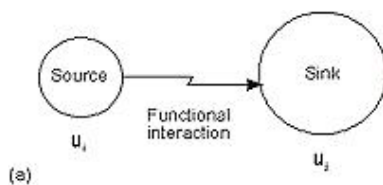


<https://www.ameSSI.org/qu-est-ce-que-la-biologie-integrative>



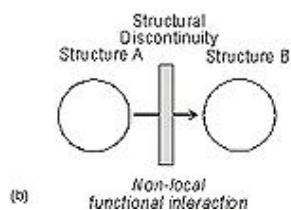
Qu'est-ce-que la Biologie Intégrative

- SCIENCES-RECHERCHES SCIENTIFIQUES



Date de mise en ligne : mercredi 1er avril 2015

Date de parution : 1 av. J.C.



Copyright © AMESSI.Org® Alternatives Médecines Évolutives Santé et

Sciences Innovantes ® - Tous droits réservés

La biologie intégrative est une nouvelle science, dont le développement pose des difficultés théoriques difficiles et spécifiques issues des mathématiques, de la physique et de la biologie. Elle concerne la description intégrée des multiples phénomènes intervenant dans les divers niveaux des organisations structurale et fonctionnelle hiérarchiques du vivant (emboîtement de poupées russes).

Elle requiert donc un formalisme mathématique spécifique nouveau, capable de traverser les niveaux d'organisation.

Sommaire

- [Pourquoi la biologie intégrative](#)
- [Quelles données caractérisent ces mécanismes ?](#)
- [La biologie intégrative est une nouvelle science, dont le développement pose des difficultés théoriques difficiles et spécifiques issues des mathématiques, de la physique et de la biologie.](#)
- [Transports d'ions à travers la membrane](#)
- [La complexité d'un organisme provient de cette construction « intégrée » d'une multitude de mécanismes.](#)
- [La question posée est de savoir comment atteindre ces objectifs...](#)
- [Pour intégrer, peut-on faire autrement que mathématiser la biologie ?](#)
- [En effet :](#)
- [Répétons-le :](#)
- [Le vivant est différent des systèmes physiques par sa construction hiérarchique tant structurale que fonctionnelle, et en conséquence par l'existence de discontinuités structurales. Il en résulte une caractéristique essentielle des interactions fonctionnelles entre unités structurales :](#)
- [Représentation hiérarchique pour une théorie biologique de l'organisation fonctionnelle \(MTIP : Mathematical Theory of Integrative Physiology\)](#)
- [Comment représenter ces interactions qui sont des actions non-symétriques et non-locales d'une structure sur une autre ? Quels processus leur sont associés ?](#)
- [Une question en découle naturellement : pourquoi des Interactions fonctionnelles apparaissent-elles ?](#)
- [L'organisation hiérarchique selon les échelles d'espace et de temps est un élément fondamental de cette théorie.](#)
-

[Organisation fonctionnelle et champ à n niveaux](#)

- [Théorie](#)
- [Formalisme](#)

- [Représentation hiérarchique pour une théorie biologique de l'organisation fonctionnelle \(MTIP : Mathematical Theory of Integrative Physiology\)](#)
- [La hiérarchie et ses conséquences : l'interaction fonctionnelle](#)
- [Mais qu'est-ce exactement qu'une fonction physiologique ?](#)
- [Du point de vue mathématique :](#)
- [Les interactions fonctionnelles sont identifiées par des discontinuités structurales](#)
- [Une représentation tridimensionnelle d'un système biologique](#)
- [Comment définir ces deux types de hiérarchies ?](#)

