



Article

Essai sur une théorie générale de la complexité: fondements de l'approche MICROGLOBAL

Yves Kocher^{1,*}

¹Chercheur et co-directeur, MicroGlobal LLC, Lully, 1132, Switzerland

*Corresponding author: yves@microglobal.ch

Abstract - Le concept MICROGLOBAL propose une nouvelle approche pour répondre à la question de l'origine et de l'évolution de la complexité du monde. Il étend les principes de la systémique et de la thermodynamique à l'ensemble de la nature (physique, biologique et sociale), suggérant une structure universelle et fractale qui opère à toutes les échelles. Cette approche postule que l'information, encodée dans les quantas de l'espace-temps, est l'élément fondamental de la réalité et qu'elle se complexifie à travers des niveaux hiérarchiques (ondes, particules, biologie, social) pour maximiser la durabilité et l'adaptation des systèmes.

L'approche MICROGLOBAL caractérise les systèmes auto-organisés par quatre fonctions fondamentales (Reproduction, Différenciation, Hiérarchisation, Liaison) déterminées par trois variables clés des interactions: la hiérarchie, la réciprocité et la temporalité des échanges. Ces interactions sont modélisées par des flux d'information, d'énergie ou de matière. Les systèmes sont analysés à l'aide de diagrammes de phase qui représentent les flux internes et externes, permettant de mesurer leur capital et leur niveau de complexité structurelle. Une boucle de rétroaction positive décrit la dynamique interne de complexification qui pousse les systèmes à s'organiser et à croître au détriment de l'entropie de leur environnement.

Le modèle identifie cinq niveaux N fondamentaux de réalité, chacun caractérisé par un capital émergent spécifique: information (espace-temps, N^0), énergie (ondes, N^1), masse (particules, N^2), structures topologiques (biologie, N^3) et symboliques (systèmes sociaux, N^4). Les transitions entre ces niveaux suivent des principes physiques établis (Landauer, Einstein, Newton). L'analyse révèle que les systèmes complexes émergent entre l'ordre et le désordre et que leur durabilité est liée à leur capacité à ajuster les quatre fonctions fondamentales pour gérer les contraintes locales et globales.

Le concept MICROGLOBAL offre un cadre général et unifié pour comprendre l'émergence de la complexité dans la nature, de l'infiniment petit à l'infiniment grand. Il étend la systémique à l'ensemble des phénomènes naturels en se concentrant sur la typologie des flux. Cette approche propose des outils de mesure pour évaluer la complexité et la durabilité des systèmes, suggérant que les systèmes les plus complexes sont aussi les plus durables car ils sont mieux adaptés pour résoudre les contraintes environnementales.

Keywords - systems, complexity, fractal, organization, self-organization, reproduction, differentiation, hiérarchisation, feedback, regulation, chain reaction, entropy, social, information, biology, information, espace-temps, quantique

Contents

1	Introduction	4
2	Les systèmes auto-organisés	5
2.1	Les systèmes	5
2.2	L'auto-organisation	5
2.3	L'émergence	5
3	Cadre théorique	6
3.1	Le système	8
3.2	L'identité	10
3.3	La hiérarchie	10
3.4	La réciprocité	11
3.5	Le capital et l'émergence	12
4	Les quatre fonctions fondamentales	14
4.1	Reproduction	16
4.2	Différenciation	17
4.3	Hiérarchisation	18
4.4	Liaison	20
5	Propriétés et analyse	22
5.1	Les frontières	22
5.2	Sens des flux	23
5.3	Représentation spirale	24
5.4	Interactions asymétriques verticales	26
5.5	Interactions symétriques horizontales	26
5.6	Outils de mesure	27
5.7	Analyse	30
6	Les régulations	30
6.1	Boucles de complexification	30
6.2	Boucles système - environnement	33
6.3	Boucles capital - flux	34
7	Principes universels de la systémique fractale	35
7.1	Reproduction	35
7.2	Différenciation	35
7.3	Hiérarchisation	36
7.4	Liaison	36
7.5	Mesure de la complexité	37
8	Concepts équivalents	39
9	Conclusion	40
A	Typologie des flux	44
B	Exemple de mesure des flux	46
C	Information	48
D	Le fer à cheval de Smale	49
E	Cycle de Carnot	50

F	Principe de Landaeur	52
G	Cycle Bau de Rochas	53
H	Typologie interne et externe des interactions	55
I	Similitude entre le modèle quantique de l'électron et le concept MICROGLOBAL	56
J	Relations entre capitaux actifs et passifs	57
K	Niveau physiques	58

1 Introduction

Le concept MICROGLOBAL est une réponse à la question de l'origine et de l'évolution du monde. Nous allons décrire cette logique universelle, ses caractéristiques, ses dynamiques, ses représentations et la manière de les mesurer. Le concept MICROGLOBAL est ainsi nommé pour sa capacité à s'appliquer à la fois au micro et au macro, au social comme au biologique et au physique [34]. Il est un prolongement des concepts de la systémique [12], de la thermodynamique [44] et des théories de l'information [7]. C'est une approche globale qui intègre dynamiques internes et dynamiques externes au système.

Le monde que nous observons est structuré en niveaux. Nous l'avons intuitivement défini à travers nos secteurs de recherche et de connaissance. Le domaine social est bien distinct des domaines de la biologie et des sciences physiques. Il est aussi évident que les plus complexes reposent sur les moins complexes et en sont dépendants, comme des couches empilées les unes sur les autres. Du monde physique émerge le monde du vivant, et du monde vivant émergent les systèmes sociaux. Chacun de ces niveaux intimement interconnectés peut se décrire en terme systémique.

L'approche MICROGLOBAL est fractale car elle présente une structure similaire à toutes les échelles d'observation. A la différence de Mandelbrot [29], l'objet mathématique qu'elle décrit n'est pas géométrique mais systémique. A tous les niveaux de complexité, l'approche MICROGLOBAL observe 4 fonctions fondamentales contrôlant la dynamique systémique. Notre analyse se concentre premièrement sur le niveau social car nous pouvons le comprendre intuitivement. Nous développerons dans un second temps les niveaux biologique puis physique.

Cet essai est divisé en 3 parties, dont la première sera développée dans cet article :

Partie I : La première partie est une introduction au modèle d'analyse MICROGLOBAL qui caractérise les systèmes par 4 fonctions fondamentales : la reproduction, la différenciation, la hiérarchisation et la liaison. Ces fonctions mesurent les interactions que les systèmes entretiennent avec leur environnement. Ces interactions, concrétisées par des flux, sont caractérisées par la hiérarchie entre les éléments, la réciprocité des flux et la temporalité des échanges. Nous verrons que les systèmes se complexifient au détriment de leur environnement qui augmente leur entropie.

Partie II : La deuxième partie caractérise les niveaux systémiques empilés les uns sur les autres, formant la structure de notre monde. Sur la toile de l'espace-temps quantique émergent les ondes (l'énergie), puis les particules (masse, charge, spin, couleur), puis la biologie (les formes) et enfin, sommet de la complexité, les symboles des systèmes sociaux. Chacun de ces niveaux opère sa dynamique dans des dimensions partielles de l'espace-temps: les ondes en 1 dimension, les particules en 2 dimensions, les systèmes biologiques en 3 dimensions et les symboles sociaux en 4 dimensions. Ces objets évoluent dans notre espace-temps à 4 dimensions mais ont une dynamique dans une dimension réduite.

Partie III : La troisième partie aborde l'origine des dynamiques systémiques. Le monde est décrit comme une toile constituée d'unités fondamentales d'information formant les quantas de l'espace-temps. L'information est constitutive des systèmes. De son état indéterminé et aléatoire, elle se détermine et se fige avec les interactions lors de la complexification des systèmes. Sa redondance est l'expression des contraintes spatio-temporelles que les systèmes cherchent à minimiser en évoluant vers des minimums d'énergie. Ainsi, le réarrangement et la compression de l'information sont la racine de la minimisation des contraintes spatio-temporelles, moteur de l'évolution complexe.

Dans cette première partie, nous commençons par poser le cadre dans lequel cet essai s'inscrit, en présentant les concepts généraux de la systémique: les systèmes, l'auto-organisation et l'émergence. Nous décrivons l'approche systémique MICROGLOBAL en introduisant d'abord les concepts clés sur lesquels elle se repose pour ensuite présenter le coeur de l'approche MICROGLOBAL: les 4 fonctions fondamentales. Sur cette base, nous présentons les concepts résultants: les frontières, les flux, les interactions et les outils de mesure. Finalement, nous abordons les boucles de régulation, les principes universels qui reposent sur les 4 fonctions fondamentales et des concepts existant équivalents.

Des annexes afin d'approfondir et élargir certaines notions présentées viennent compléter cette

première partie.

2 Les systèmes auto-organisés

Les systèmes se classifient selon de nombreux critères: leur nature, leur comportement, leur finalité, les systèmes de production, d'information ou d'exploitation. Parmi cette profusion de typologies, deux grandes catégories de systèmes se distinguent en fonction de la localisation de leur organisation. Les systèmes asservis, dont l'organisation est extérieure au système, et les systèmes auto-organisés, dont l'organisation est interne. La limite est parfois ténue entre ces deux catégories, les systèmes auto-organisés pouvant dériver vers des systèmes asservis lorsque l'environnement est trop contraignant. Nous allons décrire les caractéristiques fondamentales des systèmes auto-organisés.

2.1 Les systèmes

Un système est un ensemble d'éléments interagissant entre eux selon certains principes et règles. Il est déterminé par 3 éléments fondamentaux: sa **frontière**, ses **interactions** avec l'environnement et ses **fonctions**. Ces dernières définissent le comportement des entités faisant partie du système, leur organisation, leurs interactions et un critère identitaire d'appartenance au système. En outre, certains systèmes peuvent également avoir une **mission** (ses objectifs et sa raison d'être) qui peuvent être de différentes natures: humaine, naturelle, matérielle, immatérielle, etc. Quatre concepts fondamentaux de la systémique seront repris dans les chapitres ultérieurs. Le premier est l'**approche globale et holistique du système**, qui permet l'émergence de nouvelles propriétés. Le tout est supérieur à la somme de ses parties. Il est en rupture avec l'approche déterministe de la science classique qui décompose les systèmes au lieu d'intégrer ses éléments. Le deuxième est l'**organisation** de l'intérieur en niveaux hiérarchiques, qui permet l'auto-organisation. Les niveaux hiérarchiques permettent une gestion locale et plus efficace des contraintes. Le troisième concerne les **interactions** qui renvoient à l'idée d'une causalité non linéaire (théorie du chaos évoquée par la suite). Elles sont les boucles de rétroaction positives et négatives pour assurer l'homéostasie des systèmes. Finalement, le quatrième est la **complexité**, qui apparaît avec la multiplicité des interactions dans un environnement en perpétuel changement.

2.2 L'auto-organisation

L'auto-organisation [4] est une propriété fondamentale des systèmes. Elle est un phénomène par lequel un système s'organise de lui-même. Les systèmes physiques, biologiques, écologiques et sociaux ont tendance à s'organiser d'eux-mêmes. Il s'agit soit de l'organisation initiale du système lors de son émergence spontanée, soit de l'apparition d'une organisation plus structurée ou complexe lorsque le système existe déjà. L'auto-organisation agit à l'encontre de l'entropie (on parle alors de néguentropie), qui est une mesure du désordre des systèmes [17]. L'auto-organisation se produit par des interactions internes et externes au système, au sein de son milieu et avec lui. Elle consomme de l'énergie qui sert ainsi à établir et à maintenir le système auto-organisé.

2.3 L'émergence

Les systèmes auto-organisés sont caractérisés par leurs propriétés émergentes [48]. Ces propriétés ne sont pas déductibles de l'étude des éléments qui composent le système.

Exemple: les molécules d'eau H_2O ont des propriétés macroscopiques qui ne sont pas déductibles des propriétés individuelles de l'oxygène O et de l'hydrogène H.

Toute interaction entre éléments crée un potentiel de propriétés émergentes. Les interactions diminuent les degrés de liberté des éléments individuels et créent, à un niveau supérieur, un nouvel espace de liberté. Les contraintes résultant de l'interaction modifient les propriétés individuelles et permettent l'émergence de nouvelles propriétés caractérisées par l'apparition de nouveaux degrés de liberté. Comme illustré sur la figure 1, c'est entre l'ordre parfait (entropie nulle) et le désordre complet (entropie maximale) que les systèmes complexes se développent avec l'émergence de nouvelles

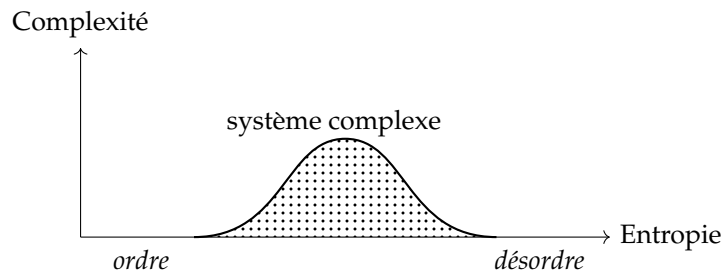


Figure 1: Les systèmes complexes émergent entre ordre et désordre.

propriétés. L'**ordre** favorise la statique et le désordre engendre la dynamique. Certaines interactions maximisent l'ordre, la stabilité et le déterminisme des systèmes. D'autres créent du désordre, de l'instabilité, de l'indéterminisme et de l'imprévisibilité [25]. Le **désordre** est caractérisé par des degrés de liberté élevés, ainsi que des états et des chemins variés. Ces multiples chemins garantissent l'adaptabilité des systèmes puisqu'ils offrent de multiples solutions aux contraintes. L'**état chaotique** caractérise ces chemins multiples par sa sensibilité aux conditions initiales [11]. Ces états variés permettent les choix, l'adaptabilité et la diversité. Au niveau macroscopique, l'état chaotique apparaît déterministe (déterminisme statistique), mais il permet à l'indétermination quantique de prendre effet dans les systèmes macroscopiques (réduction objective orchestrée [19]). Nous nous écartons d'une vision finaliste du monde qui le ferait évoluer obligatoirement vers la complexité [5]. La contingence permet d'ouvrir de multiples chemins évolutifs, d'autant plus dans les systèmes à faible énergie (systèmes biologiques et sociaux) très sensibles aux conditions initiales. Chaque chemin est unique et la description que nous pouvons en faire donne du sens a posteriori, mais avec peu de pouvoir prédictif. Le concept MICROGLOBAL donne un cadre évolutif en précisant la dynamique qui anime les systèmes. Ce cadre à toutefois des règles telles que la minimisation des contraintes et de l'information. Ces règles donnent préférence aux systèmes durables, capables de s'adapter aux contingences de l'environnement.

Le concept MICROGLOBAL intègre à la fois l'ordre pour la reproductibilité de l'identité des systèmes et le désordre pour la différenciation, l'adaptabilité et l'émergence de propriétés nouvelles [39]. La vie provient de l'émergence des systèmes biologiques et la conscience celle des hommes sociaux. Plus généralement, l'identité des systèmes, telle que nous allons la définir ci-après, peut être considérée comme l'émergence des systèmes. Dans ce sens, nous pouvons dire que l'information est l'émergence de l'espace-temps, l'énergie celle des systèmes ondulatoires, et la masse (charge, couleur et spin) celle des systèmes particulières. Nous reviendrons sur ces notions dans la deuxième partie de cet essai.

3 Cadre théorique

Le concept MICROGLOBAL est une prolongation des théories de la cybernétique [9, 47] et de la systémique [24, 46]. Il reprend les idées et les développements de la théorie des systèmes adaptatifs complexes en lui donnant un cadre conceptuel plus précis [15]. Sa spécificité est de décrire les systèmes au moyen de 4 fonctions fondamentales. Chaque fonction est définie par l'un des 4 types d'interaction suivantes: la **Reproduction** (type *R*), la **Différenciation** (type *D*), la **Hiérarchisation** (type *H*) et la **Liaison** (type *L*). Dans l'approche MICROGLOBAL, un système complexe et auto-organisé possède obligatoirement ces 4 types d'interaction. Une interaction est matérialisée par un flux d'information, d'énergie ou de matière. Elle correspond à un transfert d'un élément vers un autre élément, ou d'un système vers un autre système. Ces transferts, détaillés par la suite, peuvent être unidirectionnels ou réciproques.

Exemple: Une interaction économique entre deux personnes est le transfert d'un objet du vendeur à l'acheteur et d'argent de l'acheteur au vendeur. Une interaction chimique est le transfert ou le partage d'un électron entre deux atomes. Une interaction topologique est l'utilisation de la forme d'une clef pour ouvrir une serrure, de la forme d'une protéine pour activer une réaction, de la complémentarité des bases de l'ADN pour écrire un message. Une interaction énergétique est le transfert d'un photon pour exciter un électron. Une interaction informationnelle est l'utilisation d'un code pour réaliser une opération.

Niveau	Identité	Capital
N^0	Espace-temps	Capital virtuel d'information
N^1	Onde	Capital d'énergie
N^2	Particules	Capital de masse
N^3	Biologique	Capital de structures topologiques
N^4	Systèmes sociaux	Capital symbolique

Table 1: Résumé de l'identité et du capital de chacun des 5 niveaux fondamentaux sur lesquels se situent les systèmes.

Comme nous le verrons plus tard, les interactions peuvent être la combinaison de plusieurs types d'interactions fondamentales.

Exemple: L'achat d'un objet peut être décomposé en 2 interactions fondamentales. Le prix de revient de l'objet est la part "Différenciation" de l'échange et le bénéfice est la part "Hiérarchisation".

Nous utiliserons le terme **interaction** pour parler des relations qui existent entre deux éléments. Toute interaction implique un **flux**. Par exemple, les particules fondamentales et infiniment petites échangent des bosons, les forces fondamentales. Les structures sociales, infiniment complexes, échangent des mots, des gestes, des attitudes et des objets. Nous associons les types d'interactions à des **fonctions** fondamentales tels des opérateurs mathématiques permettant de construire des systèmes complexes auto-organisés. Nous précisons ces fonctions dans la suite de cet essai. Elles constituent le socle et la logique fondamentale d'où émergent l'information et son incarnation dans le monde physique qui nous constitue.

Exemple: Un système peut être comparé mathématiquement à la transformation du boulanger (voir annexeD). Il étire la pâte (type R), puis la coupe ou la plie (type D), l'empile (type H) et la fusionne (type L) pour mélanger ses ingrédients. Cette procédure topologique décrite dans les théories du chaos permet d'expliquer une forme d'indétermination (le battement d'aile du papillon qui engendre une tornade) qui fait émerger des propriétés nouvelles non déductibles des éléments constitutifs des systèmes.

Le concept MICROGLOBAL est une sorte de lunette qui montre la réalité systémique du monde en décomposant ses éléments et ses dynamiques en systèmes autonomes qui évoluent dans des environnements en perpétuel changement. Cette décomposition du monde en systèmes, cet assemblage d'éléments en systèmes, s'effectue des éléments les plus petits, issus de la physique fondamentale, aux éléments les plus globaux de la cosmologie, en passant par les systèmes les plus complexes de la société humaine. L'approche MICROGLOBAL définit des niveaux fondamentaux sur lesquels se développent les systèmes. Ces niveaux sont au nombre de cinq: sociale, biologique, particulière, ondulatoire et espace-temps.

Exemple: Sur le niveau topologique le plus complexe, celui des systèmes biologiques, il existe dans un ordre croissant de complexité: les atomes, les molécules, les organites, les cellules, les êtres vivants et les écosystèmes. Sur le niveau social, on distingue par exemple: l'individu, la famille, la ville, l'entreprise, le syndicat, le club de sport, l'état, etc.

Comme résumé dans le tableau 1, chacun des 5 niveaux fondamentaux est caractérisé par l'émergence d'une identité que l'on considère comme le capital du système. Pour le niveau N^0 , l'espace-temps est constitué d'un capital d'information. Pour le niveau N^1 , les ondes sont constituées d'un capital d'énergie. Au niveau N^2 , Les particules sont constituées d'un capital de masse. Au niveau N^3 , le capital de structures topologiques engendre la dynamique biologique. Finalement, au niveau N^4 , le capital symbolique engendre les systèmes sociaux. Le capital est stockable, mesurable et utilisable. Il se transforme, s'échange, s'utilise, se construit et se dégrade.

La systémique est la science de l'organisation et de la dynamique des systèmes auto-organisés [8]. La hiérarchie est au cœur du processus d'organisation, comme le temps est au cœur de la dynamique systémique. Intégrer la notion de hiérarchie et de temporalité dans la mesure des flux est donc un outil puissant pour comprendre et simuler l'évolution des systèmes. Historiquement [29], nous

distinguons deux générations dans l'approche systémique. La première, née du structuralisme [38], de la cybernétique et de la théorie de l'information, est centrée sur les concepts de structure, d'information, de régulation, de totalité et d'organisation. Le concept essentiel est sans doute celui de régulation tel qu'il est défini à travers la notion de boucle de rétroaction. La seconde intègre l'auto-organisation avec la notion de systèmes ouverts qui s'organisent de l'intérieur en interaction avec l'environnement. Un système ouvert échange de la matière, de l'énergie et de l'information avec son environnement. Cela permet au système de créer des boucles de néguentropie et ainsi de maintenir et de construire sa complexité et son autonomie. Nous proposons une troisième génération, introduite par le concept MICROGLOBAL. Celle-ci décrit une analyse centrée sur la typologie des flux et étend la notion de systèmes à l'ensemble de la nature. On parle alors de systémique fractale. De l'espace-temps au social, en passant par les ondes, les particules et la biologie, cette approche permet de mieux comprendre les divergences d'interprétation entre la physique classique et quantique. Les constantes universelles, si précisément ajustées, trouvent une explication dans la dynamique systémique qui ajuste ses variables pour maximiser la complexité et la durabilité qui lui est associée.

Cette troisième génération est caractérisée par la notion de niveaux systémiques associés aux dimensions de l'espace-temps (voir annexe C). Le premier niveau est virtuel (niveau 0, noté N^0). Il contient l'information encodée dans les quantas de l'espace-temps, décrits comme des boucles de spins de la théorie de la gravitation quantique à boucle [28]. De la perturbation de ce niveau N^0 émerge l'énergie sous forme d'onde, le niveau N^1 , défini dans une seule dimension de l'espace-temps. De la perturbation et de l'interaction des ondes émergent des particules au niveau N^2 qui se définissent dans 2 dimensions de l'espace-temps, avec l'émergence de la masse, de la charge, de la couleur et du spin. Puis, de l'interaction des particules qui se lient, émergent les formes au niveau N^3 , dans une dynamique à 3 dimensions et dont les systèmes les plus complexes sont les systèmes biologiques. Enfin, de l'interaction des systèmes biologiques émergent les systèmes sociaux au niveau N^4 , avec leur capital symbolique qui évolue en 4 dimensions puisqu'ils intègrent le temps en donnant du sens aux symboles par référence à une expérience temporelle.

Comme l'illustre la figure 2, l'approche MICROGLOBAL est **fractale** car tous les systèmes, quel que soit leur dimension spatiale ou leur niveau de complexité, ont la même structure logique. Le niveau le plus fondamental est composé de 4 axiomes qui se conjuguent avec des éléments différents sur des niveaux de complexités variées. Ces 4 axiomes définissent la singularité d'où émerge l'ensemble de la complexité du monde. Le concept MICROGLOBAL rejoint la définition première des fractales au niveau N^3 , niveau dans lequel les formes sont l'objet de la dynamique systémique [16]. En effet, les fractales ont d'abord été décrites comme des objets géométriques auto similaires invariants d'échelle. De la même manière que des formules simples, comme la courbe de Von Koch [29], donnent une figure fractale [16] en se répétant à des échelles de plus en plus petites, la formule du concept MICROGLOBAL avec ses 4 fonctions fondamentales, en se répétant à des niveaux de plus en plus complexes et composé de systèmes emboîtés, fait émerger la complexité du monde que nous observons. Les lois émergent de ces principes fondamentaux et s'ajustent pour maximiser la complexité et la durabilité des systèmes [21].

Nous précisons dans ce chapitre les termes et les notions utilisées pour décrire le concept. Nous prendrons des exemples en lien avec les systèmes sociaux car, en tant qu'individu social, nous avons une compréhension intuitive de ces systèmes puisque nous y sommes intégrés et que nous y avons développé notre langage symbolique et logique.

3.1 Le système

Le **système** est défini par opposition à l'**environnement**. Les **éléments** qui constituent un système partagent la même identité que le système. Comme l'illustre la figure 3, les éléments peuvent être intégrés dans plusieurs systèmes différents et donc intégrer plusieurs identités. Les systèmes sont organisés en niveaux, qui sont eux-mêmes des systèmes. Ils peuvent être partiellement ou totalement imbriqués les uns dans les autres. Ce qui fait partie du système est **interne** et ce qui fait partie de l'environnement est **externe** au système. L'interface entre ces deux espaces est la **frontière** du système.

Exemple: Une entreprise qui fabrique des vélos aura pour identité le "vélo". L'employé travaillant dans cette usine

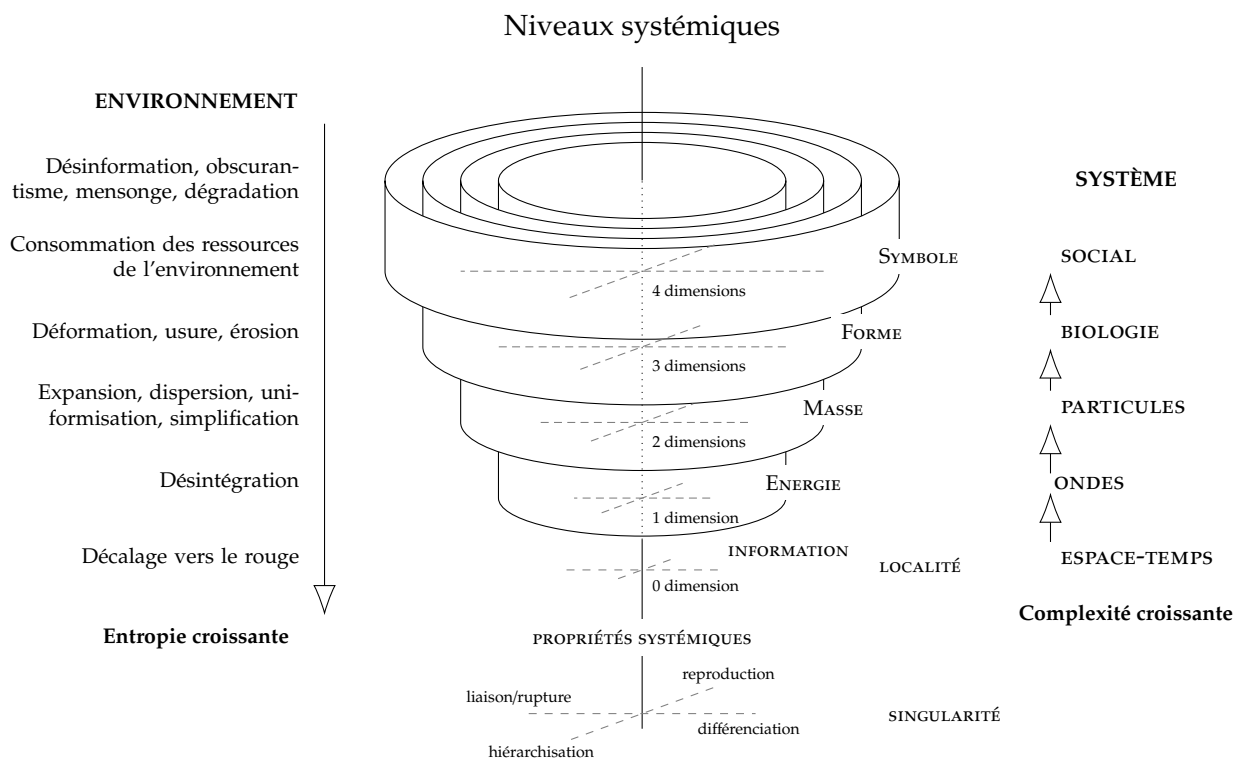


Figure 2: Les systèmes, quels que soit leur complexité, ont tous la même structure logique: Reproduction, Différenciation, Hiérarchisation et Liaison. Ils sont construits les uns sur les autres, des moins complexes au plus complexes, de l'espace-temps, aux systèmes ondulatoires, aux particules fondamentales, aux assemblages de particules portant des propriétés de formes dont les plus abouties sont les systèmes biologiques, et enfin aux systèmes sociaux. La complexité des systèmes augmente avec l'empilement des niveaux. La croissance et le fonctionnement des systèmes complexes entraîne une augmentation d'entropie dans l'environnement.

