



**HAL**  
open science

## Physique du constructivisme

Christophe Lecerf

► **To cite this version:**

| Christophe Lecerf. Physique du constructivisme. 2007. hal-00144721

**HAL Id: hal-00144721**

**<https://hal.science/hal-00144721>**

Preprint submitted on 10 May 2007

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Physique du constructivisme

Christophe Lecerf

LaISC-EPHE, 41 rue Gay Lussac 75005 Paris

Ecole des Mines d'Alès, Parc Georges Besse, 30035 Nîmes Cedex 1

Christophe.Lecerf@ema.fr

## Résumé

Le constructivisme des systèmes biologiques est présenté comme une conséquence logique de la thermodynamique et de la théorie de l'information. Pour aboutir à cette conclusion, nous établissons dans cet article les éléments fondateurs pour l'étude des phénomènes cognitifs dont : la valeur d'usage d'une action comme opératoire pour la survie, l'équivalence entre adaptation et construction automatique de représentations opératoires pour les organismes biologiques disposant des moyens de construire celles-ci, l'apprentissage par renforcement (appelé hebbien), et le caractère constructiviste du processus d'acquisition/modification des représentations. Partant de prémisses fournies par la thermodynamique et la théorie de l'information, nous les appliquons aux systèmes biologiques avec une analyse systémique et déduisons successivement les bases physiques du constructivisme.

## Abstract

Constructivism in biological systems appears as a consequence of thermodynamics and of the theory of information. In order to prove this assertion, we establish in this paper many steps founding the study of cognitive phenomenon: the usefulness of an action as an operational criterion for survival, the equivalence between adaptation and automatic construction of operational representations, learning by reinforcement (called hebbian), and constructivism in the process of acquiring/modifying representations. Starting with premises given by thermodynamics and theory of information, we apply them to biological systems with a systemic analysis, leading us to successively deduce the physical basis of constructivism.

Mots-clefs : systèmes biologiques, cognition, constructivisme, thermodynamique.

## Introduction

Nous établissons dans cet article, sans utiliser les paradigmes couramment associés aux domaines des neurosciences et de la psychologie cognitive, le constructivisme comme une conséquence logique de la thermodynamique et la théorie de l'information. Durant cette démonstration, nous établissons successivement des éléments fondateurs pour l'étude des phénomènes cognitifs :

- la double fermeture fonctionnelle des échanges et leur organisation en double boucle
- le comportement comme variable observable pertinente pour les systèmes biologiques
- la valeur d'usage d'une action comme opératoire pour la survie
- la répétition automatique des actions
- l'équivalence entre adaptation et construction de représentations opératoires pour les organismes biologiques disposant des moyens de construire celles-ci
- la création/modification permanente de représentations
- l'apprentissage par renforcement (appelé hebbien)
- le caractère constructiviste du processus d'adaptation.

Nous utilisons pour établir nos résultats l'analyse systémique avec distinction des aspects structure et fonction, ainsi que des résultats classiques dans le domaine de la physique et de la théorie de

l'information. Nous choisissons comme point d'observation les interfaces du système biologique, lequel forme avec son environnement un système global. En faisant la distinction entre les composantes structurelle et fonctionnelle des échanges, nous mettons en évidence le couplage fondamental, que nous appelons conjugaison, entre ces deux aspects. Le raisonnement repose sur la séquence des arguments à partir des prémisses.

Le chapitre 1 établira les concepts de comportement et de valeur d'usage par une analyse de la structure des échanges des systèmes biologiques. Le chapitre 2 établira, par une analyse de la dynamique des échanges, la contrainte dynamique de l'évolution qui pèse sur les SBC, puis la construction automatique de représentations opératoires de l'environnement, et enfin l'identité fondamentale entre adaptation et constructivisme. Le chapitre 3 détaille les rapports du processus d'adaptation biologique avec le temps.

### Chapitre 1. Analyse de la structure des systèmes biologiques

Dans ce chapitre, nous expliquons le cadre de l'analyse systémique et nous montrons le caractère général de la valeur d'usage pour les systèmes biologiques.

La caractérisation des structures utiles pour la démonstration sera de complexité croissante (c'est-à-dire que le nombre de contraintes sera progressivement accru), ce qui implique que les systèmes répondant à ces caractéristiques seront en nombre plus réduit, au moins en termes d'espèces biologiques. Tout système de niveau d'organisation plus contraint (plus complexe) respecte intégralement les règles décrites précédemment pour les systèmes moins contraints (moins complexes). Pour la bonne intelligibilité de notre propos, nous introduirons les concepts associés parallèlement au niveau d'organisation structurel concerné.

#### 1.1 Système Biologique, environnement et système global

A ce moment initial de l'analyse, nous désignons par le terme « système biologique », abrégé SB dans la suite, un système biologique abstrait, essentiel, réduit à ses propriétés les plus générales.

Un système biologique est une structure organisée, dotée de frontières ou limites, ainsi que de systèmes de production et de régulation internes qui assurent la permanence de la structure et de l'organisation fonctionnelle, c'est-à-dire des relations entre les éléments (autopoïèse de Varela 1979, et auto(-re)-production de Morin 1977). Ces systèmes de régulation et de régénération interne forment le métabolisme du SB. Un système biologique est capable, dans un environnement adéquat et grâce à ses échanges continus de matière avec son environnement, de maintenir durablement l'existence de sa structure alors même qu'elle est hors position d'équilibre thermodynamique (Prigogine 1977). L'existence du système biologique vivant, sa persistance dans le temps, correspond exactement à la « vie » de la structure du SB, à sa stabilité et à l'intégrité fonctionnelle de ses systèmes de production et de régulation internes. L'existence d'un SB dépend de ses échanges avec son environnement.

Un système biologique vivant existe toujours dans un environnement, échange toujours avec lui et forme avec lui un système global. L'environnement est supposé stable et pouvant suppléer durablement aux échanges du SB, de manière à assurer son existence durable au regard de sa propre échelle de temps. Les limites du SB, ses interfaces, sont le point d'observation privilégié que nous choisissons pour étudier le système global formé par le SB et son environnement.