Table des matières

- [Pourquoi la biologie intégrative](#)
- [Quelles données caractérisent ces mécanismes ?](#)
- [La biologie intégrative est une nouvelle science, dont le développement pose des difficultés théoriques difficiles et spécifiques issues des mathématiques, de la physique et de la biologie.](#)
- [Transports d'ions à travers la membrane](#)
- [La complexité d'un organisme provient de cette construction « intégrée » d'une multitude de mécanismes.](#)
- [La question posée est de savoir comment atteindre ces objectifs...](#)
- [Pour intégrer, peut-on faire autrement que mathématiser la biologie ?](#)
- [En effet :](#)
- [Répétons-le :](#)
- [Le vivant est différent des systèmes physiques par sa construction hiérarchique tant structurale que fonctionnelle, et en conséquence par l'existence de discontinuités structurales. Il en résulte une caractéristique essentielle des interactions fonctionnelles entre unités structurales :](#)
- [Représentation hiérarchique pour une théorie biologique de l'organisation fonctionnelle \(MTIP : Mathematical Theory of Integrative Physiology\)](#)
- [Comment représenter ces interactions qui sont des actions non-symétriques et non-locales d'une structure sur une autre ? Quels processus leur sont associés ?](#)
- [Une question en découle naturellement : pourquoi des Interactions fonctionnelles apparaissent-elles ?](#)
- [L'organisation hiérarchique selon les échelles d'espace et de temps est un élément fondamental de cette théorie.](#)
- [Organisation fonctionnelle et champ à n niveaux -* Théorie -* Formalisme](#)
- [Représentation hiérarchique pour une théorie biologique de l'organisation fonctionnelle \(MTIP : Mathematical Theory of Integrative Physiology\)](#)
- [La hiérarchie et ses conséquences : l'interaction fonctionnelle](#)
- [Mais qu'est-ce exactement qu'une fonction physiologique ?](#)
- [Du point de vue mathématique :](#)
- [Les interactions fonctionnelles sont identifiées par des discontinuités structurales](#)
- [Une représentation tridimensionnelle d'un système biologique](#)
- [Comment définir ces deux types de hiérarchies ?](#)

'>

Pourquoi la biologie intégrative

par Gilbert CHAUVET (1942-2007)

La vie d'un organisme vivant se résume à un ensemble d'interactions de multiples mécanismes élémentaires qui

se déroulent au bon moment, au bon endroit (ils sont dit « spatiotemporels»). Tout »codage" dans le vivant est par conséquent de nature spatiotemporelle. Ces mécanismes sont fonctionnels, car ils correspondent à une certaine fonction physiologique. Lorsque cette fonction est perturbée, elle est dite pathologique.

Quelles données caractérisent ces mécanismes ?

La biologie intégrative est une nouvelle science, dont le développement pose des difficultés théoriques difficiles et spécifiques issues des mathématiques, de la physique et de la biologie.

Elle concerne la description intégrée des multiples phénomènes intervenant dans les divers niveaux des organisations structurale et fonctionnelle hiérarchiques du vivant (emboîtement de poupées russes). Elle requiert donc un formalisme mathématique spécifique nouveau, capable de traverser les niveaux d'organisation.

La vie d'un organisme vivant se résume à un ensemble d'interactions de multiples mécanismes élémentaires qui se déroulent au bon moment, au bon endroit (ils sont dit « spatiotemporels»). Tout »codage" dans le vivant est par conséquent de nature spatiotemporelle. Ces mécanismes sont fonctionnels, car ils correspondent à une certaine fonction physiologique. Lorsque cette fonction est perturbée, elle est dite pathologique.

Quelles données caractérisent ces mécanismes ?

Transports d'ions à travers la membrane

D'abord, ils sont construits sur une structure physique, c'est-à-dire un ensemble de molécules. Par exemple, ce sera un neurone qui agira sur un autre neurone, ou encore une glande qui agira sur une autre cellule par l'intermédiaire d'une molécule, l'hormone.

La complexité d'un organisme provient de cette construction « intégrée » d'une multitude de mécanismes.

Ensuite, le mécanisme élémentaire peut résulter de la physique, comme le transport ionique à travers une membrane. Il peut aussi résulter de la combinaison de plusieurs lois physiques comme la conservation de la matière et celle de la charge électrique.

