. Dans les années 1970, Robert May (1936-2020) a étudié une forme itérative, en temps discret de cette équation (May 1976) :

$$x_{n+1} = r \cdot x_n (1 - x_n)$$

où x_n représente la population normalisée à l'instant n , x_{n+1} à l'instant discret suivant et r est un paramètre de croissance. May a démontré que cette équation simple pouvait produire des comportements dynamiques complexes, y compris le chaos, pour certaines valeurs du taux de croissance r . Il est en effet remarquable qu'à mesure que r augmente, le système subit une série de bifurcations :

- Pour $0 < r < 1$, la population converge vers zéro.
- Pour $1 < r < 3$, elle converge vers un point fixe stable différent de 0.
- Pour $3 < r < 3.449\dots$, ce point fixe devient instable et est remplacé par un cycle d'oscillations périodiques de la population de période 2, puis 4, puis 8... Ce dédoublement périodique continue à un rythme de plus en plus rapide

à chaque augmentation de « r » ; Mitchell Feigenbaum (1944-2019) a montré que le temps entre les bifurcations diminue selon une constante universelle, la constante de Feigenbaum (Feigenbaum 1978), de valeur approximative $\delta \approx 4.6692\dots$ et décrit ainsi le taux de convergence des bifurcations.

– Au-delà de $r \approx 3.56995$, le système devient chaotique, le nombre de points dans le cycle tend vers l'infini. Cette transition vers le chaos est connue sous le nom de « cascade de doublements de période », il n'y a aucune périodicité stable. Par exemple pour $r = 4$, la population varie en fonction des itérations en parcourant toutes les valeurs possibles de 0 à une valeur maximale (100%). Il est ainsi possible qu'un taux de croissance proche de 4 provoque paradoxalement une disparition de la population.

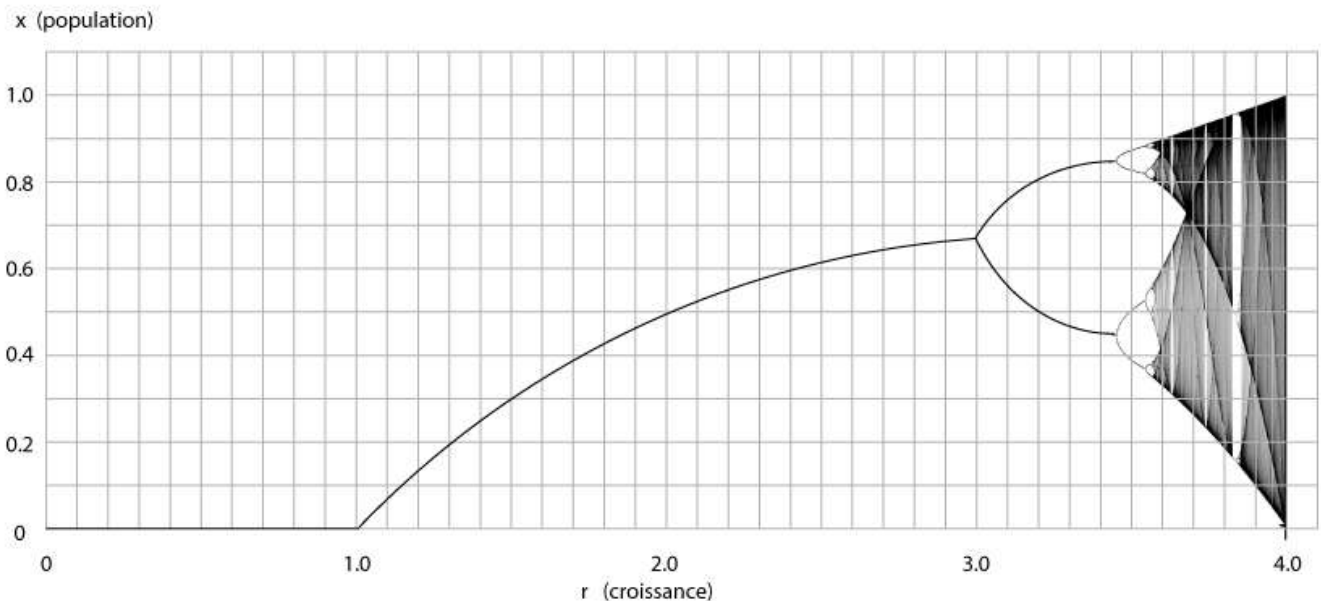


Fig. 3 – Diagramme des bifurcations de l'équation logistique (© www.groupepsi.com)

