

**Time time series. An introduction to irregular rhythms
(from ethology to psychophysics) November 3rd, 2014**

Christian Graff

► **To cite this version:**

Christian Graff. Time time series. An introduction to irregular rhythms (from ethology to psychophysics) November 3rd, 2014. Méthodes et statistiques. Univ. Grenoble Alpes; Ecole Doctorale pour l'Ingénierie, la Santé, et l'Environnement (EDISCE), 2014. tel-03078841

HAL Id: tel-03078841

<https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-03078841>

Submitted on 19 Dec 2020

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.

Université de Grenoble
Ecole doctorale Ingénierie pour la Santé, la Cognition et l'Environnement

Habilitation à Diriger les Recherches

Théorie, Modèle, Instrumentation pour la Santé, la Cognition et l'Environnement

Etude de rythmes ponctuels

Introduction aux rythmes irréguliers
(de l'éthologie à la psychophysique)

Soutenue le 2 novembre 2014

Dossier présenté par Christian Graff

Université Pierre Mendès France
2013 / 2014

COMPOSITION DU DOSSIER

Arrêté du 23/11/1988 relatif à l'habilitation à diriger les recherches

RESUME / SUMMARY

REMERCIEMENTS

PRESENTATION GENERALE

- A. Perspectives méthodologiques : diversité des approches
- B. Axe théorique privilégié

ETUDE DE RYTHMES PONCTUELS

I. Rythmes

- A. Conceptualisation de la temporalité et définitions
- B. Représentations de séquences de rythmes ponctuels
- C. Trois registres d'étude des rythmes ponctuels
- D. Rythmes caractéristiques et caractéristiques de séquences

II. Loi de Weber et Psychophysique

- A. Considérations générales, classiques
- B. Transposition au domaine moteur et aux séries temporelles
- C. Lois psychophysiques de puissance

III. Statistiques des rythmes ponctuels pour l'étude de la motricité et de la perception de la temporalité

- A. Objectifs de l'étude
- B. Indices paramétriques classiques applicables à une distribution normale
- C. Indices basés sur le rang des variables : médianes et fractiles
- D. Indices issus de la transformation logarithmique
- E. Combinaison des modèles

IV. Guide récapitulatif : comment aborder les rythmes ponctuels

SYNTHESE D'ACTIVITES SCIENTIFIQUES D'ANIMATION DE LA RECHERCHE

- A. Approches comportementales, entre éthologie et psychophysique
- B. Développement d'outils de recherche
- C. Perspectives générales
- D. Conclusion

NOTE PROSPECTIVE PRESENTANT LES ORIENTATIONS FUTURES

RESUME

Ce dossier d'habilitation à diriger les recherches est organisé autour d'un mémoire concernant mon axe principal : les *rythmes ponctuels*. Cependant en début de dossier sont présentés succinctement mes travaux dans lesquels s'inscrivent ces processus temporels. Ils interrogent une variété de modèles biologiques, animaux et humains, et les abordent, selon les cas, ou d'une manière descriptive héritée de l'éthologie, ou d'une façon expérimentale issue de la psychophysique.

Le mémoire central présente le modèle théorique des rythmes ponctuels qui permet d'aborder de nombreux phénomènes dont la dimension essentielle est la *temporalité*. Celle-ci est introduite en précisant les termes : *instant, moment, intervalle, durée, cycle, cadence, régularité* etc. Les notions fondamentales de la psychophysique, comme le seuil différentiel, sont rappelées pour être appliquées aux rythmes perçus mais aussi aux durées de mouvements produits. Des *modèles* statistiques et des *représentations* spécifiques sont proposés pour faciliter la manipulation et le traitement de variables quantitatives et qualitatives. Ces modèles privilégient l'usage de la transformation *logarithmique* népérienne pour caractériser les différences relatives (plutôt qu'absolues), plus pertinentes pour une comparaison de performances et de patterns dans toutes sortes de paradigmes.

Enfin le dossier se conclut par le document de synthèse de mes activités scientifiques et d'animation de la recherche récapitulant les points forts de mon parcours. Les outils conceptuels développés pour la neuro-éthologie des poissons électriques à faibles décharges sont exploités, transposés en psychophysique appliquée pour l'évaluation de processus moteurs et de navigation, et pour la conception de dispositifs bio-inspirés de substitution sensorielle.

SUMMARY

This file for « *Habilitation à Diriger les Recherches* » is organized around a thesis about my main research line: *SPIs, i.e. Sequences of Pulse Intervals* (sometimes quoted as *point rhythms, point time series, time time series, one-dimensional time series, etc.*). However, it is preceded by an introductory document to present my diverse investigations using behaviorist and ethological approaches, combining animal and human models.

The main thesis deals with SPIs as a relevant model for a variety of phenomena in which time is the essential dimension. A lexicon is therefore specified for time: *instant, moment, interval, duration, cycle, pace, regularity, etc.* Then fundamentals of psychophysics, especially the notion of differential threshold, are recalled and applied to timing perception but also to the timing of motor performances. Statistical tools and representations for SPIs are proposed for improved definition and processing of relevant variables. These statistics favor the naperian-logarithmic transform to characterize relative differences (rather than absolute differences), which are relevant for comparing performances and patterns in a variety of paradigms.

The last document is the record of my scientific projects that recapitulates my curriculum benchmarks. I started with birds and weakly-electric fish neuro-ethology. I capitalize now on acquired conceptual and methodological tools for the development of psychophysics. I am oriented towards evaluating navigation and motor performance and designing bio-inspired models for sensory substitution.

REMERCIEMENTS

Je vous remercie de m'avoir accordé votre confiance pour des recherches improbables.

Depuis mes débuts de chercheur enseignant, vous m'avez accordé votre temps, et votre intelligence. Il s'agit de la disponibilité d'experts de haute réputation dans des domaines plus ou moins connexes à mes préoccupations, de travaux d'étude engageant l'issue d'un diplôme terminal, de stages bénévoles de jeunes étudiants.

Je ferai mon possible pour que de futurs doctorants qui associeront leur confiance à la vôtre exploitent la valeur de ces choix partagés.

Depuis que je me suis assis sur un banc, vous m'avez procuré la matière, et votre énergie. Il s'agit des centres de recherche, des universités, du lycée, du collège, de l'école primaire et maternelle, ces lieux collectifs où vous avez maîtrisé la température, l'eau, l'électricité, la propreté, le fonctionnement des machines, la coordination des personnes.

Je ferai mon possible pour que nos institutions qui me permettent encore de me dévouer à la connaissance rendent à notre société qui les entretient ce qu'elle ne peut gagner sans elles.

Depuis que je regarde les choses qui bougent, vous m'avez accordé l'espace, et votre bienveillance. Il s'agit des laboratoires, des stations de recherche, des salles de travaux pratiques, des bureaux communs, des lieux d'élevage, des champs, de la rivière, de la forêt, des collocations, de la maison familiale, des lieux que nous avons partagés.

Je ferai mon possible pour que vos enfants profitent de semblables espaces, et qu'ils y découvrent tous leurs sens.

Je regrette de ne pouvoir vous remercier chacun par votre nom, mais j'espère que vous vous reconnaîtrez dans cette unique page car ma reconnaissance est sincère.

PRESENTATION GENERALE

A. Perspectives méthodologiques : diversité des approches

Les travaux expérimentaux que j'ai effectués ont débuté sur des animaux en empruntant aux approches relevant des deux écoles comportementales historiques, l'éthologie et le behaviorisme. Les grands principes de la psychologie expérimentale et cognitive sont issus du behaviorisme ; la posture de l'éthologue paraît donc souvent déroutante aux expérimentalistes en laboratoire. Il me semble cependant que la part la plus originale de ma contribution à l'étude de l'homme relève surtout de l'éthologie.

