

L'appropriation pluridisciplinaire mais sélective des fractales en STAPS : modalités et effets de connaissance

Matthieu Quidu

Laboratoire sur les Vulnérabilités et l'Innovation dans le Sport (L-Vis), Université Lyon 1, Lyon, France

Reçu le 15 septembre 2015 – Accepté le 20 janvier 2016

Résumé. En formalisant les objets fractals, Mandelbrot a permis une révolution majeure en mathématiques. Comment les Sciences du sport, originellement extérieures à cette innovation, l'ont-elles intégrée ? Nous dégagons les conditions de possibilité du développement des fractales en STAPS. Celui-ci a consisté à conquérir une variété, certes limitée, d'objets et de disciplines. Cette croissance s'est appuyée sur trois réseaux, organisés autour d'un chercheur fédérateur. Malgré un fonctionnement indépendant, ces communautés ont permis d'installer une activité de science normale dont les traits caractéristiques sont : résolution de problèmes théoriques, sophistications méthodologiques, références à des travaux exemplaires communs. Nous en évaluons, indicateurs scientométriques à l'appui, les effets de connaissance (théoriques, ontologiques, pratiques) mais aussi l'impact réel sur le champ des Sciences du sport et au-delà.

Mots clés : Épistémologie, innovation théorique, analyse des séries temporelles, variabilité

Abstract. The multidisciplinary but selective appropriation of fractals in Sport sciences: forms and effects on knowledge.

Mandelbrot has created a major revolution in Mathematics formalizing the fractal objects. How did Sport sciences adopt this external innovation? We try to point out the conditions that make possible the development of fractals in Sport sciences. It consisted in conquering a broad, but limited, group of objects and disciplines. This growth is based on three communities, each organized around a unifying scientist. Despite an independent action, these communities permitted to create a normal science activity: resolution of theoretical problems, methodological sophistications and shared paradigmatic works. We consider, thanks to scientometric indicators, both theoretical and practical effects on knowledge and the real impact on Sport sciences and beyond them.

Key words: Epistemology, theoretical innovation, variability, time series

1 Introduction

Soit d'un côté les *fractales*, qui constituent une innovation « révolutionnaire » au sens de Kuhn (1983) ; initialement développées en mathématiques par Mandelbrot (1967, 1995), elles ont permis de rendre compte d'objets complexes, inintelligibles dans le strict cadre de l'espace euclidien. Soit d'un autre côté les *Sciences du sport*¹ ; ce domaine composite, institutionnellement délimité par la 74^e section du CNU, fait coexister en son sein une pluralité d'objets, de disciplines et de paradigmes (Collinet,

2003). Nous analyserons la rencontre entre les fractales et les Sciences du sport, originellement étrangères à cette découverte.

L'enjeu de notre analyse épistémologique sera d'étudier les *conditions de possibilité* du développement des analyses fractales en STAPS, les *modalités* de cette « appropriation » et les *effets de connaissance* qui s'ensuivent. Peut-on repérer des étapes dans le processus de développement par les STAPS de cette innovation ? Quelles sont les conditions, épistémiques et sociales qui l'ont rendue possible ? Quelles sont, à l'inverse, les résistances qu'il a fallu vaincre ? Quelles ont été enfin les conséquences de ce développement ? Peut-on repérer une « contribution en retour » des Sciences du sport à un mouvement de connaissances dont elles n'étaient pas à l'origine ?

¹ Bien que conscients des débats socio-épistémiques autour de ces appellations (Gleyse, 1995 ; Terral, 2003), nous utiliserons de façon indifférenciée les intitulés Sciences du sport, Sciences du mouvement et de la motricité, STAPS, 74^e section. . .

2 Quelques propriétés des fractales

Dès 1967, Mandelbrot pointe les insuffisances de la géométrie euclidienne pour rendre compte de la complexité des objets naturels : « *Les nuages ne sont pas des sphères, les montagnes ne sont pas des cônes et une écorce n'est pas lisse* » (Mandelbrot, 1995). Un objet fractal possède deux propriétés distinctives : l'*auto-similarité* et la *dimension fractionnaire* (Sapoval, 1997). La première décrit la possibilité de décomposer plusieurs fois un objet en sous-unités de telle sorte que chaque unité possède une structure homologue à l'objet global. La seconde, la *dimension fractionnaire*, différencie l'objet fractal des figures euclidiennes à dimension entière (Mandelbrot, 1967). La géométrie fractale a intéressé un vaste spectre de disciplines (géologie, informatique, physiologie...) qui ont démontré la structure fractale des branches des arbres, des voies pulmonaires, des circuits nerveux...

