



HAL
open science

Changement catégoriel et transition de phase : les catégories perceptives comme des attracteurs

Emmanuel Viglieno

► **To cite this version:**

Emmanuel Viglieno. Changement catégoriel et transition de phase : les catégories perceptives comme des attracteurs. Psychologie. Université Paul Valéry - Montpellier III, 2013. Français. NNT : 2013MON30043 . tel-00958335

HAL Id: tel-00958335

<https://theses.hal.science/tel-00958335v1>

Submitted on 12 Mar 2014

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.

UNIVERSITE PAUL VALERY – MONTPELLIER III
Arts, Lettres, Langues, Sciences Humaines et Sociales
ED 60 – Territoires, Temps, Société et Développement
Laboratoire Epsilon – EA 4556

Thèse présentée par

Emmanuel VIGLIENO

Pour l'obtention du grade de Docteur en Psychologie Cognitive

De l'Université de Montpellier III

**CHANGEMENT CATEGORIEL ET TRANSITION DE PHASE :
LES CATEGORIES PERCEPTIVES COMME DES ATTRACTEURS**

Sous la direction de Manuel JIMÉNEZ

Membres du jury :

| | | |
|---------------------|--|--------------|
| Paul VAN GEERT | Professeur – Université de Groningen | (Rapporteur) |
| Rémy VERSACE | Professeur – Université de Lyon 2 | (Rapporteur) |
| Manuel JIMÉNEZ | MCF HDR – Université de Montpellier 3 | (Directeur) |
| Per Giorgio ZANONE | Professeur – Université de Toulouse 3 | (Examineur) |
| Christophe GERNIGON | Professeur – Université de Montpellier 1 | (Examineur) |
| Denis BROUILLET | Professeur – Université de Montpellier 3 | (Examineur) |

Mai 2013

REMERCIEMENTS

A l'heure où cette thèse arrive à sa fin, j'ai une pensée pour les personnes dont les chemins ont croisé le mien tout au long de ces cinq années et dont chacune d'une manière ou d'une autre a contribué, substantiellement ou modestement, intentionnellement ou pas, à faire que cette thèse devienne ce qu'elle est et qu'elle arrive à son terme. Trop nombreuses, pour que je puisse toutes les citer et même me rappeler individuellement de chacune d'elles à cet instant, je tenais malgré tout à mentionner celles d'entre elles qui furent les plus remarquables et leur adresser mes plus sincères remerciements et je m'excuse par avance auprès de celles qui échapperaient à ma mémoire et dont la mention serait malgré tout légitime.

Pour commencer, je voudrais témoigner ma gratitude à **Manuel Jiménez**, pour m'avoir encadré, accompagné et soutenu depuis sept ans dans cette longue route qui a conduit à ce projet un peu fou qu'est la rédaction d'une thèse. Pour sa gentillesse, sa sagesse, et pour toute la discrétion, le respect et l'humilité avec laquelle, toujours, il a su m'encourager, distiller ses conseils et me soutenir, parfois dans les pires moments de doute. Je le remercie pour ses qualités d'écoute, sa patience infinie et son amitié.

Merci aux professeurs **Paul Van Geert** et **Rémy Versace**, pour m'avoir fait l'honneur d'être les rapporteurs de cette thèse, pour leur expertise et leurs critiques qui valorisent mon travail et me permettent de le mettre en perspective afin de le faire évoluer. Merci aussi au professeur **Pier Giorgio Zanone** d'avoir accepté de participer au jury de ma thèse malgré une période et un emploi du temps chargé.

Je remercie également les professeurs **Christophe Gernigon** et **Denis Brouillet** pour leur participation au jury de la thèse, pour m'avoir fait bénéficier de leur expérience et pour représenter et soutenir l'enjeu de la dynamique au sein du laboratoire Epsilon. Mention spéciale

à Denis Brouillet à qui je dois d'avoir été celui qui a suscité mon intérêt pour la dynamique dès les premières heures de mon parcours.

Tous ceux qui avec qui j'ai pu avoir des échanges qui m'ont permis d'enrichir ma vision personnelle et d'améliorer ma démarche. Merci à **Lionel Brunel** pour ses nombreux conseils, sa lecture attentive et ses remarques constructives. Merci à **Walid Briki** pour les échanges trop rares sur le domaine de la dynamique et par lesquels, nous avons pu mutuellement nous soutenir quand cela devenait particulièrement difficile à certains moments et sur bien des plans. A **Raphaël Trouillet** pour nos nombreux échanges et parce qu'il a su saisir le formidable horizon que pourrait représenter l'approche dynamique pour l'avenir de la psychologie cognitive à Montpellier. Merci à **Laurent Munilla**, **Laurent Ferrier** et **Thibaut Brouillet** pour nos nombreuses discussions enrichissantes et pour m'avoir fait partager leur expérience de l'aventure compliquée qu'est la thèse.

J'adresse, bien sûr, ma reconnaissance à tous ceux qui ont participé à l'activité fastidieuse de la relecture d'un texte par lequel ils n'étaient souvent pas concernés. Merci à mon père **Francis**, ma sœur **Hélène**, à **Emmanuelle** et **Geneviève**, ainsi que tous ceux déjà cités et qui ont par ailleurs participé. Le travail minutieux et particulièrement efficace qu'ils ont accompli est d'une valeur considérable pour la qualité de ce document.

D'une manière générale, je veux remercier ceux de mon entourage, qui m'ont soutenu par leur amitié, leur confiance et leurs encouragements. Ceux qui n'ont fait que « simplement » me supporter et me comprendre. Merci à ma famille qui n'a jamais douté de moi. A **Julien**, parce qu'au labo, tu es une âme en écho à la mienne. Tout mon soutien et mes encouragements à ceux encore en devenir, et en particulier **Audrey**, **Caroline**, **Thomas** et **Clémence**, merci pour votre bonne humeur, ne la perdez pas dans ce qui va suivre.

Enfin, parce que l'on commence par le plus important mais que l'on finit par l'essentiel, je veux ici témoigner tout l'admiration, le respect et l'amour que j'ai pour celle sans qui cette thèse n'existerait simplement pas. A **Delphine** qui au long de toutes ces années m'a accompagné et a partagé avec moi le poids de lourds moments de doutes et d'incertitude en l'avenir. Elle qui a su se sacrifier et souffrir en silence et avec abnégation afin que je réalise ce projet. A elle qui, chaque matin depuis le commencement s'est levée aux aurores pour aller faire un travail pénible et harassant pendant de longues journées éprouvantes, mettant entre parenthèse sa propre détermination pour que je puisse m'adonner, sereinement et sans contrainte, à la réalisation de ce travail et le mener à terme. Je lui dois tellement que ces simple lignes ne sont qu'un témoignage dérisoire de ma gratitude et en aucun cas, une juste rétribution pour le rôle immense qu'elle a joué dans cette thèse, mais aussi dans ma vie. Aussi, c'est avec humilité que je veux lui dédier entièrement ce travail.

RESUME

Les catégories perceptives sont des éléments fondamentaux dans l'étude du fonctionnement du système cognitif. Elles traduisent la faculté du système cognitif à organiser un environnement continu et fluctuant selon des entités stables et discrètes. Classiquement, les catégories perceptives sont traitées comme des entités computo-symboliques constituées au terme d'un processus de traitement de l'information. Dans cette thèse, nous proposons une modélisation alternative qui repose sur la théorie des systèmes dynamiques. Selon l'hypothèse dynamique en psychologie cognitive, les catégories perceptives sont des attracteurs du système cognitif. En conséquence, deux phénomènes particuliers devraient pouvoir être mis en évidence lors de l'activité de catégorisation. Le premier d'entre eux, la transition de phase, est la forme du changement entre deux attracteurs catégoriels. D'après la théorie des catastrophes, elle se manifeste notamment au travers d'effets non linéaires tels que l'hystérèse, la divergence et le ralentissement critique. Le second, la stabilité, traduit la faculté d'un attracteur catégoriel à se maintenir malgré les perturbations subies par le système. Dans un premier temps, nous avons mis en évidence les marqueurs de l'hystérèse, de la divergence et du ralentissement critique dans une tâche de catégorisation perceptive à choix forcé à deux modalités à partir de séries de dessins représentant un visage d'homme ou une silhouette de femme. Cette tâche a été déclinée dans six expérimentations menées auprès de 45 participants. Dans les trois premières expérimentations, nous avons fait varier le délai inter essai (ITI) selon trois valeurs (200, 550 et 900ms) et nous avons observé la divergence par une évolution de la taille de l'effet d'hystérèse en fonction de l'ITI. En parallèle, un pic des temps de réponses au voisinage du changement catégoriel révélait le ralentissement critique de la période de relaxation du système. L'indice de convexité du front montant du pic des temps de réponses a montré une évolution similaire à

celle de la taille de l'effet d'hystérèse. Lors des trois expérimentations suivantes, nous avons testé les effets d'une tâche de distraction, d'une tâche de renforcement et du bruit externe sur les indicateurs de la transition de phase. Chacun de ces facteurs nous a permis de montrer que l'évolution de la divergence se faisait selon leur impact supposé sur la stabilité de l'attracteur catégoriel. Tous les résultats obtenus lors de ces six premières expérimentations étaient en accord avec le modèle de la France pour les transitions de phase. Enfin, dans une dernière expérimentation, nous avons étudié l'évolution de la stabilité de l'attracteur catégoriel au travers celle des temps de réponses d'une tâche de catégorisation perceptive menée sur 65 participants. Nous avons manipulé la stabilité de l'attracteur catégoriel en la renforçant grâce à des répétitions (1, 2 ou 3). Et, nous avons mesuré l'évolution temporelle de l'effet de la stabilité sur les temps de réponses catégorielles en manipulant l'ITI (200, 400, 700 et 1000ms). Nous avons mis en évidence une phase d'ascension et une phase de déclin de la stabilité. Et, nous avons montré que la durée de ces deux phases était fonction du nombre de renforcements subis par l'attracteur catégoriel. De cette façon, nous avons validé l'hypothèse de stabilité des catégories en montrant que celle-ci n'était pas linéaire. L'ensemble des observations que nous avons pu faire suggère que l'activité de catégorisation perceptive s'apparente fortement à une dynamique non linéaire comme on peut l'observer dans un système complexe.

Mots clefs : *Perception, Cognition, Catégorisation Perceptive, Systèmes Dynamiques, Théorie des Catastrophes, Hystérèse, Divergence, Transition de Phase, Attracteurs, Stabilité*

SUMMARY

Perceptive categories are fundamental elements of the cognitive system's functioning. They reveal the system's ability to organize a continuous and fluctuating environment in stable and discrete entities. According to the classical approach, perceptive categories are processed as computational symbolic entities created as a product of a data analysis process. In this thesis, we are proposing an alternative modeling that relies on the theory of dynamic systems. In line with the dynamics hypothesis in cognitive psychology, perceptive categories are attractors of the cognitive system. As a consequence, two specific phenomena should occur during the categorization process. According to the first phenomenon, the shape taken by the change between two categorical attractors is that of a phase transition. According to catastrophe theory, it manifests itself through non-linear effects such as hysteresis, divergence and critical slowing down. The second phenomenon, stability, represents a categorical attractor's ability to self-maintain in spite of disturbances in the system. First, we highlighted the hysteresis, divergence and critical slowing down markers in a two-alternative forced choice task with a series of drawings representing a man's face or a woman's figure. This task was reproduced in six different experiments with 45 participants. In the first three experiments, we gave the intertrial interval (ITI) three different values (200, 550 and 900ms) and observed the divergence represented by an evolution in the size of the hysteresis effect depending on the ITI. In parallel, a peak in the response time in the neighborhood of the categorical change revealed the critical slowing down of the system's relaxation time. The rising edge convexity index of the response time peak showed a similar evolution to that of the hysteresis effect size. During the next three experiments, we tested the effects of a distraction task, a reinforcement task and external noise on the phase transition indicators. Each of these factors allowed us to demonstrate that the

divergence's evolution was linked to the factors' supposed impact on the stability of the categorial attractor. All the results in the first six experiments were congruent with the Cusp model of the phase transition. In a last experimentation, we studied the evolution of the categorial attractor's stability through that of the response time of a perceptive categorization task done with 65 participants. We handled the categorial attractor's stability by reinforcing it with repetitions (1, 2 or 3). Furthermore, we measured the temporal evolution of the effect of stability on the categorial response time by changing the ITI (200, 400, 700 and 1,000ms). We highlighted a rising phase and a falling phase in stability. And we showed that the time scale of these two phases was dependent on the number of reinforcements on the categorial attractor. In this manner, we validated the hypothesis of category stability, demonstrating also that it was not linear. All these observations suggest that the process of perceptive categorization is highly related to non-linear dynamics, as observed in complex systems.

Key words: Perception, perceptive categorization, dynamic systems, catastrophes theory, hysteresis, divergence, phase transition, attractors, stability

SOMMAIRE

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCTION..... | 1 |
| I - CATEGORISATION, PERCEPTION ET MEMOIRE..... | 6 |
| 1.1 Définition et fonction du concept de catégorisation..... | 8 |
| 1.2 Catégorisation et perception | 10 |
| 1.2.1 <i>Catégorisation par induction.....</i> | <i>10</i> |
| 1.2.2 <i>Catégorisation descendante.....</i> | <i>11</i> |
| 1.2.3 <i>Catégorisation par appariement.....</i> | <i>12</i> |
| 1.2.4 <i>Catégorisation par synthèse.....</i> | <i>13</i> |
| 1.2.5 <i>Discussion.....</i> | <i>16</i> |
| 1.3 Catégorisation et mémoire | 18 |
| 1.3.1 <i>Catégorisation piagétienne.....</i> | <i>18</i> |
| 1.3.2 <i>Modèles prototypiques</i> | <i>19</i> |
| 1.3.3 <i>Modèles à frontières décisionnelles</i> | <i>21</i> |
| 1.3.4 <i>Modèles à exemplaires.....</i> | <i>22</i> |
| 1.3.5 <i>Limites des modèles cognitivistes</i> | <i>24</i> |
| II - POINT DE VUE EPISTEMOLOGIQUE DE LA PERCEPTION | 27 |
| 2.1 Réalisme et constructivisme de la perception..... | 27 |
| 2.2 Problème métrologique de la connaissance..... | 28 |
| 2.3 Naissance du constructivisme..... | 31 |
| 2.4 De la première à la seconde cybernétique : l'auto-organisation..... | 33 |
| 2.5 De l'auto-organisation à l'autoproduction : un cercle vertueux | 36 |
| III - LES SYSTEMES DYNAMIQUES : UN META-PARADIGME POUR PENSER LE COMPLEXE..... | 38 |
| 3.1 Le système cognitif comme un système dynamique complexe | 39 |
| 3.2 La complexité | 40 |
| 3.3 Notion de dynamique | 42 |
| 3.4 Le concept de système..... | 44 |
| 3.5 L'approche systémique | 46 |
| 3.6 Naissance de la dynamique des systèmes | 49 |
| 3.7 Théorie des systèmes dynamiques | 50 |

| | | |
|--|--|-----------|
| 3.7.1 | <i>Définitions</i> | 50 |
| 3.7.2 | <i>Loi d'évolution d'un système dynamique</i> | 51 |
| 3.7.3 | <i>Résolution d'un système dynamique : l'obstacle de la non linéarité</i> | 54 |
| 3.7.4 | <i>Notion d'attracteurs</i> | 55 |
| 3.7.5 | <i>La fonction de potentiel, un cas particulier du champ de potentiel</i> | 59 |
| 3.7.6 | <i>Etat stable dans un système dynamique</i> | 62 |
| 3.8 | <i>Téléologie des systèmes dynamiques non linéaires</i> | 62 |
| 3.8.1 | <i>L'entropie comme unique cause de la dynamique des systèmes autonomes</i> | 63 |
| 3.8.2 | <i>Entropie et gradient de concentration électronique : la force électromotrice</i> | 65 |
| 3.8.3 | <i>Entropie et gradient de concentration chimique : les courants ioniques</i> | 66 |
| 3.8.4 | <i>Entropie et répartition des forces dans un système mécanique : le travail</i> | 67 |
| 3.8.5 | <i>Entropie et mécanisme de normalisation sociale : de la singularité à l'uniformisation des comportements</i> | 68 |
| 3.8.6 | <i>De l'entropie thermodynamique à l'entropie systémique</i> | 68 |
| 3.9 | <i>L'ordre par le chaos</i> | 69 |
| IV - L'HYPOTHESE DYNAMIQUE EN PSYCHOLOGIE COGNITIVE | | 72 |
| 4.1 | <i>La théorie synergétique</i> | 74 |
| 4.1.1 | <i>De la variable collective au paramètre d'ordre et de contrôle</i> | 75 |
| 4.1.2 | <i>Notion de patterns auto-entretenus</i> | 76 |
| 4.1.3 | <i>Les piliers de la synergétique</i> | 79 |
| 4.2 | <i>La transition de phase</i> | 80 |
| 4.3 | <i>Modèles synergétiques et psychologie de la perception</i> | 81 |
| 4.3.1 | <i>Les travaux fondateurs</i> | 81 |
| 4.3.2 | <i>Catégorisation du langage et synergétique</i> | 84 |
| 4.3.3 | <i>Synergétique et perception visuelle du mouvement</i> | 89 |
| 4.3.4 | <i>La catégorisation perceptive et la synergétique</i> | 92 |
| 4.4 | <i>Définition d'un paradigme de mesure de l'hystérèse</i> | 97 |
| 4.4.1 | <i>L'hystérèse comme phénomène et indicateur de non linéarité</i> | 97 |
| 4.4.2 | <i>Approche morphodynamique des transitions de phase dans la cognition : au-delà de l'hystérèse, la divergence</i> | 100 |
| 4.5 | <i>Théorie des catastrophes et catégorisation</i> | 102 |
| 4.5.1 | <i>La fronce et ses indicateurs de catastrophe</i> | 103 |
| 4.5.2 | <i>Fronce et transition de phase</i> | 107 |
| 4.5.3 | <i>Les applications de la fronce</i> | 108 |

| | | |
|--|---|------------|
| 4.5.4 | <i>Tester le modèle de la fronce à partir de données empiriques</i> | 110 |
| 4.5.5 | <i>Méthode semi-qualitative : la détection de catastrophe</i> | 113 |
| 4.5.6 | <i>Les marqueurs de la transition de phase</i> | 114 |
| 4.5.7 | <i>Processus dynamiques et mesure du temps</i> | 118 |
| 4.5.8 | <i>Applications de la méthode de détection des catastrophes</i> | 119 |
| 4.6 | Approche dynamique et théorie des catastrophes : un paradigme d'étude pour la psychologie de la perception et la catégorisation perceptive | 122 |
| V - PRESENTATION DE LA PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE | | 124 |
| 5.1 | Positionnement théorique et épistémologique..... | 124 |
| 5.2 | Plan expérimental | 128 |
| VI - HYPOTHESE CHRONOMETRIQUE DE DIVERGENCE | | 132 |
| 6.1 | Expérimentation I.1 : Tâche de choix forcé à deux alternatives avec bistabilité, hystérèse et ralentissement critique – Condition : intervalle inter-essais 200ms | 132 |
| 6.1.1 | <i>Protocole expérimental</i> | 132 |
| 6.1.2 | <i>Prédictions expérimentales</i> | 135 |
| 6.1.3 | <i>Analyse des réponses : hystérèse et bistabilité</i> | 135 |
| 6.1.4 | <i>Analyse des temps de réponse</i> | 140 |
| 6.2 | Expérimentation I.2 et I.3 : hypothèse chronométrique de divergence – conditions ITI550ms et ITI900ms..... | 148 |
| 6.2.1 | <i>Protocole expérimental</i> | 149 |
| 6.2.2 | <i>Prédictions expérimentales</i> | 150 |
| 6.2.3 | <i>Résultats des séries pseudo-aléatoires en situation ITI550ms et 900ms</i> | 150 |
| 6.2.4 | <i>Analyse de réponses des séries progressives : hystérèse et divergence</i> | 151 |
| 6.3 | Mise en évidence des marqueurs de catastrophe..... | 153 |
| 6.3.1 | <i>Evolution de la taille de l'effet d'hystérèse : l'effet de divergence</i> | 153 |
| 6.3.2 | <i>Analyse des temps de réponse : Ralentissement critique et évolution de la convexité</i> | 155 |
| VII - FACTEURS QUALITATIFS DE DIVERGENCE | | 158 |
| 7.1 | Expérimentation II.1 : Tâche concurrente distractive | 158 |
| 7.1.1 | <i>Protocole expérimental</i> | 158 |
| 7.1.2 | <i>Prédictions expérimentales</i> | 160 |
| 7.1.3 | <i>Résultats de la tâche de décision lexicale</i> | 160 |
| 7.1.4 | <i>Résultats de la tâche de catégorisation</i> | 161 |
| 7.1.5 | <i>Discussion</i> | 164 |

| | | |
|---|--|------------|
| 7.2 | Expérimentation II.2 : Tâche concurrente renforçatrice | 164 |
| 7.2.1 | <i>Protocole expérimental</i> | 165 |
| 7.2.2 | <i>Prédictions expérimentales</i> | 166 |
| 7.2.3 | <i>Résultats de la tâche de certitude</i> | 167 |
| 7.2.4 | <i>Résultats de la tâche de catégorisation</i> | 168 |
| 7.2.5 | <i>Discussion</i> | 171 |
| 7.3 | Expérimentation II.3 : Effet du bruit sur la stabilité..... | 172 |
| 7.3.1 | <i>Protocole expérimental</i> | 174 |
| 7.3.2 | <i>Prédictions expérimentales</i> | 175 |
| 7.3.3 | <i>Résultats de la tâche d'auto-évaluation de certitude</i> | 175 |
| 7.3.4 | <i>Résultats de la tâche de catégorisation</i> | 176 |
| 7.3.5 | <i>Discussion</i> | 179 |
| 7.4 | Synthèse du modèle catastrophique de la fronce | 179 |
| VIII - ETUDE DE LA STABILITE DES ATTRACTEURS CATEGORIELS | | 182 |
| 8.1 | Modèle d'évolution temporelle de la stabilité des attracteurs catégoriels | 183 |
| 8.2 | Expérimentation III : validation du modèle d'évolution de stabilité. | 185 |
| 8.2.1 | <i>Protocole expérimental</i> | 186 |
| 8.2.2 | <i>Prédictions expérimentales</i> | 189 |
| 8.2.3 | <i>Résultats</i> | 189 |
| 8.2.4 | <i>Effet de la stabilité de l'attracteur catégoriel sur les temps de réponse</i> | 194 |
| 8.2.5 | <i>Discussion</i> | 196 |
| DISCUSSION GENERALE..... | | 198 |
| CONCLUSION..... | | 203 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | | 214 |

INTRODUCTION

Nous postulons que l'une des fonctions fondamentales de la cognition est la création et l'identification d'éléments stables et discrets au sein d'un environnement matériel continu et fluctuant. Cette fonction, autrement nommée catégorisation perceptive, est omniprésente dans la cognition et indispensable à l'organisation perceptive afin d'assurer la survie de l'individu. Mais différents points de vue théoriques existent et, parfois, s'opposent sur la façon de décrire la catégorisation et de définir les catégories. Cette thèse défend l'idée que le système cognitif possède les attributs d'un système dynamique. Par conséquent, les catégories perceptives peuvent être appréhendées comme les attracteurs d'un système dynamique non linéaire au sein duquel le changement de catégorie constitue une transition de phases entre deux attracteurs. Les concepts théoriques d'attracteur et de transition de phase apportent, par leur définition et leur nature, des éléments théoriques qui permettent de décrire, d'expliquer et de prédire le comportement du système cognitif engagé dans une activité de catégorisation perceptive. Ces éléments peuvent être l'objet d'une investigation conduisant à la validation expérimentale des prédictions faites dans le cadre de l'approche dynamique de la cognition. Ce que nous avons réalisé au travers de cette thèse.

Le présent document se découpe en huit chapitres de nature théorique ou expérimentale. Dans une première partie, notre démarche consiste à amener progressivement l'approche dynamique de la cognition au travers d'une discussion à propos du concept de catégorie et des principales approches théoriques existantes dans le cadre de la perspective computo-symbolique. Pour ce faire, nous introduisons une description sommaire de la catégorisation perceptive et des liens qu'elle entretient dans la littérature avec la mémoire, la perception et, d'une manière plus générale, la cognition (Chapitre I).

L'objectif de ce chapitre n'est pas d'offrir une revue exhaustive des travaux sur la catégorisation perceptive en psychologie cognitive, mais de présenter une synthèse qui permette de donner un point de vue rapide et global sur l'ensemble des conceptions théoriques en lien avec le sujet. Et ainsi, de faire ressortir de ces différents modèles et approches, certaines limites d'une part, mais aussi les éléments saillants qui permettent de faire un pas en direction d'une perspective dynamique d'autre part. Ensuite, nous portons la réflexion au niveau épistémologique (Chapitre II) en discutant notamment le concept d'information intrinsèque et l'hypothèse du traitement de l'information qui en découle presque naturellement. Nous prenons position pour une perspective qui ne pose pas le postulat que le monde contient en soi une information indépendante de l'observateur qui en a l'usage. Nous précisons et intégrons notre position au travers de l'épistémologie constructiviste que nous prenons soin de présenter et de définir en détail pour, finalement, parvenir au concept d'auto-organisation qui sera la base conceptuelle de la théorie des systèmes dynamiques. Par la suite, l'approche dynamique est présentée en détail (Chapitre III) comme un méta-paradigme permettant de comprendre et de modéliser les phénomènes complexes auxquels nous associons la cognition en général et la catégorisation perceptive en particulier. Nous discutons un certain nombre de concepts fondamentaux telles que les notions de dynamique, de complexité, d'émergence et de système, avant de faire une synthèse générale de la théorie des systèmes dynamiques. Dans cette section, nous définissons de façon approfondie le concept d'attracteur, son rôle au sein de la théorie et, en particulier, sa principale caractéristique : la stabilité. Le chapitre se termine sur une discussion autour de l'augmentation de la complexité dans les systèmes dynamiques non linéaires et son lien en apparence contradiction avec le second principe de la thermodynamique. Nous nous arrêtons un instant sur le concept d'entropie et, au travers d'exemples, nous montrons comment, à lui seul, ce concept constitue une explication

téléologique de la dynamique des systèmes complexes. Une fois les bases de la dynamique non linéaire posées, nous transposons la théorie dans le cadre de la psychologie cognitive (Chapitre IV). En particulier, nous discutons les apports de la théorie synergétique à la psychologie cognitive en présentant les principaux travaux dans le domaine de la catégorisation. Dans un second temps, nous introduisons la théorie des catastrophes en discutant les avantages de cette approche relativement à la théorie synergétique. Ces deux théories sont issues de la théorie des systèmes dynamiques, mais opèrent, selon nous, à différents niveaux. Pour atteindre notre objectif, il nous a semblé plus pertinent de nous situer dans le cadre de la théorie des catastrophes. C'est pourquoi, nous présentons en détail le modèle issu de la catastrophe de la fronce. En particulier, nous montrons comment un tel modèle rend compte des principales caractéristiques d'une transition de phase. Nous nous arrêtons notamment sur le phénomène d'hystérèse, largement exploré dans la littérature, ainsi que sur les phénomènes de divergence et de ralentissement critique.

Ce sont ces trois phénomènes que nous avons mis en évidence dans nos expérimentations afin de valider le modèle de la fronce et l'hypothèse générale de la transition de phase lors d'un changement de catégorie perceptive. Pour ce faire, nous les avons testés par le biais d'une tâche de choix forcé à deux modalités (Chapitre VI et VII) à partir d'une série d'images, produites par Fisher (1963), évoluant progressivement depuis le visage d'un homme à la silhouette d'une femme. Au travers d'une série de six expérimentations basées sur le même protocole, nous mettons en évidence l'effet d'hystérèse et de divergence, ainsi qu'un phénomène de ralentissement critique des temps de réaction au voisinage du changement catégoriel. Le postulat commun à cette série de six expérimentations est que la stabilité des attracteurs est le principal facteur de divergence. C'est pourquoi nous manipulons des facteurs susceptibles d'avoir un impact sur la stabilité.

Les trois premières expérimentations (I.1, I.2 et I.3) portent sur la validation de l'hypothèse chronométrique de divergence, pour laquelle nous affirmons que, la stabilité d'un attracteur catégoriel déclinant naturellement avec le temps, nous pouvons observer la conséquence au travers d'un effet de divergence. A cette fin, nous manipulons le délai inter-essais selon trois valeurs (200ms, 550ms et 900ms). Les trois expérimentations suivantes (II.1, II.2 et II.3) explorent chacune un facteur qualitatif de divergence différent. L'expérimentation II.1 montre qu'une activité distractive provoque une perte de stabilité à court terme de l'attracteur catégoriel et a un impact sur l'effet de divergence. Dans l'expérimentation II.2, nous montrons qu'une tâche relative à l'attracteur a pour effet de renforcer la stabilité de cet attracteur, ce qui s'observe par un effet inverse de celui obtenu lors de l'expérimentation II.1. Et enfin, dans l'expérimentation II.3, nous testons l'effet du bruit externe sur la stabilité de l'attracteur catégoriel. Le bruit externe, ici sous la forme de flou dans les images utilisée, est une cause de libération des degrés de liberté du système. Un plus grand nombre de degré de liberté engendre un temps de relaxation plus long, mais aussi une meilleure stabilité de l'attracteur catégoriel.

Dans la dernière partie de la section expérimentale, nous explorons la loi d'évolution de la stabilité d'un attracteur catégoriel en fonction de deux facteurs supposés avoir une influence sur celle-ci (Chapitre VIII). Le premier facteur de l'étude est le délai inter-essais qui, comme nous l'avons constaté dans les expérimentations I.1 à I.3, peut être un facteur de déclin naturel de stabilité. Nous pouvons voir que ceci dépend de la période de l'évolution dans laquelle se trouve l'attracteur. Ainsi, nous montrons que la stabilité passe par une première phase d'ascension asymptotique. Puis, s'en suit deux phases de déclin. La première, exponentielle, est immédiatement suivie par une phase de déclin asymptotique qui laisse une forme de stabilité résiduelle. Le deuxième facteur de l'étude est le potentiel

maximal de stabilité de l'attracteur que nous manipulons à partir du nombre de renforcements de celui-ci. Un attracteur possède un potentiel de stabilité d'autant plus important qu'il a été renforcé par un nombre successif de sollicitations. Ainsi, la catégorisation de trois images correspondant à la même catégorie engendre un attracteur plus stable que si seulement deux images de la même catégorie avaient été présentées. Les temps de réponse sont utilisés dans cette expérimentation comme quantificateurs de la stabilité de l'attracteur. Le principe repose sur le fait que le temps de relaxation d'un système dynamique dépende de la stabilité de l'attracteur. Plus l'attracteur est stable et meilleurs sont les temps de réponse. Les résultats montrent non seulement que la stabilité de l'attracteur évolue dans le temps de façon non linéaire, mais que la durée des différentes phases est bien fonction du potentiel de stabilité maximale.

L'ensemble des résultats obtenus au travers des sept expérimentations que compte notre étude nous a permis de renforcer notre compréhension de l'approche théorique utilisée dans le cadre de la catégorisation perceptive. En mettant en évidence les marqueurs usuels de la transition de phase pendant un changement catégoriel, nous montrons qu'un modèle dynamique répond aux exigences d'explication du phénomène étudié et nos résultats permettent de renforcer la validité de l'hypothèse dynamique en psychologie cognitive. De plus, l'évolution des performances de catégorisation et des temps de réactions est conforme aux prédictions du modèle, que ce soit celui de la fronce (Chapitre VI et VII) ou celui de l'évolution de la stabilité proposé dans la dernière partie (Chapitre VIII).

I - CATEGORISATION, PERCEPTION ET MEMOIRE

En sciences humaines, comme dans d'autres domaines scientifiques, la modélisation est une démarche nécessaire, non pas parce qu'elle explique mais parce qu'elle ouvre la voie à de nouvelles observations empiriques (Bunge, 1967). Dans le cas de l'étude de la cognition, la modélisation a souvent été d'inspiration intellectualiste : depuis Platon, en passant par d'Aquin ou Descartes, la cognition est considérée comme un ensemble de processus logiques, reflétant le primat du raisonnement sur la sensation. Plus encore, dans le cadre de la perception humaine, l'esprit ne pourrait dépasser les vicissitudes des changements d'apparence des objets que par le jugement, qui fournit la constance de l'objet (Descartes) ou des grandeurs (Malebranche) par exemple. La Gestalttheorie, en contestant l'intellectualisme, ne fait que déplacer le découpage et la stabilité des objets au monde lui-même : la même organisation se retrouverait dans l'environnement et dans sa perception.

Ces modélisations ne s'opposent pas à une approche adaptative de la cognition et de la perception. L'être vivant ne peut interagir qu'avec un environnement stable en réduisant l'immense variabilité du monde sensible par la catégorisation : *"Le premier [processus essentiel] est une propriété que tous les animaux partagent, la catégorisation perceptive, c'est-à-dire l'aptitude à découper des signaux en catégories utiles pour une espèce donnée dans un environnement qui suit les lois physiques, mais qui ne contient pas en lui-même ces catégories"* (Edelman & Tononi, 2000, p. 127).

En effet, un postulat, que nous pouvons facilement accepter, est qu'à chaque instant nous découpons et organisons un monde continu et fluctuant en catégories discrètes et stables. Ces catégories nous servent à traiter le monde selon un mode de pensée qui

s'adapte d'ailleurs étonnamment à la structure séquentielle et sémantique de notre langage articulé. Pour une majorité de chercheurs, la catégorisation serait une activité essentielle de la perception. Elle en constitue même la base selon certains auteurs comme Bruner, Goodnow, et Austin (1956) ou Varela, Thompson, et Rosch (1993). C'est pourquoi les modèles de la catégorisation sont un enjeu majeur des recherches sur la perception. Plus largement, l'étude de la catégorisation peut même être considérée comme fondatrice de la psychologie expérimentale d'un point de vue historique. Cette question était aussi bien présente chez les behavioristes que chez les gestaltistes (Heidbreder, 1924; Hull, 1920; Meili, 1926; Thorndike, 1913).

Bien avant Aristote, une position prévalait dans la conception que l'on se faisait de la catégorisation. C'est pourquoi on lui donne souvent aujourd'hui le nom de position classique. Cette position classique bénéficie d'ailleurs d'une littérature plus qu'abondante (voir notamment Cordier et Dubois (1985) et Medin et Smith (1984)). Selon cette approche, la catégorisation consiste à déterminer si une entité possède simultanément les propriétés nécessaires et suffisantes qui définissent une catégorie donnée. Ainsi, les catégories sont des entités (ou classes) aux frontières clairement et objectivement délimitées. De même, un objet appartient ou n'appartient pas à une catégorie donnée (attribution exclusive). Il résulte que puisque l'appartenance est l'unique dimension variable, chaque membre d'une même catégorie a un statut identique du point de vue d'une catégorie donnée. Par exemple, on ne demanderait jamais dans l'approche classique si la *truite* est plus un *poisson* que le *requin* car du point de vue catégoriel classique, il n'existe pas de différence entre la truite et le requin au sein de la catégorie des poissons.

1.1 Définition et fonction du concept de catégorisation

La définition de l'activité de catégorisation peut prendre différentes formes en psychologie, qui seront déterminantes lors de l'élaboration des modèles, mais il existe un consensus quant à certaines propriétés et fonctions de la catégorisation comme activité cognitive. L'activité de catégorisation est décrite comme un « *processus qui permet de regrouper des entités différentes dans une représentation unitaire, sur la base de leurs propriétés partagées* » (Cordier & François, 2002, p. 125). Cependant, une telle définition laisse planer une totale incertitude sur la constitution et la pertinence de ce que l'on nomme propriété et par ailleurs ne dit rien d'une éventuelle finalité du processus de catégorisation. Combien de propriétés l'intellect peut-il attribuer à une entité perceptive unique ? Peut-on tenir compte de toutes ces propriétés *a priori* lors du processus de catégorisation ? Pourquoi certaines d'entre elles semblent naturellement prégnantes ? Des questions auxquelles les modèles se fondant sur cette définition doivent répondre.

D'autre part, la catégorisation est vue aussi comme une « *conduite adaptative fondamentale qui permet à l'intelligence humaine de réduire la complexité et la diversité de l'environnement physique et social en l'organisant.* » (Bideaud & Houdé, 1989, p. 88). Une autre définition qui laisse supposer que l'organisation issue de l'activité de catégorisation n'est pas donnée par l'environnement mais probablement construite par le système cognitif. Et de plus, la qualité d'adaptativité d'une telle conduite induit que l'organisation émergente peut et doit être validée par une exigence de performance. La conjonction de ces deux observations implique une perspective dans laquelle l'activité de catégorisation est couplée avec l'action. Pour Richard (1994), la catégorisation remplit trois fonctions essentielles. (1) Elle permet de réduire la variabilité de l'environnement à un ensemble de dimensions restreintes, prégnantes eu égard à la perspective d'un comportement adapté. (2) Elle

produit une organisation de l'expérience perceptive par la saillance de propriétés qui deviendront constitutives du processus de catégorisation et dont les traitements cognitifs ultérieurs seront tributaires. (3) Elle permettra d'anticiper les possibilités d'action au travers de la structure corrélacionnelle des propriétés des exemplaires d'une même catégorie. L'une des conséquences directes de ces trois propriétés est l'amélioration des performances perceptivo-mnésiques ultérieures. Voilà pourquoi la catégorisation recoupe aussi bien le champ de la perception que celui de la mémoire et de l'apprentissage permettant d'en rendre possible l'unité. Enfin, pour Reuchlin (1977), la catégorisation consiste à associer à des objets différents une même réponse efficace, pour ceux-là et ceux-là uniquement. Cette définition induit la puissance intégrative et discriminative des catégories d'une manière plutôt écologique et pré-énactive.

La liste des définitions de la catégorisation n'est pas exhaustive et la plupart se recourent, bien entendu. C'est essentiellement sur la base de ce qui les sépare que des modèles différents peuvent voir le jour. Toutefois, le cadre conceptuel et épistémologique dans lequel la définition est interprétée peut conduire à des développements totalement différents. Mais elle reste malgré tout le socle sur lequel vont reposer les questions adressées aux modèles de la catégorisation. Ces derniers sont d'ailleurs nombreux et ont particulièrement évolué depuis ces trente dernières années.

Si la plupart des spécialistes en sciences cognitives s'accordent sur le caractère essentiel de la catégorisation perceptive, leurs points de vue diffèrent fortement au sujet de sa modélisation entre autres, certainement parce que les catégories résultantes ne sont pas dans l'environnement.

L'histoire de la psychologie cognitive dévoile, d'un côté, des travaux en perception s'occupant du comment on catégorise, et d'un autre côté des travaux sur la mémoire

concernant la nature et l'organisation des catégories préexistantes. Dans les sections suivantes, nous présenterons les modèles de la perception et de la mémoire issus de ces travaux, sans oublier cependant qu'ils supposent, pour la plupart, une approche conjointe de la perception et de la mémoire.

1.2 Catégorisation et perception

Nous inspirant en partie des quelques classifications récentes (Hampton, 2001; Murphy, 2002), nous considérons quatre groupes de modèles de la catégorisation perceptive : par induction, descendants, par appariement, par synthèse.

1.2.1 Catégorisation par induction

Les modèles de catégorisation par induction appliquent à la perception le classique syllogisme inductif aristotélicien : le percept doit présenter des caractéristiques, qualités ou propriétés spécifiées par des règles (Murphy, 2002), pour correspondre à une catégorie ou un concept donné.

Ces modèles sont, à notre connaissance, les plus anciens en psychologie (Hull, 1943). Ils se développent fortement avec l'école "*New Look*" anglo-saxonne au début de la deuxième moitié du XX^e siècle (Bruner, 1973). L'approche de Bruner en est exemplaire : les règles de catégorisation spécifient a/ les propriétés, b/ leur agencement (conjonction, relation, disjonction), c/ leur poids relatif, d/ leurs limites de tolérance (Bruner, 1957).

Empiriquement, beaucoup des travaux soutiennent les règles de l'induction, notamment pour les règles de conjonction et disjonction dans le cadre de l'apprentissage de catégories nouvelles (Bruner *et al.*, 1956). Mais d'autres observations ne les satisfont pas (voir, p.e., Margolis, 1994). Epistémologiquement, c'est l'idée même de propriété, qualité,

caractéristique ou trait, élément de base du syllogisme inductif perceptif, qui pose problème : la propriété serait aussi une catégorie résultant d'autres propriétés, plus élémentaires, qui seraient à leur tour des catégories et ainsi de suite. On retrouve le problème classique de l'élément primaire de la perception (voir, p.e., Rosenthal & Visetti, 1999). Prenons l'exemple princeps de Bruner (1957, p. 123) : "cette chose est ronde, sa surface n'est pas lisse, c'est de couleur orangée, de telle et telle dimension, c'est donc une orange". La qualité "surface non lisse" est une catégorie, tout autant que "rond", "orangé", "telle et telle dimension".

1.2.2 Catégorisation descendante

Beaucoup des travaux de l'école *New Look* ont surtout cherché à montrer le caractère constructiviste de la perception, se préoccupant essentiellement de la façon dont les catégories préalables nuancent les règles de catégorisations. Ceci est appelé "l'accessibilité" des catégories par Bruner (1957). Dès lors, l'accent est mis sur ce qu'on appellera, plus tard, des processus "descendants" ou "dirigés par des concepts" (Lindsay & Norman, 1977) : les catégories accessibles fonctionnent comme des "hypothèses perceptives" (Postman, 1951), prévoyant les propriétés qui doivent être induites du percept. Ces concepts se sont avérés fortement heuristiques : l'accessibilité peut être rapprochée de la fluence, la familiarité ou la disponibilité (Marewski, Gaissmaier, & Gigernenzler, 2010) et a été exportée dans la cognition sociale (p.e., Higgins, 1996). Dans le domaine strict de la perception, l'approche *New Look* a été plusieurs fois mise à jour : *New Look 2* (Erdelyi, 1974) et *New Look 3* (Greenwald, 1992) et a inspiré des modélisations proches (Gregory, 1997; Neisser, 1976). Récemment, Rensink (2002) et Auvray et O'Regan (2003) renouvellent l'étude de la cécité au changement avec une approche ouvertement descendante et active de la perception. On retrouve aussi la modélisation descendante dans certaines conceptions

neuropsychologiques, par exemple dans la "*Reverse Hierarchy Theory*" (Hochstein & Ahissar, 2002). Selon celle-ci, le processus perceptif réalise une première catégorisation globale, rapide et ascendante. Ensuite, si la tâche le requiert, des traitements descendants, attentionnels, fournirait les détails nécessaires (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

1.2.3 Catégorisation par appariement

Les modèles de catégorisation par appariement adoptent une position clairement montante ou "dirigée par des données". L'idée de l'appariement, tirée d'Hoffding (1891) et cité par Neisser (1967) : l'image sensorielle serait comparée, de façon globale ou probabiliste, avec un répertoire préalable de gabarits ou configurations, représentant les objets ou formes appris (Selfridge & Neisser, 1960). La réussite de la catégorisation dépend alors de la similarité avec une de ces représentations.

Cette approche est, dans beaucoup des cas, assez proche de la première, dans la mesure où l'appariement peut supposer la présence de caractéristiques nécessaires et suffisantes. Elles se différencient clairement, cependant, par la logique du processus de catégorisation : "par induction" pour l'approche que nous avons appelé ainsi, "par correspondance terme à terme pour l'appariement".

L'appariement n'échappe pas à deux critiques importantes. La taille du répertoire d'un être humain doit être extrêmement importante, freinant fortement la réussite de l'appariement (Pinker, 1984). Puis, la comparaison terme à terme est inadéquate pour la catégorisation d'un objet tridimensionnel, qui peut être en partie occulté, dont la présentation varie selon le point de vue et dont l'articulation des éléments peut varier avec le temps (Nevatia & Binford, 1977).

Certains ont proposé des mécanismes de mise à l'échelle et de rotation, déjà présents dans la proposition d'Hoffding (1891), pour palier quelque peu à ces critiques (p.e. Palmer, Rosch, & Chase, 1981; Ullman, 1989). D'autres ont fait appel aux prototypes pour réduire le problème (Rhodes, Brennan, & Carey, 1987).

Par ailleurs, des effets classiques comme la supériorité du mot (Reicher, 1969), de la forme (Pomerantz, Sager, & Stoeber, 1977), de l'objet (Weisstein & Harris, 1974) ou de la préséance globale (Navon, 1977) s'interprètent mieux par une similarité holistique que par une correspondance terme à terme. En effet, dans toutes ces situations, la catégorie globale est perçue avant celles des détails.

La récente approche *Coarse-to-fine* (Oliva & Torralba, 2001; Torralba & Oliva, 2003) concilie une première catégorisation globale, partant des basses fréquences, qui aiguille une catégorisation fine des détails issus des hautes fréquences (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). On est cependant bien plus proche des modèles de synthèse que des modèles d'appariement : l'approche *Coarse-to-fine* privilégiant l'émergence des catégories à partir des fréquences spatiales.

D'autres, finalement, ont réduit le nombre de caractéristiques et de catégories. Ce sont les modèles que nous appelons de catégorisation par synthèse.

1.2.4 Catégorisation par synthèse

Les modèles de catégorisation par synthèse se préoccupent de la genèse du percept ou de la représentation qui sera catégorisée. La catégorisation s'effectuerait ensuite, le plus souvent par appariement. Cependant les règles postulées pour la construction du percept deviennent aussi des règles de définition des catégories, pour justifier les premières. Ainsi, ces modèles proposent, en quelque sorte, que la catégorie est générée à chaque expérience

perceptive par la construction d'un percept, suivant quelques règles et éléments en nombre limité.

L'héritage associationniste a dominé les approches pré-cognitives de la catégorisation perceptive, en la faisant débiter par une analyse de la sensation en termes de traits fondamentaux (Boring, 1942). Dans les années soixante, Eleanor Gibson et ses collaborateurs ont publié plusieurs travaux suggérant les traits fondamentaux, ou du moins discriminants, de lettres catégorisées par des enfants (voir Neisser, 1967, pour une revue de question). Plus tard, (voir aussi Treisman, 1986); Treisman et Gelade (1980) présentent leur "théorie d'intégration des traits", qui accorde un rôle capital à la règle montante de conjonction. Cette règle ne s'appliquerait que de façon attentionnelle, ce qui permet, par un raisonnement circulaire, de repérer les "traits élémentaires", qui ne requièrent pas d'attention. Par exemple, "droit", "vertical", "parallèles", "rond", "longueur", "couleur", "luminance", seraient des traits élémentaires (Treisman, 1988; Treisman & Gelade, 1980). Après l'intégration attentionnelle des traits, le percept serait catégorisé en tant qu'objet par comparaison avec des représentations stockées en mémoire (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Le caractère étroitement associationniste de ces premières approches poussa à les combiner avec des définitions structurales du percept. On propose ainsi une description structurale, "décrivant la nature des éléments d'une configuration et explicitant l'arrangement structural de ces éléments" (Bruce & Green, 1990, p. 184).

Les modèles de "*recognition by components*" intègrent les caractéristiques et la structure dans des informations volumétriques, analogues à des prototypes. S'inspirant des propositions de Marr et Nishihara (1978), Biederman (1987) postule un ensemble limité de 36 "géons" (*geometrical ions*), discriminables, résistants à l'occlusion et au bruit visuel et

reconnaissables indépendamment du point de vue (*viewpoint-invariant*). Son modèle est présenté dans la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Cette approche ne peut pas expliquer la reconnaissance d'objets géométriquement similaires, mais différenciables par d'autres propriétés (couleur, texture, taille...) ou celle d'objets, nombreux, qui ne peuvent pas être bien décrits par des géons (Edelman, 1997).

La propriété d'indépendance du point de vue, postulée par Biederman, a été contestée expérimentalement depuis Palmer *et al.* (1981) et a donné lieu à des modèles concurrents tel que le "*view-based recognition*" (Tarr & Bülthoff, 1998). Selon celui-ci, la reconnaissance d'un objet est fonction de son point de vue le plus familier ou appris (Edelman & Bülthoff, 1992). En fonction de l'expérience, le système perceptif pourrait disposer de plusieurs vues à deux dimensions d'un objet, privilégier la plus fréquente ou canonique, voire intégrer une vue nouvelle entre deux autres apprises. Les prédictions conséquentes ont été confirmées par les travaux de ces auteurs, y compris dans le cadre particulier de la reconnaissance des visages (Wallraven, Schwaninger, Shumacher, & Bülthoff, 2002).

Pourtant, ces deux approches, *recognition by components* et *view-based recognition*, ne sont pas forcément incompatibles. D'abord, les expériences invoquées ne concernent pas les mêmes objets à reconnaître : familiers et symétriques pour Biederman, le contraire pour Tarr et Bülthoff. Les tâches proposées ne sont pas, non plus, comparables : essentiellement de l'identification pour les premiers, de la reconnaissance pour les autres. Théoriquement, la position de Tarr, Bülthoff et leurs collègues n'échappe pas à la critique de l'énormité du stockage requis alors que celle de Biederman souffre de la lenteur de la reconstruction ou de la synthèse nécessaire au fonctionnement du modèle. Ainsi, la familiarité des objets quotidiens s'accompagne d'une multitude de points de vue, ce qui rend caduque la primauté d'un point de vue particulier (Biederman & Bar, 2000). Par ailleurs, comme nous avons déjà

signalé plus haut, le modèle de Biederman échouerait à identifier des objets nouveaux ou peu compatibles avec une description géonique, un foulard par exemple, et ne pourrait pas discriminer des objets géoniquement similaires, par exemple des chaises (Edelman, 1997).

Suivant une idée de Rock (1973) et d'Ullman et Basri (1989), Schwaninger et Mast (1999) ont proposé un modèle mixte : la reconnaissance d'un objet se ferait sur les composants et/ou sur leur structure gardant les proportions, appelée "configuration". Les premiers sont invariants, alors que la configuration est stockée selon un point de vue canonique (voir la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) Ce modèle prévoit que l'appariement sur les composants est indépendant du point de vue, alors que l'appariement sur la configuration nécessite une normalisation. Ceci a été confirmé, par exemple, par leurs travaux ou par ceux de Christou, Tjan, et Bülthoff (2003). Un autre modèle mixte est proposé par Riesenhuber et Poggio (2000). Dans celui-ci, la reconnaissance et l'identification sont considérées comme des tâches perceptives similaires, nécessitant cependant des degrés différents de l'invariance structurale de l'objet perçu, organisés hiérarchiquement.

1.2.5 Discussion

A notre connaissance, aucune approche de la catégorisation perceptive n'échappe à des critiques fondamentales. On pourrait alors penser, comme Pinker (1998), que le système cognitif dispose de plusieurs processus pour catégoriser et qu'il les choisit en fonction des particularités de l'entité à catégoriser. Hélas ! Certaines critiques concernent la totalité des modèles présentés : notamment l'étendue immense du répertoire de catégories nécessaires et l'ambiguïté du statut de l'élément, trait ou caractéristique, perceptif de base, définissant le stimulus.

Le concept de prototype (Rosch, 1981), que nous rappellerons dans les modèles de la mémoire, répond à la question de l'étendue du répertoire, du moins en partie. Ce fut aussi le cas du concept de schéma perceptif, emprunté à Bartlett (1932). Un schéma perceptif est plus général qu'une catégorie, mais aussi plus dynamique : il dirige l'exploration visuelle tout en s'accommodant aux particularités du stimulus (Neisser, 1976; Rumelhart, 1980). Il se situerait ainsi entre les hypothèses perceptives de la *New Look* et les catégories. Cette approche qui a toujours un succès d'estime (p.e., Paillard, 1994), est trop générale pour être abordée expérimentalement (Oléron, 1995).

Le statut du stimulus est un problème plus complexe, à la fois parce qu'il est fondamental en psychologie cognitive et parce qu'il est brouillé par son aspect ontologique. Tous les modèles présentés semblent l'aborder comme un postulat : l'environnement serait constitué d'objets ou événements définissables *a priori* en termes de caractéristiques, ou qualités, ou propriétés ou composants, ou structures ou configurations... correspondant à ce que le système perceptif est capable de capter ou traiter.

Finalement, on se retrouve dans une généralisation du problème classique de "l'erreur du stimulus" (Titchener, 1912). La description d'un objet perçu est entachée des connaissances non perceptives de cet objet (Piéron, 1926). De la même manière, le chercheur attribue au stimulus les propriétés et l'organisation que, selon sa culture ou son modèle, devraient constituer l'objet ou événement perçus. Remplacer ces propriétés ou cette organisation par l'idée "d'information" ne fait qu'écarter le problème, puisque l'information est un présupposé aussi arbitraire que les présupposés de propriété ou d'organisation. Nous discuterons largement du concept d'information plus bas.

1.3 Catégorisation et mémoire

1.3.1 Catégorisation piagétienne

L'approche classique, évoquée plus haut, connaît son apogée avec les travaux de Piaget (Piaget & Inhelder, 1959). L'apport de l'école piagétienne met l'accent sur deux niveaux. La genèse et le développement de compétences de catégorisations, assimilant ce développement à une structuration logico-mathématique des coordinations d'action de l'individu. Vision pouvant être assimilée à tort à une perspective computationnelle du développement et de la cognition. En effet, comme nous le verrons par la suite, une structure logico-mathématique n'implique pas nécessairement des modalités de traitement d'une information extraite de l'environnement. C'est plutôt l'aspect émergent des coordinations qui est mise en avant dans les travaux de Piaget. L'ensemble de ces travaux sera malgré tout largement commenté et critiqué. Pourtant les critiques de l'approche classique de la catégorisation sont bien antérieures. Très tôt, on peut voir commencer à émerger une remise en question de l'approche classique dans les travaux de Goldstein et Scheerer (1941) sur le processus d'abstraction, la mobilité et la rigidité des catégories. Pour la première fois, la question de l'évolutivité d'une catégorie est posée d'un point de vue fonctionnel. En 1953, dans un ouvrage publié à titre posthume, Wittgenstein (2004), repris par Rips, Shoben, et Smith (1973) plus tard, soulève un certain nombre de limites. Entre autres choses, Wittgenstein (2004) démontre que les exemplaires d'une même catégorie possèdent aussi des propriétés qui les discriminent entre eux. Aspect dont l'approche classique ne rend absolument pas compte. Puisque le rôle de la catégorisation est de créer une intégration intra-catégorielle et une discrimination inter-catégorielle entre les exemplaires des différentes catégories, il n'avait jamais semblé pertinent de s'intéresser à la question de la discrimination intra-catégorielle. Une question qui, pour Wittgenstein, permet

d'élaborer une compréhension plus fine des processus de catégorisation. Tous les exemplaires ne sont pas équivalents au sein d'une même catégorie. Comment cela influe-t-il lors du processus de catégorisation ? Par ailleurs, un exemplaire satisfaisant aux conditions d'appartenance d'une catégorie peut s'avérer un meilleur représentant de la catégorie qu'un autre exemplaire satisfaisant aux mêmes conditions. Les exemplaires d'une catégorie n'ont donc pas tous le même statut dès l'instant où l'on introduit la dimension de la typicalité. Dimension d'autant plus intéressante sur le plan expérimental qu'elle est soumise à des sources de variations interindividuelles déterminées par l'histoire personnelle, l'appartenance culturelle ou encore la pratique linguistique. C'est sur la base de ces objections que vont être développés les modèles dit de capture écologique des propriétés catégorielles. Ils sont écologiques par opposition aux modèles classiques fondés sur le critère d'inclusion logique.

1.3.2 Modèles prototypiques

A la suite des travaux de Wittgenstein (2004) et de Rips *et al.* (1973), des auteurs tels que Rosch, Simpson, et Miller (1976) émettent le postulat que le monde réel possède une structure intrinsèque. Postulat justifié par l'argument empirique selon lequel la cooccurrence des attributs repose sur une structure corrélacionnelle illustrée par l'exemple suivant : « il est beaucoup plus probable que les animaux à plumes aient des ailes que les animaux à poils. » (Rosch, 1976, p. 242). Pour les tenants de cette conception, dite de capture écologique, il se constitue un catalogue d'objets prototypiques. Le prototype étant le meilleur représentant d'une catégorie, celui qui dispose des propriétés les plus fréquemment observées. Dans cette approche, le prototype n'est pas un élément perçu mais une construction cognitive issue d'un long processus d'abstraction. Le prototype est le produit de l'expérience personnelle de l'agent cognitif et sa pertinence est statistique. Il

assure simultanément la fonction d'intégration intra-catégorielle en étant le représentant le plus proche de chacun des exemplaires de la catégorie et la fonction de discrimination inter-catégorielle en étant l'exemplaire qui se distingue le plus des exemplaires des autres catégories. D'ores et déjà on peut voir un certain paradoxe dans le fait que pour que le prototype soit défini, il faut une collection d'exemplaires associés à la catégorie et donc que la catégorie qui est définie par le prototype préexiste au prototype. Paradoxe qui pourrait être levé dans une perspective dynamique. Un objet à catégoriser l'est en fonction de sa similarité avec le prototype. Lorsqu'un stimulus présente un grand nombre de similitudes avec un prototype mais par ailleurs trop de différences pour être une instance acceptable de la catégorie, alors il se crée une subdivision dans la catégorie et une spécification d'où une nouvelle catégorie émerge. Une telle approche présente une orientation clairement constructiviste puisque la catégorie émerge progressivement de l'expérience et qu'elle évolue avant de se stabiliser. Mais Rosch va plus loin en déclarant que si les objets et les catégories sont perçus comme des entités distinctes de leur environnement, c'est parce que cela est dans leur nature. Un aspect de la théorie qui est légitimement contestable. Toutefois, la théorie prototypique est corroborée par deux phénomènes en particulier. (i) Tout d'abord et en ce qui concerne les catégories naturelles, un niveau d'abstraction se dégage des autres et devient plus prégnant. La catégorie des chiens est intercalée entre la catégorie sur ordonnée des animaux et la catégorie sous ordonnée des caniches. La catégorie prégnante, c'est-à-dire la catégorie de base, est celle qui apporte le maximum d'information pour le coût cognitif minimal. La catégorie sur ordonnée des animaux possède moins de propriétés que la catégorie de base des chiens, elle apporte donc moins d'information lors du processus de catégorisation. Quant aux catégories sous ordonnées, elles héritent des propriétés de la catégorie de base donc contiennent au moins autant d'information, mais un certain nombre d'entre elles sont nécessaires pour constituer une

partition de la catégorie de base, ce qui augmente le coût cognitif. Le potentiel d'abstraction d'une catégorie sous ordonnée est plus faible puisqu'elle contient, par définition, moins d'exemplaires que la catégorie de base. Les travaux de Mervis (1985) montrent par ailleurs que les catégories de base sont les premières à être apprises et que si leur apprentissage est le plus facile, c'est probablement parce qu'elles constituent la forme d'organisation de l'espace cognitif la plus économique (Mervis & Crisafi, 1982). (ii) Un deuxième phénomène renforce la validité de l'approche prototypique par rapport à l'approche classique. Toujours concernant les catégories naturelles, les exemplaires d'une même catégorie peuvent être organisés selon le gradient de représentativité. Perspective inenvisageable par l'approche aristotélicienne où les exemplaires d'une même catégorie ont un statut identique et le processus de catégorisation est simplement binaire. L'approche prototypique permet quant à elle cette discrimination intra-catégorielle sur la dimension de la typicalité. C'est ainsi que l'on peut distinguer des exemplaires atypiques, ou encore, périphériques, ce qui introduit subtilement la notion de traitement spatial et topologique des catégories qui cessent alors de n'être que logiques pour devenir des entités analogiques. Le sous-espace conceptuel ainsi défini par la catégorie est alors doté d'un centre organisateur : le prototype dont le statut est défini statistiquement et émergeant de l'expérience personnelle de l'individu. La validité de la dimension typicalité a été testée dans de nombreuses études (Bjorklund, Thompson, & Ornstein, 1983; Cohen & Strauss, 1979; Cordier, 1981; Roberts & Horowitz, 1986; White, 1982).

1.3.3 Modèles à frontières décisionnelles

Finalement proche des modèles prototypiques puisqu'ils partagent l'idée d'un processus d'abstraction, cette approche de la catégorisation représente les catégories comme un découpage de l'espace mnésique. Chaque catégorie occupe un sous-espace de

l'espace mnésique et la spécification d'une catégorie est déterminée par la position de la frontière qui la sépare des autres catégories. Le processus de catégorisation repose sur la détermination de la position de la frontière décisionnelle entre deux catégories et de l'item à catégoriser par rapport à la frontière (Maddox & Ashby, 2004). Les frontières sont déterminées de sorte que la densité des exemplaires soit similaire à une distribution normale bornée dont la moyenne soit située à distance maximale des frontières qui délimitent la catégorie. Plus un stimulus se trouve loin de la frontière décisionnelle dans le sous-espace mnésique d'une catégorie et plus la probabilité qu'il soit considéré comme une instance de cette catégorie est grande. Bien que l'hypothèse ne soit pas clairement formulée par les auteurs, un tel processus peut être considéré comme dynamique puisqu'au travers de l'activité de catégorisation, la structure des frontières décisionnelles devrait sensiblement évoluer et s'adapter. Par ailleurs, les zones de forte densité sont très similaires au concept d'attracteur dans les systèmes dynamiques.