L'éthologie européenne privilégie une approche d'abord descriptive de l'animal dans son milieu naturel. Une place importante est accordée aux comportements spontanés et aux caractéristiques du taxon (espèce, famille...) auquel il appartient. Les moyens d'investigation s'accordent aux contraintes propres à l'espèce et à son environnement. Dans le cadre de la théorie de l'évolution, c'est l'adaptation qui explique l'émergence des comportements. L'approche est dite idiographique, à la recherche de caractéristiques propres, le contexte est ouvert.

Le behaviorisme pour sa part s'est focalisé sur des mécanismes universels des comportements construits par apprentissage. L'environnement, nécessairement, est artificiel et surtout restreint. L'espèce est une préoccupation secondaire et les spécificités zoologiques plutôt gommées. Le cadre théorique est marqué par une vision mécaniste d'entrées et de sorties prédéfinies, proche de l'électronique. L'approche est dite nomothétique, à la recherche de lois universelles, le contexte est formel.

Mes travaux, y compris sur l'homme, se placent dans un contexte artificiel, plutôt commun aux behavioristes et aux psycho-expérimentalistes. Cependant, les variables choisies sont souvent invoquées plutôt que provoquées, comme pour les éthologistes. Les données comportementales ainsi recueillies ne sont pas sous forme de variables prédéfinies par un modèle *a priori* ; elles sont volontiers dérivées de comportements spontanés, et donc théorisées *a posteriori*. Ces théories, souvent nouvelles, gagnent de l'intérêt en suscitant les manipulations suivantes.

Dans son expression la plus aboutie, le paradigme que je privilégie peut être intitulé « d'éthodrame ». Ce modèle est parent du psychodrame et du jeu de rôle, méthodes cliniques et thérapeutiques dans lesquelles le sujet est placé dans un contexte résolument artificiel et même fictif, mais qui permet de révéler, et d'influer, sur les comportements qui émergeraient dans des situations comparables de la « vraie vie ». Profitant du contexte de laboratoire, on écarte les variables contextuelles qui apporteraient une trop grande part de variabilité par un « bruit cognitif » en entrée, et par des difficultés d'enregistrement en sortie.

En outre mon intérêt se focalise véritablement sur l'individu en tant que membre d'une espèce, dont l'histoire évolutive et les caractéristiques neuro-anatomiques déterminent un mode de relation spécifique avec l'environnement, et des stratégies propres d'interaction avec son monde, son *Umwelt* (*sensu* von Uexküll, 1934). Dans

cette perspective, les capacités dites psychophysiques sont d'un intérêt primordial aussi bien chez l'humain que chez le dauphin ou le poisson électrique. Ces capacités concernent les entrées sensorielles, les sorties motrices et les relations qui les unissent, objet de la neuro-éthologie. Leur évaluation est abordée par des méthodes communes à la psychologie et la physiologie expérimentales, mais les résultats seront discutés dans un cadre adaptatif.

B. Axe théorique privilégié

Une expertise acquise sur les animaux non humains peut avoir un intérêt vétérinaire ou conservatoire qui concerne leur espèce. Cependant, mes choix de chercheur enseignant en sciences humaines accordent une importance majeure à la perspective de transpositions qui permettraient de comprendre et de résoudre des problèmes susceptibles d'intéresser notre espèce. Pour cela j'ai choisi de cultiver un champ de compétences original, mais applicable à un large domaine : celui des *rythmes irréguliers*, approché par les rythmes ponctuels qui est approfondi dans le texte central de ce dossier.

Ce traité des rythmes ponctuels présente un axe transdisciplinaire ; il montre la façon dont les modèles qui en relèvent peuvent être pertinemment exploités en éthologie, en psychophysique et quelques disciplines connexes ; il amène des outils statistiques facilitant leur approche. Les perspectives d'application du modèle théorique à des phénomènes humains, biologiques ou artificiels sont très vastes : dans les arts, les humanités, les sciences, les techniques... Chaque tentative d'application enrichit le modèle de nouveaux éléments susceptibles de s'appliquer aux autres domaines, de sorte qu'il m'a été très difficile d'en interrompre la rédaction, et il est donc livré très inachevé malgré les années. Un chapitre récapitulatif de la démarche exposée clôt donc la liste des chapitres proposés sur le lexique, la statistique et la psychophysique, laissant dans les cartons les chapitres touchant à la musique et la poésie, à l'analyse du signal, à la combinatoire, à la physique, aux conversions transmodales !

La monographie est suivie d'une synthèse de mon activité scientifique permettant de faire apparaître mon expérience dans l'animation d'une recherche. Dans les plans expérimentaux de manipulations variées, j'y soulignerai des approches relevant tantôt de l'application du schéma cybernétique « entrée-sortie » cher aux behavioristes, tantôt d'une posture de mise en condition du participant pour l'expression d'un comportement spontané, d'intérêt écologique (*real-life approach*).

Enfin le dossier se termine par une note prospective présentant mes orientations futures. Ces orientations s'inscrivent essentiellement dans le Laboratoire de Psychologie et Neurocognition de Grenoble dont je suis membre titulaire depuis cette année, et qui a déjà inscrit mes projets dans le plan quadriennal en cours d'expertise.

SYNTHESE D'ACTIVITES SCIENTIFIQUES D'ANIMATION DE LA RECHERCHE

Dans cette revue de mes principaux travaux, je mettrai en lumière, plus que les résultats eux-mêmes, la diversité et la continuité de mes approches. Je tenterai ainsi de mettre d'abord en évidence comment le regard particulier d'un éthologue de formation, attaché à la nature des comportements, peut conduire pourtant ses observations et ses expérimentations dans le cadre artificiel du laboratoire. Je présenterai ensuite succinctement quelques outils informatiques et électroniques développés dans une perspective d'usage dépassant une expérience particulière.

Sommaire

A. Approches comportementales entre éthologie et psychophysique

1. Ethologie au laboratoire.
2. Entre behaviorisme et psychophysique animale
3. Retour aux comportements spontanés et à la mise en situation
4. Spontanéité et psychophysique
5. Emergence des comportements adaptatifs
6. La perspective évolutionniste

B. Développement d'outils de recherche

1. Dispositifs de conversions transmodales
2. Outils mathématiques

C. Perspectives générales

SYNTHESE D'ACTIVITES SCIENTIFIQUES D'ANIMATION DE LA RECHERCHE

A. Approches comportementales, entre éthologie et psychophysique

1. Ethologie au laboratoire.

Mon premier travail expérimental au *Psychology Department, (Hobart & William Smith Colleges, Geneva New York)* concernait le comportement de construction du nid chez le canari *Serinus canaria* (Graff 1981). Le choix était laissé à l'oiseau entre cinq matériaux de construction de différentes textures, dont les éléments étaient datés à l'aide d'une teinture alimentaire changeant chaque jour. Il s'agissait donc d'un comportement spontané - le choix des éléments étant fonction de l'état interne - mais restreint, afin d'être quantifiable grâce aux conditions permises par la captivité : une vingtaine de couples élevés en batterie. Les résultats confirment une progression dans le choix des matériaux de construction, les proportions majoritaires s'inversant du plus dur au plus doux, jusqu'à l'arrêt qui précède la ponte. Ce développement du comportement, *connu par les naturalistes* échangeant des connaissances de source informelle sur de nombreux oiseaux, se retrouvait ainsi *établi objectivement* par des mesures standardisées.

Dans ces observations, une forme particulière de lien causal s'inscrit dans la dimension temporelle, sous un aspect différent du classique schéma behavioriste stimulus-réponse : la variable indépendante est le nombre de jours qui *précède* la date de ponte, alors que dans la situation classique, le comportement *suit* nécessairement l'évènement sensoriel - généralement provoqué - qui le déclenche.