Mais il peut aussi avoir une action retardée sur une autre structure physique : c'est là qu'apparaissent les difficultés qui font du système biologique un système très complexe. En effet, la notion de fonction apparaît lorsqu'une structure physique agit sur une autre à distance avec, par conséquent, un certain délai. Il s'agit d'une interaction fonctionnelle qui satisfait les lois de la physique.

[Claude Bernard](http://fr.wikipedia.org/wiki/Claude_Bernard) [http://fr.wikipedia.org/wiki/Claude_Bernard] fut un pionnier de l'expérimentation comparative, qu'il décrit en 1865 dans son Introduction à l'étude de la médecine expérimentale. Il est représenté ici, avec ses élèves, par le peintre Léon Lhermite. La détermination quantitative de ces actions (ou relations entre structures physiques) fait l'objet de la physiologie expérimentale. A l'époque de Claude Bernard, elle s'appelait physiologie générale.

Dans le souci de résumer et de clarifier la situation, j'emploierai l'expression structure anatomique pour structure physique, autrement dit un agencement de molécules dans l'espace physique, par exemple un neurone localisé à tel endroit du cerveau. J'appellerai alors interaction fonctionnelle l'action élémentaire d'une structure sur une autre. En conséquence, les problèmes de la physiologie intégrative seront :

- 1) l'identification des structures anatomiques capables d'action sur d'autres structures anatomiques ;
- 2) la détermination de ces actions (relations quantitatives) ;
- 3) la re-construction d'une fonction physiologique à partir de ses interactions élémentaires.

« Les points 1) et 2) sont l'objet de la biologie intégrative expérimentale.

Le point 3) est celui de la biologie intégrative théorique et computationnelle* . »

La question posée est de savoir comment atteindre ces objectifs...

* Une tendance actuelle est aussi d'appeler ce domaine la « bioinformatique », terme que je considère comme impropre pour désigner la biologie intégrative.

A mon sens, les bio-informaticiens ont une approche réductionniste plutôt qu'intégrative, bio-informatique pure plutôt que mathématique. Ceci alors ne conduit qu'à des mises en relation de façon quasi-automatique (détermination des relations par l'étude systématique d'ensemble de données). Ceci peut apparaître à certains comme une intégration... mais ce n'en est pas une (lire notamment mon courrier envoyé au mensuel La Recherche en réaction à l'article « Où va la biologie » d'Evelyn Fox Keller (La recherche, juin, n° 376, p.30), courrier publié dans le n° 378 de septembre 2004

Il existe des contraintes liées à l'intégration des mécanismes en interaction, ce qui est , en d'autres termes l'objet de la Biologie intégrative

Il faut en effet pouvoir décrire le fonctionnement d'un système à partir de ses sous-systèmes en interaction (fonctionnelle), par exemple le système vasculaire et le système respiratoire, eux-mêmes constitués d'autres sous-systèmes, et ainsi de suite, en un ensemble de mécanismes identifiés par l'expérience (emboîtement de poupées russes). Ajoutons que ces mécanismes peuvent être de nature complètement différente - mécanique, chimique, électrique... - mais qu'ils reposent sur les lois de la physique.

Ces contraintes imposent un cadre théorique dans lequel les mécanismes couplés peuvent être analysés :

- 1) selon des concepts propres à la biologie ;
- 2) selon des niveaux d'organisation ;
- 3) en respectant les lois de la physique.

Comme un cadre théorique est constitué d'une représentation et d'un formalisme mathématique, il reste à faire le choix de cette représentation et d'en déduire un formalisme pour traiter les symboles dans cette représentation.

Pour intégrer, peut-on faire autrement que mathématiser la biologie ?

Vous avez-déjà dû lire ma définition de l'intégration dans les pages précédentes. Pour moi, celle-ci ne peut être que mathématique. Et donc l'intégration des mécanismes biologiques en interaction passe forcément par une mathématisation de la biologie. Cette opinion résulte moins d'une croyance personnelle que de la nécessité dictée par la nature des systèmes biologiques, à savoir qu'ils sont des systèmes physiques pourvus de propriétés complémentaires, liées à l'existence d'interactions fonctionnelles.