1.3.4 Modèles à exemplaires

Une distinction classique dans le champ de la catégorisation est celle opérée entre identification et catégorisation (Bruner *et al.*, 1956). Par définition, ces deux notions sont diamétralement opposées. L'identification participe de la conservation et la reconnaissance de la singularité de l'événement perceptif, quand la catégorisation est une forme de généralisation et donc de réduction de l'information singulière. Malgré tout, ces deux fonctions pourraient partager des processus communs (Shepard & Chang, 1963; Shepard, Hovland, & Jenkins, 1961) et les recherches dans ce domaine témoignent de performances corrélées entre différentes tâches de catégorisation et d'identification (Nosofsky, Gluck, Palmeri, McKinley, & Glauthier, 1994). Par ailleurs, une des difficultés rencontrées par les approches basées sur la similarité est que cette dernière est fortement dépendante du

contexte (Tversky, 1977; Tversky & Gati, 1978). Le degré de similarité sur une dimension/propriété est dépendant de l'ensemble des dimensions/propriétés intervenant lors de la catégorisation de stimulus multidimensionnels. Ainsi, certaines dimensions peuvent voir leur degré de similarité augmenter ou diminuer selon qu'elles sont ou non en présence d'autres dimensions. La similarité n'est donc pas une dimension objective et intrinsèque à l'exemplaire. Ce sont ces deux observations, en particulier, qui ont amenées Nosofsky (1986) à proposer une approche quantitative et unifiée de l'identification et de la catégorisation qui tienne compte de la variabilité de la similarité. En prenant comme point de départ deux modèles quantitatifs : l'un, pour l'identification, le modèle du choix basé sur la similarité (Luce, 1963; Shepard, 1957) et l'autre, pour la catégorisation, est une généralisation de la théorie de la classification contextuelle (Medin & Schaffer, 1978). En réalisant la fusion de ces deux approches sous le nom de modèle général contextuel (General Context Model). L'idée fondamentale du modèle est que chaque exemplaire d'une catégorie est stocké en mémoire et la similarité n'est plus basée sur la proximité avec un représentant prototypique unique de la catégorie mais avec l'ensemble des exemplaires. Pour Nosofsky, c'est au travers de la façon dont la similarité va varier en fonction du contexte que la distinction entre identification et catégorisation se fait et les variations de similarité ne sont pas aléatoires et peuvent donc être modélisées de façon déterministe. Les modèles à exemplaires intègrent par la suite les modèles à traces. Ils se distinguent de manière importante des modèles prototypiques et à frontières décisionnelles car la création des catégories ne repose pas sur un processus d'abstraction. La catégorie ne préexiste pas au processus de catégorisation et n'est pas mémorisée en tant que telle. Dans une telle approche, chaque expérience est unique et engendre une trace mnésique distincte des autres. La catégorisation est le produit de l'appariement entre la trace générée par l'expérience sensorielle présente et un ensemble de traces mnésiques similaires issues des

expériences passées. Ainsi, le processus de catégorisation s'inscrit dans l'émergence d'une organisation perceptive ou sémantique qui prend naissance dans le présent et dans l'activité du système cognitif. A ce titre, nous avons là le germe d'un processus éminemment dynamique. Une grande incertitude persiste toutefois quant à la nature de ces traces (Versace, Labeye, Badard, & Rose, 2009; Versace, Nevers, & Padovan, 2002).

1.3.5 Limites des modèles cognitivistes

Pour chacune des situations évoquées ci-dessus, il est important de remarquer qu'il y a toujours nécessité d'une dichotomie entre l'activité perceptive et l'activité mnésique dans le processus de catégorisation. Même si dans le cas des modèles à traces, les catégories ne sont pas stockées en mémoire, ce sont les traces qui le sont. La question d'un stockage exhaustif de toutes les traces issues de l'expérience pose d'ailleurs de réels problèmes pour une approche purement computo-symbolique pour laquelle la modélisation d'un espace de stockage est indispensable. Le cas échéant, comment et sous quelle forme ces traces sont-elles préservées et de quelle manière sont-elles réactivées ? Les modèles ne le disent pas. D'autre part, bien que toutes ces approches semblent avoir pris du recul vis-à-vis de la conception aristotélicienne d'un monde découpé en entités discrètes préexistantes à l'activité cognitive, elles reposent encore fortement sur la notion de traitement d'une information objective intrinsèque en provenance de l'environnement, quand bien même cette information serait altérée par les connaissances issues des expériences antérieures de l'agent cognitif. Mais la principale objection que nous formulons envers ces modèles, et en particulier aux modèles prototypiques, concerne la codétermination d'entités explicatives au sein de modèles s'inscrivant dans une approche essentiellement modulariste et computationnelle. Une telle question mérite notre attention. Car si dans une approche désincarnée et atemporelle on peut se satisfaire d'une relation causale qui donne la

primauté aux catégories sur les exemplaires. Dans une perspective ontogénétique, on explique mal comment les catégories peuvent se constituer en entités cognitives si l'on ne décrit pas le processus qui en est la genèse. Et par ailleurs, peut-on réellement dissocier ce qui serait un embryon de catégorie non constituée de ces entités cognitives postulées dans les modèles décrits. Or, on peut lire dans Rosch et Mervis (1975, p. 574) la phrase suivante : « *Prototypes do not appear to precede the category and must be formed through principles of learning and information processing from the items given in the category* ». Si le prototype est nécessaire au processus de catégorisation, comment la catégorie pourrait-elle préexister et être constituée d'un ensemble non vide d'exemplaires. Quelle est la loi qui conduit à ce qu'un ensemble d'exemplaires se constituent en proto-catégorie ? Pour Roch, les catégories sont la conséquence de la structure corrélacionnelle, de l'ordre intrinsèque, en somme, qui existe dans le monde. Cette structure cause la création d'une entité cognitive : le prototype. Elle définit ainsi un rapport prescriptif de l'environnement sur le système et ceci n'est d'ailleurs pas remis en question par les approches suivantes. Une telle structure intrinsèque s'impose préalablement comme une contrainte qui va définir les limites des catégories dans l'espace cognitif où elles seront représentées. L'ordre *a priori* du monde étant ainsi imposé à l'organisation cognitive. Il reste toutefois que la pré-structure corrélacionnelle concerne les propriétés intrinsèques des stimuli et que ces propriétés sont trop nombreuses pour être toutes considérées lors du processus de catégorisation puisque la finalité d'un tel processus est de réduire le nombre de propriétés à traiter pour obtenir une réponse adaptative. Il semble alors qu'une sélection doive s'opérer parmi l'ensemble des propriétés. Ainsi, la constitution d'une collection d'exemplaires en une catégorie suppose que les propriétés sont déjà des dimensions cognitives et dépend de la prégnance de ces dernières. Etre de couleur rouge est une propriété commune aux coccinelles, aux coquelicots, aux cerises et au sang. Pourtant, cette base de corrélation n'a jamais servi comme élément constitutif d'une

catégorie naturelle qui regrouperait ces quatre exemplaires. Bien entendu, par définition, une condition nécessaire est qu'une structure corrélative est génératrice d'une catégorie du moment qu'elle apporte une économie cognitive, c'est-à-dire qu'elle regroupe un nombre suffisant de propriétés communes pour que la catégorisation remplisse sa fonction adaptative. Cette importance du tissu corrélative, repousse finalement la question de la catégorisation à un niveau plus élémentaire, celui des propriétés, sans fournir de réponse valable et sans lever le paradoxe que crée la codétermination de deux entités dans une approche analytique de la cognition. C'est le problème classique du réductionnisme. En outre, dans une telle perspective, quelle place est faite, dans le processus de catégorisation, au principal facteur d'adaptativité des catégories qui est de permettre de produire une réponse générique adaptée face à une collection de stimuli différents. En d'autres termes, une catégorisation ne peut être conçue comme un acte de perception isolé, passif et universel. Parce que la catégorisation doit être adaptative, le processus sous-jacent doit être une réponse qui intègre les contraintes et les besoins fluctuants du système et de son environnement.

II - POINT DE VUE EPISTEMOLOGIQUE DE LA PERCEPTION

Après les avoir brièvement esquissées, nous avons formulé des critiques, que nous pouvons considérer comme fondamentales envers les modèles cognitivistes. La principale, pour ce qui nous concerne, prend une dimension épistémologique par la discussion du statut de l'information dans le système cognitif. Cependant, ils restent des modèles relativement performants dans le cadre de l'épistémologie positive sur laquelle s'appuie la logique du traitement de l'information (Lindsay & Norman, 1977) issue de la première cybernétique, à savoir, un réalisme naïf dans lequel il est admis que le monde recèle une information intrinsèque qui s'impose à l'observateur et qu'il convient de représenter et de traiter dans un système symbolique (Neisser, 1967). Ce n'est donc manifestement pas sur le plan théorique, mais sur le plan épistémologique, comme nous venons de le mentionner, que se situe notre principal désaccord avec les approches computo-symboliques de la catégorisation. Dans ce chapitre, nous commencerons par introduire deux conceptions opposées du monde perçu que sont le réalisme naïf et le constructivisme. Puis, ayant critiqué la position cognitiviste au travers des biais du réalisme, nous présenterons les idées capitales du constructivisme qui nous permettront d'ouvrir sur les perspectives dynamiques. Nous concluons avec une brève évocation du concept de clôture informationnelle développée par Varela pour illustrer l'opérationnalisation de principes constructivistes.

2.1 Réalisme et constructivisme de la perception

Sur la perception, nous pouvons adopter deux positions radicalement opposées qui dérivent de la façon que l'on a de voir le monde. Soit le monde contient des objets avec des propriétés intrinsèques, et dans ce cas, percevoir consiste à récupérer de l'information et la

traiter pour construire une représentation qui rende compte de la réalité, des entités qui la constituent et des éventuelles possibilités d'action. Soit le monde contient des phénomènes, de natures diverses et indéterminées, et percevoir consiste à être au contact du monde par l'intermédiaire de points de transduction dont le rôle est de permettre à un phénomène extérieur d'avoir un effet sur les processus perceptifs. Et dès lors, le monde ne livre plus nécessairement d'information sur la nature des entités qui le constituent car il n'y a pas d'entité avant la perception, mais seulement une multitude de perturbations. Ainsi, dans cette première vision du monde et de la perception, il est tout à fait pertinent de se demander par quels moyens l'information est détectée, sélectionnée puis traitée pour révéler la nature des objets du monde réel. De même qu'il est naturel de concevoir que de tels processus puissent être pilotés par des entités telles que la mémoire ou l'attention (voir Brown & Craik, 2000; Camus, 1996). C'est le fondement du cognitivisme classique. Soit, si l'on adopte la seconde vision, le monde ne contient pas d'information préalable à l'activité perceptive, mais l'information doit être co-construite au terme des conséquences des interactions multiples entre le sujet qui perçoit et son environnement. Ceci constitue la base des épistémologies constructivistes (Watzlawick, 1988). Nous sommes face à deux visions opposées de la perception, puisque la première l'érige en cause de la cognition tel un processus préalable, mais aussi dépendant, à la connaissance, alors que la seconde ne lui accorde que le statut de conséquence phénoménologique.

2.2 Problème métrologique de la connaissance

L'idée que le monde contient l'information à la base de nos connaissances est probablement plus vieille qu'Aristote. Mais cette perspective objectiviste présente de sérieux biais : un tel raisonnement réside dans la croyance qu'il est possible de produire une

connaissance objective sur le monde, c'est-à-dire, une connaissance indépendante du sujet qui en est l'objet. Pourtant c'est un problème métrologique assez classique. Aucune mesure n'a de sens ni n'est indépendante de l'instrument qui l'a produite. La connaissance ne se constitue pas sur la capture objective de l'information, mais sur la production de relations analogiques qui traduisent les interactions entre le monde observé et le système qui l'observe. Un exemple parmi les plus simples, est celui de la mesure de la masse. Une des façons de mesurer la quantité de matière consiste à en déterminer l'équivalence en termes de masse. Le concept même de masse, bien que se construisant de manière intuitive dans le sens commun, n'est, au mieux, qu'un concept relatif, et, dans la plupart des cas, une mesure arbitraire. Pour mesurer la masse d'un corps, on procède à la mesure de son poids. Puis, par l'intermédiaire de la relation $P = m.g$, on calcule la masse. Deux remarques cependant : outre qu'ici la dimension est mesurée par la médiation du poids, le poids lui-même n'est connu (dans la plupart des cas) que par l'interaction entre le phénomène qui le cause et un objet interposé qui permet de visualiser par déformation l'effet du poids sur lui-même. Nous ne connaissons pas le poids, mais les conséquences du poids sur un objet tiers. En outre, la masse est déduite d'une relation invariante mais paramétrée. Dans l'équation $P = m.g$, g est une constante dont la valeur est fonction d'un certain nombre de facteurs. Ce qui implique nécessairement que la quantification de la masse par cette méthode est relative au contexte de l'observation. Ainsi, le même instrument de mesure donnerait une quantification différente de la masse du même objet à une altitude différente ou si la mesure était effectuée sur la lune par exemple. Cet exemple n'a pas pour objet de constituer une généralité, mais d'étayer l'idée que si la mesure « objective » en physique peut être une chose totalement relative et construite dans l'interaction entre le monde et un instrument dont l'utilité n'a de sens qu'au sein d'une théorie donnée, que penser alors de cette mesure complexe du réel que l'on nomme la connaissance ? Car comme le dit Watzlawick (1988):

"Aujourd'hui comme toujours règne la conviction que la connaissance n'est connaissance que si elle reflète le monde tel qu'il est" (p. 22). Et le cas de la masse en physique n'est d'ailleurs pas un exemple singulier. En fait, la plupart des grandeurs physiques sont co-déterminées et relatives. De même, en psychologie, la perception de la couleur, par exemple, qui est présenté comme une analyse spectrale dans la théorie trichromatique de Young-Helmholtz (Svaetichin, 1956; Young, 1802) est une forme de mesure de la quantité de lumière, en fonction de la longueur d'onde, réfléchié par un objet. Pourtant, des études montrent que la longueur d'onde, bien qu'étant incontestablement le paramètre physique à la source de la sensation chromatique, ne spécifie pas la couleur perçue. Par exemple, dans l'expérience menée par Bruner, Postman, et Rodrigues (1951) des morceaux de carton découpés en des formes d'objets typiquement rouges comme des tomates ou des homards sont vus comme étant beaucoup plus rouges que d'autres morceaux du même échantillon de carton qui, eux, sont découpés selon la forme d'objets qui ne sont pas typiquement rouges. La couleur reste « objectivement » la même mais est perçue différemment.

Ce discours sur la nature et le statut de la connaissance, et la problématique qu'il révèle, nous amène naturellement à chercher une alternative. Si la connaissance produite sur le monde n'est pas une connaissance du monde, mais une connaissance à propos du système connaissant tel qu'il s'incarne dans le monde, comment prétendre connaître le monde ? A travers les âges, les constructivistes ont proposé une solution à la fois originale et efficace pour résoudre ce paradoxe, en renonçant à considérer le monde comme indépendant du sujet et en abandonnant les conceptions analytiques.

2.3 Naissance du constructivisme

Les oppositions aux épistémologies réalistes remontent à l'Antiquité et ont toujours été nombreuses. Mais le réalisme est un point de vue solide et efficace d'une part et nombre de ses critiques tombent rapidement dans un solipsisme qui nie la nécessité de concevoir l'existence d'un monde connaissable indépendante de l'observateur, ce qui explique entre autres causes les raisons du succès du réalisme. Il ne suffit pas de critiquer pour convaincre, encore faut-il proposer une alternative crédible et efficace. Pourtant, les épistémologies constructivistes répondent à certains des biais du réalisme sans pour autant sombrer dans la tentation simplificatrice du solipsisme et ont une longue histoire derrière elles. On considère souvent, comme Le Moigne (1994), que l'acte fondateur des épistémologies constructivistes réside dans l'article conclusif de Jean Piaget (1967) dans l'encyclopédie La Pléiade, « Les courants de l'épistémologie contemporaine ». Avant cette date, le constructivisme existait sous différentes formes non institutionnelles, parfois idéologiques, ou comme une ligne de conduite de la pensée plutôt qu'une méthode. Mais, Pascal en son temps, déjà, prononçait l'épithète du réductionnisme : « *Toutes choses étant causées et causantes, aidées et aidantes, médiates et immédiates, et toutes s'entretenant dans un lien naturel et insensible qui lie les plus éloignées et les plus différentes, je tiens impossible de connaître les parties sans connaître le tout, non plus que de connaître le tout sans connaître particulièrement les parties* » (Pascal, 1976). Il ouvrait ainsi la porte à un relativisme de la connaissance. On retrouve aussi les idées constructivistes dès 1725 chez Giambattista Vico (Vico & Trivulzio, 1993) qui posait que le vrai et le faire sont une seule et même chose reliant ainsi réalité, connaissance et action, et condamnant le concept de connaissance indépendante de l'être. Mais c'est Kant (1787) qui osera l'avancée la plus considérable en réinstaurant dans le champ de la science l'importance et l'implication de l'orientation téléologique de la pensée

humaine, notion honnie et bannie par le positivisme qui lui préférait l'approche déterministe causale convenant mieux à la méthode analytique cartésienne.

Le XX^e siècle a vu un nombre important de contributions à la pensée constructiviste, à commencer par Valéry qui, dans une approche totalement phénoménologique du réel, considèrera que l'on ne perçoit que des actes sur le monde : « entre l'être et le connaître, le faire » (Valéry, 1974, p. 843). Peut-être que limiter la représentation du réel aux seuls actes ne sera pas satisfaisant aux yeux d'un réaliste, mais c'est sans concevoir que l'acte n'est pas une fin en soi mais dépend de l'activité de cognition dans une relation circulaire. La conscience des états mentaux causés par l'interaction avec le milieu et celle des actes en réaction à des fluctuations de l'environnement constituent la base de notre connaissance du monde. Une vision de la cognition pour laquelle Tabary (1994) va qualifier Valéry de « systémicien avant la lettre » pour avoir déclaré : *"La psychologie n'est possible (comme ensemble scientifique) que si on consent à regarder l'homme comme un système, c'est-à-dire un ensemble de parties, isolées ensemble et séparées du tout et qui sont toutes hors de l'œil qui les regarde, soumises semblablement et entièrement à la même connaissance, quelles que soient leurs différences intérieures, entre elles, et leurs relations."* (Valéry, 1974, p. 786). Il faut aussi mentionner la contribution considérable de Gaston Bachelard (Bachelard, 1934, 1938) au travers de ses deux ouvrages : « Le nouvel esprit scientifique » et « La formation de l'esprit scientifique » dont cette citation synthétise bien la pensée : « *Les problèmes ne se posent pas d'eux-mêmes. C'est précisément ce sens du problème qui donne la marque du véritable esprit scientifique. Pour un esprit scientifique, toute connaissance est une réponse à une question [...] Rien ne va de soi. Rien n'est donné. Tout est construit* » (Bachelard, 1938, p. 16). Un principe qui justifie pleinement une vision constructiviste pour Le Moigne (2001). Avec la publication contingente de l'ouvrage de Piaget en 1937 « La construction du réel

chez l'enfant » (1977), et notamment au travers d'une formule fameuse : « *L'intelligence organise le monde en s'organisant elle-même* », c'est ainsi que s'engage le début d'une véritable institutionnalisation de la pensée constructiviste vers 1950, qui sera marquée par la naissance de la cybernétique en tant que discipline scientifique.

2.4 De la première à la seconde cybernétique : l'auto-organisation

Dans un article fondateur de la discipline, Wiener (Rosenblueth, Wiener, & Bigelow, 1943) réintroduit la problématique kantienne de téléologie qui sera opérationnalisée dans le cadre de la cybernétique par le biais de la notion de rétroaction et de boucle récursive. C'est au travers d'une réflexion sur les processus récursifs, dans le cadre des conférences Macy (1946-1954) qu'a commencé à émerger la compréhension de la *finalité*¹ et de l'intentionnalité des systèmes naturels, concepts par ailleurs défendus par Von Bertalanffy (1993).

Von Foerster sera l'un des plus éminents contributeurs dans le cadre des conférences Macy. Pour lui, la connaissance est nécessairement le produit d'une récursivité et d'une auto-organisation (Von Foerster, 2002). En s'appuyant sur l'exemple de la tâche aveugle, ou tache de Mariotte, conséquence de la convergence des axones rétiniens au niveau du point d'insertion du nerf optique, il montre que nous n'avons pas conscience d'être aveugles puisque nous ne percevons pas une tâche sombre malgré ce « défaut » rétinien : le champ visuel est uni et continu. Si nous percevons tandis que nous sommes aveugles, c'est nécessairement parce que la perception est une construction. Mais l'acte fondateur de Von

¹ La finalité est entendue comme le but à atteindre pour un système en pleine évolution. Dans une perspective systémique, cette finalité n'a pas été conçue préalablement telle qu'elle le serait dans le cadre d'une conception humaine intentionnelle ou d'un dessein divin, mais elle est perçue comme le devenir inéluctable du système et comme cause de son évolution par l'inversion téléologique.

Foerster participant le plus à l'émergence du constructivisme est sans doute la distinction qu'il apporte entre « systèmes observés » et « systèmes observants ». Le modèle qui représente le fonctionnement du système se contient lui-même. Conception totalement absurde si le système est simplement un ensemble de processus de traitement séquentiel de l'information, mais, pour Von Foerster, la cognition est considérée comme computations de computations, c'est-à-dire une boucle récursive illimitée de computations. C'est sur la base de cette distinction fondamentale que le constructivisme actuel rejette le paradigme de la commande, rejeton naturel des approches réductionnistes, et que fut fondée la cybernétique de second ordre qui intégra les principes de la première cybernétique en en faisant une science des systèmes auto-organisés.

Dans son manifeste pour un constructivisme radical, Von Glasersfeld (1978) appuie sur la distinction entre le *fit* (convenance/ajustement) et le *match* (correspondance). Par cette distinction, il définit la connaissance comme une construction qui convient à la réalité sans toutefois lui correspondre nécessairement. C'est-à-dire qu'il n'y a pas d'analogie entre ce que nous savons et ce que la réalité est en substance. Tout ce que nous pouvons connaître du réel, c'est ce qu'il n'est pas. Affirmation que Watzlawick illustre par la métaphore du navigateur :

Par une nuit sombre et orageuse, un capitaine doit, sans balise ni rien qui puisse l'aider dans sa navigation, traverser un détroit qui ne figure sur aucune carte maritime. Dans cette situation, ou bien il échoue son bateau sur les rochers, ou bien il passe le détroit et retrouve la sécurité de la pleine mer. S'il perd à la fois son bateau et sa vie, son échec prouve que la route qu'il avait choisie n'était pas la bonne. On peut dire qu'il a découvert, en quelque sorte, ce que la traversée n'était pas. Si, par contre, il traverse le détroit, son succès prouve simplement que, littéralement, son bateau n'est pas entré en collusion avec la forme et la nature (autrement inconnue) de la voie navigable. Mais il ne le renseigne en rien sur le

degré de sécurité ou de danger dans lequel il se trouvait à chaque moment de la traversée. Le capitaine a traversé le détroit comme un aveugle. La route choisie a convenu à la topographie inconnue, ce qui ne signifie pas qu'elle lui ait correspondu – si on prend le terme de correspondance au sens où Von Glasersfeld l'utilise –, autrement dit, que la route ait correspondu à la réelle configuration géographique du détroit. On peut facilement imaginer que la réelle configuration géographique du détroit permette des traversées plus sûres et plus courtes. (Watzlawick, 1988, p. 16).

De cette métaphore résulte l'idée que la connaissance du monde ne peut être construite qu'au travers des actes de l'agent cognitif sur le monde. Et que ce qui est connu, ce sont les conséquences des tels actes par lesquelles nous déduisons le monde lui-même.

Mais pour Von Glasersfeld, l'homme est totalement responsable du monde dans lequel il vit. Notion que l'on peut interpréter aussi bien dans le champ de l'éthique que dans celui de l'épistémologie. L'opérationnalisation d'un tel principe peut, à la limite, confiner au solipsisme qui prétend que le monde n'existe pas en soi et qu'il est une création de l'esprit. Bien que dans le cas de Von Glasersfeld, ce qui est nié, c'est la causalité entre monde matériel et connaissance. A ce sujet, nous dirions que si la connaissance est une production de l'esprit humain, elle n'en reste pas moins le produit de l'activité humaine s'inscrivant dans un monde matériel et avec toutes les contraintes et nécessités inhérentes à la survie de l'individu. Aussi, cette responsabilité totale, que postule Von Glasersfeld, ne peut pas être imputée au libre arbitre et à la conscience de l'homme. Elle serait plutôt, dans une perspective ontogénétique, imputable à son organisation, tant biologique que psychologique ou sociologique. L'affirmation de Von Glasersfeld ne constitue donc pas un engagement éthique à nos yeux mais un principe épistémologique déjà contenu en germe dans la notion de système auto-organisé.

Donc, le primat des postulats des épistémologies constructivistes est que la connaissance n'a pas de sens si elle exclut ontologiquement le sujet connaissant. C'est le sujet, conçu et modélisé en tant que système, qui produit la connaissance. Ceci est une conséquence des processus rétroactifs engendrés dans le contexte d'un environnement fluctuant auquel l'individu doit en permanence s'adapter. Finalement, une connaissance est toujours nécessairement subjective et ne possède pas *a priori* de valeur propre et universelle, indépendante du sujet qui la produit. Toutefois, si « la carte n'est pas le territoire », selon Korzybski (1933), ce qui est connu du territoire n'est qu'une carte qui est la conséquence de l'exploration de ce territoire.

2.5 De l'auto-organisation à l'autoproduction : un cercle vertueux

Ainsi, puisque la connaissance n'est pas le produit d'un processus d'objectivation, il semble inutile de constituer une hypothèse symbolique et médiationniste. Hypothèse dans laquelle la question du stockage de l'information est centrale. Autrement dit, si la cognition, quelle que soit sa forme, est simplement le produit de l'interaction entre le système cognitif et son environnement, alors, nul besoin de penser une structure mnésique pour justifier les performances mnésiques du système. La mémoire du système, c'est le système lui-même.

En faisant l'hypothèse que la cognition est le produit du comportement naturel d'un système autopoïétique², Varela (1989) pose que la condition *sine qua none*, pour qu'un système soit autonome est qu'il soit opérationnellement clos, et même, dans le cadre du système cognitif, qu'il soit informationnellement clos. Ce qui signifie que le processus de production d'information est totalement contraint à l'intérieur du système lui-même. L'acte

² De Autopoïèse : processus d'autoproduction. Un système autopoïétique est un système qui, par sa nature, son organisation ou son action sur l'environnement, engendre les causes qui lui donnent naissance.

cognitif est rendu possible par le biais du couplage structurel (ou couplage par clôture) qui s'établit entre le système et l'environnement. En effet, l'idée même de la clôture opérationnelle implique l'abandon des idées d'entrées et sorties (couplage par *input*). Non pas que le couplage par *input* soit impossible, mais il relève d'une conjoncture spécifique. Or, d'une manière générale, pour un système ou une unité autopoïétique, les entrées ne spécifient pas l'état du système. Ces entrées ne sont, alors, plus partie prenante dans la définition du système. Ce qui n'est pas le cas dans les perspectives computo-symbolique et behavioriste qui s'appuient sur le paradigme de la commande pour modéliser le comportement du système cognitif. Désormais, ces entrées deviennent des perturbations dont la conséquence est une transformation potentielle de l'état du système. Qu'une perturbation soit efficace ou non dépend du niveau de couplage. En effet, en l'absence de couplage, le système peut simplement être insensible à une perturbation. Mais, dans le même temps, le couplage est lui-même un produit de la dynamique du système. Le couplage détermine le comportement qui, en retour, produit une modification de ce dernier dans une organisation définitivement autonome. Une telle vision nous conduit, le plus naturellement du monde, à embrasser le champ des théories de la dynamique des systèmes.

Le chapitre suivant a pour objet la synthèse des concepts et des principes utiles à la compréhension et à l'application de la dynamique des systèmes d'une manière générale, il sera suivi d'un chapitre plus spécifique aux applications à la psychologie cognitive.

III - LES SYSTEMES DYNAMIQUES : UN META-PARADIGME POUR PENSER LE COMPLEXE

A chaque instant, nos récepteurs sensoriels sont confrontés à un monde continu et fluctuant. Et pourtant, l'expérience phénoménologique qui en résulte découpe le réel en entités disjointes. De plus, elle est suffisamment stable pour nous permettre de produire des connaissances durables dans le temps et nous assurer une perception d'objets conservant leur identité perceptive en dépit des multiples fluctuations sensorielles. Alors, un espace continu et instable devient composé d'objets distincts de leur fond, dotés de propriétés qualitatives et s'organisant au travers de relations spatiales et sémantiques. Ce constat impose à toute tentative d'explication de la perception l'enjeu consistant à élaborer un modèle de la transition du continu au discret et de la fluctuation à la stabilité. Nous avons vu que le paradigme cognitiviste classique, en utilisant la théorie du traitement de l'information, ne parvient pas à expliquer ces performances puisqu'il repousse la question de l'intentionnalité de l'émetteur du message (Shannon, 1948) au niveau de l'environnement, tombant ainsi dans le piège d'une régression à l'infini de l'explication causale directe (Popper, 1978). Un cercle vicieux dont on ne voit jamais le bout. Pourtant, il existe un paradigme transdisciplinaire qui réalise les deux performances requises : stabiliser et discrétiser, en une seule fois et sans faire appel à un principe de relations causales hiérarchisées.

3.1 Le système cognitif comme un système dynamique complexe

La modélisation du système cognitif par le biais de l'approche des systèmes dynamiques est un choix méthodologique et épistémologique. Un modèle est un objet théorique qui parle d'une certaine réalité avec précision et fidélité sans jamais s'y substituer (Bunge, 1968). L'élaboration d'une stratégie de modélisation systémique se fonde sur la prise en compte de certains facteurs. Par exemple, il faut considérer en premier lieu l'échelle d'étude du système. Définir un système relève donc d'un ensemble de choix fait par le modélisateur. Quelle échelle ? Quelles dimensions et quelles limites pour l'espace de définition ? Est-ce une étude statique logique et ontologique ? Ou bien s'agit-il d'une étude dynamique par la modélisation de l'évolution temporelle des variables d'état du système et de l'influence de l'état du système sur son devenir ? Faisons-nous le choix de concevoir un système simple qui pourra être décrit par une dynamique linéaire et triviale, mais qui ne sera qu'une description approximative et à court terme de la richesse de l'objet étudié ? Ou devrions-nous considérer notre objet d'étude comme complexe, parce-que ses déterminants s'inter-définissent, et, dès lors, s'impose la nécessité d'un modèle dont la dynamique est non linéaire ?

Par ailleurs, quand on aborde la question de l'approche dynamique de la cognition, un grand nombre de questions émergent naturellement. Par exemple, qu'est-ce à dire que le système cognitif est un système dynamique ? En quoi cela lui confère-t-il la qualité de 'cognitif' ? Comment la perception, entre autres performances cognitives, est-elle possible au sein d'un système dynamique ?

Toutes ces questions traduisent à la fois la richesse et la complexité de l'approche. Notre objectif n'étant pas, ici, de répondre à chacune de façon systématique, mais plutôt de

dresser le plan de réflexion préalable qu'implique l'approche dynamique. Par ailleurs, avant de nous risquer à répondre à certaines d'entre elles, il nous faut commencer par poser les bases saines de quelques définitions.

En ce qui nous concerne, comme nous avons fait le choix de concevoir le système cognitif comme un système complexe, et d'en étudier la dynamique, il nous faut connaître certains des enseignements de la dynamique non linéaire. Dès à présent, il est vital de distinguer le système dynamique, modèle mathématique composé d'un ensemble d'équations différentielles reliant les variables d'état d'un système à leurs dérivées temporelles³, du système réel étudié. Et rappelons que si l'approche dynamique nous permet de comprendre comment l'information est produite, elle n'est pas un discours ontologique sur l'information : le sens de celle-ci appartient au système et émerge de la coopération entre un ensemble de contraintes, un monde de possibilités et la dynamique propre du système.

3.2 La complexité

Commençons par distinguer les notions de *complexe* et de *compliqué* qui, dans le langage commun, sont parfois amalgamées (Le Moigne, 1994). Le compliqué renvoie directement à la pensée positiviste et à la méthode analytique. Un objet compliqué pourra toujours être découpé en autant de parties que nécessaire dont on fera l'étude séparément afin d'en comprendre la nature et le fonctionnement et ainsi comprendre le fonctionnement et la nature de l'ensemble qu'ils composent. Ce passage du compliqué au simple puis du retour au compliqué est à la base de la méthode analytique exposée par Descartes (1996),

³ Pour mémoire, la dérivée temporelle d'une fonction est la quantité de changement par unité de temps. Dans la plupart des cas, on parlera de la vitesse pour la dérivée première et de l'accélération pour la dérivée seconde.

voici bientôt 400 ans. Si la méthode analytique remporte un grand succès en raison de son efficacité au sein des sciences positives, elle est rapidement mise en défaut face à une catégorie de problèmes qui, de particuliers se révèlent rapidement devenir très répandus. Il s'agit des problèmes complexes.

Le mot complexe qualifie un objet, un processus ou une entité dont les éventuels composants, plutôt qu'assemblés, sont « tissés ensemble ». Un problème complexe est un problème dont les déterminants se déterminent entre eux, se fondent dans le tout pour finalement ne plus exister en tant qu'éléments indépendants. Une situation face à laquelle l'approche analytique est inefficace. Une telle entité ne peut pas et ne doit pas être réduite à un composé d'unités élémentaires discrètes. Pour reprendre les mots de Morin, une telle démarche serait mutilante (Morin, 2005). Dès lors qu'un système comprend au moins deux variables en interaction, il est de nature complexe. Pour Morin et Le Moigne (1999), l'inscription dans une forme complexe de modélisation relève d'un choix délibéré du chercheur et c'est pourquoi Le Moigne (1999) parle de « système perçu complexe » plutôt que simplement de « système complexe ». Ce choix conditionne la démarche de modélisation dans une épistémologie qui est nécessairement non réductionniste, non causale et non analytique. Dans « *La modélisation des systèmes complexes* », Le Moigne commence par ces mots : « *Un système complexe est, par définition, un système que l'on tient pour irréductible à un modèle fini, aussi compliqué, stochastique, sophistiqué que soit ce modèle, quelle que soit sa taille, le nombre de ses composants, l'intensité de leurs interactions...* » (1999, p. 3). La notion de complexité implique presque naturellement la notion d'imprévisibilité, d'irréversibilité et d'émergence. Et, Le Moigne d'ajouter que le choix d'une modélisation complexe est principalement conduit par ce présupposé d'émergence et d'imprévisibilité : « *Il ne postule pas un déterminisme latent qui permettrait à une*

“intelligence assez puissante⁴” de prédire par le calcul l’avenir de ce phénomène, fût-ce en probabilité. » (Le Moigne, 1999, p. 3).

3.3 Notion de dynamique

Le deuxième terme qu’il nous faut définir est central puisqu’il s’agit du terme *dynamique*. Nous allons montrer que ce mot peut prendre au moins trois sens différents selon le contexte dans lequel il est utilisé. En ce qui nous concerne, nous nous plaçons dans une perspective mathématique du concept de dynamique, ce qui nous permet d’évaluer la pertinence des différents sens que peut prendre le mot relativement à cela.

(1) Dans sa première acception, dynamique s’oppose à statique. Il s’agit là d’une erreur fondamentale mais bien intégrée dans le sens commun. Une chose est dynamique si elle dépense de l’énergie ou si elle est en mouvement (ex : On dit d’une personne qu’elle est dynamique parce qu’elle est active et rarement immobile). En d’autres termes, n’est dynamique que ce qui n’est pas statique : "the use of this word may merely indicate that the author wishes to consider some system evolving, rather than static" (Norton, 1995, p. 45). Or, le véritable concept qui s’oppose à statique n’est pas celui de dynamique mais celui de cinématique. En ce que la statique est l’étude des états immobiles (états dits d’équilibre dans un système dynamique) alors que la cinématique est la science des mouvements dans l’espace. En réalité, statique, cinématique et cinétique sont trois champs d’étude totalement intégrés dans celui de la dynamique.

(2) Une deuxième définition déjà plus proche de la notion de dynamique dit qu’un processus est dynamique quand il induit une interaction avec l’environnement, une réaction

⁴ Le Moigne fait ici référence au postulat laplacien aussi appelé ‘démon de Laplace’ : « *Une intelligence qui, pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d’ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l’analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l’univers et ceux du plus léger atome ; rien ne serait incertain pour elle, et l’avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux.* » (Laplace, 1886, p. 6)

dans le but de produire une adaptation. C'est d'ailleurs dans ce cadre-là que l'on peut parfois opposer un processus statique (qui ne s'adapte pas) à un processus dynamique (qui s'adapte). Cependant, un processus peut être dynamique et, malgré tout, être indépendant des changements de son environnement.

(3) Ceci nous amène à la troisième définition, celle que nous retiendrons car elle correspond au sens du terme dynamique tel qu'il est envisagé en dynamique des systèmes. Il s'agit d'une définition qui ne se trouve pas dans les dictionnaires et semble réservée aux mathématiques et à la systémique. Selon cette définition, tout objet ou processus dont l'évolution est fonction de l'état, ou tout système dont le changement dans l'espace de définition est fonction de sa position dans cet espace sont considérés comme dynamiques. Pour bien comprendre, il faut faire la différence entre dynamique et cinématique. En cinématique, on étudie la position et le mouvement dans l'espace par rapport au temps. Le temps est alors la variable indépendante et la position la variable dépendante. Quant à l'espace, il est le repère neutre dans lequel est décrit le mouvement. En dynamique, l'espace n'est plus un repère arbitraire choisi pour décrire le mouvement. Dans un espace euclidien classique, tout point est équivalent métriquement parlant, on dit que l'espace est uniforme. Qu'un corps se situe en un point A ou B ne modifie pas la loi qui gouverne son mouvement. Mais dans le cas de l'espace d'un processus dynamique, cette loi qui gouverne le mouvement est quantitativement différente en chaque point de l'espace. Ou, du moins, le vecteur de changement l'est. C'est pourquoi le champ de la cinématique est inclus dans celui de la dynamique mais celui de la dynamique ne s'y réduit pas. Par ailleurs, c'est dans le cadre de la dynamique que sont apparus les premiers phénomènes complexes.

3.4 Le concept de système

Nous commencerons par donner une définition particulièrement simple et universellement admise : « Un système est un ensemble d'éléments distincts perçu comme un tout » .

Il s'agit peut-être de la définition la plus délicate qu'il nous faut préciser. Non que le concept de système soit, en lui-même, un concept trop abstrait ou trop complexe. Zwirn (2006) dirait que, quand on est « *habitué* », on peut voir des systèmes presque partout. Mais, suivant la perspective utilisée pour aborder l'étude des systèmes, les orientations théoriques peuvent diverger de façon importante. Ainsi, lorsque l'on aborde la question des systèmes, il faut distinguer deux niveaux conceptuels : les niveaux microscopique et macroscopique.

La perspective microscopique, que nous associerons aux disciplines de tradition déterministe telles que la physique, la chimie et, pour partie, de la biologie, illustrée, par exemple, par les travaux de Von Bertalanffy (1993) ou de Prigogine (i.e. Glansdorff & Prigogine, 1971), est une approche qui convient aux systèmes stochastiques ou encore à chaos dit « *déterministe* ». Le microscopique est l'échelle des constituants présumés du système. Dans cette perspective, un système est un ensemble d'éléments en interactions mutuelles, défini par cet ensemble et contraint par l'espace dans lequel s'opèrent ces interactions. L'étude microscopique des systèmes implique l'émergence de grandeurs macroscopiques nécessairement stochastiques⁵. C'est en observant que le comportement du tout peut se résumer à un nombre limité de dimensions, malgré la multitude de parties qui composent *a priori* le système, que se fait la transition du microscopique au macroscopique. Généralement, si elle n'est pas réduite à son aspect stochastique, cette

⁵ Une grandeur stochastique est issue de la combinaison d'un grand nombre de variables aléatoires.

perspective, utilisée pour relier des conceptions déterministes et réductionnistes à modélisation systémique, est peu adaptée au traitement des systèmes complexes et peine à faire apparaître la finalité de ces systèmes. Malgré tout, la finalité reste au cœur de l'approche systémique et Von Bertalanffy (1993) va jusqu'à faire de la téléologie un principe organisationnel fondamental des systèmes. Ceci nous amène au point de vue macroscopique.

Ce point de vue privilégié par des auteurs comme Le Moigne (Le Moigne & Carré, 1977) ou (Simon, 2004) renvoie à la démarche de modélisation des systèmes et des processus complexes⁶. Selon le point de vue macroscopique, un système est un processus complexe en devenir, c'est-à-dire irréductible à son état et à ses constituants, défini par son projet téléologique et dont l'activité modifie la structure tout en conservant son identité. Dès lors que le projet téléologique est modifié ou abandonné, le système, tel qu'il a été défini, cesse d'exister.

Ces deux points de vue ne s'excluant pas l'un et l'autre, ils doivent être compris conjointement, même s'ils ne peuvent être simultanément pris en compte dans le processus de modélisation. Il existe toutefois des définitions consensuelles et synthétiques telle que celle de De Rosnay (1975, p. 93) dans laquelle se rejoignent détermination et téléologie : « *Un système est un ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisé en fonction d'un but* ». Bien entendu, ceci n'est qu'un échantillon restreint parmi l'ensemble des définitions dont chacune renvoie à un domaine particulier (ingénierie, mathématique, informatique, biologie, physique, sociologie, etc.), mais les définitions choisies nous permettent d'introduire la notion de système dynamique.

⁶ Il semble exister une faible réciprocité : un processus complexe est nécessairement le produit de la dynamique d'un système complexe mais un système complexe pourra être le lieu de processus complexes sans pour autant y être limité.

Faire le choix de l'échelle microscopique serait, en premier lieu, postuler une homogénéité forte des constituants du système, ce qui permet une approche stochastique des comportements. Si cette échelle convient en physique (thermodynamique, astrophysique, météorologie...), elle est inadaptée à des domaines tels que la biologie et les sciences humaines où les constituants sont le plus souvent complexes, c'est-à-dire qu'ils sont eux-mêmes des systèmes non-triviaux, non homogènes et en interaction non linéaire. Pour étudier de tels objets perçus dans leur complexité, l'échelle macroscopique est préférable. Mais alors, les outils, les concepts, les questions et la forme même du discours ontologique de l'objet étudié sont différents. Un système complexe est un tout cohérent et autonome. Mais aussi, défini par un complexe d'interactions avec d'autres entités qui en font un composant d'un autre système à une échelle différente. De plus, dans une perspective complexe, il n'y a pas de hiérarchisation entre les niveaux puisque le niveau macroscopique d'un système peut participer du niveau microscopique d'un autre et réciproquement. Il ne s'agit pas là d'une simple boucle de rétroaction, mais d'une véritable codétermination complexe. Le paradoxe de « *la poule et de l'œuf* » que fuit la pensée positiviste réductionniste prend tout son sens dans la dynamique non linéaire.

3.5 L'approche systémique

L'approche systémique (e.g. De Rosnay, 1975; Durand, 1979; Le Moigne, 1994; Le Moigne & Simon, 1991; Simon, 2004; Von Bertalanffy, 1993) est un méta-paradigme⁷ qui prétend transcender les disciplines et proposer une méthode de construction de l'intelligibilité des phénomènes complexes quelle que soit leur nature. L'une des affirmations fondamentales de la systémique est que les modèles déterministes physiques, pour lesquels

⁷ En tant que paradigme, la systémique ne se réduit pas au champ d'une unique discipline mais peut être étendue à plusieurs

il suffit d'appliquer une loi générale à des unités élémentaires afin d'expliquer le comportement du tout, est un cas particulier et idéal. Ce n'est que parce que l'échelle d'observation est adéquate⁸, et que les écarts entre les prédictions théoriques et les observations réelles sont négligeables et assimilées à des erreurs de mesure⁹, qu'une telle approximation est acceptable. Un principe peut être valable sur tout un domaine et, subitement, cesser de l'être en dehors. La physique a connu en la matière une sérieuse remise en question lors de la découverte des phénomènes qui ont conduit à l'émergence de la physique quantique. Pour la systémique, lors d'un changement d'échelle, on observe des changements qualitatifs dans l'organisation des phénomènes. De sorte qu'il existe une rupture de la causalité entre le niveau d'observation microscopique et le niveau macroscopique. Cette rupture de la causalité est souvent présentée sous le terme d'émergence. L'émergence constitue une propriété caractéristique des systèmes complexes dont nous proposons la définition suivante :

Les propriétés globales d'un système apparaissent sans que n'aient changé les propriétés des parties constitutives. Elles sont issues des changements dans l'histoire des interactions des parties elles-mêmes. De même que seules les interactions comptent dans l'explication de ces propriétés, on ne peut connaître parfaitement les parties constitutives au travers des propriétés globales car des parties de nature différente peuvent engendrer les mêmes interactions¹⁰. Les propriétés émergentes sont donc, par définition, des caractéristiques dynamiques puisque conséquences directes de la nature dynamique d'un système.

⁸ Exemple : les lois de Newton sont valables pour des vitesses loin de celle de la lumière

⁹ Exemple : l'approximation du champ gravitationnel terrestre à une simple constante dans la formule $P = m \cdot g$, alors qu'il varie uniformément avec la distance au centre de la terre.

¹⁰ Cette idée est très proche de la notion d'équifinalité

Outre le concept d'émergence, quelques concepts sont centraux en systémique. Nous en mentionnerons deux en particulier en préparation de notre discussion sur les systèmes dynamiques : la non additivité et l'équifinalité.

La notion de non-additivité est fortement reliée à celle d'émergence. Elle sous-tend que la modélisation de l'organisation macroscopique d'un système, bien que celui-ci soit composé d'éléments discriminables au moins fonctionnellement, ne peut être réduite à la somme des comportements de ces éléments comme dans une perspective purement mécaniste où les forces se combinent en s'additionnant. L'idée que le tout est plus que la somme des parties résume bien cette propriété. Morin (1977) insiste, quant à lui, sur le fait que le tout est à la fois plus et moins que la somme, mais aussi qualitativement différent. D'une manière générale, on retrouvera ce principe opérationnalisé mathématiquement au travers de la non linéarité qui inclut en outre la non-proportionnalité.

Le principe d'équifinalité apparaît chez Von Bertalanffy dans l'idée que « *le même état final peut être atteint à partir d'états initiaux différents, par des chemins différents* » (1993, p. 38). Notion toutefois présente et fondamentale chez Von Boltzman dans le concept d'entropie statistique : le même état macroscopique peut être réalisé par un grand nombre de micro-états. Cette notion intègre dans le même temps le principe de la finalité : le comportement est régi par le but à atteindre (Ackoff & Emery, 1972). Elle peut s'avérer difficile à appréhender dans le cas des systèmes naturels dont on ne peut suspecter qu'ils poursuivent un but à moins de l'attribuer à la volonté de leur créateur comme c'est le cas avec les systèmes artificiels conçus spécifiquement pour accomplir une tâche. Pourtant, ce qu'il faut comprendre, c'est que ce principe s'applique nécessairement, et *a minima*, à la notion d'organisation et non de structure observée. L'état final doit être compris comme un

état global macroscopique du système et sa réalisation peut admettre une infinité d'états microscopiques différents mais équivalents¹¹ du point de vue macroscopique.

3.6 Naissance de la dynamique des systèmes

L'origine du concept de système dynamique remonte au XVII^e siècle à l'époque où l'intuition galiléenne de gravitation était parfaitement admise par Newton. Les corps chutent les uns vers les autres, cela ne fait aucun doute. Du moins, sur terre, les corps chutent vers la terre. Le problème que se posait alors Newton n'était pas tant d'ordre explicatif, mais plutôt prospectif. Le modèle galiléen était incomplet car il lui manquait un certain formalisme mathématique nécessaire à la prédiction des grandeurs telle que la vitesse. C'est ainsi que Newton s'est retrouvé face à un problème insoluble à son époque. La position, par rapport au temps, d'un solide dans l'espace dépend de sa vitesse, plus précisément, de son vecteur vitesse dans un espace *a priori* tridimensionnel. Mais, chose qui préoccupait peu Galilée, les causes de variation de la vitesse ne sont pas constantes et immuables. Ainsi, le vecteur vitesse est une fonction du vecteur accélération, lui-même directement lié à la résultante des forces qui travaillent sur ce solide. Là où le bât blesse, c'est que l'une de ces forces, la force gravitationnelle, dépend de la position du solide par rapport aux autres solides et donc de la position relative du solide dans l'espace. La position dépend de la vitesse qui dépend de l'accélération qui dépend de la force de gravité qui dépend de la position. La boucle est bouclée et voici Isaac Newton face au défi qui consiste à exprimer une inconnue mathématique en fonction d'elle-même. Ou plutôt, d'exprimer le taux de changement d'une grandeur physique en fonction de sa position. C'est pour répondre à cette problématique

¹¹ Notion générale qui est développée en particulier au travers du concept d'entropie statistique de Boltzmann.

que Newton¹² a posé les bases du calcul différentiel et infinitésimal afin de résoudre des problèmes de la forme :

$$\frac{dy}{dx} = f(y)$$

Expression qui signifie que le taux de variation $\frac{dy}{dx}$ d'une quantité variable y , par rapport à une quantité variable x , est une fonction de la valeur de y . Malheureusement, la méthode de Newton, bien que très puissante face à certains problèmes simplifiés, se révèle inappropriée face à des problèmes complexes. Ainsi, il devient totalement impossible de déterminer l'équation horaire du mouvement d'un corps dans l'espace dans un système à trois corps par la seule méthode différentielle et il faudra attendre Poincaré (1912) pour commencer à trouver des solutions à ces problèmes. A la suite de Poincaré, l'histoire de la dynamique non linéaire devient extrêmement riche, quoi qu'un peu confuse, et donne naissance à un grand nombre de théories.

3.7 Théorie des systèmes dynamiques

Ayant soulevé les précautions d'usages et énoncé quelques précisions nécessaires lorsque l'on aborde la question des systèmes et de la dynamique, nous pouvons maintenant exposer le concept de système dynamique que nous allons développer plus en détail.

3.7.1 Définitions

Commençons par donner la définition à laquelle nous nous tiendrons. Un système dynamique est un ensemble de variables dont l'évolution de chacune est une fonction de l'état du système, c'est-à-dire de la valeur de toutes les variables.

¹² Ici, nous ne prenons pas parti dans la polémique qui oppose Newton et Leibniz quant à la paternité de la création du calcul différentiel.

Cette définition issue des mathématiques (Devaney, 1989; Smolensky, 1986), discipline d'origine qui étudie la dynamique des systèmes, convient parfaitement à l'usage que nous voulons en faire, pour une application à la modélisation de la catégorisation perceptive.

Ce que l'on nomme ici variable, et qui par ailleurs pourra être appelé degré de liberté, est une dimension caractéristique de l'état d'un système. L'ensemble des valeurs prises par les variables caractéristiques, ou degrés de liberté, d'un système constitue un vecteur que l'on nomme « vecteur état du système ». Le choix des variables caractéristiques d'un système dynamique est une étape cruciale du processus de modélisation, comme dans le cas d'un système trivial où l'état est défini par la, ou les, variables en sortie, elles-mêmes définies *a priori* lors de l'étape de modélisation des limites du système. Mais, dans le cas d'un système dynamique, il n'y a pas, à proprement parler, d'entrée ou de sortie et les variables d'état sont les dimensions macroscopiques qui décrivent le mieux le système dont l'observateur souhaite comprendre et modéliser la dynamique.

L'état n'est donc pas un mode, comme marche ou arrêt dans le cas d'une machine, mais un point, une position, dans l'espace défini par les variables d'état. Un point dans l'espace correspond à un, et un seul, ensemble de valeurs des variables d'état. Pour des raisons ayant trait au déterminisme historique des sciences et que nous exposerons plus loin, l'espace des états du système est aussi appelé espace des phases. L'ensemble des états que prend le système à travers le temps forme une trajectoire que l'on appelle loi d'évolution du système.

3.7.2 Loi d'évolution d'un système dynamique

Dans un système dynamique, la loi d'évolution de l'état n'est pas connue *a priori*, elle se définit progressivement au fur et à mesure de l'évolution de l'état du système. C'est une

loi unique car dépendante des perturbations subies par le système au cours de son évolution, ainsi que des conditions initiales, qui sont souvent des dimensions réelles et donc, par définition, impossible à reproduire. Nous verrons plus loin que cela induit la détermination téléologique de la dynamique du système. Quoi qu'il en soit, ce qui est étudié dans un système dynamique, ce n'est pas la cinématique du système¹³, mais, comme nous le précisons en introduction, la loi qui relie le vecteur changement au vecteur d'état du système. Ou, en d'autres termes, les équations qui relient la quantité de changement d'une variable d'état à la valeur de toutes les variables d'état du système.

Par définition, un système dynamique peut s'écrire sous la forme d'une équation différentielle¹⁴ générale : $\dot{Y} = f(Y)$ ¹⁵

Où Y est le vecteur d'état du système et \dot{Y} est le vecteur changement. Un vecteur étant un ensemble de valeurs, l'équation générale ci-dessus peut s'écrire de façon développée sous la forme d'un système général (SG) d'équations différentielles :

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = f_1(y_1, y_2, y_3, \dots, y_n) \\ \dot{y}_2 = f_2(y_1, y_2, y_3, \dots, y_n) \\ \dot{y}_3 = f_3(y_1, y_2, y_3, \dots, y_n) \\ \dots \\ \dot{y}_n = f_n(y_1, y_2, y_3, \dots, y_n) \end{cases} \quad (SG)$$

Chaque y_i représente la valeur de la variable d'état i tandis que les \dot{y}_i représentent la valeur du taux de variation de la variable d'état i par rapport au temps. La fonction qui relie les variables d'état au taux de changement d'une de ces variables peut être différente pour chaque variable. Lorsqu'une seule de ces fonctions contient un terme non linéaire, le système tout entier est considéré comme non linéaire. Pour cela, il suffit, par exemple, que

¹³ Etude des trajectoires du système dans l'espace des phases

¹⁴ Dans cette présentation, nous n'aborderons pas le cas des systèmes à temps discret définis par des équations aux différences.

¹⁵ Notons toutefois que le système étudié, bien qu'étant dynamique, peut aussi être contraint par une influence extérieure. Dans ce cas, les équations comporteront un terme supplémentaire pour modéliser cette influence exogène sur la dynamique propre du système.

l'une des variables soit élevée à un degré différent de 1, ou encore que deux variables soient combinées de manière non additive (quotient, produit, exponentielle, etc.). Pour mémoire, la linéarité est la conjonction de deux propriétés, l'additivité et la proportionnalité. Un système linéaire est un système dans lequel les effets sont obtenus par addition de grandeurs proportionnelles aux causes. La forme générale d'une équation linéaire est la suivante :

$$\dot{y}_i = a_{i1} \cdot y_1 + a_{i2} \cdot y_2 + \dots + a_{in} \cdot y_n$$

Que nous pouvons écrire ainsi :

$$\dot{y}_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot y_j$$

Les termes en a_{ij} sont des constantes propres au système. Il est aisé de comprendre combien le cas linéaire est un cas singulier particulièrement peu probable. Quand le système est linéaire, l'ensemble des fonctions de définition peut prendre la forme d'une matrice carrée $n * n$, chaque entrée de la matrice correspondant au coefficient appliqué à une des variables dans l'équation correspondante :

$$\begin{pmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dots \\ \dot{y}_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11}; a_{12}; \dots; a_{1n} \\ a_{21}; a_{22}; \dots; a_{2n} \\ \dots \\ a_{n1}; a_{n2}; \dots; a_{nn} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix}$$

Ce qui permet l'écriture vectorielle simplifiée :

$$\dot{Y} = A \times Y$$

Dans la pratique, les modèles de la plupart des systèmes ne peuvent pas être réduits à des combinaisons linéaires des variables d'état (Stewart, 1998), étant donné la nature des interactions qui existent entre les différentes dimensions. C'est une des raisons qui permettent d'assimiler systèmes complexes et dynamique non linéaire dans la plupart des

cas. Un système dynamique non linéaire sera nécessairement complexe mais *a contrario*, un système complexe n'est pas nécessairement non linéaire, pas plus qu'il n'est nécessairement dynamique d'ailleurs. En revanche, le fait qu'un système ne soit pas linéaire explique qu'il puisse avoir des propriétés non triviales.

A la non linéarité et la complexité d'un système, on peut ajouter son autonomie. Cette notion d'autonomie s'exprime mathématiquement par une indépendance temporelle de la définition du système. Ce qui signifie que le temps n'apparaît pas comme une variable dans les équations de définition du système dynamique. Mais si l'on étend la notion, on comprend que le temps joue, dans le cas des systèmes non autonomes, le rôle de variable médiatrice avec l'environnement. En l'occurrence, le temps est pris en référence pour l'évolution d'un processus externe impactant la dynamique du système. Un système autonome est donc un système dont la dynamique est indépendante de paramètres extérieurs. Ce qui nous permet d'établir une distinction claire entre dynamique et comportement, et d'affirmer que l'étude d'un système autonome ne peut être réalisée autrement qu'au travers d'une démarche « dynamique ».

3.7.3 Résolution d'un système dynamique : l'obstacle de la non linéarité

La résolution d'un système dynamique revient à déterminer, au moins localement, les fonctions qui décrivent le comportement du système (i.e. sa trajectoire dans l'espace des phases) à partir des équations différentielles de définition et des conditions initiales. Il est important de souligner, dès à présent, qu'il est impossible de résoudre analytiquement la plupart des équations différentielles non linéaires. Cela signifie qu'il n'existe pas de solution générale sous la forme d'un composé de fonctions et d'opérateurs algébriques. Plus probablement, certaines solutions analytiques existent localement sur un sous-espace et peuvent éventuellement se reproduire sur d'autres sous-espaces et à des échelles

différentes. En pratique, les équations différentielles non linéaires peuvent être résolues de deux façons. Soit, elles sont résolues numériquement : un ordinateur calcule pas-à-pas une solution¹⁶ par incrémentation. La limite de cette méthode, c'est que, même avec un pas suffisamment petit, les solutions obtenues divergent de façon exponentielle, c'est l'un des inconvénients de la non linéarité. L'autre méthode, introduite par Poincaré (1912), est appelée méthode qualitative. Elle consiste à déterminer les propriétés qualitatives, globales ou locales, des solutions (continuité, *minima*, *maxima*, croissance, décroissance, monotonie...), tel qu'on le fait lors de l'étude qualitative des fonctions algébriques avant de tracer leur graphe. Mais cette solution présente aussi des limites lorsque le problème posé comporte plus de deux degrés de liberté.

Malgré tout, depuis Poincaré, l'approche des systèmes dynamiques a continué à se développer au travers des évolutions de la méthode qualitative, de la topologie et a bénéficié de l'avancée des théories dérivées telles que, par exemple, la cybernétique (Wienez, 1948), la théorie des jeux (Nash, 1950; Von Neumann & Morgenstern, 1945), la théorie des catastrophes (Thom, 1975), ou encore, la théorie du chaos (Gleick, 1989). Cependant, si la dynamique non linéaire reste une discipline difficile d'accès, quelques principes qui la gouvernent sont malgré tout déjà bien établis. Dans la suite de l'exposé, nous allons en mentionner plusieurs qui seront utiles à notre développement.

3.7.4 Notion d'attracteurs

Pour aborder la notion d'attracteurs, il nous faut revenir au concept d'espace des phases. Dans un système dynamique, l'évolution du système dépend de son état, c'est-à-dire de sa position dans l'espace des phases. Cet espace, contrairement à un espace euclidien

¹⁶ Une solution d'un système dynamique est une trajectoire dans son espace de phases, c'est-à-dire la succession des états du système dans le temps.

quelconque, n'est pas simplement composé de points, telles des entités neutres, abstraites et symboliques, mais il est doté d'un champ vectoriel appelé champ de potentiel (figure 1) qui détermine en tout point l'évolution du système. La façon la plus efficace pour représenter les solutions d'un système dynamique consiste à définir le champ de potentiel de son espace des phases. En chaque point Y de l'espace, on peut définir un vecteur de potentiel \dot{Y} qui est la solution locale du système dynamique. Un tel vecteur définit l'évolution du système à partir de ce point précis (la direction et l'intensité du changement).

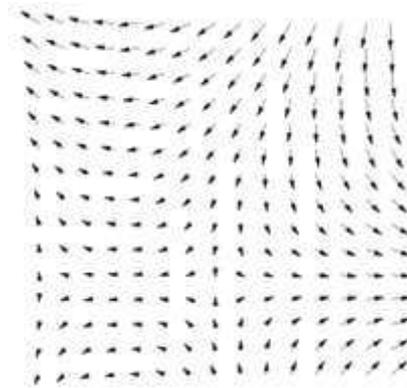


Figure 1 : Exemple de champ de potentiel dans un espace de phase à 2 dimensions

Mue par sa dynamique propre, représentée par son champ de potentiel, le système « se déplace » à l'intérieur de l'espace des phases. Il peut alors se produire trois types de phénomènes qualitativement distincts.

Soit la trajectoire du système le conduit à atteindre un point de l'espace où le potentiel est nul. C'est-à-dire que le vecteur changement en ce point est un vecteur nul, qui signifie que la dynamique en ce point est nulle. Une fois qu'il a atteint ce point, le système ne le quitte plus. Le théorème de Lyapunov (1892) démontre qu'il existe un voisinage, c'est-à-dire un ensemble de points autour du point fixe, pour lequel les trajectoires convergent vers le point fixe. Le point fixe est alors appelé attracteur et son voisinage, bassin d'attraction (*e.g.* figure 2).