Mes investigations au Laboratoire de Neurophysiologie sensorielle (CNRS, Gif sur Yvette, France) concernaient le comportement électrique et social d'un mormyre, un poisson émetteur de micro-décharges (Graff 1986). L'enregistrement d'un individu au milieu d'un groupe et simultanément du groupe dans son ensemble, nécessaire à déchiffrer une éventuelle communication est une performance technique (Graff 1987) impossible dans la nature. Les conditions de laboratoire ont permis de mettre en évidence des interactions qui privilégient le confort d'électrolocalisation active, donc la possibilité de navigation *de chaque individu* plutôt qu'une électro-communication en faveur *du groupe* dans sa globalité. Ici encore, les interactions étaient spontanées, la normalisation tenait aux conditions dans lesquelles étaient placés les individus (six groupes de six) et non à des stimuli artificiels qui leur auraient été imposés.

L'activité électrique des Mormyridae se caractérise par des impulsions tout-ou-rien séparées par des intervalles de durée variable. L'étude de leur activité individuelle (toujours spontanée mais en conditions contrôlées) a fait émerger un modèle théorique aux vastes applications. J'ai commencé à en développer des outils d'analyse (Graff 1989), que j'ai repris dans la suite de mes recherches sur d'autres phénomènes d'activité humaine ou animale. Dans ce modèle théorique dit des « rythmes ponctuels », l'information est portée d'une part par la forme de l'impulsion électrique *elle-même*, d'autre part par la forme temporelle des *suites* d'impulsions, que j'appelle « rythme ponctuel ».

2. Entre behaviorisme et psychophysique animale

J'ai ensuite approfondi mes recherches sur l'information susceptible d'être portée par la forme temporelle et spatiale des impulsions électriques de Mormyres. La méthode utilisée se basait sur le conditionnement, dans une méthodologie qui rejoignait pleinement celle des behavioristes et de la psychologie expérimentale. Au *Zoologisches Institut der Universität Regensburg* (Allemagne), j'ai dressé des mormyres à se diriger vers une source artificielle de signaux électriques imitant ceux produits par leur espèce, et à réprimer cette réponse lorsque cette source émettait un signal semblable mais différent (paradigme « go – no go »). J'ai ainsi pu montrer (Graff & Kramer 1992) leur faculté à discriminer sur des paramètres électriques leur espèce d'une autre, deux individus de leur espèce ou de sexes différents.

Dans la continuité (Graff et al. 2004) j'ai ensuite testé au Laboratoire de Biologie du Comportement, UPMF, Grenoble) avec l'aide d'étudiants en biologie et en psychologie, la faculté de mormyres et d'autres poissons électriques (Gymnotiformes) émettant un signal d'un type différent, de reconnaître des invariants spatiaux dans la forme électrique virtuelle du lieu où ils se déplaçaient. Selon un paradigme de « *double forced choice* » ils s'engageaient préférentiellement dans l'une ou l'autre branche d'un montage en Y. Chaque branche était formée par un tube garni de quatre plots qui pouvaient être interconnectés de l'extérieur selon diverses combinaisons. Les poissons se sont montrés capables de reconnaître les combinaisons établissant des liens horizontaux ou verticaux. La situation choisie s'inspirait du mode de vie naturel de ces animaux, qui évoluent essentiellement dans les boyaux obscurs du lit encombré de cours d'eau turbide où leur sensorialité particulière leur permet de naviguer.

Dans ces travaux, les stimuli autant que les réponses étaient strictement prédéfinies. Ces réponses étaient le fruit d'un « *shaping* », et montraient donc une capacité perceptive, mais non une réaction spontanée susceptible de s'exprimer dans la nature. Cette approche familière au laboratoire démontre plus les *facultés* de l'expérimentateur à manipuler le comportement du sujet que la façon dont fonctionne *normalement* ce sujet hors des conditions strictes de l'expérimentation. Cette attitude de l'homme dominant la nature et manipulant ses congénères va peu à peu faire place dans les années 2000 à une approche plus centrée sur le sujet et ses comportements spontanés.

3. Retour aux comportements spontanés et à la mise en situation

Les travaux de psychophysique qui vont suivre sont basés sur des réactions spontanées et non dictées par l'expérimentateur : il s'agit de la tendance du sujet à explorer préférentiellement certaines situations. Le paradigme utilisé permet d'avoir des informations sur sa sensibilité aux caractéristiques de l'objet exploré sans avoir à longuement préparer une réaction standard prédéfinie.

Un premier type de réponse spontanée émerge dans le *test de reconnaissance d'objets*. Deux objets identiques sont soumis à l'animal en une première présentation ; en une deuxième présentation, il est confronté à une nouvelle paire, dont l'un seulement des deux objets est identique au précédent. Lors des deux confrontations, l'animal réagit en se rapprochant des objets présentés ; s'il les

distingue lors de la deuxième confrontation, il passe plus de temps autour de l'objet nouveau. Avec des neurophysiologistes du Centre de Recherche du Service de Santé des Armées (unité de Radio-protection), nous avons appliqué ce test à des rats, et mis en évidence l'effet délétère d'un stress systémique (brûlure non douloureuse) sur leurs capacités cognitives, que nous avons mis en lien avec des variations cérébrales en monoxyde d'azote (Halm et al. 2006).

Cette tendance des animaux à l'exploration se manifeste chez l'homme dès le plus jeune âge. Avec les psychologues du « Labo Bébé » du Laboratoire de Psychologie et Neurocognition, nous avons testé l'attirance préférentielle du regard d'enfants de moins de trois jours pour des rythmes de flashes et de clics, et pour des mouvements de points lumineux respectant ou non des caractéristiques naturelles (loi de puissance $2/3$). De façon surprenante, alors que dans la même situation, les nouveau-nés orientent leur regard préférentiellement vers les trajectoires non naturelles plutôt que naturelles (Meary et al. 2007), il semble qu'à cet âge, ils ne réagissent pas à ces rythmes ponctuels. Selon les chercheurs du Laboratoire Cognition et Développement de l'Université René Descartes qui ont poursuivi notre investigation, l'attirance vers les flashes et les clics répétés se révèle par contre chez des bébés plus âgés (Graff et al. en prép.).

Les variables dépendantes employées dans ces expériences, issues d'un comportement spontané étaient binaires : le choix était limité à deux alternatives (*double forced choice*, double choix dit « forcé » entre deux objets, deux rythmes, deux mouvements...). Les recherches suivantes examineront aussi des comportements spontanés, mais la variable sera quantitative.

4. Spontanéité et psychophysique

Chaque impulsion électrique émise par un mormyre lui fournit des informations sur le milieu environnant. La finesse de l'image électrique qu'il obtient augmente avec la cadence des émissions. Lorsque le milieu change, lorsqu'il se déplace, le poisson accélère le train de ses décharges. Cette accélération transitoire, forme ainsi une « *novelty response* ». Avec l'aide de stagiaires en Biologie des Organismes et des Populations (Université Joseph Fourier) nous avons testé les facultés des mormyres à discerner des différences dans les paramètres diélectriques d'objets placés à proximité, et obtenu de véritables courbes psychophysiques. Ces courbes montrent entre autres les capacités respectives de trois espèces, dont chacune émet une décharge différente. La réponse était quantifiée par des méthodes originales d'étude des rythmes ponctuels, basées sur des statistiques de rang. Avec l'aide d'un étudiant en Ethologie et Chronobiologie (Paris 13) nous avons surtout montré pour la première fois que le poisson était sensible aux caractéristiques diélectrique de *polarité* des objets, idéalisées par une diode (Avril et Graff 2007).