En effet :

- les lois de la physique sont locales en temps et en espace ;
- les processus fonctionnels qui résultent du mécanisme dépendent continûment du temps et de l'espace ;
- les mécanismes reposent sur des structures anatomiques hiérarchisées ;
- l'évolution dans le temps d'un système dépend d'un autre système de façon continue par rapport au temps (synchronisation) et par rapport à l'espace.

Répons-le :

l'approche que je propose fait avant tout de la biologie, sciences de la vie, une science des processus fonctionnels. La nature biologique est double : elle est à la fois physique et biologique. Au sein du vivant, les unités associées existent parce que leurs processus fonctionnels associés en un autre sont plus stables que ce qu'ils auraient été s'ils n'étaient pas liés fonctionnellement.

Ce phénomène spécifique au monde vivant n'existe pas dans le monde matériel de la physique, car l'association de deux systèmes physiques le rend en général instable (sauf conditions à respecter. La raison profonde de cette différence réside dans le type de causalité, événementielle pour ce qui concerne le vivant, et non-événementielle pour ce qui concerne les systèmes physiques. Ajoutons aussi que la non-localité fonctionnelle biologique est un concept fondamental (comme la non-symétrie) car il implique une spécialisation topographique (géométrique) des fonctions qui est la caractéristique de tout être vivant. La physiologie est non locale.

Le vivant est différent des systèmes physiques par sa construction hiérarchique tant structurale que fonctionnelle, et en conséquence par l'existence de discontinuités structurales. Il en résulte une caractéristique essentielle des interactions fonctionnelles entre unités

structurales :

c'est la notion de champ non local associée à la causalité événementielle.

Interaction fonctionnelle, unité structurale, source, puits, non-localité, non-symétrie, organisation hiérarchique structurale, discontinuités structurales : tous ces concepts sont à la base de ma théorie, la MTIP (Mathematical Theory of Integrative Physiology) qui permet d'intégrer les phénomènes de la biologie.

Représentation hiérarchique pour une théorie biologique de l'organisation fonctionnelle (MTIP : Mathematical Theory of Integrative Physiology)

La MIP est une théorie de l'organisation et de l'action, à la fois topologique et géométrique. En effet, on peut partir d'un principe d'Interaction fonctionnelle entre structures biologiques, et d'un principe d'organisation hiérarchique pour les structures que sont le noyau, la cellule, le tissu et l'organe. La combinatoire de ces interactions conduit à l'organisation fonctionnelle observée. J'ai déjà également précédemment évoquée les deux propriétés des interactions, la non-symétrie et la non-localité, qui jouent un rôle essentiel dans le développement de l'être vivant.

Comment représenter ces interactions qui sont des actions non-symétriques et non-locales d'une structure sur une autre ? Quels processus leur sont associés ?

La première voie consiste à utiliser la théorie des graphes pour représenter la hiérarchie fonctionnelle induite par la combinaison des interactions. La seconde voie, complémentaire de la première, consiste à utiliser la théorie des champs pour représenter dans le temps et dans l'espace de l'action orientée, non symétrique, c'est-à-dire du produit échangé entre les unités structurales entre une source et un puits. Un champ en mathématiques est une quantité variable en tout point de l'espace.

A un instant donné et en un point donné de l'espace physique (la source), un opérateur propage, à un instant ultérieur, cette quantité vers un autre points (le puits). Cette description abstraite de la dynamique de l'action offre l'intérêt de tenir compte implicitement de l'anatomie du système vivant, tout en explicitant la propagation engendrée par les transformations qui ont lieu dans la source.

Une question en découle naturellement : pourquoi des interactions fonctionnelles apparaissent-elles ?

Avant d'atteindre l'état adulte, l'organisme passe par une phase de développement au cours de laquelle son organisation structurale et son organisation fonctionnelle se modifient. Il existe un programme génétique qui dirige cette évolution.