Le comportement du SB dans son environnement est à la fois un observable significatif (pour un observateur extérieur) et une variable globale agrégée pertinente puisqu'en rapport direct avec la survie du SB (son existence durable à l'échelle de temps de son métabolisme).

Un SB est éventuellement doté de récepteurs captant des propriétés ou des événements survenant dans l'environnement extérieur à sa structure/frontière, et d'effecteurs agissant sur cet environnement. Pour l'objectif de la démonstration présente, il nous suffit d'observer ces propriétés élémentaires des systèmes biologiques sans nous intéresser à leur origine.

### 1.2 Système Biologique Pré-connaissant.

Pour la démonstration qui nous intéresse, le niveau de caractérisation qualitatif suivant est le Système Biologique Pré-connaissant (abrégé SBP).

Un système biologique pré-connaissant est un système biologique nettement plus complexe qu'un SB puisqu'il possède, en sus des récepteurs et effecteurs maintenant obligatoirement présents, un Système Nerveux Central (abrégé SNC). Le SNC désigne ici un organe générique de centralisation et de traitement des signaux ou perceptions (internes et externes au SB). Le SNC est aussi à l'origine de l'initiation des « comportements moteurs » tournés vers l'environnement, c'est-à-dire de la mise en action des effecteurs. Le SNC est le modulateur du comportement du SBP.

### 1.3 Comportement et valeur d'usage.

Le comportement du SBP dans son environnement conditionne son existence, sa survie.

Nous introduisons la « valeur d'usage » d'une action, définie par l'effet de cette action sur l'état interne du SBP qui l'a réalisée, soit globalement sur sa survie. Ainsi, sur une période de temps, le comportement d'un SBP reflète et/ou traduit son adaptation à son environnement, le critère d'adaptation étant la survie du SBP.

La valeur d'usage reflète la nature biologique du système, c'est-à-dire la seule finalité intrinsèque de ces systèmes : maintenir son organisation, sa structure, son fonctionnement, en un mot son existence. Par rapport à cette finalité intrinsèque aux SB qu'est la survie, la valeur d'usage est opératoire, elle peut être utilisée pour piloter le comportement. Par commodité de langage, on parlera de valeur d'usage positive quand l'effet de l'action sera favorable à la survie du système biologique.

### 1.4 Système Biologique Connaissant Cognitif

Le niveau de caractérisation qualitatif suivant dans les échelles de complexité d'organisation est le Système Biologique Connaissant Cognitif, abrégé SBC.

Un Système Biologique Connaissant Cognitif est un SBP doté d'un SNC potentiellement cognitif. Comme pour les SBP, le SNC est un organe de centralisation et de traitement des signaux ou perceptions internes et externes (cf. 2.1), il est à l'origine de l'initiation des comportements moteurs tournés vers l'environnement, et il est finalement le modulateur du comportement. Par rapport à celui d'un « simple » SBP, le SNC d'un SBC répond à des exigences structurelles beaucoup plus élevées : les caractéristiques anatomiques du SNC permettent notamment l'intégration de l'état interne du SB aux phénomènes cognitifs. Le détail de cette intégration est étudié plus bas (cf. 2.1.3).

Pour notre démonstration présente, il suffit de noter qu'un SNC est potentiellement cognitif si le néocortex a une taille relative suffisante pour que des structures en double boucle de type DFC (définies plus loin) puissent apparaître dans le SNC : il doit exister un potentiel de doubles chemins de fermeture fonctionnelle, à la fois internes au néocortex et indépendants des perceptions. La valeur d'usage d'une action existe pour un SBC comme pour les SBP, et elle est moins

biologiquement déterminée que pour ceux-ci, puisque le SNC est un réseau fonctionnellement moins contraint que les réseaux biochimiques ne le sont.

Dans ce premier chapitre, nous avons posé le cadre de notre analyse systémique et défini la valeur d'usage d'une action pour un SBC.

## Chapitre 2 Analyse des échanges des systèmes biologiques

Dans ce chapitre, nous montrons d'abord que les SBC sont contraints, du fait de leur nature, à évoluer vers un régime d'échange régulier. Puis, avec la théorie de l'information, nous montrons qu'un comportement stable correspond à une représentation opératoire stable, ce qui fonde le constructivisme des SBC.

Tel que nous l'avons défini, un système biologique est capable, dans un environnement adéquat et grâce à ses échanges continus de matière avec son environnement, de maintenir durablement l'existence de sa structure bien que celle-ci soit thermodynamiquement hors position d'équilibre. Pour les systèmes biologiques connaissant, nous précisons notre analyse en distinguant les aspects structurels et fonctionnels de ces échanges, et en remarquant leur conjugaison qui nous conduit au concept de double fermeture fonctionnelle, puis de dynamique fonctionnelle et au renforcement.

### 2.1- Analyse statique des échanges dans les systèmes biologiques

#### 2.1.1 Systèmes biologiques et échanges de matières.

Tout système biologique échange des matières avec son environnement. Ces échanges témoignent de la nature fondamentalement physico-chimique des systèmes biologiques. En général, il n'y a pas de modification de la matière (espèce chimique) lors de son entrée dans le SB (passage de la frontière), et l'effet biologique de cette matière sur le SB est figé (c'est une caractéristique de l'espèce du SB considéré).

L'ensemble formé par le SB et son environnement respecte le 2<sup>e</sup> principe de la thermodynamique. Les échanges de matières contribuent directement au maintien de la structure du SB et lui sont indispensables. Chacune des matières considérées peut avoir son cycle d'échange particulier (mesuré en termes de vitesse, fréquence, rythme).

#### 2.1.2 SBC, signaux et informations.

Nous considérons ici des SB dotés d'un SNC, de récepteurs et d'effecteurs. Au niveau des récepteurs, l'effet biologique de l'interaction fonctionnelle mise en jeu par l'échange est éventuellement pré-établi par l'organisation du SBC. En d'autres termes, la signification du signal est éventuellement pré-établie, et alors c'est une caractéristique de l'espèce du SBC considéré. Dans le cas où, pour le SB, la signification d'un événement de l'environnement n'est pas totalement pré-établie, nous utiliserons le terme « information » au lieu de signal. Nous dirons dans ce cas que la signification est seulement orientée par la structure interne du SBC (et ce sera une caractéristique d'espèce). Par simplification et abus de langage, nous désignerons ce phénomène d'échange d'information entrante « perception » de l'environnement par le SBC.