Mandelbrot a initié un second développement du concept de fractales dans le domaine temporel. Classiquement, les scientifiques ont négligé la variabilité dans le temps des systèmes, considérée comme un ensemble non-corrélé de perturbations aléatoires. À l'inverse, Mandelbrot a démontré que ces fluctuations, non seulement n'étaient pas aléatoires, mais présentaient, en outre, des structures typiques. Les fluctuations fractales possèdent deux caractéristiques principales : la présence de *dépendances à long-terme* et l'*auto-similarité statistique* (Delignières & Torre, 2012). Cette dernière signifie que les fluctuations sur une échelle de temps sont similaires aux fluctuations sur une autre échelle ; la série n'a pas d'échelle de temps caractéristique. Les corrélations à long-terme signifient que la valeur actuelle dans une série n'est pas uniquement liée à la valeur précédente, mais conserve la mémoire d'un grand nombre de valeurs antérieures. Des fluctuations fractales ont pu être mises en évidence dans plusieurs systèmes complexes : tremblements de terre (géophysique), crues des fleuves (hydrologie), cours de la bourse (économie), battements du cœur (physiologie)...

3 Matériels et méthodes

3.1 Les fractales comme objet épistémologique

Pourquoi avoir choisi les fractales, plutôt qu'une autre innovation, comme support de notre étude de cas en STAPS ? Plusieurs particularités de ce renouvellement théorique nous ont tout d'abord interpellés : sa valeur révolutionnaire (au sens kuhnien) vis-à-vis de la géométrie euclidienne et de la temporalité linéaire déterministe ; son application par diverses équipes de recherche, dans plusieurs disciplines et sur des objets variés ; l'existence de débats internes méthodologiques et théoriques... Des considérations pragmatiques sont également intervenues : tout en étant significative et multi-facettes, la diffusion des fractales en STAPS demeure relativement circonscrite

d'un point de vue quantitatif², ce qui rend son analyse faisable. En outre, son développement est borné, 2003 marquant les premières publications sur les fractales dans le champ hexagonal des Sciences du sport.

3.2 Mode de constitution du corpus

L'étude de la propagation des fractales dans le *champ français des Sciences du sport*³ a nécessité la constitution d'un corpus se voulant exhaustif. Cet objectif s'est heurté aux contours flous du champ des STAPS qui apparaît divers, multi-tensionnel voire éclaté en sous-communautés (Collinet, 2003 ; Jarnet, 2004). Tout en correspondant à une réalité institutionnelle certaine (la 74^e section du CNU), les pratiques des chercheurs en STAPS s'inscrivent dans de multiples réseaux nationaux et internationaux de recherche, possédant des logiques diversifiées d'affiliation (thématiques, disciplinaires ou paradigmatiques). La définition minimale suivante a finalement été posée en guise de convention : sera considéré, dans le cadre de ce texte, comme appartenant au champ des Sciences du sport un chercheur possédant une ou plusieurs des propriétés suivantes : qualification en 74^e section, affectation/ou appartenance à un laboratoire en STAPS, travail sur des thématiques gravitant autour du sport, du mouvement ou de l'exercice.

Cette définition minimale posée, il s'est agi de regrouper un ensemble de textes utilisant le concept de fractales de 2003 à nos jours⁴. Compte-tenu de l'étendue du champ,

² Précisons que ce n'est pas l'ampleur de la diffusion d'une approche qui confère à son analyse épistémologique de la pertinence. Un programme possédant une propagation restreinte (bien que réelle) peut tout à fait donner lieu à des analyses fécondes, à la condition que celles-ci soient outillées et argumentées. Cela ne revient pas à avancer que l'étude d'une innovation théorique à large diffusion serait inintéressante ; celle-ci nécessiterait toutefois des outils analytiques et des protocoles méthodologiques spécifiques.

³ L'entrée par le champ *français des Sciences du sport* ne doit pas être vue comme une posture stricte et limitative. Il s'agit davantage d'une convention et d'un point de départ de l'analyse que d'un révélateur fidèle de la réalité des pratiques de recherche. En effet, dans le cadre des analyses fractales, des coopérations internationales sont fréquemment mises en œuvre, subsumant souvent les frontières disciplinaires et institutionnelles. Étudier un réseau suppose toujours de partir d'un point pour en retisser après-coup les ramifications, ce que nous tentons de faire en entrant par le champ hexagonal des Sciences du sport.

⁴ Des travaux sur les fractales continuent d'être publiés régulièrement. Nous tentons de saisir *sur le vif* une innovation en train de se faire, ambition qui contraste avec l'opinion que Bachelard se faisait des philosophes des sciences qu'il accusait d'être en retard d'une mutation de l'intelligence scientifique, de ne travailler que sur des problèmes scientifiques périmés. La contrepartie d'examiner une innovation *in process* pourrait être le manque de recul et de distance temporels dans

une analyse exhaustive de tous les organes de diffusion des travaux menés en STAPS n'était pas envisageable. Le corpus constitué ne pourra donc être qualifié de systématique ; il sera dit en revanche « occasionnel et provoqué » : *occasionnel* par contraste avec systématique ; *provoqué* par contraste avec aléatoire. En effet, par le truchement des recherches sur bases de données⁵, des analyses de sommaire de revues (*Movement & Sport Sciences...*), des actes de congrès (*Association des chercheurs en activités physiques et sportives...*), du répertoire des thèses, des renvois intertextuels et des *curriculum vitae* des chercheurs, nous avons pu constituer un corpus de soixante textes.