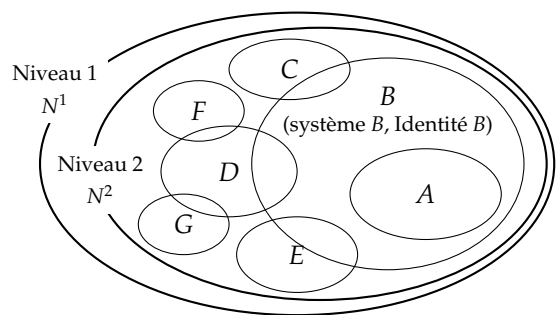


Figure 3: Description des systèmes et de leurs imbrications. Les systèmes sont organisés en niveaux puis en systèmes imbriqués totalement ou partiellement les uns dans les autres. Plus les cercles ont d'intersections et sont inclus dans d'autres, plus ils sont complexes. Les niveaux sont des systèmes, les niveaux supérieurs étant inclus dans les niveaux inférieurs: $N^2 \subset N^1$. Les systèmes sont inclus dans un niveau, $A \subset N^2$, les uns dans les autres, $A \subset B$, et emboîtés $B > A$. Les systèmes ont de multiples identités individuelles: $B \cap C \cap D \cap E$. Ils ont une identité commune B. L'identité d'un système est son émergence et est composé de la somme des identités de ses éléments. Les frontières sont les limite des systèmes. L'environnement correspond à ce qui se trouve en dehors d'une frontière: F et G sont l'environnement de B, B est l'environnement de A. Un système correspond à ce qui se trouve à l'intérieur d'une frontière. Le système englobe des éléments partageant la même identité totale ou partielle. Finalement, les éléments sont des parties composant un système: A, C, D, C sont des éléments de B, soit $B = \{A, C, D, E\}$.

partagera une partie de son identité avec son entreprise, sachant qu'il est aussi intégré dans un club de foot, dans une commune et dans une famille, chacun de ces groupes ayant sa propre identité. L'utilisateur d'un vélo partage une petite fraction de l'identité du "vélo". Il en est de même pour le fournisseur de pièces à l'usine de vélo. En revanche, les machines et outils de cette entreprise ont uniquement l'identité de l'usine car elles n'ont pas d'autres fonction que de produire des vélos.

3.2 L'identité

L'**identité** est l'essence même du système, ce qui le caractérise, ce qu'il produit pour son environnement et ce que l'environnement reconnaît et perçoit du système. À la différence des définitions psychologiques de l'identité [26], définie comme un sentiment subjectif d'harmonie, une intériorisation de sa place et de son intégration dans un système plus grand [30], l'utilisation en systémique est plus proche d'une vision sociale (socialisation de Piaget [38]) en ce qu'elle considère le rapport entre le collectif (système) et l'individu (l'élément). L'identité caractérise non seulement le système dans sa globalité, mais aussi les éléments qui composent le système à l'intérieur desquels l'identité du système est gravée (principe hologrammatique [34]). Cette notion n'est pas restreinte aux individus, mais s'étend à l'ensemble des systèmes, qu'ils soient sociaux, biologiques ou physiques.

Exemple: l'identité de l'entreprise qui produit des vélos est le vélo et non pas ses caractéristiques internes de gouvernance, d'organisation ou de production. Ces éléments peuvent changer tout en gardant la même identité perçue par l'environnement.

3.3 La hiérarchie

Les éléments d'un système interagissent entre eux à travers des transferts d'informations, d'énergie, d'outils, d'objets et d'autre forme d'utilité ou d'inutilité (déchets). Ces transferts sont des **flux** caractérisés par leurs sens, leur valeur, leur identité, leur réciprocity et le promoteur de l'interaction.

Les théories de l'échange social [45] formulent les relations entre les individus d'un point de vue psychologique, avec un aspect intériorisé de la mesure des coûts-bénéfices, et d'un point de vue social, avec une analyse économique de la relation entre l'individu et son environnement. Les relations de pouvoir-dépendance et la réciprocity (le bénéfice doit être rendu pour stabiliser les relations) sont au cœur des théories de l'échange. Nous retenons dans notre analyse la relation de pouvoir, en caractérisant les éléments en interaction par leur rapport hiérarchique et la réciprocity de leurs échanges en lien avec le renforcement mutuel, que nous qualifions de lien social. Un échange est toujours engendré par un des deux éléments en interaction. On nomme l'**initiant** ou le **promoteur** l'élément qui engendre l'interaction. Cette mise en relation correspond à une énergie d'activation, à une barrière d'énergie à franchir et à l'information nécessaire à initier l'interaction entre les éléments.

Le rapport de pouvoir que nous appelons **hiérarchie** est une valeur relative et un potentiel entre deux éléments. Nous déterminons 4 types de relations hiérarchiques au regard des flux entre deux éléments. Nous les détaillerons dans la suite de ce travail. Il s'agit de la formule suivante (1):

$$\begin{array}{l}
 A \Leftrightarrow B \quad \text{soit} \quad A \rightarrow b \quad \text{et} \quad B \rightarrow a \\
 A \rightarrow B \\
 A \leftarrow B \\
 A \rightarrow B \quad \text{puis} \quad B \rightarrow a \quad \text{puis} \quad A \rightarrow b \quad \dots
 \end{array} \tag{1}$$

Le symbole identifie un élément et non pas une identité. Le sens de la flèche indique le sens du flux. Le promoteur du flux est l'élément à l'origine de la flèche. La majuscule indique une position hiérarchique haute et la minuscule une hiérarchie basse.

L'élément hiérarchiquement supérieur ($A > b$) possède plus de valeurs, plus d'objets, ou plus de savoir par rapport à l'identité concernée. Il y a donc naturellement diffusion de ces valeurs à travers des flux de l'élément hiérarchiquement supérieur vers l'élément hiérarchiquement inférieur,

augmentant l'entropie du système ¹. Mais il y a aussi les flux inverses qui construisent des capitaux et de la complexité ². L'impression que nous, les individus sociaux, ayons à faire des choix n'est pas en contradiction avec la réalité physique qui cherche à minimiser les contraintes. La perception individuelle de ces contraintes nous pousse à faire des choix positifs (complexité croissante) ou négatifs (entropie croissante).

Exemple: Monsieur b achète un vélo à l'entreprise A. Le prix du vélo est composé du prix de revient et du bénéfice. Plus le bénéfice est important, plus la hiérarchie est importante entre le client et le vendeur (cas $A > b$). Mais avant cela, l'entreprise a fait beaucoup de publicité pour démontrer la valeur de son vélo. L'entreprise A a éduqué Monsieur b ($A \rightarrow b$). L'entreprise donne une garantie de 5 ans sur son vélo, créant un lien entre A et b ($b \rightarrow A \rightarrow b$). Si Monsieur B travaillait dans l'entreprise A, alors il aurait acheté le vélo à prix coûtant ($A = B$).

Comme il existe plusieurs identités, les systèmes possèdent des hiérarchies multiples, une spécifique pour chaque identité.

Exemple: Monsieur B est professeur de guitare et donne des cours à Monsieur c. Monsieur B a beaucoup de compétence et de connaissances en guitare par rapport à Monsieur c ($B > c$), compétence qui sont payées en argent (cas $C > b$), de sorte que l'échanges est réciproque.

3.4 La réciprocité

La réciprocité est une caractéristique fondamentale des relations au sein des échanges sociaux et, par extension, à l'ensemble des systèmes. Elle est un flux inverse qui compense l'ensemble ou une partie du flux primaire initié par le promoteur de l'interaction et dénote un intérêt commun [31]. La réciprocité (Temporalité = T) trouve un optimum selon la formule ci-dessous (2). Si elle est trop rapide ou trop lente, alors elle est moins efficace pour le lien social. En revanche, plus la valeur et la fréquence sont importantes, plus le lien est fort.

$$\text{LIEN} = \text{VALEUR} \times -T(T + b) \times \text{FRÉQUENCE} \quad (2)$$

Exemple: Le lien familial est généralement le plus fort, car la réciprocité a une durée très longue et permanente. L'invitation faite à des amis en réponse à leur invitation crée un lien social convergeant vers des intérêts communs qui renforcent les croyances et les pratiques sociales.

Une des théories de l'échange social [45] utilise la matrice coûts-bénéfices de la théorie des jeux pour expliquer les dynamiques de décision. Elle correspond à ce que nous appelons **produit** (bénéfices) et **charges** (coût). En généralisant ces concepts, nous comprenons ces choix par l'optimisation de contraintes intérieures (psychologiques) et extérieures (sociales) et dont la résultante finale est la minimisation des contraintes spatiales et temporelles se résumant à la minimisation de l'information.

Exemple: Monsieur B a acheté un vélo pour se rendre à son travail. Il a fait un calcul économique, car le vélo est moins cher que la voiture pour faire les trajets vers son travail, un calcul biologique car il économise du temps (pas de bouchons) et un calcul psychologique, car il pense que son choix renvoie une bonne image de lui-même.

Les **contraintes** dont nous parlerons dans cet article sont la résultante des formes de hiérarchies, de déséquilibres et d'asymétries. Ces contraintes sont le moteur des flux qui maximisent l'entropie tout en érodant le capital et la complexité qui le construit.

¹Fait partie du concept des minimisation des contraintes spatiales, que nous détaillerons dans la troisième partie.

²Concept de la minimisation des contraintes temporelles, également détaillé dans la troisième partie.

3.5 Le capital et l'émergence

Le **capital** est un potentiel qui permet de produire un travail. Il concentre et accumule l'information, l'énergie et la matière. Il protège les systèmes, eux-mêmes des capitaux, en ralentissant leur dégradation. Le capital fige des flux pour les restituer plus lentement et plus tard. Il est le résultat d'une hiérarchie entre deux entités: un système et son environnement. La différence de potentiel créée par cette hiérarchie doit être locale et permettre de connecter les entités entre elles. En effet, pour que le capital produise du travail, il doit y avoir des interactions et des flux.

Exemple: Un gradient de température dispersé dans un vaste espace ne permet pas d'opérer un travail, alors que ce même gradient entre un système et son environnement proche permet de produire un travail et constitue un capital. L'entropie est identique, mais le capital différent.

Un système actif est dynamique. Il entretient et développe sa complexité à travers les interactions avec son environnement, notamment par le prélèvement de ressources. Il devient inactif lorsqu'il n'y a plus de flux avec l'environnement. Il peut cependant toujours constituer un capital pour son environnement.

Exemple: Du bois mort est un capital provenant d'un système éteint, mais qui a accumulé des capitaux passifs durant sa vie. L'arbre vivant est un capital issu d'un système dynamique complexe.

Le capital est **passif** lorsqu'il fige dans le temps de manière passive des situations à forte hiérarchie (sources d'énergie, de matière concentrée, etc). Le capital passif est une accumulation d'éléments au sein d'un système. Plus il y a d'éléments dans un système, plus son capital passif est important. Sa valeur est égale au coût d'acquisition. À l'opposé, le capital est **actif** lorsqu'il permet de construire la complexité dans une dynamique systémique. Il permet de produire de la hiérarchie entre le système et son environnement. Nous étudions dans cet essai le capital *actif* à travers les flux entre le système et son environnement. Il est plus facile et moins aléatoire de mesurer des flux que d'estimer la valeur d'un capital par son potentiel d'action. Le capital passif est la valeur ou le **coût d'intégration** des éléments du système. Intégrer des éléments dans un système permet de le globaliser en augmentant son capital passif. Le capital passif est donc la somme des valeurs consommées afin d'intégrer des éléments au système. Ensuite, celui-ci est activé par le système pour devenir actif et productif. Cette **activation** dépend de la dynamique systémique. Elle peut être plus ou moins efficace et avoir un rendement plus ou moins élevé. La relation entre le capital passif et le capital actif est définie par la formule suivante (3):

$$\text{CAPITAL PASSIF} \times \text{RENDEMENT} = \text{CAPITAL ACTIF} \quad (3)$$

Exemple: Vous allez couper du bois dans la forêt et le ramenez dans votre maison. Le capital passif de votre bois est l'énergie que vous avez dépensé pour aller chercher le bois. Le capital actif sera déterminé par l'environnement dans lequel vous brûlez le bois. Une cheminée ouverte ou un fourneau aura un rendement différent et fera de votre bois un capital énergétique plus ou moins grand. C'est l'environnement qui détermine le réel capital de vos biens. Si vous avez des francs CFA, ils ne vaudront rien dans un magasin en Suisse. Si vous avez de l'eau à 30 degrés, se sera un capital précieux au Groenland mais inutile dans le Sahara.

Exemple: Au niveau social, le capital passif correspond aux valeurs inscrites à l'actif de la comptabilité. Le capital actif est la valeur de rendement. Le capital passif d'une société est composé de la sommes des valeurs symboliques du systèmes 4D (argent, connaissance, savoir-faire,...), des valeurs topologiques 3D (compétences des employés, machines, outils, ...), des valeurs de matière 2D (matière première, ...) et de l'énergie accumulée 1D. Une machine qui ne fonctionne pas est un capital passif. Dès qu'elle entre en production, elle devient un capital actif. Un employé est un capital actif que lorsqu'il travaille.

Exemple: Au niveau quantique, l'information est stockée dans les quantas de l'espace-temps, les spins de la gravité quantique à boucle. Cette information est indéfinie tant qu'elle ne participe pas, ou qu'elle ne définit pas des interactions dans les niveaux supérieurs. Ainsi, ces éléments portant de l'information sont un capital passif qui devient un capital actif lorsqu'ils définissent des interactions. L'information utile encode des interactions. Lorsque les interactions sont rompues, l'information devient inutile car elle retourne dans un état aléatoire et indéfini. C'est la dynamique quantique qui fait émerger des particules lors des interactions (et des observations) du brouillard d'onde dans laquelle l'énergie se trouve. C'est l'interaction qui produit l'information utile et le capital actif.

Le capital dans sa définition sociale correspond au capital dans sa formulation physique par la formule définissant le travail: $W = Fu$. La force F est un capital passif et statique. Lorsqu'il est conjugué et appliqué sur une distance u il produit un travail W , c'est-à-dire un capital actif et dynamique. Le capital symbolique est statique lorsqu'il décrit par exemple une formule mathématique ou un texte. La lecture de ce texte et de cette formule, c'est-à-dire l'acquisition d'un savoir, permet de produire par exemple plus efficacement un travail. Ce savoir est une réduction symbolique de phénomènes reproductibles qui permet d'optimiser des processus dynamique. L'énergie, sous toutes ses formes, est un capital statique. Sa diffusion et ses flux permettent de produire du travail et un capital dynamique. La masse m est un capital statique. Placée dans un champ d'accélération a , elle produit une force F , capital dynamique dans le niveau N^2 .

Le **rendement** définit l'émergence du système réalisée par l'exploitation du capital passif. Un rendement supérieur à 1 est le signe d'une émergence qui construit un système complexe. Un rendement égal à 1 permet de compenser l'usure du capital par sa capacité de production. Un rendement inférieur à 1 est un capital en dégradation. L'entropie l'emporte sur l'émergence et la complexification. L'information se dégrade.

Exemple: La liaison de 2 molécules d'hydrogène avec une molécule d'oxygène a des propriétés émergentes car le capital d'origine n'est pas dégradé (réversibilité avec une constante d'équilibre) et les propriétés de l'eau sont un nouveau potentiel, un nouvel état, un nouvel environnement. En terme d'information, l'information utile est plus importante avec de l'eau car les liaisons covalentes formées entre la molécule d'oxygène et les deux molécules d'hydrogène sont une information supplémentaire encodée dans les quantas de l'espace-temps.

L'**émergence** systémique provient de la valorisation des capitaux passifs. Les systèmes créent des environnements spécifiques qui activent les capitaux passifs de sorte que la valeur du capital activé est supérieure à la somme des valeurs d'intégration. Les systèmes accumulent des capitaux statiques au cours de leur histoire. Ils produisent leur identité par activation de ces capitaux. La valeur de l'identité du système est déterminée par le capital actif qui, une fois externalisé, devient le capital passif de l'environnement. La dégradation du capital passif et la dynamique des capitaux actifs produisent des flux. Et inversement, les flux produisent des capitaux. Nous mesurons donc le capital à travers les flux qu'ils produisent.

Exemple: La valeur en bourse d'une entreprise est estimée par anticipation de son capital actif (capacité de produire de vendre, d'innover,...) et de son capital passif (réserves de ressources matérielles, humaines, financières...).

Le capital s'exprime avec différentes unités de mesure selon le niveau considéré. Pour le niveau N^4 , le niveau social, il s'agit d'une valeur symbolique, la valeur monétaire. Pour le niveau N^3 , le niveau biologique, il s'agit d'une unité de force. Pour le niveau particulière, N^2 , il s'agit de la masse des particules. Au niveau N^1 , le niveau ondulatoire, il s'agit d'une valeur d'énergie. Finalement, au dernier niveau N^0 , l'espace-temps, il s'agit d'une valeur informationnelle. La relation entre les unités et leur niveau est résumée dans le tableau 2. Le capital dépend de sa concentration spatiale et temporelle ainsi que de son utilité dans la construction systémique. Pour constituer un capital, une information doit être utile ou utilisable. L'énergie doit être exploitable, la matière suffisamment concentrée pour être purifiée, les compétences apprises, et la valeur monétaire échangeable.

Exemple: l'entreprise de vélos a un capital statique à tous les niveaux considérés. Elle possède un capital financier comme fond de roulement, des employés qui ont du temps et des compétences, des matières premières pour construire les vélos et

Niveau	Identité	Unité de mesure du capital
N^0	Espace-temps	L'information
N^1	Onde	Energie
N^2	Particules	Masse
N^3	Biologique	Force
N^4	Systèmes sociaux	Symbolique

Table 2: Résumé de l'identité et unité de mesure du capital pour chacun des 5 niveaux.

Transition de niveau	Changement d'unité	Formule
$N^0 \rightarrow N^1$	Bits d'information \rightarrow Énergie	Principe de Landauer $E = kT \ln 2$
$N^1 \rightarrow N^2$	Énergie \rightarrow Masse	Relation d'Einstein $E = mc^2$
$N^2 \rightarrow N^3$	Masse \rightarrow Force	Formule de Newton $F = ma$
$N^3 \rightarrow N^4$	Force \rightarrow Travail	Formule du travail $W = Fu$

Table 3: Transformation successive des unités entre les niveaux. Du niveau N^0 au niveau N^4 , les bits d'information sont transformés en énergie, l'énergie en masse, la masse en force, et la force en travail. Chaque transformation utilise un principe établi: le principe de Landauer, la relation d'Einstein, la formule de Newton, puis celle du travail, respectivement.

de l'énergie pour faire tourner les machines de production.

Les unités des capitaux sont convertibles puisque chaque niveau se construit sur le niveau inférieur. Les bits d'information du capital de niveau N^0 sont convertibles en énergie au niveau N^1 à l'aide du principe de Landauer, qui définit un niveau d'énergie minimal $E = kT \ln 2$ pour effacer un bit d'information. L'énergie du niveau N^1 est convertible en masse au niveau N^2 avec la relation d'Einstein $E = mc^2$. La masse qui structure l'espace-temps du niveau N^2 est convertible en force dans un champ gravitationnel au niveau N^3 avec la formule de Newton $F = ma$. Finalement, la force du niveau N^3 est convertible en travail au niveau N^4 avec la formule $W = Fu$. Les conversions entre les différents niveaux sont résumées dans le tableau 3. Les notions de transformation des forces seront approfondies dans la deuxième partie de cet essai.

4 Les quatre fonctions fondamentales

Au cœur du concept MICROGLOBAL, comme nous l'avons déjà présenté, se trouve l'identification de 4 fonctions fondamentales nécessaires pour qu'un système acquière une dynamique d'auto-organisation. Comme nous le verrons plus tard (figure 12), les 4 fonctions peuvent se visualiser sur un schéma à 4 pôles où chaque pôle définit une phase du système. Les caractéristiques de ces 4 fonctions sont définies par 3 variables: la **hiérarchie** entre les éléments en interaction, la **réciprocité** des flux, réciproque ou non, et la **temporalité** des échanges, instantanée ou différée dans le temps. Ces 3 variables définissent les relations entre deux éléments en interaction, et plus généralement entre un système et son environnement. La figure 4 illustre des zones où se situent les différents types d'interactions en fonction des 3 variables.

Les trois variables (hiérarchie, réciprocity, temporalité) déterminent 4 **typologies d'interactions**. Il s'agit des typologies de type **reproductive**, **différentiative**, **hiérarchique** et **liante**. Chaque interaction ayant deux sens possibles, une fois de l'environnement \mathcal{E} vers le système \mathcal{S} , et inversement du système \mathcal{S} à l'environnement \mathcal{E} , il existe donc 8 types de flux. Les flux de type R et H , non réciproques, interagissent entre le système et son environnement et inversement. Ces flux, intemporels, ont un sens défini par la hiérarchie entre le système et son environnement. Les flux de type D sont intemporels et réciproques. Les flux de type L , internes au système, ont une temporalité leur permettant de créer du lien. En effet, ils opèrent entre un élément A et B du système (les éléments étant toujours internes au système). Finalement, les flux de type L^{-1} (rupture) ont une temporalité trop élevée pour créer du lien. Ils opèrent entre le système et son environnement. La figure 5 résume ces 8 types de flux en les positionnant sur un graphe à 2 axes, hiérarchie et temporalité, et sur lesquels sont positionnés les types de flux selon le sens de leurs interactions. La réciprocity des interactions est définie sur l'axe de la temporalité, des réciprocitys immédiates aux réciprocitys retardées.

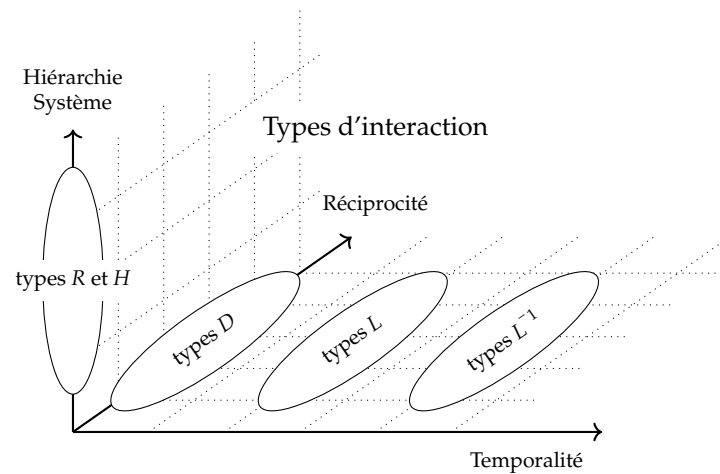


Figure 4: Typologie des interactions entre un système et son environnement selon les 3 variables qui définissent les 4 fonctions fondamentales indispensables et suffisantes à tout système auto-organisé: la **hiérarchie** des acteurs, la **réciprocity** des flux et la **temporalité** des échanges. Chaque variable est représentée par un axe du graphe tri-dimensionnel. Les ovoïdes représente des zones où se situe les interactions.

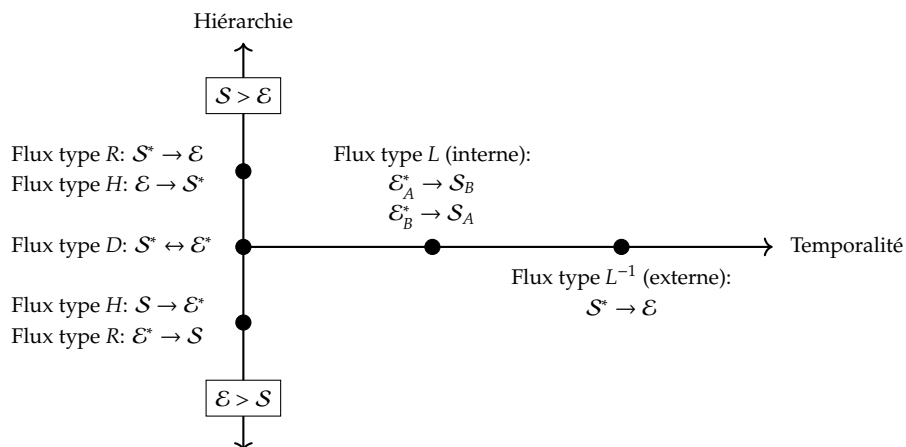


Figure 5: Représentation des 8 types de flux selon la temporalité en abscisse et la hiérarchie en ordonnée. La hiérarchie va de l'environnement qui domine le système (en bas), au système qui domine son environnement (en haut). La temporalité va de la réciprocity immédiate (à gauche), à la réciprocity distante ou différée (à droite). Le système est représenté par le symbole \mathcal{S} et l'environnement le symbole \mathcal{E} . \mathcal{E}_A représente un élément A faisant partie du système \mathcal{E} . En plus de la position sur le graphe qui exprime les variables hiérarchiques et temporelles, les types de flux sont également définis par rapport au sens des interactions, représentés par \rightarrow et \leftrightarrow . L'initiateur du flux porte l'exposant $*$.

Fonction	Type de flux	Capital actif
Reproduction	R	Identité
Différenciation	D	Adaptation
Hierarchisation	H	Organisation, domination
Lien (interne), Rupture (externe)	L, L^{-1}	Collaboration (réseau), Autonomie (frontière)

Table 4: Résumé du type de flux et de capital produit par chacune des 4 fonctions fondamentales.

Les 4 fonctions sont des variables d'état. Au niveau le plus fondamental, sur lequel la complexité des niveaux supérieurs se construit, ces variables sont de l'information. Cette information est composée de variables discontinues, vrai ou faux, 0 ou 1, et donne naissance aux états discrets du monde quantique. Ce n'est que dans les niveaux supérieurs, de plus en plus complexes, que l'on observe un monde continu à l'échelle de notre expérience domestique. Les 4 fonctions, déterminées par 4 types de flux, déterminent 4 types de capitaux actifs. Le rapport entre ces 4 capitaux actifs détermine le comportement des systèmes et leur complexité. La fonction de reproduction, déterminée par le type R , produit un capital d'identité. La fonction de différenciation, déterminée par le type D , produit un capital d'adaptation. La fonction de hiérarchisation, déterminée par le type H , produit un capital d'organisation et de domination. Finalement, les fonctions de lien (en interne) et de rupture (en externe) produisent respectivement un capital de collaboration, ou autrement dit de réseautage, et d'autonomie, c'est-à-dire la création de **frontières**. Les 4 fonctions avec leur type de flux et le capital associé produit sont résumées dans le tableau 4.