Les spécialistes en psychologie de la temporalité (*timing psychology*) considèrent classiquement que les humains diffèrent les uns des autres par un *tempo moteur spontané* ou TMS qui détermine leur cadence propre, plus lente ou plus rapide selon l'individu, dans diverses activités. Ils emploient abondamment des paradigmes de *finger-tapping* (frappes répétées du doigt), se focalisant sur la production de rythmes dit *isochrones*, c'est-à-dire formés de tapes successives séparées par un intervalle de même durée. Pour évaluer le TMS, ils laissent la personne frapper à la cadence

qui lui paraît confortable. Par contre, pour évaluer les compétences motrices et cognitive nécessaires à maintenir un rythme isochrone, ils emploient un tempo *imposé*. Typiquement, l'individu s'accorde au tempo fixé par un métronome, et poursuit ses tapes aussi fidèlement lorsqu'il s'arrête. Or l'étude de la régularité d'un rythme isochrone peut se passer d'une telle contrainte. Nous avons enregistré des séquences isochrones suivant chacune une cadence semi-spontanée, différente d'un individu à l'autre selon son choix. Elles ont permis d'estimer la régularité à partir de la dispersion des durées d'intervalles entre tapes successives, maintenues aussi régulières que possible. L'ampleur des différences entre intervalles donne une forme de « seuil différentiel moteur » ou « *Just Tenable Difference* » (Graff & El Methni 2011). Avec l'aide d'étudiantes en psychologie cognitive, sur cette consigne simplifiée et une durée d'enregistrement réduite, nous avons pu montrer chez des enfants entre 6 et 10 ans une nette progression des performances avec l'âge. Les résultats nous permettent d'établir une extension de la loi de Weber (une base de la psychophysique *perceptive*) en production (*motrice*) : tout comme la Just Noticeable Difference ou seuil différentiel perceptif, la JTD est fondamentalement proportionnelle à l'étalon. Cet étalon est la durée moyenne des intervalles entre tapes, qui est choisie spontanément. Les invariants et les facteurs de changement que la JTD permet de révéler ont été vérifiés par des répliques sur plusieurs populations (Graff et al 2006).

La division du seuil différentiel ou JTD par son étalon théorique, la moyenne des intervalles de la séquence, produit l'équivalent d'une fraction de Weber motrice. Cette fraction de Weber permet de mettre en évidence des différences selon les cadences chez un même individu : les enfants sont de moins en moins précis aux tempos plus lents. Ce gradient d'abord important, qui s'atténue avec l'âge, n'existe pas chez l'adulte. Pour l'expliquer, nous avons posé deux hypothèses : 1) la part cognitive détermine majoritairement la durée entre les tapes lorsqu'elle est longue, alors que la part motrice reste la même à toutes les cadences ; 2) la maturation de la composante cognitive est plus tardive que celle de la composante motrice. Pour confirmer la première hypothèse, avec un étudiant en psychologie cognitive, nous avons, perturbé de jeunes adultes produisant des séquences de *finger tapping* isochrone semi-spontané à différents tempos par des tâches distractives tantôt motrices et tantôt cognitives ; les performances sont effectivement plus ou moins affectées selon que les cadences sont plus rapides ou plus lentes, et de façon inversée selon la nature de la tâche (Graff, en préparation).

Ces expériences montrent qu'il est possible d'extraire une variable quantitative, psychométrique, à partir d'activité semi-spontanée impliquant un profil individuel, et de la manipuler.

5. Emergence des comportements adaptatifs

Dans des conditions environnementales bien définies, un animal exprime un comportement propre à son espèce. Ce comportement (déterminé par des caractéristiques innées de sensorialité et de motricité), émerge aussi en fonction d'apprentissages acquis avant le moment du test, et/ou élaborés en cours de route, selon les particularités de la situation expérimentale.

Avec la collaboration de cétologues du Centre de Neurosciences, équipe de

Bioacoustique de Paris-Sud et du Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes de l'Université de Toulon, nous avons caractérisé le rythme d'émission de clics d'écholocation de dauphins captifs lorsqu'ils se positionnent sur un objet pointé par leur entraîneur, afin de le comparer à celui de congénères capturant une proie. Il en ressort un profil caractéristique avec une augmentation de la cadence à l'approche de l'objet (apportant une plus grande finesse de l'image acoustique), qui est limitée par les contraintes propres à la propagation du son dans l'eau. Ces contraintes expliquent une dépendance de la cadence à la distance à la cible qui se conclut par un arrêt lorsque l'animal est trop proche de la cible (Augier et al, en préparation).

L'accélération progressive de la cadence d'émission de signaux de sondages de la phase de navigation à la phase de détection puis de discrimination de la cible est commune aux cétacés en écholocation et aux poissons électriques en électrolocalisation. Nous avons posé l'hypothèse que dans une situation analogue, n'importe quel agent en réception active adapterait son rythme d'émission de sondes impulsionnelles de façon comparable. Avec une étudiante en psychologie cognitive, nous avons demandé à de jeunes adultes (humains) de naviguer, de détecter et de discriminer des cibles à l'intérieur d'un espace constitué d'une surface plane (table), uniquement en tapant du doigt couvert d'un dé à coudre et en écoutant la sonorité variable rendue par des revêtements plus ou moins épais déterminant des zones, des cibles et des formes particulières. Le résultat est bien en accord avec le principe de convergence adaptative des stratégies comportementales émergeant dans des environnements similaires : l'homme adopte spontanément un rythme ponctuel de paramètres semblables à celui du cachalot en conditions analogues. Le paradigme est repris en collaboration avec l'équipe *Control and Perception Lab* de l'Université de Fribourg, en employant une table tactile pour la maîtrise de l'enregistrement des tapes et la manipulation du son qu'elles provoquent.

6. La perspective évolutionniste

Après le premier choc retentissant de la sociobiologie dans les sciences humaines, l'écologie comportementale a ouvert des voies politiquement correctes à la psychologie évolutionniste, réunissant les chercheurs en sciences humaines convaincus que les mêmes principes darwiniens ont produit les différents taxons caractérisés par leur anatomie et leur physiologie, mais aussi par leurs traits de comportement individuel et social.

Parmi les mécanismes biologiques élémentaires, ceux de la transmission génétique sont les plus universels et les plus fondamentaux. Si les liens de parenté conditionnent une grande partie des comportements sociaux, encore faut-il que ces liens soient perceptibles par les individus concernés. A partir de photos de visages, nous avons montré la capacité des gens à détecter un lien de parenté entre des personnes de la même population mais aussi de populations étrangères. Cette faculté dépend en partie de l'histoire individuelle de la personne testée (Kaminski et al. 2010). Elle n'avait été objectivée jusqu'alors que sur des animaux non-humains.

L'importance des liens de parenté intervient dans les comportements altruistes mais aussi dans le choix du partenaire sexuel, l'inceste étant en général évité. Par une procédure de questionnaire en ligne, nous testons en ce moment avec des membres

du Laboratoire Cognition, Langues, Langage, Ergonomie de Toulouse la réaction des gens à l'éventualité de reproduction incestueuse ou par clonage. Pour cela, nous proposons un scénario dans lequel les conditions environnementales et sociales sont soigneusement verrouillées, une procédure de mise en situation virtuelle qui reprend le principe de l'éthodrame proposé dans les expériences ci-dessus.