Les effecteurs sont aussi une caractéristique d'espèce. Un environnement dans lequel les effecteurs d'un SB ne produisent aucun effet perceptible par lui empêche l'apparition de la boucle action/réaction. Les capacités d'interaction du SBC avec son environnement sont dépendantes des

récepteurs et des effecteurs dont il est doté. Quand une action du SBC entraîne une modification de son environnement, nous appelons ce phénomène échange d'information sortante, ou « action ».

L'ensemble des perceptions et des actions d'un SBC forme ses échanges d'informations avec son environnement. Cette catégorie d'échanges est tributaire de l'existence d'un SNC. L'ensemble des actions dans le temps d'un SBC forme son comportement, observable à travers l'histoire des cycles miroirs action/réaction entre lui et son environnement.

### 2.1.3 La double fermeture fonctionnelle

L'analyse structurelle statique des échanges des systèmes biologiques restreints aux SBC conduit à remarquer qu'un SBC est un système par nature :

- i) à la fois ouvert sur son environnement
- ii) fermé sur lui-même par sa structure et son organisation régulée
- iii) et dont les actions sont bouclées sur elles-mêmes à travers son environnement.

i) Un SBC est ouvert sur l'environnement, et maintenu loin de l'équilibre thermodynamique spontané par des échanges de matière indispensables et permanents (la survie du SBC dépend directement de la poursuite de ses échanges de matière).

ii) Il est fonctionnellement, par constitution de son organisation, fermé sur lui-même puisque c'est un système biologique. Il s'agit là de la première fermeture fonctionnelle, dite interne. Elle est réalisée dans un SB notamment par les régulations du métabolisme, et concerne les échanges de matières. Dans le cas d'un SBC, une partie des fonctions de régulation du métabolisme sont assurées par le SNC, précisément par un sous-système, dit système nerveux autonome ou végétatif. Ce sous-système intègre l'état interne du système biologique et traduit vers le système nerveux les effets en retour du comportement sur l'état interne. Ces liaisons et intégrations sont indispensables pour l'établissement de la valeur d'usage d'une action et répondent à la conjugaison des composantes des échanges.

iii) Enfin ses actions, soit historiquement son comportement, sont bouclées sur elles-mêmes à travers son environnement. Il s'agit de la deuxième fermeture fonctionnelle, dite externe car prenant place via l'environnement du SBC. Les échanges visés par cette boucle de rétro-action sont essentiellement des informations.

Nous insistons pour faire remarquer que cette identification des circuits d'échanges répond à la distinction des composantes matérielles et fonctionnelles des échanges, laquelle n'a de sens que pour les systèmes biologiques connaissants. En effet, pour les systèmes biologiques sans SNC, seule la fermeture fonctionnelle interne existe, en regard des seuls échanges de matières.

Pour les SBC, dotés d'un SNC, les échanges comportent nécessairement une composante fonctionnelle d'informations, et le SNC ferme le circuit de la seconde fermeture fonctionnelle, laquelle porte essentiellement sur des échanges d'informations.

Plus précisément, le SNC est la structure où convergent les informations de la fermeture fonctionnelle externe, et celles issues du sous-système végétatif en rapport avec les échanges de matières formant la fermeture fonctionnelle interne. Pour les SBC les plus évolués, le SNC reçoit aussi les informations d'une nouvelle fermeture interne via la proprioception et la nociception, qui a la même échelle de temps de fonctionnement que le SNC. Le SNC est une structure d'intégration et de couplage des informations provenant de boucles de rétro-action conjuguant les natures matières et informations, avec les origines interne et externe au système biologique.



De ce constat sur l'organisation des échanges pour les SBC nous retenons comme schéma caractéristique et fondateur l'organisation des échanges en double boucle (l'une interne et l'autre externe) avec le SNC comme point commun entre les deux flux de matières/informations conjugués.

Nous désignons cette organisation des échanges en double boucle par le terme « double fermeture fonctionnelle », abrégé DFC. Le concept de double fermeture fonctionnelle a été proposé pour la première fois par nous en 1987 (Lecerf 1987).

Dans cette section sur l'analyse statique des échanges, nous avons établi la dualité de leur nature et le caractère général de leur organisation en double boucle.

## 2.2- Analyse dynamique des échanges et thermodynamique

Dans cette section, nous analysons les échanges du système biologique connaissant en distinguant les composantes structurelles et fonctionnelles des échanges. L'analyse détaillée de la situation d'équilibre révèle pour les SBC un équivalent à la thermodynamique physique nommé par nous dynamique fonctionnelle, laquelle est une conséquence de l'intrication des composantes matière et information des échanges d'un SBC avec son environnement.

### 2.2.1 La dynamique fonctionnelle.

L'analyse systémique des SBC amène logiquement à distinguer la composante structurelle des échanges, qui désigne les échanges de matières, de la composante fonctionnelle, laquelle recouvre les autres échanges propres aux SBC. Il apparaît que, du fait de la survie, les composantes structurelles et fonctionnelles des échanges d'un SBC sont fondamentalement intriquées, nous dirons conjuguées, au travers de la valeur d'usage. Cette conjugaison des composantes et la thermodynamique entraînent pour les SBC une contrainte dynamique d'évolution vers la stabilité des échanges, ce que nous appelons la dynamique fonctionnelle.

En effet, chaque échange de matière participe au maintien de la structure/matière du SBC, mais il est simultanément porteur d'une information fonctionnelle sur l'environnement à travers ses effets sur la survie et l'état interne. La poursuite et le maintien des échanges de matière, nécessaires pour l'auto-(re)production de l'organisation/structure du SBC, imposent simultanément le maintien des échanges fonctionnels dont est capable le SBC (dans la limite des contraintes de ses caractéristiques d'espèce). Puisque les échanges de matière sont in fine pilotés par les lois de la physique, l'évolution spontanée se fait normalement vers la stabilisation, c'est-à-dire l'équilibre au sens thermodynamique, et conduit donc simultanément à la stabilisation des échanges fonctionnels d'information.

