

- (9) P. Delattre. Direct and reversed control in transformation systems. *Math. Biol.*, 1977, **34**, 303 - 324.
- (11) R. Rosen *Dynamical System Theory in Biology*. Vol I. Wiley Inter-Sciences, New York, 1970.
- (12) E. Bernard-Weil. A general model for the simulation of balance, imbalance and control by agonistic antagonistic couples. In : *Mathematical Models in Medicine* (M. Witten, éd.). Pergamon Press, New York, pp 1587 - 1600.
- (13) G.I. Marchuk et R. V. Petrov. The mathematical model of the anti-viral immune response. In : *Mathematical Modeling in Immunology and Medicine* (G.I. Marchuk, L. N. Belykh, éd.). North-Holland, Amsterdam, 1983, pp. 161 - 173.
- (14) E. Bernard-Weil et C. Dalage. Inhibition by cortisol of the favourable effects of lysine-vasopressin on the growth of Hela cell cultures. *Experientia*, **24**, 1001, 1968.
- (15) E. Bernard-Weil, Gilbert-Dreyfus, M. David, M. Sachs et J. Sebaou. Evaluation of an antidiuretic effect in cancer. *Lancet*, 1967, II, 324 - 326.
- (16) E. Bernard-Weil. Effects of a week of ACTH or corticosteroid therapies in the diuretic response to water intake. A probably neuroendocrine response to corticosteroid load. *Steroids Lip. Res.*, 1972, **3**, 24 - 29.

STRUCTURE, FONCTION ET TRANSFORMATIONS SPATIALES

Claude-Paul BRUTER
Mathématiques, Université Paris XII

Pierre DELATTRE a consacré un ouvrage de référence à l'étude des notions de système, de structure et de fonction, dont on a compris, en ce siècle seulement, au moins pour les deux premières d'entre elles, l'intérêt majeur pour la compréhension des phénomènes physiques, vitaux, sociaux.

L'ouvrage de P. DELATTRE porte en titre un quatrième terme, celui d'évolution. P. DELATTRE n'a jamais cessé, tout au long des quinze années pendant lesquelles je l'ai connu, de porter son attention sur les progrès récents de la dynamique. Liés aux progrès général des mathématiques, ils permettent de mieux affiner les définitions et quelques caractéristiques des systèmes, structures, fonctions. L'étude de ces notions sera faite dans ce texte principalement par référence à des exemples pris en biologie, domaine pour lequel P. DELATTRE avait une prédilection particulière.

Dans le texte présent, encore introductif, l'accent sera mis sur le caractère spatial des notions de fonction et de structure. La vision spatiale des phénomènes est un préalable indispensable à leur modélisation géométrique, qui donne de la réalité, l'expérience le montre assez, la représentation la plus fidèle et la plus utile. Aussi faut-il croire en l'intérêt de ce texte, même si, pour l'heure, il se situe au niveau des généralités. La mise en oeuvre de la démarche géométrique, hormis les cas relativement simples où l'on peut se dispenser de prendre en compte les transformations chimiques, apparaît comme un objectif à atteindre situé dans le lointain. Il n'est pas trop tard pour essayer d'entreprendre ce long voyage.

I. FONCTION ET TRANSFORMATIONS SPATIALE

En mathématiques, une fonction est un cas particulier de ce qu'on appelle une application. Une application f a le propre de mettre en relation ou de préciser une relation entre parties de deux ensembles E et F . Du point de vue pratique, il faut se donner une fois pour toutes une procédure dans la manière d'établir la correspondance entre ces parties. La convention habituelle est de fixer les parties de E et d'examiner leurs pendants dans F , via f .

La question se pose de savoir si le sens attribué au terme de fonction en mathématiques peut être considéré comme voisin du sens général que la systémique reconnaît à ce terme, dans la mesure, d'ailleurs, où la systémique est capable de lui donner une définition précise. Il nous faut

donc commencer par analyser ce qu'est une fonction en systématique, fonction que nous qualifierons plus simplement de naturelle.

Une *fonction naturelle* est accomplie par un objet que nous appelons un organe voire un complexe organique. Ce complexe possède une morphologie et une constitution adaptée à la fonction qu'il exécute, au rôle qu'il joue. Celui-ci est de réaliser une transformation.