2.2. Bifurcations en physique et chimie

Dans les systèmes dissipatifs loin de l'équilibre étudiés par Ilya Prigogine (1917-2003) et d'autres, les bifurcations marquent l'apparition de nouvelles structures ou de dynamiques lorsque les flux traversant le système augmentent. Un exemple est la réaction oscillante de Belousov-Zhabotinsky (BZ). Dans ce mélange chimique hors équilibre, on observe des oscillations temporelles, le mélange change périodiquement de couleur entre incolore et jaune (Nicolis & Prigogine 1989). La réaction BZ subit une bifurcation en fonction de certains paramètres, par exemple la concentration initiale de bromate de potassium, au-delà de laquelle l'état stationnaire devient instable et l'oscillation chimique apparaît.

En physique et ingénierie, l'instabilité de flambage d'une poutre comprimée est un cas de brisure de symétrie : la poutre droite (équilibre symétrique) devient instable au-delà de la charge critique, et la structure adopte une configuration courbée vers la gauche ou la droite (deux nouveaux équilibres stables). De même, la transition ferromagnétique à la température de Curie peut s'interpréter comme une bifurcation : en dessous de la température critique, il existe deux orientations possibles d'aimantation spontanée (en simplifiant nord-sud ou sud-nord) et une brisure de symétrie magnétique, tandis qu'au-delà de la température de Curie, l'état non magnétisé (symétrique) est le seul possible. Dans ces exemples, les paramètres critiques sont respectivement la contrainte mécanique et la température, et leur franchissement entraîne un changement radical de la configuration d'équilibre.

Un exemple dans la vie quotidienne est la prise de la mayonnaise. La mayonnaise est une émulsion d'huile dans l'eau stabilisée par des molécules tensioactives présentes dans le jaune d'œuf. Lorsque l'on incorpore lentement de l'huile dans l'eau en mélangeant, le mélange reste liquide jusqu'à un certain rapport critique eau/huile, pour lequel soudain il s'épaissit et prend en masse : c'est la formation de la mayonnaise, qui peut être assimilée à une transition de la phase liquide vers la phase gel. Le paramètre de contrôle est ici la proportion d'huile. L'état du système est donné par la structure du réseau de gouttelettes, qui change brusquement lorsque la concentration devient critique.

2.3. Bifurcations en écologie

Les écosystèmes et les populations biologiques offrent de nombreux exemples de bifurcations dynamiques lorsque l'on fait varier les paramètres environnementaux ou écologiques. D'un point de vue dynamique, ces changements correspondent à des bifurcations du système modélisé. Par exemple, le passage d'un lac clair à un lac turbide peut être vu comme une bifurcation de type selle-nœud ou pli sur un diagramme d'état du lac en fonction de la charge nutritive : deux états d'équilibre, clair et turbide, coexistent sur un intervalle, séparés par un équilibre instable, et au point critique ces trois solutions se rejoignent (selle-nœud) ce qui cause le saut.

Dans la dynamique des populations, un exemple classique est celui du modèle proie-prédateur de Lotka-Volterra. Lorsque le taux de prédation ou l'efficacité du prédateur est faible, le système possède un point d'équilibre stable où proies et prédateurs coexistent à des densités constantes. Si l'efficacité du prédateur augmente et dépasse une valeur critique (par exemple via une augmentation du taux de reproduction du prédateur ou une diminution des refuges pour la proie), ce point d'équilibre peut devenir instable et une bifurcation de Hopf survient : la population se met à osciller de façon soutenue (cycles prédateur-proie). C'est l'explication de l'apparition d'oscillations endogènes dans de nombreux systèmes écologiques : des fluctuations de population de lynx et de lièvres ont ainsi pu être observées sur la longue durée historique grâce aux registres des trappeurs au Canada. Au-delà de certains seuils, si le prédateur est trop efficace, le cycle peut se rompre via d'autres bifurcations menant potentiellement à l'extinction de l'une des espèces : c'est ainsi qu'un prédateur trop vorace peut surconsommer la proie et ensuite s'éteindre faute de ressource.