A cause de la conjugaison des échanges vitaux de matière, obligatoires, et des échanges fonctionnels d'informations, il y a correspondance univoque puisque sont systématiquement et simultanément obtenus les deux effets, entre :

- i) l'évolution thermodynamique spontanée vers une situation stable d'équilibre dynamique des échanges matériels entre le système biologique ouvert et son environnement ;
- ii) et l'évolution convergente vers une situation d'équilibre dynamique des échanges fonctionnels, c'est-à-dire un cycle régulier d'actions/réactions.

La dynamique fonctionnelle est ainsi définie comme l'évolution spontanée du comportement des SBC vers une situation d'équilibre dynamique des échanges fonctionnels. La dynamique

fonctionnelle est le pendant fonctionnel, pour les systèmes biologiques connaissant, de la thermodynamique pour les réactions physico-chimiques.

En d'autres termes, l'état stable de la dynamique des échanges est la conséquence de la nature physico-chimique de la structure qui constitue le support des systèmes biologiques.

En vue d'établir cette équivalence, il nous faut d'abord insister sur la nécessité de l'existence de structures physiologiques pour remplir la fonction d'intégration des signaux internes témoignant de l'état interne physique du SBC, intégration indispensable pour piloter globalement, c'est-à-dire de manière fonctionnelle, adaptative, le comportement à travers les valeurs d'usage. Chez les primates au moins, ces structures anatomo-physiologiques désignent précisément la présence d'un archéo- et d'un paléo-cortex, de toutes les voies de proprioception et de nociception, ainsi que des liaisons avec le néocortex.

Du fait de son organisation régulée et de la valeur d'usage associée à une action, il est évident que, face à un environnement stable dans ses composantes matière (structure) et information (fonction), le comportement spontané du SBC converge nécessairement sur les actions compatibles avec le maintien des échanges vitaux. Le comportement régulier du SBC reflète un équilibre dynamique établi dans le régime d'échanges avec l'environnement.

Examinons la question a contrario de l'évolution d'un SBC face à un environnement instable afin de vérifier l'implication entre les deux processus pour un système biologique cognitif. Nous déduisons logiquement la définition d'un environnement instable comme un environnement dont les propriétés ne permettent pas, durant la période d'existence du SBC, l'établissement d'un régime d'échange régulier. Autrement dit, dans un environnement instable, l'équilibre dynamique entre le SBC et son environnement n'est jamais observé au niveau de ses interfaces.

Il n'y a ainsi qu'une alternative à considérer : l'absence d'équilibre porte principalement soit sur les échanges structurels, soit sur les échanges fonctionnels. Dans le premier cas, si l'environnement ne permet pas les échanges de matières réguliers nécessaires à la survie du SBC, celui-ci finit par disparaître et, parce qu'il n'y a plus d'échanges du tout, il y a bien implication de l'absence de stabilité « matière » vers l'absence de stabilité « SBC ».

Dans l'autre branche de l'alternative, il faudrait imaginer le découplage entre les composantes structurelles et fonctionnelles dans l'environnement. Or physiquement, le découplage entre les composantes est impossible puisqu'il faudrait réaliser des échanges de matières sans effet sur l'état interne du SB (contradiction avec nos hypothèses sur la structure des systèmes biologiques). L'absence d'équilibre dans les échanges fonctionnels revient à une absence d'équilibre dans les échanges de matières, et comme précédemment, il y a bien implication de l'absence de stabilité « matière » vers l'absence de stabilité « SBC ».

Enfin, pour établir formellement cette équivalence, il faut considérer l'implication dans l'autre sens, soit symétriquement les cas où, au lieu d'observer les réactions du SBC face à son environnement, on observe les réactions de l'environnement face aux actions du SBC. En pratique cela revient à centrer l'observation sur les perceptions du SBC et les « actions » de l'environnement plutôt que sur le comportement du SBC face à son environnement.

Par définition, l'environnement est supposé présenter au SBC des corrélations stables à son échelle de temps, c'est-à-dire des transformations fidèles et régulières de ses actions. En conséquence, une situation d'équilibre dynamique des échanges fonctionnels implique naturellement un équilibre



dynamique stable des échanges de matières. Et pour la même raison, un déséquilibre dynamique des échanges fonctionnels implique un déséquilibre dynamique des échanges de matières.

En conclusion, du fait de cette concordance des états obtenus, il y a bien équivalence entre l'évolution thermodynamique spontanée vers un équilibre stable et l'évolution convergente vers une situation d'équilibre dynamique des échanges fonctionnels d'un SBC. La stabilité « matière » correspond à une stabilité « action » opératoire pour le SBC puisqu'elle permet sa survie.

Le SBC et son environnement sont couplés l'un à l'autre durant l'existence du SBC. Le régime de la dynamique des échanges reflète de manière univoque l'état de ce couplage opératoire : un équilibre dynamique témoigne du couplage, l'absence d'équilibre dynamique témoigne de l'absence de couplage.

Pour les SBC, la contrainte dynamique liée à cette concordance entre les évolutions des échanges de matières pilotés par la thermodynamique d'une part, et des échanges d'informations fonctionnels d'autre part, peut être résumée sous une forme qui rappelle fortement les idées darwiniennes : « s'adapter ou disparaître ». Rappelons avec insistance que nous n'essayons pas d'établir cette assertion dans le domaine de l'évolution des espèces qui n'est pas notre objet. Le parallèle est toutefois suffisant pour mériter d'être signalé.

Selon la dynamique fonctionnelle, pour un SBC l'évolution du comportement vers la stabilité est le pendant fonctionnel de l'évolution thermodynamique spontanée. En d'autres termes, la répétition d'un comportement favorable à la survie, c'est-à-dire dont la valeur d'usage est positive pour le système biologique, est la règle pour un SBC. Répéter une action est le comportement induit par la nature physico-chimique des échanges, ce que nous avons explicité ici par déductions logiques successives. Nous verrons plus loin que (cf 2.2.2), si des mécanismes d'apprentissage existent de plus dans le SNC, cette répétition naturelle, automatique, conduit au renforcement du comportement.