Cette transformation possède à des degrés divers trois caractères :

- C_1 - un caractère spatial de transport.
- C_2 - un caractère morphologique de changement de forme des éléments transportés.
- C_3 - un caractère plus profond et matériel de modification substantielle, de changement d'état de ces mêmes éléments.

Prenons l'exemple de la *fonction préhensive* définie en (1), (2), : celle de la main est active ; elle saisit les objets, les déplace d'un lieu dans un autre (C_1), modifiant éventuellement leur forme (C_2) pour faciliter ce transport. La fonction de l'intestin est également active : il transporte les ingrédients alimentaires (C_2), modifie leur forme (C_3), leur composition (C_3). La fonction préhensive de l'oeil est passive : l'oeil capte les rayons lumineux, et transforme ces impressions lumineuses sans doute en impulsions nerveuses (C_1, C_2, C_3).

L'organe joue donc un rôle d'intermédiaire entre deux positions, entre deux formes, entre deux états, tout comme la fonction mathématique possède un rôle médiateur entre parties de deux ensembles. Autrement dit, il semblerait que l'organe est le correspondant de la fonction mathématique, et non point la fonction naturelle.

La réalité est plus complexe puisqu'une fonction naturelle possède, à des degrés divers, les trois caractères que nous venons de mentionner, et qui sont susceptibles de représentations mathématiques de nature fonctionnelle. Soit en effet un objet qu'un organe va traiter. On peut considérer, au moins à titre d'hypothèse, que les types de transformations subies par l'objet sont caractéristiques de l'organe en question, et de ses fonctions.

Par exemple, l'organe main procède d'abord à une sorte de compactification dynamique : un disque plongé se referme sur lui-même en même temps qu'il saisit l'objet. De la sorte, à l'objet est attachée une anse de saisie, dont la surface d'attachement est constituée par un voisinage plus ou moins étendu du bord du disque : ce voisinage, d'abord formé par les extrémités des doigts, peut s'étendre jusqu'à la totalité du disque de la main. On est ici en présence d'un ensemble de mouvements de la main, des doigts, qu'on peut localement décomposer (selon le théorème de Jordan) en translations et en rotations. Toutefois, l'ensemble de ces déplacements élémentaires s'accomplit selon une morphologie caractéristique (celle de la main), résumant globalement cet ensemble. On conviendra de dénommer *compactification dynamique* ou attachement-saisie un tel ensemble; il se

rencontre dans la formation de la plupart des placodes du règne animal, et dans la formation de toutes les feuilles et de leurs dérivées dans le règne végétal (3).

Physiquement, la saisie s'accompagne d'une pression exercée sur le bord de l'objet, de sorte que, selon la consistance de l'objet, sa forme peut rester invariante, ou bien être déformée continûment, ou bien connaître des transformations brutales et des cassures.

L'organe intermédiaire bras-avant-bras n'opère que des déplacements (translations et rotations) qui agissent, via celle de la main, sur la position spatio-temporelle de l'objet.

On peut alors dresser le tableau des transformations élémentaires exercées par le couple d'organes main-bras :

	attachement-saisie	
	sans déformation	avec déformation
translation		avec dislocation
rotation		
déplacements		

Les plaisirs de la table suggèrent une illustration immédiate et évidente des comportements dynamiques spatiaux présentés dans le tableau qui précède, et auxquels sont associés des trajectoires et des attracteurs classiques. Faisons un simple commentaire sur la seconde colonne du tableau : elle correspond aux opérations les moins rudimentaires, et, du point de vue culinaire, aux réalisations les plus raffinées. Ainsi, la fabrication de la pâte d'un mille-feuilles, celle d'une pâte brisée s'apparentent à la réalisation physique plus ou moins partielle et réussie d'un fer à cheval de Shub-Smale, dont on connaît par ailleurs les qualités de stabilité : les fonctions naturelles ont assurément la propriété d'être structurellement stables ; il est alors logique que les ensembles de trajectoires associées au comportement dynamiques liés à ces fonctions présentent elles aussi ce caractère de stabilité structurelle.