B. Développement d'outils de recherche

1. Dispositifs de conversions transmodales

L'approche comparée des comportements de navigation de diverses espèces m'a permis de développer une certaine compétence dans la conversion de signaux d'une modalité sensorielle à l'autre. En effet, les micro-décharges des poissons électriques sont imperceptibles pour l'homme et une approche intuitive de leur comportement électrique ne peut pas se faire comme pour les signaux acoustiques ou visuels produits par d'autres espèces. De plus je me suis concentré préférentiellement (mais non exclusivement) sur les rythmes ponctuels pour comparer les productions motrices, et sur des fonctionnalités de réception active comme l'écholocalisation et l'électrolocalisation. J'ai ainsi conçu des appareillages novateurs

a) Le Mormyrophone®

L'étude des rythmes ponctuels de diverses origines passe par le recueil puis le traitement de données qui possèdent des caractéristiques communes. La mise en forme de ces données par des fichiers de même standard permet d'employer ensuite des routines de traitement qui sont valables sur une grande variété de phénomènes de départ, comme cela est détaillé dans la partie « Etude de rythmes ponctuels » de ce dossier. La base de ces traitements consiste en fichiers de format fixe portant l'extension *.DAT, et contenant essentiellement la liste des intervalles entre impulsions en millisecondes. Au départ, ce format était produit par une famille de logiciels en langage C élaborés avec l'aide de nombreux stagiaires de l'IUT GE2I de l'Université Joseph Fourier, permettant l'enregistrement et la visualisation en temps réel de l'activité électrique des mormyres.

Le signal attendu en entrée est de forme TTL, une suite d'impulsions standard, chacune de 1ms et 5v. Pour l'étude des mormyres, elle est produite par un montage électronique appelé DD (Détecteur de Décharges). Celui-ci reçoit les micro-décharges du poisson libre dans son bac à partir de deux jeux d'électrodes reliés à deux entrées différentielles. Sur deux voies, le signal est pré-amplifié, filtré, amplifié de façon réglable, et enfin, par un trigger de Schmitt et une bascule à retardateur, transformé en signal TTL de 1 ou 2ms. Le signal du poisson capté en entrée de chaque voie variant avec l'orientation et la distance par rapport aux électrodes, la position des électrodes placées aux diagonales de l'aquarium assure que le signal est détecté sur une voie s'il est trop faible sur l'autre. Une porte logique de type « *ou inclusif* » permet ensuite de combiner en un signal TTL sur une seule sortie le produit du traitement effectué sur les deux voies (Graff, TP 2014).

Le logiciel Acqdidat écrit en langage C est associé à ce montage électronique pour constituer le dispositif appelé « Mormyrophone® » dont la marque a été déposée

avec l'UPMF. Ce montage convertit en temps réel l'activité du Mormyre ramenée à un rythme ponctuel en signaux acoustiques et visuels selon une quadruple bijection assurant une stimulation visuelle et auditive adaptée à l'humain. Il permet d'appréhender de façon intuitive les comportements électriques spontanés ou provoqués de l'animal qui éveillent ainsi un intérêt certain de la part de l'auditeur/spectateur, puisqu'il a pu être commercialisé (Aquarium public de Lyon) et est utilisé pour des travaux pratiques de comportement animal proposés aux étudiants de psychologie (UPMF) et de formation à l'expérimentation animale (UJF), et attire des milliers de curieux de tous niveaux lors de manifestations comme de la « Science en Fête ».

b) L'impulsionneur

Pour passer de l'étude de rythmes d'impulsions électriques de poissons à celle de rythmes de *finger-tapping* produits par des humains, j'ai conçu un appareil appelé « Impulsionneur » qui convertit justement le contact du doigt sur une surface dure, plate et lisse, quelle que soit la force et la durée de l'appui, en impulsion électrique de standard TTL compatible avec les logiciels en aval. Ce standard est préférable, aux boutons poussoirs ou à la manette de Morse couramment utilisés, car ceux-ci possèdent chacun des caractéristiques mécaniques propres (résistance, élasticité, etc.). Ces différences limitent une réplification fiable des expériences qui permette de généraliser les résultats produits. La conversion en impulsion d'un contact du doigt ou d'un autre élément sur un tel support (lisse plat, dur) constitue un standard universel, qui peut être connecté à de nombreux logiciels. Il peut s'agir des logiciels d'acquisition Lecdat ou de démonstration Acqdidat construits en langage C pour les poissons électriques, mais aussi d'un logiciel plus convivial d'acquisition-conversion qui a été développé en langage Java avec l'aide d'étudiants de l'IUT GE2I puis de l'ESISAR (INPG), appelé JaDe (Java-Dat). Une extension permet aussi de produire des frappes du pied sur une plus grande surface, toujours lisse, plate et dure.

c) Le logiciel JaDe

De nombreux signaux sonores peuvent être assimilés à des rythmes ponctuels, et de nombreux signaux électroniques peuvent être numérisés sous forme de fichiers audio. Le logiciel JaDe comporte une partie d'acquisition en format audio standard *.WAV, et une partie conversion du format *.WAV au format *.DAT. L'acquisition en format *.WAV peut aussi être effectuée par un logiciel courant tel que le magnétophone de Windows®, le logiciel libre Audacity® de Sourceforge.org®, ou un logiciel commercial comme Avisoft®, (pour lesquels l'impulsionneur peut être employé en place du microphone) ; le fichier *.WAV ainsi obtenu peut être traité par JaDe en une seconde étape. Cet utilitaire permet de ramener à une séquence de rythmes ponctuels divers signaux acoustiques comme des frappes des mains, des cris d'oiseaux, etc. Il est bien sûr compatible avec l'Impulsionneur et le détecteur de décharge DD ou toute sortie TTL. Il est très léger et facile d'utilisation, puisqu'il est employé par les étudiants de psychologie dans le cadre de travaux pratiques de psychophysique (UPMF). JaDe emploie l'horloge de la carte audio présente sur les ordinateurs multimédia, assurant une précision bien supérieure à la milliseconde, là où les performances d'autres utilitaires mesurant les durées restent parfois douteuses quand elles se basent sur l'horloge centrale d'un PC fonctionnant de façon multitâche.

Mes activités de conversion de rythmes d'origines diverses et de forme d'énergie quelconque en signaux faciles à appréhender par l'entendement humain m'ont permis d'acquérir des compétences susceptibles de contribuer au développement de dispositifs de substitution ou d'amélioration sensorielles. Avec des chercheurs en ingénierie du GIPSA-Lab de Grenoble et du LPNC, nous avons donc entamé des recherches sur un dispositif qui convertit la distance déduite d'un système infrarouge en mélodie, reçue sur des écouteurs et permettant de naviguer les yeux bandés (Stoll et al., en préparation).

2. Outils mathématiques

L'essentiel de mes études porte sur la faculté de l'homme ou d'un autre animal à détecter des différences entre signaux, donc de discrimination. La différence entre deux mesures physiques de même unité fournit une bonne mesure objective de la différence entre deux objets ou phénomènes à comparer, par exemple une suite d'intervalles de 600ms en moyenne et une autre de 810ms en moyenne différent de 210ms. Cette mesure de l'écart qu'on peut appeler différence arithmétique, est quasi-universelle et ne suscite aucune discussion. Cependant, s'il s'agit de comparer entre eux deux écarts (issus de deux paires d'objets), une estimation par la différence relative, souvent exprimée en pourcentage, apparaît souvent plus pertinente. Par exemple, entre 300ms et 500ms, la différence arithmétique est de 200ms, celle-ci est inférieure à celle de 210ms vue plus haut. Cependant cette différence de 210ms, quand elle est rapportée aux 600ms ou aux 810ms d'où elle est issue (soit 35% ou 26%), représente un écart qui peut être considéré comme relativement inférieur à l'écart exprimé par 200ms s'ils sont rapportés aux 300ms ou aux 500ms (soit 66,7% ou 40%) dont ils sont issus. Cette comparaison d'écarts effectuée sur la base de pourcentages soulève un problème puisque plusieurs valeurs peuvent être proposées pour exprimer le même écart ; l'embarras du choix du pourcentage à employer peut encore être élargi si l'on exprime les cadences en Hz plutôt qu'en ms. Je montre (Graff 2014) que la différence des logarithmes naturels (c'est-à-dire le logarithme népérien du rapport), exprimée en pourcentage, fournit une mesure objective universellement applicable qui comporte de nombreux avantages. Dans l'exemple proposé $\text{Ln}(810/600) = 30\%$ et $\text{Ln}(500/300) = 51,1\%$. J'appelle cette différence la différence géométrique.