Ainsi les systèmes biologiques connaissant sont contraints, du fait de leur nature, à évoluer vers un régime d'échange régulier. Dans les SBC, les vecteurs de cette contrainte sont l'organisation des échanges en double fermeture fonctionnelle, et la conjugaison des composantes matérielles et fonctionnelles des échanges. Tout sous-système appartenant au SBC qui présente les mêmes caractéristiques dans ses échanges est exposé à la même contrainte et évolue spontanément vers un régime d'échange dynamique stable.

### 2.2.2 Dynamique fonctionnelle, répétition et renforcement.

La section précédente a établi, à partir de la conjugaison entre structure/matière et fonction/information, que la contrainte dynamique d'adaptation entraîne la régularité du comportement. En effet selon notre analyse, l'équivalent informatif du 2<sup>e</sup> principe thermodynamique, que nous avons appelé la dynamique fonctionnelle, émerge au niveau des comportements d'un SBC sous la forme de la répétition des actions à valeur d'usage positive. La double fermeture fonctionnelle et la conjugaison des échanges sont les vecteurs de la propagation de la contrainte dynamique dans tout le SNC. L'interprétation hédoniste trouve ici une fondation, une causalité ancrée dans un domaine scientifique validé par l'expérience.

Quand il existe dans les structures formant le SNC une boucle locale de rétro-action, et quand celle-ci laisse une trace physique durable de sa mise en action, cette boucle réalise un mécanisme d'apprentissage. Par conséquent, si un mécanisme d'apprentissage existe dans le SNC, la répétition

d'une action modulée par le SNC renforce ce comportement. La « loi » proposée par Hebb se révèle ainsi être une vision agrégée de deux phénomènes indépendants : d'une part la dynamique fonctionnelle, pendant fonctionnel de la thermodynamique dans les SBC, et d'autre part l'existence dans le SNC d'un mécanisme d'apprentissage.

Selon notre analyse, le principe de renforcement est un phénomène émergent dans un système biologique cognitif quand il existe dans le SNC un mécanisme d'apprentissage.

### 2.2.3 Théorie de l'information et échanges dans les systèmes biologiques connaissant

Dans cette section, en nous plaçant au niveau des observables, définis plus haut comme le comportement du SBC face à son environnement, et munis de la dynamique fonctionnelle, nous mettons en lumière la signification en termes d'information de l'équilibre des échanges pour un SBC.

L'analyse s'appuie sur la situation d'équilibre dynamiquement contrainte, et sur les variations par rapport à cet équilibre pour établir :

- i) que la construction des représentations opératoires est automatique et nécessaire dans un SBC ;
- ii) que l'adaptation est le passage d'une représentation construite à une autre représentation construite.

Premier point : la construction automatique des représentations opératoires.

Un SBC en situation d'équilibre stationnaire, c'est-à-dire en régime d'échange régulier et permanent (quelle que soit la forme de la dynamique du régime d'échange), réalise exactement une prévision à chaque instant, du point de vue du SBC, du prochain événement qui sera perçu de l'environnement. L'assertion symétrique établie du point de vue de l'environnement est vraie aussi.

Selon la théorie de l'information, cette prévision est donc assimilable à une énergie/entropie, précisément une néguentropie. L'équilibre dynamique correspond à une entropie statistique nulle, c'est-à-dire une incertitude nulle selon la théorie de Shannon, face à laquelle le SBC maintient inchangée sa structure car, mais aussi puisque, elle est le support physique de cet équilibre des échanges.

A l'équilibre, c'est-à-dire en situation d'adaptation entre le SBC et son environnement, le SBC réagit à l'entropie statistique nulle des échanges par l'absence de modification de la structure du SNC, ce à quoi correspond « zéro création » d'information dans le SNC.

En d'autres termes : environnement et SBC sont des images fonctionnelles l'un de l'autre, au moins dans les limites des caractéristiques d'espèce qui fixent les relations entre le SBC et son environnement. Nous rappelons que, selon la dynamique fonctionnelle, le comportement d'un SBC converge spontanément vers cet état d'équilibre dynamique.

Deuxième point : l'adaptation comme passage d'une représentation construite à une autre représentation construite.

La séquence détaillée des étapes de l'analyse suffit pour justifier ses conclusions. L'analyse suppose un circuit DFC établi, autrement dit un SBC, doté d'un SNC et de récepteurs/effecteurs permettant l'existence d'une double fermeture fonctionnelle interne et externe avec le SNC comme structure commune.

Etape 1- Le régime d'échanges stabilisé des échanges matériels et fonctionnels entre un SBC et son environnement signifie que, pour chacun des échanges successifs, il y a une incertitude nulle à chaque instant sur le prochain échange fonctionnel. Il n'y a donc pas de réduction d'entropie, c'est-à-dire pas d'information différente ou nouvelle. On observe un état dynamique d'échanges stable/régulier qui permet d'inférer une organisation biologique stable du SBC dans le cadre de ses propres mécanismes de régulation.

Etape 2- Durant le cycle régulier répété des actions/réactions du SBC et de son environnement, l'environnement (via sa structure propre) et le SBC (via sa structure et son SNC) présentent chacun une image fonctionnelle opératoire de l'autre qui à la fois induit et témoigne de la régularité des échanges. Les propriétés de cette image fonctionnelle dépendent directement des capacités d'interaction du SBC (perception et action), lesquelles sont biologiquement fixées (caractéristiques d'espèce).

Etape 3- A contrario, une perturbation des échanges est une rupture de l'équilibre, ce qui signe l'apparition d'une information au sens de Shannon : l'entropie statistique est non nulle car elle est différente de la prédiction faite par le SBC. Ou bien, symétriquement, de la « prédiction » faite par l'environnement de la réaction du SBC.

Etape 4- Cette rupture d'équilibre provoque l'activation/sélection d'une autre voie de fermeture fonctionnelle interne dans le SBC, différente de celle en vigueur pendant la période d'équilibre précédente. Il y a donc modification de la structure et de l'organisation du SBC, ce que nous appelons création d'information dans le SBC par symétrie avec la situation d'équilibre.

Etape 5- Selon la dynamique fonctionnelle, le SBC converge spontanément vers le retour à un état d'équilibre dynamique.