On peut se demander si, en approfondissant cette voie, on ne pourrait pas tirer un profit de l'analyse des fonctions naturelles pour la connaissance mathématique au moins intuitive de comportements dynamiques structurellement stables ; il conviendrait alors de décomposer les fonctions naturelles en leurs composantes dynamiques élémentaires, de les étudier séparément, puis de les coupler à nouveau. Inversement, ce type d'analyse des fonctions naturelles d'après les trois critères transformationnels que nous avons relevés pourrait permettre d'affiner par exemple la typologie

des fonctions physiologiques. Les fonctions possédant les seuls caractères C_1 , voire C_1 et C_2 sont naturellement les plus faciles d'accès.

Un exemple trivial qui se situe dans la ligne des exemples précédents est celui de la mastication, opérée à l'aide de la langue par l'appareil manducatoire. Les dents y jouent le même rôle que les doigts de la main : la mastication des aliments, dislocation par pression et rotation. On peut donc ranger la mastication dans la catégorie des préhensions actives.

Toutefois, les espoirs que l'on peut fonder sur l'analyse des propriétés transformationnelles des fonctions naturelles resteront pour l'instant limités à celles qui relèvent des fonctions purement mécaniques et spatiales, tant que n'auront pas été élucidées les dynamiques multiples associées aux transformations physico-chimiques, aux changements d'états réalisés par les organes. Il reste néanmoins satisfaisant pour l'esprit de pouvoir disposer de modèles mathématiques pour les fonctions proprement spatiales.

Il n'est pas d'ailleurs illusoire de penser qu'on pourra également, un jour, utiliser de tels modèles spatiaux pour décrire les transformations physico-chimiques. Une réaction chimique n'est-elle pas, spatialement, une destruction sous l'effet peut-être d'affinités d'édifices moléculaires, de transport de certains sous-édifices et de reconstitutions d'édifices nouveaux? Naturellement, à l'heure actuelle et en général, ces transformations ne nous sont pas accessibles, non plus que les propriétés topologiques des espaces physiques au sein desquels ces transformations ont lieu. Les équations de la cinétique chimique ne traduisent évidemment que globalement le résultat quantitatif de ces transformations, mais même si nous ne parvenons jamais à créer de telles théories spatiales - l'auteur est un optimiste invétéré - concevoir leur existence paraît plutôt raisonnable.

Alors, il n'est pas illusoire de croire en la possibilité de construire une représentation entièrement géométrique des fonctions naturelles.

Divers courants scientifiques semblent d'ailleurs converger pour permettre à terme la réalisation de ce programme. D'une part, les géomètres, qui ont parfois des visions lointaines des choses, faisant appel à l'aide précieuse des mémoires des ordinateurs, se lancent dans la fabrication de catalogues de formes géométriques de manière à bien distinguer un chat d'une souris (leurs formes appartiennent à la même classe, à un difféomorphisme près, tel est le point de vue topologique; le géomètre, introduisant les relations métriques, notamment les courbures locales, entend affiner la classification topologique). D'autre part, les chimistes font de plus en plus appel à la géométrie, à la topologie, ... et à l'ordinateur pour décrire spatialement les molécules qu'ils étudient, et pour analyser leurs modes d'action. Cette jonction de facteurs laisse bien augurer de l'avenir.

Dans l'immédiat, nous allons poursuivre l'étude des fonctions naturelles, d'abord en tenant compte des phases dans lesquelles se trouvent les objets à traiter par les organes.

Un "aliment" peut en effet se présenter sous l'une des trois phases, gazeuse, liquide, solide. Naturellement, la morphologie, la structure et le

fonctionnement des organes nécessaires à la prise, au transport ou au rejet d'un "aliment" particulier dépendent de la phase dans laquelle celui-ci se trouve. On a donc, à priori, la classification fonctionnelle suivante des organes et sous-organes: C_{1g} , C_{1l} , C_{1s} .

Dans le développement de la vie, l'eau joue un rôle primordial, et l'on est donc amené à considérer, compte-tenu des conditions de température et de pression existant sur notre terre, la phase aqueuse comme intermédiaire entre la phase solide (glace) et la phase gazeuse (vapeur). Par ailleurs, chacune de ces phases peut être subdivisée en sous-phases définies par la malléabilité, la viscosité, la volatilité de chacune d'elles. Cette classification plus fine peut être établie à partir d'une analyse plus réductionniste de chaque classe, où, là encore, les facteurs spatiaux jouent un rôle majeur : arrangements des édifices moléculaires, étendue et disposition des "vides" internes. On peut donc envisager l'existence d'un ordre entre les sous-phases

$$\ll G_2 \ll \dots \ll G_n \ll \dots \ll I_1 \ll I_2 \ll \dots \ll S_1 \ll \dots \ll S_r \ll \dots$$

On pourra donc distinguer, en définitive, parmi les *transformations spatiales* :

celles qui sont des transports purs θ

celles qui sont des procédures de pur attachement α

celles, composites, qui sont des attachements accompagnés de transport π .