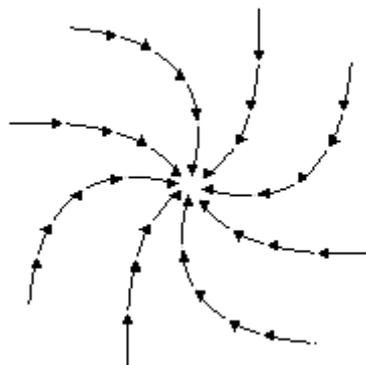


Figure 2 : Cas de l'attracteur point fixe. Les trajectoires dans le voisinage du point fixe convergent vers l'attracteur et forment le bassin d'attraction.

Dans un système mécanique, cet état correspond à l'annulation de la première et de la seconde dérivée (respectivement, vitesse et accélération). Il est concevable que, dans un système faisant intervenir des forces autres que des forces mécaniques, des dérivées d'ordre supérieur puissent intervenir.

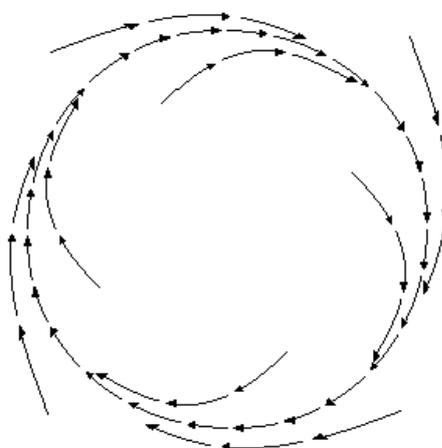


Figure 3 : Cycle limite. Les trajectoires convergent vers une trajectoire cyclique (un cercle pour l'exemple), l'ensemble des trajectoires convergentes définit le bassin d'attraction

Soit, en supposant que l'échelle temporelle est adéquatement choisie, la trajectoire du système peut passer deux fois par le même point sans s'y arrêter. Ce qui signifie que le système répète la même trajectoire indéfiniment, c'est un cycle limite. Là aussi, le théorème de Lyapunov démontre qu'il existe un voisinage de trajectoires qui convergent vers le cycle

limite (e.g. figure 3). Cette situation se produit dans un système mécanique où une dynamique de second ordre s'engage : par exemple, dans le cas du pendule simple, la trajectoire stable résulte d'un conflit permanent entre la vitesse et l'accélération.

Enfin, plutôt qu'une trajectoire ou un point fixe, c'est une zone de l'espace des phases qui est stable. C'est-à-dire que la trajectoire du système erre de façon chaotique en apparence dans un sous-espace fini de l'espace des phases. Le système reste cantonné au bassin d'attraction sans pour autant se stabiliser sur un point. Un exemple de ce type d'attracteur (figure 4) est le célèbre attracteur étrange de Lorenz (1963).

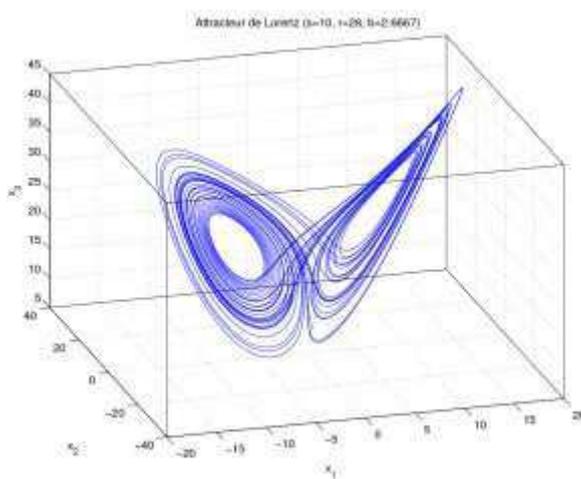


Figure 4 Représentation dans l'espace des phases à 3 dimensions de l'attracteur étrange de Lorenz (1963).

La trajectoire du système semble être prise dans une première orbite stable autour d'un point, puis, spontanément, après quelques révolutions, elle quitte cette orbite pour en rejoindre une seconde. En définitive, les attracteurs étranges sont des *patterns* complexes dans l'espace des phases. La propriété la plus importante de ces attracteurs est la sensibilité aux conditions initiales. Pour toute condition initiale, il existe une unique trajectoire infinie dans le bassin d'attraction. En outre, deux trajectoires proches peuvent s'écarter de façon exponentielle jusqu'aux limites du bassin d'attraction.

Il est tout à fait remarquable que, dans le cas précis de l'attracteur de Lorenz, si cet attracteur possède trois degrés de liberté, les orbites stables n'en possèdent que deux sur les trois et dont un seul est commun aux deux orbites. Il se trouve qu'à un moment donné, l'un des degrés de liberté est annulé tandis que celui qui était précédemment annulé est spontanément libéré. Ce phénomène sera utile plus tard lorsque nous aborderons la question de la transition de phase.

Il existe un cas mathématique limite et marginal. Si aucune convergence n'est possible dans l'espace des phases, le système diverge sur, au moins, un de ses degrés de liberté. Il est alors détruit. On comprend aisément que ce cas ne fasse pas partie des situations étudiées. Si le système est détruit, il n'y a plus rien à observer.

3.7.5 La fonction de potentiel, un cas particulier du champ de potentiel

Lorsque le système étudié possède au maximum deux degrés de liberté, le champ de potentiel peut être représenté sous la forme d'une fonction d'une ou deux variables. La fonction de potentiel est obtenue par intégration mathématique de la fonction de transition. Prenons un exemple pour l'illustrer. Supposons que la fonction de transition¹⁷ soit de la forme : $\dot{Y} = -k.Y$, avec k une constante positive caractéristique du système. L'étude du graphe de cette fonction de transition (figure 5A) permet de constater directement que cette fonction s'annule (ici, à l'origine du repère). Ainsi, lorsque Y est négatif, \dot{Y} est positif et donc Y augmente. Tandis que lorsque Y est positif, \dot{Y} est négatif, ce qui signifie que Y diminue. Y est stationnaire (constante) uniquement lorsque \dot{Y} s'annule. En intégrant cette fonction, on obtient la fonction de potentiel représentée figure 5B. Pour lire ce graphe, il faut imaginer que le système est une bille soumise à une force qui l'entraîne vers le bas. La bille roule le long de la courbe jusqu'à ce qu'elle se stabilise au niveau du *minima* de la

¹⁷ Fonction qui relie le vecteur état du système au vecteur changement

fonction de potentiel. Le *minima* est un état d'équilibre stable (attracteur) puisque quelle que soit la position de la bille, elle s'en rapproche. Cette forme est un puits de potentiel.

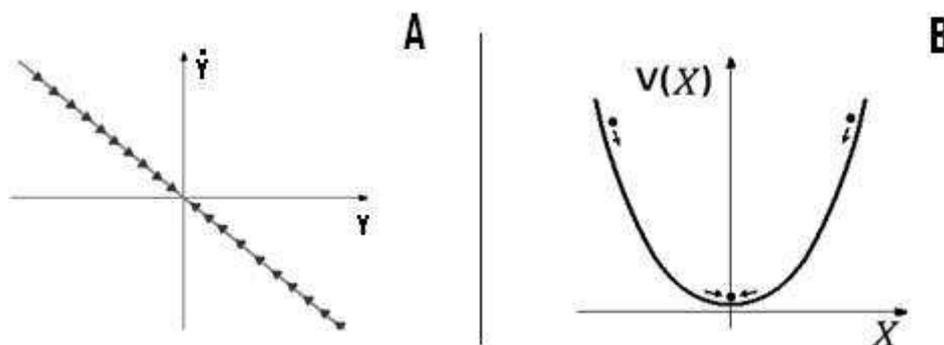


Figure 5 : Le graphe A (à gauche) représente une fonction de transition linéaire. Le graphe B (à droite) représente la fonction de potentiel, issue de la fonction de transition en A, avec un unique *minima* (attracteur).

Imaginons maintenant que la constante k de la même fonction de transfert soit négative. Le graphe de cette fonction (figure 5A) montre le même point de stabilité à l'origine du repère. Toutefois, lorsque Y est positif, son taux de variation est aussi positif, donc Y est croissant. A l'inverse, si Y est négatif, son taux de variation est négatif et Y est alors décroissant. Dans les deux cas, le système est divergent. Cela est manifeste sur le graphe de la fonction de potentiel (figure 6B). Le point où \dot{Y} s'annule est toujours un *extremum* (point d'équilibre), mais cette fois-ci, il s'agit d'un *maxima*. Si l'on simule le comportement de la bille, on constate qu'elle reste immobile, si elle est posée exactement¹⁸ sur le *maxima*. Dans tous les autres cas, elle roule le long de la courbe vers le bas, s'éloignant du point d'équilibre. Ce point est appelé point d'équilibre instable ou, aussi, *repellant*¹⁹.

¹⁸ Cas théorique idéal, impossible en pratique. La probabilité que le système se trouve précisément dans cet état tend vers zéro.

¹⁹ Terme utilisé en anglais que l'on pourrait traduire par *repulseur* par opposition à attracteur.

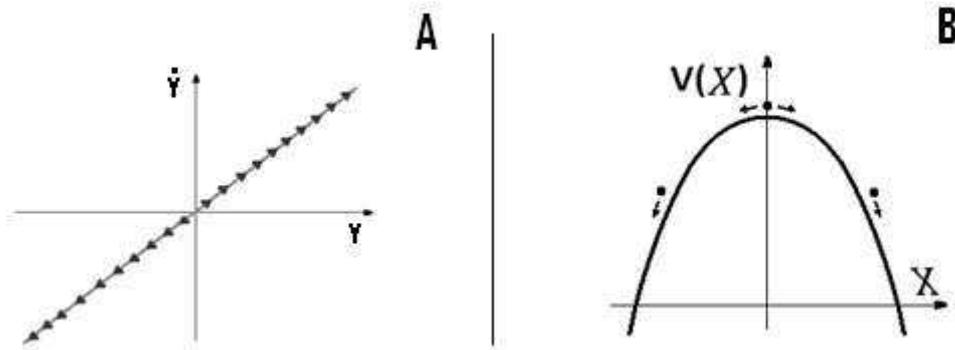


Figure 6 : (à gauche) Graphe de la fonction de transfert pour $k < 0$. (à droite) Fonction de potentiel correspondante avec un unique *maxima*.

Combinons maintenant ces deux cas au travers d'un exemple quelconque. La courbe figure 7A représente une portion d'une courbe continue quelconque²⁰ qui s'annule trois fois. Nous savons déjà que les points où la fonction s'annule sont des points d'équilibre. Ensuite, il nous suffit de déterminer si la fonction est croissante ou décroissante au voisinage de ces points pour savoir s'ils sont stables ou instables. Dans ce cas précis, il y a deux points stables séparés par un point instable. Cet exemple nous permet de constater que si la fonction de transition est continue, deux points de même nature sont toujours séparés par un point de nature différente.

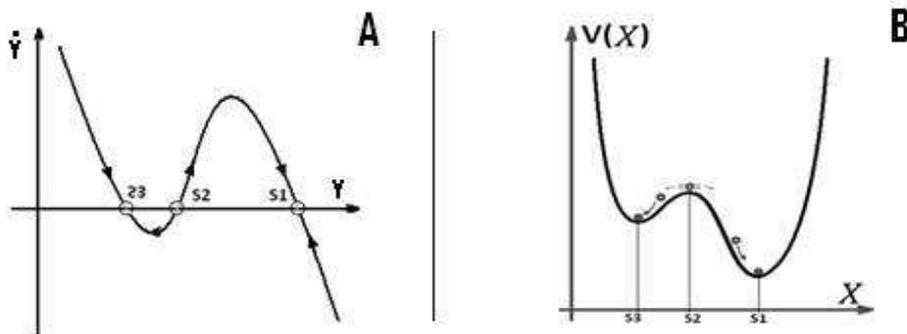


Figure 7 : (à gauche) Portion d'une fonction de transition continue qui s'annule 3 fois. (à droite) La fonction de potentiel qui en découle possède 2 *minima* (attracteurs) et un *maxima*. On parle alors de bistabilité.

²⁰ Cette courbe a l'apparence du graphe d'un polynôme de degré 3 pour plus de simplicité

3.7.6 Etat stable dans un système dynamique

Selon le théorème de Lyapunov, est stable dans l'espace des phases, par définition, tout état E dont un voisinage converge vers E (stabilité asymptotique) ou reste à proximité de E . Le voisinage peut être aussi petit que possible. Autrement dit, un système est dans un état stable s'il est possible de le perturber et qu'il revienne vers cet état spontanément. La perturbation consiste à éloigner le système de l'état initial. Notons ici, comme nous l'avons expliqué pour les différents types d'attracteurs, qu'un état stable ne désigne pas nécessairement un point fixe dans l'espace mais peut aussi faire référence à une trajectoire. De plus, il existe une autre forme de stabilité : la stabilité temporelle. Toutefois, cette dernière est assez délicate à manipuler puisqu'elle est relative à l'échelle temporelle de référence. Un état est stable temporellement, lorsqu'il se maintient assez longtemps relativement à l'ensemble des autres états adoptés par le système. Cette définition relative fait que la notion de stabilité temporelle doit être utilisée avec la plus grande prudence, contrairement à la notion de stabilité de Lyapunov, définie en début de paragraphe. Les attracteurs sont les états stables d'un système dynamique et leur stabilité renvoie à l'étendue de leur bassin d'attraction dans l'espace des phases (i.e. voisinage stable). C'est une manière de quantifier la stabilité.

3.8 Téléologie des systèmes dynamiques non linéaires

Comme nous venons de le voir, la convergence semble être la manifestation du projet téléologique d'un système dynamique non linéaire. Un tel projet pourrait alors être décrit comme une recherche de la stabilité. Un observateur naïf remarquera que tout système complexe, pour le temps qu'il existe, est mu par le besoin d'atteindre un état stable. Ainsi, si dans l'espace des phases un tel état existe et que les contraintes environnementales ne le

placent pas hors de portée de sa dynamique²¹, le système finira par l'atteindre pour ne le quitter qu'en cas de perturbation. L'étude de la dynamique est donc naturellement l'étude de la topologie des attracteurs dans l'espace des phases. Mais comment et pourquoi se forment les attracteurs d'un système ? Il existe une réponse communément acceptée pour cette question, c'est le second principe de la thermodynamique.

3.8.1 L'entropie comme unique cause de la dynamique des systèmes autonomes

C'est en 1865, sur la base des travaux de l'ingénieur français Sadi Carnot, que Rudolf Clausius introduit le modèle d'une fonction d'état baptisée entropie²² thermodynamique. Cette fonction est strictement croissante avec le temps dans un système clos. Phénoménologiquement, la croissance de l'entropie traduit l'homogénéisation de la température au sein d'un système thermodynamique. Ce qui signifie que si un système ne possède pas une température homogène en tous points, alors, il se crée spontanément des flux d'échange de chaleur. Le système évolue donc thermodynamiquement vers l'homogénéité thermique, autrement appelée équilibre thermodynamique. Une fois atteint cet état, il est considéré comme thermodynamiquement mort, c'est-à-dire qu'aucun flux thermique ne peut plus se produire spontanément dans le système.

Par la suite, avec les travaux de Boltzmann (1877), l'entropie deviendra une dimension stochastique généralisée des systèmes dynamiques. Pour Boltzmann, l'entropie décrit le degré de désorganisation microscopique du système. C'est ainsi que croissance d'entropie est souvent associée avec augmentation du désordre. Mais cette association n'est valable que dans un système fermé, cas théorique, qui ne peut se concevoir qu'à l'échelle de l'univers tout entier. En réalité, les systèmes que nous étudions pratiquent des échanges

²¹ Par la suppression de certains degrés de liberté qui rendraient l'état stable hors limite, par exemple

²² Le mot entropie est un dérivé du grec et signifie « évoluer vers ».

avec leur environnement. C'est pourquoi, la croissance locale de l'entropie n'est pas nécessairement synonyme de diminution de l'ordre. L'entropie dans les systèmes ouverts peut même devenir un principe organisationnel.

Commençons par décrire le principe de l'entropie systémique. Toute chose organisée - entendons par là « qui présente une certaine hétérogénéité laissant apparaître une structure quelconque, même « désordonnée et instable » - tend à subir une force contraire au principe qui lui confère sa structure²³. En ce sens, toute chose organisée tend à subir le poids de sa propre structure et à « s'effondrer sur elle-même ».

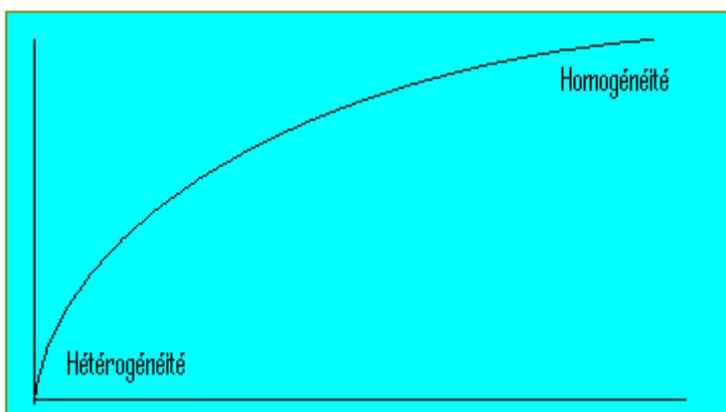


Figure 8 : Fonction d'évolution de l'hétérogénéité microscopique d'un système vers l'homogénéité.

Ainsi, toute chose hétérogène tend à évoluer vers l'homogénéité : « [...] le désordre dont il s'agit ici n'est qu'une homogénéité statistique, et il concerne le rangement des particules submicroscopiques (molécules, atomes, particules élémentaires) qui constituent la matière, dans tous leurs états énergétiques possibles » (Atlan, 1979, p. 28). Homogénéité le plus souvent atteinte de façon asymptotique (figure 8). Illustrons ceci au travers de quelques exemples.

²³ Principe duquel dérive la notion d'énergie potentielle en mécanique

3.8.2 Entropie et gradient de concentration électronique : la force électromotrice

Prenons le cas d'une pile électrochimique. La structure d'une pile est antisymétrique (voir figure 9), c'est-à-dire qu'elle possède une zone négative (excédent de charges) et une zone positive (déficit de charges). Attendu que l'excédent et le déficit s'auto-définissent mutuellement, il semble logique que l'excédent soit numériquement égal au déficit. Or, il s'avère que, si la liberté lui en est laissée, le système que constitue la pile tend à s'équilibrer. Les charges en excédent se déplacent vers la zone déficitaire, créant ainsi un flux de charges nommé courant électrique. Le déplacement des charges est souvent ramené à l'expression d'une « force électromotrice ». Ainsi, la structure hétérogène formée par la répartition inégale des charges électriques se développe vers une forme plus homogène au sein du système. Il faut toutefois remarquer que, pour autant, le système n'est peut-être pas lui-même homogène avec son environnement. Mais, dans une moindre mesure, une pile est un système quasi-clos car, sauf dans le cas d'une perte non-intentionnelle de composantes chimiques, le nombre porteur de charges du système ne devrait pas changer.

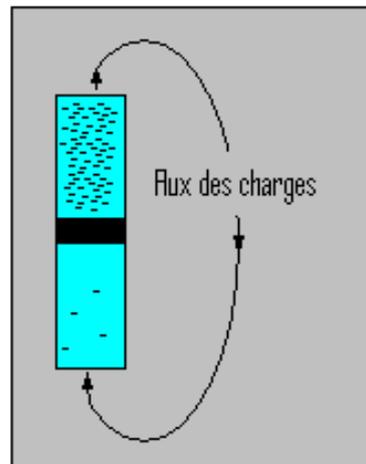


Figure 9 : Les charges électroniques dans une pile chimique se déplacent pour annuler le gradient de concentration.

3.8.3 Entropie et gradient de concentration chimique : les courants ioniques

En franchissant un niveau d'organisation de la matière, le même phénomène peut être observé au niveau des atomes. Fondé sur le même principe à l'œuvre dans l'exemple du démon de Maxwell (2001), le cas de la membrane axonique (figure 10) illustre bien ce principe au niveau biologique. Basiquement ramené à un cylindre de rayon de base r et de longueur infinie, l'axone contient un certain nombre d'ions dans son milieu intérieur et la concentration de ces ions est relativement stable dans le temps.

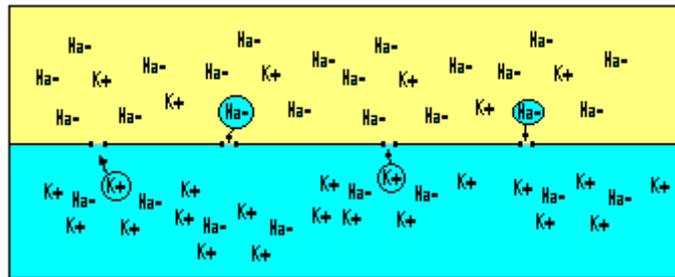


Figure 10 : Le flux ionique à travers la membrane axonique dépend du gradient de concentration des ions de part et d'autre de la membrane.

Tout au long de l'axone, un certain nombre de voies de communication avec le milieu extérieur existent. Le courant ionique naturel par gradient de concentration a lieu par homogénéisation des taux de concentration entre le milieu extérieur et le milieu intérieur de l'axone. Ici, chaque ion possède un canal spécifique qui permet la libre circulation ionique transmembranaire. Cette circulation engendre une variation de la différence de potentiel – au départ nulle – de la membrane axonique qui est l'une des principales causes du potentiel d'action des neurones. Il est intéressant de remarquer ici, que l'une des principales causes de l'activité du système nerveux repose sur une dérivée du principe d'équilibre thermodynamique. Remarquons, par ailleurs, que le phénomène attribué à l'évolution de l'entropie s'oppose directement à un autre phénomène entropique : l'homogénéisation des charges électriques s'oppose à l'homogénéisation des concentrations ioniques. Il est

particulièrement important de garder à l'esprit que deux phénomènes peuvent obéir au même principe fondamental mais s'opposer radicalement. En l'occurrence, ici, le flux d'homogénéisation ionique crée une hétérogénéité électrique.

3.8.4 Entropie et répartition des forces dans un système mécanique : le travail

Prenons un système mécanique composé d'un mobile et de plusieurs forces qui travaillent sur ce mobile. En supposant, au moment où nous nous intéressons à ce système, que la résultante de ces forces n'est pas nulle en son centre de gravité et que ces forces soient constantes, le système sera alors en mouvement et ce mouvement ne s'achèvera que lorsque le système aura résolu la problématique de l'équilibre. Le point d'équilibre de ce système, s'il est un jour atteint, est caractérisé par une relation remarquable qui est que les forces combinées produisent un travail nul sur l'ensemble du système. On considère alors que le système est dans un état particulier qui tend à compenser le travail de chacune des forces par celui des autres. Il y a, alors, homogénéité de la répartition du travail sur la structure que forme le système. Il faut remarquer que ce point d'équilibre n'est pas nécessairement un point stable dans le temps. Il se peut que la relation d'équilibre soit réalisée au travers d'un cycle mécanique. Le système mécanique Terre-Soleil en est un exemple (figure 11).

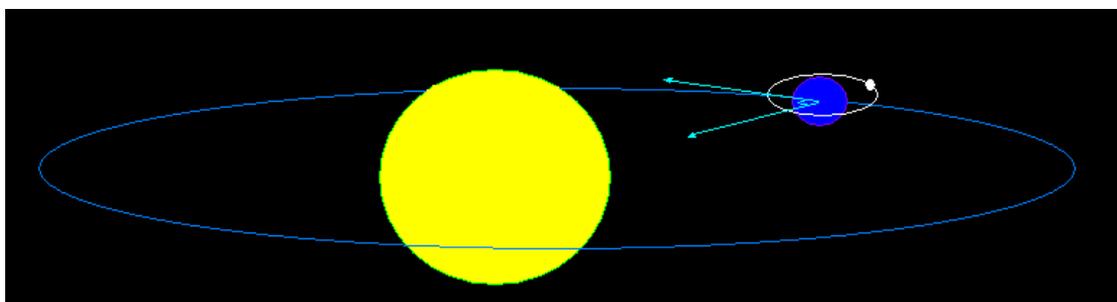


Figure 11 : Système mécanique Terre-Soleil. La terre est en orbite stable autour du soleil.

Dans cet exemple, la terre devrait tomber sur le soleil sous l'effet de la force d'interaction gravitationnelle, mais, à cause de sa vitesse acquise initialement, elle tend, dans le même temps, à s'en éloigner. L'équilibre de ces deux effets est atteint au travers d'une trajectoire elliptique héliocentrique de période relativement stable.

3.8.5 Entropie et mécanisme de normalisation sociale : de la singularité à l'uniformisation des comportements

Tous ces phénomènes ne sont pas propres aux seuls systèmes physiques. Au sein des systèmes humains, on peut aussi observer la manifestation d'une forme d'entropie. L'émergence d'une norme au sein d'un collectif humain s'observe quand, sans concertation entre les individus qui le composent, le comportement du groupe témoigne d'une convergence des comportements individuels vers un nouveau comportement propre au collectif lui-même (Asch, 1952; Festinger, 1954; Sherif, 1935). Chaque individu laissé libre d'agir de façon indépendante manifeste une singularité propre dans son comportement. Avec le temps, au sein d'un groupe dont l'une des principales priorités est d'assurer la conservation de la cohérence au sein du collectif, ces singularités s'effacent lorsque le sujet agit en tant qu'agent du collectif. Le rôle de la norme en tant que processus naturel émergeant est de conférer au collectif un répertoire d'actions qui définit le groupe en tant qu'entité dynamique. On parle alors d'actions de groupe ou de synergies de groupe. Dans cette perspective, le processus d'émergence d'une norme est directement piloté par des effets d'uniformisation mettant en relief pour ce niveau d'organisation une forme d'entropie systémique.

3.8.6 De l'entropie thermodynamique à l'entropie systémique

Au travers de ces exemples, nous pouvons déjà formuler un premier constat : l'entropie est l'expression d'une force générique qui travaille sur les systèmes dans le but de

les faire tendre vers l'état d'homogénéité maximale qu'ils peuvent admettre sans perdre leur identité. Il est remarquable que cette force apparaisse à différents niveaux d'organisation. Pourtant, l'entropie, telle qu'elle est connue en thermodynamique, explique mal à elle seule l'existence d'une collection d'attracteurs dans l'espace des phases d'un système dynamique non linéaire qui témoigne d'une augmentation de la complexité au sein du système en contradiction apparente avec le second principe de la thermodynamique. Pour poser la question en d'autres termes, comment expliquer la formation spontanée de patterns complexes dans un système dynamique possédant un grand nombre de degrés de liberté avec le seul concept de l'entropie ?

3.9 L'ordre par le chaos

C'est chez Prigogine et Stengers (1988) que nous trouvons un début de réponse à cette question. Etudiant la thermodynamique des systèmes chimiques loin de l'équilibre, ils mettent en évidence la formation de ce qu'ils nomment *structures dissipatives*. Une structure dissipative est une structure qui permet un flux d'entropie important. Les structures dissipatives se forment spontanément dans les systèmes loin de l'équilibre²⁴ quand le processus stochastique de diffusion de la chaleur n'est pas suffisant. Autrement dit, en thermodynamique, quand le gradient de température entre deux points du système atteint un seuil critique pour le système. Le meilleur exemple qui illustre ce propos est celui de la convection, mise en évidence par Bénard (voir Flesselles, Croquette, Jucquois, & Janiaud, 1995). Lorsqu'un fluide²⁵ est chauffé par le bas et refroidi par le haut, il se crée spontanément un flux de chaleur du bas vers le haut. Mais lorsque le gradient de température augmente, et avec lui la température du liquide, il se produit un phénomène

²⁴ On trouve parfois l'expression : « à la frontière du chaos »

²⁵ De l'huile de silicone dans l'expérimentation de Bénard

particulier. La chaleur cesse de se diffuser par conduction dans lequel seule l'énergie thermique est transférée de proche en proche aux molécules. A la place, le processus de convection apparaît, on dit qu'il supprime les forces de viscosité du liquide qui maintient initialement les molécules dans leur voisinage initial. Dans le processus de convection, la chaleur n'est plus diffusée de proche en proche, mais ce sont les molécules elles-mêmes qui se déplacent dans le milieu, allant du point le plus chaud au point le plus froid. Et alors que la température augmente toujours sous le liquide, la convection simple, c'est-à-dire le déplacement individuel des molécules qui transportent l'énergie thermique, ne suffit plus. Il se crée un flux de particules qui passe rapidement d'un état chaotique désorganisé à un état auto-organisé en formant un pattern que l'on appelle « cellules de Rayleigh-Bénard » (voir figure 12) à la surface du fluide. Ce pattern est induit par les conditions environnementales mais n'est pas déterminé par elles. Les rouleaux de convection que l'on peut observer en faisant chauffer de l'eau relèvent de la même dynamique.

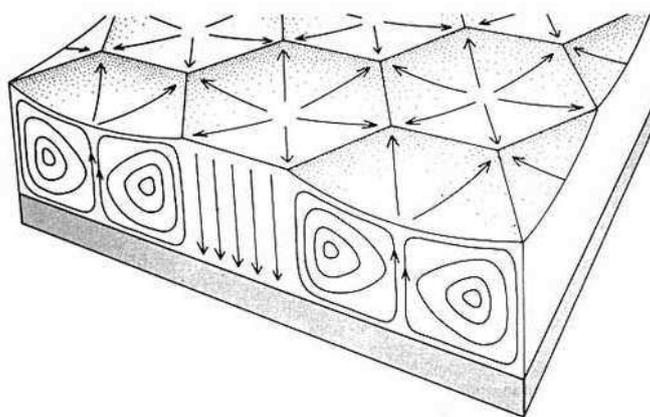


Figure 12 : Schéma d'une structure de cellules de Rayleigh-Bénard

C'est partant de ces observations que Nicolis et Prigogine (1977) élaborent la théorie de *l'ordre par le chaos* qui n'est autre qu'une théorie de l'auto-organisation des systèmes physiques. On retrouve déjà le même concept chez Von Foerster (1960) et plus tard chez Atlan (1979) sous l'appellation « complexité par le bruit », dans l'expression « chaos

déterministe » (Lorenz, 1963; Ruelle & Takens, 1971) ou encore dans le concept d'autopoïèse de Varela (1989).

Selon ces principes, une source de perturbation est la cause de l'apparition d'une structure complexe sans pour autant que cette dernière soit explicable par le bruit. Ici, le bruit joue un rôle de catalyseur et la réponse du système est émergente. C'est-à-dire qu'il possède une influence non spécifique sur le système. Pour expliquer cette apparente contradiction du second principe, Nicolis et Prigogine (1977) avancent l'hypothèse que deux systèmes peuvent échanger de l'entropie. Ainsi, l'entropie d'un système diminue tandis que celle de l'autre augmente, mais l'entropie globale reste, au mieux, constante. C'est ce principe qui explique la formation d'attracteurs dans les systèmes dynamiques non linéaires, sans qu'il soit besoin de faire appel à l'intervention extérieure d'une forme d'influence prescriptrice. Nous ajouterons que l'échange d'entropie entre deux milieux peut parfaitement être conçu au sein du même système, ce qui explique partiellement pourquoi l'évolution de l'entropie interne peut localement et temporairement causer l'émergence de structures complexes. Toutefois, ces structures formées au sein du système ont, en retour, une influence sur le système lui-même. Comme l'explique Varela (1989; Varela *et al.*, 1993), quand une forme d'organisation autopoïétique émerge, fût-ce de façon fortuite, elle tend naturellement à se maintenir du fait qu'elle engendre, par son existence, les causes qui lui donnent naissance. Ainsi, ces organisations deviennent de plus en plus probables puisqu'organisant en retour l'environnement dans lequel elles sont apparues, augmentant la probabilité de leur propre apparition. Une organisation autopoïétique s'apparente à un attracteur d'un système dynamique.

IV - L'HYPOTHESE DYNAMIQUE EN PSYCHOLOGIE COGNITIVE

L'idée que la cognition puisse être comprise comme un phénomène essentiellement temporel, dont la complexité tient dans le flux du changement lui-même (Juhel, 2005), est un vieux rêve en psychologie que caressait déjà Hume en 1740 (Hume, 1978). Mais, les concepts dynamiques ne commencent à essaimer les différents champs de la psychologie qu'à partir du début du XX^e siècle, avec notamment les concepts de champ et d'équilibration utilisés par les gestaltistes, et celui d'homéostasie en théorie cybernétique du contrôle dès le début des années 1940. L'ère dynamique en psychologie débute réellement à partir de l'évolution de la cybernétique et notamment avec les travaux d'Ashby (1960). Puisque le cerveau est composé d'une multitude d'éléments interconnectés dans un réseau complexe, il doit pouvoir faire l'objet d'investigations en tant que système dynamique. Zeeman (1965) développera cette position dans le champ de la morphodynamique. Mais c'est sur l'intuition d'Ashby qu'est né un nouveau programme de recherche qui se développera en parallèle du programme computationnel : le programme connexionniste (Hopfield, 1982; McClelland, Rumelhart, & Hinton, 1986; Rumelhart & McClelland, 1986; Smolensky, 1988). La plupart des modèles connexionnistes sont des modèles dynamiques par nature ou en puissance, puisqu'il suffit de boucler l'ensemble des sorties d'une matrice neuronale sur ses entrées pour en faire un système dynamique (Elman, 1991). Mais, bien souvent, ils sont sous-exploités et les auteurs organisent leurs discussions et leur interprétation avec un cadre conceptuel qui relève du programme computationnel (Sejnowski & Rosenberg, 1987). Toutefois, si les systèmes dynamiques sont implémentés, au départ, dans des réseaux de neurones, ils gagnent rapidement en autonomie pour, progressivement, se constituer en paradigme d'étude à part entière. C'est aux environs des années 1980 que l'approche

dynamique commence à se démocratiser et que les publications se multiplient avec une période relativement féconde entre 1994 et 1998, au travers de la publication des ouvrages de référence de Thelen et Smith (1996), Port et Van Gelder (1995) et Nowak et Vallacher (1998). La suite de ces publications verra, de plus, la fondation de la revue *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences* en 1997.

Pendant la période des années 1980 à 2000, on peut trouver des travaux s'inscrivant dans l'approche dynamique de la cognition dans, à peu près, tous les champs d'étude de la psychologie (Nowak & Vallacher, 1998; Port & Van Gelder, 1995; Thelen & Smith, 1996; Ward, 2001). Nous pouvons citer pour référence quelques travaux dans le domaine de l'apprentissage (Cooney & Constanas, 1993; Gilgen, 1995; Kampis, 1991; Vetter, Stadler, & Haynes, 1997), l'acquisition et la production du langage (Browman & Goldstein, 1985; Elman, 1990; Kelso, Saltzman, & Tuller, 1986; McClelland & Elman, 1986; Petitot-Cocorda, 1985; Pierrehumbert & Pierrehumbert, 1990; Van Geert, 1991), le contrôle moteur (Bullock & Grossberg, 1988; Carson, Goodman, Kelso, & Elliott, 1995; Haken, Kelso, & Bunz, 1985; Kugler & Turvey, 1987; Saltzman, 1992; Schöner, Kopecz, & Erlhagen, 1997; Turvey, 1990; Warren, 1995), le développement (Smith, Thelen, Titzer, & McLin, 1999; Thelen, Schöner, Scheier, & Smith, 2001), la psychologie sociale (Guastello, 1988; Kaplowitz & Fink, 1992; Vallacher & Nowak, 1997), la neuropsychologie cognitive (Amit, 1989; Babloyantz & Lourenço, 1994; Cohen, 1992; Guckenheimer *et al.*, 1993; Skarda & Freeman, 1987), la mémoire (Clayton, Frey, Sulis, & Combs, 1996; Clayton & Frey, 1997), la psychopathologie (Abraham, Abraham, & Shaw, 1990; Hornero, Alonso, Jimeno, Jimeno, & Lopez, 1999; Scott, 1985).

En particulier, dans le champ de la perception, nous signalons des travaux en perception du mouvement (Bingham, Schmidt, & Rosenblum, 1995; Grossberg & Rudd,

1992; Hock, Kelso, & Schöner, 1993; McClelland & Rumelhart, 1981; Port, Cummins, & McAuley, 1995) et dans le domaine de la catégorisation de *stimuli* ambigus (Haken, 1999; Hock, Schöner, & Voss, 1997; Kruse & Stadler, 1995; Porter & Hogue, 1998; Rączaszek, Tuller, Shapiro, Case, & Kelso, 1999; Stewart & Peregoy, 1983; Ta'edd, Ta'eed, & Wright, 1988; Tuller, Case, Ding, & Kelso, 1994). Cette dernière catégorie de travaux, que nous développerons dans ce qui va suivre, s'organise autour de deux grands programmes de recherche : la synergétique et la morphodynamique.

4.1 La théorie synergétique

La synergétique (Haken, 1977) est une des théories développées dans le cadre de l'étude des systèmes dynamiques chaotiques dont elle est l'une des branches, bien que le concept de synergie ne soit pas nouveau et déjà proposé par Bernstein (1967). Comme l'ensemble de ces théories, la synergétique se préoccupe en particulier d'expliquer l'émergence de patterns d'organisation, au sein de systèmes à grand nombre de degrés de liberté et loin de l'équilibre. C'est au travers de l'étude du comportement des atomes du cristal du laser que Haken (1984) fonde le principe synergétique dans les systèmes physiques. Lorsqu'ils sont faiblement excités par une source d'énergie externe, les atomes du cristal se mettent à osciller librement de façon totalement indépendante et le laser se comporte comme une lampe classique. Mais lorsque l'intensité de la source augmente, les atomes du cristal cessent d'osciller librement et se mettent à osciller avec la même phase. Ce qui produit un changement qualitatif radical au niveau macroscopique : un état hautement organisé s'est spontanément manifesté, l'effet laser.

4.1.1 De la variable collective au paramètre d'ordre et de contrôle

De l'exemple précédent, il ressort deux concepts de base de la théorie synergétique : le concept de paramètre d'ordre et celui de paramètre de contrôle.

Le paramètre d'ordre (voir Landau, 1936) est une variable macroscopique qui capture la dynamique d'un très grand nombre de degrés de liberté. C'est une notion fondamentale en synergétique : un très grand nombre de degrés de liberté du niveau microscopique est réduit à un unique principe organisationnel du niveau macroscopique. Dans l'exemple du laser, le paramètre d'ordre est la nature de la lumière émise et peut prendre deux valeurs qualitatives : cohérente ou non cohérente²⁶. Le paramètre d'ordre est donc à la fois la conséquence d'un mécanisme de coopération entre les éléments microscopiques du système et, en retour, une contrainte pour le comportement de ces éléments. C'est le principe au cœur de la théorie synergétique : le **principe d'asservissement** (*slaving principle*). Lorsque le paramètre d'ordre contraint la dynamique de la plus grande partie des éléments microscopiques, au travers du processus de suppression des degrés de liberté, on constate l'émergence d'un attracteur.

Le paramètre de contrôle, quant à lui, désigne la notion de facteur non spécifique de la dynamique. C'est une variable qui influence le paramètre d'ordre (i.e. l'état macroscopique du système), sans pour autant le spécifier au travers d'une relation prescriptive. Ainsi, dans l'exemple du laser, l'intensité de la source externe est le paramètre de contrôle. Il est la cause de la dynamique, mais l'explication de celle-ci reste endogène. Le passage d'un état désorganisé à un état hautement organisé est brutal (sharp). On peut arguer qu'il s'agit d'un phénomène de seuil, mais alors, nous restons cantonnés à une simple description car cela n'explique pas pourquoi spontanément des atomes, alors indépendants, se mettent à

²⁶ La lumière émise par le laser est « cohérente » quand chacun des atomes du cristal oscille à l'unisson.

osciller à l'unisson simplement parce qu'un seuil énergétique a été franchi. Il existe donc une relation entre le paramètre d'ordre et le paramètre de contrôle et c'est cette relation qui est l'objet de modélisation dans le cadre de la théorie synergetique.

4.1.2 Notion de patterns auto-entretenus

L'application de la synergetique à des modèles physiques, biologiques ou psychologiques, repose sur le postulat que la nature utilise les mêmes principes d'auto-organisation à différentes échelles pour produire des patterns. Bien que ces patterns soient différents suivant l'échelle d'observation, les principes de formation basiques restent les mêmes (Mandelbrot, 1983). Pour la synergetique, le cerveau humain est, fondamentalement, un système auto-organisé de formation de patterns, gouverné par des lois dynamiques non linéaires. En vivant à la limite d'états critiques, le cerveau est capable d'anticiper et non pas uniquement de réagir au présent (Kelso, 1995). Ce postulat est fort et possède un grand nombre d'implications. Dans le discours de l'auto-organisation, aucun niveau n'est plus ou moins fondamental qu'un autre. Pour Kelso (1995), comme pour Le Moigne (1999), la coordination (ou pattern dynamique) possède une nature informationnelle : « [...] *coordination or pattern dynamics is informational [...] What could be more meaningful to an organism than information that specifies the coordinative relations among its parts or between himself or the environment* » (Kelso, 1995, p.179). Plutôt que séparer la dynamique, relevant de la physique classique, de l'information, considérée comme un codage symbolique qui agirait tel que le fait un programme d'ordinateur, la dynamique elle-même est perçue et décrite comme porteuse de sens. Kelso relie l'intentionnalité de l'esprit humain et la dynamique auto-organisatrice du système cognitif réduit pour les besoins de simplicité de l'explication au domaine de l'activité du système nerveux central.

Ainsi, dans cette optique, il résulte, pour Kelso (1995), un ensemble de faits qui constituent la théorie synergétique de la cognition. Nous allons en examiner quelques-uns et nous pourrons constater que ces faits sont bien souvent déjà contenus dans la théorie des systèmes dynamiques elle-même.

Propriétés des patterns dynamiques

(1) Les patterns émergent spontanément comme produit des interactions d'un grand nombre d'éléments. Les interactions doivent être de nature non linéaire, contrairement aux positions de Newton pour qui le mouvement de l'ensemble peut être considéré comme la somme des mouvements des parties dans une dynamique où les forces ne font que se combiner en s'additionnant. Et donc, le comportement du tout est non seulement supérieur mais aussi qualitativement différent du comportement des parties à cause des non linéarités dans les interactions. Par cette affirmation, Kelso attribue au pattern dynamique, la qualité d'attracteur complexe étrange.

(2) Pour que des patterns puissent émerger, le système doit être une structure dissipative loin de l'équilibre. A cause des interactions non linéaires, l'énergie, ou quelle que soit la quantité ou la dimension qui représente l'activité du système, ne se propage pas uniformément²⁷ dans l'espace du système, mais se concentre en flux localisés qui canalisent le transport de l'énergie. La conséquence de cette canalisation est qu'un certain nombre de degrés de liberté du système sont supprimés. Ce point est crucial pour la théorie synergétique, car il explique comment un attracteur se forme spontanément au sein d'un système complexe et comment le complexe peut émerger du simple.

(3) Les degrés de liberté pertinents, c'est-à-dire ceux qui caractérisent les patterns émergents dans un système complexe, sont des variables collectives qui constituent le

²⁷ Comme c'est le cas dans un système thermodynamique fermé simple.

paramètre d'ordre du système. L'un des principes de la synergetique est que le paramètre d'ordre se constitue spontanément par la coordination entre certains éléments du système et, en retour, il influence le comportement de ses constituants. C'est le principe de causalité circulaire dans les systèmes complexes. Le paramètre d'ordre se distingue malgré tout de l'attracteur en ce que l'attracteur est une valeur²⁸ du paramètre d'ordre pour laquelle le potentiel est un minimum local.

(4) On peut déterminer un paramètre d'ordre au voisinage d'une transition de phase où le phénomène de perte de stabilité engendre la création de nouveaux patterns stables, ou encore le basculement entre deux patterns existants. Le paramètre d'ordre est alors constitué par les dimensions variant au cours de la transition de phase.

(5) Les fluctuations sont la cause du maintien, voire de l'augmentation, de la complexité. Elles permettent la naissance de nouveaux patterns. Dans cette perspective, les fluctuations ne sont pas une simple source de bruit à supprimer du processus informationnel²⁹. Une affirmation qui permet une fois de plus de relier le concept de pattern dynamique de Kelso à celui de structure dissipative que l'on rencontre chez Prigogine notamment (Prigogine & Stengers, 1988).

(6) Les paramètres qui, d'une façon générale, ont une influence sur la formation des patterns sans en spécifier la forme ou la nature sont appelés les *paramètres de contrôle*.

(7) Enfin, et pour en finir avec cette énumération, la dynamique du paramètre d'ordre qui caractérise l'état du système étudié, est traduite sous forme d'un système d'équations différentielles qui peuvent avoir des solutions qualitatives simples, comme les points fixes ou

²⁸ Valeur fixe ou bien variable selon que l'attracteur est un point fixe, une trajectoire cyclique ou un voisinage.

²⁹ Processus de mise en forme et de construction du pattern.

les cycles limites, mais aussi très complexes comme des structures chaotiques ou avec des dimensions aléatoires, ceci préfigurant l'énorme complexité des comportements associés.

L'ensemble des points ci-dessus définit le concept d'attracteurs dans l'approche synergétique et permet au chercheur de les modéliser afin d'en extraire des propriétés, qualitatives ou quantitatives, opérationnalisables.

4.1.3 Les piliers de la synergétique

En synergétique, qu'il s'agisse des modèles déterministes ou stochastiques qui en sont issus, les degrés de liberté sont modélisés comme des oscillateurs non linéaires, et la synergie se crée par couplage entre ces oscillateurs. Ce que nous venons de présenter sous le nom de **principe d'asservissement**. Comme tout processus dynamique, ce couplage se réalise dans le temps. On appelle temps d'équilibration, la durée théorique nécessaire au couplage de l'ensemble des oscillateurs pour atteindre l'état d'équilibre parfait³⁰. Dans un système à grand nombre de degrés de liberté, de surcroît stochastique, ce temps peut tendre vers l'infini. On dit que l'équilibration suit une loi asymptotique. Mais dans un système dynamique loin de l'équilibre, ce temps n'a que peu de sens, car l'échelle temporelle de la dynamique ne permet pas une telle équilibration. En réalité, l'équilibration globale est une sorte de mythe pour le système lui-même, un principe général qu'il poursuit sans jamais l'atteindre car il est sans cesse remis en question et modifié par sa propre non linéarité et les perturbations qu'il subit. Voilà pourquoi, on s'intéressera plutôt à un autre temps, le temps de **relaxation locale**.

Ce dernier est la durée nécessaire au système pour retrouver un état stable à la suite d'une perturbation. Admettons que le système soit dans un état stable (i.e. sur un attracteur), alors, une source de perturbation va causer un déplacement de la position du

³⁰ Ce qui correspondrait au niveau d'entropie maximum dans un système thermodynamique.

système dans l'espace des phases. Tant que la perturbation est assez faible, le système ne quitte pas le bassin d'attraction. Il est *envoyé* à travers l'espace, mais il finit par se re-stabiliser sur le même attracteur. C'est le **principe de relaxation**. Mais si la perturbation est suffisamment importante pour arracher le système au bassin d'attraction, il se produit alors une **transition de phase**. Le système quitte un état d'organisation macroscopique pour en rejoindre un autre, le cas échéant³¹.

4.2 La transition de phase

Le concept de transition de phase est central dans l'étude des systèmes dynamiques non linéaires en général et pour notre étude en particulier. La notion elle-même est, comme la plupart du temps en dynamique, héritée de la physique. On illustre souvent cette idée avec l'exemple de la transition de phase de l'eau. Lorsqu'une masse d'eau à l'état liquide est mise au contact d'une source froide dont la température est inférieure à zéro, il se crée un flux thermique entre les deux milieux. L'eau, dont la température est positive, va perdre progressivement de la chaleur au profit de la source froide. En supposant que la source froide soit à température constante, par exemple dans un congélateur, la température de l'eau décroît, jusqu'à passer sous le zéro de l'échelle de Celsius. Alors, l'organisation macroscopique de la masse d'eau change pour passer de la phase liquide à la phase solide : c'est une transition de phase. On retrouve dans cet exemple les principes et les concepts de la synergétique. La phase de l'eau est le paramètre d'ordre, la température (ou la densité de liaisons hydrogènes) est le paramètre de contrôle. Les éléments microscopiques, les molécules d'eau, adoptent spontanément une structure organisée en vertu du principe d'asservissement du paramètre d'ordre. De plus, par l'exemple de la transition de phase de

³¹ Il peut aussi être détruit et ramené au niveau de ses propres constituants, mais, comme nous l'avons déjà mentionné, cette situation sort du cadre de notre étude.

l'eau, nous pouvons amener ce qui est un phénomène de dynamique non linéaire central dans l'étude synergétique des systèmes : l'hystérèse. Dans le cas de cette masse d'eau dont la température décroît et sous certaines conditions de pression, nous remarquerons que, quelque part sous le 0°C, la transition de phase s'opère du liquide vers le solide. Pour l'exemple, supposons que cette transition s'effectue à la valeur arbitraire de -5°C. Une fois que le liquide a complètement gelé, supposons que nous inversons le gradient de température en le plaçant dans un environnement à, disons, 25°C. Naturellement, la température du liquide va remonter et passer la barre des -5°C. Or, la transition inverse du solide vers le liquide ne va pas se produire comme on pourrait s'y attendre. En fait, elle se produira aux alentours de 0°C. C'est une des propriétés les plus remarquables des phénomènes observés dans la dynamique non linéaire des systèmes : l'irréversibilité. Cette irréversibilité des processus est la marque d'une organisation des états du système et de la présence d'attracteurs. Mais nous reverrons plus en détail le phénomène d'hystérèse dans les chapitres suivants car il s'agit d'un concept central de notre travail.

4.3 Modèles synergétiques et psychologie de la perception

4.3.1 Les travaux fondateurs

Les premiers travaux synergétiques en psychologie portent sur l'étude des capacités motrices et plus particulièrement, avec l'étude princeps de Haken *et al.* (1985), sur la coordination du mouvement oscillatoire des index de deux mains. Ces auteurs reprennent l'étude de Kelso (1981). Dans cette étude, l'auteur demande aux participants d'effectuer un mouvement de balayage latéral (axe gauche-droite) avec leur index avec une synchronisation rythmique calée sur un métronome. Il est demandé aux participants un mouvement en « opposition de phase », c'est-à-dire que le mouvement implique l'action

concourante de groupes de muscles antagonistes d'un doigt à l'autre. Puis, progressivement, la fréquence d'oscillation, qui tient lieu, ici, de paramètre de contrôle, est augmentée. Lorsque la fréquence atteint une valeur critique, le mouvement des doigts cesse d'être en « opposition de phase » pour s'organiser spontanément et devenir un mouvement « en phase » où les groupes de muscles homologues sont simultanément sollicités. Par la suite, lorsque le paramètre de contrôle est diminué, le système se maintient dans le mode « en phase » et ne revient en mode « en opposition de phase » que pour une valeur bien inférieure à celle pour laquelle ce mode avait cessé d'être possible lors de la phase incrémentielle. Dans une étude ultérieure (Kelso, 1982, 1984), la même expérimentation est menée mais en exploitant le mouvement des poignets. Haken *et al.* (1985) avancent un modèle mathématique³² issu de la synergetique qui repose sur une interprétation en terme d'attracteurs. Lorsque le paramètre de contrôle est relativement bas, les deux mouvements (en phase et en opposition de phase) sont possibles. Mais, à partir de la valeur critique, il se produit un changement qualitatif dans le modèle qui gouverne la dynamique du mouvement. L'un des attracteurs cesse d'exister, celui correspondant au mode en « opposition de phase ». Dès lors, le système, qui se trouvait dans ce mode devenu instable, bascule dans le seul mode alors possible, le mode « en phase ». Le passage d'un mode à un seul attracteur à celui à deux attracteurs s'appelle une **bifurcation**. Bifurcation et transition de phase sont deux choses distinctes. La transition de phase traduit un changement qualitatif dans le comportement du système, tandis que la bifurcation traduit un changement qualitatif dans la dynamique du système, ou, autrement dit, dans son organisation.

³² Equation du potentiel du modèle HKB : $V = -a(\cos \phi + \frac{1}{4} \frac{r(\omega)^2}{r_c^2} \cos 2\phi)$ où V est le potentiel et ω le paramètre de contrôle

La figure 13 représente les graphes de la fonction de potentiel pour différentes valeurs du paramètre de contrôle. On y voit le mode en « opposition de phase », qui correspond aux puits de potentiel pour les valeurs π et $-\pi$ de la phase relative des doigts et qui se résorbe progressivement, jusqu'à disparaître totalement au fur et à mesure de l'augmentation du paramètre de contrôle. Le paramètre d'ordre est matérialisé par la petite bille grise qui est stationnaire dans le creux du puits de potentiel de la phase active. Lorsque l'attracteur correspondant à la phase active disparaît, la petite bille roule le long de la courbe vers le puits de potentiel le plus proche dans l'espace des phases. En l'occurrence, celui-ci correspond au mode d'oscillation « en phase » qui n'est pas altéré par le paramètre d'ordre.

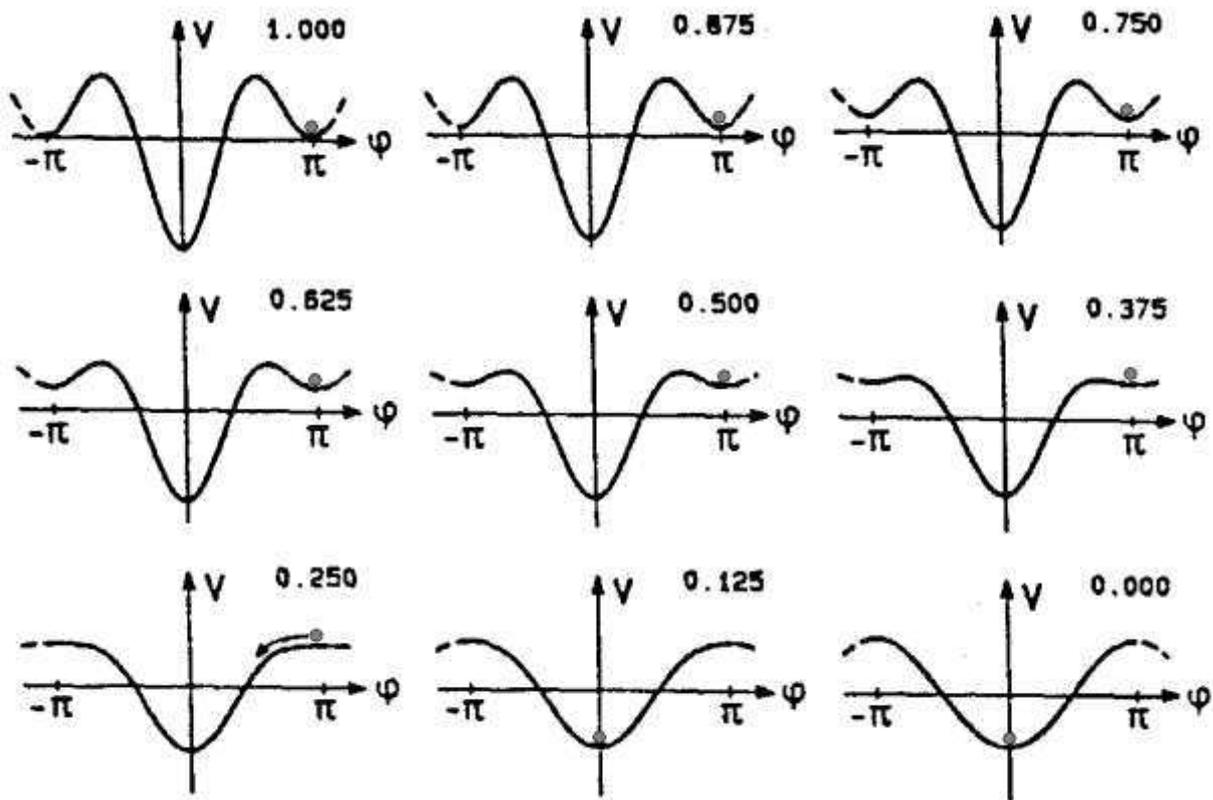


Figure 13 : Fonction de potentiel du modèle HKB en fonction du paramètre de contrôle (illustration tirée de Haken, Kelso, & Bunz (1985))

La fonction de potentiel indique que l'attracteur alternatif existe déjà, alors que le premier se maintient³³, et la profondeur du puits de potentiel implique qu'il est bien plus stable que la phase active (i.e. en opposition de phase). Pourtant, le système parvient à se maintenir et ne bascule qu'au moment où l'attracteur de la phase active a complètement disparu³⁴. Les modèles stochastiques qui injectent une composante de bruit blanc nuancent cette dernière affirmation : le système peut spontanément basculer avant même la résorption de l'attracteur sous l'effet du bruit interne.

Haken *et al.* (1985) concluent leur étude en expliquant qu'à partir d'une certaine valeur du paramètre de contrôle, les groupes de muscles de chaque main cessent de fonctionner indépendamment. Par l'intermédiaire d'un couplage entre les muscles, reposant probablement sur une synergie neuronale³⁵, les deux membres fonctionnent de façon synchrone. L'intérêt de ces travaux, outre le fait de mettre en évidence une transition de phase dans la rythmique des membres, est de d'introduire un nouveau modèle mathématique ainsi qu'un nouveau paradigme d'étude. C'est à partir du paradigme dit 'HKB', pour Haken, Kelso et Bunz, que seront déclinées par la suite un certain nombre d'études. En particulier celles de Tuller *et al.* (1994) qui va suivre.

4.3.2 Catégorisation du langage et synergétique

Dans un article de 1994, Tuller et collaborateurs proposent que, si les capacités de compréhension du langage humain sont stables malgré les fluctuations et les altérations et que, en même temps, les performances de catégorisation peuvent témoigner de

³³ La coexistence de deux attracteurs pour la même valeur du paramètre de contrôle est appelée bistabilité ou encore bimodalité suivant les études.

³⁴ On parle de convention de Maxwell quand le système se positionne sur l'attracteur le plus stable, correspondant au puits de potentiel le plus profond. Quand le système se maintient sur l'attracteur historique, on parle de convention de retard (*delay convention*) (voir Thom, 1977, p. 58)

³⁵ Haken, Kelso et Bunz (1985) formulent une hypothèse impliquant le corps calleux, mais cette hypothèse sera réfutée par Tuller et Kelso (1984) qui la testeront sur des patients *split-brain*.

surprenantes capacités d'adaptation, c'est parce que ces capacités sont le produit d'un système dynamique non linéaire. Les auteurs proposent donc de tester cette hypothèse en adaptant le paradigme HKB à une tâche de catégorisation acoustique. En faisant varier le silence entre l'énoncé de la consonne 's' et la fin du mot, les auteurs créent un biais perceptif qui favorise tantôt la perception du mot 'say', tantôt celle du mot 'stay'. La durée de ce silence constitue le paramètre de contrôle de l'expérimentation, il varie de 4ms entre 0 et 76ms : soit un ensemble de 19 valeurs qui constituent chacune un stimulus différent. Deux types de séries sont constitués à partir de cet ensemble, les séries aléatoires et les séries séquentielles. Dans les séries aléatoires, comme leur nom l'indique, les 19 valeurs de silence sont distribuées aléatoirement. Dans les séries séquentielles, contrairement aux séries aléatoires, les *stimuli* sont rangés par ordre incrémentiel et décrémental de la durée du silence. Chaque série séquentielle est donc constituée de 38 stimuli (19 en incrémentiel et 19 en décrémental) et les séries se distinguent selon qu'elles débutent par une phase incrémentielle ou décrémentielle. Chaque stimulus a une durée de 410ms plus la durée du silence. Entre chaque stimulus, un délai de 2 secondes est inséré afin que les sujets puissent noter leur réponse sur une feuille de papier. Chaque série est séparée par un délai de 6 secondes. Et enfin, une pause de 5 minutes est aménagée à la moitié de l'heure que dure l'expérimentation. Les profils de réponse sur l'ensemble des données observés par Tuller *et al.* (1994), sans tenir compte du sens de variation du paramètre de contrôle, correspondent à ceux obtenus classiquement dans les tâches d'indentification à choix forcé (Liberman, Cooper, Shankweiler, & Studdert-Kennedy, 1967). A savoir, que les réponses prennent la forme d'une courbe de fonction logistique. Toutefois, lorsque le sens de variation du paramètre de contrôle est pris en compte, les auteurs mettent en évidence trois profils de réponse distincts qu'ils nomment hystérèse, contraste et bordure (figure 14).