Lorsque nous étudions un système, nous nous concentrons sur ses interactions avec l'environnement. Cependant, l'intérieur des systèmes est composé de multiples sous-systèmes. Nous distinguons ainsi les **flux externes** composés des interactions entre le système et son environnement et les **flux internes** composés des interactions entre sous-systèmes partiellement ou totalement intégrés au système étudié.

Exemple: Nous pouvons évaluer une entreprise en fonction de ses flux externes et ses flux internes. Les éléments qui composent l'entreprise, ses sous-systèmes, peuvent être totalement intégrés comme des outils et des machines ou partiellement intégrés comme des employés. Les employés ne sont donc que partiellement intégrés à l'entreprise car ils sont aussi intégrés dans d'autres systèmes sociaux (famille, club, syndicat, etc.). Ils sont à la fois des éléments internes à l'entreprise et des éléments faisant partie de son environnement. L'entreprise agit envers eux d'une part comme des éléments internes en les considérant comme le capital de l'entreprise, et d'autre part comme des éléments externes qu'il faut fidéliser les maintenir dans l'entreprise.

Nous détaillons dans la suite de ce chapitre les 4 types d'interactions et leur rôle dans les systèmes. Pour étayer les propos, nous donnerons quelques exemples d'ordre social. Un tableau récapitulatif est présenté dans l'annexe A.

4.1 Reproduction

La reproduction est engendrée par des flux d'éléments de la haute hiérarchie vers des éléments de la basse hiérarchie. Il n'y a pas de réciprocity et l'interaction est instantanée. L'interaction n'est pas contraignante car les deux éléments, celui qui donne et celui qui reçoit, doivent accepter et valider l'interaction.

Exemple: Les parents donnent de la nourriture, le logement, et l'éducation à leurs enfants. Les commerçants font des promotions en donnant des produits pour les faire connaître. Une cellule qui se divise donne son identité à la cellule fille. La double hélice d'ADN se dédouble pour transmettre son identité. L'article que vous lisez est la transmission de l'identité de son auteur.

Comme illustré sur la figure 6, la fonction de reproduction ou de production consiste à multiplier à l'**identique** un élément social, biologique, physique, informationnel ou mathématique. On les trouve dans la production industrielle, la reproduction biologique asexuée ou la fonction de multiplication en mathématiques. Pour produire un élément identique, il faut copier et dupliquer de l'information.

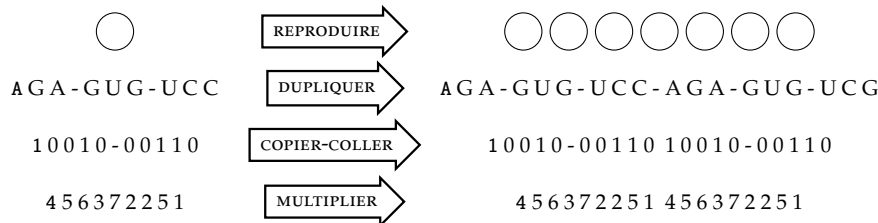


Figure 6: Illustration de la fonction de reproduction pour des systèmes topologiques, biologiques, informatiques et mathématiques. Elle consiste à reproduire des formes, dupliquer des codes d'ADN, copier et coller des lignes de codes et multiplier des variables.

La reproduction implique des flux **internes** au système pour réaliser une **production** et des flux **externes** pour transmettre et externaliser l'identité du système à son environnement.

Externaliser l'identité du système se réalise principalement à travers des flux de type *R*, Reproducteur (don, publicité, promotion, aide) et de type Différenciateur *D* (échange, vente, troc). Ils permettent la **reproduction** du système qui se dédouble et acquiert la même auto-organisation et autonomie que son parent. Ils permettent également la **diffusion** de l'identité du système, ce qui justifie sa place dans l'environnement et la hiérarchie qu'il y occupe. Le système qui se dédouble, s'agrandit ou qui transmet son identité à son environnement constitue une expansion de sa sphère d'influence et d'action. Le système puise dans ses ressources internes pour se développer, produire et imposer son identité à l'environnement sans qu'une contrepartie soit demandée à l'environnement.

Lorsqu'un système se **dédouble**, l'original donne son identité à sa copie sans contrepartie. Lorsqu'il **s'agrandit**, le système investit pour lui-même en multipliant ses composantes internes. Lorsqu'un système **externalise** son identité, le bénéficiaire est l'environnement qu'il cherche à intégrer pour se globaliser. Le bénéficiaire est toujours un élément hiérarchiquement inférieur pour l'identité en question. Lorsque l'identité est échangée, la plus-value est à la fois interne et externe (type *D*), mais lorsqu'elle est donnée (type *R*), la plus-value est principalement interne car elle permet d'agrandir le système et son identité. Nous parlons de reproduction pour cette stratégie d'expansion qui recouvre 3 activités. La première activité est la **croissance interne**, autrement dit l'agrandissement du système et le développement de son identité interne. La deuxième activité est le **dédoublement**, qui est un processus de multiplication du système en vue d'acquérir de l'autonomie. Finalement, la dernière activité est l'**externalisation** de l'identité pour intégrer l'environnement au sein du système.

La **mesure** du niveau de reproduction d'un système est la quantité de flux en hiérarchie descendante (de la haute vers la basse hiérarchie) que ce système donne en interne et en externe. Nous distinguons les dynamiques **interne** et **externe** de reproduction. La dynamique interne de reproduction est mesurée à travers l'affectation des ressources (investissement, formation, etc.). Elle caractérise l'investissement dans la croissance interne et le dédoublement des systèmes. C'est une stratégie d'adaptation à l'environnement (stratégie parallèle) qui se referme sur elle-même. La dynamique externe de reproduction, quant à elle, est mesurée à l'aide des flux avec l'environnement (publicité, promotions, etc.). Elle caractérise la dynamique de conquête et d'intégration de l'environnement dans son système. C'est une stratégie de transformation de l'environnement pour l'adapter à ses propres contraintes et à son identité (stratégie sérielle). C'est une stratégie qui s'ouvre sur l'environnement.

4.2 Différenciation

La différenciation est engendrée par des flux réciproques, c'est-à-dire égaux en valeur, entre éléments de hiérarchies différentes pour les identités qu'ils échangent. Chaque élément est hiérarchiquement supérieur à l'autre pour l'élément qu'il transmet. La réciprocité est instantanée, de sorte qu'il n'y a aucun solde après l'échange qui ne crée ni dépendance ni lien. La différenciation est qualitative et horizontale, puisque les échanges sont de valeur identique.

Exemple: Un maraîcher achète un vélo. Le vendeur de vélos est hiérarchiquement supérieur au maraîcher pour l'identité "vélos". Inversement, le maraîcher est hiérarchiquement supérieur au producteur de vélo pour l'identité "légumes". Tous deux ont une spécificité et sont hiérarchiquement supérieurs dans leur domaine de compétence. Leur échange, vélos contre légumes, se réalise à valeur égale car rapporté à une mesure commune, celle de la valeur monétaire, les éléments ont la même valeur.

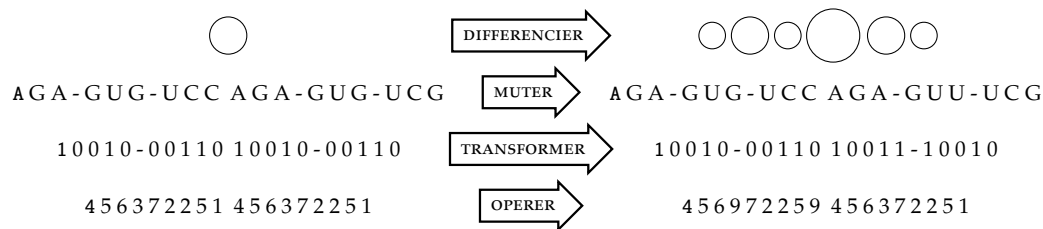


Figure 7: Illustration de la fonction de différenciation pour des systèmes topologiques, biologiques, informatiques et mathématiques. Elle consiste à modifier des formes, muter des codes d'ADN, transformer des lignes de codes et procéder à des opérations sur des variables.

La différenciation est un processus qui transforme des éléments pour les rendre différents (voir figure 7). Elle les transforme soit pour optimiser le système (objectifs internes), soit pour mieux s'adapter à l'environnement (objectifs externes). La différenciation spécialise les éléments pour les rendre plus performants à une fonction spécifique. Dans les systèmes sociaux par exemple, la différenciation est engendrée par les activités de recherche et développement. En biologie, on trouve les processus de mutation, de crossing-over et de méiose. En chimie et en biochimie, il existe de multiples types de réactions et de liaisons permettant de différencier les molécules et d'assembler les atomes. Les réactions organiques d'addition, de substitution ou d'élimination, les réactions chimiques de synthèse de décomposition ou d'isomérisation en sont des exemples. Au niveau particulière, on retrouve les processus de désintégration et de recombinaison. On observe aussi ce phénomène de différenciation avec l'interférence et la superposition des ondes, ou l'altération, et le traitement de l'information.

En **interne**, la différenciation est le fruit de la recherche et du développement qui caractérise la capacité du système à évoluer, à s'adapter et à rechercher des solutions aux contraintes. Les systèmes optimisent leur fonctionnement interne et réorientent leur identité de manière à mieux s'adapter à l'environnement, rendant cet environnement plus dépendant de son identité.

En **externe**, les systèmes différencient l'environnement par la diffusion de leur identité. Rappelons que l'identité est également transmise à l'environnement à la phase *R* (voir section 4.1). Les échanges sont d'autant plus importants que le système est différencié et spécifique, qu'il est unique et que son environnement est dépendant de son identité. La mesure des échanges réciproques caractérise l'état de spécialisation du système par rapport à son environnement. Pour se différencier, il faut assembler, combiner et ainsi transformer des éléments. Le système choisit avec les interactions de type *D* les éléments qu'il intègre à son système et qui lui permettent de se différencier. Les flux *D* différencient à la fois l'environnement et le système.

Lorsque le système domine l'environnement pour l'identité considérée, les flux *D* sont associés à des flux hiérarchiques *H* (bénéfiques). Lorsque le système a une hiérarchie faible par rapport à l'environnement, alors les flux *D* sont associés à une composante reproductive *R*: promotion, cadeaux, réductions, actions, etc.

4.3 Hiérarchisation

La hiérarchie est engendrée par des flux d'éléments de la basse hiérarchie vers la haute hiérarchie. Il n'y a pas de réciprocité et l'interaction est instantanée. L'interaction est contraignante et initiée unilatéralement par l'élément de la haute hiérarchie. Il y a une contrainte de l'élément de la haute hiérarchie sur l'élément de la basse hiérarchie.

La hiérarchisation est l'action d'organiser les éléments en leur affectant des niveaux d'influence et de pouvoir différents (voir figure 8). Les niveaux les plus élevés ont plus de pouvoir et cherchent à résoudre des contraintes plus globales. Les niveaux les plus faibles résolvent des contraintes locales. Organiser permet d'optimiser le fonctionnement complexe des systèmes en minimisant les charges et en maximisant les profits. Dans un système social (N^4), le secteur primaire est de type *R*, le secondaire de type *D*, et le secteur tertiaire, avec ses activités d'administration, de gestion et de planification, joue un rôle hiérarchique. Au niveau biologique (N^3), les fonctions hormonales et nerveuses organisent et contrôlent le corps. Au niveau moléculaire et particulière, ce sont les propriétés électriques (électronégativité) qui régissent les types de liaisons. La polarisation des ondes pour le niveau N^1 et la redondance de l'information pour le niveau N^0 hiérarchisent les éléments de

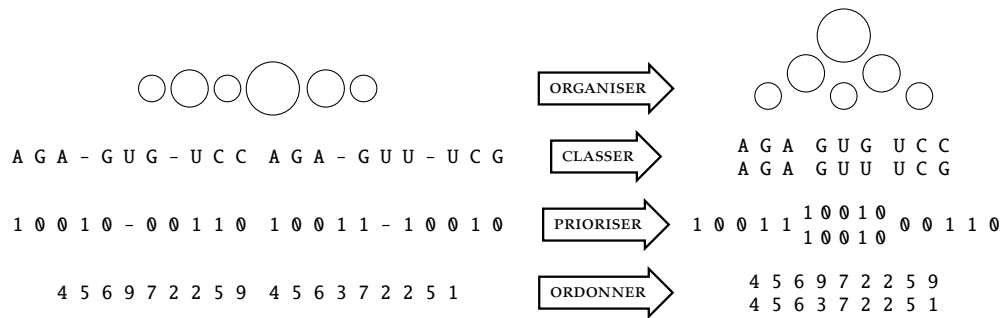


Figure 8: Illustration de la fonction de hiérarchisation pour des systèmes topologiques, biologiques, informatiques et mathématiques. Elle consiste à organiser des formes, classer des codes d'ADN, prioriser des lignes de codes et ordonner des variables.

ces systèmes.

En **interne**, l'organisation permet de maximiser l'efficacité des processus en stratifiant verticalement les éléments afin de résoudre les contraintes aux différents niveaux. Les niveaux supérieurs imposent des contraintes sur les niveaux inférieurs. L'organisation permet de maximiser le rapport produit/charges. Dans un système social, les produits sont l'administration et les charges sont le contrôle, la justice et la répression.

Exemple: L'entreprise de vélos exige que ses employés arrivent à l'heure au travail. Cette exigence permet d'organiser et de planifier efficacement le travail. Mais c'est une contrainte sur l'employé qui doit s'organiser pour arriver à l'heure quelles que soient les conditions météorologiques ou la circulation sur la route.

En **externe**, le profit de l'organisation est internalisé dans le système, alors que les charges et les contraintes sont externalisées dans l'environnement.

La hiérarchie entre les acteurs est au cœur des typologies de flux (voir section 3.3). Cette hiérarchie existe entre les éléments composant les systèmes ainsi qu'entre les systèmes et leur environnement. La hiérarchie est une différenciation verticale car elle implique des différences de pouvoir et de valeurs, alors que la différenciation horizontale (fonction D) est une différence de fonctions. Plus la hiérarchie des acteurs est haute, plus elle est rare et plus elle a de la valeur.

Dans des transactions économiques, plus le profit est grand, plus la hiérarchie est élevée. Lorsque ce **rapport hiérarchique** est bénéfique pour le système, il favorise l'acquisition des ressources nécessaires à la création de l'identité, au développement et à l'expansion du système. La **mesure** du niveau de hiérarchie d'un système se réalise par l'importance des flux hiérarchiques. Plus un flux de hiérarchie est important, plus l'élément qui capte ce flux possède une position hiérarchique élevée.

La **dynamique interne** d'organisation est mesurée dans les systèmes sociaux par l'importance de l'affectation des ressources aux activités tertiaires d'administration, de planification et d'organisation (un gain pour le système), ainsi que des activités de contrôle et de répression (une charge pour le système). Il est crucial pour un système d'ajuster le nombre de niveaux hiérarchiques afin qu'ils ne soient ni trop peu nombreux, ni en excès. Une hiérarchie trop simplifiée entraîne une diminution de la performance due à l'absence de planification, ce qui occasionne des gaspillages de temps, d'énergie et de ressources. À l'inverse, un trop grand nombre de niveaux hiérarchiques génère des coûts administratifs excessifs par rapport à l'amélioration de la performance.

La **dynamique externe** d'organisation est le pouvoir que possède le système sur son environnement. Ce pouvoir est mesuré par l'importance des flux hiérarchiques avec l'environnement. Cette dynamique conditionne l'acquisition des ressources pour le système.

Dans l'ensemble, chaque interaction est soumise à une hiérarchie entre intervenants, que ce soit avec l'environnement ou des sous-systèmes. L'interaction liante fait alterner la hiérarchie entre les éléments. L'interaction de différenciation, même si elle est égalitaire, se réalise entre deux éléments de hiérarchies différentes pour les éléments qu'ils échangent. Les interactions hiérarchiques et de reproduction sont naturellement hiérarchiques car il n'y a pas de réciprocité.

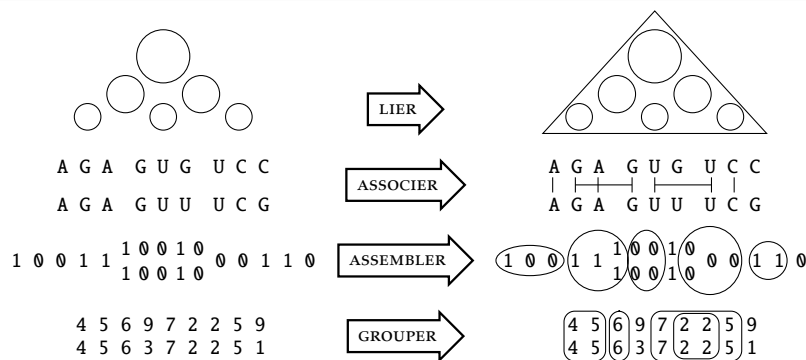


Figure 9: Cette figure illustre la fonction de liaison pour des systèmes topologiques, biologiques, informatiques et mathématiques. Elle consiste à lier et fusionner des formes, associer des codes d'ADN, assembler des lignes de codes et grouper des variables.

4.4 Liaison

La liaison est engendrée par des flux identiques en valeur (comme pour D), mais différés dans le temps. Un flux unidirectionnel de A vers B (type R) au temps t engendre un autre flux, identique en valeur, mais pouvant être différent dans son objet (idem D), au temps $t + \Delta t$ et en sens inverse, soit de B vers A . Ces flux sont volontaires et non contraignants.

Les flux liants sont un mélange des 3 types de flux décrits précédemment. Ils ont la caractéristique de R car ils sont unidirectionnels et volontaires. Ils ont la caractéristique de D car ils sont réciproques et égaux en valeur. Finalement, ils ont la caractéristique de H car ils engendrent une alternance de hiérarchie entre les éléments. En effet, l'élément A est hiérarchiquement supérieur pendant le temps $t + \Delta t$, puis la hiérarchie s'inverse et l'élément B devient dominant avec le contre-flux. Pour maintenir cette alternance, il est nécessaire que l'élément B donne deux fois plus en valeur lors du contre-flux, engendrant une obligation envers l'élément A . Comme nous le verrons par la suite, cette obligation provoque une réaction en chaîne et permet un lien durable.

Comme l'illustre la figure 9, la liaison est un processus qui permet le partage des ressources au sein d'un système. Elle permet à tous les éléments de participer à un même projet, celui de l'identité du système. Cette identité est gravée dans les éléments, quel que soit leur niveau hiérarchique. Le lien donne la confiance et un but commun, et produit une sécurité à travers la dépendance de chaque élément vis-à-vis du système. En effet, le groupe est plus fort qu'un élément isolé.

Le lien est interne au système et garanti par une frontière qui délimite l'appartenance au système et à l'environnement. Cette délimitation permet de produire des bénéfices internes et d'externaliser les charges. Les frontières permettent de se protéger des contraintes de l'environnement. La liaison, pour sa part, permet aux éléments de collaborer au sein d'un réseau. Elle facilite le transfert d'information, d'énergie et de matière entre les niveaux hiérarchiques pour construire l'identité. Par exemple, le domaine des loisirs et du social produisent du lien au sein des systèmes sociaux. Les liaisons aromatiques et métalliques ainsi que les réactions de synthèse et de polymérisation sont typiquement des interactions liantes. Dans les systèmes vivants, ces interactions se réalisent dans des milieux protégés de l'environnement par une membrane semi-perméable. En physique, des champs de force lient les particules. En information, la cohérence des ondes et les suites logiques permettent de lier les éléments au sein des systèmes.

En **interne**, les ressources sont affectées à produire du lien. Ces liens sont des canaux, des ponts et des connexions entre les éléments. Le lien correspond à un protocole de communication. Un code et une procédure qui permettent de communiquer de manière trans-hiérarchique. Dans un système social, cette procédure de communication est réalisée par les activités dites "sociales". Elle développe une compréhension et une vision communes qui permettent aux éléments de partager, de se comprendre et de mutualiser les objectifs du système.

Exemple: Inviter des amis à un repas est un don. Il est en général suivi par un contre-don, le retour de l'invitation. Ces invitations produisent le lien social uniquement dans la mesure où les dons alternent avec les contre-dons dont les valeurs s'annulent. Si vous invitez toujours des amis qui ne vous rendent pas la pareille, alors il existe un rapport hiérarchique et il ne s'agit plus d'un don mais d'un flux éducatif de type R .

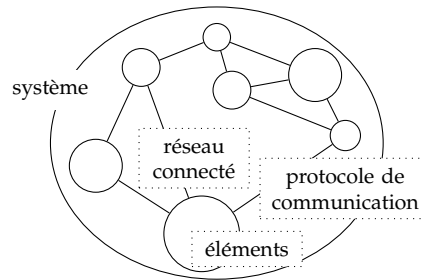


Figure 10: Illustration des liens entre les éléments d'un système formant un réseau connecté. Les liens sont des canaux de communication qui permettent, via le protocole de communication, un même langage, une même interprétation et une même identité.

En **externe**, Les ressources sont affectées au contrôle des flux avec l'environnement en créant une frontière semi-perméable. À la différence des autres phases, il n'y a pas de flux avec l'environnement, puisque l'objectif est de créer une frontière. Il y a en revanche des flux sortants lorsque la temporalité de l'échange est supérieure à la valeur b : le temps de mémoire liante du système. Ces flux, sans réciprocité liante, constituent les flux extérieurs de type L^{-1} (Rupture). Il s'agit de l'externalisation des déchets, formés de tout ce qui ne constitue pas l'identité du système et des activités liées aux conflits. L'exemple suivant permet de comprendre la relation entre la dynamique externe (rupture entre le système et l'environnement) et interne (lien entre les éléments du système) des interactions liantes.

Exemple: L'approche écologique intègre l'environnement (environnement au sens écologique, bio-social global) dans les systèmes productifs des entreprises. En considérant cet environnement comme une élément partenaire de l'entreprise, ils considèrent que la relation avec lui est de type liant; ce que l'environnement donne, on le lui rends dans un esprit de développement durable. A l'inverse, l'approche non écologique considère l'environnement écologique comme un système extérieur avec lequel on est en rupture, ce qui permet d'y déverser ses déchets sans contrepartie.

La création de **canaux de communication** (voir la figure 10), qui exige un même code pour tous les éléments, est produite par des flux égaux en valeur mais à réciprocité différée. Ainsi, même si les hiérarchies entre les éléments sont différentes, la création de ce code, inscrit de manière égale dans tous les éléments, nécessite des échanges égaux en valeur, même si des informations ou des objets de valeurs très différentes circuleront sur ces canaux.

La **mesure** du niveau de cohérence, de lien ou la force du réseau est mesurée par la quantité de flux liants. Ces flux, qui sont un produit pour le système, sont permanents car les liens doivent être entretenus et ajustés pour conserver la cohérence du système. Les contreparties de ces produits sont les charges, constituées des ressources affectées à la sécurité, aux frontières et à la guerre. La sécurité est un service de l'ensemble du système à chacun de ses éléments.

Exemple: Les douanes et le contrôle des flux à travers les frontières garantissent la semi-perméabilité de la frontière. Ils sont une charges car ils ne produisent que l'absence de lien, de la rupture pour assurer la sécurité.

Le rapport entre le produit (activités liées aux flux liants) et les charges (activités liées à la sécurité), nous donne la performance et le rendement du système dans sa phase L . D'une manière générale, les produits sont internes car ils sont une plus valeur complexe pour le système et les charges sont externes car elles sont des contraintes pour l'environnement. Cependant, ces charges sont également une contrainte pour le système car elles consomment ses ressources.

Le lien est ainsi mesuré avec la formule suivante (4):

$$C_L = F_L \times -t_r(t_r + b) \times f_r = \text{Capital } L$$
$$F_L = \text{Flux de typologie } L$$
$$t_r = \text{temps séparant la réciprocité} \tag{4}$$
$$b = \text{temps de réciprocité inactive}$$
$$f_r = \text{fréquence}$$

Lorsque les valeurs transmises sont nulles, ce qui est le cas pour l'externalisation de déchets, le lien est nul et ne nécessite pas de contre-flux. Lorsque la temporalité (t_r) est infinie, cas où l'on ne s'inquiète jamais de l'impact de la pollution qu'engendrent des déchets, alors le lien est également nul. Lorsqu'un flux L est à réciprocité infinie ou à valeur nulle, alors ce flux est extérieur au système. Il traverse la barrière semi-perméable de la frontière du système. Ce flux marque la rupture du système avec l'environnement puisqu'il n'y a pas de réciprocité. On le considère comme un flux externe de type L noté L^{-1} (rupture). Dès qu'il y a une réciprocité, on considère que l'environnement est partiellement intégré au système étudié et donc que le flux est intérieur au système étudié.

L'intégration des systèmes les uns dans les autres ne se limite pas à la création d'un réseau entretenant des échanges volontaires réciproques. La consommation de l'identité d'un système crée un **lien d'intérêt et de dépendance** entre les acteurs. Le système s'intègre dans l'environnement lorsqu'il consomme de son identité. L'environnement s'intègre dans le système lorsqu'il consomme de l'identité du système. Les systèmes sociaux cherchent à renforcer ce lien par la publicité, les promotions et les avantages multiples. Ainsi, l'échange économique, bien que non liant par définition, est un embryon de lien. Lorsque vous devez payer avant de recevoir votre produit, vous accordez votre confiance. A l'inverse, lorsque vous recevez vos produits avant de payer, votre fournisseur vous accorde sa confiance. Ainsi, le différé entre la réception de la marchandise et le paiement est la durée de la temporalité du lien.

5 Propriétés et analyse

La définition du concept MICROGLOBAL par les quatre fonctions fondamentales induit des propriétés systémiques spécifiques que nous détaillons dans les paragraphes suivants.

5.1 Les frontières

Comme mentionné précédemment, le système est séparé de son environnement par une **frontière semi-perméable**. La frontière maintient et contrôle certains flux et en bloque d'autres. Elle est à la fois une protection et un filtre, car les échanges avec l'environnement sont indispensables au système pour assurer sa survie et son développement. A travers les frontières, on trouve ainsi des échanges de type R pour chercher à adapter l'environnement à son système, des flux de type D pour acquérir les éléments utiles à sa construction et à sa diversification, et des flux H pour acquérir les ressources utiles à sa conservation et à son développement. Finalement, il y a les flux L qui construisent une cohérence interne au système pour construire son identité, mais également un réseau qui va au-delà des frontières. Le système crée des alliances et des dépendances avec l'environnement en raison des éléments partiellement intégrés au système. Ces éléments sont à la fois internes et externes. Ils partagent une partie de leur identité avec le système tout en étant intégrés dans d'autres systèmes de l'environnement. C'est la semi-perméabilité de cette frontière qui permet une intégration partielle des éléments dans un système. On considère qu'ils sont internes au système pour la part d'identité commune qu'ils possèdent.

Exemple: les hommes sont intégrés dans de nombreux systèmes sociaux: la famille, l'entreprise, la commune, le club de foot. Les clients qui font du vélo portent cette identité au même titre que l'entreprise qui les produit. La nourriture que nous consommons nous lie partiellement à l'environnement qui la produit.