Parmi les caractéristiques des rythmes irréguliers, le niveau d'irrégularité ou de diversité représente un axe fascinant de recherche, suscité par la variabilité de l'activité électrique des mormyres, très grande par rapport à d'autres agents. Intuitivement, on s'accorde assez facilement pour reconnaître qu'un pattern est parfaitement régulier, plutôt régulier, plutôt irrégulier ou tout-à fait aléatoire. Ces notions se rapprochent de l'entropie de Shannon (ou de Renyi); cependant les entropies se calculent à partir de probabilités caractérisant un processus théorique, et non des productions finies, seules accessibles à l'expérimentateur. Je propose donc de quantifier l'irrégularité des productions, comme on quantifie l'entropie des processus, et d'examiner les relations qu'ils entretiennent. Un processus théorique tel qu'un rythme, lorsqu'il est parfaitement régulier, ne peut générer que des productions, des séquences, parfaitement régulières ; par contre un processus parfaitement aléatoire peut générer des productions dont l'irrégularité est plus ou moins élevée, mais plus ou moins fréquemment. Une pièce de monnaie conforme peut aussi bien tomber cinq fois de suite sur pile, qu'alterner trois piles et deux

faces ; un dé parfait peut générer la suite 123456 avec la même probabilité que 111111, ou que 135224, mais je considère la dernière combinaison comme une production plus *irrégulière* que les précédentes. Je propose la notion et le terme d'*irrégularité* (ou de *diversité*) pour caractériser des productions finies, homologues à la notion d'entropie caractérisant des processus ; je propose une formule de calcul de cette diversité (appliquée aux productions), et recherche la relation qui unit l'entropie d'un processus infini avec la régularité des productions finies qu'il est susceptible de produire. En une première étape, avec l'aide d'étudiants en mathématiques de l'UPMF, et de l'INPG, j'ai réussi à déterminer l'Irrégularité Moyenne d'une Production Issue d'un Processus d'Entropie Maximale (en fonction de la taille de la production et du nombre de réalisations possibles) ; cette « IMPIPEM » représente un point de normalisation pour comparer entre elles des irrégularités relatives de productions d'effectifs différents (Graff, en préparation). Ces mesures de diversité ainsi définies concernent pour le moment des variables qualitatives indépendantes, mais des pistes sont ouvertes pour des variables quantitatives.

C. Perspectives générales

Mes préoccupations de recherche se maintiennent sur trois plans :

- Définir les procédures de réception active, en particulier dédiées à la navigation ; les appliquer à des dispositifs de conversion intermodale bio-inspirés pour l'amélioration sensorielle et perceptive
- Modéliser les phénomènes psychophysiques, en focalisant sur les rythmes ponctuels irréguliers, et sur les mesures de différences et de diversité dans la temporalité.
- Approcher le sujet dans un contexte éthologique, c'est-à-dire en incarnant sa cognition et en situant son comportement dans une histoire évolutive guidée par l'adaptation.

1) De nombreux systèmes de navigation (écholocalisation de chauves-souris et de dauphins, percussion chez l'aye-aye, électrolocalisation chez les Mormyres) emploient des signaux impulsionnels qui forment des rythmes ponctuels. L'approche bio-inspirée me permet de contribuer au développement de dispositifs d'amélioration sensorielle, en particulier par la conversion de signaux recueillis dans une forme particulière d'énergie en stimuli facilement perceptibles par l'humain (Stoll et al, soumis).

2) Le clignement spontané des yeux varie selon différents contextes cognitifs et sociaux, il est très faible chez les bébés mais aussi chez les mères qui sont en interaction avec eux (Descroix et al, soumis). Des séquences de rythmes ponctuels constitués par les clignements des yeux peuvent être extraits des enregistrements d'eye-tracking. Nous voudrions examiner l'importance des clignements spontanés des yeux dans la métacommunication.

3) Le modèle d'horloge mentale (internal clock) proposé par Treisman et repris par de nombreux auteurs travaillant sur le finger-tapping doit être revu d'après les derniers résultats obtenus sur des rythmes isochrones par une analyse des durées dans un espace logarithmique.

D. Conclusion

Ma formation d'éthologie privilégie des paradigmes dans lesquels les particularités et les constantes comportementales émergent de l'environnement dans une dialectique adaptative. La relation entre le sujet et son milieu est déterminée par des systèmes sensorimoteurs propres à l'espèce, qui définissent les paramètres pertinents à étudier. Pour appliquer le principe sémiotique de Saussure « C'est la différence qui fait le signe », la psychophysique nécessite de définir au mieux les hétérogénéités dans les stimuli et dans les actes. Pour les approcher, ma modélisation mathématique amène des mesures de différence relative, de diversité des échantillons et de richesse des palettes. Celles-ci facilitent la conversion de paramètres pertinents en stimuli distinctifs et en patterns perceptibles. Parmi eux, la durée, indissociable de tout comportement et sur laquelle se construisent les rythmes, représente mon paramètre favori.

PUBLICATIONS CITEES

AUGIER, DOH, Y. DELFOUR, F., ADAM, O., GLOTIN, H. & GRAFF, C. (Submitted) Self-jamming avoidance responses of echolocating dolphins. – J. Exp. Biology.

DESCROIX, E., CHARAVEL, M. & GRAFF, C. (in preparation). Spontaneous eye-blink during nursing: A longitudinal study on term and premature infants and their mothers. – Developmental Biopsychology

GRAFF, C. (1982). Le canari (*Serinus canaria*, Fringillidae) comme animal de laboratoire. – Rapport de Mission auprès du Ministère des Relations Internationales.

GRAFF, C. (1986). Activité électrique et comportement social du poisson électrique à faibles décharge (*Marcusenius macrolepidotus*, Mormyridae). – Thèse de l'Université de Paris XI, Orsay.

GRAFF, C. (1987). Recording electrophysiological signals from small moving animals: electrode fixation and low-torque swivel for recording one electric fish in a group. - J. Neurosc. Meth. 19, p. 95-104.

GRAFF, C. (1989). Firing activity of the weakly-electric fish *Marcusenius macrolepidotus* (Mormyridae, Teleostei). Logarithmic distribution of inter-pulse intervals and sequential inequality testing. - Behaviour 109, p. 258-284.

GRAFF, C. (2014). Expressing relative differences (in percent) by the difference of natural logarithms. – Journal of Mathematical Psychology, in press

GRAFF, C. & KRAMER, B. (1992). Trained weakly-electric fish *Pollimyrus isidori* and *Gnathonemus petersii* (Mormyridae, Teleostei) discriminate between waveforms of electric pulse discharges. - Ethology, 90(4), 279-292.

GRAFF, C., KAMINSKI, G., OHLMANN, T. & GRETTY, M. (2004). Electric fish

perceive and abstract 3xD features in their electric fields and recognise their presence in novel shapes. – *Current Biology* 14(9), 818-823.

HALM, M.P., POQUIN, D., LESTAEVEL, P., CHANCERELLE, Y. & GRAFF, C. (2006). Brain and cognitive impairment from burn injury in rats. – *Burns*, 32(5) 570-6.

MEARY, D., MAZENS, K., KITROMILIDES, E., GRAFF, C. & GENTAZ, E. (2007). Four-day neonates look longer at non-biological motions of a single-point of light. – Public Library of Science ONE.