Ces transformations peuvent affecter le corps dans sa globalité ou dans ses parties, les aliments. Une transformation spatiale composite peut s'accompagner ou non d'un changement de sous-phase.

Donnons quelques exemples :

(organes de)	θ_s	pieds, pattes, pseudopodes
transport spatial	θ_l	cils vibratiles, nageoires
de l'être	θ_g	ailes
(organes de)	α_g	narines
saisie(attachement)	α_l	bouche, langue
des "aliments"	α_s	doigts, becs, pinces, trompes
(organes de)	θ_g	soufflets, tuyaux
transport spatial	θ_l	tuyaux et "pompes"
des "aliments"	θ_s	tuyaux et "bras"

(En passant du gaz au solide, l'activité dynamique se fige évidemment : le caractère périodique du mouvement des soufflets (respiration, circulation sanguine) perd de sa force lors du transport intestinal. On notera, par contre, le caractère périodique de la marche (stabilisation sur un attracteur, le cercle, d'un mouvement stable)).

(organe de)
changements de
sous-phases

π_s doigts, appareil manducatoire, langue
 π_g poumon (alvéoles pulmonaires)
 π_1 organe salivaire, intestins.

Prenons enfin, et de manière très succinte, un exemple plus global, comme celui de la respiration : elle est typiquement le fait d'un complexe organique. Voies respiratoires, ensemble pulmonaire (le système musculaire du soufflet, l'ensemble alvéolaire où s'effectuent les échanges, les transfusions chimiques et la liaison avec le complexe sanguin), sont les deux principaux composants du support organique de ce complexe. La plupart des transformations rencontrées dans la série d'exemples particuliers qui précèdent, figurent également dans la respiration, conçue donc comme un agencement de transformations spatiales.

L'affinement de la classification précédente se heurte bien sûr à la difficulté de séparer, au sein du même milieu organique, les différentes classes de transformations bio-chimiques et donc spatiales qui sont opérées, dont le caractère fonctionnel peut être polyvalent, l'action plus ou moins diffuse (exemple, les neurohormones).

L'étude s'avère encore plus délicate si l'on considère les organes des sens : ils travaillent sur des formes géométriques dont le substrat et le mode de reconnaissance sont spécifiques de chaque sens. Ces formes sont décelées par leurs singularités, certaines de leurs géodésiques, leur cut-locus, des lignes ou des surfaces de rupture de gradient. Pour l'essentiel, la forme tombe sur les récepteurs de l'organe. C'est au niveau de ces récepteurs que s'accomplissent les transformations spatiales accompagnant les modifications de phase, les transductions. L'organe de saisie reste fondamentalement une placode (au même titre que la main ou le pied), le transport s'accomplit encore par l'intermédiaire de bras, les neurones et leurs ramifications dentritiques, aux extrémités desquelles s'articulent les "articulations" nerveuses. Les modalités phasiques se rapportent à la nature du support vibratoire, modulé par l'intensité et la longueur d'onde de chaque vibration.

En définitive, il apparaît que l'activité de l'individu, de nature globale, met en jeu un système dynamique de dimension énorme, fibré sur un domaine excessivement tordu et noué, plongé dans R^3 . Mais ces activités se répartissent en classes bien typées, car les dynamiques visibles sont les projections sur R^3 des dynamiques multidimensionnelles que l'on vient d'évoquer.

L'organisation principale de ces dynamiques est donc celle des dynamiques sur R^3 , ici modulées par les données multidimensionnelles. Fondamentalement et localement, les mouvements correspondants ne peuvent donc être que de deux types, soit déplacements rectilignes, soit rotations. Le déplacement hélicoïdal est évidemment une combinaison des deux types précédents de déplacement.