Etape 6- Le retour à l'équilibre de la dynamique des échanges signe une adaptation, c'est-à-dire un échange fonctionnel réussi, entre le système biologique connaissant et son environnement. Cette adaptation du SBC est réalisée au travers d'une modification de sa structure afin qu'elle devienne le support du nouvel équilibre. Il a été établi plus haut (cf. 2.2.1) que l'absence durable de retour à l'équilibre, ou non-adaptation, signifie à terme la disparition du SBC, c'est-à-dire la fin de l'existence de sa structure.

L'adaptation, contrainte résultant de la dynamique fonctionnelle, marque le passage d'un équilibre dynamique à un autre. Elle est aussi, en termes d'information, le passage d'une représentation opératoire de l'environnement à une autre.

Dans la confrontation du SBC avec son environnement, la symétrie et l'équilibre qui sont suggérés en fixant l'observation aux limites du SBC n'impliquent pas que les capacités d'adaptation soient elles-mêmes également réparties entre les protagonistes. Le plus souvent, l'environnement est doté d'une structure physique rigide dont le SBC peut, grâce à sa plasticité interne, et notamment celle de son SNC, construire une image fonctionnelle opératoire qui contribue à sa survie. Le résultat de l'adaptation est bien un couple d'images fonctionnelles opératoires comme indiqué à l'étape 2, conséquence d'échanges symétriques, mais l'essentiel du travail d'adaptation est réalisé du côté du SBC. En général, c'est le SBC qui s'adapte à son environnement, et c'est dans le SBC que sont construites les représentations opératoires, car tout le potentiel d'adaptation du système global considéré réside dans le SNC du sous-système SBC. Une exception évidente à ce cas de figure est constituée par les systèmes sociaux où l'on peut observer une co-construction qui reflète la répartition du potentiel d'adaptation entre le SBC et son environnement. Notons qu'aucune hypothèse sur la répartition du potentiel d'adaptation dans le système global n'est nécessaire à l'analyse.

Résumons ces résultats nouvellement établis, essentiels pour les sciences cognitives car ils donnent un fondement et une rationalité physique à la construction de représentations ultimement rattachées à la valeur d'usage opératoire pour la survie.

- A l'équilibre, la structure et la dynamique des échanges dans le SNC forment une représentation historiquement construite par l'entité de son environnement, précisément une image dynamique et opératoire de l'environnement qui sous-tend le comportement stabilisé de l'entité. Notons qu'aucune hypothèse sur un éventuel mécanisme d'apprentissage n'est nécessaire.
- Le retour à l'équilibre de la dynamique des échanges signe une adaptation, soit le passage d'un équilibre dynamique des échanges à un autre équilibre dynamique, autrement dit le passage d'une représentation construite à une autre représentation construite. Notons encore qu'aucune hypothèse sur un éventuel mécanisme d'apprentissage n'est nécessaire.
- Le processus d'adaptation d'un SBC à son environnement recouvre un processus équivalent de construction de représentations opératoires de l'environnement. Adaptation et utilisation d'informations sont deux facettes d'un même processus dynamique. La non-adaptation équivaut à la disparition du SBC. L'état de l'équilibre dynamique des échanges est à la fois le témoin de l'adaptation et de la construction de représentations.

#### 2.2.4 Adaptation et constructivisme.

Nous avons établi dans les sections précédentes la nécessité physique du processus d'adaptation continu des SBC à leur environnement par construction de représentations opératoires.

Ce processus recouvre exactement le « constructivisme » défendu par J. Piaget : les représentations sont construites sous l'influence historicisée de pré-orientations biologiques et de l'expérience de l'individu engagé dans un cycle d'actions/réactions avec son environnement. Le constructivisme adaptatif reçoit ici son fondement, ancré dans la physique et la théorie de l'information.

Dans notre perspective, les phénomènes cognitifs, que nous résumons grossièrement par les opérations revenant à capter/traiter/stocker/manipuler des représentations, apparaissent comme une capacité fonctionnelle d'adaptation dont la particularité est d'avoir le SNC comme support. L'extension et la diversification des opérations possibles sur les représentations construites correspondent alors au développement d'une capacité d'adaptation. La part que peut prendre dans ce développement l'accroissement relatif du volume du néocortex, tel qu'observé chez les primates, est évidente tant cet accroissement contribue à augmenter le potentiel de chemins DFC. En d'autres termes, la cognition est une propriété fonctionnelle d'adaptation qui bénéficie des propriétés de son support particulier, le SNC, et devient donc très efficace quand le SNC intègre des mécanismes d'apprentissage et augmente son potentiel cognitif.

La création des représentations est spontanée, automatique, permanente, tout comme l'est le mécanisme d'adaptation à l'environnement car elle en est une forme de réalisation propre aux SBC. Quand le SNC intègre un mécanisme d'apprentissage (il existe une boucle locale de rétro-action laissant une trace physique durable), les représentations construites peuvent être durablement acquises.

Plus précisément, chaque adaptation conduit à sélectionner dans le SNC une représentation construite de la valeur d'usage de l'action pour le SBC. En effet, la représentation intègre à la fois

l'histoire de l'action et son effet en retour sur le SBC. En tant que représentations, les valeurs d'usage peuvent aussi être durablement acquises.

La valeur d'usage d'une action ou d'un comportement, son « sens » pour le SBC, est pré-orientée par la fonction de l'organisation biologique (fermeture fonctionnelle) interne (caractéristique d'espèce), modulée par l'histoire de l'individu. L'organisation et la structure biologique du SBC donne une correspondance fixe/permanente entre actions et perceptions internes (fermeture fonctionnelle interne au SB) à l'échelle de temps de l'apprentissage.

Les changements biologiques structurels importants pendant le développement du SBC ne constituent pas un obstacle si les échelles de temps des fonctions « transport d'information », laquelle supporte le comportement à chaque instant, et « adaptation » (apprentissage) sont très petites devant celle de l'évolution de la structure (la maturation psychomotrice s'étend chez l'homme sur des années). Notre analyse suppose seulement que, pour les fonctions en rapport avec la valeur d'usage, et à leur échelle de temps, l'organisation et la structure biologique du SBC doivent donner une correspondance fixe entre actions et perceptions internes suffisamment longue pour permettre leur mémorisation dans la structure du SNC.