GRAFF, C., MEARY, D., FRICHEL, M. & GENTAZ, E. (*en preparation*). Visual attention for inter-pulse intervals in young infants.

AVRIL, A. & GRAFF, C., (2007). Active electrolocation of polarized objects by pulse-discharging electric fish, *Gnathonemus petersii*. – *Journal of Comparative Physiology A.*, 193(12), 1221-1234

GRAFF, C., BIYADI, N., AZZAOU, F.-Z., AHAMI, A.O.T., ABOUSALEH, Y., ELKHETTANI, Y. (2006). Validation de moyens de recherche en psychophysique : transfert de technologie pour l'étude de rythmes ponctuels. - In : Santé, éducation, environnement (A.O.T. Ahami, Ed.). Digi Editions, Rabat. Pp. 82-90.

KAMINSKI, G, DRIDI, S, GRAFF, C., & GENTAZ, E. (2009). Human ability to detect kinship in strangers' faces: effects of the degree of relatedness. - Proceedings of the Royal Society of London, Biological Sciences, June 17. Doi 10.1098/rsbp.2009.0677

GRAFF, C. (2009). JaDe and the Impulsionneur. A set-up for the study of sequences of pulse intervals. - 12th Rhythm Production and Perception Workshop, Lille (communication orale).

GRAFF, C & EL METHNI, M. (2011). Développement de la précision temporo-motrice et cadences spontanées de jeunes enfants. - *Psychologie française*, 56(1),19-29 doi:10.1016/j.psfr.2010.11.003

STOLL C., PALLUEL-GERMAIN R., FRISTOT V., PELLERIN, D., ALLEYSSON, A. & GRAFF, C. (soumis). Navigating from a depth image converted into sound. – *Applied Bionics and Biomechanics*

NOTE PROSPECTIVE PRESENTANT LES ORIENTATIONS FUTURES (PROGRAMME A 4 ANS)

Mon projet développera et exploitera le modèle théorique des rythmes ponctuels, c'est-à-dire de suites d'événements brefs, ou impulsions, séparés par des intervalles de durée variable. Ces impulsions peuvent être des actes moteurs ou des stimuli sensoriels, et dans des boucles sensori-motrices particulièrement simples à aborder, les deux à la fois. Ainsi, des frappes du doigt, des clignements des yeux et des clics synthétiques, forment :

- a) dans un contexte de communication, des signaux émis et/ou reçus, et
- b) dans un contexte de navigation, des sondes émises et reçues.

Grâce aux nombreuses extensions de ce modèle central, mes recherches rejoindront directement plusieurs objectifs de l'équipe « Perception et Sensori-motricité » (PSM) du Laboratoire de Psychologie et NeuroCognition (LPNC) en particulier l'axe explorant le rôle de l'information sensorielle dans la perception de l'espace et la navigation. Ce projet contribuera également fortement au développement de l'axe transversal « Modélisation » du LPNC.

Axe 1 : Modélisation des différences relatives et de l'irrégularité en psychophysique

Ce premier axe poursuit un travail d'abstraction dérivé de la théorie psychophysique de la mesure. Il sert de base aux autres opérations de recherche. Il enrichira l'interprétation d'une tâche simple permettant l'évaluation de l'évolution des capacités motrices et temporo-cognitives de jeunes enfants ou de personnes vieillissantes.

a. Usage d'échelles logarithmiques

La loi de Weber-Fechner établit une relation linéaire entre les différences de stimuli perçus et les différences de logarithmes des stimuli physiques ; la loi de puissance de Stevens établit une relation linéaire entre le logarithme des stimuli appliqués et le logarithme des stimuli perçus, exprimés sur une autre échelle. Il me semble que l'usage préalable d'échelles logarithmiques s'impose *a priori* dans les mesures des durées ou des fréquences non seulement des stimuli, mais aussi des réponses motrices. Cette posture est basée et étayée par une longue expérience sur des modèles très variés de rythmes en biologie du comportement (Graff, en révision). Je propose d'étendre encore ce principe à la mesure des distances, des énergies ou des masses (mesurées en unités du Système International) des phénomènes ou des objets qui constituent les stimuli et les actions ; il paraît en effet que les correspondances entre divers paramètres des objets et phénomènes physiques réels, qu'ils soient de nature biologique, minérale ou artificielle sont, en hypothèse nulle, reliés par des lois de puissance (c'est-à-dire linéaires sur une échelle log-log) indépendamment de l'expérience humaine. Cette correspondance objective servirait de guide essentiel pour la conversion et la synthèse de stimuli efficaces en substitution et en amélioration sensorielle, un champ d'application de la psychophysique en plein développement.

b. Estimation de la diversité

La variété, diversité ou irrégularité de nombreux objets ou phénomènes, en particulier les rythmes, est un paramètre qualitatif pour lequel un accord peut en

général être facilement obtenu par des observateurs indépendants. Ils placeront sur la même échelle ordinale l'activité d'un métronome, les battements du cœur, les chocs d'une balle de tennis, les frappes de grêlons sur un toit. Je propose un mode de mesure qui permettrait de distinguer différents niveaux d'irrégularité sur une échelle quantitative, en tenant compte du nombre de possibilités offertes par le système et de la taille de l'échantillon. J'ai ainsi défini un calcul de l'Irrégularité Moyenne Issue d'un Processus d'Entropie Maximale (IMPIEM), un repère fondamental pour de telles estimations. Il reste à définir les propriétés de la distribution autour de celle-ci.

c. Complexification du modèle des rythmes ponctuels pour une application étendue

Dans un rythme ponctuel unidimensionnel, les impulsions sont théoriquement toutes identiques ; il se limite à une dimension unique, le temps qui sépare les intervalles inter-impulsions. Ce modèle qui a l'avantage d'être minimaliste suffit à générer la diversité faisant l'objet du travail théorique ci-dessus (b) et peut être décomposé pour extraire des facteurs sous-jacents comme dans la tâche motrice présentée ci-dessous (d).

La communication nécessitera une complexification du modèle, car elle implique nécessairement deux agents, et la distinction entre les signaux qu'ils échangent. Dans un rythme composite émergeant de la superposition des deux rythmes individuels (rythme ponctuel bi-agent) les paramètres se multiplient : par exemple, les latences entre les clignements des yeux de deux interlocuteurs, ou entre les clics d'un métronome et les frappes d'un *finger tapping* qui le suit.

La navigation par réception active implique nécessairement une dimension supplémentaire qui caractérise les hétérogénéités portées dans la sonde reçue (rythme ponctuel marqué) ; par exemple la réflexion d'une sonde infra-rouge dépend de la distance à l'obstacle, la sonorité de frappes du doigt dépend de la nature du support touché. Ce modèle rejoint les séries temporelles classiques.

d. Application aux composantes motrices et cognitives dans la production d'un rythme isochrone

Le modèle du rythme ponctuel simple permet d'aborder la précision du geste. Un mouvement volontaire comprend des étapes de planification et de réalisation qui dépendent de structures sans doute distinctes, mais en interaction. L'importance respective des deux composantes peut être mise en évidence dans une tâche simplifiée, le *finger-tapping* isochrone. Alors que les modèles mathématiques classiques présentent le résultat comme une *somme*, je propose un modèle de *produit* des deux processus impliqués, cognitivo-temporel et moteur. La pertinence du modèle peut être testée sur un *finger tapping* isochrone semi-spontané (divers tempos semi-imposés) associé à une tâche distractive perturbant soit la planification (tâche temporo-cognitive), soit la réalisation (tâche motrice). Des affinements du modèle sont en cours et d'autres tâches seraient souhaitables pour le confirmer au-delà des limites de ce paradigme. Le paradigme utilisé offre déjà un test simple d'évaluation de capacités motrices et temporo-cognitives qui peut avoir valeur de diagnostic ou de suivi.