Mais pourquoi ce programme agit-il de la façon qui est observée ? Refusant le finalisme, cette doctrine philosophique qui impose une raison finale à l'existence de toute structure, nous devons comprendre pourquoi une association entre deux structures existe alors qu'elle rend le système plus complexe et que chaque unité prise individuellement se suffit, potentiellement, à elle-même.

Or, contrairement à ce qui est généralement obtenu dans les systèmes physiques, j'ai démontré de façon physique et mathématique[1]) qu'un système biologique est d'autant plus stable qu'il est complexe[2] : il y a stabilisation par association de structures (ce que j'ai appelé le principe d'auto-association stabilisatrice, ou PAAS, principe général organisateur en biologie qui décrit pourquoi deux structures ont tendance à s'associer, réalisant de ce fait, une fonction nouvelle).

En termes biologiques, la conservation obligatoire de l'homéostasie au cours du développement entraîne l'association des structures pour que la stabilité de la dynamique physiologique augmente. Le PAAS conduit à une construction de nature mathématique du système biologique : les unités associées existent parce que leurs processus fonctionnels associés en un autre sont devenus plus stables, et qu'une perturbation environnementale, qui auparavant les détruisait, ne peut plus les détruire [voir schéma].

Ainsi, la théorie que je propose consiste en un principe général, le PAAS, en l'existence nécessaire de l'interaction fonctionnelle élémentaire, et une construction mathématiquement organisée des unités structurales à partir des interactions fonctionnelles.

L'organisation hiérarchique selon les échelles d'espace et de temps est un élément fondamental de cette théorie.

Cette organisation permet d'obtenir une classification des données biologiques selon des critères (l'espace et le temps) nécessaires à leur compréhension intégrée. Les mécanismes physiologiques élémentaires sont alors classés selon un graphe hiérarchique qui peut être mathématiquement étudié. Ensuite, on peut obtenir une véritable intégration des processus fonctionnels observés.

[1] Notamment lorsqu'il s'agit de deux voies biochimiques (Chauvet et Costalat, 1995), mais aussi dans les cas beaucoup plus complexes, comme par exemple la dynamique du cervelet (Chauvet et Chauvet 1999). Le PAAS est une constante, un principe général organisateur en biologie.

(2) C'est le contraire dans les systèmes physiques (sauf conditions à respecter) : l'explication de cette différence avec les systèmes biologiques réside dans le type de causalité : événementielle pour les systèmes biologiques, non-événementielle pour les systèmes physiques.

Organisation fonctionnelle et champ à n niveaux

- Théorie
- Formalisme

Représentation hiérarchique pour une théorie biologique de l'organisation fonctionnelle (MTIP : Mathematical Theory of Integrative Physiology)

La hiérarchie et ses conséquences : l'interaction fonctionnelle

Au cours de mon travail sur les modèles physiologiques, du niveau moléculaire au niveau de l'organisme (voir Chauvet « Theoretical systems in Biology », page 143, Vol 1, Pergamon Press, 1996), j'ai introduit de nouvelles idées spécifiques à l'étude de la biologie, en particulier le concept d'interaction fonctionnelle non symétrique et non locale dans un espace hiérarchique. Ces concepts fondamentaux ont émergé d'une approche bottom-up des systèmes vivants, autrement dit d'une étude systématique des fonctions physiologiques isolées, suivie par l'intégration de ces fonctions au niveau de l'organisme.

Une conséquence significative de cette théorie est que les organismes vivants ne sont pas seulement vus comme une double représentation organisationnelle, simultanément structurale et fonctionnelle, mais aussi vus sous la forme d'une double représentation mathématique, à la fois géométrique et topologique.

Mais qu'est-ce exactement qu'une fonction physiologique ?

Nous pouvons la comparer à une fonction mathématique dans le sens où l'action d'une structure sur une autre entraîne un certain produit. La fonction physiologique serait alors l'action (l'application en termes mathématiques) et le produit serait le résultat de la fonction (la valeur de la fonction en termes mathématiques) qui est souvent identifiée à la fonction physiologique elle-même. Bien que cette définition soit générale, elle est malheureusement inopérante.