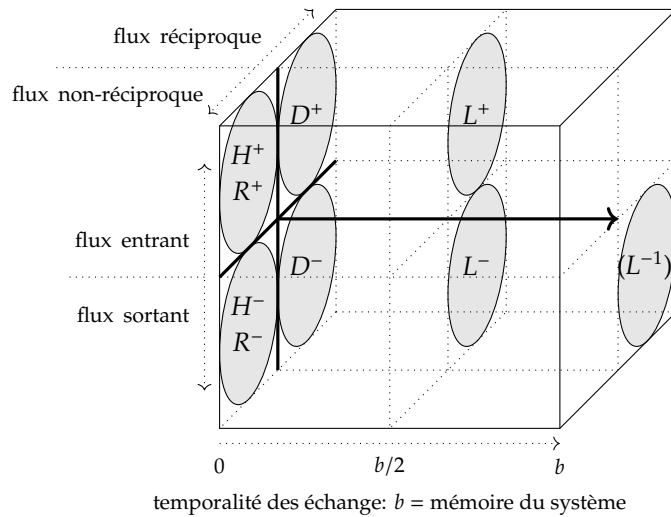


Figure 11: Représentation des 8 types de flux selon les 3 variables caractéristiques, avec le sens des flux mis en évidence. R^- est un flux sortant initié par le système et R^+ est un flux entrant initié par l'environnement. D^- est un flux sortant initié par le système avec sa réciprocity D^+ qui est un flux entrant. H^+ est un flux entrant initié par le système et H^- est un flux sortant initié par l'environnement. L^+ et L^- sont des flux interne. Lorsque la réciprocity est supérieur à la mémoire du système, alors la réciprocity L^{-1} n'est pas liante, mais en rupture.

5.2 Sens des flux

Le sens des flux est déterminé par la hiérarchie des acteurs et par la dynamique des systèmes. D'une manière générale, les flux s'écoulent de la haute vers la basse hiérarchie ou, dit autrement, du concentré vers le dilué. C'est le cas pour les flux R et D qui diffusent selon une dynamique entropique. Pour les flux H , les transferts se font de la basse vers la haute hiérarchie, car les systèmes imposent des contraintes à l'environnement, ce qui permet ce type de transfert néguentropique. Les flux de type L sont non hiérarchiques. En revanche, ils produisent une hiérarchie alternée à l'origine du lien.

L'analyse est généralement centrée sur les systèmes, dans le but de comprendre la dynamique d'un système au sein de son environnement. Cependant, l'environnement n'est pas uniforme. Il est composé d'une multitude de systèmes qui, eux aussi, ont une dynamique complexe et considèrent le système étudié comme une part de leur environnement. Ainsi, le système étudié et les systèmes qui composent son environnement peuvent chacun être promoteurs d'interactions et générateurs de flux. Comme nous l'avons montré précédemment (voir section 4), les flux sont à double sens. Par exemple, un flux de type R (reproduction), est divisé en deux types de flux: un flux qui va de l'environnement \mathcal{E} au système \mathcal{S} et un second qui va du système \mathcal{S} vers son environnement \mathcal{E} . Dans la suite de cet essai, nous utilisons la notation R^+ pour définir le flux R **entrant** dans le système et R^- pour définir le flux R **sortant** du système. La figure 11 résume les 8 types de flux dans un espace en 3 dimensions permettant de les caractériser selon le sens des flux (en ordonnée), la réciprocity des flux (en profondeur) et la temporalité des échanges (en abscisse). Le neuvième flux (L^{-1}) est du même type que le flux L , mais son effet est opposé puisqu'il produit de la rupture et non du lien.

La figure 12 représente les mêmes flux mais selon un modèle plus systémique, que nous appelons l'**espace des phases**. Ce modèle représente un système sous forme de cercle avec chacune des 4 typologies de flux positionnée sur un des quatre axes du cercle. Chaque cardinalité du cercle de l'espace des phases constitue une des 4 phases du système: la phase R au nord, la phase D à l'est, la phase H au sud et la phase L à l'ouest. Sur la figure 12, les flux sont représentés par des flèches. Les flèches pleines sont les flux initiés par le système et les flèches vides ceux initiés par l'environnement. Cette représentation permet de visualiser l'importance des flux de chaque type en fonction de l'importance des flèches et d'en faire un bilan utile afin de comprendre la dynamique du système. Le développement de l'aspect comptable et analytique de ces flux fera l'objet d'une autre contribution.

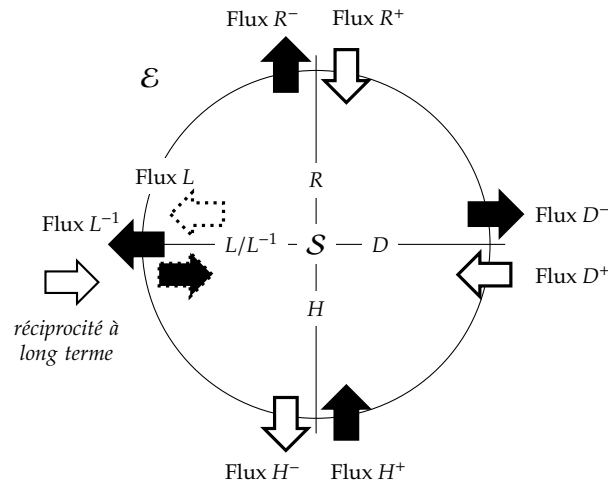


Figure 12: Diagramme de phase d'un système, où chaque type de flux est représenté sur un des 4 axe. Le sens des flux externes dépend de la typologie de l'interaction entre le système et son environnement et de l'initiateur du flux. Les flèches foncées correspondent aux flux engendrés par le système et les flèches claires les flux engendrés par l'environnement. Pour la phase L , la flèche externe ne pénètre pas dans le système car elle correspond à une réciprocité à très long terme qui n'engendre pas de lien. Les 2 flèches L intérieure sont des flux interne. on les représente en pointillé.

5.3 Représentation spirale

Les quatre interactions fondamentales (R , D , H , L) dépendent les unes des autres et se stimulent mutuellement dans une réaction en chaîne: la reproduction, qui produit une forte identité, est le substrat de la différenciation, un système fortement différencié doit être organisé et hiérarchisé, une forte hiérarchie engendre le lien, et finalement un lien fort produit de la reproduction.

Le développement de la complexité des systèmes se déroule ainsi par paliers successifs. Ce n'est que sur la base du premier palier que peut être construit le suivant, puis sur le deuxième que peut être construit le troisième, et ainsi de suite. L'ensemble des 4 paliers qu'abritent les 4 fonctions fondamentales existe en permanence dans les systèmes complexes, mais ils s'optimisent et se développent par étapes successives. Le premier palier correspond à la production de l'identité: la phase R . Le système peut soit donner son identité, soit consommer celle de son environnement. C'est la raison pour laquelle il y a deux flèches en sens inverse sur la figure 12. Cette identité évolue ensuite en fonction des contraintes internes et externes au système. La phase D différencie et spécialise le système et son identité. Sur la figure 12, les deux flux en sens inverse sont représentés par deux flèches de sens opposé et de même longueur, car la valeur de ce qui entre dans le système est égale à la valeur qui en ressort. Cet échange d'identité différencie à la fois le système et son environnement. Le palier suivant est l'optimisation du fonctionnement du système, car sa complexification exige que des niveaux hiérarchiques soient créés afin d'optimiser le fonctionnement du système pour mieux gérer les différents niveaux de contraintes. Il s'agit de la phase H , qui organise les activités par niveaux hiérarchiques et qui engendre des flux asymétriques. Les flux prélevés dans l'environnement, qui entrent dans le système, sont une contrainte sur l'environnement, car ces flux sont contrôlés uniquement par le système. L'environnement est donc contraint de les donner. Ce n'est d'ailleurs pas un don de l'environnement mais une captation du système. Inversement, le système doit fournir à son environnement des flux qu'il a l'obligation de transmettre. Il y a donc, à ce pôle hiérarchique, deux flux en sens inverse. Enfin, les contraintes internes exigent un contre-pouvoir qui se crée par les organes de régulation interne. Par exemple, dans les systèmes sociaux, ils sont représentés par les syndicats, les comités d'entreprises, mais aussi par les activités récréatives, les repas et les sorties d'entreprises.

A la différence des autres flux, les flux liants sont internes au système. Mais cette dynamique de flux liant, avec une réciprocité différée dans le temps, se transforme en flux externe lorsque la réciprocité a une durée supérieure à la mémoire du système. Elle produit alors non pas un lien, mais une rupture entre le système et son environnement. C'est la création de la frontière qui délimite le système de son environnement. Sur la figure 12, la flèche du contre don en externe ne pénètre pas dans le système, car lorsque ce flux se réalisera, s'il se réalise, il ne sera pas perçu comme un contre don mais comme une contrainte sur le système. Ce flux remplit une fonction de rupture et non de

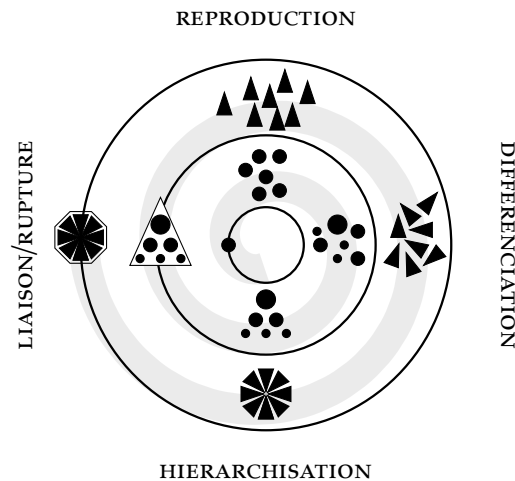


Figure 13: Les systèmes sont représentés par un cercle. Leur identité est définie par des formes (rond, triangle). Les systèmes inférieurs (petits cercles au centre) sont les éléments des systèmes supérieurs (grands cercles à l'extérieur). Chaque pôle représente une fonction fondamentale. Ainsi, les systèmes se reproduisent (pôle Nord) se différencient (pôle Est), s'organisent (pôle Sud) et se lient (pôle Ouest) afin de devenir autonomes. La suite logique des fonctions au sein d'un système ($R \rightarrow D \rightarrow H \rightarrow L \rightarrow R$) associée à l'empilement des systèmes produit une croissance en spirale. Plus la spirale s'étend, plus les systèmes qu'elle englobe sont complexes.

lien. La mémoire du système dans sa phase *L*, la phase dans laquelle émerge le temps, détermine la durée de rétention d'une information passive. Elle dépend de nombreux facteurs, de sorte que sa valeur est très variable selon les niveaux et les systèmes. Cette mémoire s'érode au fil du temps. Lorsqu'elle est effacée, elle perd sa capacité à associer des flux entre eux et donc à les considérer comme réciproques. Le lien étant un assemblage de deux éléments par un troisième, l'absence du troisième élément signifie une fusion entre deux éléments. Pour imaginer ce propos, prenons deux objets liés par une corde. La corde part d'un objet pour retourner vers un autre objet et les assembler. Plus les objets sont distants, plus la corde sera longue et moins le lien sera fort. Dans cette image, la temporalité de l'échange est semblable à la longueur de la corde et à l'éloignement des objets liés.

Les interactions par couches successives, dont nous venons de décrire la logique sociale, sont identiques à celles qui décrivent les orbitales atomiques dans le modèle quantique³. Nous donnerons de plus amples explications dans la partie 2.

Exemple: L'entreprise qui fabrique des vélos commence par construire un premier modèle, c'est la production de son identité à la phase R. Elle améliore ensuite son produit pour qu'il soit plus performant, c'est la phase D de son activité. Avec la complexification de son activité, elle organise son entreprise pour optimiser ses activités: gestion du personnel, directeur des achats, etc. C'est la phase H. Enfin, la pression mise sur ses employés engendre la création d'un comité d'entreprise. Parallèlement, il y a la création d'activités internes pour développer l'esprit de l'entreprise et motiver les employés. C'est la phase L de l'entreprise.

Alors que les niveaux systémiques se construisent les uns sur les autres (puisque les systèmes des niveaux inférieurs composent les éléments des niveaux supérieurs), et que la dynamique interne à un système évolue par paliers en faisant alterner les phases (*R*, *D*, *H* et *L*, pour ensuite recommencer avec *R*), nous pouvons intégrer ces dynamiques et représenter l'évolution de la complexité comme une spirale qui se déroule et s'agrandit. Plus la complexité est importante, plus la spirale est grande. Cette représentation est illustrée sur la figure 13. Nous avons représenté sur cette figure les identités comme des formes qui se multiplient, puis se diversifient, s'organisent et se lient, faisant émerger un système de niveau supérieur avec une nouvelle forme qui intègre les formes du niveau précédent. Cette représentation est une vision dynamique de l'évolution des systèmes qui se complexifient. Les systèmes, représentés par les cercles sur le schéma, sont constamment en mouvement pour s'ajuster aux contraintes des systèmes qui les portent ainsi qu'aux systèmes dont ils sont le support.

La présentation des systèmes sous forme de cercle fermé, comme nous allons le développer dans la suite de ce travail, permet de rappeler la nature autonome des systèmes, qui ont une dynamique dissociée de celle de leurs environnements. Elle permet également d'y dessiner les sous-systèmes

³L'annexe I développe plus en détail les similitudes avec le modèle quantique

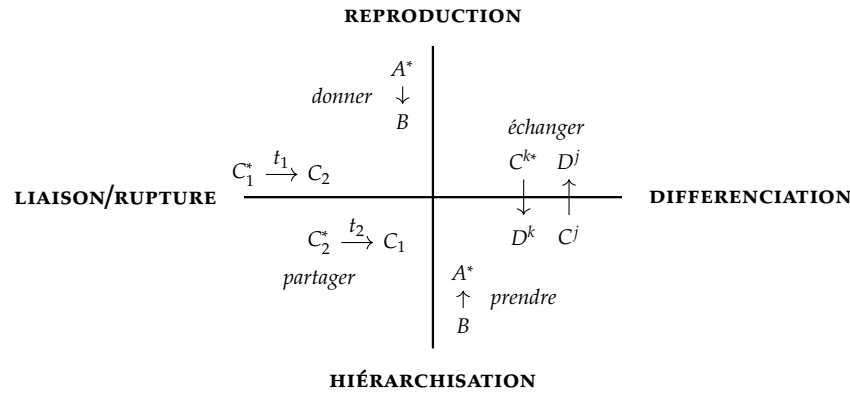


Figure 14: Les 4 fonctions fondamentales sont représentée aux 4 pôles d'une croix. En haut, la fonction de Reproduction avec ses flux unidirectionnels donnés de la haute à la basse hiérarchie. A droite, la fonction de Différenciation avec ses flux réciproques d'identité différente échangée, mais égal en valeur. En bas, la fonction de Hiérarchie avec ses flux d'identité variables, pris par la haute hiérarchie à la basse hiérarchie. A gauche la fonction de Liaison qui, en interne du système, pratique le don et le contre don, c'est-à-dire des échanges égaux en valeurs mais différés dans le temps. La hiérarchie moyenne entre C_1 et C_2 est identique mais alterne au cours des interactions. Lorsque cette interaction se déroule à travers la frontière du système, alors l'absence de contre-don ou sa temporalité excessive engendre une rupture avec l'environnement. L'élément qui porte une étoile initie l'interaction. L'ordre des hiérarchie est: $A > B > C_1 = C_2 > D$. L'indice k et j sont les identités des éléments échangés.

qui les composent, soulignant l'emboîtement des systèmes les uns dans les autres. Le cercle, qui se transformera en ovoïde lors de la description quantitative des systèmes, a aussi cet avantage de pouvoir y dessiner des axes qui se rejoignent au centre. Similaire au diagramme de phase, cette représentation nous permet de placer sur le cercle les 4 pôles qui représentent les 4 fonctions fondamentales avec les 4 typologies de flux. La disposition fait apparaître des propriétés similaires sur l'axe horizontal (interactions symétriques) et d'autres sur l'axe vertical (interactions asymétriques). Comme nous le verrons par la suite, elle permet également de séparer deux types de dynamiques fondamentales en séparant le cadran de son pôle nord-est à son pôle sud-ouest. Pour visualiser les propriétés de l'axe horizontal et de l'axe vertical, nous présentons sur le schéma de la figure 14 les 4 fonctions avec leur variable hiérarchique, identitaire, et le sens des flux sur un graphe à 4 pôles. Le détail de cette représentation en fonction des flux internes ou externes est présenté en annexe H.

5.4 Interactions asymétriques verticales

Les flux de type **reproducteur** (flux éducatifs dans les systèmes sociaux) produisent de l'identité à travers une dynamique de **reproduction** (R). Ces interactions sont constituées par un transfert de valeur (don) des éléments de la haute vers la basse hiérarchie. Les flux de type **hiérarchiques** permettent l'acquisition des ressources à travers une dynamique d'**organisation** (H). Ces interactions sont constituées par un transfert de valeur (prendre) des éléments de la basse vers la haute hiérarchie.

5.5 Interactions symétriques horizontales

Les flux de type **différenciation** (flux économiques dans les systèmes sociaux) produisent la spécialité à travers une dynamique de **différenciation** (D). Ces interactions sont constituées par un transfert réciproque égal en valeur (échange). La réciprocité est immédiate. Les flux de type **liants** (flux dits sociaux dans les systèmes sociaux) produisent de la cohérence à travers une dynamique de **liaison** (L). Ces interactions sont constituées par un transfert réciproque égal en valeur (don et contre-don). La réciprocité est différée dans le temps.

La systémique classique mesure des flux d'énergie-matière qui entrent et sortent d'une boîte noire. La cybernétique [47] mesure des flux d'information. L'approche MICROGLOBAL, quant à elle, mesure ces mêmes flux mais selon la typologie décrite. Elle considère que la typologie des flux détermine la structure et la dynamique évolutive des systèmes. En plus d'être quantitative, cette mesure est qualitative.

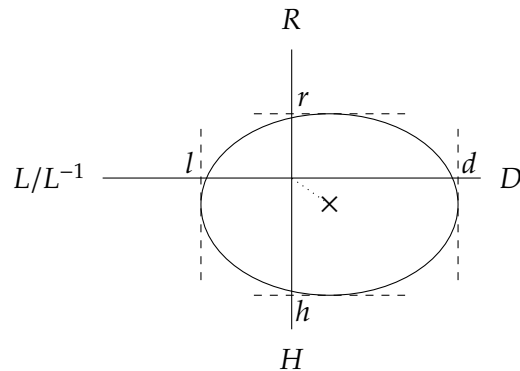


Figure 15: Exemple d'une représentation d'un système par une ellipse dans un espace des phases à deux axes et 4 pôles. Le graphique permet de visualiser les valeurs des 4 types d'interaction: R (reproduction, e.g. éducation), D (différenciation, e.g. économie), H (hiérarchie, e.g. organisation) et L (liaison, e.g. social). Le système étudié est déphasé car l'ellipse n'est pas au centre et donc la répartition des interactions n'est pas équilibrée.

5.6 Outils de mesure

L'approche MICROGLOBAL mesure 2 types de flux: les flux **extérieurs** et les flux **intérieurs**. Les flux extérieurs sont ceux qui opèrent entre le système et son environnement suivant la typologie des 4 fonctions décrites précédemment, alors que les flux intérieurs concernent l'affectation des ressources internes du système dans les 4 domaines que développent les 4 fonctions fondamentales. Ces mesures déterminent le niveau de complexité des systèmes selon la formule présentée à la fin de ce travail. Elles permettent en outre de tirer des conclusions sur la dynamique évolutive des systèmes. Un phénomène observé au niveau N^4 peut être mesuré puis analysé avec les unités du niveau considéré (N^4) et des niveaux inférieurs (N^3, N^2, N^1, N^0).

Exemple: L'entreprise de production de vélos peut être analysée sous l'angle des flux financiers (N^4), du travail des ouvriers (N^3), des flux de matière (N^2), d'énergie (N^1) et d'information (N^0) contenue dans toute ces formes de capitaux.

Le tableau de l'annexe B présente un exemple chiffré de mesure des flux externes lorsqu'un client achète du pain chez un boulanger. Comme illustré sur la figure 15, ces valeurs peuvent ensuite être reportées dans un graphique représentant l'espace des phases: une valeur représente l'intersection de l'ellipse du diagramme de phase avec un des axes. Dans cette analyse, nous distinguons les flux engendrés par le système de ceux initiés par l'environnement. Nous pouvons ainsi caractériser la structure du système avec son environnement par deux diagrammes de phase: l'un qui contient les flux engendrés par la dynamique du système ainsi que ceux engendrés par la dynamique de l'environnement (à gauche sur la figure 16), et un autre diagramme, identique, mais représentant la dynamique interne du système (à droite sur la figure 16). Ce dernier contient les secteurs qui complexifient le système (produit) ainsi que ceux qui constituent une charge pour l'environnement. La superposition des deux ellipses de chaque diagramme de phase permet une comparaison visuelle des systèmes ainsi que de leur évolution dans le temps, comme nous le verrons plus loin.

Le système engendre des flux de type R lorsqu'il **donne** de son identité à l'environnement. Les flux de type D sont engendrés lorsque le système **échange** avec son environnement. Les flux de type H sont engendrés lorsque le système **prend** des ressources et, finalement, les flux de type L sont générés lorsque le système externalise des éléments autres que son identité (déchets). Rappelons que le type L est à cheval entre un flux interne et un flux externe. Le flux interne L est liant lorsqu'il **partage** des ressources et le flux externe L^{-1} est une rupture car la contrepartie est trop longue ou inexistante pour être liante. Ces flux sont toujours composés d'une identité extérieure autre que celle du système. L'environnement quant à lui engendre des flux de type R lorsqu'il donne au système. Il engendre des flux de type D lorsqu'il échange avec le système, des flux de type H lorsqu'il prend au système, et des flux de type L lorsqu'il donne au système en attente d'une contrepartie qui lui permettrait de s'intégrer au système. Cette interaction serait alors internalisée. Sans contrepartie ou avec une temporalité réciproque trop longue, ce flux sera de type R . À noter que les flux de type D

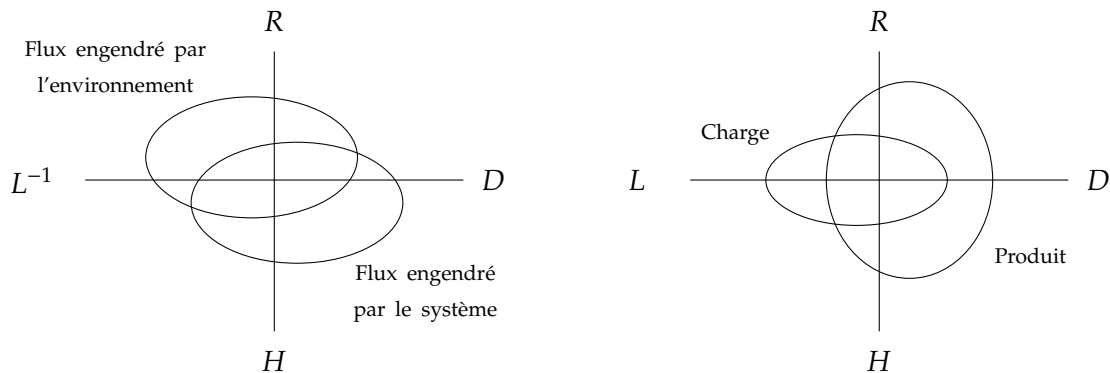


Figure 16: Analyse d'une entreprise avec deux diagrammes de phase. Le diagramme de phase de gauche représente l'entreprise dans sa relation avec l'environnement. Celui de droite représente sa stratégie interne par l'affectation des ressources à ses différents secteurs d'activité. Les charges sont les secteurs qui contraignent l'environnement alors que les produits sont les secteurs qui complexifient le système. Le décentrage des ellipses informe sur la stratégie interne du système (schéma de droite) et son impact sur l'environnement (schéma de gauche). La relation entre les deux schémas informe sur la performance de la dynamique interne à produire un système complexe durable.

et L ont des valeurs identiques qu'ils soient déclenchés par le système ou l'environnement.

L'**affectation interne des ressources** est considérée comme un produit lorsqu'elle construit la complexité du système et comme une charge lorsqu'elle est une contrainte pour l'environnement. Les secteurs qui construisent la **complexité** des systèmes sociaux sont considérés comme des **produits**. Le secteur de la production de l'identité est de type R . Celui de la recherche et du développement est de type D . Le secteur tertiaire de l'administration est de type H . Finalement, celui des loisirs, des réseaux et des activités sociales est de type L . Les secteurs qui sont des contraintes pour l'environnement sont considérés comme des **charges** qui augmentent l'**entropie** du système. La consommation des identités de l'environnement (intrants) est de type R . La dédifférenciation de l'environnement par la diffusion de son identité dans l'environnement (commerce, transport) est de type D . La désorganisation de l'environnement provoquée par le système qui impose ses contraintes pour assurer sa sécurité intérieure est de type H . La rupture du système avec l'environnement par une frontière semi-perméable qui assure sa sécurité extérieure est de type L/L^{-1} .

Nous venons de décrire la **statique des systèmes** comme une photographie de l'état du système à un moment donné. La représentation par une ellipse dans l'espace des phases est une image figée du système. La structure systémique, ainsi définie, fait évoluer le système dans le temps, de sorte que la forme de l'ellipse, son centrage et son extension vont se modifier. Par conséquent, nous allons représenter la **dynamique du système**, son histoire, son évolution, par une spirale croissante au sein de laquelle nous représentons la dynamique interne par deux sinusoïdes. Semblables à une onde, elles façonnent le système par impulsion faisant alterner les phases R , puis D , puis H , et enfin L pour recommencer indéfiniment ce cycle. La phase de cette onde, qui représente le film du système, est le temps entre deux prises de vue. La figure 17 illustre cette représentation. Les systèmes évoluent par optimisations successives. Alternativement, ils produisent leur identité, ils la différencient pour l'adapter à l'environnement interne et externe, l'organisent pour en tirer de la plus-value et lient les éléments entre eux pour se cloisonner de l'environnement. Ces phases, dans la dynamique des systèmes, sont semblables à une onde qui stimule alternativement chaque processus du système. On peut comparer cette dynamique interne à une onde électromagnétique qui fait osciller son champ électrique et magnétique dans les 2 axes (4 directions) perpendiculaires à son déplacement. Un troisième axe représente l'écoulement du temps. Dans le détail, un diagramme de la dynamique d'un système représente l'évolution d'un système en 3 dimensions sur les axes suivants:

- Axe $L - D$: Cet axe exprime la valeur des **flux symétriques** D et L . Dans la description des ondes électromagnétiques, cet axe est celui du champ magnétique. Il en est de même pour les flux symétriques que l'on peut associer à l'énergie cinétique. Les mouvements d'échange créent la valeur de la phase D et L , alors que la position hiérarchique associée à l'énergie potentielle détermine la valeur des flux asymétriques.
- Axe $R - H$: Cet axe exprime la valeur des **flux asymétriques** H et R entre l'environnement et le système. Un rapport hiérarchique existe entre les acteurs de ces flux. La hiérarchie crée

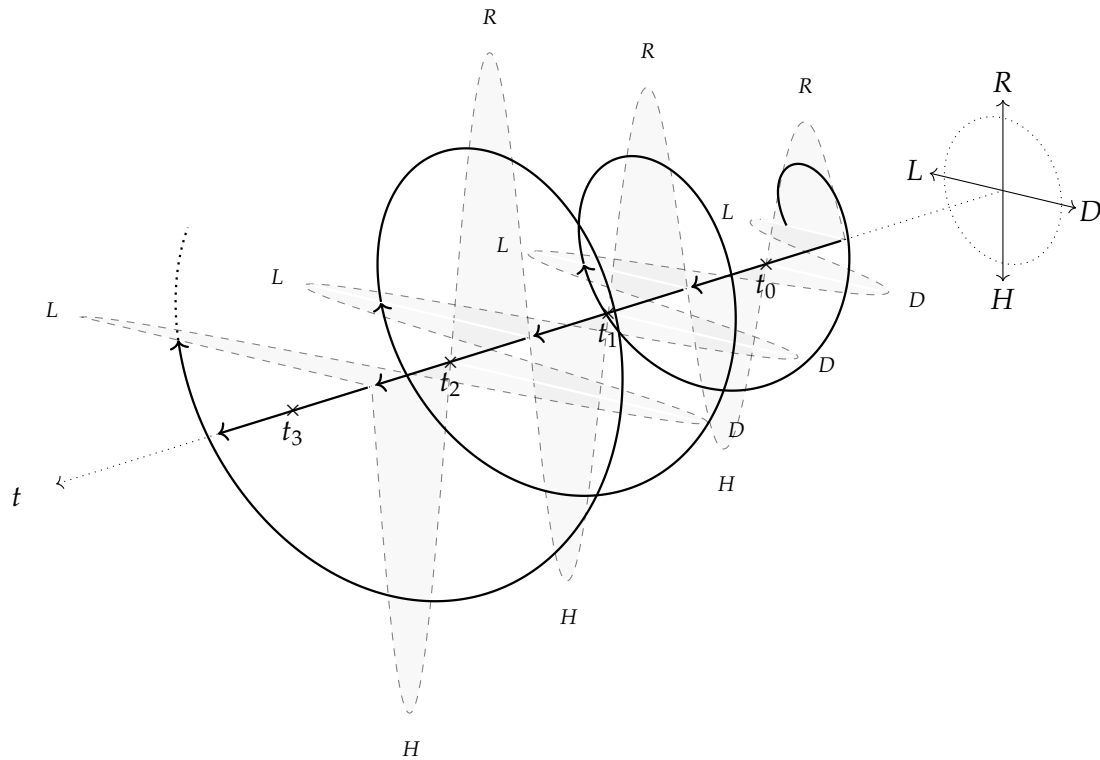


Figure 17: Représentation de la dynamique d'un système à travers des quantas de temps sur l'axe t et les stimulations des phases R, D, H, L sur les axes $L-D$ et $R-H$. Ceux-ci représentent l'oscillation des phases asymétrique D et L et symétrique R et H , respectivement. La spirale représente l'évolution du système dont la complexité grandit par les optimisations successives des phases à travers les quantas de temps. Le temps quantique évolue par petits sauts représentés par $t = 0$ puis $t = 1$, puis $t = 2$ et $t = 3$. Ce diagramme offre une représentation plus détaillée, en 3D, de la figure 13.

une énergie potentielle semblable à celle du champ électrique décrite sur ce même axe pour les ondes électromagnétiques.