2.4. Bifurcations biographiques

Le terme de bifurcation connaît une transposition intéressante en sciences sociales, où il désigne de manière générique une situation de changement imprévu de trajectoire, un moment où une série de facteurs convergent pour faire dévier le cours ordinaire des choses. Marc Bessin & *al.* (2010) ont étudié les bifurcations biographiques qui peuvent se produire dans des sphères variées de l'existence :

- dans le domaine personnel et identitaire : ce sont des bifurcations touchant à l'identité individuelle, par exemple des crises existentielles, des conversions religieuses, ou liées à la santé ;
- dans le domaine professionnel : reconversion volontaire d'un individu qui quitte une carrière toute tracée pour explorer une nouvelle voie par choix personnel, ou au contraire bifurcation contrainte de celui qui perd son emploi à la suite d'un licenciement économique ou d'une faillite ;
- dans le domaine conjugal et familial : ruptures (séparations, divorces) et, à l'inverse, certaines formations de couple (mariage, remariage tardif, recomposition familiale) constituent des bifurcations majeures du parcours de vie intime ;
- dans le domaine migratoire : partir vivre dans un autre pays, que ce soit par choix ou par contrainte, implique un changement radical de contexte culturel, linguistique, social et oblige l'individu à réapprendre en grande partie son monde environnant.

L'approche de ces auteurs vise à répondre à des questions telles que : qu'est-ce qui fait qu'un individu accorde du sens à un événement et modifie sa trajectoire de vie, plutôt que cet événement soit absorbé sans grand effet ? Pour y répondre, ces sociologues combinent des enquêtes longitudinales (suivi d'individus sur plusieurs années) et des analyses qualitatives approfondies des récits de vie en suivant par exemple de jeunes adultes sur une période de 10 ans avec des entretiens répétés, afin de voir comment évoluent leurs réseaux relationnels et leurs orientations de vie, et à quels moments surviennent des bifurcations (entrée dans la vie professionnelle, union, rupture, etc.). Ils constatent qu'une bifurcation est souvent favorisée ou construite par la conjonction d'une crise subjective comme un sentiment d'impasse ou de discordance dans la situation actuelle, d'une décision ou d'un choix à faire et d'une temporalité propice où des alternatives se présentent clairement. Autrement dit, une bifurcation émerge souvent quand un individu prend conscience d'une inadéquation entre lui et son contexte et qu'une ouverture temporelle permet la reconfiguration. On a ici une forme d'écho à l'utilisation par Pierre Bourdieu du terme d'hystérésis : un paysan du Béarn pourrait maintenir son habitus jusqu'à un certain point où une bifurcation pourrait se présenter : vieillir célibataire ou changer.

Jean-Claude Kaufmann (2008), sociologue de la vie quotidienne et de l'individu, a développé une réflexion sur le changement de soi et explore les bifurcations ou tournants biographiques. Il explique que la bifurcation n'est ni une identification passagère, ni un remaniement ponctuel, ni une évolution progressive et s'inscrit dans un cadre évolutif marqué par trois étapes successives :

- Instabilité structurelle : des identifications imaginaires alternatives s'installent en conflit avec les schémas de

pensée implicites qui ouvrent des fenêtres de réflexivité et alourdissent la charge mentale avec des manques, par exemple, de fluidité gestuelle.

- Crise ouverte et basculement : c'est le temps fort de la bifurcation où le « Je » est tiraillé entre le désir de retrouver un confort mental et une évaluation critique destinée à se donner les moyens de choisir le meilleur avenir ; le basculement s'opère souvent avec un évènement déclencheur comme une rencontre.

- Recomposition biographique : un travail de reconstruction, d'ajustement est à effectuer à la fois dans les profondeurs intériorisées de la mémoire et dans les interactions sociales.

2.5. Discussion

La théorie des bifurcations permet de comprendre, pour un certain nombre de systèmes, les modalités de leur basculement vers des états loin de l'équilibre initial et leurs nouveaux domaines de fonctionnement. Elle inclut des outils mathématiques robustes pour classer les bifurcations et pour caractériser le chaos. Des recherches sont toujours en cours dans ce champ, et des verrous subsistent dans l'analyse de systèmes de très grandes dimensions.