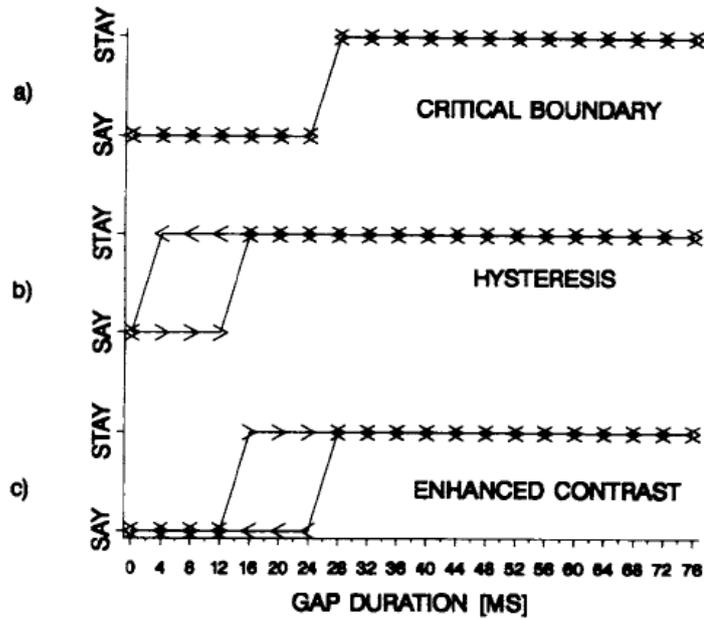


Figure 14 : Les trois profils de réponse obtenus par Tuller *et al.* (1994). Le profil (a) correspond au profil de bordure, les basculements ascendants et descendants ont lieu pour la même valeur du paramètre de contrôle. Les profils (b) et (c) sont, respectivement, les profils d'hystérèse et de contraste.

L'hystérèse est le phénomène déjà décrit plus haut pour lequel la valeur du paramètre de contrôle, pour la transition d'une catégorie à l'autre, est supérieure en phase incrémentielle par rapport à la phase décrémente. A l'opposé, lorsque la valeur de transition est inférieure en phase incrémentielle par rapport à la phase décrémente, il s'agit du phénomène de contraste (*enhanced contrast*) ou encore d'hystérèse inverse. Enfin, lorsqu'il n'y a pas de différence entre les deux valeurs, les auteurs donnent le nom de bordure (*critical boundary*) au phénomène. Tuller *et al.* (1994) observent des taux respectifs de 17%, 41% et 42% de profils pour la bordure, l'hystérèse et le contraste. Ces résultats posent de sérieux problèmes que nous allons développer, cependant les auteurs proposent à la suite de leurs résultats un modèle mathématique (figure 15) qui décrit la fonction de potentiel d'un système à deux attracteurs.

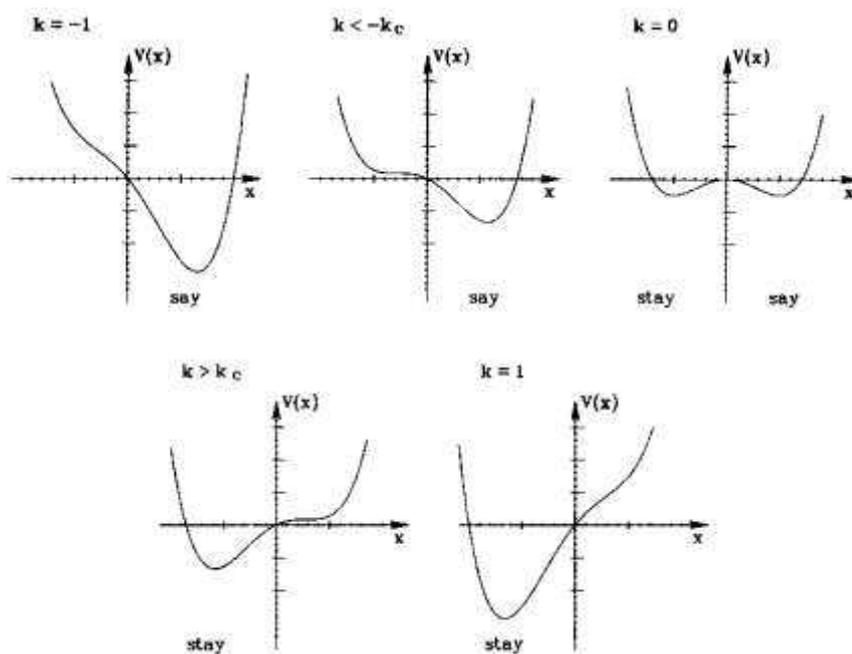


Figure 15 : Modèle de la fonction de potentiel à deux attracteurs tiré de Tuller, Case, Ding, & Kelso (1994).

$$V(x) = kx - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{4}$$

Commençons par remarquer que le profil de contraste s'oppose à la fois empiriquement et théoriquement à celui d'hystérèse. A aucun moment, le profil de contraste n'est justifié ou prédit par la théorie qui sert à l'élaboration du modèle mathématique utilisé par les auteurs. Mais, le fait que les deux profils soient observés à proportions égales devrait s'opposer aux prédictions théoriques défendues dans cette étude. Par ailleurs, la méthode même utilisée pour mesurer le taux est discutable. En effet, les auteurs catégorisent les séries séquentielles selon la valeur du point de basculement pour les phases incrémentielles et décrémentationnelles. Or, absolument rien ne justifie que l'on mette en comparaison ces deux valeurs. Prenons par exemple deux séries différentes, S1 et S2, dans lesquelles les valeurs de basculement incrémentielles et décrémentationnelles, I1, D1, I2 et D2, sont, respectivement, 34, 38, 42 et 50. De telles valeurs indiquent, pour chacune des séries, un profil de contraste quand on associe I1 à D1 et I2 à D2. Or, supposons que nous fassions l'association I1-D2 (34 ; 50) et I2-D1 (42 ; 38), alors nous obtenons un effet de

contraste sur la première association et un effet d'hystérèse sur la seconde. Associer les valeurs de basculement au sein d'une même série est arbitraire ou signifierait, implicitement, que nous considérons qu'il existe un effet de la valeur du premier basculement sur le second, ce qui n'est certainement pas le cas ici. Puisque cette association est arbitraire et que, par ailleurs, de cette association dépend le profil de réponse, elle ne peut être la bonne méthode pour quantifier les effets. En outre, bien qu'il ne soit pas question pour nous ici de remettre en question les présupposés théoriques dans l'étude de Tuller *et al.* (1994), il nous faut reconnaître que la manifestation de l'effet de contraste dans cette étude ne bénéficie pas d'explications satisfaisantes. Nous tâcherons d'apporter un éclaircissement à cet épineux problème par la suite. Toutefois, il est important de remarquer que, quel que soit le pattern d'hystérèse ou de contraste, les deux impliquent qu'il existe deux perceptions possibles pour la même valeur du paramètre de contrôle. Ceci porte le nom de bistabilité et induit l'existence de deux attracteurs distincts. Ce qui n'est cependant pas le cas avec le profil de bordure pour lequel la valeur de transition est la même en incrémentielle et en décrémentielle. Nous ferons toutefois remarquer que le profil de bordure n'est pas autre chose que la traduction d'une hypothèse nulle, c'est-à-dire, l'observation d'une absence de différence. Si cela a du sens qualitativement avec l'approche méthodologique utilisée par Tuller *et al.* (1994), pour laquelle on peut effectivement dire qu'une série est de type bordure, cela n'en a en revanche aucun si l'on cesse de vouloir comparer les valeurs de transition deux à deux.

D'autres études ont par la suite été menées avec le même protocole avec plus ou moins de succès quant au taux d'hystérèse observé. Nous pouvons citer notamment Rączaszek *et al.* (1999). Dans cette étude, c'est le sens perçu d'une phrase ambiguë qui est étudié comme une fonction d'un paramètre de la prosodie de la phrase. Cette étude utilise

un paradigme identique à celui de Tuller *et al.* (1994), mais le taux d'hystérèse mesuré est largement supérieur. Bien que Rączaszek *et al.* (1999) ne précisent toutefois pas la valeur exacte du ratio pour chacun des profils, l'hystérèse est le profil dominant dans 13 cas sur 20 (65%) contre 6 cas sur 20 (30%) pour le contraste. Le profil de bordure lui, reste marginal puisqu'il n'est dominant que dans un cas sur les 20 (5%). Toutefois, les auteurs font cas du problème que pose le contraste au modèle proposé et suggèrent que celui-ci pourrait être un artefact de l'apprentissage ou de l'attention. Ils insistent sur les différences dans la nature des *stimuli* et la structure de l'expérimentation, qui pourraient expliquer le fait que le profil d'hystérèse soit prédominant dans leur étude. Malgré tout, nous adressons à cette étude les mêmes critiques méthodologiques que précédemment puisque l'hystérèse est mesurée qualitativement pour chaque série et non pas quantitativement sur l'échantillon.

Par ailleurs, Rączaszek *et al.* (1999) aussi bien que Tuller *et al.* (1994) donnent une définition opérationnelle de l'hystérèse : le seuil de changement pour les phases incrémentielles du paramètre de contrôle est supérieur au seuil de changement pour les phases décrémentiellles. L'interprétation qui en est faite est, d'ailleurs, objectiviste et repose sur l'idée qu'il existe une perception normale, celle qui serait donnée, par exemple, dans les phases aléatoires de leurs études.

4.3.3 Synergétique et perception visuelle du mouvement

L'apport majeur à la perception visuelle du mouvement dans le cadre de la synergétique est dû principalement aux travaux de Hock. Dans leur étude originale, Hock *et al.* (1993) observent la formation d'un pattern au travers du paradigme du mouvement du quartet (*i.e. motion quartet paradigm*) (Kruse, Stadler, & Wehner, 1986; Ramachandran & Anstis, 1985; Von Schiller, 1933). Quatre points sont disposés aux quatre coins d'un rectangle virtuel. Seuls deux parmi les quatre sont simultanément visibles, ceux situés dans

les coins diamétralement opposés. L'alternance crée l'illusion d'un mouvement dont le pattern est fonction du rapport de la largeur sur la hauteur du rectangle : le ratio d'aspect. L'hypothèse étant que la perception favorise le mouvement qui implique le déplacement le plus court dans l'espace selon un principe similaire aux principes de la gestalt-théorie. Ainsi, par exemple, lorsque la hauteur est supérieure à la largeur (ratio > 1), l'alternance d'affichage des points du quartet donne l'illusion d'un mouvement horizontal. Tandis que si la hauteur est inférieure à la largeur (ratio < 1) alors la perception favorisée est celle du mouvement vertical. En faisant varier systématiquement la valeur du ratio, Hock *et al.* (1993) présumant qu'ils vont pouvoir observer un effet d'hystérèse. Mais pour les auteurs, il est important de faire la différence entre l'hystérèse perceptive et l'hystérèse induite par la persistance de la réponse précédente. En effet, l'objectif principal de cette étude est de démontrer la relation entre la stabilité d'un percept et l'effet d'hystérèse. Pour ce faire, Hock *et al.* (1993) mettent au point ce qu'ils nomment la méthode modifiée des limites (*i.e. Modified method of limits*). Dans l'étude de Tuller *et al.* (1994), les participants répondent pour chaque stimulus. Dans le but d'éviter l'effet supposé de la réponse précédente, Hock *et al.* (1993) demandent aux participants de ne répondre qu'après le dernier stimulus de la série. Toutefois, chaque série se termine par des valeurs différentes du paramètre de contrôle et l'objectif pour le participant étant de dire s'il a perçu le pattern alternatif de mouvement, ce qui implique qu'il a perçu un changement. Ainsi, les auteurs peuvent établir la probabilité de changement en fonction de la valeur finale du paramètre de contrôle. Ils peuvent conclure à une hystérèse lorsque la courbe obtenue en phase ascendante se trouve au-dessous de la courbe descendante (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Les courbes des résultats sont réalisées par sujet et non par série, ce qui évite le biais que nous avons évoqué plus haut, à savoir que pour mettre en évidence un profil (hystérèse

ou contraste), il faut mettre en relation deux courbes de façon totalement arbitraire dans le cas d'un traitement par série. La méthodologie utilisée permet d'éviter toute interférence entre le moment où les participants perçoivent le changement et le moment où ils le signalent. Etant donné l'objectif de leur étude, les auteurs restent très attachés au contrôle des différentes sources d'hystérèse. Ils précisent que leur méthode ne permet pas d'éviter une hystérèse qui serait due, non pas à une persistance dans la réponse, mais à une persistance dans la décision de l'individu. Cette distinction est pertinente si l'on considère séparément les dimensions perceptives, mnésiques et motrices. La procédure de Hock *et al.* (1993) manifeste une grande rigueur méthodologique. Cependant elle nous paraît inappropriée pour une raison précise. Bien qu'il puisse être expérimentalement nécessaire de contrôler la situation afin d'obtenir une hystérèse perceptive la plus « pure » possible, sur le plan théorique cela a beaucoup moins de sens. En effet, au niveau global du système, il n'y a encore aucune différence entre les effets de perception et ceux qui concernent un éventuel autre aspect cognitif puisque cette subdivision n'existe pas à ce niveau-là. Nous comprenons néanmoins la nécessité, pour Hock *et al.* (1993), d'opérer cette discrimination étant donné l'objectif principal de leur étude qui est de relier stabilité perceptive et hystérèse. Toutefois, la distinction faite entre le moment de la perception et celui de la décision est un découpage séquentiel de la cognition propre à une vision mécaniste et réductionniste dont nous avons discuté dans les sections précédentes. Quoi qu'il en soit, les auteurs ne donnent pas de définition théorique de l'hystérèse mais se cantonnent à une définition purement opérationnelle. Pour Hock *et al.* (1993), l'hystérèse est une propriété induite par la stabilité perceptuelle : « *Hysteresis and multistability are essential temporal properties of percepts.* ». Ce qui nous semble être une erreur d'interprétation car l'hystérèse est un effet systémique et non une propriété. Même si l'on peut expliquer cet effet en le reliant à la stabilité des attracteurs, il n'est pas pour autant une propriété de ces attracteurs,

mais simplement une conséquence de leur influence sur les réponses données, qui se manifeste comme une forme de résistance au changement.

4.3.4 La catégorisation perceptive et la synergétique

Au contraire de Hock *et al.* (2003), Kostrubiec (2001) accepte que l'hystérèse soit un phénomène statistique et expérimental. En 2001, Kostrubiec propose une tâche de catégorisation perceptive présentant des planches à fond bleu sur lesquelles sont disposés 198 éléments picturaux pouvant être soit de couleur sombre (vert ou noir), soit de couleur vive (rouge ou mauve). La proportion d'éléments de couleur vive par rapport aux éléments de couleur sombre constitue le paramètre de contrôle. Quant au paramètre d'ordre, il est opérationnalisé par l'appui sur un bouton, bouton de gauche pour les planches sombres et bouton de droite pour les planches vives. Contrairement au paradigme utilisé par Tuller *et al.* (1994), Kostrubiec (2001) n'utilise pas de séries aléatoires intercalées, et ce, afin « *de contrôler l'évolution des effets résiduels entre les présentations successives de la série d'images.* » (Kostrubiec, 2001, p. 131). Pour tester l'hypothèse d'hystérèse, Kostrubiec (2001) utilise la moyenne du paramètre de transition³⁶ en ascendant, comparée à la moyenne du paramètre de transition en descendant. C'est une différence remarquable avec les protocoles de Hock *et al.* (1993) et Tuller *et al.* (1994). En utilisant les moyennes, on évite d'avoir à associer arbitrairement des événements qui ne sont pas *a priori* reliés.

Dans leur étude, Gepshtein et Kubovy (2005), cherchent aussi à produire un effet d'hystérèse. Toutefois, contrairement à Hock *et al.* (1993), ils ne souhaitent pas distinguer hystérèse perceptive et hystérèse décisionnelle. En fait, c'est même le contraire qu'ils réalisent puisque leur tâche est une tâche de décision perceptive. Pour cette tâche, Gepshtein et Kubovy (2005) utilisent des matrices de points disposés soit rectangulairement

³⁶ Valeur du paramètre de contrôle pour laquelle le changement est perçu

soit hexagonalement. Dans le cas rectangulaire (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), deux organisations sont possibles : orientation à 0° de la trame par rapport à un axe repère et une orientation à 90°.

Dans le cas hexagonal, trois organisations sont possibles : une orientation à 0° par rapport au repère, une orientation à 60° par rapport au repère et enfin une orientation à 120° par rapport au repère. L'écart entre les points de la trame hexagonale est homogène, de sorte qu'aucune organisation perceptive ne soit favorisée. L'écart entre les points de la trame rectangulaire est variable et manipulé pour générer un biais en faveur d'une des deux organisations perceptives. Le rapport des écarts relatifs à l'organisation relative au repère (d_0) et les écarts relatifs à l'organisation à 90° (d_{90}) constitue le paramètre de contrôle : $R_1 = \frac{d_{90}}{d_0}$. Le produit entre les deux est maintenu constant et égal à 1 ($d_0 \times d_{90} = 1$). Lorsque R_1 est supérieur à 1, l'organisation perceptive favorisée correspond à l'alignement à 0° par rapport à l'axe repère, et réciproquement. Lors de la procédure, les essais consistent en une présentation L_1 d'une trame rectangulaire de ratio R_1 et d'une trame L_2 hexagonale dans l'une des trois conditions possibles. A l'issue des deux présentations, le participant doit choisir parmi les orientations proposées pour les deux trames (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Les résultats montrent qu'il existe un effet de corrélation entre les deux réponses que les auteurs qualifient d'hystérèse.

Pour Gepshtein et Kubovy (2005), l'hystérèse est un effet de mémoire dans un système dynamique, bien qu'ils ne reprennent pas explicitement le terme dynamique mais parlent d'un système dont l'état dépend de son histoire. Ils considèrent l'hystérèse comme un phénomène et en donnent donc une définition phénoménologique plutôt qu'opérationnelle : « *This tendency resembles a memory-like phenomenon in a system whose state depends on its history. If the perception of an ambiguous stimulus persists even after*

the stimulus has been changed to the point where its geometry favors an alternative interpretation, the perceptual system is said to show hysteresis with respect to this type of ambiguous stimulus » (Gepshtein & Kubovy, 2005, p. 2). Mais ils n'apportent toutefois pas d'explication théorique quant à son origine. Pour eux, il s'agit seulement d'un comportement manifesté par le système.

D'autre part, quand les auteurs abordent l'aspect opérationnel, l'hystérèse est alors justifiée comme un défaut perceptif car la perception d'un stimulus ambigu se maintient malgré l'évolution de la structure géométrique favorisant une perception différente. Cette remarque traduit une vision objectivable de l'hystérèse sur la base du traitement d'une information intrinsèque porteuse des propriétés de l'objet. On peut en déduire que, si hystérèse il y a, c'est en dépit de la supposée « vraie » nature du stimulus. Bien entendu, la légitimité du point fixe et objectif qui sépare deux interprétations alternatives d'un stimulus se justifie, dans les cas étudiés par Gepshtein et Kubovy, par une observation stable de ce seuil perceptif. Mais l'idée même que ce point soit stable, voire qu'il existe, paraît tout à fait incongrue dans le contexte d'un stimulus ambigu. Cette apparente stabilité n'est en fait qu'un artefact expérimental. La décision, par exemple, d'un seuil situé au ratio unitaire pour le quartet de Hock (Hock *et al.*, 1993; Hock, Schöner, & Hochstein, 1996), est purement arbitraire car sa justification repose sur *l'a priori* que les dimensions verticales et horizontales sont équivalentes et qu'il existe une équiprobabilité quand les deux écarts sont quantitativement identiques. Or, c'est exclure qu'un mouvement sur l'axe horizontal puisse être plus prégnant qu'un mouvement sur l'axe vertical, ou même l'inverse. Pourquoi les deux seraient-ils équivalents perceptivement³⁷ ? Techniquement, ceci ne constitue pas une remise en question du travail de Gepshtein et Kubovy (2005). Toutefois, cela a un fort impact

³⁷ Voir notamment les travaux de Fraise et Vautrey (1956) sur l'illusion verticale-horizontale.

sur l'interprétation qui est faite des résultats obtenus. Le fait est que, dans la pratique, cette frontière artificielle n'est jamais observée dans les situations où le paramètre de contrôle évolue progressivement. En particulier, l'étude des seuils relatifs en psychophysique illustre bien cette position. Et c'est en établissant la probabilité des taux de catégorisation que l'on déduit un tel seuil par la médiane.

Nous finirons ce rapide tour d'horizon des études qui s'intéressent à l'hystérèse perceptive avec le cadre théorique de la synergétique en abordant le cas de l'étude de Gori, Giora, et Pedersini (2008). Dans cette étude, les auteurs cherchent à produire un effet d'hystérèse à partir d'un matériel qui évolue de façon continue (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Il est demandé aux participants de signaler quand ils perçoivent un changement dans l'organisation perceptive du stimulus.

Les auteurs observent que les participants ne perçoivent pas la transition pour la même valeur du paramètre de contrôle suivant que ce dernier évolue de façon croissante ou décroissante. La valeur de transition en phase croissante est supérieure à la valeur de transition en phase décroissante. Ils statuent pour une hystérèse perceptive qu'ils observent chez chacun de leurs huit participants. En manipulant le temps de présentation des stimuli, ils constatent que la taille de l'effet d'hystérèse obtenu diminue avec l'augmentation de la durée de la séquence. Pour finir, ils concluent que leurs résultats sont en accord avec l'idée que le mouvement permet de maintenir plus longtemps la distinction fond-forme initiale.

Toutefois, Gori *et al.* (2008) se bornent à considérer l'hystérèse comme un effet de retard entre la cause et sa conséquence. Ce qui est une des interprétations souvent associée à l'effet d'hystérèse mais qui en constitue une définition plutôt réductrice. Les auteurs s'appuient sur la définition de Kruse et Staedler (1995) qui stipule que l'hystérèse traduit la résistance d'un système au changement. Cette résistance peut, par exemple, se manifester

sous la forme d'un délai inhabituel entre un changement et sa cause présumée. Mais, surtout, cette définition induit qu'il peut y avoir un effet d'hystérèse qui n'implique pas un changement observé/observable. Si un système résiste aux changements, c'est *a priori* pour les empêcher et non pas uniquement les retarder. Le retard n'est que la manifestation d'une résistance qui finit par échouer à empêcher un changement. La différence entre l'interprétation de Gori *et al.* (2008) et celle que nous soutenons réside dans le fait que la résistance du système au changement doit se manifester avant tout par un report du changement à une date ultérieure et non pas uniquement une augmentation dans la latence du temps de réaction. Dans la situation expérimentale utilisée par Gori *et al.* (2008), ces deux phénomènes sont nécessairement confondus. Or, il est nécessaire de pouvoir les discriminer car le retard au changement témoigne d'un effet nommé *ralentissement critique* distinct de celui d'hystérèse. De plus, la dynamique des systèmes prédit que toute transition de phase s'accompagne nécessairement d'un effet de ralentissement critique (Gilmore, 1993). Il est donc naturel que Gori *et al.* (2008) observent cet effet chez 100% de leurs participants et le confondent avec un effet d'hystérèse qui peut être présent par ailleurs. C'est pourquoi l'évolution continue du paramètre de contrôle est à proscrire dans un protocole qui a pour but de mesurer une hystérèse et il est préférable d'utiliser un paramètre à évolution discrète. Une des raisons majeures de la distinction entre ralentissement critique et hystérèse, malgré leur lien fonctionnel avec le concept d'attracteur, est que leur évolution obéit à des principes et des causes différents. Le ralentissement critique désigne une forte augmentation de la latence obéissant à une loi de puissance (probablement exponentielle). Cette augmentation est la conséquence de l'instabilité engendrée par le conflit entre deux attracteurs et qui culmine au moment critique de la transition. Parallèlement, l'hystérèse est un marqueur de la stabilité temporelle du percept, comme le montrent Hock *et al.* (1993), ce qui n'implique

théoriquement pas l'intervention d'un attracteur alternatif, mais influe sur le moment où le percept perd sa stabilité. Même si dans la pratique, deux attracteurs sont toujours nécessaires pour pouvoir observer un effet d'hystérèse.

4.4 Définition d'un paradigme de mesure de l'hystérèse

4.4.1 L'hystérèse comme phénomène et indicateur de non linéarité

Ainsi que nous venons de le voir, l'hystérèse est un élément central de la théorie dynamique de la cognition, mais les dissensions qui existent entre les différentes méthodes utilisées pour la mettre en évidence et la mesurer en font un phénomène plutôt mal défini. Pour Hock *et al.* (1993) il s'agit d'une propriété liée à la stabilité du percept, tandis que chez Tuller *et al.* (1994) ou encore chez Kostrubiec (2001), il s'agit d'un phénomène expérimental. Pour Gori *et al.* (2008) il s'agit d'un effet de retard tandis que Gepshtein et Kubovy (2005) y voient plutôt un phénomène de mémoire. En définitive, ces interprétations ne se contredisent pas mais ne se rejoignent pas non plus. Pour mieux comprendre quel est l'intérêt de l'hystérèse et comment la mesurer avec précision, il faut commencer par la définir sans ambiguïté.

Si l'on s'en tient à ce qu'en disaient les Grecs de l'Antiquité, qui étudiaient des phénomènes électrostatiques sans le savoir, l'hystérèse est l'observation d'un cycle dans la mesure de l'évolution d'un phénomène naturel. Le cycle d'hystérésis est l'ensemble formé par la phase ascendante d'un paramètre, qui conduit à un changement qualitatif, et la phase descendante qui conduit au changement inverse. La figure 16 est un exemple de cycle d'hystérésis dans une jonction P-N d'un transistor. La jonction est dite passante quand le

courant de base³⁸ est suffisant. Il existe une valeur du courant de base où la jonction devient passante. Mais une fois que cette dernière est passante, lorsque le courant de base est diminué, la jonction ne perd sa conductivité que pour une valeur plus faible du courant de base qui l'a rendue passante.

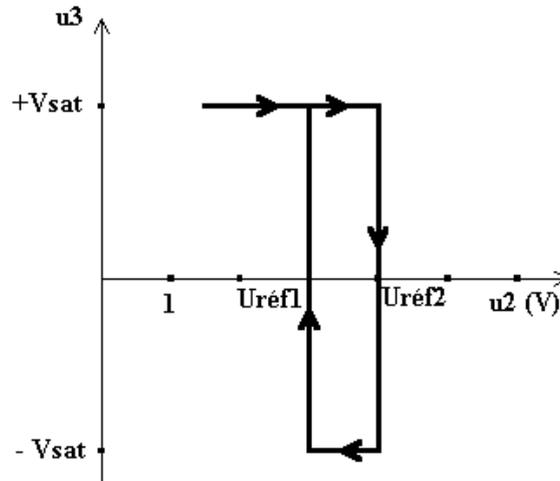


Figure 16 : Cas d'hystérésis dans la polarisation d'une jonction P-N

L'hystérèse est donc la description d'un phénomène irréversible observé dans des conditions particulières. En cela, on peut considérer qu'elle est un phénomène expérimental puisque certaines conditions doivent être réunies pour qu'elle se manifeste. Toutefois, elle s'explique par la présence de deux attracteurs dont l'existence est attestée par la manifestation de deux états macroscopiques distincts et stables. Comme nous l'avons vu sur la figure 15, lorsque le système est stabilisé sur un attracteur et que le paramètre de contrôle évolue jusqu'à résorber le puits de potentiel correspondant à cet attracteur sur la fonction de potentiel, le système ne change de phase qu'à la disparition complète du puits de potentiel tandis que le second puits de potentiel, correspondant au deuxième attracteur, est déjà plus profond. Lorsque le paramètre évolue dans le sens inverse, le même

³⁸ La jonction entre le collecteur et l'émetteur d'un transistor PNP devient passante quand le courant qui est appliqué à la base du transistor est suffisant. Sur la Figure 16, ce courant est indiqué par l'intermédiaire de la tension de base en abscisses du graphique.

phénomène se produit, ce qui permet d'observer un décalage entre les valeurs critiques de transition dans les deux phases. Toutefois, si l'on prend en compte l'influence du bruit sur le processus (e.g. Hock, Schöner, & Giese, 2003), la transition peut se produire avant ou après la disparition complète du puits de potentiel. Ainsi, lorsque, dans le paradigme HKB, on augmente de façon discrète le paramètre de contrôle, on s'attend à ce que le système bascule pour une certaine valeur du paramètre. Toutefois, à cause du bruit, la valeur du basculement devient une variable aléatoire distribuée normalement³⁹. Bien que la valeur centrale n'ait pas de signification intrinsèque puisque que le processus est dynamique, elle permet la comparaison avec la valeur centrale obtenue lorsque le paramètre diminue comme illustré par la figure 17.

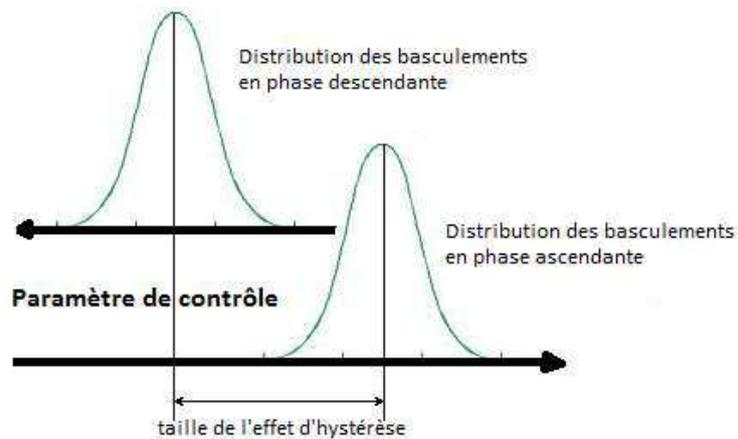


Figure 17 : Modélisation et quantification de l'effet d'hystérèse.

Ainsi, il est possible par cette méthode de mesurer la taille de l'effet d'hystérèse, mais à quelle fin ? D'une manière générale, si l'on recherche un effet d'hystérèse, c'est pour démontrer l'existence d'attracteurs et soutenir l'hypothèse dynamique sous-jacente de la transition de phase. Cependant, comme le font justement remarquer Ploeger *et al.* (Ploeger,

³⁹ Dans le cas de l'hypothèse générale d'un bruit blanc, cette variabilité étant aussi bien intra-individuelle qu'inter-individuelle et le produit de la variabilité conjointe d'une multitude de variables aléatoires impliquées dans le processus.

Van Der Maas, & Hartelman, 2002), l'hystérèse est une marque caractéristique de la transition de phase, mais elle n'est pas la seule. En réalité, il existe un certain nombre de phénomènes qui témoignent de la manifestation d'une transition de phase.

4.4.2 Approche morphodynamique des transitions de phase dans la cognition : au-delà de l'hystérèse, la divergence

Démontrer qu'une transition de phase se produit lors d'un processus de catégorisation, c'est démontrer que ce processus repose sur le principe d'un système dynamique. Nous avons vu que les systèmes dynamiques possèdent des attracteurs et que ces attracteurs peuvent être nombreux dans le cas de systèmes complexes. Par ailleurs, nous avons vu que ces attracteurs mis en compétition sont la cause des transitions de phase que nous avons déjà caractérisées par deux phénomènes : le changement brutal d'état (ou basculement) et l'effet d'hystérèse. Mais, lors d'une transition de phase, d'autres phénomènes sont en jeu et, en particulier, le phénomène de divergence.

D'une certaine manière, nous avons déjà évoqué la divergence lorsque nous parlions de bifurcation. Dans le cas d'une bifurcation en fourche (*pitchfork bifurcation*, voir figure 18), avec la variation d'un paramètre, un système passe d'un mode où un seul état stable existe à un mode où deux états stables distincts coexistent. Toutefois, lorsque les deux états stables se forment, ils sont proches l'un de l'autre, mais si le paramètre continue d'augmenter, ils s'éloignent. Ce phénomène s'appelle la divergence et c'est pourquoi le paramètre de contrôle porte le nom de *paramètre de divergence* (*splitting variable*). Dans les études présentées plus haut, la divergence n'est pas prise en compte. Bien entendu, les situations expérimentales proposées sont systématiquement bistables, on n'observe donc pas la bifurcation, mais puisque deux attracteurs coexistent, alors on devrait pouvoir observer la divergence.

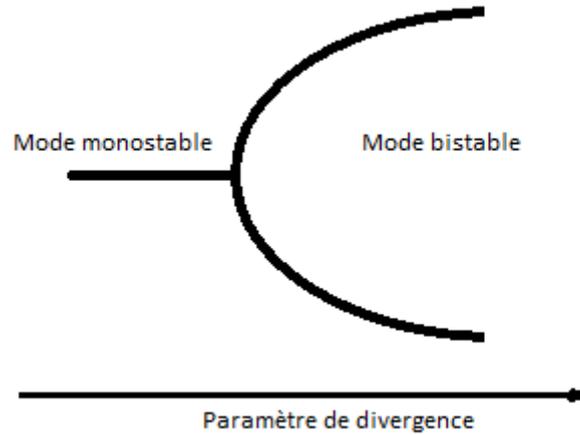


Figure 18 : Passage d'un mode à un seul attracteur à un mode à deux attracteurs, la bifurcation.

Si l'hystérèse peut se constater et s'expliquer en observant l'évolution de la fonction à deux puits de potentiel, c'est aussi le cas de la divergence comme nous pouvons le voir sur la figure 19. Avec l'évolution du paramètre de divergence, les *minima*⁴⁰ s'éloignent et les puits de potentiel se creusent.

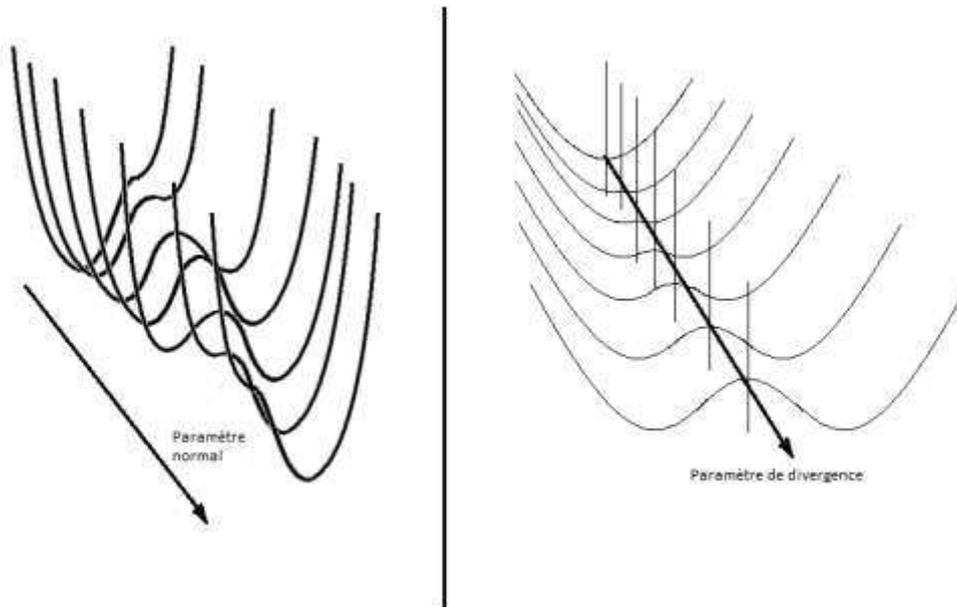


Figure 19 : (à gauche) Evolution de la fonction de potentiel selon le paramètre normal qui cause l'effet d'hystérèse. (à droite) Evolution de la fonction de potentiel selon le paramètre de divergence qui cause la bifurcation et la divergence.

⁴⁰ Sur la courbe de potentiel, les *minima* correspondent à des états d'équilibre stable

Mais un problème devient manifeste avec l'évolution de la fonction de potentiel représentée dans la figure 19. Pour un même système et pour des valeurs données des paramètres, il n'y a qu'une fonction de potentiel. Or, il est difficile de représenter une fonction de trois variables, même dans un espace tridimensionnel, et ici notre fonction de potentiel possède bien trois variables : l'état du système et les deux paramètres de contrôle. Le modèle de la fonction de potentiel est donc insuffisant pour illustrer dans la même représentation à la fois l'effet d'hystérèse et l'effet de divergence. C'est pourquoi nous résolvons ce problème en faisant appel à la théorie des catastrophes qui reste à ce jour la seule à offrir la possibilité de représenter l'ensemble de ces phénomènes au sein du même modèle mathématique.

4.5 Théorie des catastrophes et catégorisation

La théorie des catastrophes (Poston & Stewart, 1978a; Thom, 1975; Zeeman, 1976), est une approche mathématique et topologique de la dynamique non linéaire qui fournit un cadre pour concevoir des modèles des discontinuités locales induites par de petites perturbations. Elaborée par le mathématicien français René Thom, à partir de la théorie topologique des systèmes dynamiques de Poincaré, elle a pour but de produire des modèles continus de phénomènes discontinus. En l'occurrence, la transition de phase est, par excellence, le type de phénomènes discontinus se produisant dans un espace continu. Lorsque la description d'un phénomène dynamique devient impossible par le biais du potentiel parce qu'il comporte trop de paramètres, la théorie des catastrophes fournit un théorème de classification qui décrit les singularités que l'on obtient en fonction du nombre de paramètres. Ainsi, il existe sept types de catastrophes, appelées catastrophes

élémentaires⁴¹, qui dépendent principalement du nombre de paramètres de contrôle du système étudié. En ce qui nous concerne, nous avons deux paramètres, nous limiterons notre présentation à celle de la fonce (*cusp*).

4.5.1 La fonce et ses indicateurs de catastrophe

Largement exploitée par Zeeman (1976) qui a produit une grande quantité d'applications pour la catastrophe à deux paramètres⁴², la fonce est certainement la plus simple des catastrophes qui décrit la transition de phase. Elle rassemble d'une manière simple et élégante, sous la forme d'une hyper-surface dans un espace à trois dimensions, quelques-unes des caractéristiques de la dynamique non linéaire. Chaque point de cette surface est un point de l'espace des phases qui représente l'état stable qui correspond aux valeurs des paramètres de contrôle. Sur la figure 20 on peut voir quatre des cinq indicateurs de catastrophe (*catastrophe flag*, Gilmore, 1993) : ***hystérèse, bistabilité, basculement et divergence***. Les deux paramètres de contrôle constituent le plan de contrôle. A partir de chaque point du plan de contrôle on peut déterminer la ou les solutions, c'est-à-dire, le point d'intersection entre la droite orthogonale au plan de contrôle, passant par le point de contrôle, et la surface de la fonce. Ce point indique quel est l'état stable du système correspondant à ces valeurs des paramètres de contrôle.

⁴¹ Le pli (1), la fonce (2), la queue d'aronde (3), l'ombilic hyperbolique (3), l'ombilic elliptique (3), le papillon (4) et l'ombilic parabolique (4)

⁴² Les deux paramètres du modèle de la fonce sont (1) la variable normale (de l'anglais *normal variable*), on trouve aussi le terme de variable d'asymétrie et (2) la variable de divergence (*splitting variable*) ou encore variable de bifurcation. Les termes 'variable' et 'paramètre' sont interchangeables tant que l'on reste dans le contexte du modèle de la fonce.

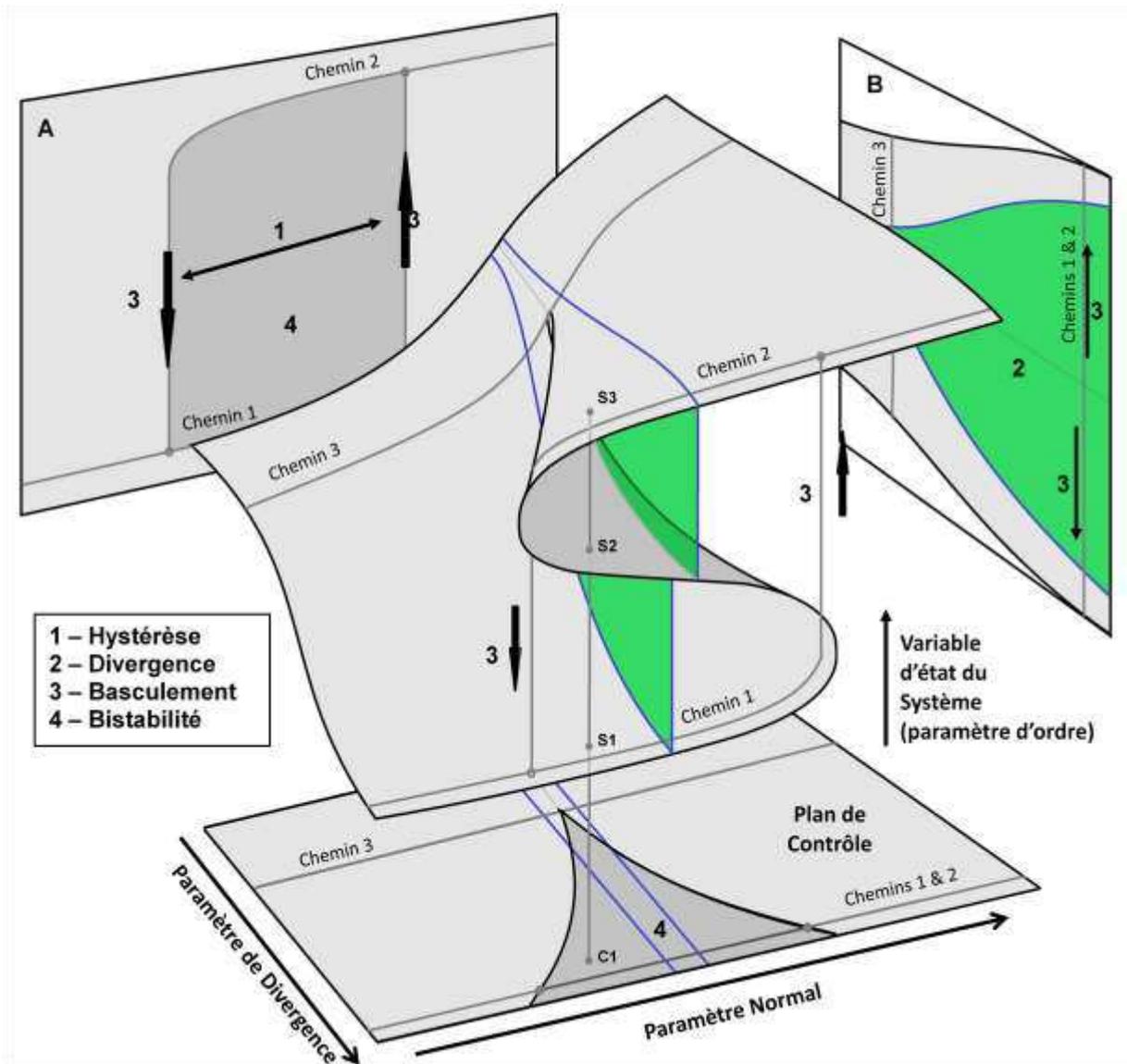


Figure 20 : La catastrophe de la fronce et les indicateurs de catastrophe associés. La surface de la Fronce représente l'ensemble des points stables en fonction des paramètres. Le plan de contrôle est constitué par les deux facteurs variables appelées paramètre normal et paramètre de divergence. Le plan A est la coupe constituée par les chemins 1 et 2 et illustre le pattern d'hystérèse. Le plan B est la projection de la section constituée par les deux droites bleues et permet de visualiser graphiquement l'effet de divergence : les deux droites bleues restent parallèles dans le plan de contrôle mais divergent sur la surface de la fronce. La zone 4 est la zone de bistabilité. Comme on peut le voir, le point de contrôle C1 correspond à trois points de la surface de la fronce (S2, S2 et S3). Seuls S1 et S3 sont des états stables car S2 se trouve sur la zone dite inaccessible. Le point de convergence des lignes de bifurcation sur le plan de contrôle est l'origine du repère et est appelé point catastrophique. C'est le point où se produit la bifurcation, c'est-à-dire le passage d'un seul à deux états stables possibles.

Sur le plan de contrôle, on peut remarquer une zone particulière délimitée par deux courbes se rejoignant en un point du plan. Cet espace est la zone de bistabilité. Pour chaque point de cette zone (e.g. C1), il y a trois solutions, c'est-à-dire trois points d'intersection correspondant avec la fronce (e.g. S1, S2 et S3). Cela signifie qu'il y a théoriquement trois états d'équilibre possibles pour un seul point de contrôle. Deux d'entre eux sont des attracteurs, le troisième est un répulseur. L'ensemble des points répulseurs sur la fronce est appelé « zone inaccessible » car il est impossible d'atteindre de tels états. Les deux courbes⁴³ délimitant la zone de bistabilité forment l'ensemble des points catastrophiques, on les appelle courbes de pli ou lignes de bifurcation. En effet, c'est à partir des points délimités par cet ensemble que se produit la transition de phase.

Illustrons l'effet d'hystérèse sur la fronce au travers d'un exemple. Lorsque nous suivons le chemin 1, celui qui part du coin inférieur gauche pour atteindre le point inférieur droit du plan de contrôle, nous pouvons voir la trajectoire correspondante sur la fronce. Ce chemin correspond à une augmentation continue du paramètre normal et un paramètre de divergence maintenu constant. Le plan A de la figure 20 représente le plan de coupe défini par l'ensemble des points correspondant aux chemins 1 et 2 sur la fronce. Au départ du chemin 1, le point correspondant sur la fronce se trouve dans la partie inférieure. Lorsque le chemin 1 atteint et coupe la première ligne de bifurcation, il ne se passe rien de particulier. Le système devient bistable et, du fait de l'attracteur, il conserve son état. Mais lorsque le chemin 1 atteint la deuxième ligne de bifurcation, il n'y a plus aucun point stable dans le voisinage du précédent. La surface de la fronce marque à cet endroit un pli. Poursuivre sur la surface signifierait revenir en arrière pour le paramètre de contrôle. Or, comme son nom l'indique, c'est le paramètre de contrôle qui détermine les points stables et non l'inverse. Il

⁴³ Lignes de bifurcation

se produit alors un phénomène de basculement, le système se trouvant précédemment dans un état stable correspondant à la partie inférieure de la fonce et cet état stable ayant désormais disparu. A l'échelle de temps qui correspond à la dynamique rapide du système⁴⁴, celui-ci quitte l'état antérieur et se stabilise sur le nouvel état stable correspondant à la partie supérieure de la fonce. Un tel état était déjà stable auparavant et même certainement plus stable⁴⁵, mais suivant la convention de retard, le système se maintient sur son attracteur actuel aussi longtemps que possible. Ainsi, une petite variation du paramètre de contrôle peut engendrer une importante variation de l'état du système.

Si le chemin 1 correspond à une phase ascendante du paramètre de contrôle⁴⁶, le chemin 2 correspond à la phase descendante. On peut voir les deux chemins sur le plan de coupe A, et notamment la partie où ils se séparent qui correspond à la zone de bistabilité. La surface totale sur le plan de coupe qui correspond à la zone de bistabilité est un quantificateur de la taille de l'effet d'hystérèse. Sur les chemins 1 et 2, nous pouvons déjà voir la bistabilité, le basculement et l'hystérèse. Pour voir la divergence, il nous faut considérer les deux lignes bleues parallèles sur le plan de contrôle. Alors que la distance entre ces deux lignes reste constante sur le plan de contrôle, leurs projections sur la fonce divergent. On peut voir clairement cette divergence sur le plan de projection B. Ainsi, à partir de la seule représentation graphique de la fonce, on peut représenter autant d'information, là où, avec la fonction de potentiel, il aurait fallu deux graphes séparés. Malgré tout, un des indicateurs de catastrophe n'apparaît pas sur la fonce : le ralentissement critique.

⁴⁴ En comparaison avec la dynamique lente des paramètres de contrôle

⁴⁵ Au regard de la profondeur du puits de potentiel correspondant

⁴⁶ Rappelons que le paramètre normal est le seul à varier, il est donc le paramètre de contrôle.

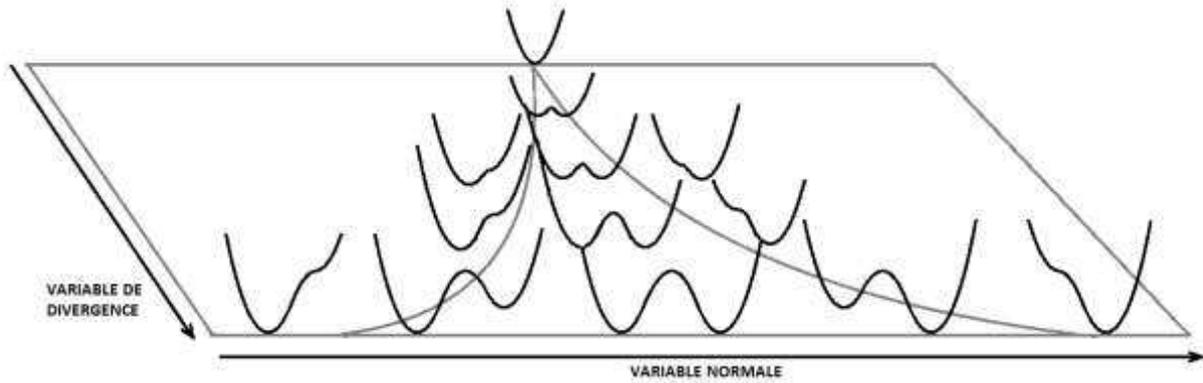


Figure 21 : Fonctions de potentiel associées aux points du plan de contrôle de la fronce

Pour compléter la description du modèle de la fronce, la figure 21 représente l'ensemble des fonctions de potentiels associées à chaque point du plan de contrôle. On peut y constater que l'évolution de la fonction traduit les deux tendances déjà illustrées dans la figure 19.

4.5.2 Fronce et transition de phase

La fronce rend graphiquement compte d'une transition de phase de façon à la fois quantitative et topologique. Les marqueurs de la fronce sont ceux couramment observés dans les situations classiques de transition de phase comme celle des phases de l'eau par exemple.

Pour expliquer le fonctionnement du modèle de la fronce, Poston et Stewart (1978b) proposent une excellente illustration. Supposez que vous teniez une spatule en plastique jetable pour mélanger votre café entre l'index et le pouce de votre main gauche (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Avec votre index vous exercez une légère pression de façon à courber la spatule. Comme cette spatule a une forme plate, elle ne peut se courber que dans deux directions (droite ou gauche sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Avec l'index de votre main droite, vous exercez une pression sur le milieu de la spatule. Pour une pression verticale donnée, la pression horizontale restera inopérante tant qu'elle n'atteindra

pas une valeur suffisante. Lorsque cette valeur aura été atteinte, la spatule va brutalement basculer dans la direction de la pression exercée par l'index de la main droite. La force du basculement dépend de la déformation de la spatule et donc de la pression verticale exercée par la main gauche. Ainsi, la pression verticale (F_v) joue le rôle de variable de divergence tandis que la pression horizontale (F_h) joue le rôle de variable normale.

La spatule en plastique semble posséder deux états stables (courbée à droite ou bien à gauche), pourtant, cet état de bistabilité n'existe que tant qu'une pression verticale est exercée, dans le cas contraire, un seul état stable existe.

4.5.3 Les applications de la fronce

Dès son apparition, la théorie des catastrophes a remporté un franc succès notamment au travers des multiples applications qui en furent faites en science d'une manière générale et particulièrement en sciences humaines (Poston & Stewart, 1978a; Zeeman, 1976, 1977). Un tel engouement a d'ailleurs provoqué une période de controverses et critiques (Zahler & Sussmann, 1977) qui furent levées par la suite (Ellairs, Goodwin, & Mackley, 1977). Les contributions de Zeeman à la théorie des catastrophes sont aussi considérables que précoces et couvrent un large champ d'applications allant d'un modèle du rythme cardiaque et des influx nerveux (Zeeman, 1972) et de la topologie du cerveau (Zeeman, 1976) aux modèles des flux de valeurs boursières (Zeeman, 1974) en passant par les effets du stress sur le jugement (Zeeman, 1976) et les troubles dans les environnements carcéraux (Zeeman, 1976). On trouve par ailleurs des applications de la théorie des catastrophes en psychologie, notamment les travaux sur les transitions entre les stades piagétiens du développement de l'enfant (Van der Maas & Molenaar, 1992), les changements soudain dans les attitudes (Van der Maas, Kolstein, & Van Der Pligt, 2003) l'apprentissage moteur (Newell, Liu, & Mayer-

Kress, 2001), en psychologie sociale (Guastello, 2007) et en psychologie cognitive (Dutilh, Wagenmakers, Visser, & Van der Maas, 2011).

Plus spécifiquement, dans le champ de la perception, Poston et Stewart (1978) proposent le modèle de la fronce comme ensemble des points d'équilibre d'un système dynamique pour rendre compte de la relation stimulus-percept face à des images ambiguës. Leur objectif est de démontrer qu'un tel modèle permet d'expliquer des effets telles que l'hystérèse et la bistabilité observés dans des situations perceptives ambiguës (Attneave, 1971) et de faire certaines prédictions telles que la divergence. Pour les auteurs, une catégorie perceptive peut être considérée comme une structure dissipative de la dynamique (neuronale, chimique, etc.) du cerveau dont la stabilité correspond à un minimum local de la production d'entropie. A la suite de ces travaux, partant du constat que de nombreux phénomènes comportementaux sont de nature catastrophique (bimodalité, hystérèse, divergence, etc.), Stewart et Peregoy (1983) affirment que la théorie des catastrophes permet de modéliser de tels comportements. Ils proposent d'appliquer le modèle présenté par Poston et Stewart (1978) à une tâche visuelle de catégorisation d'images ambiguës. En étudiant la distribution des scores de ressemblance des images présentées avec l'une des deux catégories possibles et, avec l'algorithme de Cobb (Cobb & Watson, 1980), ils déterminent la surface qui correspond le mieux à leurs données, c'est-à-dire une fronce. Ainsi, ils mettent en évidence les effets de bimodalité⁴⁷ et de divergence. Toutefois, leur protocole ne permet pas d'observer une hystérèse perceptive comme pour Attneave (1971). Ils concluent que la convention de Maxwell est préférable à la convention de délai pour expliquer la dynamique du processus de catégorisation. Rappelons que, selon la convention de Maxwell, le système se positionne sur l'attracteur le plus stable, tandis qu'il se maintient

⁴⁷ Ici, on peut comprendre la bimodalité de la même manière que la bistabilité. En l'occurrence et pour ce qui nous concerne, nous ne ferons pas de distinction entre les deux mots.

jusqu'à la disparition de l'attracteur actuel avec la convention de retard. L'une des raisons pour lesquelles Stewart et Peregoy (1983) n'ont pu obtenir d'hystérèse est que leur protocole est majoritairement statique et ne présente aucune structure d'évolution temporelle progressive. La convention de délai qui permet de décrire la phénoménologie d'un système dynamique, engagé dans un processus de stabilisation suite à une perturbation, n'est valide que dans les situations où se manifeste un effet d'hystérèse. Une fois que l'hystérèse apparaît et devient mesurable, elle peut être intégrée au modèle comme un marqueur de la dynamique non linéaire du système.

L'une des phases la plus délicate, de la modélisation utilisant la fronce, est la détermination et l'opérationnalisation des paramètres de contrôle et, en particulier, le choix concernant le paramètre de divergence. Il est relativement simple de déterminer une variable qui tiendra lieu de paramètre normal, du moment qu'elle induit un biais en faveur d'un mode ou l'autre en fonction de sa valeur. En revanche, la divergence est un effet beaucoup moins visible phénoménologiquement et il est assez difficile de déterminer une variable qui engendre un contraste accru entre les deux modes stables. Dans leur étude, Stewart et Peregoy (1983) émettent l'hypothèse que c'est la quantité de détails dans l'image qui joue ce rôle. Ils supposent que plus une image possède de détails et plus la divergence sera importante. L'effet reste cependant mitigé et se heurte aux principaux problèmes inhérents à la technique de modélisation quantitative utilisée par les auteurs.

4.5.4 Tester le modèle de la fronce à partir de données empiriques

Plusieurs techniques permettent de tester le modèle de la fronce et se distinguent selon qu'il s'agit d'une technique quantitative ou qualitative. La technique quantitative s'intéresse particulièrement à élaborer un modèle mathématique d'adhésion entre les prédictions et les données empiriques. Il existe plusieurs méthodes pour ce faire. La

première est une technique de régression appelée technique de régression polynomiale (Guastello, 1988, 1992) qui se base sur l'ensemble des solutions à l'équation de la fonce : $0 = -y^3 + bx + a$ où a est le paramètre normal, b le paramètre de divergence et y la variable comportementale (i.e. l'état du système). Wagenmakers *et al.* (Wagenmakers, Molenaar, Grasman, Hartelman, & Van der Maas, 2005) soulignent toutefois que cette technique ne permet pas de distinguer entre les points d'équilibre stables et instables, ce qui la rend pour le moins suspecte selon les termes des auteurs.

Une autre technique quantitative pour tester le modèle de la fonce est le principe de l'analyse de catastrophe qui repose sur la vraisemblance maximale (*maximum likelihood*) calculé par l'algorithme de Cobb (Cobb, 2007; Cobb & Watson, 1980) et qui estime le *log likelihood* du modèle catastrophique et le compare à celui du modèle linéaire. En utilisant une équation différentielle stochastique qui intègre un terme de bruit blanc, Cobb (2007) dérive une fonction de densité de probabilité à partir de la fonce. Pour chaque point du plan de contrôle, il existe une fonction de densité de probabilité. Lorsque le paramètre de divergence est bas, les fonctions de densité dérivées sont unimodales, et quand le paramètre de divergence atteint le point de fonce où la bifurcation a lieu, les courbes dérivées deviennent bimodales. La valeur des modes et leur intensité dépendent de la valeur du paramètre normal. Les modes de la fonction de densité correspondent aux points d'équilibre stables (attracteurs) tandis que les antimodes correspondent aux points d'équilibre instables (répulseurs). Pour utiliser cette technique, il suffit de produire une certaine quantité de données pour un ensemble de points du plan de contrôle. L'algorithme de Cobb calcule alors un taux d'adhésion des données à une fonce.

Cette technique, qui présentait toutefois quelques limites dont certaines liées en particulier au fonctionnement parfois erratique du programme de Cobb, a été améliorée par

Hartelman (Hartelman, 1997; Hartelman, Maas, & Molenaar, 2011). Outre l'amélioration du code source afin de le rendre plus robuste et plus stable, ce chercheur intègre, en plus de l'évaluation du *log likelihood*, le calcul du critère d'information d'Akaike (AIC), critère de parcimonie. Celui-ci tient compte du nombre de paramètres utilisés dans le modèle pour expliquer la variabilité (Loehlin, 1992). Ainsi que celui du critère d'information bayésien (BIC) qui teste le modèle en fonction de la quantité de données (Schwarz, 1978).

La technique améliorée a notamment été utilisée par Ploeger *et al.* (Ploeger *et al.*, 2002). Dans cet article, les auteurs font la revue des travaux de Hock *et al.* (Hock *et al.*, 1993; Hock *et al.*, 1997) et proposent d'adapter le protocole afin d'élaborer un protocole qui permette de tester le modèle de la fronce et ses hypothèses à partir du paradigme du mouvement apparent du quartet. Ainsi, ils proposent de fusionner les deux expérimentations. Pour mémoire, la première des expérimentations de Hock *et al.* (1993) manipule le ratio d'aspect (AR) du quartet (hauteur sur largeur) tandis que la seconde (Hock *et al.*, 1997) fait varier le contraste lumineux relatif entre les deux paires de points diamétralement opposés du quartet et le fond (*background-relative luminance contrast* : *BRLC*). Dans la version originale de ces deux paradigmes, aussi bien l'AR que le BRLC sont utilisés comme paramètres de contrôle en tant que variables normales, c'est-à-dire, relativement au paradigme HKB (Haken *et al.* 1985), comme cause du basculement, de la bistabilité et de l'hystérèse. La modification que Ploeger *et al.* (2003) apportent consiste à intégrer les deux variables dans le même protocole, en considérant le BRLC non plus comme une variable normale, mais comme la variable de divergence. Comme dans les études de Hock *et al.* (1993, 1997), sur la base de la méthode modifiée des limites, les participants doivent dire s'ils ont perçu ou non un changement dans le mouvement apparent du quartet pendant la série qui leur a été présentée. L'intérêt de la démarche de Ploeger *et al.* (2003)

est d'intégrer le concept de divergence dans une approche qui n'en tient pas compte. Par ailleurs, le protocole utilisé couvre l'intégralité de la surface de la fronce, avec, notamment, une partie bistable, une partie monostable et une bifurcation, chose souvent compliquée à mettre en œuvre dans le même paradigme. Malgré tout, la démarche de Ploeger *et al.* (2003) possède deux limites. Tout d'abord, le choix du BRLC comme paramètre de divergence pose un problème au regard des résultats de Hock *et al.* (1997). Dans cette étude, il est montré que le BRLC est un bon candidat en tant que variable normale puisque les auteurs s'en servent comme paramètre de contrôle pour créer un biais catégoriel et obtenir de l'hystérèse. Il se trouve donc que le BRLC, variable opérationnelle, influe tant sur la variable normale que sur la variable de divergence. Ce phénomène doit nécessairement être pris en compte pour tester quantitativement le modèle, mais les équations qui relient les variables opérationnelles (AR et BRLC) aux paramètres théoriques du modèle (normal et divergence) ne sont pas données par la théorie. En fait, on peut imaginer, comme le font Ploeger *et al.* (2003), que ces équations sont linéaires, alors une simple transformation du plan de contrôle (homothétie) permet d'adapter les variables au modèle, mais on peut tout autant supposer que ces équations ne sont pas linéaires, et alors le plan de contrôle perd son homogénéité, rendant la validation quantitative inopérante et même impossible. En outre, il faut remarquer que Ploeger *et al.* (2003) utilisent, comme variable comportementale, une variable dichotomique, voire à trois modalités dans certains cas. Or, la validation quantitative de la fronce s'effectue idéalement à partir de données continues puisque la fronce est une hyper-surface dans un espace tridimensionnel continu.