- **Axe t :** représente l'écoulement du temps quantique. Le temps évolue par quanta, ce qui signifie que, comme l'aiguille d'une montre qui saute d'une seconde à la suivante, le temps quantique évolue par petits sauts. Remarquons que le point de croisement de la courbe $H-R$ sur l'axe du temps correspond à des flux de valeur égale. Le croisement au milieu du quanta correspond à l'échange de type D , car il est instantané, donc dans le même quanta de temps. Le croisement au passage d'un quanta à un autre correspond à un échange de type L . Cet échange est à cheval sur les 2 quantas, de sorte qu'ils sont considérés comme différés dans le temps.

Rappelons que les ondes électromagnétiques sont créées par l'oscillation (vibration) de particules chargées (dipôles) qui créent le champ électrique sinusoïdal ainsi que sa composante magnétique perpendiculaire due à un effet relativiste de contraction du temps. Dans la description ondulatoire des systèmes MICROGLOBAL, le dipôle n'oscille pas dans une seule dimension mais circule en deux dimensions sur l'ellipse de l'espace des phases. De ce fait, l'axe $R-H$ représente une projection du champ électrique correspondant aux flux asymétriques alors que l'axe $L-D$ représente une projection du champ électrique correspondant aux flux électriques. Bien que ce dernier ressemble aux flux magnétiques décalés d'un quart de cycle, il n'est cependant pas dépendant du module du champ électrique. Finalement, l'addition des valeurs des deux axes $R-H$ et $L-D$ donne la somme de flux échangés entre un système et son environnement. La spirale que forme l'évolution des systèmes est déterminée par l'importance des flux représentés par l'amplitude des 4 composantes de l'onde. On peut se représenter les pics des ondes comme des forces, des impulsions ou des projectiles qui donnent forme à la spirale et la maintiennent développée. L'onde est comparable à la pression d'air qui maintient un ballon gonflé.

Dans l'analyse de l'évolution d'un système, le quanta peut être d'une année, d'un mois, d'une heure ou d'une seconde, selon le système et la rapidité de son évolution. La représentation sous forme sinusoïdale souligne la logique des fonctions qui se stimulent mutuellement. En effet, R est

substrat de D qui est substrat de H qui est substrat de L qui est substrat de R . La suite des réactions vertueuses construit la complexité dans une réaction en chaîne.

5.7 Analyse

Une analyse complète avec les outils présentés ci-dessus permet de tirer des conclusions sur la stabilité, l'adaptabilité, les points de rupture et le type de stratégie des systèmes. C'est un outil d'aide à la décision dans une perspective de durabilité. Une analyse complète sera développée dans une autre contribution. Voici cependant deux stratégies systémiques basées sur le modèle MICROGLOBAL. La première stratégie met en concurrence le capital actif et le capital passif (voir section 3.5). Maximiser la complexité par activation du capital passif est une plus-value à long terme, alors que concentrer le capital passif est une plus-value à court terme. La complexité renforce la hiérarchie avec l'environnement, alors que la concentration des capitaux renforce la hiérarchie interne. La maximisation de la complexité est qualitative, alors que la concentration des capitaux par l'élargissement des systèmes est quantitative. La deuxième stratégie est celle dite du *lion et de la fourmi*: elle dépend de la hiérarchie entre le système et l'environnement. Le lion domine son environnement, est hiérarchiquement en haut de la chaîne alimentaire, se reproduit peu et domine sur de grands territoires. Les fourmis, quant à elles, sont très nombreuses et vivent en grande communauté pour faire face à leur vulnérabilité. Les lions ont une stratégie dite sérielle centrée sur la fonction H alors que les fourmis ont une stratégie parallèle centrée sur la fonction R . Les lions dominent leur environnement et l'adaptent à leurs contraintes (ils font peur aux autres animaux) alors que les fourmis s'adaptent à leur environnement.

6 Les régulations

Les boucles de régulation décrivent les unités fondamentales de la régulation des systèmes. Elles permettent de produire l'identité du système, d'optimiser les processus de production, de contrôle et d'adaptation, ainsi que de diffuser l'identité dans l'environnement. Ces boucles adaptent en permanence l'activité interne du système et son interaction avec l'environnement. Entremêlées les unes aux autres, elles forment des réseaux de régulation d'autant plus denses que le système est complexe. À chaque phase du système, une boucle de régulation va générer de la complexité pour le système et de l'entropie pour son environnement. Dans le concept MICROGLOBAL des boucles de ce type forment des réactions en chaîne qui complexifient les systèmes. Un système se complexifie au détriment de son environnement, qui se décomplexifie et augmente son entropie. Nous classifions les boucles en 3 groupes: les boucles de complexification, les boucles système-environnement et les boucles capital-flux. Nous détaillons chacun de ces groupes dans les sections suivantes.

6.1 Boucles de complexification

La typologie des flux (voir section 4) permet de caractériser la structure des systèmes dans ses rapports avec l'environnement. On parle de **dynamique externe** pour les flux générateur d'un capital externe et de **dynamique interne** pour les flux générateur d'un capital interne. Rappelons que l'analyse d'un système présenté avec un diagramme de phase (figure 16) représente les flux internes (engendrés par le système) et les flux externes (engendrés par l'environnement) dans le même espace des phases. Ainsi, l'analyse du rapport entre la dynamique interne et externe peut être faite dans une comptabilité complexe analytique⁴. Les boucles de régulation que nous explicitons ici sont uniquement liées à la dynamique interne et à la construction du capital interne.

Les systèmes se **complexifient** par les enchaînements successifs de la phase de reproduction, de différenciation, de hiérarchisation et de liaison, pour ensuite recommencer à la phase de reproduction. Cette boucle forme une **réaction en chaîne** $R \rightarrow D \rightarrow H \rightarrow L \rightarrow R$. C'est une boucle de rétroaction positive, qui ne conduit non pas à la stabilité mais à la croissance du système. En effet, le moteur de la différenciation (D) est un système à forte identité, celui de la hiérarchisation (H) est un système fortement différencié – le moteur du lien est une forte hiérarchie (H) – et celui de la reproduction (R) est un système fortement lié (L). En optimisant chacune de ces fonctions, une réaction en chaîne

⁴L'étude de cette comptabilité sera détaillée dans une autre publication.

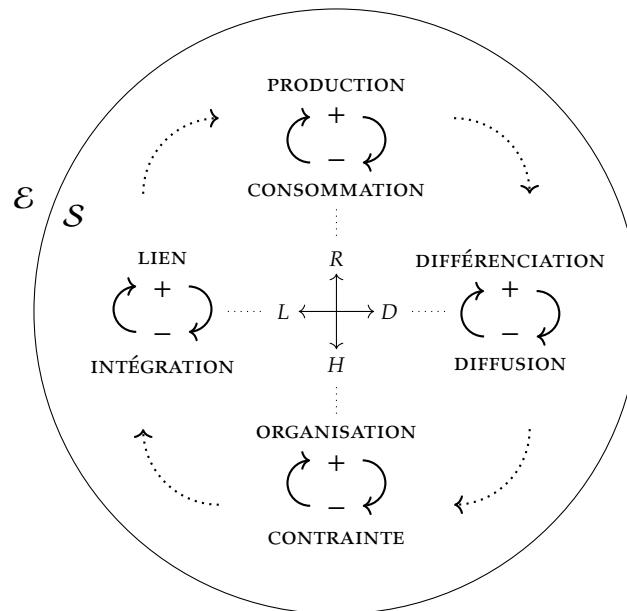


Figure 18: Représentation des boucles de complexification internes au système. Chaque phase *R*, *D*, *H*, *L* cherche à trouver un optimum interne au système entre une charge + et un produit -. Ainsi, la boucle *R* cherche à réaliser des économies d'échelle, *D* des économies de spécialisation, *H* des économies d'organisation et *L* des économies de partage. L'exécution d'une boucle dans une phase stimule l'activité de la phase suivante, créant une réaction en chaîne qui fait croître le système.

complexe est amorcée. Pour la phase reproductive *R*, les **économies d'échelle** permettent d'optimiser la production, causant une croissance de la production et un renforcement du lien. En effet, plus il y a d'éléments qui partagent une identité, plus le réseau que constitue cette identité est vaste et solide. La production implique une transformation, un réarrangement et un assemblage des intrants. Pour la phase de différenciation *D*, les **économies de spécialisation** permettent d'optimiser les processus de transformation, la spécialisation étant une somme d'économies d'échelle réalisée à chaque étape de la production. Pour la phase de hiérarchisation *H*, les **économies d'organisation** permettent d'optimiser la spécialisation. En effet, l'organisation est une somme d'économies d'échelle verticale pour la minimisation des contraintes hiérarchiques. Elle concentre les pouvoirs proches des contraintes selon leur niveau. Finalement, pour la phase de liaison *L*, on trouve les **économies de partage** par la mise en commun des objectifs et le fonctionnement en réseaux, permettant de minimiser et d'assumer les contraintes hiérarchiques internes. Cette boucle vertueuse qui s'auto-entretient est le moteur de la croissance de la complexité des systèmes. Cette complexité active le capital passif pour produire du capital actif. L'**optimisation** de chacune des 4 phases consiste à maximiser les produits, ce qui complexifie le système, en minimisant les charges, ce qui augmente l'entropie de l'environnement. Il y a deux aspects à cette optimisation: un **aspect interne** au système qui consiste à optimiser son fonctionnement intérieur, et un **aspect externe** qui consiste à optimiser son interaction avec son environnement. Plus le rapport produit/charge est élevé, plus la performance est élevée. Les boucles de complexification internes et la réaction en chaîne qu'elles produisent sont illustrés sur la figure 18. Celles qui sont externes sont illustrées sur la figure 19.

Optimiser la quantité de **production** en interne consiste à rechercher le niveau de production qui engendre le moins de charges possible par unité de produit. Une production trop faible engendre des charges fixes trop élevées et, à l'inverse, une production trop forte engendre des charges variables trop élevées. En externe, une production trop faible risque de produire des produits trop chers, mais une production trop abondante risque de faire chuter les prix. La consommation d'énergie-matière de l'environnement produit une augmentation d'entropie car elle déstructure la matière et disperse son énergie. L'optimisation de la production en interne implique une **différenciation** des étapes de production. Elle consiste à spécialiser les opérations pour les rendre plus répétitives, plus rapides et plus efficaces. Mais elle implique une circulation des produits entre les étapes de production. Un optimum est nécessaire entre le gain (produit) obtenu par la spécialisation des étapes de production et la contrainte (charge) qui oblige à faire circuler les produits de poste en poste. L'optimisation externe suit la même logique. Le produit de la spécialisation est internalisé alors que les charges sont la diffusion de l'identité dans l'environnement (commerce). Cette diffusion augmente

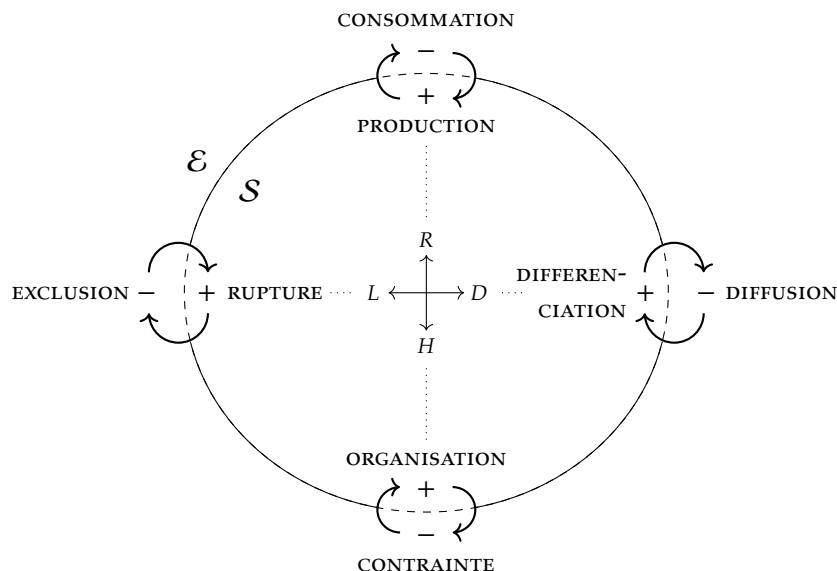


Figure 19: Représentation des boucles de complexification entre un système et son environnement. À chacune de ses phases le système a une boucle qui cherche à maximiser son produit (+) tout en minimisant la charge (-) sur son environnement. Pour la phase *R* le système cherche à maximiser sa production tout en minimisant sa consommation sur l'environnement. Pour la phase *D* il s'agit de maximiser la différenciation et minimiser la diffusion. Pour la phase *H* il s'agit de maximiser l'organisation pour minimiser les contraintes environnementales. Et finalement, pour la phase *L*, il s'agit d'engendrer de la rupture tout en minimisant l'exclusion avec son environnement.

l'entropie de l'environnement, car les produits sont dispersés d'un état concentré dans le système à l'environnement.

Optimiser l'**organisation** interne du système consiste à différencier les niveaux de contrôle et de décision pour que chaque niveau soit le plus proche possible des contraintes à gérer. Ce bénéfice (produit) implique une circulation d'information, comme la circulation des produits sur une chaîne de montage qui est une charge pour le système. Un nombre de niveaux hiérarchiques optimum est recherché par le système. En externe, le système cherche à maximiser sa hiérarchie tout en préservant une pénétration dans l'environnement la plus importante possible. Une hiérarchie trop élevée (un prix trop élevé) va diminuer le nombre de clients, de sorte qu'un optimum entre la maximisation de la hiérarchie et son intégration dans l'environnement doit être trouvé. L'augmentation de l'entropie de l'environnement correspond à la soustraction d'énergie-matière de l'environnement (bénéfice), comme le tribut à payer pour disposer de l'identité du système.

Optimiser les **liens** internes du système consiste à maximiser les liens entre les éléments tout en conservant des éléments différenciés. Trop de liens ou des liens trop forts dé-différencient les éléments en les faisant fusionner. Trop peu de liens rend le système incohérent. Le bénéfice du lien (produit) est le rapprochement d'identités et de compétences différentes. La charge du lien est le temps et l'énergie passés à partager et à cultiver la même identité. Le lien interne qui cultive une identité forte produit une rupture externe qui exclut et délimite fortement le système. Un optimum doit être trouvé pour que la frontière soit semi-perméable et permette de contrôler les flux transfrontaliers. Une trop forte identité interne engendre une rupture avec l'extérieur ainsi qu'une frontière trop étanche pour que le système soit intégré de manière optimale dans l'environnement. L'entropie de l'environnement augmente, car le système externalise ses déchets constitués d'énergie-matière dégradée. En revanche, l'entropie du système diminue en raison des liens entre les éléments.

Deux fonctions complémentaires se différencient à chaque phase. Ces fonctions engendrent des activités qui s'alimentent mutuellement. On respecte ainsi un principe universel décrit dans les théories de l'univers à énergie nulle [20, p. 129]. On sépare du néant ce qui est positif de ce qui est négatif, les charges des produits, la production de la consommation, la différenciation de la dé-différenciation, l'organisation des contraintes et enfin le lien de la rupture. C'est un principe dialogique qui unit des notions antagonistes mais indissociables [33].

Le mouvement inverse $R \rightarrow L \rightarrow H \rightarrow D \rightarrow R$ engendre l'**accumulation de capital passif**. Lorsque le lien *L* engendre la hiérarchie *H*, cet enchaînement produit la corruption ou le clientélisme. Il en est de même lorsque la hiérarchie *H* engendre la différenciation *D* (économies planifiées), lorsque

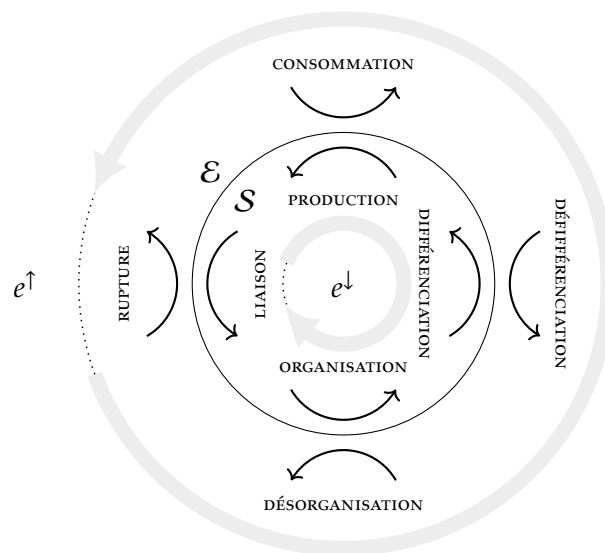


Figure 20: Illustration des boucles de complexication entre le système S et son environnement E . Alors que le système croît en complexité avec la diminution de son entropie représentée par la boucle e^\downarrow , le système lui augmente son entropie avec la boucle e^\uparrow . Ces deux boucles sont le fruit des dynamiques d'échanges entre S et E : la production de S engendre de la consommation sur E , la différenciation de S produit de la dédifférenciation sur E , l'organisation de S produit de la désorganisation sur E et finalement la liaison de S produit de la rupture pour E .

la différenciation D engendre la production R (technocratie), ou que l'identité R produit le lien L (totalitarisme). L'accumulation de capital est indispensable dans un système. Cependant, lorsqu'elle se réalise au détriment de la complexité, le court terme prend l'avantage sur le long terme. Le système est plus solide à court terme, mais plus fragile à long terme par le manque d'adaptabilité à l'environnement qui évolue. Lorsque l'accumulation du capital déconstruit des systèmes de niveaux inférieurs, c'est le processus normal décrit à la figure 20. Ce processus implique un mouvement horaire $R \rightarrow D \rightarrow H \rightarrow L \rightarrow R$ pour le système et antihoraire $R \rightarrow L \rightarrow H \rightarrow D \rightarrow R$ pour l'environnement. La stabilité du système, sa croissance ou sa décroissance, est un compromis entre les deux mouvements qui, d'une part, construisent la complexité par activation du capital passif, et d'autre part, la détruisent au profit de l'accumulation de capital passif.

6.2 Boucles système - environnement

Les boucles système-environnement décrivent les relations fonctionnelles entre le système et son environnement. Une fonction dans une phase du système est couplée à la même fonction des systèmes composant l'environnement. Les fonctions sont ainsi inverses entre le système et l'environnement. Le bénéfice complexe du système est couplé à une perte entropique (augmentation d'entropie) de l'environnement. L'inverse est également vrai, car pour un système en décroissance ou en décomplexification, l'environnement prend le bénéfice au détriment du système.

Comme illustré précédemment sur la figure 20, le système est couplé à l'environnement dans chacune de ses phases. Ces boucles sont dissipatives car elles puisent dans l'environnement l'entropie nécessaire à la construction et à l'entretien de la complexité du système. Dans la phase de reproduction R , la production de l'identité du système est couplée à une consommation de l'identité de l'environnement. Le système construit un capital, sa production et son identité au détriment de l'environnement qui augmente son entropie en consommant son capital. Dans la phase de différenciation D , la spécialisation ou différenciation du système est couplée à la dédifférenciation de l'environnement. La diffusion de l'identité du système (sa production) dans l'environnement est une augmentation d'entropie. En effet, lorsque l'identité est concentrée dans le système, l'entropie est basse. Cependant, quand l'identité se disperse ou se diffuse dans l'environnement, l'entropie du système augmente. Dans la phase de hiérarchisation H , la production d'organisation dans le système engendre des contraintes et une désorganisation de l'environnement qui augmente son entropie. Dans la phase de liaison L , la création d'un réseau cohérent par des éléments qui partagent le

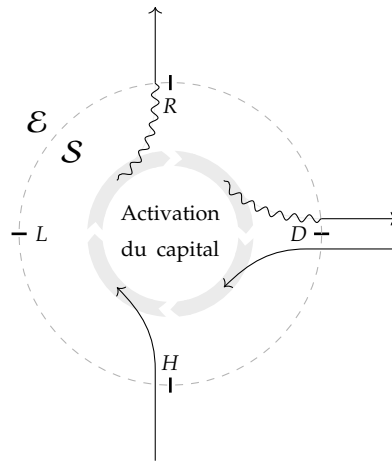


Figure 21: Illustration de la boucle capital-flux. Le système reçoit de son environnement du capital passif via ses fonctions H et D . Le capital passif est ensuite activé au sein du système et retourne dans son environnement via ses fonctions R et D . L'activation du capital est représenté par la boucle au centre du système. La partie plate de la flèche illustre un capital passif et les vaguelette du capital actif. Ainsi, on remarque que du capital activé dans un système devient passif lorsque celui-ci est transmis à son environnement.

même objectif est couplée à une rupture avec l'environnement par la production de frontières. Dans cette situation, la diminution de l'entropie à l'interne est couplée à une augmentation de l'entropie à l'extérieur.

6.3 Boucles capital - flux

Il existe un rapport étroit entre les flux (3.3) et les capitaux (3.5). Les flux proviennent d'une source qui constitue un capital, et le capital est une accumulation produite par des flux. Flux et capitaux sont liés par cette relation réversible qui transforme les valeurs potentielles en valeurs actuelles, l'énergie potentielle en énergie cinétique, la statique en dynamique et l'immobile en mobile. Le capital représente ce qui est acquis et figé. Les flux sont l'expression du capital donnant vie au système en le connectant à son environnement. Les flux circulent entre les systèmes. Étant des transferts de capitaux, donc des capitaux en mouvement, les flux déterminent ainsi l'activité du capital. Plus le capital est activé, plus il produit des flux et de l'émergence, et plus il participe au maintien et à la construction de la complexité. Le capital actif se construit dans le système par activation du capital passif et par émergence. Il devient ensuite productif (actif) par activation des ressources au moyen des flux internes. L'identité émerge de cette activation et devient un nouveau capital pour l'environnement. La boucle capital-flux se compose de 4 étapes. Durant l'étape 1, qui a lieu dans la phase H , le système acquiert des ressources constituées des capitaux passifs de l'environnement. Dans la deuxième étape, en phase R , les flux internes au système activent le capital pour produire l'identité du système. Dans la troisième étape, en phase D, H, L , le système se complexifie en développant son outil de production. Finalement, dans la quatrième et dernière étape, en phase R et D , l'identité est externalisée dans l'environnement. L'exécution simultanée des 4 étapes est représentée de manière simplifiée sur la figure 21 du point de vue des capitaux actifs/passifs.

Les capitaux et les flux sont composés des mêmes objets. Ils sont statiques sous forme de capitaux et dynamiques sous forme de flux. Ces deux formes d'existence sont complémentaires, de la même manière que l'espace (statique) est complémentaire au temps (dynamique). L'oscillation entre ces deux formes permet la complexification. Le système vit de ces deux réalités, l'une ancrée dans l'espace et définie par des lieux, l'autre ancrée dans le temps et définie dans la durée. Au niveau le plus fondamental, le principe d'incertitude de Heisenberg [2] nous force à considérer l'une ou l'autre réalité, mais pas les deux en même temps. Soit la vitesse, soit la localisation de l'objet, la particule peut être définie avec une bonne précision. Les deux états ne peuvent être connus avec précision en même temps, de la même manière qu'un élément est soit statique sous forme de capital, soit dynamique sous forme de flux. Ces états peuvent passer de l'un à l'autre en permanence. Les flux produisent du capital et les capitaux produisent des flux dans des boucles de rétroactions constructives (positives) ou destructives (négatives). Le capital actif immobilise les flux d'information-énergie-matière par la dynamique de la **minimisation des contraintes temporelles**. Le capital passif se

dégrade naturellement en produisant des flux par la dynamique de la **minimisation des contraintes spatiales**. Capitaux actifs et passifs produisent tous deux des flux. Mais le capital actif permet de maintenir et de développer le capital, alors que les flux du capital passif le dégradent.

Les systèmes consomment partiellement les flux issus des capitaux passifs qu'ils ne contrôlent pas et qui sont des ressources pour construire la complexité. En revanche, les capitaux actifs, produits par le système, génèrent des flux que le système contrôle. Le capital statique trouve sa valeur à court terme, puisqu'il dépend de l'environnement actuel. La complexité est un capital actif et dynamique qui définit le potentiel à long terme, car elle caractérise le potentiel d'adaptation à l'environnement. Quatre types de flux connectent le système à son environnement et correspondent aux 4 fonctions fondamentales que nous avons décrites. L'annexe J décrit plus en détail huit boucles de rétroaction mettant en relation les flux internes au système avec les flux externes.

7 Principes universels de la systémique fractale

Dans les sections qui suivent, nous définissons des principes généraux sous forme d'axiomes que nous déclinons en termes logiques et qui s'appliquent de manière universelle à toute la nature. De ces principes universels se déduisent des principes locaux applicables de manière restrictive à chaque niveau systémique [36]. Chacune des 4 fonctions du concept MICROGLOBAL correspond à un principe fondamental.

7.1 Reproduction

Nom	Usage	Formule	Principe
Fonction <i>R</i>	Définit l'identité	$3 \equiv 3$	Principe d'équivalence

Les systèmes sont tous caractérisés par une identité. C'est leur raison d'être et d'exister. Cette identité correspond à une relation ou une interaction d'équivalence car, en plus de la notion de valeur égale, il y a la notion de valeur de vérité en logique, de caractéristiques communes en mathématiques et de besoins en sciences sociales. L'équivalence est une même quantité, une même valeur et une même qualité. L'identité du système est le capital qu'il représente pour son environnement. C'est un capital actif pour le système, mais un capital passif pour l'environnement.