En ingénierie, la théorie des bifurcations a connu des avancées notables dans le domaine de la gestion des réseaux électriques pour éviter l'apparition de « blackouts » ; en aérodynamique pour analyser le décrochage d'une aile ; ou encore en robotique, pour comprendre les changements de mode de locomotion, par exemple le passage de la marche à la course.

En climatologie, l'existence de bifurcations pouvant potentiellement conduire à des effondrements (fonte irréversible des calottes glaciaires, désorganisation des courants océaniques...) est étudiée avec attention, mais la complexité du système climatique hautement multivariable rend difficile l'identification précise des seuils de bifurcation et de leur nature douce ou abrupte. Des travaux sont en cours autour des signaux d'alerte précoce. L'idée de base est que les systèmes qui approchent d'un seuil de bifurcation présentent des propriétés statistiques universelles indépendamment des détails à petite échelle, ce qui aiderait à détecter l'approche d'une bifurcation par exemple via l'augmentation de la redondance des fluctuations. Par ailleurs, beaucoup de modèles écologiques sont très simplifiés par rapport à la réalité multi-spécifique et spatialisée des vrais écosystèmes. Introduire la spatialisation ajoute une complexité supplémentaire : par exemple des écosystèmes spatialisés peuvent éviter ou retarder une bifurcation globale via des hétérogénéités locales, ou au contraire subir des bifurcations encore plus abruptes si des phénomènes de contagion spatiale avec effets de masse se produisent. L'un des enjeux actuels est d'étendre la théorie des bifurcations aux systèmes complexes spatio-temporels (écologie du paysage, métapopulation...). Les avancées en modélisation numérique et en théorie des réseaux dynamiques commencent à aborder ces questions, mais il reste ardu de classer toutes les bifurcations possibles quand le système à modéliser comporte des dizaines d'équations couplées...

Dans les sciences sociales, particulièrement en ce qui concerne les bifurcations biographiques, la poursuite des travaux de recherche permettrait de prévoir ou d'anticiper les changements dans la vie des individus et peut-être de se donner les moyens d'apprendre à bifurquer positivement. D'un côté, l'idée même de bifurcation implique une rupture de la prévisibilité, liée à des contingences uniques. De l'autre, on constate des régularités statistiques : par exemple, on sait que le risque de divorce est plus élevé dans les premières années de mariage, ou que la probabilité de reconversion professionnelle augmente vers la quarantaine à mi-carrière. Ces réflexions rejoignent la question de la prévention : peut-on détecter les signaux faibles d'une rupture, par exemple identifier précocement les élèves ou les jeunes adultes en décrochage pour éviter une bifurcation vers l'échec ? La sociologie des bifurcations est encore jeune, mais certainement riche de potentialités pour éclairer ce que nos sociétés « liquides » (Zygmunt Bauman) font de nous, et ce que nous faisons de ce qu'elle fait de nous.

3. CATASTROPHES

3.1. Une théorie permettant d'identifier les types de rupture en dynamique des systèmes

La théorie des catastrophes (Thom, 1972), initiée par le mathématicien français René Thom (1923-2002) dans les années 1960-70, est une branche de la topologie différentielle visant à classer et à décrire les changements de régime brutaux et discontinus dans les systèmes dynamiques. Il ne s'agit pas ici de catastrophes au sens courant de désastres mais de formes mathématiques singulières décrivant des discontinuités, des changements de régime soudains dans des systèmes dynamiques. La théorie des catastrophes s'intéresse aux situations dans lesquelles une évolution continue des conditions ou paramètres d'un système peut conduire, à certains points critiques, à une

transformation discontinue de l'état du système, une catastrophe au sens de saut soudain. René Thom a montré qu'en se restreignant à des systèmes ayant un potentiel, c'est-à-dire une fonction énergie dont les minima représentent les états stables du système, et dépendant d'un petit nombre de paramètres de contrôle, on pouvait classer les différentes formes de ruptures possibles en un nombre limité de types universels, appelés catastrophes élémentaires. Pour un nombre maximum de 4 paramètres de contrôle, il n'existe que 7 formes élémentaires de catastrophes.