4.5.5 Méthode semi-qualitative : la détection de catastrophe

Nous venons de voir que la technique quantitative se heurte à des difficultés classiques en sciences humaines et deux majeures en particulier. La première est que les variables

utilisées pour opérationnaliser les paramètres de contrôle se combinent, linéairement ou non. Ce qui implique que la variation d'un paramètre du modèle n'est pas isomorphe à la variation de la variable empirique et les prédictions expérimentales deviennent alors extrêmement délicates. La deuxième difficulté concerne la variable comportementale. Dans le modèle de la fronce, cette variable est quantitative et continue. Or, le plus souvent, en sciences humaines, les variables comportementales sont discrètes. Ce sera le cas pour nous puisque la variable d'état étudiée est la catégorie exprimée. Le fait d'opérationnaliser la variable comportementale par le biais d'une variable qualitative rend la technique beaucoup moins efficace. C'est pourquoi, en sciences humaines, dans la plupart des cas, on utilisera une technique qui peut être qualifiée de semi-qualitative appelée 'détection de catastrophe' (Dutilh *et al.*, 2011; Jansen & Van der Maas, 2002; Van der Maas & Molenaar, 1992; Wagenmakers *et al.*, 2005).

4.5.6 Les marqueurs de la transition de phase

Elaborée par Gilmore (1993), qui en donne une démonstration mathématique dans son ouvrage, cette technique repose sur l'existence de ce que l'on appelle des marqueurs de catastrophe (*catastrophe flag*). Gilmore (1993) a pu démontrer l'existence de huit de ces marqueurs. Nous sommes déjà plus ou moins familiers avec certains d'entre eux. Parmi ces huit marqueurs, on compte : la bimodalité/bistabilité, le basculement, l'hystérèse, la divergence, le ralentissement critique, la zone d'inaccessibilité, la divergence dans la linéarité de la réponse et la variance anormale. En ce qui nous concerne, nous nous contenterons d'étudier les cinq premiers, qui peuvent être inscrits aisément dans une démarche de mise à l'épreuve expérimentale. L'observation de la cooccurrence de ces marqueurs dans un ensemble de données empiriques est la marque d'une transition de phase. La bimodalité renvoie au fait que pour une même valeur du paramètre de contrôle,

deux valeurs comportementales peuvent être observées. Le changement soudain désigne une forte variation de la variable comportementale alors que le paramètre de contrôle n'a changé que très faiblement. L'hystérèse est le phénomène que nous avons amplement décrit et discuté plus haut. Quant à la divergence et le ralentissement critique, ce sont deux marqueurs fondamentaux que nous allons discuter plus en détail.

Nous avons mentionné plus haut que la divergence est un phénomène à la fois qualitatif et quantitatif qui survient à la suite d'une bifurcation. Comme nous avons pu le voir sur la figure 20, les deux lignes bleues parallèles dans le plan de contrôle correspondent à deux trajectoires divergentes dans l'espace des phases. Alors que la distance entre ces deux lignes reste constante dans le plan de contrôle, elle augmente sur la surface de la fronce. On peut déjà appréhender la difficulté qu'il peut y avoir à mettre ce phénomène expérimentalement en évidence si l'on utilise une variable d'état qualitative, voire dichotomique. Il est nécessaire alors de pouvoir quantifier la distance entre deux catégories. Toutefois, si l'on observe bien la fronce, on comprend que la divergence se manifeste aussi indirectement d'une toute autre manière. Si l'on fait varier le paramètre de divergence en maintenant le paramètre normal constant, on peut obtenir les deux lignes bleues du plan de contrôle et ainsi voir diverger les trajectoires dans l'espace des phases. Mais si maintenant nous faisons varier le paramètre normal, nous pouvons constater une chose importante : avec l'augmentation de la variable de divergence, la taille de l'effet d'hystérèse augmente aussi (voir Van der Maas et Molenaar, 1992, p. 405, figure 10). Cette relation topologique entre la taille de l'effet d'hystérèse et le paramètre de divergence est une manifestation indirecte de la divergence elle-même. Ce qui nous permet de relier explicativement la divergence aux causes de l'hystérèse. L'avantage de cette approche est qu'il est alors facile d'élaborer des hypothèses testables. En effet, que ce soit chez Ploeger *et al.* (Ploeger, Van

der Maas, Hartelman, 2002) ou chez Stewart et Peregoy (1983) et même chez Van der Maas et Molenaar (1992), on retrouve la difficulté à opérationnaliser le paramètre de divergence et, dans la plupart des cas, le choix de la variable est très peu discuté voire simplement intuitif. La possibilité de produire des hypothèses de divergence est une valeur ajoutée considérable, tant sur le plan théorique que du point de vue de la validation des modèles catastrophiques.

Le cinquième et dernier marqueur que nous étudierons est le ralentissement critique. Ce marqueur est défini en ces termes par Gilmore : « *As the bifurcation set (Delay Convention) is approached, [...] so that one or more of the eigenvalues approaches zero. The relaxation time of the corresponding mode becomes larger and larger. That is, as we approach a non-Morse critical point, it becomes more and more difficult for (at least) one of the mode to relax back to zero. This lengthening of the relaxation timescale is called the critical slowing down* » (Gilmore, 1993, p. 167). Comme nous l'avons expliqué plus haut, un système dynamique tend vers l'équilibre, ce qui le cantonne à des états stables et, quand il est perturbé, il tend à retrouver un état stable (identique ou différent). Le temps mis pour retrouver un état stable après perturbation est le temps de relaxation. Or, à proximité d'une transition de phase, ce temps se dilate de façon exponentielle. C'est ce phénomène que l'on nomme ralentissement critique. Il est particulièrement intéressant d'un point de vue théorique car il permet de montrer le rapport qui existe entre la stabilité des attracteurs, centres organisationnels de la dynamique du système, et la phénoménologie du système. Plus un attracteur est stable et plus rapidement il asservit le système. Ainsi, les temps de relaxation sont plus courts lorsque les attracteurs sont plus stables. Ceci est vrai partout, sauf au voisinage d'une catastrophe. Lorsque l'on s'approche de la jonction entre deux bassins d'attraction (i.e. l'ensemble des points catastrophiques dans l'espace des phases), la

dynamique devient chaotique. Cela est dû au conflit entre les deux attracteurs. C'est une caractéristique des systèmes dit hyperstatiques, comme par exemple, une chaise à quatre pieds comparée à un trépied. Là où le trépied constitue un système monostable puisque qu'il est un dispositif de suppression de trois degrés de liberté dans un espace à trois dimensions, la chaise à quatre pieds est théoriquement bistable du simple fait qu'il est techniquement impossible de réaliser quatre pieds qui soient de longueur parfaitement égale, et que la structure de la chaise peut se déformer avec l'âge et les efforts, engendrant alors un système de suppression de quatre degrés de liberté dans le même espace à trois dimensions que le trépied. Au mieux, l'un des dispositifs de suppression est redondant tant que les quatre pieds sont de longueur égale, et sinon le système devient bistable. Quand plusieurs points d'équilibre existent, le système devient paradoxalement instable. Le conflit se manifeste dans l'antagonisme des degrés de liberté supprimés par les attracteurs. Lorsque le nombre de degrés de liberté supprimés est supérieur au nombre de dimensions de l'espace des phases, alors le système n'est plus stable. Dans un système où la convention du retard est appliquée, le système se maintient sur un attracteur initial tant que celui-ci n'a pas complètement disparu. Malgré tout, l'attracteur antagoniste existe et se renforce, ce qui cause un ralentissement du temps de relaxation. Plus on s'approche du bord du bassin d'attraction et plus ce ralentissement augmente, préfigurant le basculement du système. En outre, plus les deux attracteurs antagonistes sont stables, et plus ce phénomène de conflit est important. Ainsi, un attracteur très stable peut maintenir le contrôle jusqu'au dernier moment et limiter le ralentissement dû à la proximité d'un bassin d'attraction alternatif. Mais, malgré tout, le ralentissement critique finit par se produire et il est d'autant plus violent qu'il se produit tard.

Dans un système dynamique, le temps de relaxation n'est pas une conséquence de la quantité de données à traiter. Dans une perspective dynamique de la cognition, la plus simple des tâches et le plus élémentaire des comportements recèlent toute la profondeur et la complexité du système dont ils sont le produit (Kelso, 1995). Contrairement aux processus computationnels dont la simplicité est héritée d'une structure ou d'un algorithme limité dans l'espace opérationnel, un processus dynamique met en œuvre, à chaque instant, l'intégralité du système. Ainsi, si un processus computationnel est rapide, c'est parce qu'il est simple et composé d'un faible nombre de traitements. En revanche, dans un système dynamique, les éventuels traitements que l'observateur peut dégager sont tous distribués, intégrés et concourants. La situation qui s'en rapproche le plus en théorie computationnelle est celle des traitements parallèles. Mais même dans ce cas, on reste cantonné à un niveau où ces traitements sont objectivement distinguables et les produits de mécanismes séparés. Or, si un processus dynamique est rapide, ce n'est pas parce qu'il est simple, puisque, par essence, tout processus dont un système complexe est le siège hérite de cette complexité. Si un processus dynamique est rapide, c'est la conséquence de la stabilité du système. Ce qui peut être déduit de la définition même des systèmes dynamiques.

4.5.7 Processus dynamiques et mesure du temps

Il va de soi que le temps et sa mesure sont des enjeux majeurs pour une approche qui met en avant la notion de dynamique. Or, la non-extensivité des traitements dans une approche dynamique est une conséquence de la non linéarité, elle-même conséquence de la complexité des processus. Si on peut raisonnablement penser que le temps est une dimension extensive isomorphe aux traitements dans une approche computationnelle séquentielle classique, ce n'est déjà plus le cas dans les variantes parallèles où le temps de traitement est la conséquence des traitements les plus longs. Il n'y a déjà plus additivité. Or,

dans l'hypothèse dynamique, on ne peut plus parler du paradigme chronométrique dans les mêmes termes (Kelly, Heathcote, Heath, & Longstaff, 2001; Ratcliff & Rouder, 1998). Ainsi, si la tâche ou le stimulus est, dans un cas, plus complexe, ou si un traitement supposé est *a priori* plus élaboré, cela n'impacte pas nécessairement une augmentation significative du temps de réalisation de la tâche. Et dans une moindre mesure, si cette augmentation a lieu, elle n'est pas proportionnelle à la cause présumée. Dans cette perspective, le temps de réponse résulte en partie du temps de relaxation. Et ce temps, lui, dépend du nombre de degrés de liberté à supprimer pour atteindre la stabilité. Avec ceci de particulier, c'est qu'il peut augmenter exponentiellement avec ce nombre au voisinage d'une transition de phase.

4.5.8 Applications de la méthode de détection des catastrophes

Deux études en particulier tentent d'appliquer la technique de validation par détection des marqueurs de catastrophe. L'une, en psychologie du développement, étudie la discontinuité du développement cognitif chez l'enfant au travers de l'acquisition de nouvelles règles pour la résolution de la tâche d'évaluation de l'état de la balance (*balance scale task*), pour laquelle l'enfant doit déterminer de quel côté va pencher une balance en fonction de la charge sur ses deux plateaux et de la distance de chaque plateau au pivot central (Jansen & Van der Maas, 2002). En guise de variable normale, les auteurs choisissent le rapport de la distance à droite sur la distance à gauche (i.e. distance entre le plateau de droite et de gauche par rapport au pivot). Et pour opérationnaliser le paramètre de divergence, ils utilisent le nombre d'éléments de masse sur les deux plateaux. La variable comportementale est l'usage d'une des deux règles de raisonnement. Avec la règle I, les enfants prédisent que si le nombre de poids sur les deux plateaux sont identiques, la balance sera en équilibre. Tandis que si le nombre de poids diffère, alors la balance penchera du côté où le nombre de poids est le plus important. A la différence de la règle I, lorsque les enfants

sont capables d'employer la règle II, ils tentent de tenir compte de la distance relative entre les deux plateaux et le pivot lorsque les nombres de poids sur les deux plateaux sont égaux et prédisent que la balance penchera du côté du plateau le plus distant du pivot. Toutefois, ils sont incapables de tenir compte de la distance entre les deux plateaux lorsque le nombre de poids est différent. Cette capacité survient plus tard avec les règles III et IV. Jansen et Van der Maas (2001) étudient la transition entre la règle I et la règle II. Ils parviennent à mettre en évidence l'hystérèse, la bimodalité et le basculement soudain, mais ne réussissent pas à produire un effet de divergence. Pour tester la divergence, les auteurs se focalisent sur la distance modale entre les deux distributions générées en phase ascendante et descendante, et ils prédisent qu'en cas de divergence, la probabilité d'obtenir des réponses dans la zone intermédiaire sera encore plus faible. Toutefois, cet effet n'apparaît pas significativement dans leur étude. Les raisons peuvent être diverses. Le choix de la variable de divergence peut être en cause tout comme l'échelle d'observation. La mesure de la divergence pose un réel problème étant donné qu'il s'agit d'un phénomène continu. Ainsi, s'il est testé pour deux valeurs de la variable de divergence trop proches, alors la différence entre les deux modes pour chacune des conditions peut ne pas apparaître statistiquement significative. Dans le cas spécifique de l'étude de Jansen et Van der Maas (2001), nous pensons, comme semblent le penser les auteurs, que la variable 'nombre de poids' est un candidat théorique convenable pour la modélisation du paramètre de divergence, mais qu'elle n'est pas suffisamment sensible pour mettre en évidence le phénomène de divergence dans les données. Le ralentissement critique n'est pas étudié dans cette étude, et d'une manière générale, il est assez difficile à tester dans les travaux sur le développement des facultés cognitives et en particulier dans l'étude des passages d'un stade développemental à un autre (Van der Maas & Molenaar, 1992).

La deuxième étude, que nous souhaitons présenter, qui utilise la technique de détection des marqueurs de catastrophe, propose un modèle du compromis entre la vitesse et la précision dans les tâches cognitives (*Speed-Accuracy Trade-off : SAT*). Pour cette étude, Dutilh *et al.* (2011) proposent que la transition entre une stratégie qui privilégie la vitesse (*fast guess*) et celle qui privilégie la précision (*stimulus controlled mode*) est discontinue et qu'elle témoigne des propriétés d'une transition de phase telle que modélisée par la fronce. L'originalité de l'étude consiste dans le fait que les auteurs utilisent les mêmes variables pour opérationnaliser les deux paramètres de contrôle de la fronce, à savoir, une récompense (*pay-off*) pour la vitesse et une autre pour la précision. La différence entre les deux récompenses constitue la variable normale tandis que la somme des deux récompenses représente la variable de divergence. La variable comportementale rapportée est le temps de réponse à une tâche de décision lexicale. Les auteurs prédisent qu'en fonction des valeurs des paramètres de contrôle, ils pourront observer deux catégories de temps correspondant chacun à un mode de réponse (*fast guess* ou *stimulus controlled mode*). La continuité de la variable comportementale permet en outre de tester l'hypothèse de zone inaccessible. Chose assez surprenante, bien que disposant d'une variable de divergence et s'appuyant sur le modèle de la fronce, Dutilh *et al.* (2010) ne testent pas explicitement l'hypothèse de divergence. Elle apparaît néanmoins dans les données présentées.

4.6 Approche dynamique et théorie des catastrophes : un paradigme d'étude pour la psychologie de la perception et la catégorisation perceptive

L'hypothèse dynamique en psychologie cognitive dispose d'une large littérature (pour revue, voir Beer, 2000; Guastello, 2001; Spencer, Austin, & Schutte, 2012; Van Gelder, 1998) qui, du fait de la dimension métathéorique de la dynamique non linéaire, partage un certain nombre de concepts et d'outils avec d'autres disciplines dans le champ desquelles l'hypothèse dynamique est en application depuis bien plus longtemps que dans celui de la psychologie. Ce qui fait des systèmes dynamiques une approche solide non seulement sur le plan théorique mais aussi d'un point de vue méthodologique, tant des méthodes éprouvées et différentes peuvent abonder au sein d'une même sous-discipline (e.g. Granic & Hollenstein, 2003). Sur le plan théorique, la synergétique est certainement le domaine le plus fécond car, outre l'ensemble des travaux développés dans le cadre de ce programme de recherche et, notamment, au travers des apports majeurs de Kelso et Hock, elle fournit un bon nombre de concepts explicatifs du fonctionnement du système cognitif et de ses performances, permettant, par ailleurs, de faire des prédictions pouvant être éprouvées expérimentalement. Mais comme nous l'avons vu, les travaux en synergétique proposent des descriptions incomplètes. En particulier, les études sur la transition de phase se focalisent sur le phénomène d'hystérèse mais négligent celui de divergence. Une lacune que la théorie des catastrophes permet de combler en produisant des modèles mathématiques qui peuvent être confrontés empiriquement selon des méthodes quantitatives continues ou discrètes, en fonction des besoins et des contraintes du thème ou de l'objet étudié. En particulier, le modèle de la fronce inclut non seulement les prédictions d'hystérèse et de divergence, mais il produit, en outre, une série d'autres prédictions comme le basculement,

la zone inaccessible, la variance anormale, la divergence dans la linéarité de la réponse et, tout particulièrement, le ralentissement critique. Nous excluons de cette liste la bistabilité puisqu'elle est naturellement intégrée dans le phénomène d'hystérèse. L'approche semi-quantitative permet de faire des prédictions simples qui peuvent être mises à l'épreuve facilement au travers de protocoles classiques. L'un des enjeux de cette approche consiste à déterminer le facteur quantitatif qui peut tenir le rôle du paramètre de divergence, étant bien entendu que ce choix doit être justifié théoriquement. Nous avons pu constater, au travers de différentes études, que ce n'était pas une tâche aisée du fait de la multi-détermination récurrente du comportement et de la complexité à déterminer une échelle d'analyse qui corresponde à l'échelle du phénomène étudié. Une transition de phase peut être le mode de changement privilégié d'un système, il faut néanmoins pouvoir disposer d'une méthode suffisamment sensible pour en dévoiler tous les aspects. La méthode quantitative de validation étant 'aveugle' à ce dernier critère car elle ne permet pas de montrer si l'échelle d'étude est adéquate et peut donc réfuter une prédiction alors qu'elle est néanmoins vraie. Ainsi, la détection de catastrophes paraît une technique préalable plus efficace pour mettre en évidence une transition de phase comme celle modelée par la fonction. Chaque marqueur de catastrophe pouvant être testé séparément ou bien conjointement avec les autres. La force de validation de cette approche étant, bien entendu, la prédiction conjointe d'un ensemble de phénomènes distincts et non redondants.

V - PRESENTATION DE LA PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE

5.1 Positionnement théorique et épistémologique

La catégorisation perceptive est un champ à part entière de la psychologie cognitive et l'affluence des modèles en rend bien compte. La plus grande partie de ces modèles repose sur l'hypothèse cognitiviste du traitement d'une information objective et intrinsèque au monde. Cette hypothèse est en fait plutôt un postulat fondé sur ce que nous pourrions appeler l'épistémologie réaliste et qui repose en grande partie sur le constructivisme (Le Moigne, 2002). Nous réfutons cette approche réaliste de la perception qui consiste à supposer que le monde est intelligible en soi et que la cognition n'est qu'un processus de traitement de l'information voué à la recherche d'un sens préexistant. Car c'est une approche bien peu parcimonieuse et qui se trouve rapidement mise en échec face à des phénomènes marginaux, mais néanmoins fondamentaux, telles que les illusions perceptives. A l'approche réaliste, nous préférons une épistémologie constructiviste pour laquelle le sens et la perception sont le produit de l'activité et de l'interaction entre le système cognitif et l'environnement, ce dernier ne contenant aucune information prescriptive. La catégorisation perceptive n'est plus une fonction d'un système computo-symbolique, mais une performance adaptative d'un système auto-organisé.

Dans l'optique de ce positionnement épistémologique, l'approche métathéorique des systèmes dynamiques est particulièrement efficace pour rendre compte de l'activité du système cognitif et de certains phénomènes inexplicables par le biais des théories computo-symboliques, telle que l'hystérèse notamment. Ce qui fait de l'hystérèse un indicateur historique de la présence de non linéarités et de transitions de phase dans le comportement.

Bien sûr, dans l'approche dynamique, les questions posées sont de nature différente que celles posées dans le cadre de l'approche computo-symbolique. En présentant succinctement les bases de la théorie des systèmes dynamiques, nous avons pu constater que la dynamique des systèmes complexes s'organise spontanément autour d'objets appelés attracteurs, corollaires des structures dissipatives dans les systèmes thermodynamiques ouverts loin de l'équilibre, et que la principale caractéristique des attracteurs est leur stabilité⁴⁸. De ces attracteurs émerge la non linéarité de la dynamique et en particulier, le passage d'un attracteur à un autre appelé couramment une transition de phase. L'attracteur conférant une certaine stabilité au système, le passage d'un attracteur à un autre n'est possible qu'au prix d'un apport d'énergie ou si le premier attracteur disparaît. C'est à cette dernière condition que l'on peut, en cas de bistabilité, observer une hystérèse. Cette condition est appelée dans la littérature la convention de délai.

En adoptant une vision constructiviste de la perception et une approche dynamique de la cognition, la catégorisation perceptive devient explicable par le biais des attracteurs. A une catégorie correspond un attracteur qui se forme au sein du système pendant l'activité de catégorisation. Mais là où les prototypes et les traces jouent un rôle principalement descriptif dans les modèles cognitivistes, dans la mesure où le principe de catégorisation repose sur eux mais n'est expliqué que par le biais d'un processus indépendant de ces derniers, l'attracteur est explicatif en soi. Décrire le phénomène de catégorisation par le biais des attracteurs impose à la fois l'adhésion au champ théorique de la dynamique non linéaire et à celui des systèmes complexes et, par ailleurs, implique un ensemble de prédictions immédiates, parmi lesquelles se trouve le ralentissement critique. La perception

⁴⁸ On trouve souvent des évocations de la 'force' des attracteurs. Ceci en référence du modèle gravitationnel où l'attraction est modélisée par le travail d'une force. Dans cette optique, la stabilité est plus une propriété du système asservi par un attracteur. Nous postulons que la stabilité héritée du système est une conséquence directe de la force d'asservissement de l'attracteur, c'est pourquoi l'on parle de la stabilité des attracteurs.

procède par inférences inconscientes, disait Von Helmholtz (2009), et d'une certaine manière, elle est semblable à un cycliste qui doit pédaler pour maintenir une position d'équilibre, dès qu'elle cesse de faire des inférences, elle cesse d'exister. A cet égard, la dynamique temporelle de la perception est pleine d'enseignements. L'exemple fictif suivant illustre notre propos :

Cette forme que je vois à l'horizon alors que je marche le long de cette petite route de campagne, j'ai une petite idée de ce que cela peut être, un quadrupède dans un champ, peut-être bien un mouton. Mais au fur et à mesure que je me rapproche, ma certitude s'éloigne et le doute m'envahit. Pourtant, je continue de distinguer un animal. Quand soudain, l'évidence me frappe. Ce n'est qu'un buisson.

Voici ce que pourrait être un moment perceptif qui correspond trait pour trait à une transition de phase catégorielle. La première hypothèse ressemble à une hypothèse probable, une application de la convention de Maxwell. Le système est asservi par l'attracteur le plus stable. Mais au fur et à mesure que le temps passe, la contrainte environnementale rend l'hypothèse initiale moins probable et l'attracteur perd sa stabilité. Pourtant, il continue d'organiser la perception, en application de la convention de délai, car nul doute que l'attracteur qui correspond à la perception d'un buisson existe déjà dans l'espace des phases. Ce n'est que quand l'attracteur initial a totalement perdu sa stabilité que l'attracteur alternatif s'impose et résulte comme une prise de conscience de la réalité au plan phénoménologique à la manière d'un « insight » (Köhler, 1917). Mais par la suite, l'attracteur s'étant manifesté, la perturbation est devenue un buisson, réponse perceptive adaptée dans un monde où les buissons doivent être perçus en tant que tels, le système soumis à une multitude d'autres perturbations va progressivement se défaire de l'emprise de cet attracteur et ce dernier va alors perdre progressivement sa stabilité au profit d'un autre. Le phénomène buisson n'occupe plus la perception et sa saillance diminue

progressivement jusqu'à atteindre le niveau moyen du champ perceptif, libérant l'attention pour une autre série d'inférences inconscientes.

Nous venons de décrire succinctement, dans les termes des systèmes dynamiques, ce qui se passe au niveau du système cognitif quand l'évolution de l'environnement le conduit à adapter sa perception. Lorsqu'un paramètre environnemental évolue de manière à biaiser une catégorie perceptive en faveur d'une autre, la théorie des systèmes dynamiques prédit que le changement ne peut se faire ni de façon continue, ni sous la forme d'un simple changement qualitatif. Il est nécessairement accompagné de cet ensemble d'indicateurs, que nous avons décrits au chapitre précédent, au nombre desquels on trouve l'effet d'hystérèse. Dans le cadre du présent travail de thèse, nous proposons d'étudier la catégorisation perceptive avec une perspective dynamique au voisinage du moment où le changement de catégorie s'opère. Ainsi, en accord avec la théorie, nous nous attendons à observer un changement conforme à la typologie des transitions de phase et plus particulièrement celle modélisée par la catastrophe de la fonce. L'objectif majeur de notre travail est de montrer que les conceptions dynamiques rendent bien compte du phénomène de catégorisation perceptive et que les catégories peuvent être considérées comme des attracteurs tant sur le plan ontologique, puisqu'ils présentent les mêmes propriétés, que sur celui de la dynamique. Ainsi, nous allons mettre en évidence, dans une tâche qui implique une catégorisation perceptive, les phénomènes de bistabilité, d'hystérèse, de ralentissement critique et de divergence. Et pour finir, nous montrerons que, à l'instar des attracteurs, les catégories ne sont pas de simples objets symboliques, mais qu'elles ont un moment d'avènement correspondant à l'augmentation de stabilité de l'attracteur, ainsi qu'un moment de déclin qui correspond à la perte de stabilité du même attracteur.

5.2 Plan expérimental

La partie expérimentale se structure en trois grandes sections. La première section est composée de trois expérimentations. Dans la première expérimentation (I.1), nous commençons par mettre en évidence un effet d'hystérèse lors d'une tâche de catégorisation perceptive par choix forcé à deux modalités. En nous fondant sur une adaptation du paradigme HKB(Haken *et al.*, 1985), nous montrons que le changement de catégorie dans le sens ascendant ne se produit pas pour le même stimulus que dans le sens descendant, traduisant ainsi les effets de bistabilité et d'hystérèse. Par ailleurs, dans la seconde partie de cette première expérimentation, nous nous focalisons sur la dynamique des temps de réponse. Nous montrons, en particulier, que les temps de réponse au voisinage du basculement augmentent de façon quasi-exponentielle, conformément à la prédiction du ralentissement critique. La deuxième et la troisième expérimentation (I.2 & I.3) de la première section viennent compléter la validation de l'hypothèse chronométrique de divergence. Etant donné que les attracteurs sont supposés décliner naturellement à court terme du fait des multiples sources d'activité et de perturbations au sein du système, nous prédisons que si nous augmentons le délai entre les items des séries, alors la taille de l'effet d'hystérèse dans ces deux expérimentations va diminuer avec l'augmentation du délai. Nous introduisons, en outre, la mesure du taux de convexité de la courbe des temps de réponse, afin de montrer que la convexité est corrélée avec la stabilité de l'attracteur. Certes, il y aurait toujours un pic de temps de réponse au voisinage du basculement, mais dans la deuxième et la troisième expérimentation, les courbes devraient être moins incurvées. Ce que nous déduisons du fait que des attracteurs moins stables ont moins d'emprise sur le système, et cela s'observe par une perte de performances, au niveau des temps de réponse, qui devient particulièrement visible au voisinage du basculement.

La deuxième section de la partie expérimentale est composée de trois expérimentations (II.1, II.2 et II.3) qui testent chacune un facteur de divergence. En utilisant les résultats de l'expérimentation I.3 comme point de référence, nous introduisons une tâche perturbatrice entre chaque stimulus des séries dans les expérimentations II.1 et II.2. Dans l'expérimentation II.1, les participants doivent accomplir une tâche simple de décision lexicale. Le but de cette tâche est, comme son nom l'indique, de perturber le système et de causer une diminution de la stabilité de l'attracteur catégoriel. Nous nous attendons alors à ce que la diminution de la taille de l'effet d'hystérèse soit plus importante que lorsque le temps passe simplement comme dans l'expérimentation I.3. Puis, une tâche concurrente est imposée aux participants de l'expérimentation II.2. Mais contrairement à celle de l'expérimentation II.1, cette tâche n'est pas sans rapport avec la tâche principale de catégorisation. Il est demandé aux participants, après chaque réponse catégorielle, d'évaluer leur certitude sur la réponse qu'ils viennent de donner. Bien qu'il s'agisse d'une tâche concurrente, elle partage des traits communs avec la tâche principale, et plutôt que d'affaiblir l'attracteur catégoriel, nous prédisons qu'elle le renforcera. Ainsi, l'effet d'hystérèse sera plus important dans la situation II.2 que dans la situation II.1. Dans le même temps, nous attendons une évolution du paramètre de convexité de la courbe des temps de réponse conforme aux prédictions. La dernière expérimentation de la deuxième section (II.3) étudie l'influence du bruit sur la stabilité du système. Classiquement, le bruit est un facteur d'augmentation d'instabilité quand il est interne. Dans cette expérimentation, nous ajoutons une source de bruit externe qui s'ajoute au stimulus sous la forme d'un algorithme de flou. Les *stimuli* étant moins nets, leur effet sur la dynamique du système devrait être moins coercitif. Ainsi, alors que le paramètre évolue vers l'attracteur alternatif, la stabilité de l'attracteur diminue moins rapidement que dans la situation sans flou. Ce facteur d'augmentation de stabilité doit nécessairement entraîner une augmentation de la taille de

l'effet d'hystérèse. Cette sixième expérimentation clôture la validation de l'hypothèse de divergence, l'hystérèse ayant été observée dans des proportions variables dans chacune des expérimentations.

La troisième section ne comporte qu'une seule expérimentation (III) dont le but est de montrer la dynamique d'ascension et de déclin de la stabilité des attracteurs catégoriels. A cette fin, nous utilisons un paradigme différent de celui des six premières expérimentations, dont chacune était une déclinaison de la première. Nous conservons le principe de la tâche de catégorisation perceptive à choix forcé à deux modalités, mais, cette fois-ci, nous n'appliquons pas le paradigme HKB qui consiste à présenter des séries ascendantes et descendantes. A la place, les participants doivent catégoriser une longue série de stimuli structurés. Chaque stimulus se distingue en fonction de la taille du bloc d'images congruentes avec l'image cible. Ainsi, une image peut être précédée d'un bloc d'une, deux ou trois images appartenant à la même catégorie. En outre, cette catégorie peut être, ou non, la même que la catégorie du stimulus cible. Par ailleurs, le délai entre chaque essai est manipulé de même qu'il l'était dans les expérimentations I.1 à I.3. L'objectif de cette sixième expérimentation est de montrer que la nature et la taille du bloc de stimulus précédent ont un effet sur le temps de réponse de la cible. Si le bloc est de la même catégorie que la cible, le temps de réponse sera amélioré en comparaison des situations où le bloc n'est pas de la même catégorie que la cible. En outre, l'amélioration du temps de réponse sera d'autant plus importante que la taille du bloc sera importante. Mais quoi qu'il en soit, cette prédiction ne vaut que pour la phase d'ascension de la stabilité de l'attracteur. Chacune des répétitions de la même réponse catégorielle renforce l'attracteur et permet ainsi une amélioration des temps, jusqu'à atteindre une performance optimale. Nous manipulons le délai inter-essais afin de montrer qu'au-delà d'un certain temps, la tendance s'inverse, et la stabilité de

l'attracteur décline. Elle décline d'autant plus vite que l'attracteur était peu stable à l'origine. Elle déclinera donc plus rapidement avec les petits blocs qu'avec les gros blocs. Ainsi, dans les situations de délais courts, un attracteur faible atteint une stabilité maximale et décline rapidement, tandis que les attracteurs forts mettent plus de temps pour devenir optimaux ainsi que pour décliner. Nous montrons que les temps de réponse sont meilleurs pour les petits blocs avec de faibles délais, puis ils augmentent à nouveau, alors que les temps de réponse pour les gros blocs sont meilleurs en général que pour les petits blocs mais leur stabilité n'atteint son maximum que pour des délais plus importants.

Notre objectif tout au long de la série d'expérimentations du présent travail est d'amener progressivement à une meilleure compréhension du rôle du concept d'attracteur dans le phénomène de catégorisation perceptive. En nous appuyant sur les relations explicatives que la dynamique non linéaire établit entre les attracteurs et les différents phénomènes lors d'une transition de phase, nous allons montrer que, non seulement les marqueurs de catastrophe sont bien présents lors d'une transition catégorielle, mais en outre que les catégories présentent les mêmes propriétés dynamiques que les attracteurs. Comme nous l'avons annoncé, nous commencerons par refaire la démonstration d'hystérèse lors des processus perceptifs. Un résultat déjà largement admis que nous allons mettre en évidence dans notre protocole expérimental. Notre première expérimentation est donc une adaptation des protocoles classiquement utilisés dans le domaine synergétique et repose sur le principe du paradigme HKB.

VI - HYPOTHESE CHRONOMETRIQUE DE DIVERGENCE

6.1 Expérimentation I.1 : Tâche de choix forcé à deux alternatives avec bistabilité, hystérèse et ralentissement critique – Condition : intervalle inter-essais 200ms

Dans cette expérimentation, nous étudions les conséquences de l'évolution progressive d'un paramètre de contrôle visuel et catégoriel sur le comportement du système, ainsi que ses effets sur le phénomène de catégorisation perceptive. Pour ce faire, nous avons mis en place une tâche de catégorisation à choix forcé à deux alternatives dans laquelle le stimulus évolue progressivement d'une catégorie à l'autre. Nous attendons un effet d'hystérèse et une augmentation notable des temps de réponse autour du point de changement de catégorie sous la forme d'un pic de temps de réponse de nature exponentielle. L'objectif de cette expérimentation est de dégager les principes généraux de la dynamique temporelle de la catégorisation en situation d'hystérèse avec ce matériel, afin d'établir un paradigme d'étude que nous déclinons pour étudier plus finement la formation des attracteurs catégoriels et leur influence sur la dynamique du système, en mettant en évidence notamment l'effet de divergence.

6.1.1 Protocole expérimental

Participants

Quarante-cinq participants, hommes et femmes, sélectionnés aléatoirement sur la région de Montpellier (France), âge variant entre 17 et 53 ans. Tous avaient une bonne vision ou corrigée par le port de lunettes ou lentilles.

Matériel

Comme l'ont fait Stewart et Peregoy (1983), le matériel utilisé pour cette phase expérimentale, ainsi que pour les cinq expérimentation qui vont suivre, est constitué de 15 images⁴⁹ (figure 22) de type dessin en noir sur fond blanc issues de la série de Fisher (1967). Les images numérotées de 1 à 15 représentent le visage d'un homme (image 1) qui évolue image après image vers la silhouette d'une femme agenouillée (image 15).

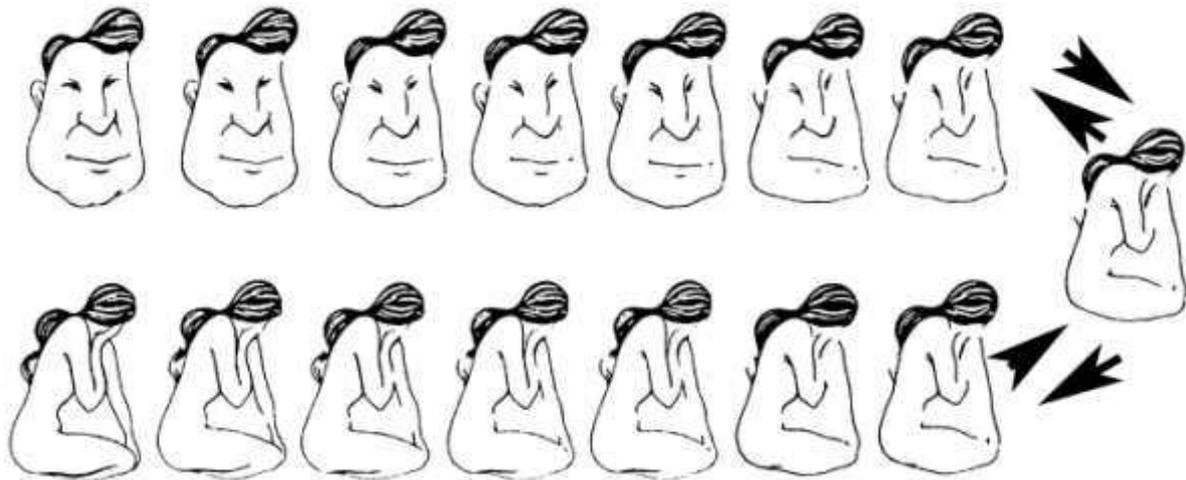


Figure 22 : Les 15 images de la série. L'image en haut à gauche est l'image 1. L'image en bas à gauche est l'image 15

L'intérêt d'utiliser un tel matériel est qu'il a maintes fois été éprouvé au travers de multiples études et qu'il permet d'obtenir un effet d'hystérèse (voir Attneave, 1971).

Méthode

Les images sont présentées séparément sur un écran d'ordinateur portable de 17". Il est demandé aux participants de catégoriser l'image présentée à l'écran comme un homme ou une femme. Pour cela, ils doivent appuyer le plus rapidement possible sur la touche 'F' ou 'H' du clavier avec l'index de la main droite ('F' Pour 'Femme' et 'H' pour 'Homme'). Afin d'optimiser les performances, un cache en carton est disposé sur le clavier ne laissant accessibles que les touche 'F' et 'H'. Chaque image est affichée pendant 200ms et l'image

⁴⁹ Images au format 225x325 pixels affichées sur un écran 17" en résolution 640x480

suivante est présentée après un délai de 200ms suivant la réponse du participant. L'écran reste vierge (blanc) pendant ce délai. Chaque participant est pré-exposé aux images 1 et 15 avant le début de l'expérimentation car, lors des phases de pré-expérimentation, nous avons pu constater que sans pré-exposition, certains participants n'ayant aucun point de référence ne prenaient jamais conscience d'un changement et produisaient la même réponse pendant toute la série d'image. La procédure se compose d'une phase d'entraînement que le participant peut répéter à volonté jusqu'à ce qu'il se sente à l'aise avec le matériel et le mode de réponse. Puis, suit une phase expérimentale composée de 4 séquences elles-mêmes divisées en 3 séries. Durant la première série de chaque séquence, les 15 images sont présentées de façon pseudo-aléatoire. Les séries pseudo-aléatoires sont organisées en deux séquences (voir tableau 1). Ces séries commencent par les images les plus fortement polarisées (images 1 et 15) et se terminent par les images centrales plus ambiguës. Finir sur des images ambiguës permet de minimiser l'effet de la dernière image de la série pseudo-aléatoire sur la première image de la série suivante. Les deux séquences sont alternées en intra-sujets, pour contrebalancer l'effet de présentation de la première image sur le reste de la série.

Tableau 1 : Séquences de présentation pseudo-aléatoire des images

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|
| Séquence 1 Amorce 'homme' | 1 | 15 | 2 | 3 | 14 | 13 | 4 | 5 | 6 | 12 | 11 | 10 | 7 | 9 | 8 |
| Séquence 2 Amorce 'femme' | 15 | 1 | 14 | 13 | 2 | 3 | 12 | 11 | 10 | 4 | 5 | 6 | 9 | 7 | 8 |

A l'issue de chaque série aléatoire sont présentées deux séries dites progressives (figure 22), une ascendante et une descendante. Pendant une série ascendante, les images sont présentées dans l'ordre de l'image 1 à l'image 15 tandis qu'elles sont présentées dans le sens inverse, de l'image 15 à l'image 1 pendant une série descendante. A chaque nouvelle séquence, l'ordre des séries ascendantes et descendantes est inversé. Un couple

ascendant/descendant est suivi d'un couple descendant/ascendant. L'ordre de présentation du premier couple (ascendant/descendant ou descendant/ascendant) est contrebalancé sur l'ensemble de l'échantillon. Les séries sont séparées par un message annonçant la série suivante et présenté pendant 500ms. La durée moyenne de la procédure est d'environ 10 minutes. Nous recueillons les réponses et les temps de réponse des participants.

6.1.2 Prédictions expérimentales

Dans cette étude, nous nous focalisons sur la détection des indicateurs de catastrophe tels que la bistabilité, l'hystérèse et le ralentissement critique. Nous nous attendons donc à ce que le point moyen de basculement des séries ascendantes soit différent du point moyen de basculement des séries descendantes, ce qui marquera la bistabilité du système. Mais en outre, nous nous attendons à ce que le point moyen de basculement des séries ascendantes soit supérieur au point moyen de basculement des séries descendantes. Ceci sera la marque de l'effet d'hystérèse. Pour finir, nous attendons une augmentation significative des temps de réponse au voisinage du basculement. Le pic ainsi obtenu sera le témoin du ralentissement critique.

6.1.3 Analyse des réponses : hystérèse et bistabilité

Les réponses catégorielles et les temps de réponse sont récupérés pour chaque image. Les données ainsi obtenues sont classées et traitées en fonction des types de séries où elles sont produites (i.e. Pseudo-Aléatoire ou Progressives). Les données issues des séries pseudo-aléatoires sont réordonnées suivant un ordre croissant de l'image 1 à l'image 15. A partir des réponses sur les séries pseudo-aléatoires, nous calculons le centre subjectif de la série pour chaque participant. Ce centre constitue le point théorique équiprobable qui nous permettra de repérer le point d'ambiguïté maximale d'une série pour un participant. Pour le calculer,

nous faisons la somme de toutes les réponses ‘homme’ et nous divisons par le nombre total de réponses (en condition pseudo-aléatoire). Le résultat est multiplié par le nombre d’images dans la série. Grâce à ce centre subjectif, nous pourrions séparer la série en deux groupes d’images avec un taux de catégorisation homme ou femme important. Dans l’exemple du tableau 2, nous avons 29 réponses hommes pour un total de 60 réponse : $(29/60) \times 15 = 7.25$. Pour ce participant, la série est légèrement polarisée du côté ‘femme’ car l’image médiane est l’image 8. Cela signifie que les réponses ‘femme’ dans les séries pseudo-aléatoires étaient plus fréquentes.

Tableau 2 : Exemple de réponses et temps de réponse (en ms) de 4 séries pseudo-aléatoires pour un participant. S-PA 11 désigne la première présentation de la séquence pseudo- aléatoire 1 tandis que S-PA 21 désigne la première présentation de la séquence 2. Dans cet exemple, le centre théorique calculé est de 7.25, ce qui signifie que pour ce sujet, l’image 7 et toutes celles qui précèdent sont plutôt des visages d’hommes tandis que l’image 8 et les suivantes sont plutôt des silhouettes de femmes.

| Image | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | Moyennes |
|----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----------|
| S-PA 22 | H | H | H | H | H | H | F | F | F | F | F | F | F | F | F | 744,8 |
| S-PA 12 | H | H | H | H | H | H | F | H | F | F | F | F | F | F | F | 788,9 |
| S-PA 21 | H | H | H | H | H | H | F | F | F | F | F | F | F | F | F | 1019,3 |
| S-PA 11 | H | H | H | H | H | H | H | H | H | H | F | F | F | F | F | 1510,6 |

En calculant le taux de catégorisation pour chacune des images sur l’ensemble des réponses de tous les participants aux séries pseudo-aléatoires, on retrouve le pattern classique avec palier catégoriel et zone d’ambiguïté, le tout formant la courbe d’une fonction logistique (figure 23). On peut remarquer que le centre de la série est très légèrement décalé sur la droite (vers la catégorie ‘femme’), ce qui indique que la série est faiblement polarisée par la catégorie ‘homme’. Toutefois, une différence si faible est sans incidence pour la suite. A noter qu’à l’exception des images 7, 8 et 9, l’ensemble des images ont des taux de catégorisation supérieurs à 90%. Et même en ce qui concerne les images 7 et 9, ces taux avoisinent les 80%. L’image 8, elle, est à 53% catégorisée comme un visage d’homme.

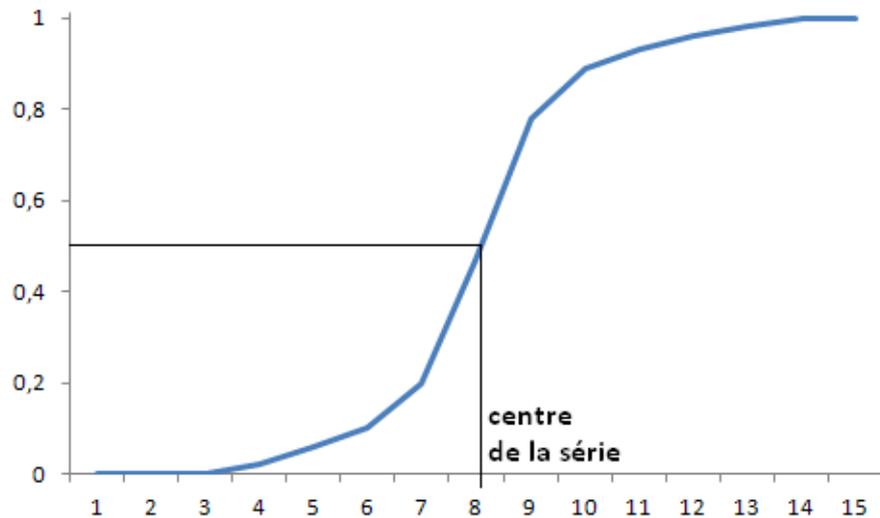


Figure 23 : Taux de catégorisation 'femme' par image des séries pseudo-aléatoires pour l'ensemble de l'échantillon dans la condition ITI200ms

Après avoir traité les données catégorielles issues des séries pseudo-aléatoires, nous traitons les données issues des séries progressives. Pour chacune de ces séries, nous localisons le basculement catégoriel. Si au cours d'une série donnée, plus d'un changement catégoriel a lieu, la série est classée avec les séries dites instables. Et enfin, les séries où n'a lieu aucun basculement, bien que pouvant d'une certaine façon être considérées comme une hystérèse maximum, sont néanmoins classées dans la catégorie des séries invalides.

Nous calculons pour chaque participant le point moyen de basculement en ascendant et le point moyen de basculement en descendant. Ce calcul nous permet de catégoriser le participant afin de calculer le taux d'hystérèse de l'échantillon (tableau 4), en faisant le rapport du nombre de profils d'hystérèse sur le nombre total de participants.

Tableau 3 : Exemple de données brutes sur les 8 séries progressives (4 ascendantes et 4 descendantes) pour un participant. Les données sont rangées dans l'ordre des réponses de l'image 1 à l'image 15. Les temps de réponse sont exprimés en millisecondes. Les basculements sont repérés en gris lorsqu'il n'y a qu'un seul basculement dans la série et en jaune s'il y en a plusieurs (cas d'instabilité). La colonne en bleu foncé localise approximativement le centre théorique de la série pour ce participant.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Desc 4 | H 686 | H 713 | H 945 | H 1231 | F 1166 | F 1211 | F 645 | F 710 | F 696 | F 746 | F 630 | F 710 | F 524 | F 532 | F 718 |
| Desc 3 | H 759 | H 640 | H 733 | H 717 | H 1465 | F 1093 | F 1329 | F 1281 | F 870 | F 670 | F 635 | F 1316 | F 719 | F 669 | F 1328 |
| Desc 2 | H 673 | H 741 | H 786 | H 796 | H 874 | H 1025 | F 974 | F 908 | F 816 | F 760 | F 1818 | F 764 | F 844 | F 557 | F 1311 |
| Desc 1 | H 543 | H 822 | H 2575 | H 1467 | F 1564 | F 2181 | H 1303 | H 497 | H 499 | H 1208 | H 1313 | H 1531 | F 1094 | F 3191 | F 1372 |
| Asc 4 | H 904 | H 647 | H 560 | H 541 | H 559 | H 532 | H 620 | H 1102 | H 620 | H 682 | H 956 | F 1438 | F 1098 | F 619 | F 460 |
| Asc 3 | H 1043 | H 621 | H 699 | H 576 | H 552 | H 668 | H 546 | H 477 | H 557 | F 2930 | F 731 | F 1019 | F 628 | F 933 | F 1881 |
| Asc 2 | H 1058 | H 660 | H 620 | H 551 | H 578 | H 766 | H 1970 | F 1560 | F 1510 | F 1272 | F 605 | F 501 | F 731 | F 720 | F 720 |
| Asc 1 | H 1585 | F 1246 | H 3694 | H 4078 | H 1276 | H 1122 | H 1799 | F 1229 | F 1639 | H 2038 | H 1606 | H 1060 | H 2559 | H 3014 | F 1940 |

Dans l'exemple du tableau 3, les points de basculement en ascendant pour les séries valides sont, respectivement, aux images 8, 10 et 12. Ce qui donne un point moyen de basculement ascendant pour ce participant de 10. Le point moyen descendant étant à 5, pour ce même participant, nous avons un profil d'hystérèse de taille $10 - 5 = 5$.

Tableau 4 : Effectifs et proportions des profils hystérèse et contraste sur l'ensemble de l'échantillon pour la condition ITI200ms

| Profil du participant | Hystérèse | Contraste |
|-----------------------|--------------|-----------|
| Effectif | 26 | 19 |
| Proportion (en %) | 57,78 | 42,22 |

Puis, nous réitérons le calcul sur l'ensemble de l'échantillon afin de calculer la taille de l'effet d'hystérèse pour cette condition en faisant la différence entre le point moyen de basculement en ascendant avec le point moyen de basculement en descendant. Pour cette première condition ITI200ms, le point moyen de basculement en ascendant vaut **10,60** contre **6,37** en descendant (cf. tableau 5).

Tableau 5 : Distribution des basculements par image dans les séries ascendantes et descendantes pour la condition ITI200ms

| Image | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | Total |
|----------|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------|
| Asc 200 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 4 | 9 | 18 | 39 | 48 | 39 | 9 | 3 | 0 | 172 |
| Desc 200 | 0 | 0 | 1 | 12 | 31 | 51 | 46 | 24 | 5 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 173 |

La figure 24 représente la distribution des basculements dans la série en fonction de l'image pour les séries ascendantes et descendantes. Comme nous l'avions supposé, nous pouvons voir que les basculements se distribuent normalement autour du point moyen. La différence significative ($t(343)=30.53, p < .001$) entre les deux points moyens de basculement indique un effet d'hystérèse d'une valeur **4.23**, soit en proportion de la taille de la série : **28.2%**.

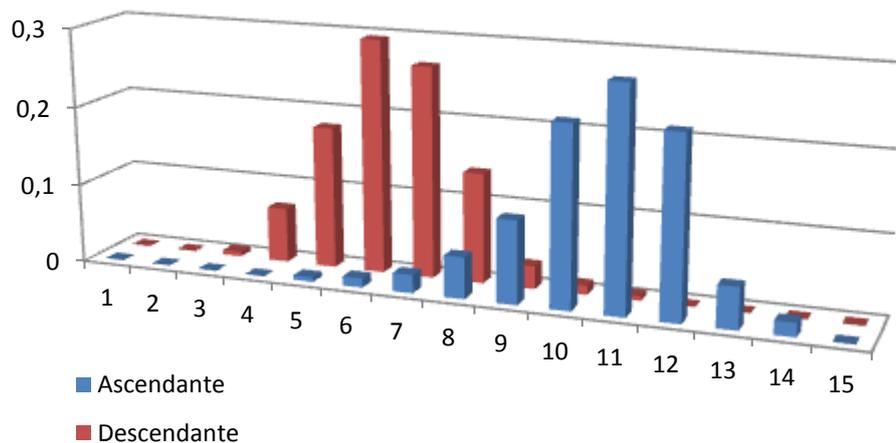


Figure 24 : Distribution des basculements des séries ascendantes et descendantes en fonction de l'image pour la condition ITI200ms

La figure 25 illustre ce résultat en représentant graphiquement les taux de catégorisation 'femme' pour les séries ascendantes et descendantes. On obtient un pattern classique de deux courbes décalées à la forme d'une fonction logistique. La lecture des points moyens de basculement sur les courbes de taux de catégorisation est beaucoup plus simple mais cependant moins précise, et implique nécessairement la normalité de la

distribution des points de basculement. C'est pourquoi nous ne la communiquons qu'à titre indicatif.

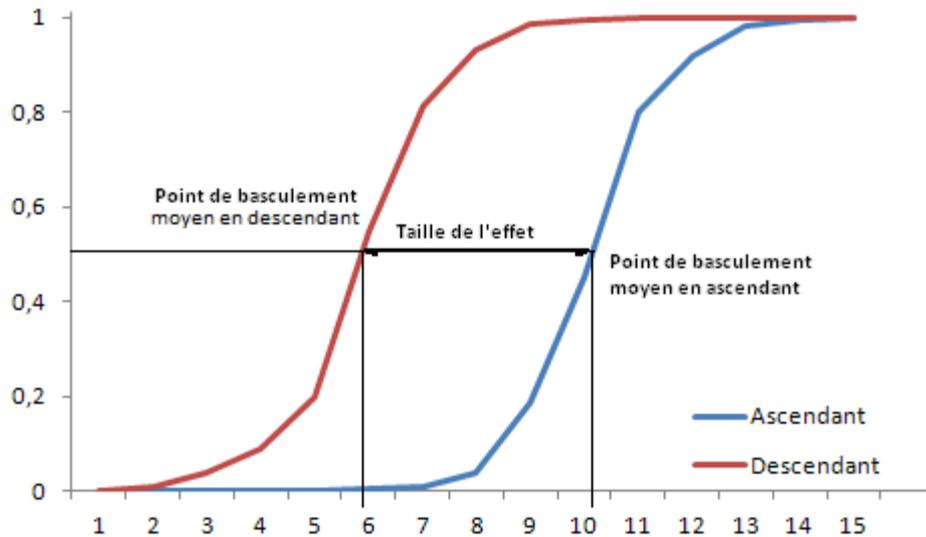


Figure 25 : Taux de catégorisation en phases *ascendante* et *descendante* pour la condition IT1200ms

Nous avons constaté que, selon notre protocole, le taux de configuration de contraste était assez faible, comme nous nous y attendions. En comparant les taux obtenus dans cette expérimentation (tableau 4) avec des résultats classiques de la littérature (Tuller *et al.*, 1994), nous remarquons que les taux de contraste sont sensiblement les mêmes (42% chez Tuller *et al.* (1994)), mais le taux d'hystérèse est nettement supérieur (57% contre 41% chez Tuller *et al.* (1994)). Ceci est principalement dû au fait que notre méthode élimine totalement la configuration de bordure au profit, *a priori*, du pattern d'hystérèse.

6.1.4 Analyse des temps de réponse

Après avoir travaillé sur les réponses catégorielles afin de mettre en évidence et mesurer les effets de bistabilité et d'hystérèse, nous nous penchons à présent sur les temps de réponse de ces mêmes réponses catégorielles. Rappelons que nous nous attendons à observer un effet de ralentissement critique au voisinage du basculement.

Temps de réponse des séries pseudo-aléatoires

Il est communément admis que les temps de réponse augmentent avec la 'difficulté' perceptive (Bogacz, 2007; Ratcliff & Rouder, 1998). C'est-à-dire, dans notre cas, avec l'ambiguïté des images présentées. Ainsi, lorsque l'on observe les temps de réponse pour les séries pseudo-aléatoires, nous devrions constater une augmentation au voisinage de l'image 8 qui est la plus ambiguë.

Tableau 6 : Temps de réponse (en ms) par image des séries pseudo-aléatoires dans la condition ITI200ms

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|------|------|-----|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1272 | 1081 | 970 | 1086 | 963 | 1162 | 1334 | 1100 | 1277 | 1318 | 1139 | 1197 | 1230 | 1201 | 1692 |

Or, comme nous pouvons le constater dans le tableau 6, ce n'est pas le cas sur l'ensemble de l'échantillon, le temps de réponse pour l'image 8 (1100 ms) est même inférieur à la moyenne des temps de réponse de l'ensemble des images en situation *aléatoire* (1202 ms). Toutefois, nous interprétons cet effet inattendu par le fait que chaque individu a un centre différent pour la série. Si nous étudions l'évolution des temps de réponse des séries pseudo-aléatoires avec comme point de référence non pas l'image 8, centre de la série pour l'échantillon, mais le centre subjectif calculé pour chaque participant, nous retrouvons l'effet décrit dans la littérature. La figure 26 représente la moyenne des temps de réponse pour les trois images de chaque côté des centres subjectifs calculés. Nous ne prenons que les trois images avant et après afin de nous assurer que, quel que soit le centre subjectif, ces images existent. Par exemple, pour un participant dont le centre subjectif calculé est de 12.3, il n'y a pas d'image +4. Nous pouvons constater que plus on se rapproche du centre de la série qui incarne le niveau d'ambiguïté maximum et plus les temps de réponse augmentent.

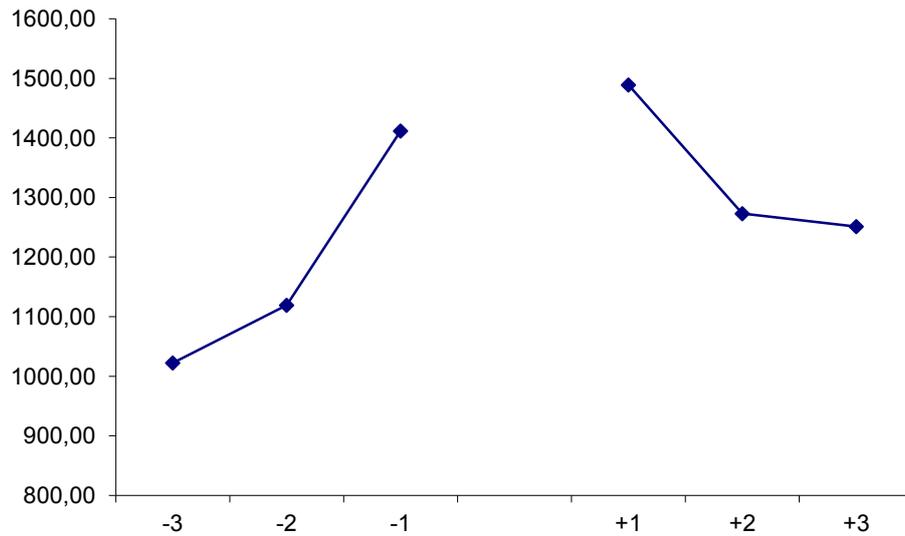


Figure 26 : Moyennes des temps de réponse (en ms) en situation *aléatoire* pour les trois images avant et après le centre subjectif de la série. Les valeurs négatives (-3, -2, -1) correspondent à la catégorie 'homme' et les valeurs positives (+1, +2, +3) correspondent à la catégorie 'femme'

Temps de réponse des séries progressives

A présent, nous allons traiter les temps de réponse pour les séries progressives. Notre objectif principal est de montrer que les temps de réponse en situation progressive diffèrent des temps de réponse en situation aléatoire, et donc vérifier s'il y a un effet de l'ordre de présentation des images. Un premier regard sur les moyennes des temps de réponse par images (figure 27) nous montre qu'il existe bien une augmentation notable des temps de réponse pour les images 5 à 11. Premier constat, la moyenne générale des temps de réponse en situation aléatoire, **1202 ms**, est bien supérieure à la moyenne des temps de réponse en situation progressive, **712 ms**. Il est à remarquer que, nous n'observons pas de différence notable des temps de réponse pour l'image 8 dont le taux de catégorisation est de 53% par rapport aux images 7 et 9 (respectivement $t(688) = 0.104$, $p > .91$ et $t(688) = 1.37$, $p > .17$) dont le taux de catégorisation est de plus de 80%. Mais il n'y a pas non plus de grandes différences avec les images 6 et 10, par rapport à l'image 8, bien qu'elles soient significatives (respectivement $t(688) = 5.88$, $p < .001$ et $t(688) = 2.93$, $p < .004$). Pour rappel, les images 6 et 10 obtenaient des taux de catégorisation supérieur à 90%, ce qui laissait présager qu'elles

étaient des images peu ambiguës et donc aisément catégorisables. Pourtant, nous obtenons des temps de réponse importants sur ces deux images comparés aux temps de réponse de celles qui ont aussi un taux de catégorisation de plus de 90 %.

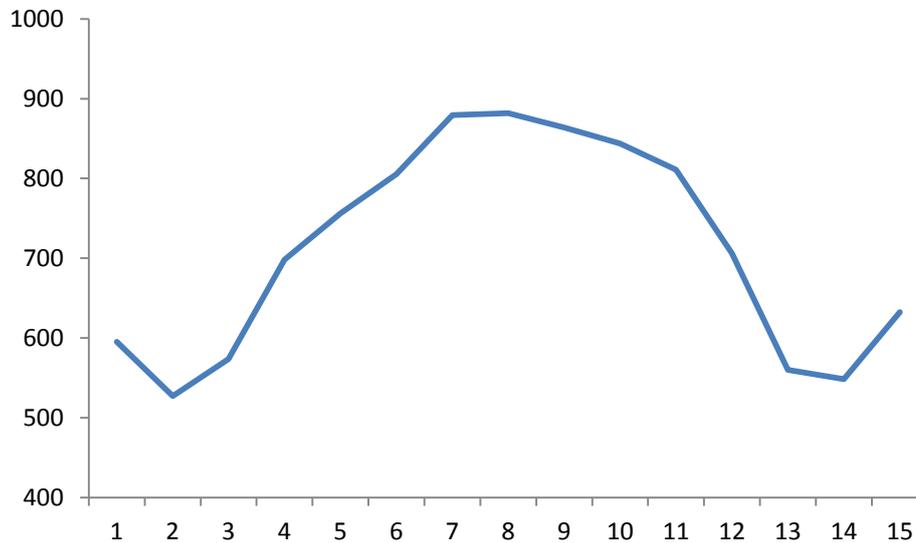


Figure 27 : Moyennes des temps de réponse (en ms) par image pour l'ensemble des séries progressives en condition ITI200ms

Une autre remarque que nous pouvons faire, c'est que les images 1 et 15 qui sont les moins ambiguës ne sont pas les images sur lesquelles les performances sont les meilleures comme nous aurions pu nous y attendre. De fait, ce sont les images présentées en premier (ou en dernier) dans chaque série progressive. Mais nous reviendrons sur ce point un peu plus tard, notamment lors de l'expérimentation III.1.