L'équivalence caractérise cette phase *R* qui produit en interne cette identité, sa valeur, sa qualité, et la diffuse dans l'environnement pour que ces qualités se retrouvent équivalentes dans d'autres systèmes de l'environnement. C'est le fondement de la stabilité des constructions systémiques et des capitaux qui constituent les systèmes.

Le principe d'équivalence affirme l'existence et la **permanence** des systèmes décrits par leur identité à travers leurs interactions. Les systèmes sont égaux à eux-mêmes dans l'espace et dans le temps. Ils sont donc permanents et leur état ne dépend pas de leur localisation. Le principe d'équivalence stipule que les mêmes actions produisent les mêmes effets. Il justifie la description de la nature en termes de logique mathématique et de symboles. En effet, pour décrire le monde en termes mathématiques, il faut considérer que ce monde a la même structure que notre description [42, p. 152]. Pourquoi une description mathématique permettrait-elle de décrire le monde, si ce monde n'était pas lui-même constitué de la même logique et de la même matière informationnelle que notre description? En considérant le monde comme étant, dans ses fondements, une structure d'information et de logique interactionnelle, on peut considérer que notre description est une réalité fractale de notre monde et pas uniquement une représentation. Étant ancrée dans la symbolique sociale et non pas dans les quantas de l'espace-temps, cette description elle-même n'a pas le potentiel génératif de ce dernier.

7.2 Différenciation

Nom	Usage	Formule	Principe
Fonction <i>D</i>	Définit l'égalité	$3 = 2 + 1$	Principe d'équilibre et de symétrie

L'équation décrit un principe très général, un principe qui cherche des compromis entre différentes contraintes. Les deux côtés de l'égalité ont la même valeur alors qu'ils sont différents. Il s'agit du principe même de la différenciation. Chercher à résoudre une équation consiste à chercher la diversité des approches et des calculs, à simplifier, à optimiser, à minimiser et à trouver la meilleure solution, c'est-à-dire la plus simple, celle qui nécessite le moins d'information. Minimiser les informations en cherchant une solution à une équation revient à minimiser les contraintes.

L'égalité représente l'équilibre entre des valeurs de part et d'autre de cette balance que constitue le signe de l'égalité. Lorsque les deux termes de part et d'autre de la balance sont strictement identiques, alors on a une relation d'équivalence. Le principe d'équivalence est donc un cas particulier du principe d'équilibre. L'interaction de type D respecte l'équilibre tout en permettant des transferts et des échanges d'identités différentes. Les symétries sont un cas particulier du principe d'équilibre. La nature recherche la symétrie car elle minimise l'information et, comme pour les systèmes physiques, elle minimise l'énergie.

Les équilibres minimisent les contraintes temporelles. Ainsi, ce qui est avant est égal à ce qui est après. Les équilibres minimisent également les contraintes spatiales: ce qui est ici est égal à ce qui est ailleurs. Ces égalités sont des bassins d'attraction vers lesquels les systèmes évoluent pour être en équilibre avec l'environnement. On parle d'équilibre dynamique dans cette recherche de stabilité, car c'est un compromis entre les flux positifs et négatifs, entre les flux entrants et sortants du système afin de maximiser la construction complexe et l'homéostasie qui lutte contre la dégradation naturelle et entropique du système.

7.3 Hiérarchisation

Nom	Usage	Formule	Principe
Fonction H	Définit la hiérarchie	$3/2$	Principe hiérarchique

Le principe hiérarchique affecte une valeur aux systèmes et aux éléments. Il organise et optimise les processus. Il minimise les contraintes par les différents types d'économies que nous avons évoqués précédemment.

La hiérarchie est une mesure du degré de dépendance entre les éléments. Cette dépendance est caractérisée par l'utilité d'un élément au sein d'un système ou d'un système dans son environnement. Le critère de cette utilité dépend du niveau de l'analyse. C'est la capacité descriptive des symboles pour les systèmes sociaux, la capacité de complémentarité (capacité liante) des formes pour les systèmes particuliers, la valeur énergétique pour les systèmes ondulatoires et enfin la capacité informationnelle pour l'espace-temps. Chacun de ces critères se retrouve dans les niveaux qui lui sont supérieurs, de sorte que l'ensemble des niveaux peut être compris et analysé en termes de contenu informationnel. La valeur absolue de la hiérarchie entre deux éléments se mesure par le rapport de la valeur de leur entropie informationnelle (quantité d'information portée par l'élément).

La fonction de hiérarchie peut être représentée par le signe de la division. Le chiffre supérieur, le dividende, a toujours une valeur plus importante que le chiffre inférieur, le diviseur (dans l'ensemble \mathbb{N}). En effet, le dividende fait augmenter le résultat alors que le diviseur le fait diminuer.

7.4 Liaison

Nom	Usage	Formule	Principe
Fonction L	Définit la liaison	$3,2 \cup 32$	Principe de conservation

En liant ou en fusionnant deux éléments, un troisième est produit qui n'a pas les propriétés additives de ses constituants. Les capitaux d'origine sont conservés, mais un nouveau capital émerge. Les contraintes et les degrés de liberté individuelles sont diminués au profit de contraintes collectives et de nouveaux degrés de liberté.

Le principe de conservation est étroitement lié à l'**émergence**. Car l'émergence et la complexité sont des notions qualitatives, alors que la conservation est une notion quantitative. Les capitaux émergents ne sont pas de même nature que les capitaux d'origine. La transformation qualitative des capitaux dans la dynamique systémique ne consomme pas le capital d'origine, mais le réarrange

et le reconfigure de manière à obtenir plus de potentiel avec le même capital. C'est le principe de l'**activation** des capitaux.

L'information, étant le pilier de cette construction, est conservée, mais elle se réarrange lors de l'émergence des nouveaux capitaux pour devenir plus "utile" et produire une nouvelle identité. Les propriétés individuelles disparaissent au profit des propriétés collectives. Les capitaux individuels s'additionnent et s'activent pour produire un nouveau capital.

7.5 Mesure de la complexité

La complexité algorithmique [37] est mesurée par la quantité de ressources, de temps et d'espace nécessaires pour résoudre un problème complexe [35]. Elle peut également se mesurer par le nombre de bits nécessaires à formaliser un système complexe. La complexité définie dans le concept MICROGLOBAL, comprise comme un potentiel de développement ou de survie à long terme, peut se formaliser par les équations décrites par les 4 fonctions fondamentales. Mais il n'est pas possible de reproduire le monde que nous connaissons par une simulation, car les 4 fonctions, assemblées en système, ont une composante aléatoire qui ne permet pas une description unique, absolue et universelle. Les constantes de notre monde se sont ajustées de manière à maximiser la complexité. De nombreuses bifurcations et choix sont aléatoires. Ils sont valorisés dans la mesure où ils minimisent les contraintes spatiales et temporelles et qu'ils maximisent la complexité.

L'approche MICROGLOBAL consiste à mesurer la complexité structurelle du système en considérant que plus un système est complexe, plus sa faculté à résoudre les contraintes de l'environnement sera grande [11].

Nous distinguons la dynamique **intérieure** et la dynamique **extérieure** des systèmes. La dynamique intérieure se caractérise par le calcul de ses **capitaux**. La **somme** des capitaux individuels de ses éléments internes constitue le capital passif du système. Additionné à la somme des interactions entre les éléments du système, ce capital passif devient actif et produit une nouvelle identité dont la valeur est déterminée par son interaction avec l'environnement. La valeur de ce capital actif dépend de l'environnement, mais également des variables internes telles que le rapport entre les charges du système qui produisent de la complexité (production, spécialisation, recherche, organisation, réseau) et celles qui produisent de l'entropie dans l'environnement (consommation, commerce, contraintes organisationnelles, surveillance, sécurité). Ainsi, toutes les charges d'un système ne participent pas de la même manière à la construction de la complexité. Le calcul du capital interne des systèmes est défini avec la formule (5) suivante:

$$C_s = \sum C_e + \sum I_i$$

$$C_s = \text{Capital système} \tag{5}$$

$$C_e = \text{Capital éléments}$$

$$I_i = \text{Interactions internes}$$

De la dynamique interne émerge l'identité du système et sa dynamique complexe externe. Cette **dynamique externe** correspond au **produit** des capitaux externes de chaque phase. Ces capitaux externes sont la valeur des flux engendrés par le système, entre le système et l'environnement, par unité de temps.

Pour comprendre la logique de ce calcul, nous nous reportons au niveau N^0 , niveau où émerge l'espace-temps à 4 dimensions. Chaque phase détermine une dimension. La phase R détermine la dimension 1, la phase D détermine la dimension 2, la phase H détermine la dimension 3 et la phase L détermine la dimension du temps. La valeur de la phase R détermine une longueur. Le produit de la valeur de la phase R et D détermine une surface. Le produit de la phase R , D et H détermine un volume et le produit des phases R , D , H et L détermine l'espace-temps à 4 dimensions. C'est la dynamique de ce niveau 0 et l'interaction des éléments au sein du système qui produisent l'émergence de l'espace-temps et qui lient les dimensions entre elles de manière à nous faire observer une coordonnée spatio-temporelle unique pour chaque point de l'espace-temps. A l'intérieur de ce système, les éléments (dimensions) apparaissent disjoints de sorte que l'on observe la non-localité

caractéristique des phénomènes quantiques. La localité émerge de la dynamique de ce système et s'observe dans les niveaux supérieurs.

Pour déterminer la **complexité** d'un système, on multiplie la valeur des capitaux externes C_e (capitaux externes initiés par le système) de chaque phase, ce qui donne la formule (6):

$$\begin{aligned} \text{complexité} &= C_{X_{ext}} = C_{R_{ext}} \times C_{D_{ext}} \times C_{H_{ext}} \times C_{L_{ext}} \\ \text{Complexité } C_{X_{syst}} &= \text{Complexité du système} \\ \text{Capital } R_{ext} = C_{R_{ext}} &= \text{Flux externe } R_{ext}/t \text{ sortant donnés sans contrepartie} \\ \text{Capital } D_{ext} = C_{D_{ext}} &= \text{Flux externe } D_{ext}/t \text{ échangés, soit sortant ou entrant} \\ \text{Capital } H_{ext} = C_{H_{ext}} &= \text{Flux externe } H_{ext}/t \text{ entrant, pris sans contrepartie} \\ \text{Capital } L_{ext} = C_{L_{ext}} &= \text{Flux externe } L_{ext}/t \text{ à réciprocité } > b \text{ avec l'environnement} \end{aligned} \quad (6)$$

Si un capital est nul (soit $C_{Re} = 0$, ou $C_{De} = 0$, ou $C_{He} = 0$, ou $C_{Le} = 0$), alors la complexité est nulle et le système n'est pas ou plus auto-organisé de l'intérieur. Le système peut être compliqué, mais pas complexe. Le maximum de complexité pour un capital spécifique apparaît lorsque les 4 capitaux des 4 phases sont identiques.

Au **niveau social**, la somme des valeurs des biens d'une entreprise, l'actif de son bilan, correspond au capital passif. C'est l'activité de l'entreprise, les interactions entre machines, matières premières et employés, qui active ce capital passif. Le compte d'exploitation comptabilise les interactions entre les différents éléments de l'entreprise. Ainsi, les flux internes d'énergie-matière-information sont le reflet de la construction du capital actif. Le produit des capitaux externes sera maximum lorsque la valeur de chaque typologie est identique. Ainsi $4^4 > 13 \times 1 \times 1 \times 1$. Les sommes sont dans les deux cas égales à 16. Cette dernière entreprise ($13 \times 1 \times 1 \times 1$) aurait une très forte production, mais une capacité très faible de spécialisation, d'organisation et de culture d'entreprise. Cette entreprise serait une succursale d'un groupe plus grand (holding par exemple), dont elle dépend pour les fonctions faibles de la société. Sa faible complexité rend cette entreprise fortement dépendante de son environnement pour assurer sa durabilité.

Au **niveau moléculaire**, le capital interne est composé de la valeur énergétique des atomes (capital passif créé par leur masse) additionnée à l'énergie de liaison des atomes (activation du capital). L'interaction entre les atomes est composée des flux d'électrons entre les parties liées des atomes. L'énergie interne d'un système moléculaire est la somme de toutes les énergies (cinétique et potentielle) microscopiques liées à sa structure moléculaire et atomique. Le capital externe est l'énergie que le système moléculaire échange (travail, chaleur...) avec l'environnement. La somme de cette énergie détermine le capital du système moléculaire. Le produit de ces énergies selon les 4 types d'interactions (covalence de coordination, covalence, interaction ionique et hydrogène) décrit la complexité du système. Une molécule très stable interagit peu avec l'environnement, de sorte qu'elle ne sera pas complexe car pas évolutive. A l'inverse, une molécule instable interagit fortement avec l'environnement et pourra être complexe si elle entretient avec l'environnement les 4 types d'interactions. L'évolution des molécules non complexes, stables ou instables, dépend de leur environnement et appartient à des ensembles complexes plus vastes tels que les organismes vivants.

Au **niveau de l'information**, le **capital** du niveau N^0 de l'espace-temps est la **somme** des bits formés par les spins de la gravité quantique à boucle [40]. Selon cette théorie, ces boucles forment à leur jonction les nœuds qui représentent les quantas de volume de l'espace-temps. Elles sont organisées comme les orbitales des électrons en couches autour des noyaux. Ces couches se remplissent les unes après les autres, des plus proches du noyau (les moins énergétiques) aux plus éloignées. Nous pouvons comparer ces règles du principe d'exclusion de Pauli [40] qui obligent les électrons à avoir des états quantiques différents dans les différentes orbitales et à remplir ainsi les orbitales basses avant les hautes, aux bits des spins qui se configurent à la suite d'interactions, d'abord sur le niveau de la dimension 1 (R), puis sur le niveau de la dimension 2 (D), puis de la dimension 3 (H) et enfin de la dimension 4 (L), celle du temps⁵. Les dimensions sont disjointes et sont indéfinies tant qu'une interaction ne les oblige pas à se configurer et à enregistrer une information. Les dimensions émergent les unes après les autres, ce qui explique la non-localité des phénomènes quantiques. La

⁵L'annexe K développe plus en détail la notion des niveaux physiques.

complexité de l'espace-temps se calcule par le **produit** des capitaux de chaque phase. Lorsque les niveaux se remplissent, les dimensions émergent, d'abord à 1 dimension par des longueurs, puis par deux dimensions, les surfaces, par 3 dimensions, les volumes, et enfin par la quatrième dimension, le temps ⁶. Le produit de ces capitaux, donc l'émergence de la complexité, produit l'espace-temps et nous permet de localiser les événements sur des lieux et des instants uniques de l'espace-temps. Le système lie ses éléments, associe les dimensions pour que l'espace-temps nous apparaisse comme une toile cohérente bien que déformable dans la description de la relativité.

8 Concepts équivalents

Plusieurs concepts décrivent les systèmes avec les mêmes fonctions que celles du concept MICROGLOBAL. Certains cycles décrits ci-dessous représentent les fonctions fondamentales mais ne forment pas pour autant des systèmes auto-organisés. Ils n'accumulent pas de capital et sont pilotés par leur environnement. Ils ne sont pas les initiateurs, les commandeurs des flux qu'ils engendrent. Ils n'ont donc pas la complexité des systèmes autonomes puisqu'ils sont organisés de l'extérieur. Ils sont une partie d'un système auto-organisé d'ordre supérieur. Nous les détaillerons dans la partie II de cet exposé.

Le concept **LYFE** [27] définit la vie comme étant un système auto-organisé. Ces 4 critères sont identiques à ceux définis dans le concept MICROGLOBAL. Le premier critère, l'autocatalyse, est une interaction éducative et reproductive par une dynamique de production de l'identité des systèmes. Le deuxième, l'évolution darwinienne et la capacité d'apprentissage, est une interaction de différenciation qui spécialise le système complexe. Le troisième, les structures dissipatives, est une interaction hiérarchique qui prélève l'énergie dans l'environnement pour construire la complexité du système. Finalement, le quatrième et dernier critère, l'homéostasie, est une interaction liante qui produit des frontières entre le système complexe et l'environnement. Le système complexe peut stabiliser ses variables à l'intérieur de ses frontières.

Le **fer à cheval de SMALE** [43], ou la transformation du boulanger [14] dans la théorie du chaos [16], décrit un exemple de simulation de système dynamique. Une succession d'opérations géométriques simples permet d'obtenir un comportement chaotique. Ce concept décrit 4 étapes équivalentes aux 4 fonctions d'un système MICROGLOBAL: étirement d'une surface, coupe, empilement et fusion. Elles correspondent respectivement aux fonctions R , D , H et L . Ce concept est décrit plus précisément dans l'annexe D.

Le **cycle de CARNOT** [18] est un ensemble de quatre transformations subies par un fluide lorsque de la chaleur est échangée entre une source chaude et une source froide: la chauffe (détente isotherme réversible), la compression adiabatique réversible, le refroidissement (compression isotherme réversible) et la détente (adiabatique). Elle correspondent respectivement aux fonctions H , L , R et D du concept MICROGLOBAL. Le cycle transforme de la chaleur en énergie motrice et inversement. Trois variables, tirées de la loi des gaz parfaits ($PV = nRT$), permettent d'effectuer un cycle thermique semblable au cycle systémique MICROGLOBAL. La pression correspond à la hiérarchie, la température caractérise les transformations isothermes et adiabatiques et le volume les transformations isobares (voir annexe E).

Le **principe de Landauer** [6], démontré par l'expérience de Szilar, permet de montrer que la connaissance de l'état d'un bit d'information correspond à un travail égal à $KT \ln 2$. Autrement dit, l'effacement d'un bit d'information, c'est-à-dire l'ignorance de son état par un observateur (un système dans lequel ce bit est utile et concrétise une interaction), peut être converti en un travail. Le cycle que décrit cette expérience de pensée possède 4 étapes, chacune correspondant à une fonction fondamentale du concept MICROGLOBAL. Un schéma est présenté à l'annexe F. Le principe sera décrit dans la deuxième partie de cet exposé.

Le **cycle de Beau de Rochas** [18] convertit l'énergie chimique en énergie mécanique dans les moteurs 4 temps. Il est composé de 4 phases correspondantes aux 4 fonctions fondamentales du concept MICROGLOBAL: aspiration, compression, détente (inflammation) et refoulement. Elles correspondent respectivement aux fonctions D , H , R et L . Un schéma présente cette correspondance dans l'annexe G.

⁶La figure 2 a été présentée au début de l'exposé sans les éléments techniques pour en comprendre tous les aspects. Alors qu'elle a servi à ce moment à fournir une vue globale et intuitive pour le lecteur, on peut maintenant en apprécier la profondeur et notamment les imbrications des niveaux.

Le cycle de **traitement de l'information** [1] est une méthode de traitement de l'information en 4 étapes. L'entrée, le traitement, la sortie et le stockage constituent les quatre principes majeurs de ce cycle. Chacun de ces principes correspond à une fonction fondamentale du concept MICROGLOBAL, respectivement les fonctions H , D , R et L .

9 Conclusion

Dans cet exposé, le premier de trois d'un essai sur la systémique, nous avons introduit l'approche MICROGLOBAL. Cette approche propose un cadre d'analyse systémique centré sur 4 fonctions fondamentales déterminées par les rapports hiérarchiques, la réciprocité et la temporalité des interactions. La première fonction, la reproduction, est une interaction asymétrique en hiérarchie descendante, donc d'un élément de haute hiérarchie vers un élément de basse hiérarchie pour l'identité considérée, et sans réciprocité. La deuxième, la différenciation, est une interaction symétrique, à réciprocité instantanée et égale en valeur entre des éléments de hiérarchie différente mais pour des identités différentes. La troisième, la hiérarchisation, est une interaction asymétrique en hiérarchie montante, d'un élément de basse hiérarchie vers un élément de haute hiérarchie pour l'identité considérée, et sans réciprocité. La quatrième et dernière, la liaison, est une interaction égale en valeur mais à réciprocité différée entre éléments de même hiérarchie.

Nous avons soutenu que toute interaction peut être décrite au moyen de ces 4 fonctions combinées. La mesure des flux entre le système et son environnement selon ces 4 critères permet de déterminer le capital et la complexité des systèmes. Le capital est la somme des valeurs des éléments du système, alors que la complexité est le produit des 4 valeurs selon ces critères. La complexité, ainsi définie, est gage d'auto-organisation et détermine la durabilité des systèmes. Les systèmes les plus complexes sont les plus durables, car ils ajustent leurs variables pour maximiser la durabilité. Comme pour les systèmes biologiques, la nature conserve les systèmes les plus durables. Durant ces interactions, les systèmes se complexifient au détriment de leurs environnements, qui augmentent leur entropie. Ils se construisent par activation de leurs capitaux internes en produisant une identité qui constitue un capital émergeant pour l'environnement.

Nous avons posé les bases d'une systémique générale qui étend ses principes généralement appliqués aux systèmes sociaux et biologiques à l'ensemble de la nature, y compris les systèmes physiques, ondulatoires, quantiques et informationnels. Ce cadre est donc à la fois très général et très spécifique, de sorte qu'il peut être appliqué à l'ensemble des systèmes de la nature, de l'infiniment petit à l'infiniment complexe. Les systèmes se décomposent en niveaux emboîtés les uns dans les autres sur lesquels se développent de nombreux sous-systèmes. On distingue le niveau N^0 de l'information d'où émerge l'espace-temps, le niveau N^1 des ondes d'où émerge l'énergie, le niveau N^2 des particules d'où émerge la masse, le niveau N^3 de la topologie d'où émergent les formes, notamment la biologie, et le niveau N^4 des symboles d'où émerge le social. Un foisonnement de systèmes colonise l'ensemble de ces niveaux. La singularité, ce point sans dimension où toutes les théories s'effondrent, correspond à la logique systémique du concept MICROGLOBAL. Toute règle et toute constante sont issues de cette dynamique qui a façonné le monde pour le rendre localement toujours plus complexe et globalement toujours plus désordonné. Ces deux mouvements répondent à la minimisation des contraintes temporelles pour l'évolution complexe et à la minimisation des contraintes spatiales pour l'évolution entropique.

Cette première partie a présenté les fondements de cette analyse, appliquée au niveau social. La partie suivante appliquera ce concept au niveau physique pour comprendre comment l'information, de la singularité d'origine, s'incarne dans les différents niveaux de la nature. La troisième partie développera la minimisation des contraintes comme moteur de l'évolution complexe et entropique.

*

Remerciements

Cette réflexion a débuté il y a plusieurs années dans le cadre de mes études à l'IUED à Genève. Elle a fait l'objet d'un diplôme de recherche en 2004 (essai de modélisation de la complexité d'un itinéraire de développement) encadré par Rolf Steppacher et Jacques Grinevald. La réflexion s'est poursuivie et étoffée durant ces dernières années pour aboutir à un concept plus clairement énoncé. Je remercie mes professeurs de l'IUED (devenu IHEID en 2007) pour l'intérêt qu'ils ont manifesté à cette démarche holistique visant à comprendre le fonctionnement des sociétés dans les multiples aspects de leur développement. Je remercie vivement ma famille pour les encouragements qu'ils m'ont donnés, plus particulièrement mes fils Noémien et Keran Kocher qui ont activement et avec beaucoup de compétences fait mûrir cette réflexion. Merci à mon frère Michel avec qui je suis associé dans la société MICROGLOBAL, société de recherche, de développement et d'application du concept MICROGLOBAL.

References

- [1] Jean-Louis Amat and Gérard Yahiaoui. *Techniques avancées pour le traitement de l'information*. Editions Cepaduès, 2002.
- [2] Alain Aspect. Quelques tests expérimentaux des fondements de la mécanique quantique (en optique). In *Université de tous les savoirs*, volume 4. Odile Jacob, 2002.
- [3] Peter William Atkins and François Gallet. *Chaleur et désordre: Le deuxième principe de la thermodynamique*. Pour la Science, 1987.
- [4] Henri Atlan. *Le vivant post-génomique ou Qu'est-ce que l'auto-organisation ?* Odile Jacob, 2010.
- [5] Jean-Pierre Bibring. *Seuls dans l'Univers*. Odile Jacob, 2022.
- [6] Edward Bormashenko. Landauer's principle: Past, present and future. *Entropy*, 27(4), 2025.
- [7] Léon Brillouin. *La science et la théorie de l'information*. J. Gabay, 2000.
- [8] Alain Cardon. *La complexité organisée : Systèmes adaptatifs et champ organisationnel*. Hermes Science Publications, 2004.
- [9] Joël de Rosnay. *Le Macroscopie, vers une vision globale*. Points, 2014.
- [10] Jean-Paul Delahaye. *Vers du calcul sans coût énergétique*, volume 471. Pour la science, 2017.
- [11] Gérard Donnadieu and Michel Karsky. *La systémique, penser et agir dans la complexité*. Éditions liaisons, 2002.
- [12] Daniel Durand. *La systémique*. Que Sais-Je, 2017.
- [13] Ivar Ekeland. *Le Calcul, l'Imprévu. Les figures du temps de Kepler à Thom*. Points, 1987.
- [14] L. Ermann and M. Saraceno. Quantized baker map. *Scholarpedia*, 7(12):9860, 2012. revision #129387.
- [15] Murray Gell-Mann. *Le Quark et le Jaguar: voyage au coeur du simple et du complexe*. Flammarion, 1997.
- [16] James Gleick. *Chaos: Making a New Science*. Viking, 1987.
- [17] Jacques Grinevald. La révolution carnotienne thermodynamique, économie et idéologie. *Cahiers Vilfredo Pareto*, 14(36):40–79, 1976.
- [18] Livres Groupe. *Cycle Thermodynamique: Moteur Stirling, Cycle de Carnot, Cycle de Beau de Rochas, Cycle D'Atkinson, Cycle de Miller, Cycle de Brayton*. Books LLC, 2010.
- [19] Stuart Hameroff and Roger Penrose. Orchestrated reduction of quantum coherence in brain microtubules: A model for consciousness. *Mathematics and Computers in Simulation*, 40(3):453–480, 1996.
- [20] Stephen Hawking. *A Brief History of Time*. Bantam Books, New York, 1998.
- [21] Thomas Hertog. *L'Origine du temps*. Odile Jacob, 2023.
- [22] Maurice Jacob. le model standard en physique des particules. *Pour la science*, (300):58, 2002.
- [23] Ilya G. Kaplan. *The Pauli Exclusion Principle: Origin, Verifications, and Applications*. John Wiley Sons, 2017.
- [24] Jean-Louis le Moigne. La théorie du système général (théorie de la modélisation). *Communication. Information Médias Théories*, 2(3):217–218, 1978.