Pour un paramètre a en entrée et une variable x en sortie, l'équation $V = x^3 + ax$ qui donne la valeur du potentiel d'un système correspond au pli. Le pli est une catastrophe courante, illustrée par exemple par l'effondrement d'une population lorsque la natalité ne compense plus la mortalité, ou par le décrochage d'une aile d'avion quand l'angle d'attaque dépasse la limite et que la portance s'effondre. Géométriquement, la surface des états stables en fonction du paramètre ressemble à une feuille pliée sur elle-même : au bout du pli, il n'y a plus de solution stable possible, le système « tombe » sur l'autre face du pli.

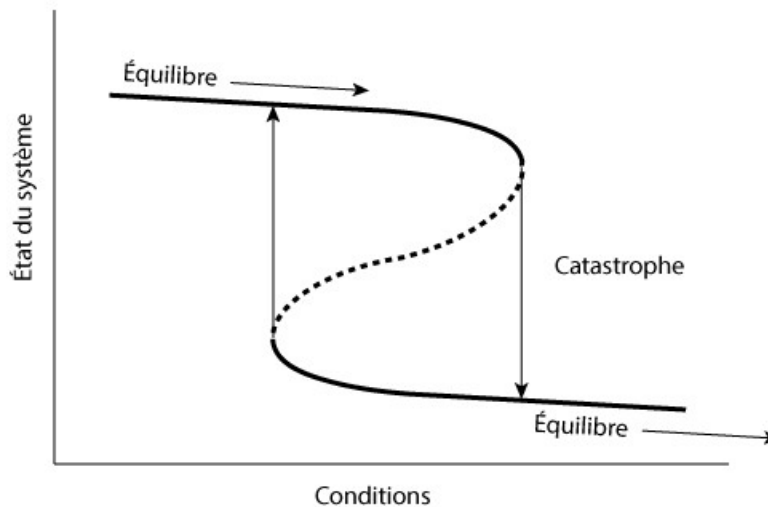


Fig. 4 – Catastrophe de type « pli » (© www.groupepsi.com)

La *fronce* est une catastrophe à 2 paramètres ($V = x^4 + ax^2 + bx$), décrite par une surface d'équilibre rebroussee en pointe. Elle combine deux plis qui se rencontrent. Pour certaines combinaisons des deux paramètres, le système présente deux états stables possibles, séparés par un état instable, formant une boucle d'hystérésis. À l'intérieur de la région de bistabilité, un petit changement peut précipiter le système d'un état à l'autre (catastrophe), tandis qu'en dehors de cette région le système n'a qu'un état possible. La fronce est pertinente pour modéliser des situations dans lesquelles deux variables d'influence déterminent un état d'équilibre multi-stable.

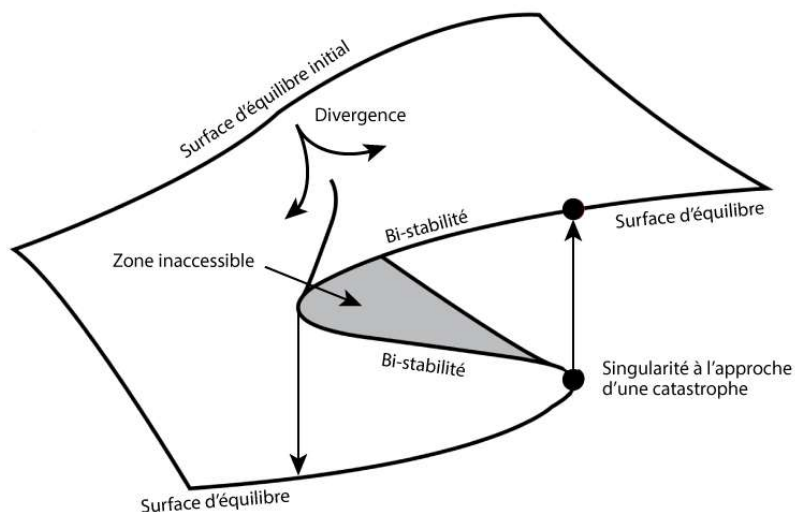


Fig. 5 – Catastrophe de type « fronce » (© www.groupepsi.com)