Afin d'avoir une vision plus claire des temps de réponse, il nous faut, dans un premier temps, séparer les données des séries ascendantes et des séries descendantes. Nous pouvons constater sur la figure 28 que les courbes des moyennes des temps de réponse en ascendant et en descendant semblent avoir la même forme que la distribution des basculements observée dans la figure 24. Bien que nous puissions clairement constater que la dynamique des temps de réponse en situation progressive se distingue de celle des temps

de réponse en situation aléatoire, et que la similarité entre la distribution des basculements et les temps de réponse vont dans le sens de l'hypothèse du ralentissement critique, nous allons mettre ce phénomène en évidence en allant plus loin dans le traitement des données.

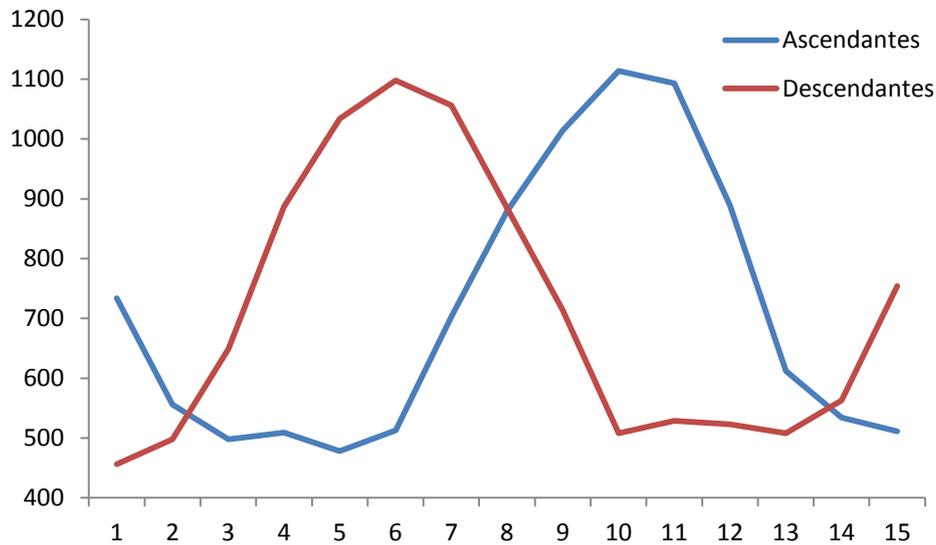


Figure 28 : Moyennes des temps de réponse (en ms) par image en situation progressive pour les séries ascendantes et descendantes dans la condition ITI200ms

Ralentissement critique

A partir des séries progressives séparées en fonction de leur type ascendant ou descendant, nous isolons les six réponses autour du point de basculement, soit un groupe de sept réponses pour chaque série valide. Nous classons les réponses dans l'ordre. C'est-à-dire que la première image d'un bloc obtenu pour une série descendante peut être l'image 13, alors l'image suivante sera l'image 12 et ainsi de suite jusqu'à l'image 7. Ces sept réponses sont ensuite indexées en fonction de leur position par rapport au basculement. La réponse correspondant au moment du basculement est repérée par le marqueur T_0 . Pour la réponse juste avant le basculement, nous utilisons le marqueur T_{-1} , pour la réponse juste après, le marqueur T_1 et ainsi de suite.

Nous calculons alors la moyenne normalisée des temps de réponse de chacun de ces sept moments relatifs au basculement avec la formule suivante :

$$\bar{T}_{ij} = \frac{\bar{t}_{ij} - \bar{t}_{.j}}{\sigma_{.j}} \times \sigma_{.i} + \bar{t}_{.i}$$

Où i est l'indice correspondant au rang de l'image par rapport au basculement et j au participant. \bar{t}_{ij} est donc la moyenne du participant j pour l'image i . Tandis que $\bar{t}_{.j}$ et $\sigma_{.j}$ sont respectivement, la moyenne du participant et l'écart-type des temps de réponse sur toutes les images. Tandis que $\bar{t}_{.i}$ et $\sigma_{.i}$ sont la moyenne et l'écart-type sur tout l'échantillon. En normalisant ainsi les réponses de chaque participant, nous minimisons la variabilité 'inter-sujet'. L'intérêt de ce traitement est d'éviter que la forme des temps de réponse des séries les plus lentes contamine celle des séries plus rapides. Pour finir, en calculant les moyennes par image pour tout l'échantillon, nous obtenons une série de sept moyennes normalisées dont la forme traduit l'évolution générale des temps de réponse au voisinage du basculement.

Le tableau 7 contient les moyennes des temps de réponse normalisés et centrés autour du point de basculement. Nous avons effectué une ANOVA à mesures répétées avec le facteur *rang de l'image* (T0, T-1, T-2 et T-3) comme variable intra sujet et les facteurs *série* et *sujets* comme variables aléatoires. L'effet principal du facteur *rang de l'image* est significatif ($F(3, 990) = 311, p < .001$). Les contrastes de cette analyse montrent également des écarts significatifs entre les images : T-3 (M=432,53 ; SE=15,23) à T-2 (M=658,14 ; SE=14,28) ($F(1,44) = 400 ; p < .001$), T-3 à T-1 (M=945,94 ; SE=20,03) ($F(1,44) = 663 ; p < .001$), T-3 à T0 (M=1305,65 ; SE=36,96) ($F(1,44) = 503 ; p < .001$), T-2 à T-1 ($F(1,44) = 283 ; p < .001$), T-2 à T0 ($F(1,44) = 285 ; p < .001$), T-1 à T0 ($F(1,44) = 72,3 ; p < .001$).

Tableau 7 : Moyennes des temps de réponse normalisés (en ms) autour du point de basculement en condition ITI200ms

| Rang de l'image | T-3 | T-2 | T-1 | T0 | T+1 | T+2 | T+3 |
|-----------------|--------|--------|--------|----------------|--------|--------|--------|
| Temps (ms) | 432,53 | 658,14 | 945,94 | 1305,65 | 534,67 | 413,88 | 398,73 |

La courbe (figure 29) obtenue à partir des moyennes des temps des réponses centrées autour du point de basculement, a nettement la forme d'un pic. Les temps de réponse sont croissants jusqu'au basculement puis chutent aussi rapidement qu'ils ont crû.

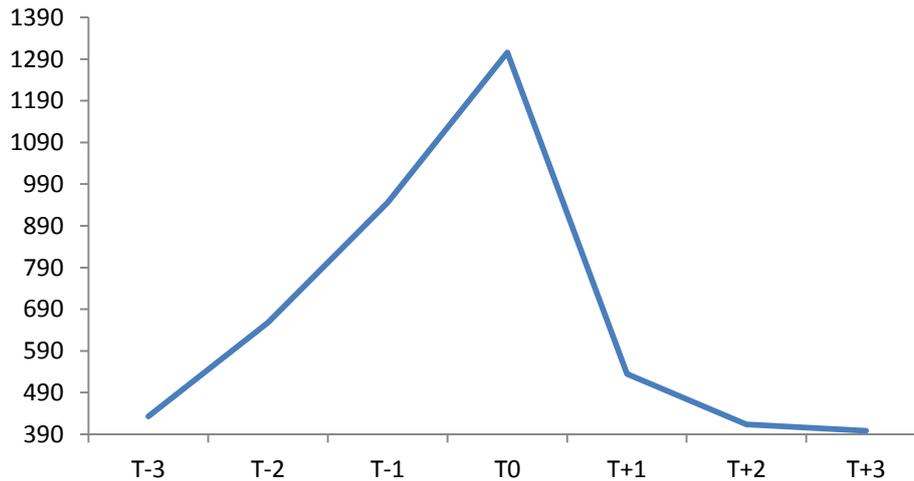


Figure 29 : Courbe des moyennes des temps (en ms) des réponses centrées autour du point de basculement, pour les séries progressives et la condition ITI200ms

La forme de la courbe des moyennes des temps de réponse en situation progressive démontre bien la présence d'un phénomène de ralentissement critique, avec une augmentation rapide et un pic de temps de réponse au moment du basculement. Il est à remarquer que le temps T+1 est plus court que le temps T-1, ce qui marque la restauration brutale de l'asservissement d'un nouvel attracteur sur le système.

Calcul de l'indice de convexité

Afin de pouvoir comparer la forme des courbes obtenues dans les différentes conditions expérimentales, nous calculerons l'indice d'accélération (γ), ou indice de convexité de la courbe des temps de réponse entre T_{-3} et T_0 dans chaque condition. Puisque cette courbe n'est ni continue, ni définie analytiquement, nous ne pouvons pas en

calculer l'intégrale. Nous calculerons donc la différence entre l'aire sous la droite qui relie les points T_{-3} et T_0 et l'aire sous la courbe des temps de réponse (voir figure 30).

Toutefois, pour obtenir des indices exploitables et comparables, nous transformons les temps de réponse pour qu'ils deviennent des valeurs comprises entre 0 et 1 avec la formule suivante :

$$T'_i = \frac{T_i - T_{min}}{T_{max} - T_{min}}$$

Par ce traitement, nous obtenons des valeurs sans dimension comprises entre 0 et 1. Notre indice doit traduire la convexité de la courbe et pouvoir être comparé avec celui d'une autre courbe. La formule de la différence d'aire après simplification devient :

$$\gamma = 1 - (T'_{-1} + T'_{-2})^{50}$$

La valeur obtenue peut être positive ou négative ($\gamma \in]-1; 1[$) et traduit la convexité ($\gamma > 0$) ou la concavité ($\gamma < 0$) de la fonction des temps de réponse sur l'intervalle représenté. Grâce à cet indice, nous pourrions comparer la convexité des courbes pour les futures conditions expérimentales. La figure 30 illustre graphiquement le calcul de l'indice.

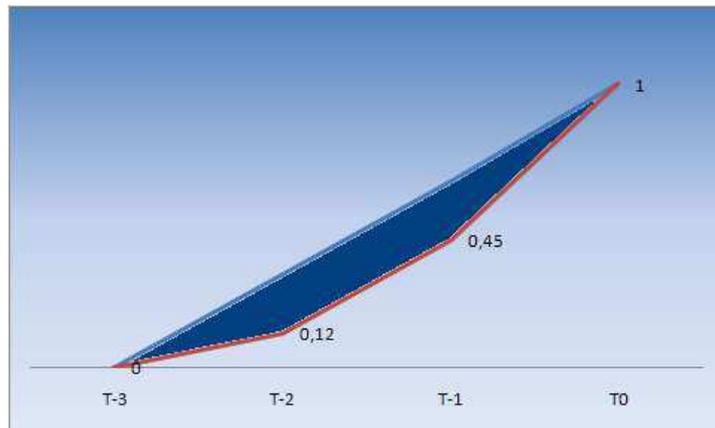


Figure 30 : Exemple de calcul de la différence d'aire pour l'indice de convexité

⁵⁰ Equation obtenue par simplification de l'équation de différence d'aire :

$$\frac{1}{2} - \left[\frac{1}{6}T'_{-2} + \frac{1}{3}T'_{-2} + \frac{1}{6}(T'_{-1} - T'_{-2}) + \frac{1}{3}T'_{-1} + \frac{1}{6}(1 - T'_{-1}) \right]$$

Pour cette première condition ITI200ms, l'indice de convexité du front montant de la courbe des moyennes des temps de réponse centrés autour du point de basculement est de **0.153**. Cet indice sera plus tard comparé avec les indices obtenus dans les autres conditions. L'hypothèse que nous formulons est que plus l'attracteur est stable (hypothèse de divergence croissante), plus l'indice de convexité sera important, et réciproquement l'indice devra décroître avec la stabilité de l'attracteur. Il résulte que l'indice de convexité est corrélé avec la taille de l'effet d'hystérèse comme on peut le constater sur la représentation graphique de la fronce.

6.2 Expérimentation I.2 et I.3 : hypothèse chronométrique de divergence – conditions ITI550ms et ITI900ms

Comme nous l'avons annoncé dans le chapitre précédent, nous allons tester plusieurs hypothèses de divergence. Dans cette section, nous étudions l'hypothèse du déclin temporel de la stabilité des attracteurs. Rappelons que notre postulat concernant la divergence est qu'elle est causée par la stabilité des attracteurs et donc qu'elle devrait être corrélée avec cette dernière. Plus spécifiquement, nous allons étudier comment cette stabilité décline naturellement avec le temps et montrer que la conséquence directe de ce déclin est une diminution des phénomènes de non linéarité telles que l'hystérèse et la divergence.

Dans un réseau de neurones, les attracteurs sont des états d'activité qui se forment spontanément et se maintiennent, au moins pour un temps, malgré l'activité rémanente du reste du réseau (Hebb, 1949). Dans le cerveau, l'activité fluctuante spontanée finit par déstabiliser n'importe quel pattern d'activité auto-entretenu (Braun & Mattia, 2010). Ainsi, un attracteur reste stable pour un temps relatif à l'échelle temporelle du processus cognitif qu'il sous-tend et disparaît du fait des fluctuations dans le reste du cerveau. Les causes de

ces fluctuations sont diverses, à l'échelle neuronale individuelle comme l'activité spontanée de certains neurones et la variabilité dans le mécanisme de transmission synaptique (Faisal, Selen, & Wolpert, 2008) mais aussi, au niveau des groupements de neurones où l'échelle temporelle des pics d'activité peut varier de façon stochastique, induisant une forme d'instabilité au niveau du pattern d'activité (Brunel & Hakim, 1999). Cette activité concomitante constitue un bruit de fond, ou encore bruit interne, souvent mis en cause pour expliquer certains phénomènes, telle que la résonance stochastique dans la perception (Aihara, Kitajo, Nozaki, & Yamamoto, 2008; Simonotto *et al.*, 1997), et dont nous reparlerons à l'occasion de l'expérimentation II.3. Dans l'immédiat, nous considérerons l'hypothèse selon laquelle ce bruit interne est la cause de la perte spontanée de stabilité de l'attracteur qui cause le phénomène de bistabilité perceptive (Leopold et Logothetis, 1999). Cette instabilité sera la cause d'une diminution de la divergence et donc de la taille de l'effet d'hystérèse.

6.2.1 Protocole expérimental

Participants

Quarante-cinq participants, hommes et femmes, sélectionnés aléatoirement sur la région de Montpellier (France), âge variant entre 19 et 61 ans. Tous avaient une bonne vision ou corrigée par le port de lunettes ou lentilles.

Matériel

Le matériel utilisé est le même que celui de l'expérimentation I.1. Il s'agit des quinze images issues de la série de Fisher (1967).

Méthode

Pour les expérimentations I.2 et I.3, nous reprenons à l'identique le protocole utilisé lors de l'expérimentation I.1. Nous faisons varier la durée de l'intervalle inter-essais (ITI) selon deux valeurs : 550ms (I.2) et 900ms (I.3). L'objectif étant d'étudier deux valeurs d'ITI en plus de celle de 200ms utilisée pour l'expérimentation initiale, afin de montrer l'évolution de la divergence en fonction du temps. La variable ITI constitue alors, dans le cadre du modèle de la fronce, le paramètre de divergence.

6.2.2 Prédictions expérimentales

Nous attendons une diminution de la proportion et de la taille de l'effet d'hystérèse avec l'augmentation de l'ITI. De même, les temps de réponse devraient augmenter d'une manière générale comme conséquence de la perte de stabilité de l'attracteur. Par ailleurs, l'indice de convexité du front montant des temps de réponse au voisinage du basculement devrait lui aussi diminuer avec l'augmentation de l'ITI.

6.2.3 Résultats des séries pseudo-aléatoires en situation ITI550ms et 900ms

Comme on pouvait s'y attendre, les taux de catégorisation des images en pseudo-aléatoire varient peu par rapport à la condition ITI200ms. De sorte qu'en arrondissant à deux chiffres significatifs, les résultats sont identiques et on obtient la même courbe que sur la figure 23. En revanche, les temps de réponse fluctuent énormément par image (EM = 274ms) mais la moyenne des temps de réponse reste sensiblement la même (respectivement 1214ms et 1185ms en ITI550ms et ITI900ms contre 1202 en ITI200ms).

Tableau 8 : Temps de réponse moyen(en ms) en fonction des images en pseudo-aléatoire pour les conditions ITI550ms et ITI900ms

| Image | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ITI 550ms | 1 440 | 1 125 | 974 | 1 059 | 1 383 | 1 369 | 1 292 | 1 326 | 1 077 | 1 540 | 1 045 | 1 121 | 937 | 1 202 | 1 321 |
| ITI 900ms | 841 | 1 063 | 1 286 | 1 431 | 1 188 | 992 | 865 | 1 012 | 1 545 | 1 459 | 1 250 | 1 314 | 1 129 | 987 | 1 412 |

Aucune corrélation ne semble apparaître entre ambiguïté de l'image et temps de réponse. Cependant, lorsque les temps de réponse par image sont remplacés par les temps de réponse par rapport au centre subjectif (voir tableau 8), on constate de nouveau une augmentation sensible des temps de réponse à proximité du centre (cf. figure 26).

6.2.4 Analyse de réponses des séries progressives : hystérèse et divergence

Le premier constat que nous faisons est que le taux des participants présentant un profil moyen d'hystérèse baisse avec la durée de l'intervalle inter-essais (cf. tableau 9), cette baisse se faisant au profit de l'augmentation des profils de contraste et tendant à produire l'équiprobabilité des deux profils, c'est-à-dire, une absence d'effet. Cela doit nécessairement s'observer sur la taille de l'effet d'hystérèse.

Tableau 9 : Effectifs et proportions des profils hystérèse et contraste sur l'ensemble de l'échantillon pour les conditions ITI550ms et ITI900ms

| Profil du participant | Hystérèse | | Contraste | |
|-----------------------|-----------|----------|-----------|----------|
| | ITI550ms | ITI900ms | ITI550ms | ITI900ms |
| Effectif | 25 | 23 | 20 | 22 |
| Proportion (en %) | 55,5 | 51,1 | 44,4 | 48,8 |

Le tableau 10, la figure 31 et la figure 32 représentent les distributions des points de basculement. Comme dans la condition ITI200ms, nous pouvons constater que l'ensemble a l'allure d'une distribution normale bornée à droite pour les phases ascendantes et à gauche pour les phases descendantes.

Tableau 10 : Distribution des basculements par image dans les séries ascendantes et descendantes pour les conditions ITI550ms et ITI900ms

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|----------|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Asc 550 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 3 | 6 | 14 | 32 | 43 | 37 | 25 | 6 | 2 | 1 |
| Desc 550 | 0 | 0 | 1 | 6 | 21 | 45 | 49 | 29 | 12 | 6 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Asc 900 | 0 | 0 | 1 | 2 | 3 | 5 | 8 | 18 | 34 | 41 | 33 | 21 | 5 | 1 | 0 |
| Desc 900 | 0 | 0 | 2 | 4 | 17 | 44 | 47 | 35 | 15 | 6 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |

En condition ITI550ms, le point moyen de basculement pour la phase ascendante se trouve à **10.07** dans la série d'images et à **6.88** pour la phase descendante. Afin de tester statistiquement la différence entre les moyennes, nous avons effectué un test de Student bilatéral sur des échantillons indépendants. L'écart, positif et significatif ($t(343) = 18.06$; $p < .001$), nous donne une taille d'effet d'hystérèse de **3.19**, soit 21.3% en proportion de la série.

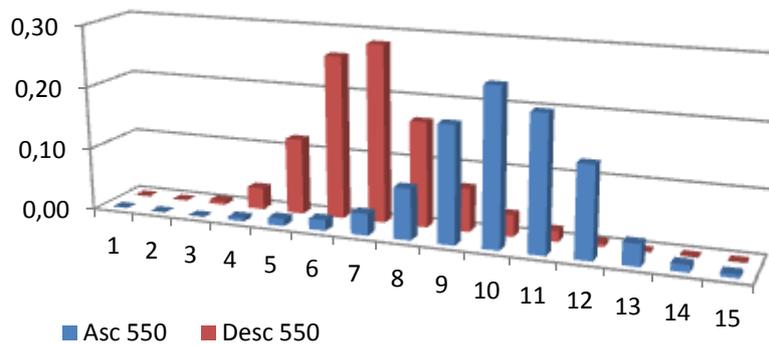


Figure 31 : Distribution des basculements des séries ascendantes et descendantes en fonction de l'image pour la condition ITI550ms

En condition ITI900ms, le point moyen de basculement pour la phase ascendante se trouve à **9.69** et à **6.99** pour la phase descendante. L'écart, positif et significatif ($t(343) = 14.66$; $p < .001$), nous donne une taille d'effet d'hystérèse de **2.7**, soit 18% en proportion de la série.

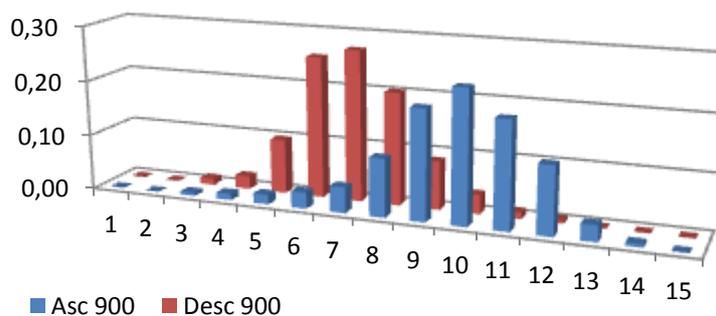


Figure 32 : Distribution des basculements des séries ascendantes et descendantes en fonction de l'image pour la condition ITI900ms

6.3 Mise en évidence des marqueurs de catastrophe

6.3.1 Evolution de la taille de l'effet d'hystérèse : l'effet de divergence

L'hypothèse générale de divergence chronométrique stipulait que la stabilité des attracteurs catégoriels devait diminuer naturellement avec le temps en causant une diminution de la taille de l'effet d'hystérèse. Cette variation de taille étant interprétée comme un effet de divergence. Le tableau 11 résume les valeurs d'hystérèse obtenues dans les trois conditions expérimentales.

Tableau 11 : Synthèse des résultats sur les réponses pour les trois valeurs de l'ITI

| | Basculement ascendant | Basculement descendant | Taille moyenne de l'effet | Taux profil d'hystérèse (%) |
|----------|--------------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| ITI200ms | 10,6 | 6,37 | 4,23 | 57,78 |
| ITI550ms | 10,07 | 6,88 | 3,19 | 55,5 |
| ITI900ms | 9,69 | 6,99 | 2,7 | 51,1 |

Nous avons effectué une ANOVA à mesures répétées avec le facteur *phase* (*ascendante vs descendante*) comme variable intra-sujets, le facteur *ITI* (200, 550 et 900) comme variable inter-sujets et le facteur *série* comme variable aléatoire. Comme nous pouvons le constater, non seulement la taille moyenne de l'effet obtenu diminue avec l'augmentation de l'ITI, mais cet effet est confirmé par les valeurs moyennes des basculements pour les séries ascendantes et descendantes. En effet, la diminution de la taille moyenne de l'effet d'hystérèse est respectivement due à une augmentation du seuil moyen de basculement en descendant et une diminution du seuil moyen de basculement en ascendant (cf. figure 33). L'analyse de la variance montre un effet du facteur *phase* ($F(1, 513)=14955$; $p < .001$), aucun effet principal du facteur *ITI*, mais une interaction entre le facteur *ITI* et le facteur *phase* ($F(2, 513)=264$; $p < .001$).

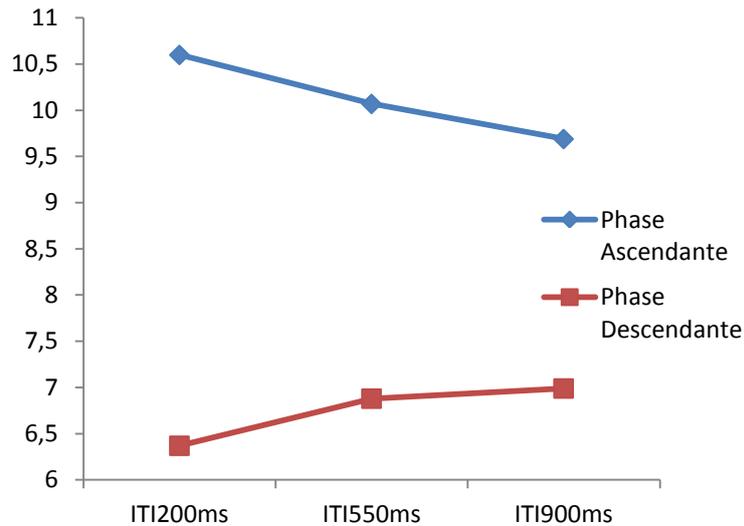


Figure 33 : Valeurs moyennes du point de basculement en phases ascendantes et descendantes en fonction de la valeur de l'ITI

Ainsi, nous constatons le phénomène de divergence chronométrique au travers de la diminution de la taille moyenne de l'effet d'hystérèse. Mais cette divergence est encore mieux illustrée lorsque nous reportons les courbes de profils de réponse par condition sur la surface de la fronce en fonction des prédictions. La condition ITI200ms étant la condition pour laquelle la stabilité de l'attracteur catégoriel devait être la meilleure, la courbe des réponses obtenues dans cette condition apparaît au premier plan sur la figure 34. De même, la courbe des réponses obtenues dans la condition ITI900ms est placée à l'arrière-plan car, selon nos prédictions, il s'agit de la condition dans laquelle l'attracteur catégoriel est le moins stable et pour lequel nous attendons le moins d'hystérèse. Ainsi, nous pouvons constater comment l'ensemble des réponses permet de faire correspondre les observations à la forme de la fronce dont sont dérivés les différents effets étudiés.

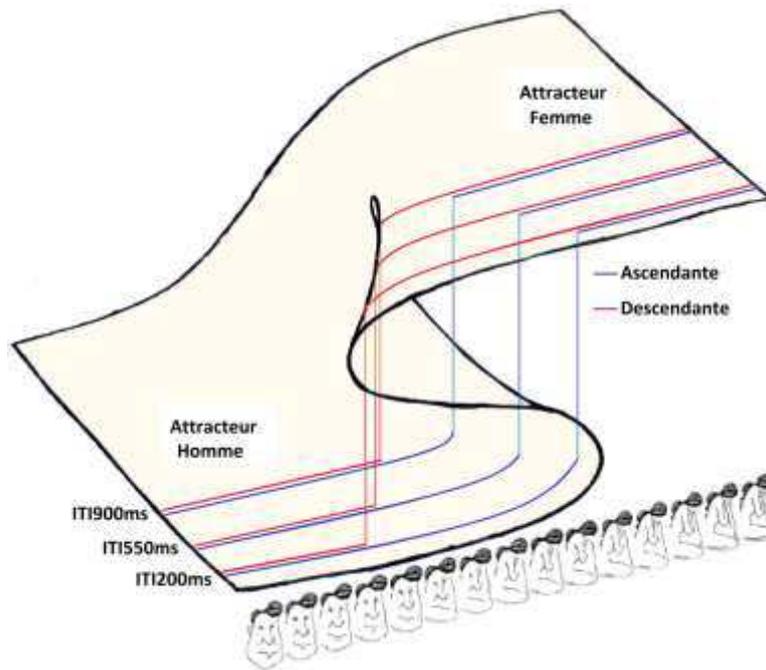


Figure 34 : Adaptation des résultats des réponses des participants à la surface de la fronce pour les trois valeurs de l'ITI

6.3.2 Analyse des temps de réponse : Ralentissement critique et évolution de la convexité

Nous avons effectué une ANOVA à mesures répétées sur les temps de réponse pour chacune des deux conditions ITI550 et ITI900, avec le facteur *rang de l'image* (T-3, T-2, T-1 et TO) comme variable intra sujet et les facteurs *série* et *sujet* comme variables aléatoires. L'effet principal du facteur *rang de l'image* est significatif dans les deux conditions (ITI550ms ; $F(3, 996) = 405,8$; $p < .001$ et ITI900ms ; $F(3, 1000) = 614,5$; $p < .001$). Dans l'analyse des temps de réponse des séries progressives pour les conditions ITI550ms et ITI900ms, nous avons adjoint les résultats obtenus dans la condition ITI200ms pour comparaison (figure 35). Le premier constat que nous faisons est que nous obtenons toujours une augmentation des temps de réponse avec un pic situé au moment du basculement. Globalement, les temps de réponse des séries progressives augmentent avec l'ITI, soit respectivement 712ms, 784ms et 831ms pour les conditions ITI200ms, ITI550ms et ITI900ms ($F(2, 16 197) = 863$, $p < .001$). Cette augmentation des temps de réponse moyens

peut être considérée comme une conséquence de la diminution de la stabilité de l'attracteur catégoriel. Lorsque nous regardons les courbes des fronts montants des temps de réponse en situation progressive, il est remarquable que la courbe pour la condition ITI200ms commence au plus bas pour finir au plus haut tandis que l'observation est inversée pour la condition ITI900ms dont la courbe commence au plus haut et finit au plus bas. Il y a donc inversion des courbes pendant le front montant. Cette observation traduit particulièrement une amplitude de front variable. En condition ITI200ms, la stabilité est la meilleure, il est donc naturel que la courbe du front montant du pic des temps de réponse présente des valeurs inférieures aux autres conditions. En revanche, l'amplitude du pic peut être considérée comme une marque du conflit entre deux attracteurs. Plus ces attracteurs sont stables et plus l'amplitude est importante.

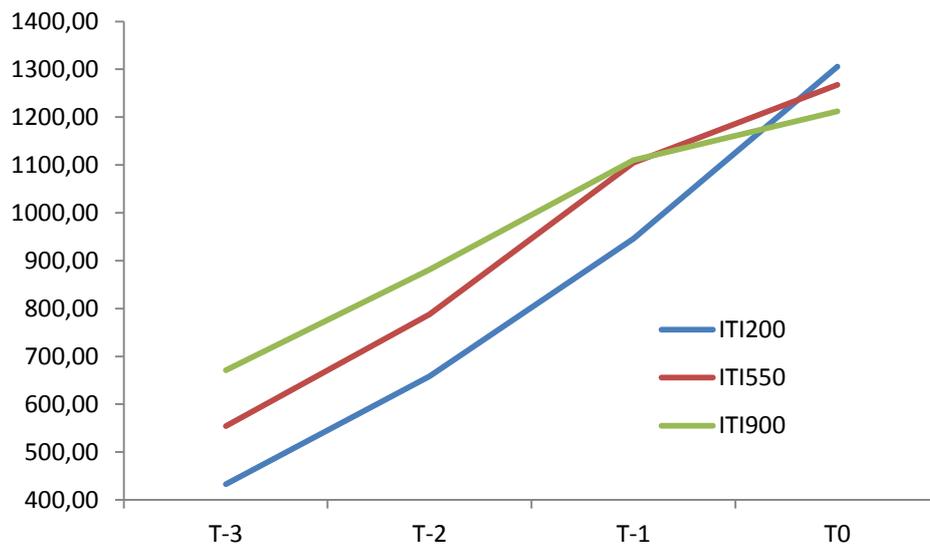


Figure 35 : Courbe des moyennes des temps de réponse (en ms), des séries progressives, centrées autour du point de basculement pour les trois valeurs de l'ITI

Pour confirmer les observations topologiques, nous transformons les courbes selon la méthode indiquée plus haut afin de calculer les indices de convexité respectifs. Les courbes obtenues sont représentées dans la figure 36. Nous pouvons remarquer dès à présent que la

courbe correspondant à la condition ITI200ms se situe en dessous des deux autres courbes et que l'ordre des courbes respecte la valeur de l'ITI.

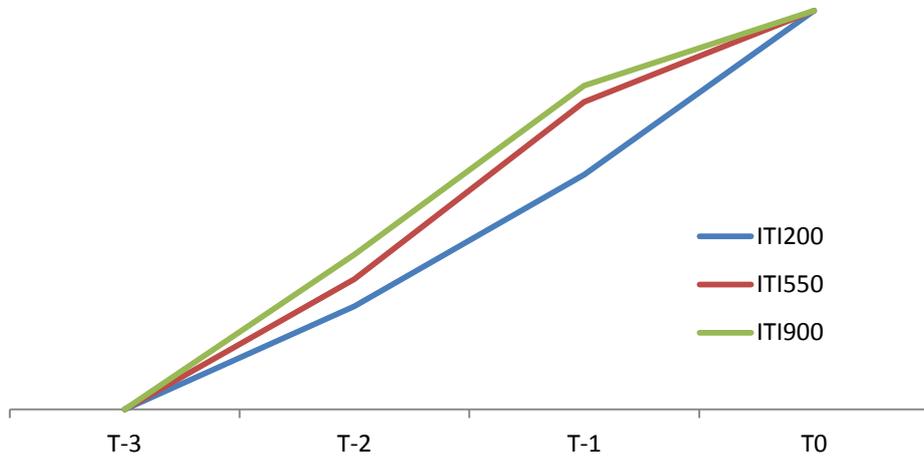


Figure 36 : Courbe des temps de réponse normalisés pour le calcul de l'indice de convexité pour les trois valeurs de l'ITI

Les valeurs de l'indice de convexité, calculées pour les conditions ITI200ms à ITI900ms sont, respectivement, 0.153 (convexité), -0.098 (quasi-linéarité) et -0.2 (concavité). Comme prévu, les courbes des fronts montants des temps de réponse des séries progressives deviennent de moins en moins convexes avec l'augmentation de l'ITI. Nous attribuons la responsabilité de ce phénomène à la diminution de la stabilité de l'attracteur catégoriel. Moins l'attracteur est stable et moins il permet de compenser l'effet de la croissance de l'instabilité, due au conflit entre les deux attracteurs catégoriels, sur les temps de réponse.

VII - FACTEURS QUALITATIFS DE DIVERGENCE

Après avoir vérifié l'effet d'un paramètre continu tel que le temps qui s'écoule entre deux essais consécutifs de catégorisation, nous comprenons que les facteurs de divergence peuvent être multiples. De fait, tout facteur qui peut engendrer une modification du potentiel d'un attracteur est un candidat valable comme facteur de divergence. Dans cette section, nous allons commencer par tester l'effet d'une tâche concurrente, intercalée, sur la stabilité de l'attracteur catégoriel principal. L'objectif de cette expérimentation est d'établir qu'une activité secondaire cause une perte de stabilité de l'attracteur principal, et de montrer que cette activité consciente et volontaire a un effet plus important que l'activité de fond opérationnalisée par l'ITI dans l'expérience précédente.

7.1 Expérimentation II.1 : Tâche concurrente distractive

7.1.1 Protocole expérimental

Participants

Quarante-cinq participants, hommes et femmes, sélectionnés aléatoirement sur la région de Montpellier (France), âge variant entre 19 et 61 ans. Tous avaient une bonne vision ou corrigée par le port de lunettes ou lentilles.

Matériel

Le matériel utilisé est le même que celui des expérimentations I.1 à I.3. Il s'agit des quinze images issues de la série de Fisher (1967).

Méthode

Nous reprenons le protocole utilisé dans les expérimentations précédentes que nous modifions pour ajouter une tâche de décision lexicale entre chaque essai. La tâche de décision lexicale débute 200ms après la réponse à la tâche de choix catégoriel. Un délai de 200ms précède l'essai catégoriel suivant tel qu'illustré dans la figure 37.

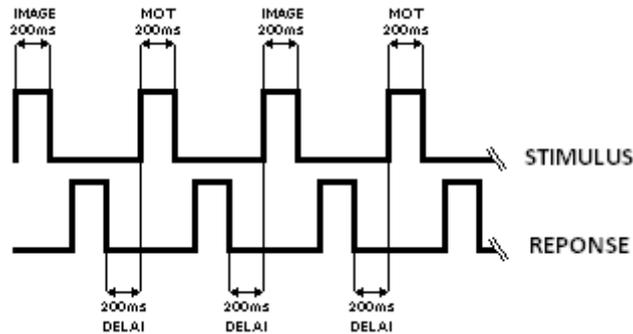


Figure 37 : Séquence temporelle de l'expérimentation II.1

Après que le participant a répondu sur la tâche catégorielle, un stimulus apparaît à l'écran pendant 200ms. Celui-ci peut être soit un mot pris aléatoirement parmi une liste de huit mots de la langue française, soit une suite de lettres sans signification dont la taille varie entre six et neuf lettres prises aléatoirement parmi une liste de huit suites de lettres. Le participant répond en appuyant sur la touche 'O' si c'est un mot et 'N' dans le cas contraire. Nous avons pris soin de choisir des mots qui entretiennent *a priori* le moins de relation avec la tâche de catégorisation, les catégories 'homme' et 'femme'. Il y a autant de mots féminins que masculins. Toutefois, nous n'avons pas contrôlé la fréquence qui est une dimension sans intérêt pour notre expérimentation puisque l'objectif de cette tâche est de créer une perturbation de la série de catégorisations. La liste des mots et des suites de lettres est répertoriée dans le tableau 12, le tirage est aléatoire et sans remise. Les contrôles sont effectués afin de minimiser les effets de biais catégoriels homme ou femme, pour éviter un déplacement du centre des séries lors de la tâche de catégorisation. Ce déplacement

aurait pour conséquence un tassement des réponses entraînant une moins bonne sensibilité de la tâche de catégorisation. Toutefois cet effet n'aurait, *a priori*, aucune conséquence sur les indicateurs que nous étudions, à savoir l'hystérèse, la divergence et le ralentissement critique.

Tableau 12: Liste des mots et non-mots utilisés dans la tâche de décision lexicale

| | | | | | | | | |
|-----------------|---------|--------|----------|---------|--------|-----------|---------|----------|
| mots | voiture | bureau | montagne | musique | ananas | téléphone | pinceau | tenaille |
| non-mots | sduivdy | dzntix | aundixsp | cysinqp | dviqpz | cunfqoezb | lmtavti | xsegunqk |

De même que dans les expérimentations précédentes, nous recueillons les réponses et les temps de réponse des participants. Ont été supprimés des données traitées, les séries progressives invalides définies précédemment, ainsi que les participants dont le taux d'erreur à la tâche de décision lexicale était supérieur à 10% (un unique cas).

7.1.2 Prédictions expérimentales

La tâche de décision lexicale étant supposée jouer le rôle de perturbateur entre chaque essai catégoriel, la stabilité de l'attracteur catégoriel doit décroître plus rapidement que dans la condition ITI900ms. En conséquence de quoi, nous attendons une diminution notable de la taille de l'effet d'hystérèse par rapport à la condition ITI900ms. En outre, ce résultat devrait être confirmé par une diminution conjointe de l'indice de convexité du front montant des temps de réponse au voisinage du basculement.

7.1.3 Résultats de la tâche de décision lexicale

Le taux d'erreur moyen après suppression est de **2.83%** sur l'ensemble de l'échantillon. Ces erreurs sont toutes attribuées par les participants à un excès de précipitation induite par la volonté de répondre le plus rapidement possible. Aucun participant n'a rapporté ne pas connaître un des huit mots présentés. Le temps de réponse moyen à la tâche de décision

lexicale est de **438ms** (SD = 89ms), portant le délai inter-essais catégoriel moyen à 838ms soit proche de la condition ITI900ms de l'expérimentation I.3 ce qui nous permet d'utiliser cette dernière comme point de comparaison.

7.1.4 Résultats de la tâche de catégorisation

Analyse des réponses

Pour cette condition avec tâche de décision lexicale (condition LEXI), la proportion du profil d'hystérèse chute à 40 % (soit 18 participants sur 45) alors qu'elle était de 50.1 % dans la condition ITI900ms. Cette diminution de proportion est accompagnée d'une diminution de la taille de l'effet d'hystérèse que l'on peut voir sur la figure 38. Le point moyen de basculement pour la phase ascendante se trouve à 9.38 et à 7.29 pour la phase descendante. L'écart est positif et significatif ($t(343) = 14.47$; $p < .001$), il nous donne une taille d'effet d'hystérèse de 2.09, soit 13.9% en proportion de la série.

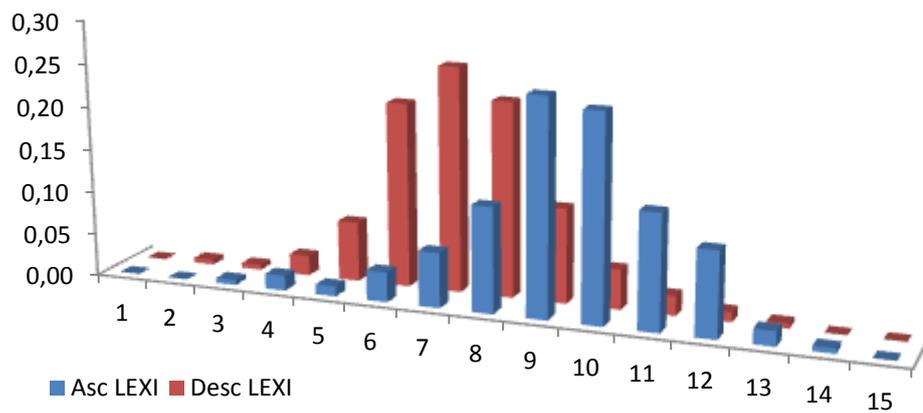


Figure 38 : Distribution des basculements des séries ascendantes et descendantes en fonction de l'image pour la condition avec tâche de décision lexicale

Nous avons effectué une ANOVA à mesures répétées avec le facteur *phase* (*ascendante vs descendante*) comme variable intra-sujets, le facteur *condition* (*ITI900ms et LEXI*) comme variable inter-sujets et le facteur *série* comme variable aléatoire. En comparaison, la taille de l'effet d'hystérèse pour la condition ITI900ms était de 2.7 (18%), la différence est elle aussi significative. L'analyse de variance montre un effet principal du facteur *phase* ($F(1, 342) = 4863$; $p < .001$) qui confirme le test de Student pour l'effet d'hystérèse, et une interaction significative entre les facteurs *phase* et *condition* ($F(1, 342) = 77,28$; $p < .001$) sans effet principal du facteur *condition*. Ces résultats indiquent que lorsque l'on passe de la condition ITI900ms à la condition LEXI, le point moyen de basculement en phase ascendante diminue et le point moyen descendant augmente (voir figure 39) et soutient ainsi l'hypothèse de divergence.

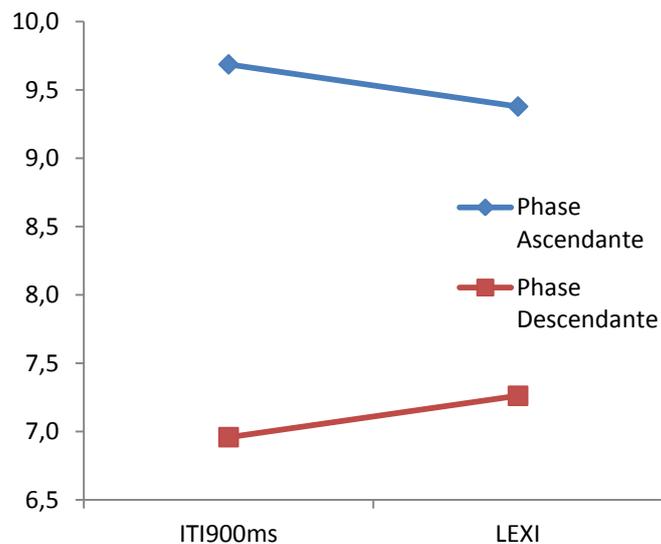


Figure 39 : Représentation graphique des points moyens de basculement en phase ascendante et descendante pour les conditions ITI900ms et LEXI

Analyse des temps de réponse

Le temps de réponse moyen pour les séries pseudo-aléatoires est de **1326ms** en condition LEXI soit une augmentation de 141ms par rapport à la condition ITI900ms ($t(5358) = 30.74$; $p < .001$). On remarque aussi une augmentation du temps de réponse moyen pour

les séries progressives, $M = 834ms$, contre 782ms en condition ITI900ms ($t(10798) = 24.03$; $p < .0001$). La différence entre les temps de réponse, pour les conditions *aléatoire* et *progressive*, est de nouveau significative ($t(8070) = 154.86$; $p < .0001$), comme pour les expérimentations précédentes.

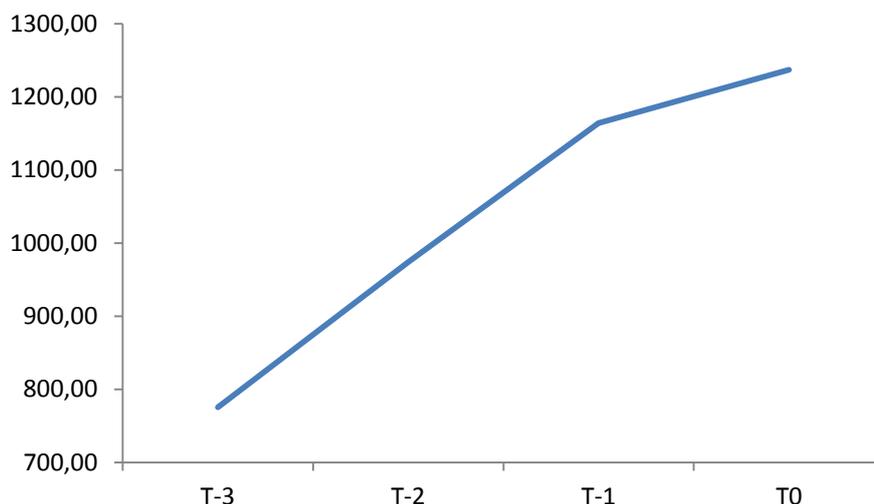


Figure 40 : Moyennes des temps des réponses des séries progressives, centrées autour du basculement, pour les 4 images avant le basculement (inclus), pour la condition avec tâche de décision lexicale

Nous avons effectué une ANOVA à mesures répétées sur les temps de réponse avec le facteur *rang de l'image* (T-3, T-2, T-1 et T0) comme variable intra sujet et les facteurs *séries* et *sujets* comme variable aléatoire. Nous obtenons un effet principal du facteur *rang de l'image* ($F(3, 1020) = 934,7$; $p < .001$). La figure 40 représente les temps de réponse avant le basculement. On peut y voir que le pic de temps de réponse est toujours présent, mais, aussi, que la courbe a une forme nettement plus concave comme en témoigne l'indice de convexité négatif ($\gamma = -0.273$). Cette observation va de pair avec l'évolution de la taille de l'effet d'hystérèse pour cette condition. Cette observation correspond à notre prédiction selon laquelle une tâche concurrente engendre une diminution de la stabilité de l'attracteur catégoriel et ainsi une diminution de la taille de l'effet d'hystérèse, relativement à la condition ITI900ms. Dans les conditions ITI900ms et LEXI, la durée qui sépare deux essais est

la même mais, dans le cas de la condition LEXI, les participants sont amenés à fournir une réponse supplémentaire et indépendante de la réponse catégorielle, engendrant ainsi un nouvel attracteur en conflit avec l'attracteur catégoriel et diminuant sa stabilité.

7.1.5 Discussion

Dans cette expérimentation nous montrons qu'une tâche concurrente de la tâche de catégorisation peut causer une diminution de la stabilité de l'attracteur catégoriel que nous observons au travers d'une diminution de la taille de l'effet d'hystérèse et de l'indice de convexité du front montant du pic des temps de réponse au voisinage du basculement. Nous avons montré préalablement, dans la première section de la partie expérimentale, que la divergence était directement liée à la stabilité de l'attracteur, ce qui nous permet ici de déduire que la diminution des paramètres observés témoigne de cette perte de stabilité. En accord avec notre position théorique, nous supposons que chacune des tâches engendre son propre attracteur qui entre en conflit avec l'autre. L'attracteur catégoriel est le seul à se maintenir au long de la série puisqu'il est le seul à bénéficier d'une mécanique de renforcement de stabilité, par la tâche et par le stimulus, tandis que l'attracteur relatif à la tâche de décision lexicale est en permanence reconstitué puisqu'il est renforcé par la tâche mais pas par le stimulus qui change aléatoirement et n'est jamais le même sur l'ensemble de la série.

7.2 Expérimentation II.2 : Tâche concurrente renforçatrice

Il peut paraître intuitivement évident qu'une tâche concurrente puisse jouer un rôle de distracteur avec un effet direct sur la stabilité. Ce que la théorie des systèmes dynamiques apporte de plus, c'est qu'une tâche concurrente peut aussi jouer un rôle de renforçateur de l'attracteur catégoriel. En effet, un attracteur peut partager une partie de son domaine dans

l'espace des phases avec un autre. Ou en termes de patterns dynamiques, deux patterns peuvent partager des degrés de liberté communs. Ce chevauchement de domaine des attracteurs a pour conséquence que la manifestation de l'un permet le renforcement d'une partie de la stabilité de l'autre. Plus précisément, un attracteur étant assimilable à un sous-espace de l'espace des phases, quand deux attracteurs partagent le même espace, l'espace commun est lui aussi un sous espace attracteur de la dynamique du système. La manifestation des deux attracteurs renforce ainsi la stabilité de cet attracteur commun, causant indirectement un renforcement simultané des deux attracteurs. C'est cette hypothèse que nous allons tester dans la présente expérimentation.

7.2.1 Protocole expérimental

Participants

Quarante-cinq participants, hommes et femmes, pour une moitié, des étudiants de psychologie de premier cycle, volontaires et récompensés, et pour l'autre moitié, des personnes sélectionnées aléatoirement sur la région de Montpellier (France). L'âge varie entre 17 et 64 ans sur l'ensemble de l'échantillon. Tous avaient une bonne vision ou corrigée par le port de lunettes ou lentilles.

Matériel

Nous avons repris la série de quinze images utilisées dans les expérimentations précédentes.

Méthode

De manière similaire avec la condition LEXI, nous proposons une tâche qui s'intercale entre chaque décision catégorielle et l'image suivante à catégoriser. Le participant doit

évaluer, sur une échelle en cinq points, le degré de certitude de la réponse qu'il vient de donner. Pour ce faire, un écran de consigne reste affiché jusqu'à la réponse du participant. Le participant peut noter sa certitude de 1 à 5 en appuyant sur les touches, respectivement, de E à U du clavier. Avec 1 (E) pour une réponse "pas sûr du tout" et 5 (U) pour "absolument certain". La figure 41 illustre la séquence temporelle de l'expérimentation.

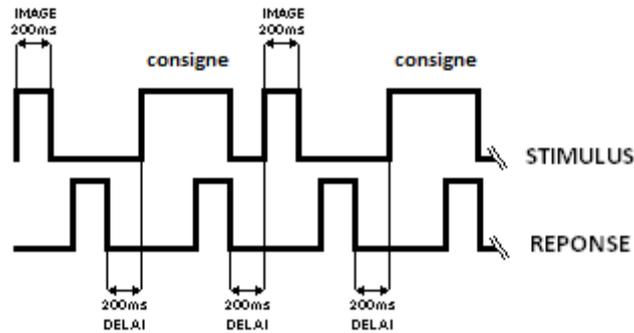


Figure 41: Séquence temporelle de l'expérimentation II.2

7.2.2 Prédictions expérimentales

Puisque la tâche d'auto-évaluation de la certitude sur la réponse donnée est relative à l'activité catégorielle précédente, elle devrait causer une augmentation de la stabilité de l'attracteur catégoriel. C'est pourquoi nous attendons que la taille de l'effet d'hystérèse dans la condition CERT soit supérieure à celle de la condition LEXI. En outre, puisqu'une activité relative a un effet de renforcement, nous attendons que la taille de l'effet d'hystérèse dans cette condition soit aussi supérieure à celle de la condition ITI900ms où aucun renforcement n'est *a priori* à l'œuvre. Par ailleurs, comme dans les conditions précédentes, nous attendons à ce que l'indice de convexité du front montant des temps de réponse au voisinage du basculement évolue de la même manière que la taille de l'effet d'hystérèse.

7.2.3 Résultats de la tâche de certitude

Lorsque nous appliquons aux données obtenues dans la tâche de certitude, le même traitement qu'aux temps de réponse des réponses catégorielles. C'est-à-dire, lorsque nous faisons la moyenne des scores de certitude, non pour chaque image, mais, par image en fonction du point de basculement pour chaque série. Alors, nous obtenons la courbe représentée à la figure 42. Sur cette courbe, les scores de certitude ont été inversés pour refléter l'incertitude. Nous pouvons remarquer, une fois de plus, que le maximum se situe au point de basculement et non sur les images les plus ambiguës telles que les images 7 à 9. Cette correspondance topologique entre les courbes d'incertitude et de temps de réponse ne permet toutefois pas de déterminer si la certitude exprimée est une conséquence directe du temps de réponse ou si les deux sources de variations (certitude et temps de réponse) sont explicables par la perte de stabilité de l'attracteur catégoriel.

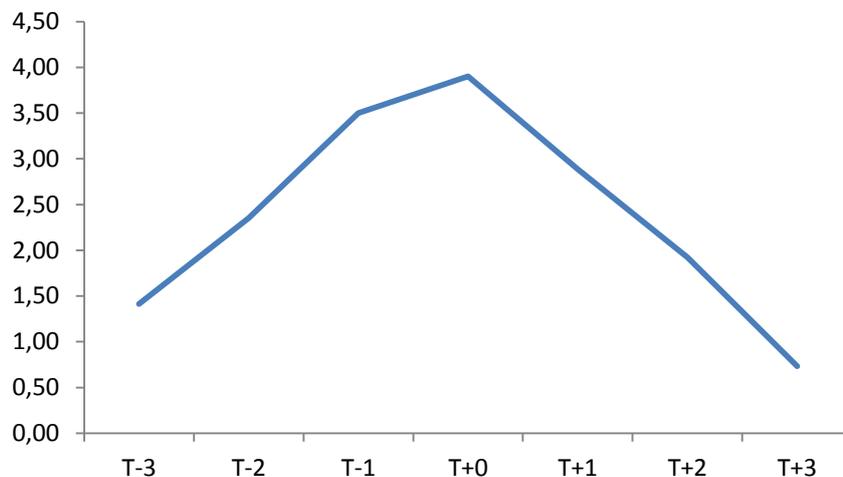


Figure 42: Courbe inversée des moyennes de certitude pour le bloc de 7 images autour du point de basculement pour la condition CERT

La moyenne des temps de réponse pour la tâche de certitude est de **557ms** contre 438ms pour la tâche de décision lexicale lors de la condition LEXI. Une augmentation ($t(10798) = 20.75$; $p < .001$) qui laisse supposer que la difficulté de la tâche d'auto-évaluation de

certitude est plus importante que celle de décision lexicale. Cette durée porte l'ITI à 957 ms, soit une durée plus importante que dans la condition ITI900ms et qui impliquerait une diminution de la divergence et donc de la taille de l'effet d'hystérèse pour cette condition si nous appliquions la seule hypothèse chronométrique de divergence.

7.2.4 Résultats de la tâche de catégorisation

A l'inverse de l'expérimentation précédente, nous constatons une augmentation du taux de participants avec un profil d'hystérèse. Pour la condition avec tâche de décision lexicale, le taux d'hystérèse par participant était de 40%, tandis qu'il est de **62.2%** pour la condition avec tâche de certitude auto-évaluée (CERT).

Analyse des réponses

Le point moyen de basculement pour la phase ascendante se trouve à **11.02** et à **5.95** pour la phase descendante. L'écart est positif et significatif ($t(343) = 29$; $p < .001$), il nous donne une taille d'effet d'hystérèse de **5.07**, soit 33.8% en proportion de la série.

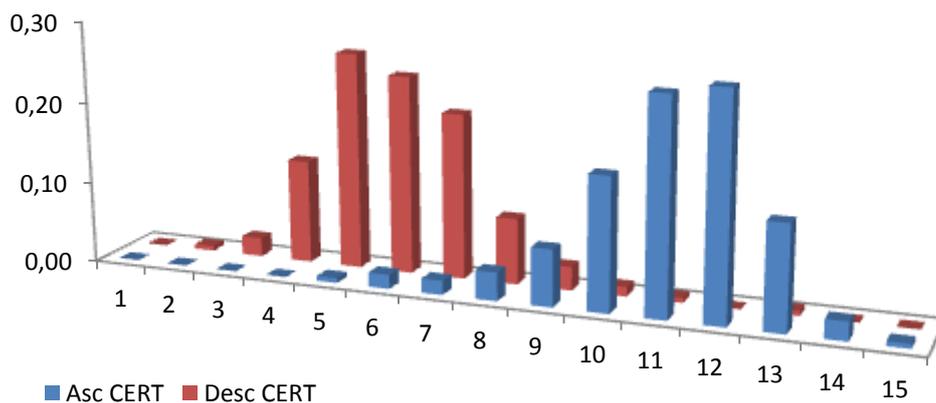


Figure 43 : Distribution des basculements des séries ascendantes et descendantes en fonction de l'image pour la condition avec tâche d'auto-évaluation de certitude

Nous avons effectué une ANOVA à mesures répétées avec le facteur *phase* (*ascendante vs descendante*) comme variable intra-sujets, le facteur *condition* (*LEXI, CERT, et ITI200ms*) comme variable inter-sujets et le facteur *série* comme variable aléatoire. Nous retrouvons un effet principal du facteur phase ($F(1, 513) = 18503$; $p < .001$). La taille de l'effet d'hystérèse pour la condition CERT est supérieure à la taille de l'effet d'hystérèse en condition LEXI, mais aussi en condition ITI200ms avec une interaction significative des facteurs *phase* et *condition* ($F(2, 513) = 1001$; $p < .001$) entre la variable condition et la variable phase (voir figure 44).

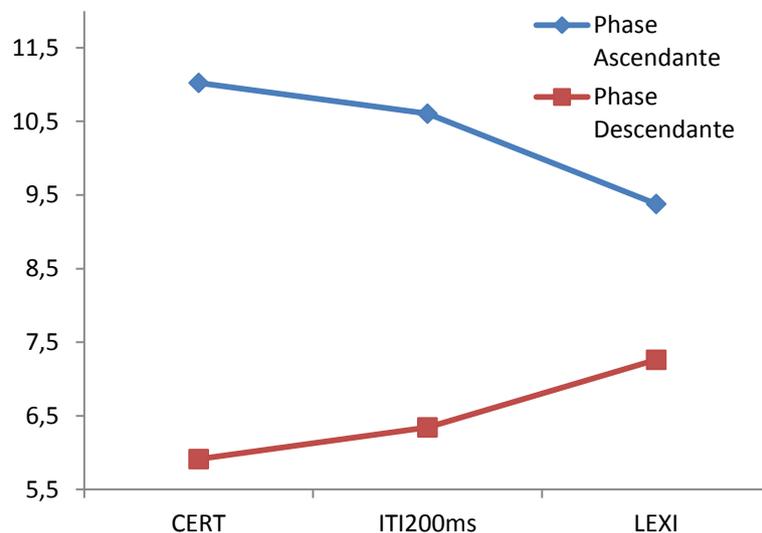


Figure 44: Points moyens de basculement en fonction de la phase ascendante ou descendante pour les conditions CERT, LEXI et ITI200ms

L'augmentation de la taille de l'effet d'hystérèse en condition CERT, relativement à la condition LEXI, montre que la tâche d'auto-évaluation de certitude, bien que plus difficile que la tâche de décision lexicale, étant donnée l'augmentation de la moyenne des temps de réponse, n'engendre pas la même instabilité. Nous pouvons même dire qu'elle a un effet de renforcement de la stabilité de l'attracteur puisqu'elle produit un effet d'hystérèse plus important encore que dans la condition ITI200ms et donc, *a fortiori*, que dans la condition ITI900ms pour un ITI supérieur. Un tel résultat montre clairement que l'hypothèse

chronométrique n'est valable qu'en l'absence d'activité consciente et, dans le cas contraire, le sens de l'effet de divergence va dépendre qualitativement de la nature de l'activité et de sa relation avec l'attracteur catégoriel.

Analyse des temps de réponse

Le temps de réponse moyen pour les séries pseudo-aléatoires est de **1295ms** en condition CERT. Une valeur qui se trouve dans le voisinage de la moyenne des temps de réponse pour la condition LEXI, pour laquelle le temps de réponse moyen était supérieur aux temps de réponse pour la condition ITI900ms. En revanche, le temps de réponse moyen pour les séries progressives, **M = 803ms**, est inférieur à la moyenne des temps de réponse pour la condition LEXI ($M = 834ms$; $t(10\ 798) = 21.4$; $p < .001$) mais supérieur à la moyenne des temps de réponse pour la condition ITI900ms ($M = 782ms$; $t(10\ 798) = 19.2$; $p < .001$). Une ANOVA à mesures répétées, avec le facteur *rang de l'image* comme variable intra sujets et les facteurs *série* et *sujets* comme variables aléatoires, confirme l'effet d'augmentation des temps de réponse au voisinage du basculement ($F(3, 1004) = 521,3$; $p < .001$).