Il est relativement facile de décrire les fonctions physiologiques particulières comme la vision, la digestion, la mémorisation, etc. mais il est beaucoup plus difficile de donner une définition opérationnelle d'une fonction physiologique en général. Une possibilité est de définir une fonction physiologique comme une combinaison d'interactions fonctionnelles entre structures.

De telles interactions fonctionnelles sont évidemment spécifiques puisqu'elles décrivent l'action (quelle que soit sa nature) d'une structure sur une autre ou, plus précisément, l'action d'une source sur un puits après que l'action ait subi une transformation dans la source (c'est-à-dire ait entraîné une transformation dans le puits).

Il est donc clair que l'interaction possède la propriété de non symétrie source vers puits. En outre, elle montre une autre propriété très importante : celle de non localité, définition un peu plus difficile à comprendre puisqu'elle prend son origine dans la hiérarchie structurale du système (voir Chauvet, « Hierarchical functional organization of formal biological systems », 1993)), c'est-à-dire que certaines structures sont incluses dans d'autres. La non localité peut être expliquée comme suit :

- 1) d'un point de vue mathématique, dans une représentation continue, l'action d'une structure sur une autre est nécessairement l'action d'un point sur un autre. Ceci ne correspond pas à l'action d'une cellule sur une

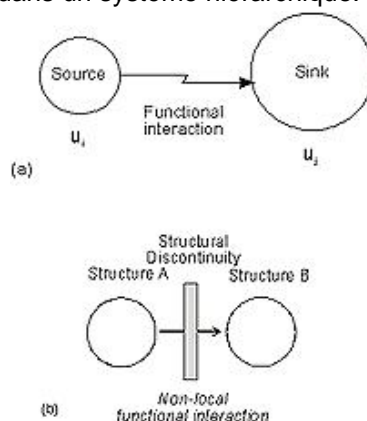
autre dans l'espace physique puisque cellule contient des régions avec des fonctions spécialisées et donc ne peut pas être réduite à un point.

- 2) l'interaction entre une structure et une autre doit opérer à travers d'autres structures, que nous avons appelées discontinuités structurales, à l'intérieur desquelles les processus évoluent différemment. Donc d'autres niveaux d'organisation dans le système hiérarchique contribuent au fonctionnement d'une structure donnée à un niveau donné de la hiérarchie. Ceci est la non localité due au choix de la représentation, dans ce cas la représentation hiérarchique. Les équations qui représentent ces processus doivent par conséquent avoir une structure différente et doivent inclure des termes non-locaux.

Le même raisonnement s'applique aux processus dynamiques des interactions fonctionnelles, opérant par exemple sur groupes de neurones ou glandes endocrines. En termes plus généraux, il peut être étendu à l'activité complète de l'organisme, pourvu que toutes les interactions fonctionnelles impliquées soient correctement représentées. Nous pouvons alors formuler une théorie hiérarchique de l'organisation fonctionnelle de la façon suivante :

Dans un système hiérarchique à n niveaux, chaque interaction fonctionnelle est décrite par le transport d'un signal activateur et/ou inhibiteur (sous la forme d'un potentiel d'action d'une hormone ou de tout autre type d'interaction) entre une source et un puits, et chaque fonction physiologique est la conséquence d'une combinaison de telles interactions. Cette idée peut être commodément exprimée par une théorie du champ selon laquelle un opérateur transmet une interaction à une vitesse donnée d'une source vers un puits situé dans l'espace des unités, la source et le puits étant chacun réduit à un point.

Cette représentation constitue la base de la définition d'une fonction physiologique comme le comportement global d'un groupe d'unités structurales dans un système hiérarchique.