Avec 3 paramètres, les catastrophes élémentaires sont plus difficiles à visualiser. On distingue : la *queue d'aronde* ($V = x^5 + ax^3 + bx^2 + cx$), et avec deux variables (x et y) en sortie, l'ombilic hyperbolique (la *vague*, $V = x^3 + y^3 + axy + bx + cy$), l'ombilic elliptique (le *poil*, $V = x^3/3 - xy^2 + a(x^2 + y^2 + bx + cy)$). Avec 4 paramètres, on distingue le *papillon* ($V = x^6 + ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx$) et l'ombilic parabolique (le *champignon*, $V = x^2y + y^4 + ax^2 + by^2 + cx + dy$). Avec 5 paramètres, il existe 4 formes de catastrophes supplémentaires. Quand il y a 6 paramètres ou plus, la classification des catastrophes devient infinie.

L'intérêt de la théorie des catastrophes est qu'elle fournit une classification universelle de ces ruptures, indépendante du détail du système, dès lors que l'hypothèse de stabilité structurelle est satisfaite avec peu de paramètres. Le formalisme de la théorie des catastrophes peut être appliqué à des domaines très variés : morphogenèse biologique, linguistique, événements sociaux, avec l'idée que ces catastrophes mathématiques pourraient correspondre à des formes prototypiques de transitions observées dans la réalité. Cependant, pour qu'un système soit strictement dans le cadre de la théorie mathématique des catastrophes élémentaires de Thom, il faut qu'il soit décrit par un potentiel et quelques paramètres seulement. Or nombre de systèmes complexes n'ont pas d'énergie bien définie (par exemple, des systèmes non conservatifs, ou des dynamiques avec cycles et chaos). La théorie des catastrophes s'applique bien aux équilibres statiques ou aux transitions de régime entre états stationnaires. Elle est donc adaptée pour les transitions de phase d'équilibre en physique, ou les changements d'états stables. Elle l'est moins pour les systèmes intrinsèquement dynamiques comme les oscillateurs. À cet endroit, il faut utiliser la théorie des bifurcations comme les bifurcations de Hopf. De plus, la théorie des catastrophes ne prend pas en compte le temps de bascule ni les trajectoires pendant la catastrophe, elle est seulement capable de lister l'avant et l'après et les états possibles. En pratique, les systèmes réels peuvent subir des oscillations transitoires, du retard, du bruit pendant une catastrophe, ce que l'approche de la théorie des catastrophes élémentaires ne prend pas en compte.

3.2. Exemples d'applications

Plusieurs systèmes physiques ont été décrits à l'aide de la théorie des catastrophes, en particulier dans les années 1970. Un exemple célèbre est l'instabilité de flambement d'une tige ou d'une plaque en mécanique : une tige comprimée axialement reste droite jusqu'à une charge critique (point de bifurcation), puis fléchit soudain dans un sens ou l'autre. Pour une tige parfaite (parfaitement droite initialement), c'est une bifurcation de fourche symétrique (deux directions de flambage possibles) sans hystérésis (juste au seuil, tout déplacement latéral diverge). Si on introduit une légère asymétrie (tige légèrement courbée initialement, ou imperfection), le problème se transforme en une fronce : avant le seuil, deux états existent (droit et légèrement courbé) mais l'état droit devient instable au seuil et la tige claque dans une position courbée marquée.

Des changements écosystémiques brutaux peuvent être analysés en termes de catastrophes au sens de René Thom. Le cas de la fronce est particulièrement adapté aux écosystèmes dans lesquels deux facteurs prédominent. Par exemple, dans les savanes, on peut tracer un diagramme avec, sur un axe, un gradient climatique pour les précipitations, et sur un autre axe, l'intensité des feux de brousse. Le couvert végétal boisé peut alors montrer une région de bi-stabilité (forêt par rapport à la savane), pour des conditions intermédiaires, formant une fronce. Généralement, les écologues parlent de diagrammes de phase ou de surfaces de réponse, sans toujours invoquer explicitement la théorie des catastrophes, mais l'idée est la même : il existe un pli dans la surface qui cause un saut lorsqu'on le dépasse. Des études expérimentales ou de terrain essaient parfois de cartographier ces surfaces : en manipulant à la fois la charge en nutriments et la pression de pêche dans un lac, on pourrait voir de quelle manière se répartit l'état du lac (algues par rapport aux plantes), possiblement en montrant une zone d'hystérésis. Toutefois, la multiplicité des facteurs en environnement (lumière, nutriments, température, espèces introduites...) fait que la simplification à deux axes est hasardeuse.