2. STRUCTURES ET TRANSFORMATIONS SPATIALES

Delattre (4) concevait un système comme "un ensemble d'éléments en interaction". Cette définition, de nature dynamique, est mal adaptée à la description de systèmes au caractère plus statique, comme par exemple celui des poids et mesures. Ne serait-il pas préférable de dire plus simplement qu'un système est un ensemble d'éléments organisé ?

Un mode d'organisation sera appelé une structure. En général, un système ou objet est un ensemble d'éléments muni de plusieurs structures, plus ou moins compatibles entre elles. Cette définition est *a minima*, il vaut cependant la peine qu'on s'y arrête.

Nous allons ici nous pencher sur les différents types de structure que l'on peut concevoir. Il nous semble qu'il existe essentiellement deux types de structure qui, au prime abord, semblent distinctes : les structures spatiales d'une part, des structures que nous appellerons opératoires ou fonctionnelles d'autre part.

Observons que chacune de ces structures induit une relation d'ordre, plus ou moins partielle : il existe donc toujours, sous-jacente, une structure d'ordre ; les structures d'ordre apparaissent ainsi comme les plus fondamentales des structures. Elles possèdent le défaut d'être en général assez pauvres, et, pour cette raison, font parfois l'objet d'un certain dédain.

Cette attitude est évidemment très superficielle et ne doit pas faire oublier que l'usage de la notion d'ordre par des experts permet de retrouver ou de découvrir des propriétés difficilement accessibles par d'autres méthodes.

Les structures trivialement spatiales rendent compte bien sûr de l'organisation spatiale des parties : la structure topologique précise la disposition des parties appelées voisinages, la structure différentiable précise des formes locales homéomorphes aux formes de référence, l'analyse de la structure en strates permet de reconnaître les différentes strates de l'organisation, et la manière dont ces strates se raccordent entre elles.

Une structure opératoire ou fonctionnelle présente un caractère énergétique, voire dynamique. Elle précise l'agencement et un mode d'action d'un sous-ensemble de parties sur les autres, ou sur l'environnement de l'objet.

Bien que traditionnellement considérée comme faisant partie des structures topologiques, et peut-être de manière abusive, nous rangerons ici dans la catégorie des structures opératoires la structure métrique : une telle structure définit en effet une distance, i.e. précise une dépense d'énergie minimale si, du point A, on veut agir sur le point B ; il faut songer d'abord à atteindre ce point.

Du point de vue mathématique, la structure de groupe est le type même des structures opératoires : elle indique les traits généraux et essentiels de modes d'action des éléments d'un objet sur les éléments de ce même objet.

Cependant, l'observation du monde physique et organique suggère d'envisager d'autres types de structures opératoires, qui se présentent parfois sous la forme de blocs fonctionnels et dont le finalité et les caractéristiques

par des verbes transitifs. Il apparaît aussitôt que ces blocs fonctionnels correspondent aux organes et aux complexes organiques, envisagés dans la première partie de ce texte, de sorte qu'en définitive ces structures opératoires peuvent être décrites spatialement.

Classons-les en structures de saisie, en structures de transport, en structures de transformation phasique, enfin en structures de régulation. Les structures de saisie sont les plus simples à décrire. Elles se composent en général d'une forme particulière, et d'un élément moteur qui agit sur la forme. Dans le cas d'une phase solide, la forme est un cylindre plein que l'élément moteur plie en deux "phalanges" des "doigts" ou "pincées" qui vont s'incruster dans l'objet à saisir, ou le serrer. Le pliage, en tant qu'application continue d'un domaine compact sur lui-même, possède un point fixe, centre organisateur d'une éventuelle articulation autour de laquelle se développe une rotation, essentiellement plane.

Les structures de transport sont beaucoup plus diversifiées que les structures de saisie. L'élément moteur du transport peut être exogène (vent, pesantEUR, agent extérieur) ou endogène (muscles, moteurs). Il peut être, ou non, affecté de mécanismes de démultiplication des forces. La phase de l'objet transporté, celle du milieu au sein duquel s'effectue le transport, jouent un rôle important. On peut donc à priori songer à 36 structures différentes de transport. Certaines d'entre elles ne sont guère physiquement réalisables, mais d'autres sont à prendre en compte. Le sujet d'étude est donc assez riche pour que nous ne songions pas à l'aborder ici en détail.

Cette position se justifie également pour les structures de transformation phasique autrement plus nombreuses, et les structures de régulation d'autant plus complexes que l'objet est riche en composants distincts.