Du point de vue mathématique :

(i) une interaction fonctionnelle est définie comme l'interaction entre deux des p unités structurales u_i et u_j ($i, j = 1, p$) d'un système biologique formel (FBS). L'une des unités, par exemple u_i , émet un signal qui agit sur l'autre unité, u_j , qui en retour émet une substance, après une éventuelle transformation f :

(1)

Cette interaction, appelée fonction élémentaire, est représentée par y_{ij} (Figure 1) et constitue un élément du graphe mathématique qui représente l'organisation du système biologique formel (O-FBS). La dynamique des

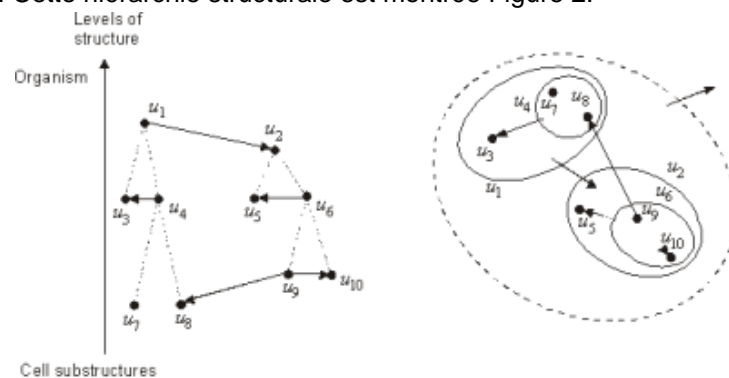
interactions fonctionnelles est alors décrite par un système d'équations du type suivant :

(2)

ou r 's sont des paramètres physiques ou géométriques spécifiques.

(ii) L'unité structurale est définie comme l'ensemble des éléments anatomiques ou physiques intervenant dans la fonction physiologique.

Donc d'un point de vue fonctionnel, un système constitué d'un ensemble d'éléments comme des molécules, des organites cellulaires, des cellules, des tissus et des organes est représenté par des interactions fonctionnelles entre unités structurales. Cette hiérarchie structurale est montrée Figure 2.



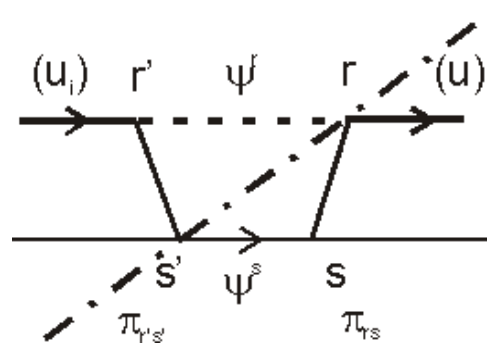
Les interactions fonctionnelles sont identifiées par des discontinuités structurales

Les interactions fonctionnelles peuvent être identifiées par la présence de discontinuités structurales.

Supposons que nous ayons deux unités structurales séparées par une discontinuité structurale. L'interaction se propage d'une unité à l'autre à travers cette discontinuité qui pourrait être par exemple une membrane, siège d'un transport actif. La membrane est au niveau inférieur dans la hiérarchie structurale, par rapport aux deux unités en interaction.

Du point de vue de la dynamique de l'interaction fonctionnelle, on peut dire qu'elle consiste en un certain processus physiologique opérant dans les deux unités (localisées en r' et r dans l'espace des unités, c'est-à-dire le r -espace qui se réfère à $r'(x, y, z)$ et $r(x, y, z)$ dans l'espace physique tridimensionnel, avec un processus physiologique différent ayant lieu au niveau inférieur dans la discontinuité structurale. Une interaction fonctionnelle peut être représentée sous la forme d'un diagramme, comme le montre la figure 3.

L'équation gouvernant le transport de l'interaction s'applique à un milieu continu et explique pourquoi l'équation du processus est différente au niveau inférieur de l'organisation. Cette observation constitue la base d'un nouveau formalisme (voir Chauvet, 1999, 2002) impliquant ce que j'ai appelé les S propagateurs (propagateurs dans les structures).



Une représentation tridimensionnelle d'un système biologique

Comme on l'a vu, une fonction physiologique peut être représentée par des graphes mathématiques où les noeuds correspondent aux unités structurales et les arêtes aux interactions orientées, non-symétriques. Toutes les fonctions physiologiques sont couplées de façon intriquée dans la hiérarchie.