Un exemple donné par Erik Christopher Zeeman et repris par Thom (Thom 1980) est le comportement d'un chien confronté à une menace : selon le degré de peur et d'agressivité (deux paramètres), le chien peut soit s'enfuir, soit attaquer. Une variation continue de ces facteurs peut conduire à un changement soudain de réaction (de la fuite à l'attaque) s'analysant comme une catastrophe de type fronce. Ces exemples, bien que schématiques, illustrent comment la théorie des catastrophes tente de qualifier différents types de discontinuités et de fournir des analogies formelles entre des domaines variés.

3.3. Discussion

Cependant, ces tentatives d'utiliser la théorie des catastrophes dans différents domaines, bien qu'élégantes qualitativement, ont souvent été critiquées pour leur manque de validation empirique rigoureuse. L'application quantitative stricte de la théorie des catastrophes aux sciences humaines a suscité du scepticisme, et cette théorie, après

un engouement initial, est en partie retombée dans l'oubli dans les années 1980. En effet, vers la fin des années 1970, une controverse a éclaté autour de la théorie des catastrophes appliquée hors du domaine mathématique strict : certains l'accusaient d'être utilisée de manière métaphorique et non falsifiable. Sussmann et Zahler (1978) ont publié une critique virulente soulignant que beaucoup d'applications sociales ne faisaient qu'ajuster qualitativement des formes de fronce à des phénomènes sans données quantitatives solides ni tests statistiques pour confirmer l'existence des surfaces postulées. En réponse, les utilisateurs de la théorie des catastrophes ont développé des outils de régression permettant de tester statistiquement si un jeu de données correspond mieux à un modèle en fronce qu'à un modèle linéaire.

La question demeure, de la prise en compte de situations du monde réel qui sont complexes : que faire quand on a plus de deux ou trois paramètres significatifs ? La classification de René Thom énumère des catastrophes élémentaires avec quelques variables : au-delà, l'espace des transformations possibles devient impossible à modéliser. Or la plupart des systèmes réels intéressants ont une dimension bien plus grande. Il n'existe pas de classification simple des catastrophes dans des systèmes de grande dimension. On retombe sur des approches numériques ou spécifiques à chaque système. Par ailleurs, l'hypothèse du potentiel est limitante : beaucoup de systèmes sociaux ou biologiques n'ont pas une fonction potentielle globale (dynamique non conservative, ou bien trop de variables pour réduire à un potentiel). La théorie du chaos, plus souple, a en quelque sorte supplanté la théorie des catastrophes dans l'étude des systèmes dissipatifs dynamiques. Cependant, lorsque l'on étudie les diagrammes de bifurcation, on retrouve naturellement les catastrophes de Thom sur ces diagrammes. En ce sens, la théorie des catastrophes peut être vue comme une branche de la théorie des bifurcations avec ses spécificités.

CONCLUSION

L'étude des concepts d'hystérésis, de bifurcation et de catastrophe montre qu'elles sont étroitement liées, un seuil d'hystérésis peut amener à une bifurcation d'un système et conduire à une catastrophe. Ces concepts offrent une grille de lecture intéressante permettant d'appréhender les transitions dans les systèmes complexes loin de l'équilibre notamment en physique, en écologie, en sciences sociales... Vivien Braccini & *al.* (2025) proposent un peu plus loin dans ce numéro une approche de la transformation des organisations dans laquelle les passages de seuils à l'occasion de crises peuvent se lire en termes d'hystérésis, de bifurcations et de catastrophes. Les recherches dans ces domaines se poursuivent et les questions ne manquent pas : Comment intégrer le hasard dans la description des bifurcations en considérant des systèmes réels qui subissent du bruit ? Quelles nouvelles formes de bifurcations pourraient apparaître dans des réseaux complexes comme dans un réseau neuronal de millions de neurones ou dans un réseau social de millions de personnes ? Ces défis impliquent une approche interdisciplinaire et nécessitent une collaboration étroite entre différents domaines : théoriciens des systèmes dynamiques, mathématiciens, physiciens, spécialistes de domaines applicatifs, experts en science des données, sociologues...