- [25] Jacques Lesourne. *Économie de l'ordre et du désordre*. Economica, 1990.
- [26] Laurent Licata. La théorie de l'identité sociale et la théorie de l'auto-catégorisation: le soi, le groupe et le changement social. *Revue électronique de psychologie sociale*, 1:19–33, 2007.
- [27] David Louapre. «lyfe»: la vie redéfinie. *Pour la Science*, 545(3):34–39, 2023.
- [28] Jean-Pierre Luminet. *L'Écume de l'espace-temps*. Odile Jacob, 2020.
- [29] Benoit B. Mandelbrot. *The Fractal Geometry of Nature*. W.H.Freeman Co Ltd, 1982.
- [30] Edmond Marc. *Psychologie de l'identité - Soi et le groupe*. Dunod, 2005.
- [31] Marcel Mauss. *Essai sur le don: Forme et raison de l'échange dans les sociétés archaïques*. Flammarion, Paris, 2021.
- [32] Edgar Morin. *La Méthode, tome 3. La Connaissance de la connaissance. Anthropologie de la connaissance*. Seuil, 1986.
- [33] Edgar Morin. *La Méthode, tome 1. La Nature de la nature*. Points, 2014.
- [34] Edgar Morin. *La Méthode, tome 2. La Vie de la vie*. Points, 2014.
- [35] Christos H Papadimitriou. Computational complexity. In *Encyclopedia of computer science*, pages 260–265. 2003.
- [36] Jean Perdijon. *Les physiciens sont-ils des intellectuels?: Petit traité (illustré) de culture physique*. 2016.
- [37] Sylvain Perifel. *Complexité algorithmique*. Ellipses, 2014.
- [38] Jean Piaget. Le structuralisme. *Cahiers internationaux de symbolisme*, pages 17–18, 1968.
- [39] Ilya Prigogine. *La fin des certitudes. Temps, Chaos et les Lois de la Nature*. Editions Odile Jacob, 2010.
- [40] Carlo Rovelli. De la gravitation à boucles. *Images de la Physique*, pages 35–43, 2012.
- [41] Carlo Rovelli. *Par-delà le visible*. Odile Jacob, 2015.
- [42] Carlo Rovelli. *Trous blancs*. Flammarion, 2025.
- [43] S. Smale and M. Shub. Smale horseshoe. *Scholarpedia*, 2(11):3012, 2007. revision #91781.
- [44] Isabelle Stengers and Ilya Prigogine. *La nouvelle alliance - Métamorphose de la science*. Gallimard, 1986.
- [45] John W. Thibaut and Harold H. Kelley. *The Social Psychology of Groups*. John Wiley Sons, 1959.
- [46] Ludwig Von Bertalanffy. *Théorie générale des systèmes*. Dunod, 2012.
- [47] Norbert Wiener. *La cybernétique : Information et régulation dans le vivant et la machine*. Seuil, 2014.
- [48] Hervé Zwin, Jean Claude Heudin, and Jean Jacques Kupiec. L'énigme de l'émergence. *Sciences et Avenir - Hors-série*, 143, 2005.

A Typologie des flux

Chaque type d'interaction correspond à une fonction fondamentale. Partant du système a , nous construisons le système p sachant que l'identité p est plus que la somme des identités qui le composent. Comme illustré sur la figure 22, au cours de l'émergence du système p , les identités a acquièrent une nouvelle identité: celle du nouveau système dans lequel elles sont intégrées.

La **différenciation verticale** (H) engendre un lien vertical par une redistribution interne (R): Il existe un **équilibre interne entre R et H** car plus la hiérarchie est importante, plus la redistribution doit être importante pour équilibrer les contraintes internes au système. L'environnement qui bénéficie d'un flux R (flux externe) devient partiellement intégré au système puisqu'il consomme et partage l'identité du système.

La **différenciation horizontale** (D) engendre un lien horizontal (L) par les flux de dons et contre-dons. Il existe un **équilibre interne entre D et L** , car plus les éléments d'un système sont diversifiés, plus il faut du lien pour garder la cohérence du système et conserver son identité.

La **séparation** entre dynamique **interne** (flux interne) et dynamique **externe** (flux externe) est marquée par la temporalité des flux liants qui deviennent des flux de rupture (R_L) lorsque la temporalité est trop longue. L'élément qui ne reçoit pas le contre-don en retour de son don considère que son don est sans valeur. C'est un flux de déchet qui est exclu du système et qui marque la rupture et la frontière entre le système et l'environnement. Le flux du don devient un flux externe.

Équilibre H et L : Les liens horizontaux (L) sont un contre-pouvoir à la hiérarchie H de sorte qu'un équilibre se réalise entre H et L .

Équilibre R et D : La forte diversité s'oppose à la forte identité.







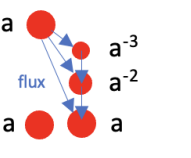
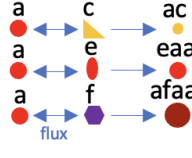
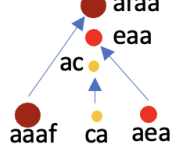
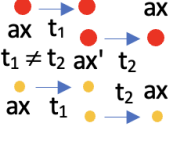
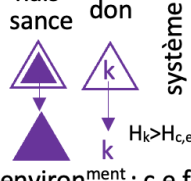
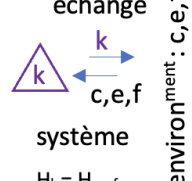
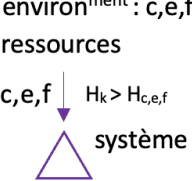
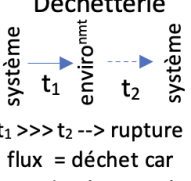
Système a	Système k				Système p
	Reproduction	Différenciation	Hiérarchisation	Liaison/Rupture	
 a	 $a+a+a+a+a$	 $a \rightarrow ac$ $a \rightarrow afaa$ $a \rightarrow eaa$	 $H_{afaa} > H_{eaa} > H_{ac}$	 $afaa+eaa+ac=k$ $H_k > \sum H_{ax}$	 p
Flux internes dynamique interne affectation des ressources	dédoublement croissance  production consommation ressources	transformation  recherche diffusion ressources	organisation  organisation contrôle ressources	réseautage  lien rupture ressources	
Flux externes	naissance don système  environ ^{ment} : c,e,f $H_k > H_{c,e,f}$	échange  système $H_k = H_{c,e,f}$ environ ^{ment} : c,e,f	environ ^{ment} : c,e,f ressources  système $H_k > H_{c,e,f}$	Déchetterie  système $t_1 >>> t_2 \rightarrow$ rupture flux = déchet car pas de réciprocité	
Typologie des flux externes	hiérarchie $H_{syst.} > H_{envir.}$ Flux syst. \rightarrow envir. Temporalité: pas de réciprocité	hiérarchie $t_1 \rightarrow H_{syst.} > H_{envir.}$ $t_2 \leftarrow H_{envir.} > H_{syst.}$ Flux syst. \leftrightarrow envir. Temporalité: instantanée $t_1 = t_2$	hiérarchie $H_{syst.} > H_{envir.}$ Flux syst. \leftarrow envir. Temporalité: pas de réciprocité	hiérarchie $t_1 \rightarrow H_{syst.} > H_{envir.}$ $t_2 \leftarrow H_{envir.} > H_{syst.}$ Flux syst. \leftrightarrow envir. Temporalité: différée $t_1 \ll t_2$	
Identité:	a, b, c, ..., y, z				
Hiérarchie:	$H_{aa} = aa = a^2$ nombre d'identité détermine la hiérarchie $a^3 > a^2 > a$ $aaaF > aafa > afaa > faaa$ position détermine hiérarchie				
	$t_1 > t_2 \rightarrow$ liaison l'enviro ^{nmt} devient élément du système				

Figure 22: Résumé des typologies des flux systémiques

B Exemple de mesure des flux

Le tableau de la figure 23 présente un exemple chiffré de mesure de flux lors de l'achat de pain par un client dans une boulangerie. Les flux sont décomposés selon la relation entre les deux acteurs de l'échange. Nous pouvons ainsi caractériser la structure du systèmes avec son environnement par deux graphiques, l'un des flux entrant et l'autre des flux sortants.

Exemple 1

Système: La boulangerie achète ses intrants (D^-) et vend son produit au prix de revient (D^+) avec un bénéfice (H^+). Le système est en croissance car la somme des flux entrant est supérieur à celle des flux sortant.

Environnement: le client achète son pain (D^+) au prix de revient (D^-) additionné du bénéfice du boulanger (H^-). Le système puise sa croissance dans l'environnement, car la somme des flux sortant est supérieur a elle des flux entrant.

Exemple 2

Idem que l'exemple 1, mais avec un décalage entre la prise du pain et son paiement. Ce décalage engendre de flux interne de liaison de 2 puis 3 unités, de sorte que le client devient un élément partiellement intégré au système.

Exemple 3

Le pain est vendu en promotion à 1.-/pain (D^+). La valeur du pain étant de 3.-, on considère une perte de 2.-/pain (R^+) qui correspond à la valeur de la promotion pour le client.

Exemple 4

Le client est fidéliser avec une réduction. Cela engendre un lien et intègre le client au système boulangerie.

Exemple 5

Un client retourne un pain qui est trop sec contre remboursement. Le flux R_L de déchet est externalisé de sorte que le système est en décroissance. Les déchets que le système produit engendre un lien avec l'environnement, alors même qu'il n'y a pas de contre flux. Car l'environnement absorbe les déchet sans contrepartie ou avec une contrepartie d'une temporalité très longue. Il existe également un lien entre le boulanger et le client dans la mesure ou le retour du pain est considéré comme un contre-don, la réciprocité de l'achat qui a eu lieu auparavant.

Exemples de flux sociaux : transaction de pain à 3.--/pain. Prix de revient : 2.--/pain																			
	R		D		H		R _L		R		D		H		L		R-D-H-L	t.	
Flux entrant : + Flux sortant : -	S	E	S	E	S	E	S	E	-	+	-	+	-	+	-	+	S = système E = environ.		
Vente au comptant À 3.--/pain	+ 0 - 0		+2 -2		+1 0		0 0										S+ = 0,2,1,0 S- = 0,2,0,0 E+ = 0,2,0,0 E- = 0,2,1,0	t1 t1 t1 t1	
Vente à crédit 3.--/pain	+ 0 - 0		0 -2		0 0		0 0								0 -2		S+ = 0,0,0,0 S- = 0,2,0,0 E+ = 0,2,0,0 E- = 0,0,0,0	t1 t1 t1 t1	
Prends le pain à T1	+ -	0 0		+2 0		0 0		0 0								+2 0	E+ = 0,2,0,0 E- = 0,0,0,0	t1 t1	
Paiement du pain à t2	+ 0 - 0		+2 0		+1 0		0 0								+3 0		S+ = 0,2,1,0 S- = 0,0,0,0 E+ = 0,0,0,0 E- = 0,2,1,0	t2 t2 t2 t2	
Promotion (vente à perte) Pain à 1.--	+ +2 - 0 + -		+1 -2		0 0		0 -1										S+ = 2,1,0,0 S- = 0,2,0,1 E+ = 0,2,0,1 E- = 2,1,0,0	t1 t1 t1 t1	
Bons fidélité 5 pains PV = 12.-- économie d'échelle : PR = 8.--	+ 0 - 0 + -		+8 0		+4 0		0 0									+12 0	S+ = 0,8,4,0 S- = 0,0,0,0 E+ = 0,0,0,0 E- = 0,8,4,0	t1 t1 t1 t1	
payé de suite	+ 0 - 0		0 -8		0 0		0 0										0 -8	S+ = 0,0,0,0 S- = 0,8,0,0	t2 t2
emporté après	+ -	0 0		+8 0		0 0		0 0								+8 0	E+ = 0,8,0,0 E- = 0,0,0,0	t2 t2	
Retour de 1 pain sec (déchet) et remboursement	+ 0 - 0 + -		0 0		0 -3		+3 0									+3	S+ = 0,0,0,3 S- = 0,0,3,0 E+ = 0,0,3,0 E- = 0,0,0,3	t1 t1 t1 t1	
	Flux externes								Flux interne										
L'environnement inclut le client, fournisseurs, l'état, etc. Le système inclut le boulanger et son entreprise. Le client fait aussi partie du système lorsqu'il y a un flux interne de type L avec lui. La somme des flux de l'environnement et du système doit s'équilibrer dans chaque type d'interaction X- + X+ = 0																			

Figure 23: exemple de comptabilité des flux sociaux

C Information

L'information est stockée dans les quantas de l'espace-temps. Elle est indéfinie lorsqu'elle est non contrainte par une interaction. L'information est inutile et inutilisable dans cet **état indéfini**. Une perturbation de l'espace-temps engendre une onde, soit une interaction qui fige les quantas dans des **états définis**. Lorsque l'interaction cesse, l'état redevient flou et indéfini.

L'information, à travers les valeurs de spin, s'inscrit dans les quantas de l'espace-temps comme les électrons sur des **orbitales**. Les valeurs de spins sont des unités d'information. Elle remplit d'abord les orbitales basses puis, par empilement, les orbitales supérieures. Les orbitales de l'informations définissent les dimensions de l'espace-temps. La première orbitale définit une première dimension de l'espace-temps, la seconde orbitale une seconde dimension et ainsi de suite.

Ainsi, les ondes sont des phénomènes définis dans une seule dimension. Les particules dans 2 dimensions, la topologie en 3 dimension et les symboles sociaux en 4 dimensions. Cette approche permet de comprendre la superposition et l'intrication quantique par des informations manquantes et indéfinies dans les orbitales supérieures de l'espace-temps. Elle permet également d'envisager des dimensions supérieures à 4, mais inaccessibles à nos sens communs.

Chaque niveau systémique correspond à un **type de capital**. Chacun de ces capitaux complexifie l'information gravée dans les orbitales de l'espace-temps qui passe d'une forme indéfinie à une forme définie. Chaque niveau **conserve son capital** dans les étages supérieurs.

L'information au niveau N^0 est conservée dans les niveaux supérieurs mais elle reste indéfinie et inexploitable tant qu'elle n'encode pas des interactions. L'information constitue un capital uniquement lorsqu'elle est utilisable et qu'elle définit des interactions.

Il en est de même pour l'énergie qui est inutilisable lorsqu'elle est homogène mais qui constitue un capital lorsqu'elle est hétérogène et que l'on peut en tirer un travail.

Toutes interactions entre les éléments d'un système est un flux d'information quel que soit son niveau. L'information des niveaux supérieurs est gravée dans les orbitales supérieures des quantas de l'espace-temps. Le niveau N^1 pour l'énergie, le niveau N^2 pour les particules, le niveau N^3 pour les formes et le niveau N^4 pour les symboles. Nous comprenons ainsi que les ondes ont une approche statistique, les particules sont soumises à l'incertitude de Heisenberg, et les formes, même en 2 dimensions, sont précisément définies lorsque les 3 dimensions ont émergé.

Comme illustré sur la figure 24, à chaque niveau l'**entropie augmente** (deuxième loi de la thermodynamique). [3] L'information se disperse dans un espace-temps en expansion, l'énergie contenue dans les ondes s'affaiblit en raison du décalage vers le rouge, les particules se désintègrent et les formes se déforment, se dispersent, et perdent ainsi leur fonctions.

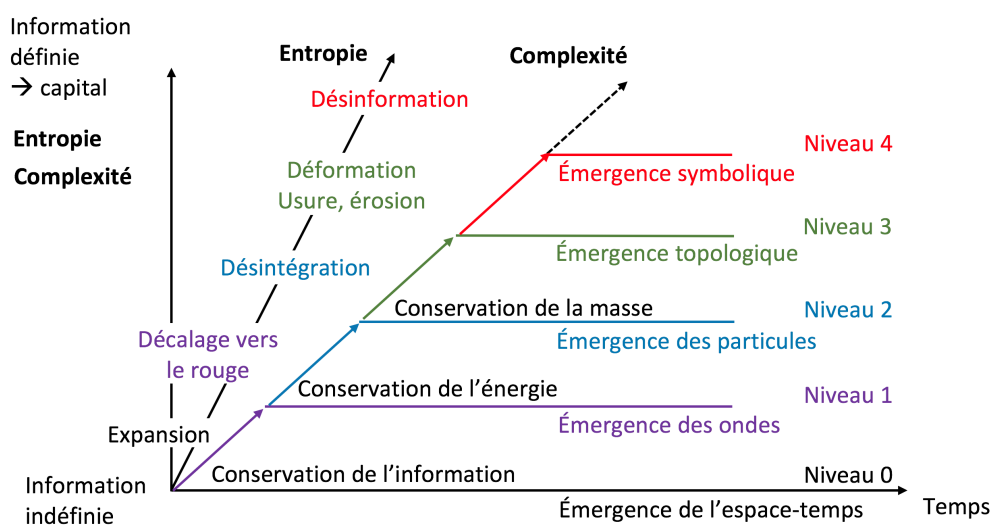


Figure 24: Évolution de la complexité et de l'entropie à travers les niveaux systémiques

D Le fer à cheval de Smale

L'application du fer à cheval de Smale [43], très proche de la transformation du boulanger [14], est un exemple de système dynamique caractérisant les systèmes complexes auto-organisés [13]. Une succession d'opération géométriques très simple permet d'obtenir un comportement chaotique. Ces transformations sont l'étirement, la découpe, l'empilement et la fusion. L'état chaotique, de par sa sensibilités aux conditions initiales, offre des solutions et des choix multiples pour la minimisation des contraintes, la diversification et l'adaptation des systèmes. Le schéma 25 représente les 4 opérations de la dynamique interne d'un système auto-organisé:

- La production d'identité par multiplication des éléments.
- La spécialisation interne des éléments.
- L'organisation interne du système
- Le lien entre les éléments.

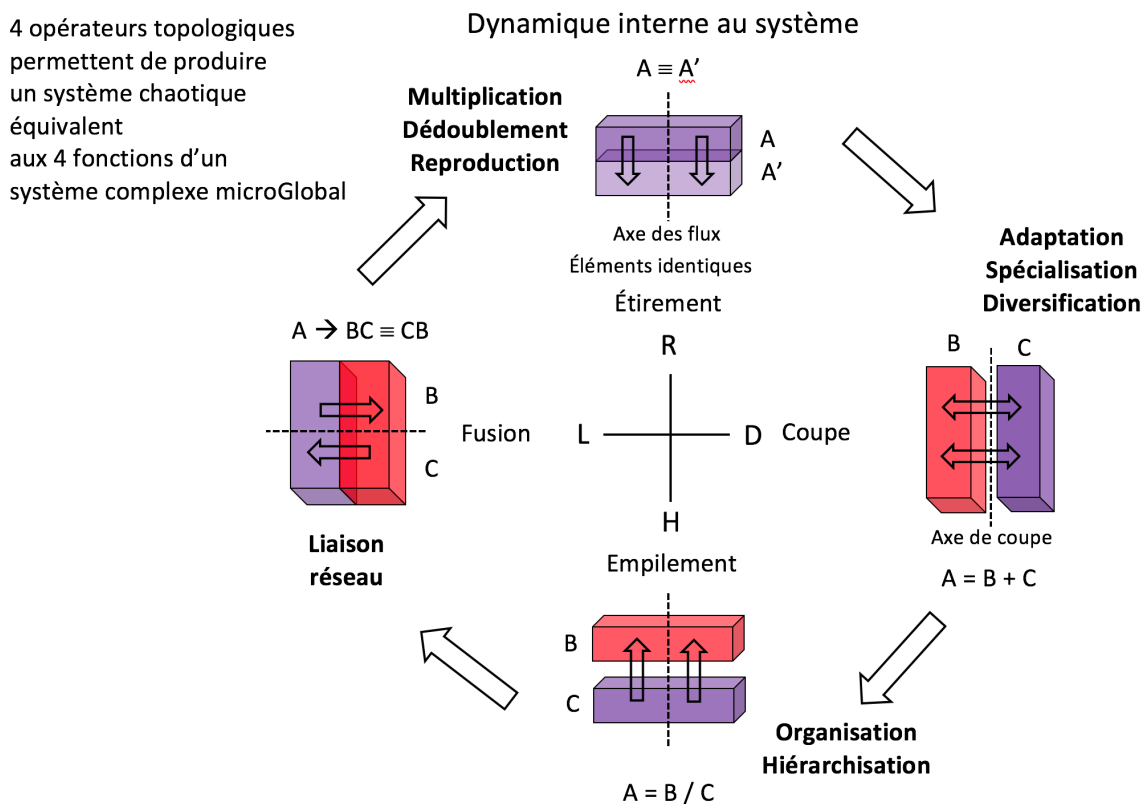


Figure 25: Correspondance du Fer à cheval de Smale et de l'approche MICROGLOBAL

E Cycle de Carnot

La figure 26 illustre la correspondance entre les variables du concept MICROGLOBAL et celle du cycle de Carnot.

La **pression** correspond au flux asymétriques car il implique des transfert de chaleur entre le système et l'environnement. Les compressions (R) ou détente (H) qui engendrent un échauffement ou un refroidissement sont isothermes car, pour que le système maintienne sa température, il doit externaliser ou internaliser de l'énergie sous forme de chaleur. L'entropie du système diminue lors de la compression isotherme et augmente lors de la détente isotherme.

Le **volume** correspond aux flux symétriques car les compressions (L/R_L) et les détente (D) sont adiabatiques, c'est-à-dire sans échange de chaleur de la même manière que les flux des phases L et D sont à valeur réciproque et identique. Il y a donc un travail réalisé dont l'énergie correspond à la variation de température du système.

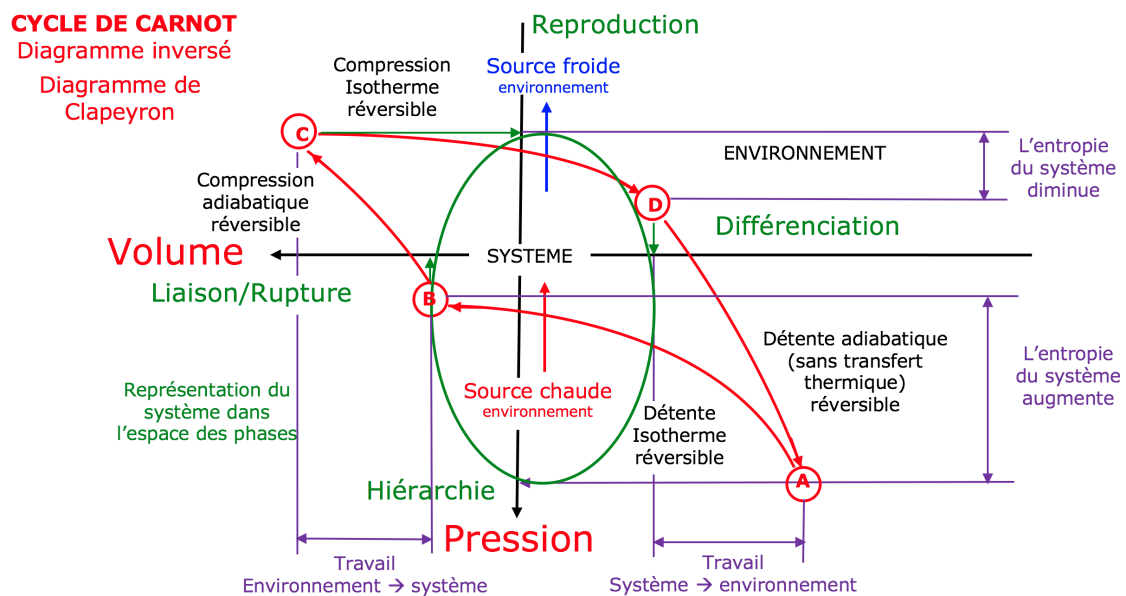


Figure 26: Correspondance entre le cycle de Carnot et l'approche MICROGLOBAL

La typologie des flux du concept MICROGLOBAL représentée sur le graphe de la figure 27 peut être mis en relation avec les **variables thermodynamique**. Sur la variable **température**, nous avons mis d'une part les transformations adiabatiques qui n'engendrent pas d'échange de chaleur, et d'autre part les transformations isothermes qui nécessitent des transferts de chaleur.

Les transformations adiabatiques sont de type D si la temporalité des échange est instantanée et de type L lorsque la temporalité de l'échange est non nulle. Elle permet un lien interne optimal aux valeurs $b/2$ et, au-delà de la valeur b , la réciprocity devient inexistante et marque la rupture (R_L) du lien avec l'environnement. La temporalité des échanges est en rapport avec les volumes car, dans le secteur adiabatique, il n'y a pas d'échange de chaleur. L'énergie interne est constante. Il existe un volume optimum d'espace-temps dans lequel les interactions interne au système peuvent être liantes. Dans un volume trop petit, les réciprocity sont instantanées et trop grande. Elles n'atteignent pas leur cible et n'ont plus de réciprocity.

Les interactions de type D couvrent les 2 secteur de pression $H_e > H_s$ et $H_s > H_e$ car un flux dans un des secteur engendre un flux dans l'autre, chacun des éléments étant de hiérarchie supérieur pour l'identité qu'il échange.

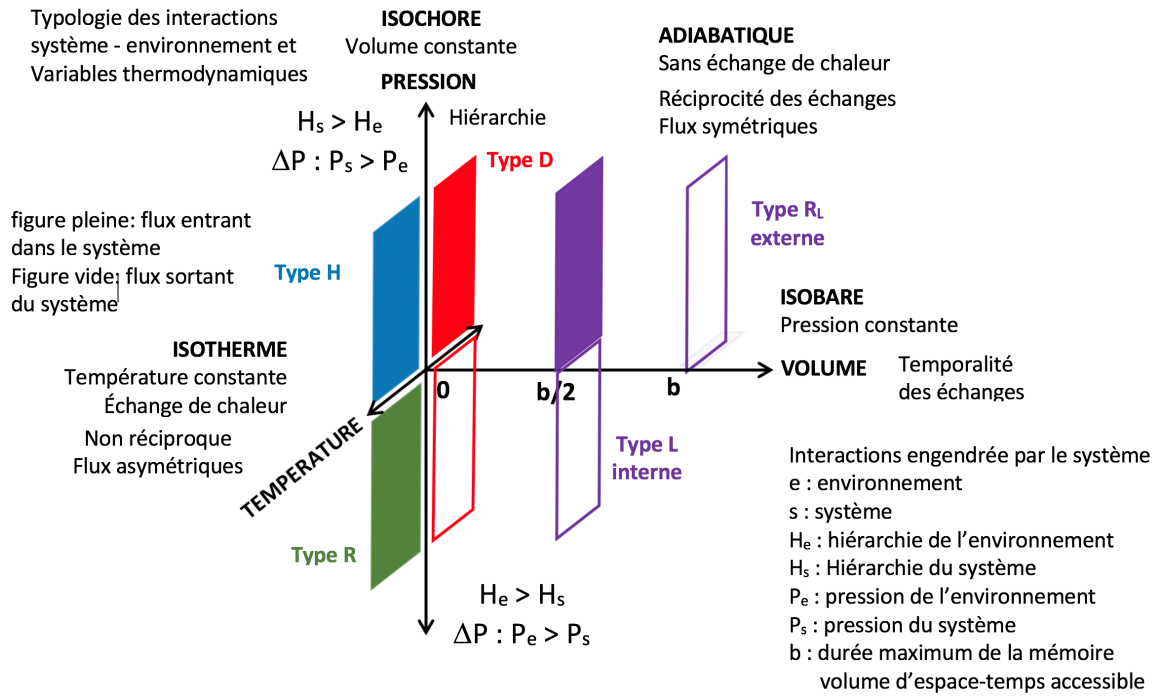


Figure 27: Graphique des variables thermodynamiques en relation avec la typologie des interactions systémiques du concept MICROGLOBAL.

F Principe de Landauer

Le **principe de Landauer** [6] est démontré par l'**expérience de Szilard**. Elle démontre qu'un bit d'information peut être converti en travail d'une valeur de $Q_e = kT \ln(2) = 0.0175eV$ à $20^\circ C$ [10]. Comme illustré sur la figure 28, elle se décrit par 4 étapes correspondant aux 4 fonctions du concept MICROGLOBAL. Cette correspondance est semblable à celle décrite pour le cycle thermique des moteur 4 Temps avec le cycle Bau de Rochas [18].

Décrire le principe de Landauer avec la logique MICROGLOBAL permet de montrer que le passage du niveau N^0 , celui de l'information gravée dans les quantas de l'espace-temps, au niveau N^1 , celui de l'énergie, peut être comprise comme une construction fractale. Les deux niveaux évoluent avec la même logique mais pas avec le même capital. Le capital du niveau supérieur émerge du niveau inférieur.