Elles sont liées relativement à l'espace - ce qui est évident - mais aussi au temps qui correspond à une vitesse d'évolution différente des fonctions physiologiques (échelle de temps différente). Probablement la meilleure façon de voir cet aspect de la hiérarchie est de considérer les boucles intriquées en temps de l'algorithme qui représente l'évolution de la fonction.

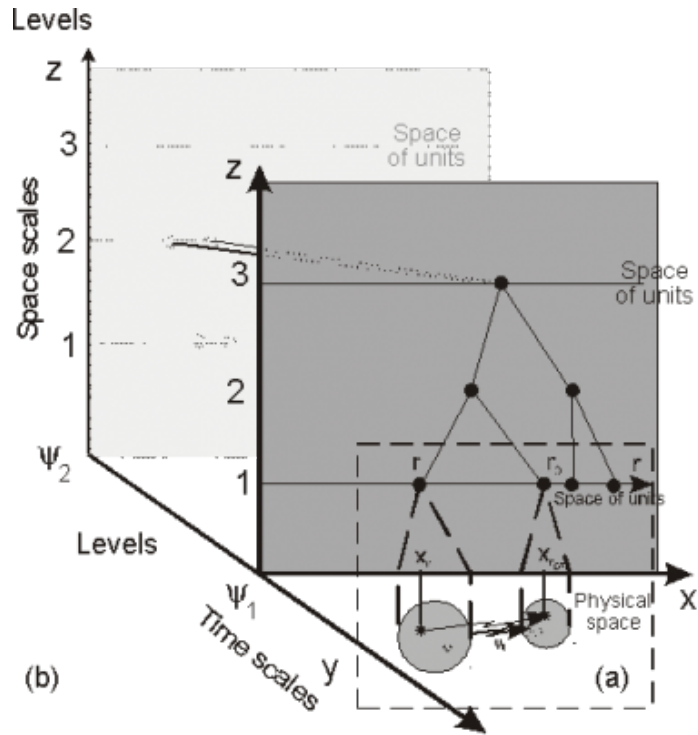
Nous devons donc non seulement considérer la hiérarchie structurale mais aussi la hiérarchie fonctionnelle du système. Alors, chaque niveau de l'organisation fonctionnelle correspondra à une fonction physiologique particulière, c'est-à-dire à un processus qui se réalise dans une certaine échelle de temps.

Comment définir ces deux types de hiérarchies ?

Il est commode de considérer la hiérarchie structurale comme étant organisée selon les échelles d'espace d'un processus physiologique, alors que la hiérarchie fonctionnelle est organisée selon les échelles de temps. De plus, ceci offre l'avantage de séparer clairement les organisations structurales et fonctionnelles, c'est-à-dire la structure et la fonction du système biologique étudié.

Cette "séparation" peut être représentée en utilisant des axes pour les échelles d'espace, les échelles de temps, et l'espace des unités structurales. Nous obtenons une représentation tridimensionnelle d'une fonction physiologique (Figure 4) qui montre :

- les unités structurales dans l'espace pour une fonction donnée et l'organisation hiérarchique des fonctions physiologiques pour une échelle d'espace donnée.
- l'intégration des fonctions physiologiques, c'est-à-dire l'identification des couplages entre les fonctions, qui requiert de déterminer les interactions fonctionnelles aux différents niveaux hiérarchiques impliqués



Par exemple, les interactions au niveau moléculaire entre l'angiotensine et la rénine seront situées au niveau le plus bas de l'organisation hiérarchique représentant la circulation du sang, et seront elle-même couplées au réseau neuronal. Ce travail complexe peut seulement être entrepris en utilisant des méthodes mathématiques hautement abstraites et techniquement avancées ;, ce que j'ai appelé la **MTIP (Mathematical Theory of Integrative Physiology)**.

Site Officiel de **Gilbert Chauvet** à qui nous rendons hommage :

<http://www.gilbert-chauvet.com/>