L'individuation de chacun se fait par sélection épigénétique dans le SNC en fonction des interactions avec l'environnement, et précise la valeur d'usage de chaque action, évidemment dans le cadre de la pré-orientation liée aux caractéristiques d'espèce.

Du fait de la valeur d'usage, l'interaction avec l'environnement sélectionne la réponse/représentation adéquate parmi les multiples chemins DFC potentiels offerts par le SNC, puis stabilise cette réponse par répétition à cause de l'apprentissage par renforcement. En d'autres termes, quelle que soit la variabilité offerte par le SNC, il y a sélection épigénétique d'un comportement adapté, c'est-à-dire évalué comme tel par l'individu à ce moment-là de son histoire et dans le contexte précis du moment.

#### 2.2.5 Constructivisme et causalité

Il a été établi plus haut qu'un comportement adapté est une prédiction de la prochaine perception/action dans le cycle des échanges. Un comportement adapté témoigne d'un couplage opératoire entre les prédictions du SBC et les réactions de son environnement.

Précisément, à travers ses représentations construites, un SBC projette littéralement sa « causalité interne » sur ses perceptions, internes ou externes, car cette causalité interne est le moyen des prédictions qu'il réalise. En effet, la causalité interne au SBC, quel qu'en soit le support physique, établit une relation constante et nécessaire entre perceptions et actions. De son côté, l'environnement fournit en réaction des événements qui provoquent ces perceptions. Et puisqu'il s'agit d'un comportement adapté, le tout se déroule dans un cycle régulier. L'adaptation garantit donc le couplage entre des causalités de nature fort différentes, l'une propre au SBC, l'autre à l'environnement.

Les représentations construites intègrent une causalité fonctionnelle, propre au SBC, dont la valeur d'usage est fixée par l'adéquation, c'est-à-dire l'efficacité de sa capacité de prédiction, à la causalité du phénomène considéré.

Chaque SBC construit un modèle de ses perceptions, et les caractéristiques d'espèce induisent, à cause de la communauté des perceptions et des pré-orientations liées aux structures fonctionnelles biologiques, une communauté de modèles de représentations entre les individus de la même espèce.



A contrario, l'apparition d'une variation des caractéristiques biologiques peut induire la séparation des deux populations concernées si elle diminue leur adaptabilité l'une à l'autre.

L'emploi de l'expression « projeter sa causalité » est intentionnel pour marquer que, ici, le sens du mot constructivisme couvre aussi l'acception proposée par l'école de Palo Alto (Watzlawick 1985). En effet, aucune hypothèse n'a été requise sur la nature de l'environnement, qui peut donc être aussi bien « physique » rigide, et correspondre alors à la période de maturation précoce et à l'acception piagetienne, que « social » adaptable, et correspondre alors à la période de socialisation ultérieure de l'individu et à l'acception sociologique.

Les SBC sont nécessairement constructivistes dans leur processus d'adaptation opératoire à leur environnement. L'adaptation d'un SBC à son environnement témoigne de l'efficacité des prédictions qu'il projette sur son environnement.

Dans ce chapitre sur l'analyse dynamique des échanges, nous avons successivement établi la contrainte dynamique de l'évolution qui pèse sur les SBC, puis la construction automatique de représentations opératoires de l'environnement, puis l'identité fondamentale entre adaptation et constructivisme.

### Chapitre 3. Le temps dans les SBC

#### 3.1 L'irréversibilité des événements biologiques.

La modification physique structurelle liée à l'apprentissage d'une cellule, ou d'une structure nerveuse, ou du SNC a un coût énergétique qui est toujours exactement celui du maintien de la structure du SBC. En effet, puisqu'il est vivant, le SBC réalise en permanence l'adaptation de sa propre organisation aux changements que celle-ci subit, quelles qu'en soient les causes. Autrement dit, le coût énergétique physique du fonctionnement du SBC est indépendant de son action de construction de représentations, et du point de vue thermodynamique, il n'y a pas d'irréversibilité spécifique au traitement des informations. Vivre, s'adapter, apprendre, sont des activités indissociables qui ont le coût « normal » de l'efficacité énergétique globale du SBC.

Du point de vue fonctionnel dans le SBC, la dynamique propre du système biologique (cycle de la cellule, du système, des interconnexions, etc...) peut rendre les modifications structurelles liées à l'apprentissage irréversibles : par exemple, à cause du mécanisme d'épigénèse, une connexion non renforcée est, en pratique, définitivement perdue. Et cette disparition d'un chemin potentiel de fermeture fonctionnelle a une incidence sur l'évolution ultérieure de tout le SNC.

Il y a donc bien irréversibilité des événements biologiques, mais pour des raisons biologiques et aux échelles de temps biologiques, et pas pour des raisons thermodynamiques.

#### 3.2 Les échelles de temps des fonctions biologiques.

La structure et l'organisation des échanges en double fermeture fonctionnelle (DFC) mises en évidence plus haut illustrent clairement l'intrication et la dualité des fonctions supportées par une structure biologique.

Pour un SBC observé au niveau le plus général, chaque instant est l'occasion d'un échange qui conjugue des aspects structurels et fonctionnels. A un niveau plus détaillé dans l'organisation en double fermeture fonctionnelle, le SNC est simultanément et en permanence le support d'un traitement d'information (transport, transformation) entre récepteurs et effecteurs, et le support



d'une modification structurelle interne en rapport avec l'adaptation. Enfin, le SNC est le support de l'adaptation à l'environnement, mais aussi le support de l'adaptation au développement de la structure biologique du SBC, que ce soit le SNC lui-même ou le SB dont il fait partie. Chacune de ces fonctions est caractérisée par une échelle de temps propre.

Chacune des fonctions biologiques est caractérisée par son échelle de temps, et cette différence est nécessaire pour permettre qu'une structure unique puisse être le siège de plusieurs fonctions distinctes. Dans une structure physique qui est le siège de plusieurs fonctions, les mécanismes de régulation en jeu pour chacune des fonctions jouent sur des échelles de temps différentes, en rapport avec la fonction à laquelle ils participent. L'unicité de lieu peut permettre des interactions entre les mécanismes ou fonctions.