* Ce test pourra aisément être adapté pour des évaluations (screening et suivi) de personnes souffrant de divers troubles liés au vieillissement, qui intéressent en particulier l'équipe *Mémoire et Développement* du LPNC.

Axe 2 : Mouvements oculaires et communication

Ce deuxième axe focalise sur les clignements des yeux et les croisements de regard, assimilables à des impulsions formant des rythmes. Les clignements sont couramment enregistrés mais inexploités par des méthodes d'eye tracking parfaitement maîtrisées au LPNC. Le croisement du regard représente une hypothèse originale sur la communication para-verbale et par le visage seul, en particulier chez le nourrisson, un thème relevant des modèles biologiquement plausibles de la perception visuelle.

a. Rôle communicatif des clignements des yeux

Notre étude des clignements des yeux des nouveau-nés et de leurs mères en situation d'allaitement confirme un taux bas connu chez les nourrissons, mais révèle surtout que la mère cligne très peu par rapport à une situation d'interaction verbale avec un adulte (article en préparation). Ces résultats en conditions « écologiques » et une méta-analyse de la littérature nous suggèrent un rôle essentiel de communication para-verbale du clignement des yeux qui ponctuerait l'échange conversationnel. Cette hypothèse communicationnelle n'a pratiquement pas été prise en compte jusqu'ici, les auteurs travaillant sur l'adulte recherchant plutôt des relations avec les émotions et avec l'engrammage par « *chunks* » au courant de l'apprentissage. Elle pourra être testée par une série d'expériences dans lesquelles sera aménagée une situation standard d'échange verbal ou non, avec ou sans interlocuteur visible, par un dispositif de type visioconférence. Ces travaux pourront profiter de l'équipement (*eye-tracker*) et de l'expertise de l'équipe PSM et de l'équipe M&D dans le suivi du regard, qui possèdent de nombreux enregistrements d'*eye tracking* dans lesquels les clignements, très accessibles, pourraient être exploités.

*Ce lien par le regard intéresse les professionnels de la communication ; il permettra d'obtenir un financement de thèse de la part de Maego Formation, Lyon.

b. Croisements du regard

Le cheminement du regard des humains adultes ou enfants et d'autres primates scrutant une image de visage montre une prépondérance de la zone oculaire, puis de la bouche et retour sur les yeux. Ces mouvements sont interprétés en termes de recherche d'information de la part du sujet, une hypothèse peu parcimonieuse pour un éthologue qui le décrirait plutôt en termes de stimulus-signe et de *fixed-action pattern* (FAP). En situation éthologique, les premières secondes de confrontation avec un nouveau visage seraient chez l'homme un moment important de prise de contact par croisement du regard. Ce croisement se répèterait plus ou moins abondamment si le contexte se prolonge selon les relations entretenues par les tâches en cours. Il interviendrait dans toute situation sociale en présence visuelle d'autres intervenants, où il pourrait constituer un marqueur important. On appelle effet d'audience le rôle joué par le regard de l'autre sur les choix individuels.

* Ce contexte fait justement l'objet d'un vaste projet de recherche ANR déposé par Olivier Pascalis (DR CNRS, responsable de l'équipe *Mémoire et Développement* du LPNC), concernant l'influence du groupe dans la prise de décision. Le rôle de l'audience doit y être étudié sous différents aspects (développement, psychophysique, imagerie cérébrale) qui mobilise d'autres équipes travaillant au Baby-lab et d'autres membres de l'équipe PSM spécialisés en neuro-imagerie et en modélisation bayésienne.

Axe 3 : Transcodage sensoriel et navigation

Ce troisième axe intéresse directement les boucles réception / action telles qu'elles existent dans de nombreuses procédures : l'acte moteur est la source des stimuli dont le traitement fournit l'information décisive aux choix ultérieurs (déplacements). Les modèles bio-inspirés proposent différents modes de codage qui peuvent être testés en milieu virtuel, puis appliqués à des dispositifs de substitution et d'amélioration sensorielle.

a. Navigation en espace virtuel

Les déplacements fonctionnels impliquent un échantillonnage des paramètres des lieux traversés et des objets (obstacles, cibles) rencontrés. Dans de nombreux systèmes biologiques, la prise d'information se fait par l'usage de signaux appelés sondes, envoyées par l'agent dans son milieu et reçues par le même agent sous une forme modifiée par les caractéristiques du milieu (réception active). De façon générale, la finesse de lecture dans l'espace dépend de la fréquence de répétition dans le temps, et l'agent modifie son activité selon la nouveauté ou l'intérêt des éléments rencontrés ou susceptibles de l'être. Cette règle générale, observée chez différentes espèces (chauves-souris ou dauphins en écholocation, poissons électriques en électrolocalisation), nous l'avons vérifiée avec succès lors d'une expérience pilote (mémoire de master), chez l'homme dans un contexte virtuel. Les figures rythmiques observées sont semblables à celles qu'expriment les animaux lorsqu'ils sont confrontés aux mêmes pressions de sélection adaptative, avec des spécificités qui dépendent de contraintes liées par exemple à la vitesse de déplacement de la sonde (acoustique ou électrique). Après avoir confirmé ces résultats sur un dispositif plus élaboré, nous voulons à présent tester les caractéristiques rythmiques qui émergent dans le contexte complexifié d'une interaction entre plusieurs agents : réponses d'arrêt et de latence privilégiée. Les sujets privés de vision se déplaceront du doigt sur une table tactile géante, avec des algorithmes de feed-back auditif en fonction des lieux et des objets d'un environnement virtuel. Les résultats devraient trouver leur application pour la mise au point de systèmes de substitution sensorielle robustes en situation écologique.

* Ce projet est en coopération avec Jean-Pierre Bresciani, Université de Fribourg et rattaché au LPNC, spécialiste de contrôle moteur et perception en milieu virtuel.

b. Conversion sonore de l'espace par marquage de signaux ponctuels

Le développement des micro-émetteurs, des micro-capteurs, et des processeurs numériques permet de plus en plus de sonder l'environnement et de délivrer un système atteignant d'une façon le système nerveux d'un professionnel ou d'une personne souffrant de déficience sensorielle. En biologie et en ingénierie, la constance de la sonde *envoyée*, soit continue, soit ponctuelle, facilite l'extraction de paramètres pertinents dans la sonde *reçue* lesquels dépendent des caractéristiques de l'environnement ainsi perçu. Nous avons participé à l'évaluation d'un dispositif convertissant en temps réel des sondes infra-rouges en sonorités variables selon la distance entre l'agent (personne aux yeux bandés) et les parois d'un parcours ainsi traversé avec succès, même confronté à une tâche distractive en parallèle (article en cours de rédaction). En effet l'information de profondeur est essentielle dans l'orientation spatiale. Je voudrais poursuivre en optimisant la fonction de transformation de la palette des distances à celle des sonorités afin de perfectionner

le dispositif destiné à remplacer ou améliorer la perception de l'espace en situation de déficience visuelle.

* Ce projet initié par David Alleysson et Richard Palluel-Germain (équipe *Perception et Sensorimotricité*),

Vincent Fristot et Denis Pellerin du Gipsa-lab, se poursuivra avec la contribution de jeunes déficients visuels de la Fédération Étudiante pour une Dynamique Études et Emploi avec un Handicap.

Axe : Rythmes cardiaques

a. Cordiphon

b. Carlatrithme

J. von Uexküll, *Mondes animaux et monde humain*, suivi de *Théorie de la signification* [1934], trad. P. Muller, Paris, Denoël, 2004