Il est clair, en tous cas, que les systèmes loin de l'équilibre ne changent pas de manière progressive et prévisible comme le pensait un certain déterminisme classique, mais plutôt de manière surprenante, et s'ils sont régis par des lois, celles-ci sont non linéaires. Savoir lire les signes précurseurs de transformation de systèmes complexes, savoir que tel phénomène présente de l'hystérésis ou que la valeur de tel paramètre d'un système va l'approcher d'une bifurcation ou d'une catastrophe, est déjà une manière précieuse de se préparer à accompagner les systèmes en train de changer dans un environnement incertain (Petitjean & Finck 2025).

L'intérêt majeur de ces concepts, même si leur transposition aux sciences sociales ne permet pas la prédiction chiffrée des comportements individuels et sociaux, est de sensibiliser le chercheur aussi bien que le professionnel, d'une part, à l'idée que les individus, les groupes, les collectifs ne cherchent pas nécessairement à maintenir une sorte d'homéostasie autour de valeurs constantes, mais que, tout en préservant leur pérennité, ils peuvent connaître différents états d'équilibre – pratiquement différentes identités – entre lesquels ils évoluent ou régressent ; et que, d'autre part, ces changements sont rarement continus, et plus souvent se présentent sous forme de ruptures, voire d'oscillations brutales entre des positions sans solutions de continuité, parfois même antinomiques. C'est pour prendre en compte ces caractéristiques des systèmes complexes dynamiques que nous avons proposé d'introduire le concept d'homéodynamique en théorie des systèmes (Petitjean, Finck & Schmoll 2025).

Références :

- Bessin M., Bidart C., Grossetti M (2010), *Bifurcations. Les sciences sociales face aux ruptures et à l'événement*, Paris, La Découverte.
- Bourdieu P. (1980), *Le sens pratique*, Paris, Les Éditions de Minuit.
- Bourdieu P. (2002) : *Le Bal des célibataires. Crise de la société paysanne en Béarn*, Paris, Seuil.
- Braccini V., Kaïdi M. & Schmoll P. (2025), Passages de seuils dans les organisations en croissance et fonction de passeur de l'intervenant, *Cahiers de systémique*, 7, p. 45-56. DOI : <https://doi.org/10.5281/zenodo.17312559>.
- Feigenbaum M.J. (1978), Quantitative Universality for a class of nonlinear transformations, *Journal of Statistical Physics*, 19(1), p. 25–52.
- Holling C.S. (1973), Resilience and Stability of Ecological Systems, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4(1), p. 1-23.
- Kaufmann J.C. (2008), *Quand Je est un autre. Pourquoi et comment ça change en nous*, Paris, Armand Colin.
- May, R.M. (1976), Simple mathematical models with very complicated dynamics, *Nature*, 261, p. 459–467.
- Nicolis G. & Prigogine I. (1989), *A la rencontre du complexe*, Paris, PUF.
- Petitjean H. (2025), Ball-and-Cup : histoire et portée d'un modèle heuristique, *Cahiers de systémique*, 7, p. 21-28.
DOI : <https://doi.org/10.5281/zenodo.17311951>.
- Petitjean H. & Finck S. (2025), Comprendre et accompagner les systèmes loin de l'équilibre, *Cahiers de systémique*, 7, p. 5-8.
DOI : <https://doi.org/10.5281/zenodo.16420697>.
- Petitjean H., Finck S. & Schmoll P. (2025), Pour introduire le concept d'homéodynamique en théorie des systèmes, *Cahiers de systémique*, 7, p. 29-44. DOI : <https://doi.org/10.5281/zenodo.17312443>.
- Sussmann H.J. & Zahler R.S. (1978), Catastrophe theory as applied to the social and biological sciences: A critique, *Synthese*, 37, p. 117-216.
- Scheffer M. (2001), Catastrophic shifts in ecosystems, *Nature*, 413, p. 591-596.
- Thom R. (1972), *Stabilité structurelle et morphogénèse : Essai d'une théorie générale des modèles*, Reading (MA), W. A. Benjamin.
- Thom R. (1980), *Paraboles et catastrophes, Entretiens sur les mathématiques, la science et la philosophie*, Paris, Flammarion.