Une dernière remarque doit être faite. Via la considération de certains systèmes mécaniques, les mathématiciens ont été amenés à introduire la notion de stabilité structurelle. Indéformabilité, rigidité, solidité, souplesse, adaptabilité, flexibilité, évanescence, fiction, tels sont des aspects et des manifestations divers de la stabilité structurelle. Pour situer valablement un objet dans l'univers des objets, il est aujourd'hui indispensable de préciser le degré de stabilité auquel il peut prétendre. Ce n'est certes pas chose toujours facilement réalisable, car ce degré global est fonction de la qualité de mobilité de chaque structure présente au sein de l'objet ; sa définition mathématique fait donc appel à des transformations de Poincaré locales, à des groupes locaux de monodromie.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) C.P. Bruer, *Topologie et Perception* (aspects neurophysiologiques) 2, Maloigne, Paris, 1976
- (2) C.P. Bruer, *Éléments pour une théorie morphologique de la préhension et de la perception*, in *Biologie Théorique*, Solignac 1985 (H. Lück ed.), CNRS, 37-46, 1985.
- (3) C.P. Bruer, *On some morphological principles in botany arising from mathematical considerations*, *Acta Biotheoretica*, 38: 171-180, 1990.
- (4) P. Delattre, *Système, Structures, Fonction, Evolution*, Maloigne, Paris, 1971.

DE LA PHYSIQUE A LA PHILOSOPHIE NATURELLE: L'itinéraire exemplaire de Pierre DELATTRE

René THOM
Institut des Hautes Etudes Scientifiques
Bures-sur-Yvette

Ce n'est pas sans un certain pincement de coeur qu'on se replace devant les pages écrites par un ami qui vous a trop abruptement quitté. Pour d'entendre le son de sa voix dans ses phrases qu'on se répète intérieurement. Pour aussi de devoir céder à un style trop facilement élogieux, de composer l'hagiographie de circonstance. Car le fait est - en relisant ses oeuvres - je n'ai trouvé que très rarement l'occasion de ressentir des divergences ou des réserves. S'il m'est arrivé, de son vivant, de ne pas approuver toutes ses positions, c'est qu'elles étaient inspirées chez lui de la plus large tolérance - à l'égard même de démarches qui, sur le plan intellectuel, m'apparaissaient suspectes ou peu fondées. Bien que physicien de formation, Pierre Delattre ne partageait en aucune manière le dogmatisme, voire la morgue, qui caractérise assez souvent les spécialistes de cette discipline; trop souvent, en effet, les physiciens sont prompts à transférer dans d'autres domaines (scientifiques ou humains) cette rigueur et cette précision implacable des lois physiques qu'ils ne cessent d'exploiter dans leur domaine. De sa formation initiale, Pierre Delattre n'avait retenu, je crois, que le sens de la rigueur intellectuelle, celle de la démonstration mathématique. Il avait d'emblée le sentiment de l'originalité propre de chaque domaine disciplinaire et du respect que cette spécificité demande. Dès qu'il eut à s'occuper de dosimétrie, les théorisations hâtives et fragmentaires qui caractérisent les connaissances reçues en ce qui concerne l'effet des radiations sur les êtres vivants ne manquèrent pas de le frapper par leurs insuffisances. De là - sur le plan de sa carrière - des difficultés avec la hiérarchie, ou ses collègues. Mais sur le plan scientifique proprement dit, il est certain que ses premières réflexions sur ce problème furent le germe de ce qui devait constituer plus tard son oeuvre essentielle, la théorie des systèmes de transformation. C'est au cours des années 1967-70 que fut élaborée cette théorie. Par des considérations classiques de cinétique chimique, Pierre fut amené, devant la complexité des systèmes différentiels ainsi obtenus, à proposer des simplifications; elles furent de deux types : l'une consiste à préciser l'effet des champs sur les réactions chimiques dans un formalisme approprié (approximation linéaire); l'autre réside dans l'introduction du point de vue qualitatif : rappelons que cette opération consistait à associer à toute les espèces chimiques α d'un système réactif un sommet $c(\alpha)$ d'un graphe orienté Γ ; à tracer une arête orientée joignant le sommet $c(\alpha)$ à $c(\beta)$ s'il existait une réaction du système au