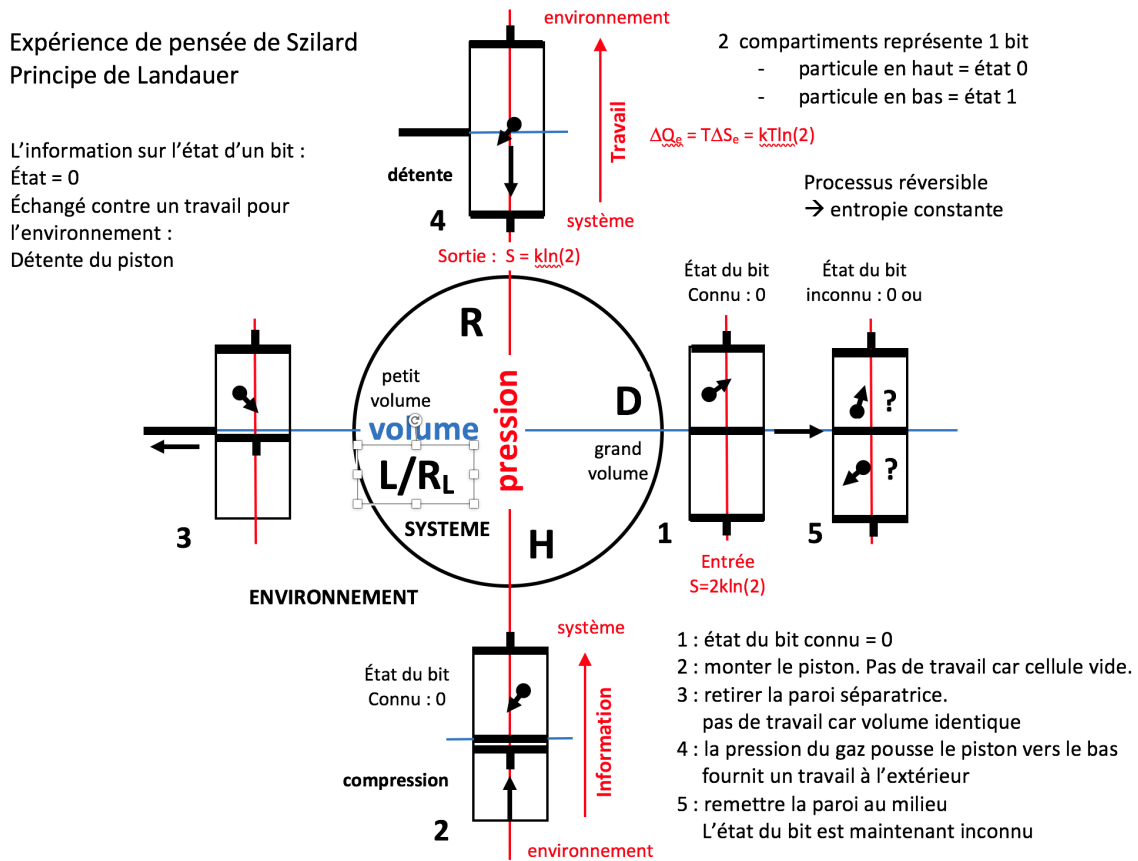


Figure 28: Correspondance entre l'expérience de pensée de Szilard et le concept MICROGLOBAL

G Cycle Bau de Rochas

Le cycle **Bau de Rochas** [18] converti l'énergie chimique en énergie mécanique dans les moteurs 4 temps. Les 4 temps correspondent aux 4 fonctions du concept MICROGLOBAL et sont illustré sur la figure 29 et 30. La présence de 4 phases permet une propriété cyclique.

Un moteur thermique n'est pas un système complexe car il est **hétéronome**, c'est-à-dire organisé de l'extérieur. Le moteur est un sous-système du système qui l'exploite. Le système maître impose un environnement spécifique qui permet d'activer un capital passif pour produire un capital actif. Le capital passif est l'énergie injectée dans le moteur et le capital actif est la force mécanique, le mouvement produit. On transforme un capital chimique, dont l'énergie réside dans les liaisons chimique, inscrit dans le niveau N^3 , en mouvement, devenant le capital du niveau N^4 . Le moteur est un système complexifiant.

La combustion du carburant en dehors d'un moteurs produirait uniquement de la chaleur et donc une dégradation de l'énergie qui produit une croissance entropique dans les niveaux inférieurs. L'agitation des particules provoque un rayonnement thermique, soit un rayonnement électromagnétique caractéristique du niveau N^1 . La combustion libre du carburant engendre donc une dé-complexification faisant notamment passer le capital du niveau N^3 au niveau N^1 .

Les variations de volume dans les **systèmes ouverts** se réalise à pression égale entre le système et l'environnement. Cela représente les flux à valeurs égale car la pression représente la hiérarchie. D'un côté (D) les flux sont entrant et sont des ressources. De l'autre côté (R_L), les flux sont sortant et son des déchets. Ces flux sortant sont à valeur nuls de sorte qu'ils ne nécessitent pas de contrepartie et qu'il marque une rupture avec l'environnement (pollution non traitée).

Lorsque le **système est fermé** la pression entre le système et l'environnement est différente car la hiérarchie est différente. Dans la phase R c'est le système qui produit une contraintes sur l'environnement en produisant de l'énergie mécanique. Dans le cas H c'est l'environnement qui produit une contrainte sur le système en comprimant le cylindre.

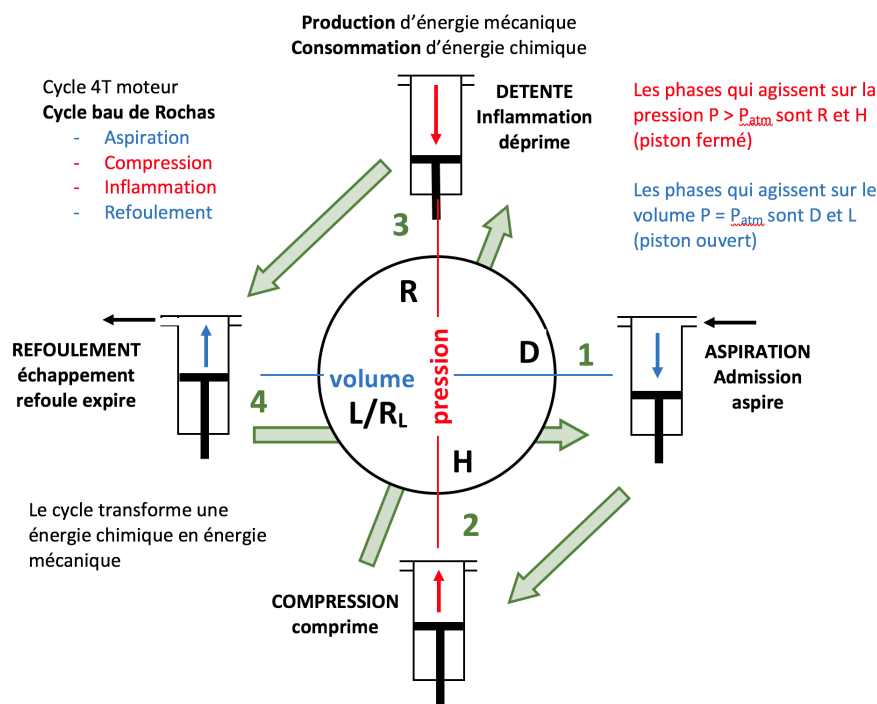


Figure 29: Correspondance entre les phases du cycle Bau de Rochas et celles du concept MICROGLOBAL.

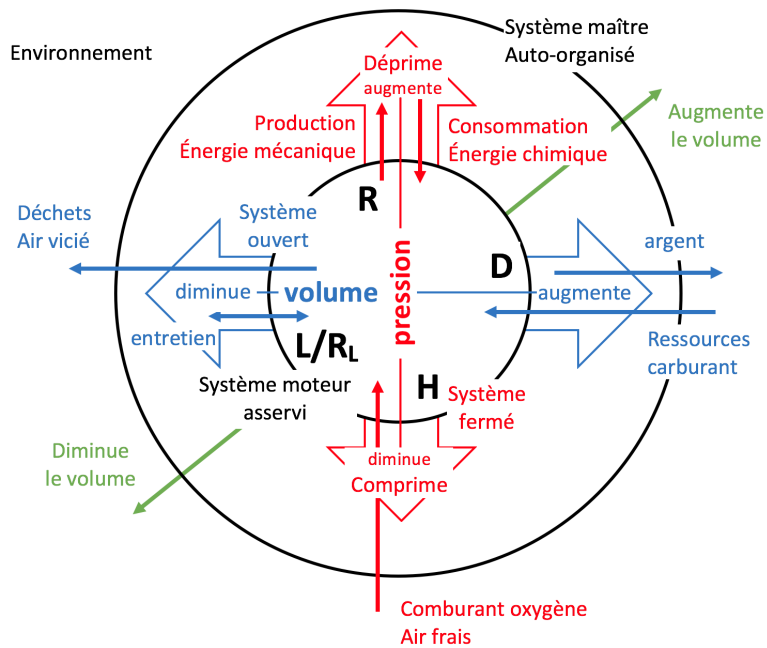


Figure 30: Relations entre un système et son environnement lors du cycle Bau de Rochas.

H Typologie interne et externe des interactions

La typologie des interactions interne au système (voir la figure 31) permet un lien horizontal des éléments ayant la même hiérarchie et un lien verticale des éléments n'ayant pas la même hiérarchie. Ce dernier lien est composé du don de la phase *R*, et le contre-don de la phase *H*.

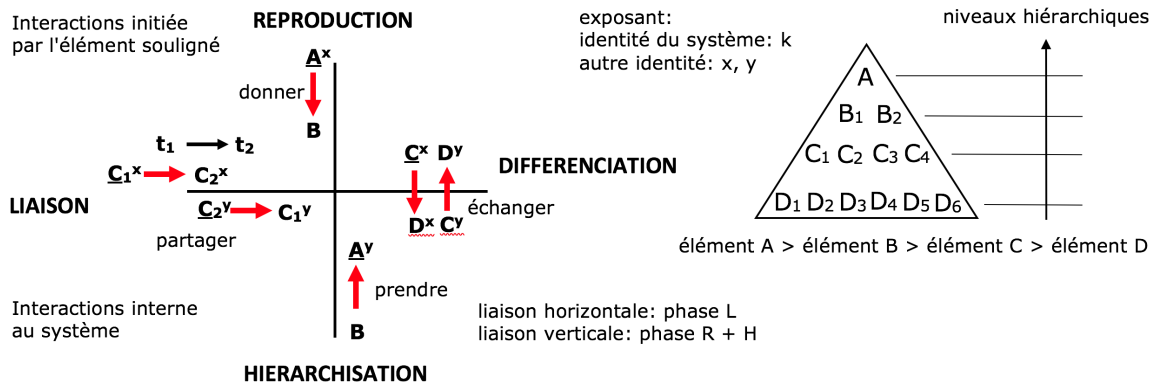


Figure 31: Typologie des interactions interne au système

La typologie des interactions externe (voir la figure 32) est pour la phase *L* une rupture avec l'environnement engendrée par l'externalisation des déchets. En effet le système donne de son identité en phase *R* et externalise ses déchets en phase *R_L* car la temporalité de la réciprocité est supérieur à la mémoire du système et n'engendre de ce fait pas de lien.

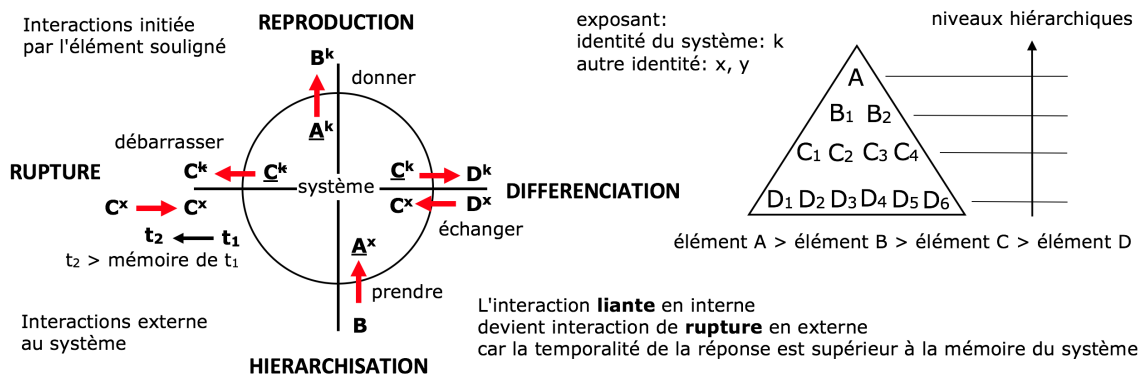


Figure 32: Typologie des interactions externe au système

I Similitude entre le modèle quantique de l'électron et le concept MICROGLOBAL

Le modèle quantique décrit l'état d'un système de particules au moyen de 4 nombres appelés nombres quantiques. Il en est de même dans le concept MICROGLOBAL qui caractérise les systèmes au moyen de 4 grandeurs liées au type d'interaction que le système entretient avec son environnement. Le schéma de la figure 33 présente ces similitudes qui seront développées dans la deuxième partie de cet essai. Les similitudes sont de deux ordres:

- Chaque nombre quantique peut être associé à un type d'interaction (phase) du concept MICROGLOBAL. Chaque phase représente une dimension de l'espace-temps et donc une valeur spécifique sur la dimension considérée. Nous considérons donc que chaque nombre quantique mobilise une dimension de l'espace-temps pour s'y inscrire, tel un bit d'information des nœuds de l'espace-temps. L'énergie s'inscrit sur une dimension, la forme des orbitales présentant toujours une symétrie s'inscrit en deux dimensions, la direction s'inscrit dans 3 dimensions spatiales et le spin dans la quatrième dimension temporelle.
- Les nombres quantiques dépendent les uns des autres, en cascade, partant de la valeur n de l'énergie de l'orbitale considérée vers l , puis vers ml et ms . Il en est de même dans le concept MICROGLOBAL comme nous le développons dans la suite de ce travail.

Nous parlerons dans la deuxième partie de cet essai de la structure de l'espace-temps que nous analyserons à travers une approche systémiques qui cherche les similitudes de l'approche quantique avec le principe d'exclusion de Pauli [23], pour proposer une réponse à la compréhension de l'intrication quantique et de la superposition des états. Nous considérerons que l'information, gravée dans les nœuds de l'espace-temps, remplit d'abord les couches inférieures, comme pour le remplissage des orbitales, ce qui fait émerger progressivement les dimensions de l'espace-temps. Nous comprendrons ainsi l'approche statistique de la mécanique quantique ainsi que le concept d'incertitude de Heisenberg.

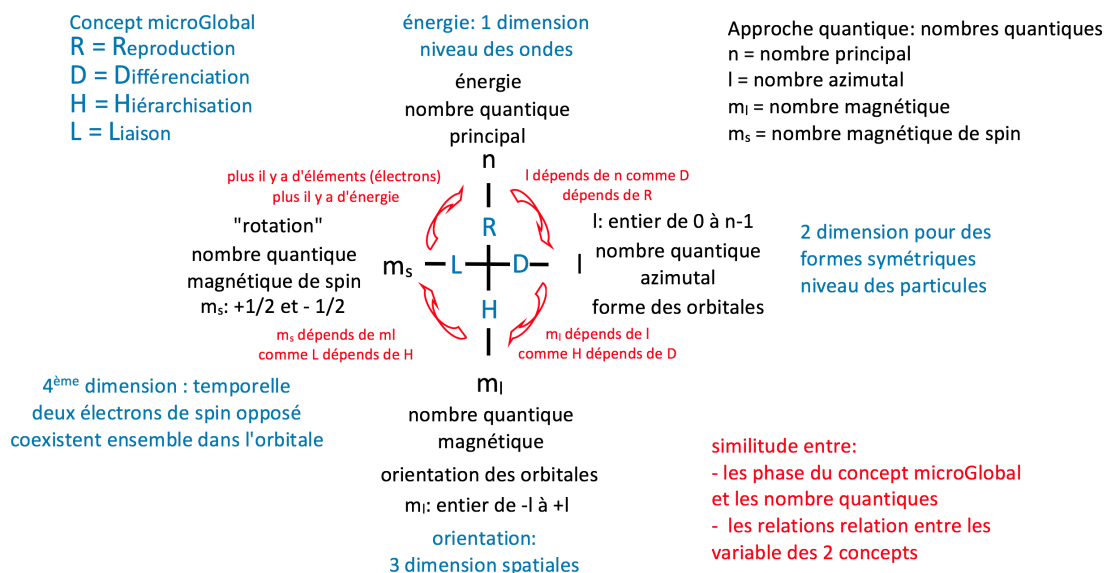


Figure 33: Correspondance entre le modèle quantique et le concept MICROGLOBAL.

J Relations entre capitaux actifs et passifs

La figure 34 est une vision globale de l'ensemble des boucles de rétroaction dans un système. Les flux construisent les capitaux et les capitaux produisent des flux dans des boucles récursives [32]. Ils produisent des flux en se dégradant comme c'est le cas lorsque le système consomme ses ressources, ou en activant un capital, comme c'est le cas lorsqu'une machine ou un employé exécute son travail. Le sens des flèches montre un système qui se complexifie. Si le sens est inversé, il caractérisera un système en décroissance. On visualise la réaction en chaîne qui complexifie le système ainsi que, avec les flèches inversées, une réaction en chaîne qui dégrade le système.

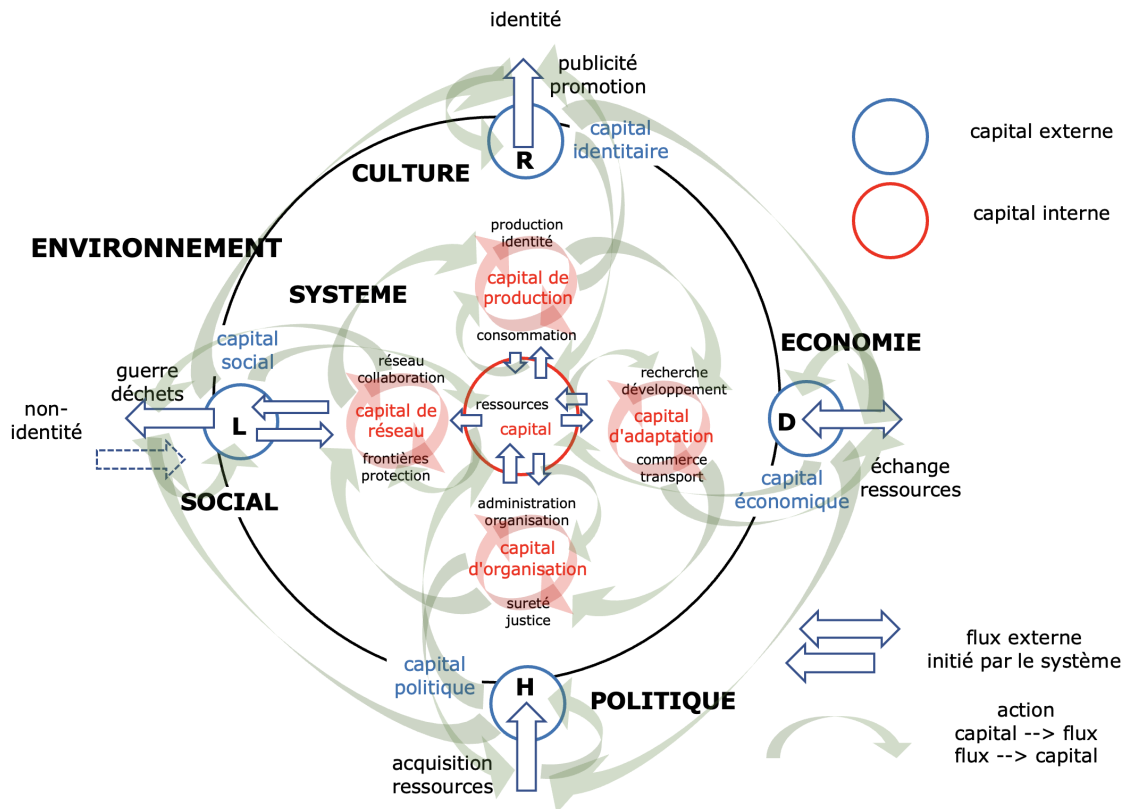


Figure 34: Exemple d'interaction entre les capitaux et les flux. Les flux interne et construisent le capital du système et sont à l'origine des flux externes entre le système et son environnement. Ces interactions constituent des boucle de rétroaction qui conduisent le système à se complexifier.

K Niveau physiques

La figure 35 est un schéma général de l'empilement des systèmes du niveau 0 au niveau 3.4, niveau qui correspond aux molécules. Ce schéma permet de visualiser la position des éléments sur les 4 pôles de l'approche MICROGLOBAL en fonction de leurs caractéristiques. Ce schéma sera explicité dans la seconde partie de cet essai, mais il permet de comprendre, à la lecture de cette première partie, l'aboutissement de la généralisation de la systémique aux niveaux fondamentaux à travers le model standard en physique des particules [22] et les particularité contre intuitive de la physique quantique. En effet, si la systémique est un outil puissant pour comprendre la dynamique des macrosystèmes, tels les systèmes biologiques et sociaux, alors, il paraît raisonnable de penser que les fondements de cette approche sont applicables aux systèmes plus simples tels les systèmes chimiques, physiques et informationnels.

Dans cette vision systémique fractale, nous émettons l'hypothèse que le coeur du monde est une logique mathématique que la nature a sélectionnée pour stabiliser le chaos que le vide rend instable. Par une réaction en chaîne, l'activité des 4 fonctions fondamentales fait émerger les spins, tel une mémoire primaire qui différencie du néant deux états distinct, le bit (-1/+1 ou 0/1). Les spins s'assemblent et définissent des noeuds, les briques élémentaire de l'espace-temps [40, 41]. Chaque boucles que forment les spins définissent une dimensions de l'espace-temps, de sorte que 4 boucles forment un tétraèdre qui représente un quanta de volume d'espace. La structure en tétraèdre des quantas d'espace-temps est une structure, comme une cellule (3D) ou une entreprise (4D), qui prends des formes variées et qui contient plus ou moins d'information (nombre quantique de spin plus ou moins grands). Cette structure a une dynamique interne de type R, D, H, L. L'information est d'abord stockée dans la boucle de la dimension 1, puis dans celle de la dimension 2 et enfin dans celle de la dimension 3, comme un vase qui se remplit progressivement ou comme un programme qui calcule ses variables pas à pas (portes logiques). L'identité de ces systèmes définit les interactions des niveaux supérieurs encodées dans les spins. Nous proposerons dans la deuxième partie de cet essai une description des dynamique de ces noeuds (dynamique des intercepteurs) semblable à la dynamique décrites dans cette essai pour les systèmes supérieurs.

Il est étonnant de constater que, comme pour les systèmes sociaux et biologiques, se sont les interactions entre des éléments de base, les spins de la gravité quantique, qui produisent les systèmes, les noeuds, qui tissent l'espace-temps. Nous retrouvons 4 caractéristiques fondamentales tout au long de la pyramide de la complexité, ce qui nous a amené à définir 4 fonctions fondamentales (R, D, H, L), correspondant à 4 fonctions mathématiques (portes logiques réversibles : CNOT, H, CCNOT, CSWAP) avec lesquels nous espérons comprendre et décrire la dynamique du monde.

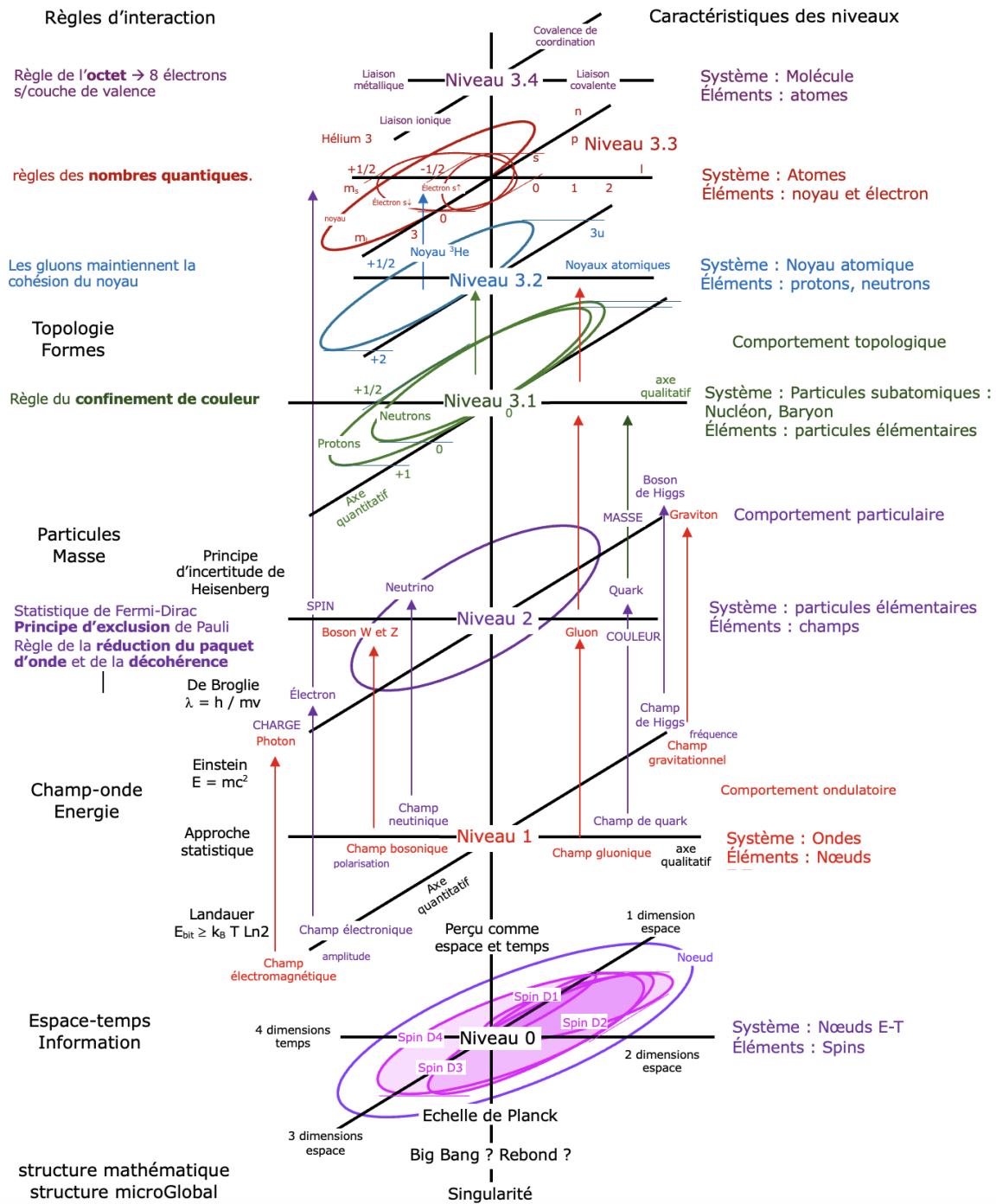


Figure 35: Représentation des systèmes physiques dans l'espace des phases. Le niveau de l'espace-temps N^0 qui encode les informations dans les spins de l'espace-temps. Le niveau ondulatoire N^1 d'où émerge l'énergie. Le niveau particulaire N^2 d'où émerge la masse. Et les niveaux topologiques $N^{3.1}$, $N^{3.2}$, $N^{3.3}$, et $N^{3.4}$, d'où émerge respectivement les nucléons et baryons, les noyaux atomiques, les atomes et les molécules.