### Conclusions.

Nous présentons un résumé synthétique des résultats importants établis successivement dans cet article. Il est rappelé que les bases scientifiques qui conduisent à ces résultats sont la thermodynamique et la théorie de l'information, appliquées aux systèmes biologiques avec une analyse systémique.

Ont été successivement établis :

1. Sur une période de temps à l'échelle du SBC, le comportement d'un SBC reflète et traduit son adaptation à son environnement, le critère d'adaptation étant la survie du SBC. Le comportement d'un SBC est à la fois un observable pour un observateur et une variable agrégée pertinente pour le SBC.
2. La dynamique fonctionnelle qui affirme que, pour un SBC, il y a correspondance univoque entre :
  - i) d'une part l'évolution thermodynamique spontanée vers une situation stable d'équilibre dynamique des échanges matériels entre le système SB ouvert et son environnement ;
  - ii) et d'autre part l'évolution convergente vers une situation d'équilibre dynamique des échanges fonctionnels, c'est-à-dire un cycle régulier d'actions/réactions.
3. Le SBC et son environnement sont couplés l'un à l'autre durant l'existence du SBC. La dynamique des échanges témoigne de manière univoque de ce couplage.
4. La valeur d'usage d'une action est opératoire, elle peut être utilisée pour piloter le comportement. Elle reflète la nature biologique du système.
5. Selon la dynamique fonctionnelle, l'évolution du comportement vers la stabilité est le pendant fonctionnel de l'évolution thermodynamique spontanée. La répétition d'un comportement favorable à la survie est la règle pour un SBC.
6. Le principe de renforcement hebbien est un phénomène émergent dans un système biologique cognitif consécutif à la dynamique fonctionnelle quand il existe dans le SNC un mécanisme d'apprentissage.
7. Pour un SBC à l'équilibre, la structure et la dynamique des échanges dans le SNC forment une représentation historiquement construite de son environnement, précisément une image dynamique fonctionnelle et opératoire qui sous-tend son comportement stabilisé.
8. Une rupture de l'équilibre signe l'apparition d'une information au sens de Shannon : l'entropie statistique est alors non nulle car elle est différente de la prédiction faite par le SBC de la réaction de l'environnement. L'assertion symétrique est vraie aussi.
9. Le retour à l'équilibre de la dynamique des échanges après une perturbation signe une adaptation, soit le passage d'un équilibre dynamique des échanges à un autre équilibre dynamique, autrement dit le passage d'une représentation construite à une autre représentation construite.

10. Le processus d'adaptation d'un SBC à son environnement décrit un processus équivalent de construction de représentations de l'environnement. Adaptation et utilisation d'informations fonctionnelles sont deux facettes d'un même phénomène. La non-adaptation équivaut à la disparition du SBC. La construction de représentations est un processus dynamique, ultimement fondé sur la thermodynamique, qui résulte de la conjugaison des échanges structurels et fonctionnels et de leur organisation en double fermeture fonctionnelle.
11. La création des représentations est spontanée, automatique, permanente, tout comme l'est le mécanisme d'adaptation à l'environnement. Quand le SNC dispose d'un mécanisme d'apprentissage, les représentations construites peuvent être durablement acquises.
12. L'adaptation produit à la fois une représentation construite et sa valeur d'usage pour le SBC : en effet, la représentation intègre à la fois l'histoire de l'action et son effet en retour sur le SBC. Quand le SNC dispose d'un mécanisme d'apprentissage, comme les représentations, les représentations opératoires avec valeur d'usage peuvent être durablement acquises.
13. Du fait de la valeur d'usage, le SBC sélectionne via ses interactions avec l'environnement, puis stabilise par répétition à cause de l'apprentissage par renforcement, la représentation adéquate parmi les multiples chemins DFC potentiels offerts par le SNC. En d'autres termes, quelle que soit la variabilité offerte par le système physique, il y a sélection épigénétique d'un comportement adapté, c'est-à-dire évalué comme tel par l'individu à ce moment-là de son histoire.
14. Les SBC sont nécessairement constructivistes dans leur processus d'adaptation à leur environnement. Un SBC construit des représentations opératoires et projette sa causalité interne sur ses perceptions, internes ou externes. L'adéquation de la causalité projetée est mesurée par la validité des prédictions et inscrite dans la valeur d'usage associée. L'adaptation garantit le couplage des causalités entre celle du SBC et celle de son environnement.

Enfin, nous insistons sur l'absence d'hypothèse tant sur la nature du SNC que sur ses mécanismes pour établir nos résultats. La définition du SNC comme « un organe de centralisation et de traitement d'informations » est générique, tout comme l'est celle du mécanisme d'apprentissage. Nos conclusions sont donc générales, et notamment applicables à des systèmes artificiels qui seraient dotés des propriétés adéquates, ou à d'autres systèmes biologiques que le système nerveux central.

#### Bibliographie :

- Bertalanffy, L. von., "An Outline of General Systems Theory" *Philosophy of Science*, Vol. 1, No. 2, 1950
- Bertalanffy, L. von, "General system theory - A Critical Review", *General Systems* 7, 1-20, 1962
- Hebb, D., *Psychophysiologie du comportement*, PUF, Paris 1958, et *The organization of Behaviour* Wiley, NYC, 1949
- Lecerf C., *Contribution à la modélisation des réseaux neuronaux et à l'apprentissage automatique*. Thèse de doctorat en informatique. Université Paris8 Vincennes Saint-Denis, 1987
- Morin, E., *La nature de la nature (la Méthode tome 1)*, Seuil, 1977, Nouvelle édition, coll. Points, 1981
- Nicolis, G., & Prigogine, I., *Self-organization in non-equilibrium systems*, Wiley-Intersciences, 1977
- Thomas R., & D'Ari R., *Biological Feedback*, CRC Press, Boca Raton Florida, 1990
- Varela, F.J., *Principles of Biological Autonomy*, New York, Elsevier North Holland, 1979
- Varela, F.J., & Thompson, E., Rosch, E., *The embodied mind*, MIT Press, Cambridge MA, 1991
- Watzlawick, P. *L'invention de la réalité*, Seuil, 1985.