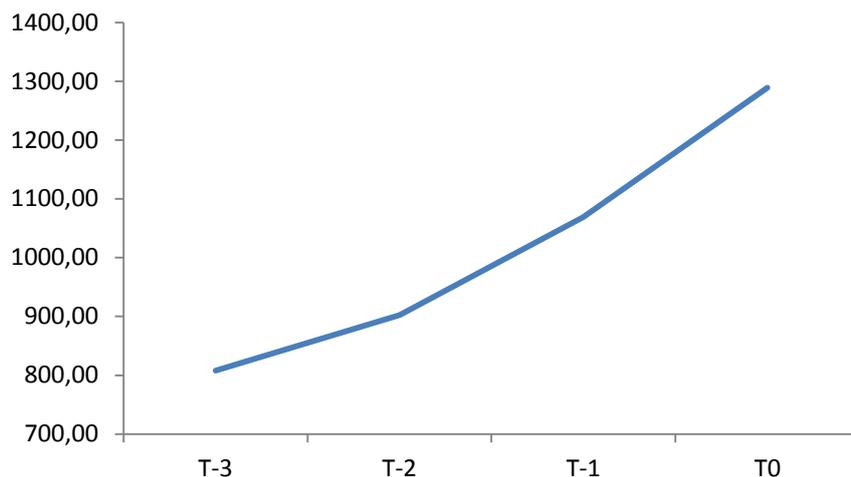


Figure 45 : Moyennes des temps de réponse, centrés autour du basculement pour les 4 images avant le basculement (inclus), des séries progressives pour la condition avec tâche d'auto-évaluation de certitude

La courbe des temps de réponse au voisinage du basculement (figure 45) montre un pic de temps de réponse avec un front montant de nouveau incurvé vers le bas dont l'indice de convexité positif $\gamma = 0.26$ témoigne de l'augmentation du conflit entre les deux attracteurs catégoriels.

7.2.5 Discussion

Dans cette expérimentation, nous avons montré qu'une tâche concurrente pouvait avoir un effet de renforcement de la stabilité de l'attracteur catégoriel, dès lors qu'elle était relative à la tâche de catégorisation ou qu'elle entretenait un lien avec l'attracteur constitué pendant cette tâche, ce qui se traduit dans l'espace des phases par deux bassins d'attraction qui se superposent pour certains degrés de liberté. L'effet d'hystérèse obtenu est plus important qu'en situation de décision lexicale, ce qui traduit la différence qualitative entre ces deux conditions, mais il est aussi plus important qu'en situation ITI200ms. Cette dernière différence montre que la tâche d'auto-évaluation de certitude n'a pas simplement un rôle de maintien de la stabilité, mais bien un rôle de renforcement, puisque au-delà du délai post-réponse catégorielle de 200ms, que l'on retrouve aussi dans la condition CERT, la stabilité de l'attracteur catégoriel continue de croître. Le processus de transition de phase se retrouve aussi dans le phénomène de ralentissement critique et l'indice de convexité s'accorde une fois de plus avec les résultats sur la taille de l'effet d'hystérèse, traduisant une divergence conforme aux prédictions. Ces résultats soutiennent bien l'hypothèse selon laquelle, lors de la tâche d'auto-évaluation de certitude, alors que l'attracteur se renforce, le temps n'est pas nécessairement un facteur de déclin de la stabilité. Et cela montre que cette dernière peut être renforcée après la manifestation initiale de l'attracteur, phénomène qui, par ailleurs, se produit déjà lors de la répétition catégorielle de la série d'images présentées.

7.3 Expérimentation II.3 : Effet du bruit sur la stabilité

Lors de la première série d'expérimentations, nous avons travaillé sur l'hypothèse chronométrique de divergence qui repose sur l'idée que le système est toujours en train de faire quelque chose et que cette activité non relative à l'attracteur catégoriel constitue une forme de bruit interne qui cause la chute de la stabilité de cet attracteur. Les résultats obtenus sont conformes à cette hypothèse et, de plus, confirment l'idée que le bruit interne est un facteur qui augmente la sensibilité du système aux perturbations, phénomène désigné sous le nom de résonance stochastique (Plessner & Tanaka, 1997; Simonotto *et al.*, 1997). Le rôle du bruit est central dans le fonctionnement des systèmes dynamiques et plus particulièrement pour la stabilité des attracteurs. En particulier, les cas limites de décision catégorielle avec ambiguïté sont idéalement décrits par une dynamique de bruit-attracteur (Braun & Mattia, 2010). Malgré tout, il ressort des travaux de Simonotto *et al.* (1997) que cette relation entre le bruit interne et la résonance stochastique n'a rien de linéaire et les auteurs montrent clairement qu'il existe une plage optimale de la quantité de bruit interne pour maximiser l'effet de la résonance. En deçà et au-delà, le bruit n'a pas d'effet ou a un effet délétère qui tend à supprimer complètement l'information produite. Toutefois, il existe une distinction entre le bruit interne, qui est la conséquence d'une activité de fond du système et a donc une influence directe sur sa dynamique, et le bruit externe causé par une source indépendante du système (Van Kampen, 1987). La différence majeure entre ces deux catégories de bruit est que le dernier est une adjonction qui s'effectue malgré le processus de production de l'information, tandis que le premier est une source de variabilité inhérente au processus de production lui-même et traduit une partie de la nature de ce processus. Si le bruit interne peut être une source de résonance stochastique qui favorise la détection d'un signal ou d'une variation, et peut causer une forme d'instabilité au sein du système parce

qu'il se distribue le plus souvent normalement⁵¹, le bruit externe en revanche produit l'effet inverse (Ward, 2001). En effet, en s'ajoutant au processus de production, le bruit externe cause un affaiblissement des contraintes qui définissent l'espace des degrés de liberté dans l'espace des phases et augmente ainsi le domaine au sein duquel le système peut produire un attracteur lors du processus de relaxation. L'attracteur étant ainsi plus étendu dans l'espace des phases, le processus de relaxation devient plus long mais le domaine de l'espace dans lequel est produit le bruit interne est d'autant plus restreint, élément favorable au maintien de la stabilité du système. Le bruit permet un plus grand nombre de degrés de liberté, ce qui cause l'augmentation de la stabilité de l'attracteur (Millieux, Calvin, & Temprado, 2005). En résumé, l'adjonction de bruit externe limite la contrainte environnementale sur le système, augmente le nombre de degré de liberté, augmente la stabilité du système et, pour finir, augmente le temps de relaxation et permet la production de réponses plus stables dans le temps.

En plus des éléments précités, il existe un autre argument en faveur du choix du bruit externe comme variable de divergence. Tuller *et al.* (1994) observent pour leur tâche qu'avec le temps, au fur et à mesure de la progression de l'expérimentation, l'occurrence du profil d'hystérèse diminue, c'est-à-dire que la distance entre les attracteurs augmente du fait d'une meilleure discrimination due à l'habituation au matériel et à l'apprentissage de la tâche. Indirectement, Tuller *et al.* (1994) formulent une hypothèse de divergence. Toutefois, nous observons l'effet contraire sur l'ensemble de nos expérimentations. La taille moyenne de l'effet d'hystérèse, toutes conditions confondues, est plus importante pour les dernières séries progressives que pour les premières. Cette opposition peut probablement être imputée à toutes les différences qui existent entre les situations expérimentales de Tuller *et*

⁵¹ On l'appelle alors bruit blanc

al. (1994) et les nôtres, mais elles nous poussent à formuler une hypothèse explicative. Avec le temps et l'habituation, nous supposons qu'il se produit une baisse de l'attention des participants. Cette baisse de l'attention serait une cause d'augmentation de l'effet d'hystérèse pour les raisons expliquées plus haut. Nous supposons que l'attention permet un maintien de la pression environnementale sur le système et qu'elle est une cause de suppression des degrés de liberté. La baisse d'attention a donc un effet analogue à l'adjonction de bruit externe sur le processus de relaxation, à savoir une augmentation du temps de relaxation d'une part et de la stabilité de l'attracteur catégoriel d'autre part. Une façon d'explorer cette hypothèse consiste alors à manipuler la quantité de bruit externe en ajoutant simplement ce bruit dans les images que nous utilisons.

7.3.1 Protocole expérimental

Participants

Quarante-cinq participants, hommes et femmes, pour une moitié, des étudiants de psychologie de premier cycle, volontaires et récompensés, et pour l'autre moitié, des personnes sélectionnées aléatoirement sur la région de Montpellier (France). L'âge varie entre 17 et 64 ans sur l'ensemble de l'échantillon. Tous avaient une bonne vision ou corrigée par le port de lunettes ou lentilles.

Matériel

La série de quinze images utilisées dans les expérimentations précédentes

Méthode

Pour cette sixième expérimentation, nous utilisons une dernière fois le protocole décliné depuis l'expérimentation I.1. Plus exactement, nous reprenons le protocole utilisé

lors de l'expérimentation II.2 précédente. Cette fois-ci, nous avons utilisé l'algorithme de flou du logiciel Paint Shop Pro avec la valeur 30% afin d'introduire du bruit dans les images de la série de Fisher (1967). Les images deviennent moins nettes et plus difficiles à identifier. Les différences d'une image à l'autre sont moins marquées, les images étant ainsi moins discriminables une à une au sein de la série. Les participants sont, une fois de plus, appelés à catégoriser les images présentées à l'écran puis à auto-évaluer la certitude de leur choix. Le maintien de la tâche d'évaluation de certitude nous permet de comparer les résultats de la condition FLOU à ceux de la condition CERT.

7.3.2 Prédictions expérimentales

Pour la condition FLOU, nous ne faisons pas de prédiction sur l'évolution globale des temps de réponse, puisque cette condition introduit conjointement un facteur de stabilité qui permet l'amélioration des performances et un facteur de difficulté, les images floues, qui causent une détérioration des performances. En revanche, nous prédisons une augmentation de la taille d'effet d'hystérèse comme conséquence de l'augmentation de la stabilité de l'attracteur catégoriel et en vertu de l'hypothèse de divergence. Par ailleurs, nous nous attendons à ce que l'indice de convexité du front montant confirme cette augmentation de stabilité en étant plus importante que dans la condition CERT.

7.3.3 Résultats de la tâche d'auto-évaluation de certitude

De manière analogue à la condition CERT, nous constatons que le pic d'incertitude (figure 46) correspond au pic des temps de réponse après alignement des données sur le point de basculement. La moyenne des temps de réponse sur la tâche de certitude (**M=564ms**) est sensiblement la même que pour la condition CERT, l'augmentation n'étant

pas significative. La durée de l'ITI étant conservée, la source de variation est ici uniquement due à l'altération des images dans la condition FLOU par rapport à la condition CERT.

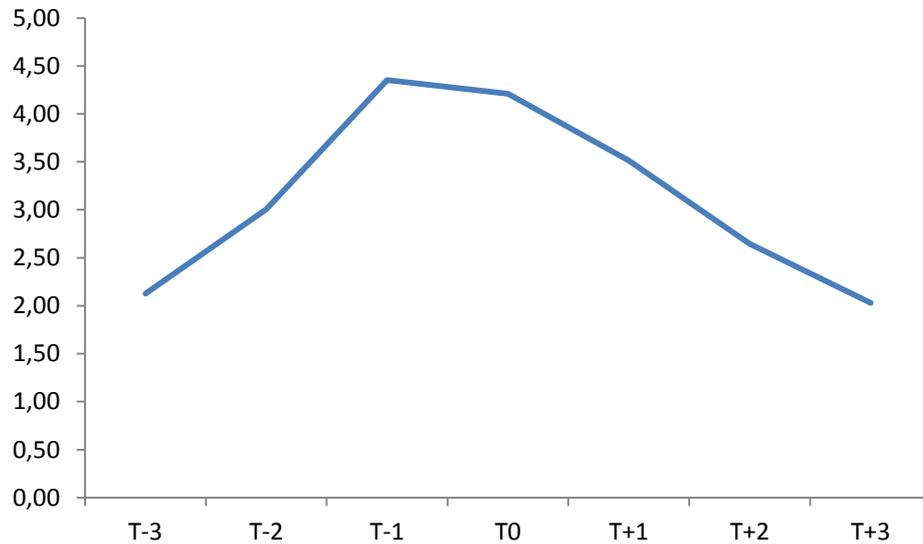


Figure 46 : Courbe inversée des moyennes de certitude pour le bloc de sept images autour du point de basculement pour la condition FLOU

7.3.4 Résultats de la tâche de catégorisation

Analyse des réponses

Le point moyen de basculement pour la phase ascendante se trouve à **11.42** et à **5.62** pour la phase descendante. L'écart est positif et significatif ($t(343) = 27.98$; $p < .001$), il nous donne une taille d'effet d'hystérèse de **5.8**, soit 38.6% en proportion de la série. La figure 47 représente la distribution des basculements pour la condition FLOU en fonction de la phase.

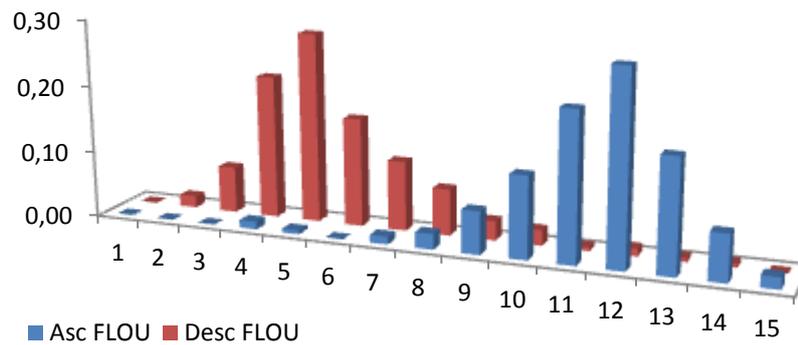


Figure 47 : Distribution des basculements des séries ascendantes et descendantes en fonction de l'image pour la condition avec tâche d'auto-évaluation de certitude et images floues (FLOU)

Nous avons effectué une ANOVA à mesures répétées avec le facteur *phase* (*ascendante vs descendante*) comme variable intra-sujets, le facteur *condition* (*FLOU et CERT*) comme variable inter-sujets et le facteur *série* comme variable aléatoire. L'effet principal du facteur *phase* est significatif ($F(1, 342) = 14660$; $p < 0,001$). La taille d'effet d'hystérèse obtenue en condition FLOU est supérieure à la taille d'effet d'hystérèse pour la condition CERT. L'analyse de variance montre une interaction significative entre les facteurs *phase* et *condition* ($F(1, 342) = 66,54$; $p < .001$), sans effet principal du facteur *condition*, qui témoigne d'un effet opposé de la condition sur chacune des phases. Pour la condition FLOU, le basculement moyen en phase ascendante est supérieur tandis que le basculement moyen en phase descendante est inférieur (voir figure 48).

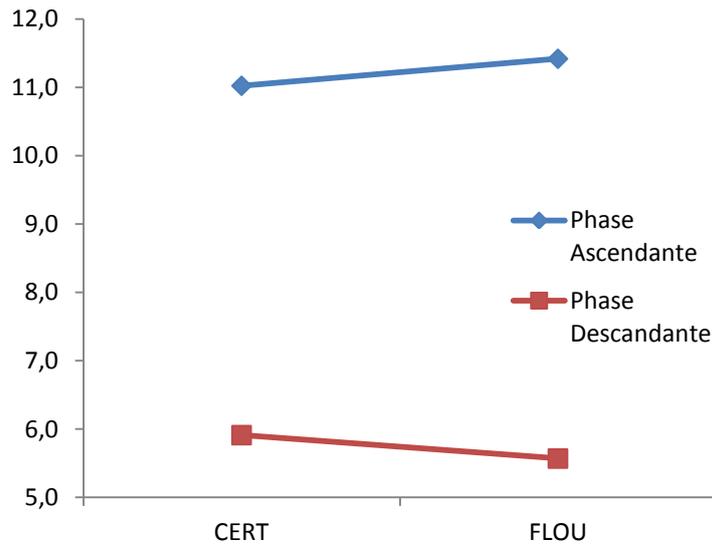


Figure 48 : Points moyens de basculement en fonction de la phase ascendante ou descendante pour les conditions CERT et FLOU

Analyse des temps de réponse

La forme des temps de réponse obtenus dans la condition FLOU ne diffère que peu de celle obtenue en condition CERT, comme nous pouvions nous y attendre, les deux conditions étant très similaires. Toutefois, la moyenne des temps de réponse sur cette condition est plus importante que dans la condition CERT où les images ne sont pas floutées. Par ailleurs, en ce qui concerne le front montant des temps de réponse à l'approche du changement (figure 49), l'indice de convexité calculé est $\gamma = 0.42$, soit en augmentation par rapport à la condition CERT ($\gamma = 0.26$) conjointement à l'augmentation de la taille de l'effet d'hystérèse. Une ANOVA à mesures répétées, avec le facteur *rang de l'image* comme variable intra sujets et les facteurs *série* et *sujets* comme variables aléatoires, confirme l'effet d'augmentation des temps de réponse au voisinage du basculement ($F(3, 996) = 876$; $p < .001$).

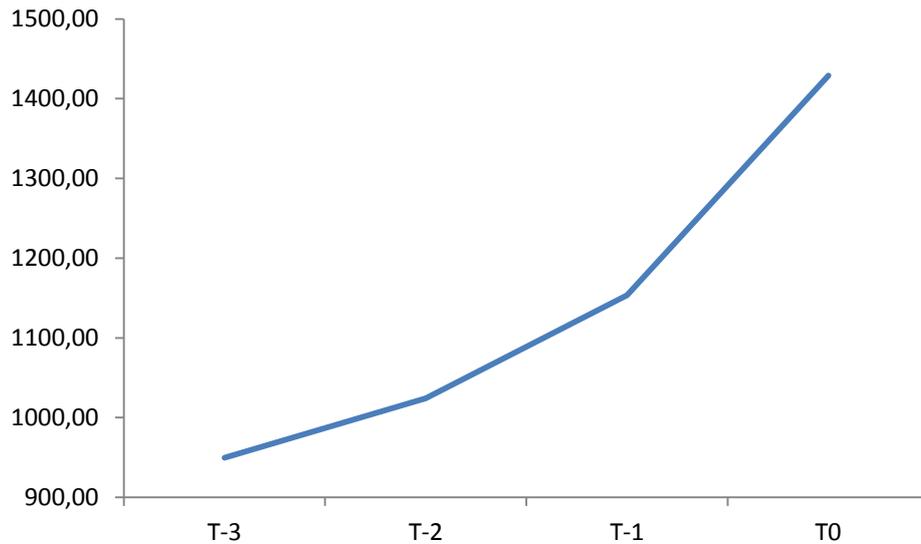


Figure 49 : Moyennes des temps des réponses centrées autour du basculement pour les 4 images avant le basculement (inclus), pour les séries progressives dans la condition avec images floues et tâche d'auto-évaluation de certitude (FLOU)

7.3.5 Discussion

Nous avons supposé que l'injection de bruit dans le stimulus aurait pour effet d'augmenter la difficulté de la tâche de catégorisation, ce que nous avons pu constater par le biais d'une augmentation globale des temps de réponse pour la condition FLOU. Mais, conjointement, la présentation d'images floues, en comparaison de la condition CERT, tend à faire diminuer la pression environnementale sur le système et à augmenter le nombre de degrés de liberté pour la tâche de catégorisation. Le bassin d'attraction d'un tel attracteur est alors plus étendu dans l'espace des phases et engendre une plus grande stabilité. Ce qui s'est traduit dans notre étude par une augmentation de la taille de l'effet d'hystérèse par rapport à la condition sans bruit (CERT).

7.4 Synthèse du modèle catastrophique de la fronce

Dans ces deux premières séries d'études, nous nous sommes attachés à mettre en évidence les marqueurs de transition de phase tels qu'ils apparaissent dans le modèle catastrophique de la fronce. Il ressort globalement que le changement catégoriel en

perception présente les propriétés d'une transition de phase et que les paramètres employés permettent de représenter les données comportementales par le biais de la surface de la fronce, ce qui en fait un modèle mathématique adéquat du changement catégoriel. Par ailleurs, c'est l'observation conjointe de chacun des indicateurs de non linéarité au sein d'une même tâche, qui permet de confirmer la solidité de l'hypothèse dynamique de la catégorisation que nous avons décrite dans la partie théorique. De plus, l'hypothèse selon laquelle ces phénomènes sont directement dépendants de la stabilité de l'attracteur catégoriel, nous a conduit à formuler un ensemble d'hypothèses expérimentales, qui ont permis la manipulation de ces phénomènes, assortie de prédictions qualitatives et quantitatives.

Dans la première étude, nous avons mis en évidence la bistabilité du système catégoriel, conséquence de l'ambiguïté, ainsi que son expression dynamique en situation d'évolution progressive : l'hystérèse. Cette dernière est le phénomène logiquement manifesté par un système dynamique bistable en cas d'ambiguïté et de basculement imminent. A la suite de la première étude, et dans les deux études suivantes, nous avons montré que la stabilité de l'attracteur catégoriel évoluait naturellement avec le temps. Pour ce faire, nous avons montré que le délai inter-essais était un facteur de divergence et que la taille de l'effet d'hystérèse diminuait avec son augmentation, et donc, avec la diminution de la stabilité de l'attracteur. Parallèlement, dans ces trois expérimentations, nous avons mis en évidence le phénomène de ralentissement critique qui se produit lorsque l'instabilité du système augmente exponentiellement au voisinage d'un changement de bassin d'attraction. Phénomène que nous avons nommé 'basculement'. De plus, nous avons pu constater que l'effet facilitateur de l'attracteur sur les temps de réponse était préservé d'autant plus longtemps que l'attracteur était stable. Comme marque de cet effet, nous avons observé

que le pic des temps de réponse au moment du basculement présentait une convexité qui évoluait parallèlement à la divergence, c'est-à-dire à l'évolution de la stabilité de l'attracteur. Nous avons mis en évidence cette évolution par le biais d'un indice de convexité.

VIII - ETUDE DE LA STABILITE DES ATTRACTEURS CATEGORIELS

L'hypothèse chronométrique de divergence développée dans la première section de la partie expérimentale nous a permis de montrer, conformément aux prédictions générales de la théorie des systèmes dynamiques (Ward, 2001), que le temps était un facteur de déclin de la stabilité de l'attracteur catégoriel. Rappelons ici que dans notre étude, nous opérationnalisons la stabilité de l'attracteur au travers de sa capacité à asservir le système et à produire une réponse observable plus ou moins rapidement. Le postulat sous-jacent repose sur le principe du temps de relaxation que nous avons introduit avec la théorie synergétique : « Measurement of the time it takes to return to some observed state – local relaxation time – is an important index of stability and its loss when patterns spontaneously form » (Kelso, 1995, p.45). Un temps de réponse rapide induit un temps de relaxation court qui traduit une forte stabilité de l'attracteur. Ainsi, les résultats obtenus dans la première section permettent d'établir le principe du déclin temporel de la stabilité.

Par ailleurs, comme nous le faisons déjà remarquer lors de l'analyse des temps de réponse pour l'expérimentation I.1, les temps de réponse pour les premières images des séries progressives – qu'elles soient ascendantes ou descendantes – diminuent sensiblement jusqu'à atteindre un palier stable et ne recommencent à augmenter qu'à l'approche du basculement. Si nous interprétons cette observation à l'aide du postulat précédent, nous pouvons en déduire que l'attracteur se constitue et se renforce avec le temps. C'est-à-dire qu'au fil des présentations des images et, en moindre mesure, des réponses des participants, la stabilité de l'attracteur augmente jusqu'à devenir optimale, ce qui se traduit par une diminution puis une stabilisation des temps de réponse. Toutefois, ceci pourrait n'être qu'un artefact expérimental engendré par une forme d'habituation locale de la série. Chaque série

étant distinctement séparée de la suivante, nous pouvons imaginer que le changement de série engendre une chute de l'attention et que celle-ci a pour conséquence une diminution des performances qui ne redeviennent optimales qu'après quelques essais dans la même série. Mais la première hypothèse permet de formuler un modèle de l'ascension et du déclin temporel de la stabilité. C'est cette hypothèse que nous allons développer et explorer dans cette troisième et dernière section expérimentale tout en tâchant de la mettre en compétition avec l'hypothèse attentionnelle.

8.1 Modèle d'évolution temporelle de la stabilité des attracteurs catégoriels

Les résultats déjà obtenus montrent que lors de la phase d'ascension de la stabilité, les temps de réponse évoluent de façon asymptotique vers une valeur « plancher », ce qui permet de supposer que la stabilité suit une loi d'évolution isomorphe. Cet effet est souvent expliqué dans la théorie synergétique par le biais du modèle de couplage d'oscillateurs non linéaires. Ainsi, le temps de relaxation augmente exponentiellement avec le nombre d'oscillateurs couplés jusqu'à atteindre un seuil de saturation. On retrouve des lois d'évolution asymptotiques des processus stochastiques un peu partout dans la nature. Le plus célèbre étant la loi du déclin de l'activité radioactive (ou vitesse de désintégration des noyaux) inversement proportionnelle au nombre de noyaux. Dans le cas d'un processus cognitif reposant sur une base neuronale, la formation d'un attracteur repose sur la synergie d'un groupe de neurones (voir Haken, 2006) et cette synergie est analogue et peut être assimilée au couplage d'oscillateurs non linéaires. Cette base nous permet d'esquisser une loi d'évolution pour la phase d'ascension de la stabilité. D'autre part, nous avons établi que pour un même attracteur, la stabilité décline avec le temps à la suite du processus de

relaxation. Une fois l'attracteur constitué, on observe un effet d'inertie, qui est la principale cause de l'hystérèse et qui décline de façon non linéaire avec le temps comme le suggère la forme des courbes de bifurcation sur la fronce. Là aussi, comme le montrent les courbes de bifurcation, la progression apparaît comme asymptotique. Toutefois, le déclin ne devrait pas être une simple loi exponentielle de décroissance comme dans l'exemple de la radioactivité. Il apparaît qu'il y a un moment de maintien de stabilité où le déclin est assez faible, puis, une accélération du déclin et, enfin, un amortissement critique. La figure 50 illustre graphiquement ces trois moments de l'évolution théorique de la stabilité.

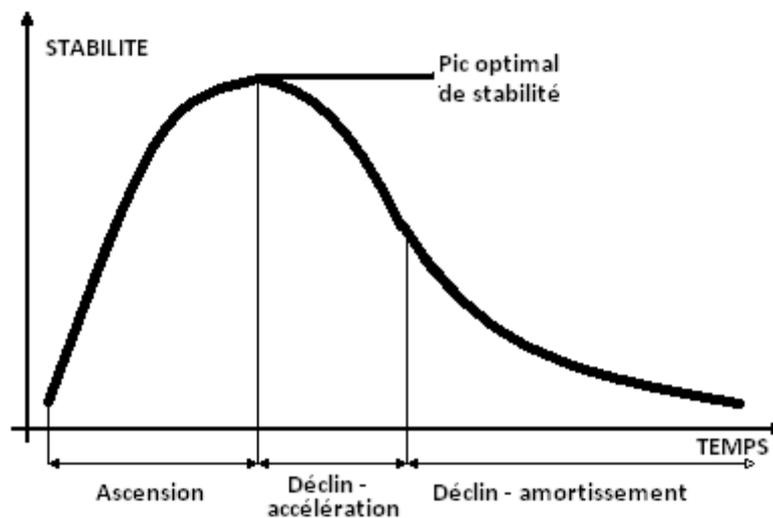


Figure 50 : Modèle d'évolution de la stabilité de l'attracteur catégoriel

Outre la forme générale de la loi d'évolution naturelle de la stabilité, on peut remarquer qu'un attracteur, selon cette prédiction, possède un maximum de stabilité. Nous appellerons un tel maximum, quand il existe, le potentiel optimal de stabilité de l'attracteur. Ce potentiel correspond à l'étendue de l'attracteur dans l'espace des phases. La loi d'évolution d'un attracteur est donc topologiquement la même que pour n'importe quel attracteur, mais le maximum de cette loi change en fonction de l'attracteur. La stabilité maximale est une propriété spécifique à chaque instance d'un attracteur. Elle dépend de ses déterminants et altère la forme de la loi sans en changer la topologie (figure 51). Nous avons

pu constater jusqu'à présent dans les études précédentes que cette stabilité maximale est dépendante des nombreux facteurs de divergence.



Figure 51 : Exemple de trois lois de stabilité pour trois attracteurs de maximum différent.

8.2 Expérimentation III : validation du modèle d'évolution de stabilité.

Dans cette expérimentation, nous allons tester l'influence de la stabilité de l'attracteur catégoriel sur les performances à la tâche de choix forcé à deux modalités dans différentes conditions, ce qui nous permettra de mettre en évidence la loi de stabilité à travers le temps. L'objectif étant de montrer que la stabilité évolue en fonction du temps comme nous l'avons décrit ci-dessus, mais, par ailleurs, de montrer que cette évolution est aussi fonction du potentiel maximum de l'attracteur.

La procédure expérimentale pour cette expérimentation sera sensiblement différente des précédentes. Nous abandonnons la structure en séries des images de Fisher (1967) puisque nous ne cherchons plus à produire un effet d'hystérèse. Nous avons besoin de montrer quantitativement l'effet des images et catégorisations précédentes sur l'essai actuel. Plus précisément, nous allons montrer que les temps de réponse lors de la tâche de choix forcé dépendent de la stabilité de l'attracteur quand celui-ci est congruent. Si l'image

présentée en 200ms a été précédée d'une ou de plusieurs images correspondant à la même catégorie, alors, l'attracteur constitué lors des présentations précédentes et dont le niveau de stabilité n'est pas encore nul doit produire un effet sur la réponse actuelle. Plus le nombre d'images congruentes présentées avant est important et plus la probabilité que l'attracteur ait atteint son niveau de stabilité maximum est importante. Par ailleurs, plus le délai entre les réponses est important et plus la probabilité que la stabilité de l'attracteur ait décliné est grande. La conséquence devrait être une variation des temps de réponse qui reflète ces deux hypothèses, conformément à la loi d'évolution théorique de la stabilité.

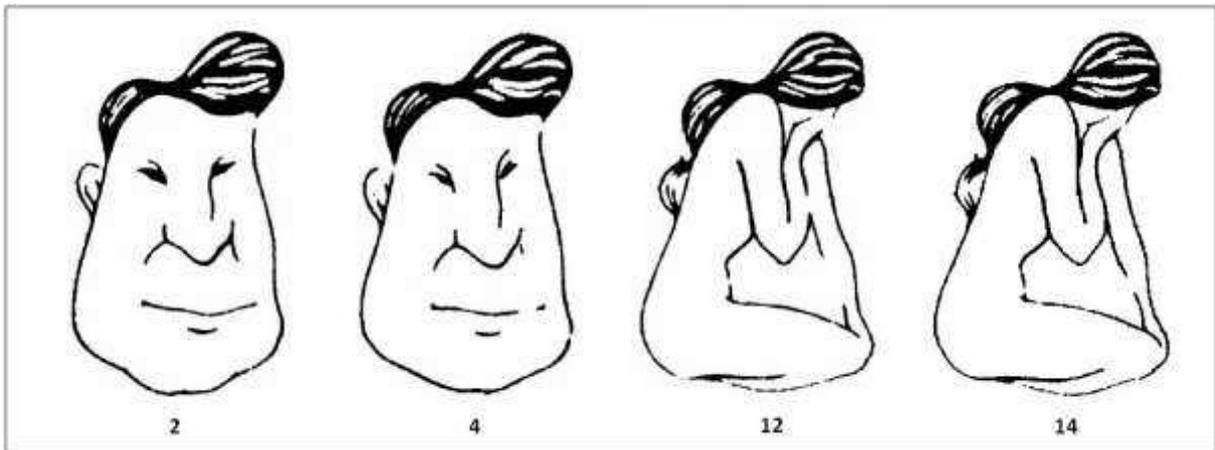


Figure 52 : Images issues de la série de Fisher(1963), utilisée dans les expérimentations précédentes et présentées aux participants de l'expérimentation III

8.2.1 Protocole expérimental

Matériel

Nous avons constitué des blocs d'images à partir des images 2, 4, 12 et 14 de la série de quinze images utilisée dans les expérimentations précédentes (voir figure 53). Il nous fallait choisir des images polarisées mais différenciables de sorte que deux images identiques ne soient pas présentées à la suite. Pour mémoire, les images 2 et 4 appartiennent à la catégorie 'homme' (H) tandis que les images 12 et 14 appartiennent à la catégorie 'femme' (F). Chaque image cible présentée à l'écran appartient à un bloc d'images caractérisé par

deux dimensions. Tout d'abord, l'image présentée est précédée par un groupe amorce d'images congruentes, c'est-à-dire appartenant toutes à la même catégorie (H ou F). La cible est de plus caractérisée par le fait qu'elle constitue, ou non, un changement catégoriel par rapport aux images du groupe précédent (A ou S). En outre, la taille du groupe d'images est manipulée. Ainsi, une cible peut être précédée d'un groupe de trois, de deux ou même d'une image unique.



Figure 53 : Exemple de bloc test de type 3HA. La cible est une image de la catégorie 'homme' précédée par un groupe d'images amorce de trois images de la catégorie opposée 'femme' qui induisent un changement catégoriel entre la cible et le groupe. Le bloc débute par une image de type H afin de délimiter le début du groupe amorce de type F.

Il nous faut faire remarquer que chaque image est potentiellement une cible puisque chaque image présentée nécessite une réponse de la part du participant. Par exemple, la troisième image d'un groupe de trois images congruentes est une cible précédée par deux images congruentes sans changement catégoriel ; ceci permettra d'étudier les blocs sans changement catégoriel, à une ou deux amorces, à partir de blocs à trois amorces. Les blocs sont constitués afin que chaque situation, illustrée dans le tableau 13, se produise. On remarquera donc que le bloc 1HS, par exemple, n'apparaîtra jamais seul puisqu'il est compris dans le bloc 3FA. L'image cible du bloc 1HS correspond à la troisième image du bloc 3FA (FHH -> FHHHF). De sorte que le bloc 3FA suffit pour tester les conditions 3FA et 1HS. Chaque bloc débute par une image de la catégorie opposée au groupe amorce afin de délimiter ce dernier et de contrôler sa taille. Toutes les images, à l'exception de l'image qui délimite le début d'un bloc et la première image du groupe d'amorce, sont des cibles correspondant à l'une des situations du tableau 13.

Tableau 13 : Structure des blocs d'images en fonction de la taille du groupe amorce, du type de la cible (H ou F) et de la présence ou non d'un changement catégoriel

| Taille amorce | Type cible | Changement | Code | Structure bloc |
|---------------|------------|------------|------|----------------|
| 1 | H | A | 1HA | H.F.H |
| 1 | H | S | 1HS | F.H.H |
| 1 | F | A | 1FA | F.H.F |
| 1 | F | S | 1FS | H.F.F |
| 2 | H | A | 2HA | H.FF.H |
| 2 | H | S | 2HS | F.HH.H |
| 2 | F | A | 2FA | F.HH.F |
| 2 | F | S | 2FS | H.FF.F |
| 3 | H | A | 3HA | H.FFF.H |
| 3 | H | S | 3HS | F.HHH.H |
| 3 | F | A | 3FA | F.HHH.F |
| 3 | F | S | 3FS | H.FFF.F |

Population

Soixante-cinq participants, hommes et femmes, sélectionnés aléatoirement sur la région de Montpellier, âge variant de 19 à 61 ans. Vision bonne ou corrigée par le port de lunettes ou de lentilles.

Méthode

Les participants reçoivent la consigne de catégoriser, le plus rapidement possible, les images qu'ils voient apparaître à l'écran, en appuyant sur la touche H s'il s'agit du visage d'un homme et sur la touche F s'il s'agit de la silhouette d'une femme. Les images ne se répètent pas. Par exemple, pour la catégorie 'homme', les images 2 et 4 sont alternées de sorte qu'une image donnée n'est jamais vue deux fois de suite. Chaque image est présentée pendant **200ms** et séparée de la suivante par un délai inter-essais de **200, 400, 700 ou 1000ms**. Chaque condition décrite dans le tableau 13 est présentée quatre fois pour chacun des quatre délais inter-essais. Les blocs (tableau 14) sont distribués aléatoirement et sans remise sur les trois dimensions variables : taille, délai et changement. Chaque participant voit donc six blocs différents de cinq images dans quatre conditions de délai, l'ensemble se

répète quatre fois, soit 96 blocs et 480 images. La durée moyenne de l'expérimentation est de 25 minutes.

Tableau 14 : Structure des blocs présentés lors de l'expérimentation

| Blocs présentés | |
|-----------------|-------|
| FHHHH | HFFFF |
| HFFFF | FHHHF |
| HFFHH | FHHFF |

8.2.2 Prédictions expérimentales

En mesurant les temps de réponse, nous nous attendons à trouver une représentation de la stabilité de l'attracteur catégoriel. Plus la stabilité est forte et meilleurs seront les temps de réponse dans la situation sans changement. De sorte que, pour être conforme au modèle théorique, les courbes des temps de réponse devront avoir une forme opposée à celle de la loi de stabilité de l'attracteur. Par ailleurs, pour n'avoir que l'effet de l'attracteur sur la réponse, nous feront la différence entre la condition sans changement, où l'attracteur se manifeste, et la condition avec changement où l'attracteur ne joue pas de rôle facilitateur. D'une manière générale, dans la condition avec changement, les temps de réponse seront globalement plus importants que dans la condition sans changement puisque la réponse ne bénéficie pas de l'effet de facilitation due à la stabilité de l'attracteur. En outre, le changement de catégorie qui correspond à une transition de phase doit ici aussi engendrer un effet de ralentissement critique qui aura un effet perturbateur sur la tâche de catégorisation.

8.2.3 Résultats

Nous recueillons les réponses et les temps de réponse. Les sujets dont le taux d'erreur est supérieur à 5% sont éliminés de l'ensemble des données traitées. De même, les temps de

réponse qui dépassent la moyenne du participant de deux écarts-types sont remplacés par la moyenne du participant sur la condition. Les données sont classées en fonction des trois variables : taille du groupe amorce, durée du délai inter-essais et changement. Les données des cas excédentaires⁵² sont sélectionnées aléatoirement pour composer des groupes de données de même taille que ceux des conditions avec groupe amorce de trois images. L'ensemble des résultats est synthétisé dans le tableau 15.

Tableau 15 : Moyennes des temps de réponse en fonction des variables taille amorce, changement et délai inter-essais

| Moyenne en fonction de la taille d'amorce, du changement et du délai inter-essais | | | | | |
|---|------------|-----|------------|------------|------|
| Taille amorce | Changement | 200 | 400 | 700 | 1000 |
| 1 | Avec | 433 | 432 | 429 | 437 |
| 1 | Sans | 434 | 410 | 425 | 431 |
| 2 | Avec | 473 | 464 | 426 | 424 |
| 2 | Sans | 474 | 428 | 410 | 421 |
| 3 | Avec | 443 | 440 | 442 | 437 |
| 3 | Sans | 421 | 384 | 381 | 387 |

Condition 1 : Taille du groupe amorce 'une image'

La figure 54 représente les temps de réponse moyens pour la condition 'taille amorce 1' (TA1). La courbe bleue représente les données obtenues avec changement et la courbe rouge les données obtenues sans changement. Les valeurs des temps de réponse ne sont données qu'à titre indicatif, les prédictions ne portant que sur l'évolution des temps de réponse. On peut d'ores et déjà remarquer que la courbe en condition sans changement a une allure conforme à la prédiction théorique faite. Pour la condition TA1 comme pour les suivantes, nous avons effectué une ANOVA à mesures répétées avec le facteur *ITI* (200, 400, 700 et 1000) et le facteur *changement* (avec et sans) comme variable intra-sujets et le facteur *essai* comme variable aléatoire. L'analyse de variance montre un effet principal

⁵² Les cas avec bloc d'une image ou de deux images sont plus fréquents que ceux avec trois images en amorce.

significatif du facteur *ITI* dans la condition *avec changement* ($F(3, 192) = 4.1449$, $p = 0.007$) et aucun effet de l'*ITI* dans la condition *sans changement*.

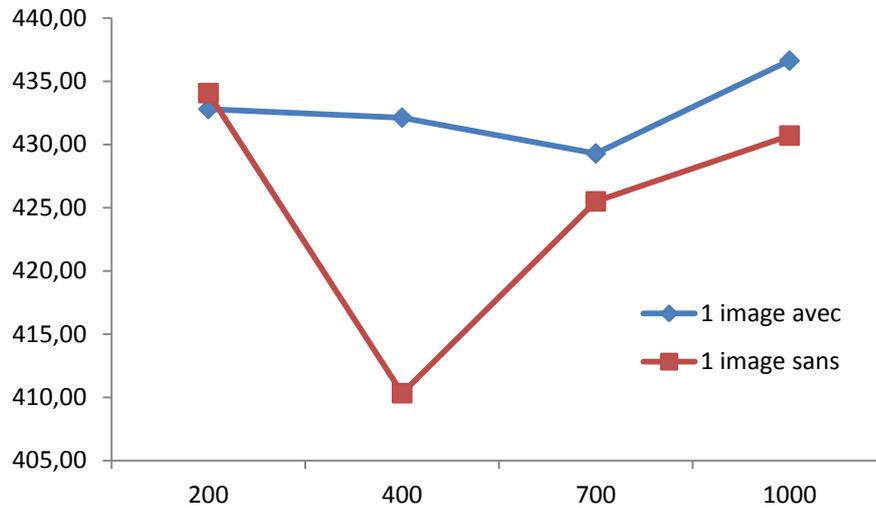


Figure 54 : Moyennes des temps de réponse avec et sans changement par valeur de l'*ITI* pour la condition une image d'amorce pour la condition 'taille amorce 1' (TA1)

Le minimum des temps de réponse pour la condition « taille du groupe amorce trois images » est atteint en situation sans changement pour un délai inter-essais de 400ms. Pour cette valeur de l'*ITI*, la différence entre les moyennes des temps de réponse pour la condition avec changement (1A400 : $M=432$ ms) et la condition sans changement (1S400 : $M=410$ ms) est significative ($t(518) = 2.37$; $p = 0.018$). De plus, les différences entre la condition 1S400 et les conditions 1S200 (434ms) et 1S700 (425ms) sont-elles aussi significatives (respectivement $F(1, 64) = 12.43$; $p < .001$ et $F(1, 64) = 4.7$; $p = 0.0338$) démontrant qu'il y a un minimum local des temps de réponse pour l'*ITI* de 400ms. L'analyse de variance ne montre aucun effet significatif de la variable *ITI* dans la condition sans changement. Le graphe des temps de réponse (figure 54) illustre ces résultats.

Condition 2 : Taille du bloc amorce 'deux images'

Les temps de réponse moyens pour la condition 'taille amorce 2' sont représentés dans la figure 55, qui présente des similarités avec la figure 54. La courbe rouge, qui représente

l'évolution des moyennes des temps de réponse en fonction de la durée de l'ITI pour la condition sans changement, montre bien un minimum comme dans la condition TA1. L'analyse de variance montre un effet significatif de l'ITI dans la condition 'avec changement' ($F(3, 192) = 30.024, p < 0.001$). En revanche, la courbe bleue, représentant la condition avec changement, n'est pas stationnaire comme dans la condition précédente, TA1. Entre les valeurs 400ms et 700ms de l'ITI, les temps de réponse chutent ($t(2078) = 21.12; p < .001$) de façon proche pour les situations avec changement et sans changement.

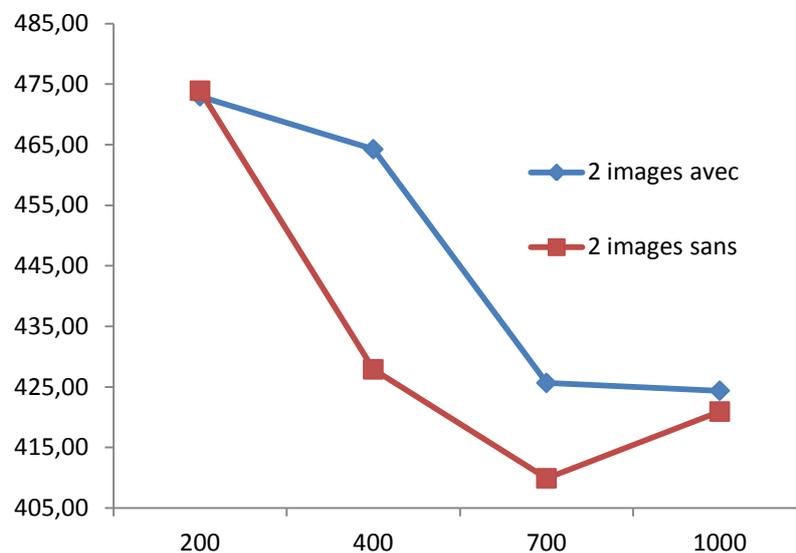


Figure 55 : Moyennes des temps de réponse avec et sans changement par valeur de l'ITI pour la condition une image d'amorce pour la condition 'taille amorce 2' (TA2)

Un effet indépendant de la variable changement qui n'illustre donc pas un effet facilitateur de l'attracteur catégoriel. Il semblerait que, dans la condition de bloc amorce de deux images, un effet se produise entre 400ms et 700ms. Cette amélioration des temps de réponse non attendue, dans la condition avec changement, se produit probablement aussi en condition sans changement et se superpose à celui de l'attracteur. Une telle superposition d'effet justifie le choix de considérer la différence entre les temps de réponse avec changement et sans changement pour faire apparaître uniquement l'effet facilitateur de l'attracteur sur les performances. Ce que nous ferons plus bas. Toutefois, l'étude des

contrastes confirme que 2A700 est le minimum de la fonction avec une différence significative vis-à-vis de 2A400 et 2A1000 ($F(1, 64) = 6.32 ; p = 0.0144$).

Condition 3 : Taille du bloc amorce 'trois images'

La figure 56 représente les temps de réponse moyens pour la condition 'taille amorce 3'. Cette fois encore, la courbe des temps de réponse pour la condition sans changement semble bien illustrer les différents moments de l'évolution de la stabilité de l'attracteur catégoriel avec un minima des temps de réponse pour un ITI de 700ms. L'analyse de variance montre un effet significatif de l'ITI dans la condition 'avec changement' ($F(3, 192) = 6.3384 ; p < 0.001$). Nous ne retrouvons pas dans la condition TA3 l'effet observé en condition TA2 sur les temps de réponse pour la condition avec changement pour laquelle l'ITI n'a aucun effet significatif. Ce qui semble indiquer que l'effet observé en condition 'taille amorce 2' est un effet qualitatif propre à la taille du bloc. Une taille de bloc amorce de deux images semble induire une certaine attente de changement qui facilite les temps de réponse dans ce cas précis. Cette fois encore, la courbe des temps de réponse (figure 56) pour la condition sans changement semble bien illustrer les différents moments de l'évolution de la stabilité de l'attracteur catégoriel avec un minima des temps de réponse pour un ITI de 700ms. Toutefois, du fait de l'évolution de la forme de la courbe et de son aplatissement, les différences entre les temps de réponse 3A700 et 3A400 et entre les temps de réponse 3A700 et 3A1000, ne sont pas significatives. En revanche, les contrastes entre les temps de réponse en 3A200 et ceux du groupe 3A400-1000 montrent bien une différence significative ($F(1, 64) = 14.313 ; p < .001$). Ce qui permet d'affirmer qu'il y a bien une amélioration notable des temps de réponse au-delà de l'ITI 200ms pour la condition 'avec changement'.

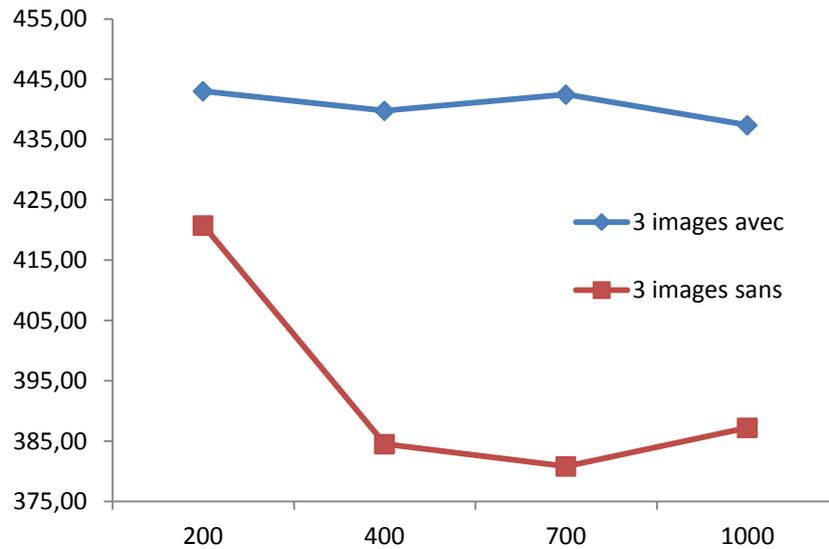


Figure 56 : Moyennes des temps de réponse avec et sans changement par valeur de l'ITI pour la condition une image d'amorce pour la condition 'taille amorce 3' (TA3)

8.2.4 Effet de la stabilité de l'attracteur catégoriel sur les temps de réponse

Les différences entre les moyennes des temps de réponse avec changement et sans changement en fonction de la taille de l'amorce et du délai inter-essais sont calculées et représentées sur la figure 57. Une forte valeur sur la courbe représente une faible différence entre les situations avec et sans changement. Un premier regard sur les courbes montre que le gain obtenu est similaire à celui que nous attendions. La loi d'évolution de la stabilité de l'attracteur catégoriel proposée plus haut mentionne une phase d'ascension que nous pouvons voir ici représentée par une phase d'amélioration des performances sur les courbes de différentiel. Puis, la stabilité atteint un maximum relatif à la structure de l'attracteur et aux renforcements dont il a été l'objet, ce qui se traduit par un minimum sur les courbes de gain. Ensuite, avec l'augmentation de l'ITI, la stabilité décline asymptotiquement.

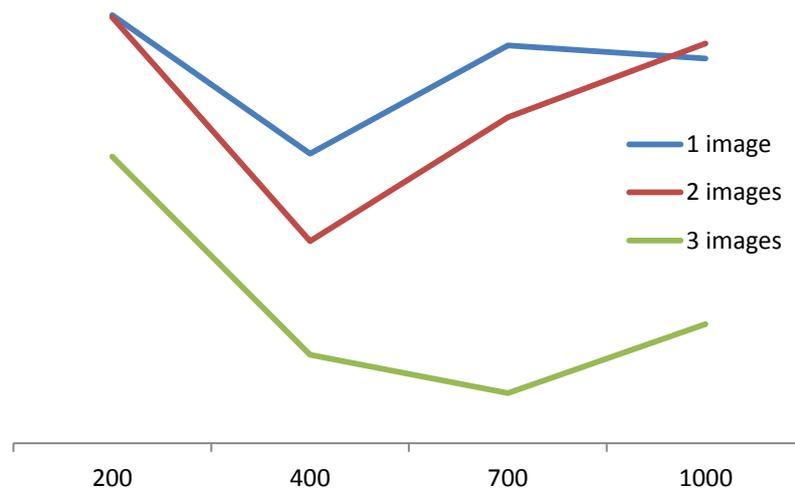


Figure 57: Différentiel des moyennes des temps de réponse en conditions *avec* et *sans* changement de catégorie pour les conditions TA1, TA2 et TA3 en fonction de la durée de l'ITI (en ms)

La position relative des trois courbes confirme la prédiction que plus l'attracteur catégoriel est renforcé, plus son maximum de stabilité est important. Ce qui se traduit aussi, par ailleurs, par des phases d'ascension et de déclin plus longues. Pour la condition avec une image, la plage temporelle de variation de l'ITI est suffisante pour montrer l'intégralité du cycle de stabilité de l'attracteur catégoriel. Le maximum de stabilité est atteint aux environs des 400ms et la phase de déclin asymptotique semble s'achever approximativement à 700ms. Pour la condition avec deux images, le maximum de stabilité semble être atteint lui aussi pour un ITI de 400ms⁵³ tandis que la phase de déclin se poursuit jusqu'à 1000ms. Une des raisons pour laquelle les deux maxima de stabilité, en condition une et deux images, sont identiques, est probablement due à un défaut de sensibilité de l'expérimentation. Des valeurs intermédiaires d'ITI autour de 400ms auraient sans doute permis une discrimination. La condition avec trois images montre de fortes différences avec les deux conditions précédentes. Le minima semble être atteint pour un ITI de 700ms et la plage de variation de l'ITI n'est pas assez étendue pour représenter entièrement la phase asymptotique de déclin

⁵³ Avant le calcul de la différence entre les conditions avec et sans changement, le minimum de la courbe des temps de réponse pour la condition sans changement était obtenu pour l'ITI de 700ms.

de la stabilité. Par ailleurs, on peut remarquer que dès 200ms d'ITI, il y a déjà un effet facilitateur qui n'apparaît pas pour les deux autres conditions.

8.2.5 Discussion

L'hypothèse principale défendue dans cette section concerne l'évolution de la stabilité de l'attracteur catégoriel. Il est posé qu'un attracteur est une entité conceptuelle mais traduisant un ensemble de phénomènes empiriques ainsi que leurs relations et, en particulier, qu'il est caractérisé par sa stabilité. Nous avons pris le parti de penser qu'une catégorie était un objet dynamique et, donc, que sa stabilité ne pouvait pas être appréhendée comme une caractéristique propre et immuable, mais comme une dimension relative au système lui-même. En manipulant le délai inter-essais et la taille du bloc relatif au nombre de présentations congruentes successives, nous avons fait varier la stabilité de l'attracteur catégoriel. Cette variation de stabilité est illustrée au travers de la variation des performances. Une forte stabilité pour un attracteur congruent engendre une meilleure performance des temps de catégorisation comparé aux temps de catégorisation où l'attracteur n'est pas congruent. Les courbes de différentiels des temps de réponse montrent toutes trois phases distinctes. Une première phase pendant laquelle les temps de réponse diminuent puis se stabilisent. La période de diminution est d'autant plus importante et le minimum des temps de réponse est d'autant plus bas, que la stabilité induite par le nombre de présentations est grande, c'est-à-dire, que le potentiel de stabilité de l'attracteur catégoriel est grand. Puis, une première phase de déclin exponentiel où les temps de réponse croissent de plus en plus vite. Et enfin, au-delà d'un certain seuil lui aussi fonction du potentiel de stabilité de l'attracteur catégoriel, la phase de déclin devient asymptotique et on peut imaginer que la stabilité devient nulle au bout d'un temps relativement long. Certaines hypothèses peuvent être formulées directement à partir de ces résultats. Par

exemple, le fait qu'une phase d'ascension soit nécessaire pour que l'attracteur atteigne son potentiel maximal nous éclaire en particulier sur le phénomène de cécité à la répétition lors de présentation visuelle sérielle rapide (Kanwisher, 1987). En effet, la présentation rapide de deux *stimuli* identiques, en deçà de la fin du processus de relaxation, n'engendre pas de nouveau processus de relaxation tant que le premier n'est pas achevé étant donné que la re-présentation du même stimulus n'est pas une cause de perturbation pour le système, ce qui explique que le nouveau stimulus n'est pas perçu comme une re-présentation de l'ancien.

DISCUSSION GENERALE

Cette thèse défend l'idée que la catégorisation perceptive et le changement catégoriel peuvent être expliqués selon la théorie des systèmes dynamiques et, en particulier, par le modèle de la fonce issue de la théorie des catastrophes. Ce modèle détermine un certain nombre de prédictions expérimentales dont la plupart ont été confrontées aux résultats d'une tâche de choix forcé à deux modalités.

Dans la première série d'expérimentations, nous avons montré que le changement catégoriel présentait toutes les caractéristiques d'une transition de phase. Dans un premier temps, en étudiant le moment où le changement de catégorie se produisait dans des séries de *stimuli* évoluant progressivement d'une catégorie à l'autre, nous avons pu mettre en évidence les phénomènes de bistabilité et d'hystérèse, ainsi que celui de ralentissement critique. Tous trois sont des phénomènes prédits par la théorie des catastrophes, les deux premiers étant visualisables dans l'espace tridimensionnel du modèle de la fonce. Dans un second temps, nous nous sommes attachés à mettre en évidence le phénomène de divergence que nous avons opérationnalisé par une variation dans la taille de l'effet d'hystérèse. Définition opérationnelle que nous avons déduite graphiquement du modèle de la fonce. Plusieurs paramètres ont été manipulés afin de produire le phénomène de divergence. Le premier d'entre eux fut le délai inter-essais (ITI) que nous avons progressivement augmenté en attendant une diminution de la taille de l'effet d'hystérèse. Les résultats ont permis de valider cette prédiction et nous en avons tiré la conclusion que, la stabilité de l'attracteur catégoriel étant la principale cause de divergence, l'ITI avait un impact sur la stabilité, et donc, que cette dernière évoluait naturellement et avait tendance à décliner avec le temps.

Puis, nous nous sommes intéressés à différents facteurs qualitatifs de divergence. Ainsi, une activité distractive sans rapport avec la tâche de catégorisation provoque une chute de stabilité supérieure à celle qui se produit naturellement pendant le même délai. Ce qui nous permet d'affirmer que le maintien de la stabilité ainsi que son déclin naturel avec le temps sont directement liés à l'activité du système. Élément que nous avons pu montrer en comparant les résultats des expérimentations I.3 et II.1 car l'effet d'hystérèse obtenu en II.1 était moindre que celui obtenu en I.3. Toutefois, le temps ne serait pas en soi une cause de déclin de la stabilité.

En effet, comme nous venons de le préciser, le déclin dépend finalement de l'activité du système et nous avons supposé qu'une activité qui entretiendrait un rapport avec la tâche de catégorisation ou son produit, aurait pour conséquence d'améliorer la stabilité de l'attracteur catégoriel. Ce que nous avons pu montrer dans l'expérimentation II.2 en intercalant une tâche d'évaluation de la certitude sur la réponse catégorielle. Afin de répondre à cette tâche, le système maintient l'activité correspondant à l'attracteur catégoriel et étend son domaine dans l'espace des phases, ce qui a pour conséquence de produire un attracteur plus stable encore qu'à l'issue de la réponse à la tâche de catégorisation. Les résultats ont montré que la taille de l'effet d'hystérèse était supérieure à celle obtenue dans l'expérimentation I.3 où le délai inter-essais était de 900ms, c'est-à-dire approximativement la durée moyenne pour répondre à la tâche de certitude, mais, en outre, la taille de l'effet d'hystérèse était aussi supérieure à celle obtenue dans l'expérimentation 1.1 où le délai inter-essais n'était que de 200ms. Un résultat qui laisse penser en fin de compte que le temps n'est pas en soi un facteur de déclin, mais qu'il est à mettre en rapport avec la nature de l'activité du système.

Enfin, en ce qui concerne les facteurs de divergence, nous avons montré que le bruit externe était aussi une cause de divergence et d'augmentation de la stabilité, contrairement au bruit interne. Ainsi, nous avons injecté du bruit dans les stimuli en rendant les images floues et nous avons montré que, une fois de plus, la taille de l'effet d'hystérèse augmentait comme un témoignage de l'augmentation de la stabilité de l'attracteur catégoriel. En effet, des images plus floues sont des contraintes moins importantes sur le système car la résolution d'une perturbation dans un contexte contraint engendre une plus grande instabilité résiduelle. Nous avons ainsi pu observer que la réalisation du processus de relaxation est globalement plus longue, mais la stabilité résultante est meilleure car ce processus met en relation un nombre plus important de degrés de liberté. Dans le cas contraire, ces degrés de liberté auraient été supprimés par la contrainte environnementale provoquant ainsi une augmentation de l'instabilité et, par conséquent, une diminution de la stabilité de l'attracteur catégoriel ainsi que de la taille de l'effet d'hystérèse.

Dans la troisième et dernière section expérimentale, nous avons présenté un modèle de la loi d'évolution de la stabilité d'un attracteur catégoriel en fonction du temps. Nous avons pu, notamment, mettre en évidence trois phases distinctes de cette évolution. D'abord, une phase d'ascension pendant laquelle la stabilité de l'attracteur s'accroît jusqu'à atteindre une valeur maximale. Ensuite, une phase de déclin rapide pendant laquelle la stabilité suit une loi de déclin exponentielle. Et enfin, une phase de déclin asymptotique. Nous avons formulé l'hypothèse que la stabilité de l'attracteur catégoriel évoluerait naturellement en fonction du délai précédant une sollicitation ultérieure, comme nous avons pu le montrer dans la première série d'expérimentations où nous avons manipulé le délai inter-essais. Ainsi, en dessous d'un certain seuil, le délai n'est pas suffisant pour que l'attracteur atteigne une stabilité maximale. En revanche, une fois ce seuil atteint, la stabilité

de l'attracteur ne peut que décroître en l'absence de renforcement et du fait de l'activité globale du système. Ce que nous avons pu observer au travers de l'augmentation progressive des temps de réaction. Ces derniers témoignent de l'influence de la stabilité de l'attracteur catégoriel sur les essais ultérieurs. Ainsi, une catégorisation est facilitée, et donc plus rapide, par la stabilité de l'attracteur catégoriel correspondant. Par ailleurs, nous avons émis l'hypothèse selon laquelle la loi d'évolution devait aussi dépendre du potentiel maximal de stabilité de l'attracteur et que ce potentiel maximal pouvait être renforcé par la répétition. C'est pourquoi, plus le nombre de catégorisations congruentes entre elles et avec l'élément cible est important, plus le potentiel maximal de l'attracteur augmente. Nous avons pu observer que cet effet apparaissait dans les temps de réaction qui étaient globalement meilleurs lorsque la taille des blocs augmentait. Mais, de plus, nous avons pu mettre en évidence une interaction entre le délai inter-essais et la taille des blocs. Plus la taille d'un bloc est importante, plus le potentiel de stabilité de l'attracteur est grand, et plus le délai nécessaire pour l'atteindre augmente. Ainsi, le délai inter-essais nécessaire pour atteindre la stabilité maximale, c'est-à-dire, celle qui engendre les meilleures performances, pour les blocs de petites tailles, est inférieur à celui nécessaire pour les blocs de grandes tailles. Un attracteur atteint son potentiel de stabilité maximal d'autant plus tard que celui-ci est important.

En définitive, ces résultats soutiennent l'hypothèse selon laquelle une catégorie est instanciée par un attracteur dans le système cognitif. Le changement de catégorie présente les caractéristiques d'une transition de phase, tandis que les catégories elles-mêmes sont dotées d'une dimension relative à la stabilité d'un attracteur au sein d'un système dynamique. En particulier, le principe d'ascension et de déclin de la stabilité apparaît à la fois dans la première et la troisième section expérimentale, respectivement sous la forme d'un

effet de divergence qui se traduit par une augmentation de la taille de l'effet d'hystérèse, et sous la forme d'une amélioration des performances comme une conséquence de l'augmentation de la stabilité de l'attracteur catégoriel associé à la réponse donnée. L'ensemble de ces observations prend tout son sens lorsque nous adoptons une approche dynamique de la cognition.

CONCLUSION

Les catégories peuplent notre univers perceptif. Mais au-delà de ce fait, une question légitime est : « D'où proviennent-elles ? ». Face à cette interrogation, un réalisme matérialiste confortable nous encourage à croire que l'univers est rempli d'objets dotés d'une nature universelle car indépendante de l'observateur. Mais, c'est donner une réponse ontologique à une question ontogénétique. De plus, c'est oublier que cette nature tire sa légitimité d'un consensus qui conduit à définir les catégories selon leurs finalités, laissant seulement croire qu'une telle finalité préexiste à l'observation. Or, si le sens naît du consensus, celui-ci masque l'absence totale de finalité *a priori*. Alors, on peut se demander ce que pourrait être une catégorie qui ne soit pas le produit de ce consensus. La science moderne positiviste nous enseigne que toute chose est issue des transformations d'une ou plusieurs autres et, ainsi, que toute chose se définit relativement à un ensemble d'autres choses, cette réduction allant à l'infini. Elle énonce ce fait mais ne nous dit pas comment penser globalement avec une perspective qui conduit à un finalisme nihiliste. Car, en somme, chaque chose n'est qu'un épiphénomène d'un autre épiphénomène. Toutefois, l'apparence paradoxale de cette affirmation ne prouve au mieux que les limites de notre capacité à appréhender la nature dynamique de notre univers. Doit-on rejeter cette affirmation car elle semble vouée à nous enfermer dans un cercle sémantique infernal ?

Ce que nous pouvons en comprendre, c'est qu'une chose n'est que parce qu'elle est le produit d'une interaction. Ainsi, toute catégorie, nonobstant ses déterminants finaux qui relèvent de leur rôle adaptatif, est issue d'une dynamique d'interactions entre différentes parties elles-mêmes issues d'autres interactions. Toutefois, l'enchaînement n'est pas conçu linéairement comme une succession de causes et d'effets, mais comme un ensemble de

rétroactions dans un système complexe. Comme nous constatons l'existence des catégories, nous en déduisons qu'un appareil les a causé. Mais, lorsque nous percevons du sens là où nous savons qu'il n'y en a pas *a priori*, c'est-à-dire, lorsque nous produisons le sens à partir de rien, quel est donc l'appareil à incriminer ?

Le système cognitif est une machine à produire du sens. Le sens produit est une contrainte comportementale qui confère une finalité à cette fonction. Et, l'unique moyen pour que cette fonction soit adaptative, c'est que la production de sens soit couplée avec le comportement dont elle est le contexte. Tout comportement devient ainsi la conséquence d'une interaction entre une fonction qui produit le sens et une fonction qui agit. Un tel couplage est l'élément fondamental d'un système dynamique. Mais une conséquence n'a rien d'une finalité. Il est donc inutile de chercher dans l'action la justification d'une causalité linéaire. C'est parce que l'action est couplée avec la fonction qui produit le sens, qu'elle est produite par elle et qu'elle la produit en retour. Ce postulat est en rupture totale avec la pensée positive analytique. Cette façon de concevoir les observables scientifiques est par ailleurs plutôt bien assumée par l'approche systémique dotée de cet outil qu'est la dynamique non linéaire. Mais, serait-ce dû à une technicité mathématique trop dense de cet outil, les conséquences épistémologiques évoquées ci-dessus nous semblent souvent laissées de côté lors des applications.

Alors, en ce qui nous concerne, si nous écartons l'aspect technique pour nous focaliser sur les conséquences épistémologiques, qu'en ressort-il ? Un système dynamique est un ensemble d'éléments en interaction. Il est formé et défini par ces éléments et les interactions qu'ils admettent dans l'espace de définition du système. Chose paradoxale, cette définition est issue la nature non-prédéfinie de l'espace des phases du système. Cet espace qui souvent occupe les esprits alors qu'il n'est que la conséquence de l'observation

de la dynamique du système. Il en va de même pour la dimension qui rythme cette dynamique, à savoir le temps. Sans observateur, il n'y a ni espace, ni temps. Sans espace et sans temps, il n'y a pas d'observation. Le système lui-même ne doit son existence qu'aux choix qu'a faits l'observateur. Mais, il ne faut voir en l'observateur rien de plus qu'un autre système capable de percevoir, c'est-à-dire, de créer des catégories relativement distinctes à partir d'un monde essentiellement continu. Or, c'est une chose commune entre deux systèmes dynamiques couplés qui s'informent mutuellement. Mais la propriété la plus importante d'un système dynamique autonome est qu'il n'est mû que par le changement vers l'équilibre. La finalité de l'ontogénèse du système devient sa propre ontogénèse. Dans la définition même de l'équilibre se cache pourtant une certaine tautologie. Si un état d'équilibre existe et si le système l'atteint, alors, par définition, il ne s'en éloignera pas spontanément. Ainsi, si le système évolue vers l'équilibre, sa stabilité ne fait qu'augmenter. Or, si un système évolue de façon spontanée, comment pourrait-il évoluer vers un état moins stable ? L'augmentation irrépressible de la stabilité du système le conduit irrémédiablement vers l'état d'équilibre. Encore faut-il que cet état soit accessible. Dans le cas contraire, l'évolution spontanée s'interrompt dans l'état le plus stable possible et c'est précisément ce que nous avons pu observer au travers du phénomène d'hystérèse : le système semble tenir compte du coût que le passage d'un état à un autre peut avoir et privilégie souvent l'état actuel au détriment de la stabilité.

Tout au long de cette thèse, nous avons soutenu l'idée que la théorie des systèmes dynamiques non linéaires offrait une meilleure compréhension, en apportant des solutions de modélisation innovantes, pour les processus cognitifs. Une telle approche constitue ainsi une alternative parcimonieuse aux approches fondées sur la théorie du traitement de l'information. En particulier, nous avons avancé que le phénomène de catégorisation

perceptive pouvait être étudié au travers de la dynamique d'une transition de phase dans le cadre du changement catégoriel. Dans ce contexte, les catégories perceptives sont assimilables à des attracteurs. Nous nous sommes attachés, dans un premier temps, à montrer que le changement catégoriel possédait les mêmes propriétés que celles de la catastrophe de la fronce. Ces propriétés, autrement appelées marqueurs de catastrophe, ont été mises en évidence dans six situations expérimentales dérivées d'une tâche de choix catégoriel forcé à deux modalités.

Ainsi, nous avons pu montrer les phénomènes d'hystérèse, de ralentissement critique et de divergence, en situation de bistabilité, qui sont tous une conséquence de la présence de deux attracteurs de stabilité variable au sein de l'espace des phases d'un système dynamique. Une attention particulière a été accordée à la définition et à la méthode de mesure de l'effet d'hystérèse. Effet que nous avons décrit, non pas comme une caractéristique propre au système, mais comme un type de comportement engendré par la situation d'évolution progressive d'un paramètre de contrôle, en d'autres termes un phénomène expérimental. C'est pourquoi nous avons discuté les différentes approches de mesure de l'hystérèse proposées dans la littérature en les rapprochant de la définition qui en était faite, en particulier dans les travaux de Tuller *et al.* (1994) et de Hock *et al.* (1993). Ces auteurs utilisent une approche synergétique plutôt qu'une approche catastrophique. En ce qui nous concerne, de ces deux approches notre choix s'est porté sur une modélisation catastrophique plus complète du point de vue des prédictions. Grâce au modèle de la fronce, nous avons pu explorer les phénomènes de divergence et de ralentissement critique, peu développés en synergétique jusqu'à présent. Par ailleurs, la théorie des catastrophes apporte une meilleure intégration de l'ensemble des phénomènes au sein d'un même modèle mathématique. Toutefois, les différences entre théorie des catastrophes et théorie

synergétique n'en font pas deux méthodes à opposer et, malgré les éléments que nous avons mis en exergue, ces deux approches se fondent pleinement dans la théorie des systèmes dynamiques. C'est pourquoi, nous n'avons pas cherché à mettre l'accent sur une méthode plutôt que l'autre, mais nous avons choisi la plus adaptée à nos objectifs.

Généralisation

Ce travail nous a permis d'affiner la définition et la méthodologie de mesure que nous avons utilisées tout au long de la partie expérimentale. Parallèlement, nous avons établi le principe de déclin naturel des attracteurs catégoriels au sein du système cognitif. Ceci nous a amené à formuler l'hypothèse chronométrique de divergence selon laquelle, avec le temps, la stabilité d'un attracteur catégoriel décline naturellement du fait que le système n'est jamais figé. Un déclin qui s'observe par une diminution de la taille de l'effet d'hystérèse qui est une manifestation de la divergence telle que perçue dans le modèle de la fronce. Cette contingence d'observations nous conforte dans l'idée que le changement de catégories perceptives se constitue comme une transition de phase ainsi qu'elle se définit, par exemple, en physique, mais, d'une manière générale, au sein d'un système dynamique.

Puisque nous venons de montrer que la catégorisation perceptive peut être modélisée par l'approche dynamique, pouvons-nous pour autant prétendre que cette approche est plus vraisemblable que les approches traditionnelles fondées sur le traitement de l'information ?

La vraisemblance de l'approche que nous proposons ici réside dans l'idée que les catégories ne préexistent pas à l'activité de catégorisation, ce qui constitue une position à la fois plus parcimonieuse et plus puissante tant d'un point de vue explicatif que prédictif.

Ainsi, l'attracteur n'est pas un mot qui remplace celui de catégorie mais un objet théorique qui implique un grand nombre de contraintes et fournit certaines informations sur la nature du processus de catégorisation : en particulier, le fait que ce qui est vu comme une catégorie n'est pas une représentation figée, mais est un élément dynamique en constante évolution. Ce dernier n'est pas la cause de processus cognitifs sous-jacent, mais leur conséquence.

La catégorisation naît du besoin de produire des réponses simples et adaptées à des situations nouvelles. La naissance d'une nouvelle catégorie sur la base d'une ancienne, repose sur la nécessité de produire une réponse plus spécifique à une évolution particulière de l'environnement. Or, la perception n'est pas une contemplation passive du monde mais une organisation qui émerge des interactions entre l'agent cognitif et l'environnement dans lequel il est intégré. C'est pourquoi, les catégories évoluent à la fois comme une conséquence du changement dans l'environnement mais aussi comme l'expression de la nature dynamique du système dans lequel le processus a lieu.

Nos travaux s'appuient essentiellement sur un ensemble de phénomènes qui ne peuvent être étudiés que dans des conditions expérimentales particulières. Par exemple, l'hystérèse nécessite un paradigme de présentation progressive pour être mise en évidence car elle témoigne d'un effet à court terme. Selon nos conclusions, si l'hystérèse est la conséquence d'un effet de résistance au changement dû à la stabilité des attracteurs, nous devrions pouvoir observer les effets de cette stabilité dans de nombreuses situations à évolution progressive. Bien entendu, dans la vie de tous les jours, cette progression est le plus souvent lente. Or, l'effet d'hystérèse est à mettre en rapport avec l'échelle temporelle de l'évolution des processus et de la dimension sous-jacente des attracteurs considérés et donc le délai dans lequel il peut être rapporté en dépend. Dans notre situation, l'échelle de

temps des processus est très courte et par conséquent l'hystérèse ne peut être observée qu'à court terme. Les temps de réaction constituent alors un indicateur dont l'échelle temporelle est adaptée à celle des processus impliqués dans notre étude. De plus, nous avons montré qu'en compliquant le contexte de la tâche et en induisant une activité relative à la catégorie mais qualitativement différente, nous pouvions étendre l'attracteur au-delà des dimensions de la tâche de catégorisation, et produire un effet d'hystérèse plus important sur une échelle de temps plus large. Ce que nous avons fait par le biais de la tâche d'auto-évaluation de certitude. Nous pouvons alors supposer qu'une tâche, impliquant des processus plus étendus opérants à des échelles de temps plus importantes, permette de mettre en évidence le même phénomène pourvu que ces processus soient mesurés au travers des indicateurs adéquats. Ainsi, sur une échelle de temps beaucoup plus grande que celle que nous avons utilisée, nous pourrions, par exemple, imaginer des phénomènes similaires en mesurant le rapport entre la luminosité ambiante et le moment où l'on allume les phares de nos voitures. Imaginons une personne qui effectue chaque soir le même trajet en quittant son travail pour rentrer chez elle. Supposons que ce trajet nécessite que les phares soient allumés en hiver mais pas en été. Maintenant, observons quel jour de l'année cette personne va commencer à allumer ses phares lors du passage du solstice d'été à celui d'hiver et mesurons la luminosité ambiante. Effectuons la même observation dans le sens du passage du solstice d'hiver au solstice d'été. Alors, nous serions en droit d'attendre que la luminosité mesurée pour le passage de l'été à l'hiver soit inférieure à la luminosité mesurée pour le passage de l'hiver à l'été. Une prédiction expérimentale qui correspondrait à un effet d'hystérèse.

Cela dit, la généralisation ne se limite pas à différentes échelles de temps des processus. Nous pouvons aussi l'étendre à différentes tâches de catégorisation tel que nous

l'avons présenté au chapitre six. Par exemple, Hock *et al.* (1993) montrent une hystérèse dans la perception du mouvement du quartet tandis que Raczaszek *et al.* (1999) mettent en évidence l'effet d'hystérèse dans une tâche de catégorisation du sens d'une phrase. Dans ce domaine aussi nous pourrions imaginer un certain nombre de situations permettant de tester les mêmes hypothèses dans des conditions qualitativement différentes.

Conséquences et apports.

Un élément paradigmatique fondamental de cette recherche est l'étude de la nature des changements au sein du système cognitif ainsi que de ses propriétés. En mettant en évidence un ensemble de phénomènes conjoints, relatifs au changement, qui ne peuvent être expliqués ou prédits en dehors de la dynamique non linéaire, nous faisons la démonstration de la validité théorique de l'approche dynamique dans le cadre de la catégorisation perceptive. Une telle approche qui fait l'économie du postulat du traitement de l'information pour expliquer les performances cognitives est un bond épistémologique et théorique considérable, qui implique de reconsidérer un grand nombre de présupposés sur les objets et les fonctions cognitives. Quel peut être, par exemple, le statut de la mémoire dans un système dynamique où rien n'est stocké mais où chaque événement marque durablement la trajectoire du système dans son espace de phase et est à même d'influencer le comportement du système à l'avenir ? Peut-elle être différenciée de la perception ? A nos yeux, la mémoire ne peut plus être considérée comme une structure incarnée ou une fonction spécifique réalisée par une partie du système dans le but de servir un objectif, mais plutôt comme une performance globale observée au travers du comportement du système tout entier et comme conséquence de la nature dynamique de ce système. De plus, du point de vue systémique, la disjonction entre perception et mémoire est artificielle et ne sert que des fins explicatives dans le cadre d'une perspective fonctionnaliste de la cognition. Un point

de vue holistique préserve la nature complexe du système étudié et interdit cette disjonction.

Toujours est-il, en ce qui concerne les changements cognitifs, que l'un des précurseurs les plus importants est l'augmentation de l'instabilité du système que nous avons observée au travers de l'évolution des temps de réponse. Mais un tel indicateur n'est pas exploitable dans toutes les situations, comme nous l'avons déjà exprimé. Car l'instabilité se manifeste notamment par l'augmentation de la variabilité dans la vitesse d'exécution d'une réponse dans le contexte de changement de modalité de cette dernière. Et, en particulier, pour des échelles de temps relativement importantes où la variabilité est naturellement grande indépendamment de l'instabilité. Cette dernière ne peut être observée au travers des temps de réponse qui ne constituent alors plus un indicateur suffisamment sensible. Mais si la dynamique non linéaire peut prétendre à l'explication générale des situations de changement cognitif, des facteurs spécifiques pour chacune de ces situations devraient rendre compte de l'augmentation de cette variabilité. Toute la difficulté réside dans la façon de les opérationnaliser afin de les rendre observables. A titre d'exemple, nous pourrions proposer de considérer, non pas la variabilité des temps de réponse, mais celle des réponses elles-mêmes. Mais cet indicateur implique une situation expérimentale suffisamment sensible dans laquelle cette variabilité puisse se manifester.

Limites et perspectives

Comme dans toute recherche scientifique, nous sommes en droit de nous demander dans quelle mesure les résultats observés, et les conclusions que nous en tirons, sont indépendants des méthodes de recueil utilisées et, en particulier, des méthodes d'analyse. Dans notre cas, nous avons privilégié une méthode semi-quantitative sans ignorer qu'il en existe d'autres. Notre choix était fondé sur le souci de prendre en compte la difficulté de

modéliser, en particulier, le paramètre de divergence afin d'obtenir des indicateurs en adéquation avec chacun des paramètres du modèle. De plus, une telle approche, que l'on peut qualifier d'analyse topologique, est particulièrement indispensable pour explorer de manière critique un domaine en plein développement. En outre, elle nous a semblé plus prudente qu'une approche quantitative. Rappelons que nous avons déjà abordé la question de la technique de Cobb (1981), améliorée par Hartleman (1997), permettant algorithmiquement de déterminer l'équation de la fronce qui correspond aux données empiriques grâce au maximum de vraisemblance. Cependant, comme nous l'avons fait remarquer, cette technique, outre qu'elle nécessite une quantité d'observations plus conséquente, pose le problème de l'interaction non linéaire des effets entre la variable normale et la variable de divergence. Le cas idéal étant que les deux variables soient totalement indépendantes pour former un repère orthogonal. C'est donc la question de la confiance envers les paramètres manipulés qui limite l'utilisation de cette technique. A la lumière de nos résultats, nous pouvons envisager d'appliquer cette technique dans le contexte de notre étude. Nous ne nous attendons pas à ce que cette analyse contredise nos conclusions générales, ni ne fournisse d'éléments qualitativement nouveaux, en revanche, elle apporterait une description plus fine du modèle de référence en renforçant nos hypothèses.

Pour terminer, nous voudrions insister sur un point qui concerne la forme de notre démarche et qui a consisté à mettre en contraste les approches fondées sur la théorie du traitement de l'information et celle des systèmes dynamiques. Pour nous, le fond du problème n'est pas que ces deux approches s'excluent mutuellement en se contredisant. Car même si elles peuvent se disputer sur le *pourquoi*, c'est-à-dire sur la forme des processus qui causent les comportements observables, elles sont définies pour répondre à des questions

radicalement différentes. Ainsi, quand la démarche cognitiviste s'intéresse à la forme, c'est-à-dire à répondre à la question « *Quoi ?* » dans le but de mieux connaître le comportement humain, ce qui est typiquement une considération ontologique, l'approche dynamique se fonde sur le besoin de répondre à la question « *Comment ?* » afin de mieux expliquer ce même comportement. Nous considérons qu'il existe une différence importante entre les concepts de connaissance et d'explication, que ces deux notions ne se recoupent pas et qu'elles servent une finalité différente. Comme nous l'avons soutenu tout au long de cette thèse, la connaissance est le produit d'un échange entre l'objet connu et l'être connaissant. Elle est donc toujours une description *a posteriori* et subjective. Tandis que l'explication est une démarche qui consiste à rendre intelligible les phénomènes, elle permet de comprendre mais pas de connaître. Ainsi, au-delà des contradictions que nous avons tenté de mettre en évidence pour justifier notre choix épistémologique, les deux approches restent malgré tout complémentaires, jusqu'à ce que, éventuellement, l'une des deux parvienne à évoluer suffisamment pour traiter les mêmes questions que l'autre de manière plus efficace.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abraham, F. D., Abraham, R. H., & Shaw, C. D. (1990). *A visual introduction to dynamical systems theory for psychology*. Santa Cruz: Aerial Press.
- Ackoff, R., & Emery, F. (1972). Structure, Function and Purpose. Dans R. L. Ackoff & E. F. E. (dir.), *On Purposeful Systems* (p. 13-32). Trowbridge, Wiltshire: Redwood Press Limited.
- Aihara, T., Kitajo, K., Nozaki, D., & Yamamoto, Y. (2008). Internal noise determines external stochastic resonance in visual perception. *Vision research*, 48(14), 1569-1573.
- Amit, D. J. (1989). *Modeling Brain Function*. New York: Cambridge University Press.
- Asch, S. E. (1952). Effects of group pressure on the modification and distortion of judgements. Dans G. E. Swanson, T. M. Newcomb & E. L. Hartley (dir.), *Readings in social psychology* (2^e éd., p. 2-11). New York: NY Holt.
- Ashby, W. R. (1960). *Design for a Brain: The Origin of Adaptive Behaviour*. Chapman & Hall.
- Atlan, H. (1979). *Entre le cristal et la fumée: essai sur l'organisation du vivant*. Paris: Seuil.
- Attneave, F. (1971). Multistability in perception. *Scientific American*, 225, 63-71.
- Auvray, M., & O'Regan, J. K. (2003). L'influence des facteurs sémantiques sur la cécité aux changements progressifs dans les scènes visuelles. *L'année Psychologique*, 103(1), 9-32.
- Babloyantz, A., & Lourenço, C. (1994). Computation with chaos: A paradigm for cortical activity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 91(19), 9027-9031.
- Bachelard, G. (1934). *Le nouvel esprit scientifique*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Bachelard, G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris: Vrin.
- Bartlett, F. C. (1932). *Remembering. A study in experimental and social psychology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Beer, R. D. (2000). Dynamical approaches to cognitive science. *Trends in cognitive sciences*, 4(3), 91-99.
- Bernstein, N. (1967). *The Coordination and Regulation of Movement*. Oxford: Pergamon Press.
- Bideaud, J., & Houdé, O. (1989). Le développement des catégorisations: «capture» logique ou «capture» écologique des propriétés des objets? *L'Année psychologique*, 89(1), 87-123.
- Biederman, I. (1987). Recognition-by-Components: A Theory of Human Image Understanding. *Psychological Review*, 94, 115-147.
- Biederman, I., & Bar, M. (2000). Differing views on views: Response to Hayward and Tarr. *Vision Research*, 40, 3901-3905.

- Bingham, G. P., Schmidt, R. C., & Rosenblum, L. D. (1995). Dynamics and the orientation of kinematic forms in visual event recognition. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21(6), 1473.
- Bjorklund, D. F., Thompson, B. E., & Ornstein, P. A. (1983). Developmental trends in children's typicality judgments. *Behavior Research Methods*, 15(3), 350-356.
- Bogacz, R. (2007). Optimal decision-making theories: linking neurobiology with behaviour. *Trends in cognitive sciences*, 11(3), 118-125.
- Boltzmann, L. (1877). Über die Beziehung eines allgemeinen mechanischen Satzes zum zweiten Hauptsatze der Wärmetheorie. *Wiener Berichte*, 75, 67.
- Boring, E. G. (1942). *Sensation and perception in the history of experimental psychology*. New York: Appleton-Century-Crofts.
- Braun, J., & Mattia, M. (2010). Attractors and noise: twin drivers of decisions and multistability. *Neuroimage*, 52(3), 740-751.
- Browman, C. P., & Goldstein, L. (1985). Dynamic modeling of phonetic structure. Dans V. Fromkin (dir.), *Phonetic linguistics* (p. 35-53). New York: Academic Press.
- Brown, S. C., & Craik, F. I. M. (2000). Encoding and retrieval of information. Dans E. Tulving & F. I. M. Craik (dir.), *The Oxford Handbook of Memory* (p. 93-107). New York: Oxford University Press.
- Bruce, V., & Green, P. R. (1990). *Visual Perception: Physiology, Psychology and Ecology*. Hove: Lawrence Erlbaum Associates.
- Brunel, N., & Hakim, V. (1999). Fast global oscillations in networks of integrate-and-fire neurons with low firing rates. *Neural computation*, 11(7), 1621-1671.
- Bruner, J. S. (1957). On perceptual readiness. *Psychological Review*, 64, 123-152.
- Bruner, J. S. (1973). *Beyond the information given*. New York: Norton.
- Bruner, J. S., Goodnow, J. J., & Austin, G. A. (1956). *A Study of Thinking*. New York: John Wiley & Sons.
- Bruner, J. S., Postman, L., & Rodrigues, J. (1951). Expectation and the perception of color. *The American journal of psychology*, 64(2), 216-227.
- Bullock, D., & Grossberg, S. (1988). Neural dynamics of planned arm movements: emergent invariants and speed-accuracy properties during trajectory formation. *Psychological review*, 95(1), 49.
- Bülthoff, H. H. (2007, February-12-2007). *Perception and Action in Virtual Environments*. Communication présentée The Lausanne Neuroscience Seminars, Lausanne.
- Bunge, M. (1967). *Scientific Research. Strategy and Philosophy*. Berlin, New York: Springer-Verlag.
- Bunge, M. (1968). Les concepts de modèle. *L'Age de la science*, 1(), 165-180.
- Camus, J. F. (1996). *La psychologie cognitive de l'attention*. Paris: A. Colin.
- Carson, R. G., Goodman, D., Kelso, J., & Elliott, D. (1995). Phase transitions and critical fluctuations in rhythmic coordination of ipsilateral hand and foot. *Journal of Motor Behavior*, 27(3), 211-224.

-
- Christou, C. G., Tjan, B. S., & Bühlhoff, H. H. (2003). Extrinsic cues aid shape recognition from novel viewpoints. *Journal of Vision*, 3, 183-198.
- Clayton, K., Frey, B., Sulis, W., & Combs, A. (1996). Inter-and intra-trial dynamics in memory and choice. Dans W. Sulis & A. Combs (dir.), *Nonlinear dynamics in human behavior* (p. 90-106). Singapore: World Scientific.
- Clayton, K., & Frey, B. B. (1997). Studies of mental "noise". *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences*, 1(3), 173-180.
- Cobb, L. (2007). Parameter estimation for the cusp catastrophe model. *Behavioral Science*, 26(1), 75-78.
- Cobb, L., & Watson, B. (1980). Statistical catastrophe theory: An overview. *Mathematical Modelling*, 1(4), 311-317.
- Cohen, A. H. (1992). The role of heterarchical control in the evolution of central pattern generators. *Brain, Behavior and Evolution*, 40(2-3), 112-124.
- Cohen, L. B., & Strauss, M. S. (1979). Concept acquisition in the human infant. *Child Development*, 50(2), 419-424.
- Cooney, J., & Constan, M. (1993). On determining the dimension of discontinuities in human learning and development. *Emerging themes in cognitive development*, 1, 154-191.
- Cordier, F. (1981). Catégorisation d'exemplaires et degré de typicalité: étude chez des enfants. *Cahiers de psychologie cognitive*, 1, 75-83.
- Cordier, F., & Dubois, D. (1985). Typicalité et représentation cognitive. *Cahiers de Psychologie Cognitive*, 1(3), 299-333.
- Cordier, F., & François, J. (2002). *Catégorisation et langage*. Paris: Hermès Science Publications.
- De Rosnay, J. (1975). *Le macroscopie*. Paris: Seuil.
- Descartes, R., Adam, C., & Tannery, P. (1996). *Le Discours de la Méthode. œuvres*. Paris: Vrin, CNRS.
- Devaney, R. L. (1989). An introduction to chaotic dynamical systems. Menlo Park, California: Addison-Wesley, .
- Durand, D. (1979). *La systémique*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Dutilh, G., Wagenmakers, E. J., Visser, I., & Van der Maas, H. L. J. (2011). A Phase Transition Model for the Speed-Accuracy Trade-Off in Response Time Experiments. *Cognitive Science*, 35(2), 211-250.
- Edelman, S. (1997). Computational theories of object recognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 1(8), 296-304.
- Edelman, S., & Bühlhoff, H. H. (1992). Orientation dependence in the recognition of familiar and novel views of three-dimensional objects. *Vision Research*, 32(12), 2385-2400.
- Edelman, S., & Tononi, G. (2000). *A Universe of Consciousness: How Matter Becomes Imagination*. New York: Basic Books.
- Ellairs, R., Goodwin, B., & Mackley, M. R. (1977). In support of catastrophe
-

- theory (letter). *Nature*, 270, 381-382.
- Elman, J. L. (1990). Finding structure in time. *Cognitive science*, 14(2), 179-211.
- Elman, J. L. (1991). Distributed representations, simple recurrent networks, and grammatical structure. *Machine learning*, 7(2), 195-225.
- Erdelyi, M. H. (1974). A new look at the New Look: Perceptual defense and vigilance. , 81, 1-25. *Psychological Review*, 81, 1-25.
- Faisal, A. A., Selen, L. P. J., & Wolpert, D. M. (2008). Noise in the nervous system. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(4), 292-303.
- Festinger, L. (1954). A theory of social comparison processes. *Human relations*, 7(2), 117-140.
- Fisher, G. H. (1967). Preparation of ambiguous stimulus materials. *Perception and psychophysics*, 2, 421-422.
- Flesselles, J., Croquette, V., Jucquois, S., & Janiaud, B. (1995). *Behavior of a One-Dimensional Chain of Nonlinear Oscillators*. Communication présentée Studies in the Science of Complexity, Santa Fe Institute.
- Gepshtein, S., & Kubovy, M. (2005). Stability and change in perception: spatial organization in temporal context. *Experimental brain research*, 160(4), 487-495.
- Gilgen, A. R. (1995). A search for bifurcations in the psychological domain. Dans F. Abraham & A. Gilgen (dir.), *Chaos theory in psychology* (p. 139-144). Westport, CT: Praeger.
- Gilmore, R. (1993). *Catastrophe theory for scientists and engineers*. Dover publications.
- Glandsdorff, P., & Prigogine, I. (1971). *Structure, stabilité et fluctuations*. Paris: Masson.
- Gleick, J. (1989). *La théorie du chaos: vers une nouvelle science*. Paris: Albin Michel.
- Goldstein, K., & Scheerer, M. (1941). Abstract and concrete behavior an experimental study with special tests. *Psychological monographs*, 53(2), i.
- Gori, S., Giora, E., & Pedersini, R. (2008). Perceptual multistability in figure-ground segregation using motion stimuli. *Acta psychologica*, 129(3), 399-409.
- Granic, I., & Hollenstein, T. (2003). Dynamic systems methods for models of developmental psychopathology. *Development and Psychopathology*, 15(3), 641-669.
- Greenwald, A. G. (1992). New Look 3: Unconscious Cognition Reclaimed. *American Psychologist*, 47, 766-779.
- Gregory, R. L. (1997). *Mirrors in mind*. Oxford and New York: WH Freeman/Spektrum.
- Grossberg, S., & Rudd, M. E. (1992). Cortical dynamics of visual motion perception: short-range and long-range apparent motion. *Psychological review*, 99(1), 78.
- Guastello, S. J. (1988). Catastrophe modeling of the accident process: Organizational subunit size. *Psychological Bulletin*, 103(2), 246-255.
- Guastello, S. J. (1992). Clash of the paradigms: A critique of an examination of the polynomial regression technique for evaluating catastrophe theory hypotheses. *Psychological Bulletin*, 111(2), 375-379.

- Guastello, S. J. (2001). Nonlinear dynamics in psychology. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 6(1), 11-29.
- Guastello, S. J. (2007). Moderator regression and the cusp catastrophe: Application of two-stage personnel selection, training, therapy, and policy evaluation. *Behavioral Science*, 27(3), 259-272.
- Guckenheimer, J., Gueron, S., Harris-Warrick, R. M., Guckenheimer, J., Gueron, S., & Harris-Warrick, R. M. (1993). Mapping the dynamics of a bursting neuron. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 341(1298), 345-359.
- Haken, H. (1977). *Synergetics. An introduction. Nonequilibrium phase transitions and self-organization in physics, chemistry, and biology*. Berlin.
- Haken, H. (1984). *Laser theory*. Berlin: Springer-Verlag.
- Haken, H. (1999). Synergetics and some applications to psychology. Dans W. Tschacher & J.-P. Dauwalder (dir.), *Dynamics, synergetics, autonomous agents* (p. 3-12). Singapore: World Scientific.
- Haken, H. (2006). Synergetics of brain function. *International journal of psychophysiology*, 60(2), 110-124.
- Haken, H., Kelso, J. A. S., & Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological cybernetics*, 51(5), 347-356.
- Hampton, J. A. (2001). The role of similarity in natural categorization. Dans U. Hahn & M. Ramscar (dir.), *Similarity and categorization* (p. 13-28). New York: Oxford University Press.
- Hartelman, P. A. I. (1997). *Stochastic catastrophe theory - Unpublished doctoral dissertation* (University of Amsterdam, Amsterdam).
- Hartelman, P. A. I., Maas, H. L. J., & Molenaar, P. (2011). Detecting and modelling developmental transitions. *British Journal of Developmental Psychology*, 16(1), 97-122.
- Hebb, D. O. (1949). *The Organization of Behavior*. New York: Wiley.
- Heidbreder, E. (1924). An experimental study of thinking. *Archives of Psychology*.
- Higgins, E. T. (1996). Knowledge activation: Accessibility, and salience. Dans E. T. Higgins & A. W. Kruglanski (dir.), *Social Psychology: Handbook of Basic Principles*. New York: The Guilford Press.
- Hochstein, S., & Ahissar, M. (2002). View from the top. Hierarchies and reverse hierarchies in the visual system. *Neuron*, 36(5), 791-804.
- Hock, H. S., Kelso, J. S., & Schöner, G. (1993). Bistability and hysteresis in the organization of apparent motion patterns. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19(1), 63-80.
- Hock, H. S., Schöner, G., & Giese, M. (2003). The dynamical foundations of motion pattern formation: Stability, selective adaptation, and perceptual continuity. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 65(3), 429-457.

- Hock, H. S., Schöner, G., & Hochstein, S. (1996). Perceptual stability and the selective adaptation of perceived and unperceived motion directions. *Vision research*, 36(20), 3311-3323.
- Hock, H. S., Schöner, G., & Voss, A. (1997). The influence of adaptation and stochastic fluctuations on spontaneous perceptual changes for bistable stimuli. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 59(4), 509-522.
- Hoffding, H. (1891). Psychische und physische Activitat. *Vierteljahrsschrift fur wissenschaftliche Philosophie*, 15, 233-250.
- Hopfield, J. J. (1982). Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proceedings of the national academy of sciences*, 79(8), 2554-2558.
- Hornero, R., Alonso, A., Jimeno, N., Jimeno, A., & Lopez, M. (1999). Nonlinear analysis of time series generated by schizophrenic patients. *Engineering in Medicine and Biology Magazine, IEEE*, 18(3), 84-90.
- Hull, C. L. (1920). *Quantitative aspects of the evolution of concepts : an experimental study*. Princeton, N.J., Lancaster, Pa.,: Psychological review company.
- Hull, C. L. (1943). *Principles of Behavior*. New York: Applenton-Century-Crofts.
- Hume, D. (1978). 1739. A treatise of human nature. *London: John Noon*.
- Jansen, B. R. J., & Van der Maas, H. L. J. (2002). The development of children's rule use on the balance scale task. *Journal of Experimental Child Psychology*, 81(4), 383-416.
- Juhel, J. (2005). Les systemes dynamiques non lineaires dans l'etude de la variabilite cognitive. Dans B. Cadet & R. Herin (dir.), *La complexite: ses formes, ses traitements, ses effets* (p. 193-216). Caen: PUC.
- Kampis, G. (1991). *Self-modifying systems in biology and cognitive science: a new framework for dynamics, information and complexity*. Pergamon Press Oxford.
- Kant, I. (1787). *Kritik der reinen Vernunft (Vol. III)*. (2^e éd.). Berlin: Reimer
- Kanwisher, N. G. (1987). Repetition blindness: Type recognition without token individuation. *Cognition*, 27(2), 117-143.
- Kaplowitz, S. A., & Fink, E. L. (1992). Dynamics of attitude change. *Analysis of dynamic psychological systems*, 2, 341-369.
- Kelly, A., Heathcote, A., Heath, R., & Longstaff, M. (2001). Response-time dynamics: Evidence for linear and low-dimensional nonlinear structure in human choice sequences. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A*, 54(3), 805-840.
- Kelso, J. (1981). On the oscillatory basis of movement. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 18(63), 9.
- Kelso, J. A. S. (1982). *Human motor behavior: An introduction*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum.
- Kelso, J. A. S. (1984). Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 246(6), 1000-1004.

- Kelso, J. A. S. (1995). *Dynamic patterns: The self-organization of brain and behavior*. Cambridge, MA: MIT press.
- Kelso, J. A. S., Saltzman, E., & Tuller, B. (1986). The dynamical theory of speech production: Data and theory. *Journal of Phonetics*, 14(4), 29-60.
- Köhler, W. (1917). *Intelligenzprüfungen an anthropoiden*. 1. Königl. akademie der wissenschaften.
- Korzybski, A. (1933). A non-Aristotelian system and its necessity for rigour in mathematics and physics. *Science and Sanity*, 1933, 747-761.
- Kostrubiec, V. (2001). *La mémoire émergente: vers une approche dynamique de la mémorisation*. Paris: L'Harmattan.
- Kruse, P., & Stadler, M. (1995). *Ambiguity in mind and nature (multistable cognitive phenomena)*. Berlin: Springer-Verlag.
- Kruse, P., Stadler, M., & Wehner, T. (1986). Direction and frequency specific processing in the perception of long-range apparent movement. *Vision Research*, 26(2), 327-335.
- Kugler, P. N., & Turvey, M. T. (1987). *Information, natural law, and the self-assembly of rhythmic movement*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Landau, L. (1936). The theory of phase transitions. *Nature*, 138, 840-841.
- Le Moigne, J.-L. (1999). *La modélisation des systèmes complexes (Vol. 2)*. Paris: Dunod.
- Le Moigne, J.-L. (2001). Pourquoi je suis un constructiviste non repentant. *Revue du MAUSS* 17(1), 197-223.
- Le Moigne, J.-L. (2002). *Le constructivisme: Epistémologie de l'interdisciplinarité*. Editions L'Harmattan.
- Le Moigne, J. L. (1994). *La théorie du système général: théorie de la modélisation*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Le Moigne, J. L., & Carré, D. (1977). *Auto-organisation de l'entreprise: 50 propositions pour l'autogestion*. Les Éditions d'organisation.
- Le Moigne, J. L., & Simon, H. A. (1991). *Sciences des systèmes, sciences de l'artificiel*. Paris: Dunod.
- Lieberman, A. M., Cooper, F. S., Shankweiler, D. P., & Studdert-Kennedy, M. (1967). Perception of the speech code. *Psychological review*, 74(6), 431-461.
- Lindsay, P. H., & Norman, D. A. (1977). *Human. Information Processing: An Introduction to Psychology*. New York: Academic Press.
- Loehlin, J. C. (1992). *Genes and Environment in Personality Development*. Newbury Park, CA: Sage.
- Lorenz, E. N. (1963). Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the atmospheric sciences*, 20(2), 130-141.
- Luce, R. D. (1963). Detection and recognition. *Handbook of mathematical psychology*, 1, 103-189.

- Maddox, W. T., & Ashby, F. G. (2004). Dissociating explicit and procedural-learning based systems of perceptual category learning. *Behavioural Processes*, *66*(3), 309-332.
- Mandelbrot, B. B. (1983). *The Fractal Geometry of Nature*. New York: WN Freeman.
- Marewski, J. N., Gaissmaier, W., & Gigerenzer, G. (2010). Good judgments do not require complex cognition. *Cognitive Processing*, *11*, 103-121.
- Margolis, E. (1994). A Reassessment of the Shift from the Classical Theory of Concepts to Prototype Theory. *Cognition*, *51*, 73-89.
- Marr, D., & Nishihara, H. K. (1978, February 23, 1978). *Representation and recognition of the spatial organization of three dimensional structure*. Communication présentée the Royal Society of London B. doi: 10.1098/rspb.1978.0020
- Maxwell, J. C. (2001). *Theory of Heat (1871)*. Dover: Books on Physics.
- McClelland, J. L., & Elman, J. L. (1986). The TRACE model of speech perception. *Cognitive psychology*, *18*(1), 1-86.
- McClelland, J. L., & Rumelhart, D. E. (1981). An interactive activation model of context effects in letter perception: I. An account of basic findings. *Psychological Review; Psychological Review*, *88*(5), 375-401.
- McClelland, J. L., Rumelhart, D. E., & Hinton, G. E. (1986). *The appeal of parallel distributed processing*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Medin, D. L., & Schaffer, M. M. (1978). Context theory of classification learning. *Psychological Review; Psychological Review*, *85*(3), 207-238.
- Medin, D. L., & Smith, E. E. (1984). Concepts and concept formation. *Annual review of psychology*, *35*(1), 113-138.
- Meili, R. (1926). Experimentelle untersuchungen über das ordnen von gegenständen. *Psychological Research*, *7*(1), 155-193.
- Mervis, C. B. (1985). On the existence of prelinguistic categories: A case study. *Infant Behavior and Development*, *8*(3), 293-300.
- Mervis, C. B., & Crisafi, M. A. (1982). Order of acquisition of subordinate-, basic-, and superordinate-level categories. *Child Development*, *53*(1), 258-266.
- Millieux, L., Calvin, S., & Temprado, J.-J. (2005). Limiting the recruitment of degrees of freedom reduces the stability of perception-action patterns. *Human movement science*, *24*(2), 218-233.
- Morin, E. (1977). *La méthode. 1 : La nature de la nature*. Paris: Seuil.
- Morin, E. (2005). *Introduction ala pensée complexe*. Paris: Seuil.
- Morin, E., & Le Moigne, J. L. (1999). *L'intelligence de la complexité*. Paris: Editions L'Harmattan.
- Murphy, G. L. (2002). *The Big Book of Concepts*. Cambridge, Mass: MIT Press.
- Nash, J. F. (1950). Equilibrium points in n-person games. *Proceedings of the national academy of sciences*, *36*(1), 48-49.

- Navon, D. (1977). Forest before trees: The precedence of global features in visual perception. *Cognitive Psychology*, 9, 353-383.
- Neisser, U. (1967). *Cognitive Psychology*. New York: Appleton-Century-Crofts.
- Neisser, U. (1976). *Cognition and Reality*. San Francisco: Freeman.
- Nevatia, R., & Binford, T. O. (1977). Description and recognition of complex curved objects. *Artificial Intelligence*, 8(1), 77-98.
- Newell, K. M., Liu, Y. T., & Mayer-Kress, G. (2001). Time scales in motor learning and development. *Psychological review*, 108(1), 57-82.
- Nicolis, G., & Prigogine, I. (1977). *Self-organization in nonequilibrium systems*. New York: John Wiley & Sons.
- Norton, A. (1995). Dynamics: an introduction. Dans R. F. Port & T. Van Gelder (dir.), *Mind as motion: Explorations in the dynamics of cognition*. Cambridge, MA: MIT press.
- Nosofsky, R. M. (1986). Attention, similarity, and the identification–categorization relationship. *Journal of Experimental Psychology: General; Journal of Experimental Psychology: General*, 115(1), 39-57.
- Nosofsky, R. M., Gluck, M. A., Palmeri, T. J., McKinley, S. C., & Glauthier, P. (1994). Comparing modes of rule-based classification learning: A replication and extension of Shepard, Hovland, and Jenkins (1961). *Memory & cognition*, 22(3), 352-369.
- Nowak, A., & Vallacher, R. R. (1998). *Dynamical social psychology*. New York: Guilford Press.
- Oléron, P. (1995). Un examen critique des modèles mentaux de Johnson-Laird. *L'Année Psychologique*, 95, 693-706.
- Oliva, A., & Torralba, A. (2001). Modeling the shape of the scene: A holistic representation of the spatial envelope. *International Journal of Computer Vision*, 42(3), 145-175.
- Paillard, J. (1994). L'intégration sensori-motrice et idéomotrice. Dans M. Richelle, J. Requin & M. Robert (dir.), *Traité de Psychologie Expérimentale*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Palmer, S., Rosch, E., & Chase, P. (1981). Canonical perspective and the perception of objects. Dans J. Long & A. D. Baddeley (dir.), *Attention and Performance IX*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- Pascal, B. (1976). *Pensées*. Paris: Flammarion.
- Petitot-Cocorda, J. (1985). *Les catastrophes de la parole*. Paris: Maloine.
- Peyrin, C., & Musel, B. (2012). On the Specific Role of the Occipital Cortex in Scene Perception. Dans S. Molotchnikoff & J. Rouat (dir.), *Visual Cortex - Current Status and Perspectives* (p. 61-82). Rijeka: Intech.
- Piaget, J. (1967). *Logique et connaissance scientifique : les courants de l'épistémologie scientifique contemporaine*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Piaget, J. (1977). *La construction du réel chez l'enfant*. Paris et Neuchâtel: Delachaux & Niestlé.
- Piaget, J., & Inhelder, B. (1959). *La genèse des structures logiques élémentaires*. Paris: Neuchâtel.

- Piéron, H. (1926). Les problèmes de la perception et la psychophysologie. *L'Année Psychologique*, 27, 1-22.
- Pierrehumbert, J. B., & Pierrehumbert, R. T. (1990). On attributing grammars to dynamical systems. *Journal of Phonetics*, 18, 465-477.
- Pinker, S. (1984). Visual cognition: An introduction. *Cognition*, 18, 1-63.
- Pinker, S. (1998). *How the Mind Works*. London: Penguin Books.
- Plesser, H. E., & Tanaka, S. (1997). Stochastic resonance in a model neuron with reset. *Physics Letters A*, 225(4), 228-234.
- Ploeger, A., Van Der Maas, H. L. J., & Hartelman, P. A. I. (2002). Stochastic catastrophe analysis of switches in the perception of apparent motion. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9(1), 26-42.
- Poincaré, H. (1912). Sur un théorème de géométrie. *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo (1884-1940)*, 33(1), 375-407.
- Pomerantz, J. R., Sager, L. C., & Stoeber, R. J. (1977). Perception of wholes and of their component parts: Some configural superiority effects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 3, 422-435.
- Popper, K. R. (1978). *La connaissance objective*. Bruxelles: Editions Complexe.
- Naive time, temporal patterns, and human audition, (1995).
- Port, R. F., & Van Gelder, T. (1995). *Mind as motion: Explorations in the dynamics of cognition*. Cambridge, MA: MIT press.
- Porter, R. J., & Hogue, D. M. (1998). Nonlinear dynamical systems in speech perception and production. *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences*, 2(2), 95-131.
- Postman, L. (1951). Toward a general theory of cognition. Dans J. H. Rohrer & M. Sherif (dir.), *Social Psychology at the Crossroads*. New York: Harper and Brothers.
- Poston, T., & Stewart, I. (1978a). *Catastrophe theory and its applications*. (2^e éd.). London Pitman.
- Poston, T., & Stewart, I. (1978b). Nonlinear modeling of multistable perception. *Behavioral Science*, 23(4), 318-334.
- Prigogine, I., & Stengers, I. (1988). *Entre le temps et l'éternité*. Paris: Fayard.
- Rączaszek, J., Tuller, B., Shapiro, L. P., Case, P., & Kelso, S. (1999). Categorization of ambiguous sentences as a function of a changing prosodic parameter: A dynamical approach. *Journal of psycholinguistic research*, 28(4), 367-393.
- Ramachandran, V. S., & Anstis, S. M. (1985). Perceptual organization in multistable apparent motion. *Perception*, 14(2), 135-143.
- Ratcliff, R., & Rouder, J. N. (1998). Modeling response times for two-choice decisions. *Psychological Science*, 9(5), 347-356.
- Reicher, G. M. (1969). Perceptual recognition as a function of meaningfulness of stimulus material. *Journal of Experimental Psychology*, 81(2), 275-280.
- Rensink, R. A. (2002). Change detection. *Annual Review Psychology*, 53, 245-277.

- Reuchlin, M. (1977). *Psychologie*. Paris: Presse Universitaire de France.
- Rhodes, G., Brennan, S. E., & Carey, S. (1987). Identification and ratings of caricatures: implications for mental representations of faces. *Cognitive Psychology*, 19, 473-494.
- Richard, J.-F. (1994). La résolution des problèmes: bilan et perspectives. *Psychologie française*, 39(2), 161-175.
- Riesenhuber, M., & Poggio, T. (2000). Models of object recognition. *Nature Neuroscience*, 3, 1199-1204.
- Rips, L. J., Shoben, E. J., & Smith, E. E. (1973). Semantic distance and the verification of semantic relations. *Journal of verbal learning and verbal behavior*, 12(1), 1-20.
- Roberts, K., & Horowitz, F. D. (1986). Basic level categorization in seven- and nine-month-old infants. *Journal of Child Language*, 13(02), 191-208.
- Rock, I. (1973). *Orientation and Form*. New York: Academic Press.
- Rosch, E. (1976). Classification d'objets du monde réel: Origines et représentations dans la cognition. *Bulletin de psychologie*, 242, 250.
- Rosch, E. (1981). Prototype classification and logical classification: The two systems. Dans E. Scholnick (dir.), *New trends in conceptual representation: Challenges to Piaget's theory* (p. 73-86). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates Inc.
- Rosch, E., & Mervis, C. B. (1975). Family resemblances: Studies in the internal structure of categories. *Cognitive psychology*, 7(4), 573-605.
- Rosch, E., Simpson, C., & Miller, R. S. (1976). Structural bases of typicality effects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 2(4), 491-502.
- Rosenblueth, A., Wiener, N., & Bigelow, J. (1943). Behavior, purpose and teleology. *Philosophy of science*, 10(1), 18-24.
- Rosenthal, V., & Visetti, Y.-M. (1999). Sens et temps de la Gestalt (Gestalt theory: critical overview and contemporary relevance). *Intellectica*, 28(1), 147-227.
- Ruelle, D., & Takens, F. (1971). On the nature of turbulence. *Communications in mathematical physics*, 20(3), 167-192.
- Rumelhart, D. E. (1980). Schemata: The building blocks of cognition. Dans R. J. Spiro, B. C. Bruce & W. F. Brewer (dir.), *Theoretical issues in reading comprehension*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- Rumelhart, D. E., & McClelland, J. L. (1986). *Parallel distributed processing: explorations in the microstructure of cognition*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Saltzman, E. L. (1992). Biomechanical and haptic factors in the temporal patterning of limb and speech activity. *Human movement science*, 11(1), 239-251.
- Schöner, G., Kopecz, K., & Erhagen, W. (1997). The dynamic neural field theory of motor programming: Arm and eye movements. *Advances in Psychology*, 119, 271-310.
- Schwaninger, A., & Mast, F. (1999). Why is face recognition so orientation-sensitive? Psychophysical evidence for an integrative model. *Perception (Suppl.)*, 28, 116.
- Schwarz, G. (1978). Estimating the dimension of a model. *The annals of statistics*, 6(2), 461-464.

- Scott, D. W. (1985). Catastrophe theory applications in clinical psychology: A review. *Current Psychology*, 4(1), 69-86.
- Sejnowski, T. J., & Rosenberg, C. R. (1987). Parallel networks that learn to pronounce English text. *Complex systems*, 1(1), 145-168.
- Selfridge, O. G., & Neisser, U. (1960). Pattern recognition by machine. *Scientific American*, 203, 60-68.
- Shannon, C. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Bell Syst. Tech. J*, 27, 623-656.
- Shepard, R. N. (1957). Stimulus and response generalization: A stochastic model relating generalization to distance in psychological space. *Psychometrika*, 22(4), 325-345.
- Shepard, R. N., & Chang, J. J. (1963). Stimulus generalization in the learning of classifications. *Journal of Experimental Psychology*, 65(1), 94-102.
- Shepard, R. N., Hovland, C. I., & Jenkins, H. M. (1961). Learning and memorization of classifications. *Psychological Monographs: General and Applied*, 75(13), 1-42.
- Sherif, M. (1935). A study of some social factors in perception. *Archives of Psychology (Columbia University)*.
- Simon, H. A. (2004). *Les sciences de l'artificiel*. Paris: Folio Essais.
- Simonotto, E., Riani, M., Seife, C., Roberts, M., Twitty, J., & Moss, F. (1997). Visual perception of stochastic resonance. *Physical Review Letters*, 78(6), 1186-1189.
- Skarda, C. A., & Freeman, W. J. (1987). How brains make chaos in order to make sense of the world. *Behavioral and brain sciences*, 10(2), 161-195.
- Smith, L. B., Thelen, E., Titzer, R., & McLin, D. (1999). Knowing in the context of acting: the task dynamics of the A-not-B error. *Psychological Review; Psychological Review*, 106(2), 235-260.
- Smolensky, P. (1986). Information processing in dynamical systems: Foundations of harmony theory. Dans D. E. Rumelhart, J. L. McClelland & t. P. R. Group (dir.), *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*. (Vol. 1, p. 194-281). Cambridge, MA: MIT Press/Bradford Books.
- Smolensky, P. (1988). *Connectionism, constituency, and the language of thought*. Boulder: University of Colorado,.
- Spencer, J. P., Austin, A., & Schutte, A. R. (2012). Contributions of dynamic systems theory to cognitive development. *Cognitive Development*, 27(4), 401-418.
- Stewart, I. N., & Peregoy, P. (1983). Catastrophe theory modeling in psychology. *Psychological Bulletin*, 94(2), 336-362.
- Svaetichin, G. (1956). Spectral response curves from single cones. *Acta physiologica Scandinavica. Supplementum*, 39(134), 17-46.
- Ta'edd, L. K., Ta'eed, O., & Wright, J. (1988). Determinants involved in the perception of the Necker cube: An application of catastrophe theory. *Behavioral Science*, 33(2), 97-115.
- Tabary, J. (1994). Introduction à la méthode de Paul Valéry. *Revue Internationale de systémique*, 8(3), 287-306.

-
- Tarr, M. J., & Bülthoff, H. H. (1998). *Object Recognition in Man, Monkey, and Machine*. Cambridge: The MIT Press.
- Thelen, E., Schöner, G., Scheier, C., & Smith, L. B. (2001). So what's a modeler to do? *Behavioral and brain sciences*, 24(01), 70-80.
- Thelen, E., & Smith, L. B. (1996). *A dynamic systems approach to the development of cognition and action*. Cambridge, MA: MIT press.
- Thom, R. (1975). *Stabilité Structurelle et Morphogénese. Essai d'une théorie générale des modes*. Paris: Inter Editions.
- Thorndike, E. L. (1913). *The psychology of learning*. New York: Teachers College.
- Titchener, E. B. (1912). The Schema of Introspection. *American Journal of Psychology*, 23, 485-508.
- Torralba, A., & Oliva, A. (2003). Statistics of natural image categories. *Network: Computation in Neural Systems*, 14, 391-412.
- Treisman, A. M. (1986). Features and objects in visual processing. *Scientific American*, 255(5), 114-125.
- Treisman, A. M. (1988). Features and objects: The fourteenth Bartlett memorial lecture. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 40(2), 201-237.
- Treisman, A. M., & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive psychology*, 12(1), 97-136.
- Tuller, B., Case, P., Ding, M., & Kelso, J. A. S. (1994). The nonlinear dynamics of speech categorization. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20(1), 3-16.
- Turvey, M. T. (1990). Coordination. *American Psychologist*, 45(8), 938-953.
- Tversky, A. (1977). Features of similarity. *Psychological review*, 84(4), 327-352.
- Tversky, A., & Gati, I. (1978). Studies of similarity. *Cognition and categorization*, 1, 79-98.
- Ullman, S. (1989). Aligning pictorial descriptions: An approach to object recognition. *Cognition*, 32, 193-254.
- Ullman, S., & Basri, R. (1989). Recognition by Linear Combinations of Models. A.I. Memo 1152: Massachusetts Institute of Technology.
- Valéry, P. (1974). *Paul Valéry : Cahiers, tome II*. Paris: Galimard.
- Vallacher, R. R., & Nowak, A. (1997). The emergence of dynamical social psychology. *Psychological Inquiry*, 8(2), 73-99.
- Van der Maas, H. L., & Molenaar, P. C. (1992). Stagewise cognitive development: An application of catastrophe theory. *Psychological Review; Psychological Review*, 99(3), 395-417.
- Van der Maas, H. L. J., Kolstein, R., & Van Der Pligt, J. (2003). Sudden transitions in attitudes. *Sociological Methods & Research*, 32(2), 125-152.
- Van Geert, P. (1991). A dynamic systems model of cognitive and language growth. *Psychological review*, 98(1), 3-53.
-

- Van Gelder, T. (1998). The dynamical hypothesis in cognitive science. *Behavioral and Brain sciences*, 21(05), 615-628.
- Van Kampen, N. G. (1987). *Some theoretical aspects of noise*. Communication présenté Ninth International Conference on Noise in Physical Systems, Singapore.
- Varela, F. J. (1989). *Autonomie et connaissance : essai sur le vivant*. Paris: Seuil.
- Varela, F. J., Thompson, E., & Rosch, E. (1993). *L'inscription corporelle de l'esprit*. Paris: Seuil.
- Versace, R., Labeye, É., Badard, G., & Rose, M. (2009). The contents of long-term memory and the emergence of knowledge. *European journal of cognitive psychology*, 21(4), 522-560.
- Versace, R., Nevers, B., & Padovan, C. (2002). *La mémoire dans tous ses états*. Marseille, France: Solal.
- Vetter, G., Stadler, M., & Haynes, D. (1997). Phase transitions in learning. *Journal of Mind and Behavior*, 18, 335-350.
- Vico, G., & Trivulzio, C. (1993). *La science nouvelle (1725)*. Paris: Gallimard.
- Von Bertalanffy, L. (1993). *Théorie générale des systèmes*. (Traduit par J. Chabrol). Paris: Dunod.
- Von Foerster, H. (1960). On self-organizing systems and their environments. Dans M. C. Yovits & S. Cameron (dir.), *Self-Organizing Systems*. New York: Pergamon Press.
- Von Foerster, H. (2002). *Understanding Understanding: Essays on Cybernetic and Cognition*. New York - Berlin - Heidelberg: Springer-Verlag.
- Von Glasersfeld, E. (1978). Radical constructivism and Piaget's concept of knowledge. Dans F. B. Murray (dir.), *The Impact of Piagetian Theory* (p. 109-122). Baltimore: University Park Press.
- Von Helmholtz, H. (2009). *Optique physiologique: Des perceptions visuelles*. Harmattan.
- Von Neumann, J., & Morgenstern, O. (1945). Theory of games and economic behavior. *Bull. Amer. Math. Soc*, 51, 498-504.
- Von Schiller, P. (1933). Stroboskopische alternativversuche. *Psychologische Forschung*, 17, 180-214.
- Wagenmakers, E. J., Molenaar, P., Grasman, R. P. P. P., Hartelman, P. A. I., & Van der Maas, H. L. J. (2005). Transformation invariant stochastic catastrophe theory. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 211(3), 263-276.
- Wallraven, C., Schwaninger, A., Shumacher, S., & Bülthoff, H. H. (2002). View-based recognition of faces in man and machine: Re-visiting intrer-extra-ortho. *Lecture Notes in Computer Science*, 2525, 651-660.
- Ward, L. M. (2001). *Dynamical cognitive science*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Warren, W. H. (1995). Self motion: Visual perception and visual control. Dans W. Epstein & S. Rogers (dir.), *Perception of space and motion*. San Diego, CA: Academic Press.
- Watzlawick, P. (1988). *L'invention de la réalité. Contributions au constructivisme*. Paris: Seuil.

- Weisstein, N., & Harris, C. S. (1974). Visual detection of line segments: An object superiority effect. *Science*, *186*, 752-755.
- White, T. G. (1982). Naming practices, typicality, and underextension in child language. *Journal of Experimental Child Psychology*, *33*(2), 324-346.
- Wienez, N. (1948). Cybernetics. *Scientific American*, *179*(5), 14-18.
- Wittgenstein, L. (2004). *Recherches philosophiques*. Paris: Gallimard.
- Young, T. (1802). The Bakerian lecture: On the theory of light and colours. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, *92*, 12-48.
- Zahler, R. S., & Sussmann, H. J. (1977). Claims and accomplishments of applied catastrophe theory. *Nature*, *269*(10), 759-763.
- Zeeman, E. C. (1965). Topology of the brain. Dans M. R. Council (dir.), *Mathematics and computer science in biology and medicine*. London: H.M. Stationary Office.
- Zeeman, E. C. (1972). Differential equations for the heartbeat and nerve impulse. *Towards a theoretical biology*, *4*, 8-67.
- Zeeman, E. C. (1976). Catastrophe theory. *Scientific American*, *234*(4), 65-83.
- Zeeman, E. C. (1977). *Catastrophe Theory: Selected Papers (1972-1977)* Reading, MA: Addison Wesley.