Pour chaque texte du corpus, seront analysés : le type de revue-cible, les co-signatures, les références bibliographiques, les objets et objectifs de l'étude, la nature des apports. Précisons que nous ne sommes pas personnellement spécialistes des fractales, notamment de leurs subtilités mathématiques. Nous avons néanmoins tenté d'en acquérir une compréhension minimale (ce qui implique, pour reprendre Collinet et Terral (2006), un certain « coût d'entrée » pour l'épistémologue) afin de saisir la nature des problèmes théoriques posés. Soyons clairs à ce stade : notre ambition n'est pas de proposer une synthèse des résultats mais d'analyser le développement de cette innovation dans un champ qui lui était originellement extérieur.

4 Conditions de possibilité du développement des fractales en Sciences du sport

4.1 Des conditions épistémiques de possibilité

4.1.1 Un besoin théorique réel

L'appropriation des fractales en STAPS correspond à un besoin théorique et méthodologique authentique, celui de pouvoir étudier l'historicité d'un système sur le long-terme. Il en va par exemple des travaux de Delignières, Fortes et Ninot (Fortes & Ninot, 2012 ; Fortes, Delignières & Ninot, 2004) sur la dynamique de l'estime de soi : les analyses fractales offrent l'opportunité de prolonger sur le temps long des outils de l'approche dynamique initialement concentrés sur les corrélations à court-terme.

Grâce à l'outil fractal, les auteurs opèrent un double changement d'échelle, tant sur la temporalité que sur l'entité considérées. Est désormais prise pour objet la *variabilité intra-individuelle d'un système singulier envisagé*

l'analyse. En effet, comme l'indique Sapoval (1997), le risque d'étudier une science en cours de constitution est que « le sens profond ou l'utilité véritable ne se révèlent qu'après-coup ». Nous tenterons de compenser cette difficulté par le déploiement le plus explicite possible d'analyseurs jugés pertinents.

⁵ Nous avons exploré des bases telles que *CAIRN*, *Researchgate*, *PubMed* en utilisant les mots-clés : « fractales », « bruit rose », « variabilité », « corrélations à long-terme »...

sur le temps long. Cette problématique a été traditionnellement occultée sous l'effet conjugué de la négligence pour l'historicité et de la concentration sur les tendances moyennes. Ce qui était un *bruit* dans les études « classiques » devient le *cœur* de l'analyse des chercheurs mobilisant les fractales. Celles-ci érigent en objet scientifique *légitime* des fluctuations qui étaient préalablement considérées comme « de la pollution secondaire » insignifiante (Delignières & Torre, 2012). Par les analyses fractales, la variabilité se voit dotée de structures significatives dont la détection renseigne sur le fonctionnement du système. En outre, l'observation prolongée des systèmes sur la durée permet de rendre compte de leur complexité intrinsèque, ce dont restent incapables des mesures ponctuelles ou trop brèves ; en effet, « *fractals are considered as the natural outcome of complex dynamical systems behaving at the frontier of chaos* » (Torre, Delignières & Lemoine, 2007).

4.1.2 Une conquête d'objets diversifiés

« *Comme il arrive souvent dans l'histoire des sciences, certains objets ou phénomènes ne semblent être pris en compte qu'à partir du moment où un concept clair permet de les analyser. La plupart des objets concernés par le concept de dimension fractale ont existé de tout temps, mais il manquait jusqu'à très récemment les mots pour le dire* » (Sapoval, 1997, p. 75). Les fractales ont offert, dans le champ des Sciences du sport, ce langage qui a permis de détecter des fluctuations à long-terme dans un nombre croissant de systèmes. L'année 2003 marque la publication des premiers travaux dans deux domaines indépendants des Sciences du sport.

D'un côté, Fortes soutient sa thèse en psychologie sociale de l'estime de soi. Celle-ci a été codirigée par Ninot et Delignières, respectivement spécialistes des jugements auto-évaluatifs et du traitement du signal. À partir de mesures répétées bi-quotidiennement sur un an et demi, Fortes démontre que l'estime de soi, classiquement considérée comme un trait stable, possède, à l'échelle d'un individu singulier, une dynamique non-aléatoire caractérisée par une mémoire à long-terme⁶.

Indépendamment, en physiologie de l'exercice, Billat étudie la variabilité cardiaque en course d'endurance. L'article *princeps*, publié en 2003 (Billat, Wesfreid, Cottin, Kapfer & Koralstein, 2003), se prolongera dans une série d'études (Bardet, Billat & Kammoun, 2009 ; Billat, Wesfreid, Kapfer, Koralstein & Meyer, 2006 ;

⁶ Un numéro spécial de la revue *Movement & Sport Sciences* a été consacré en 2007 à l'approche dynamique en psychologie sociale. Cette thématique a été récemment reprise par De Ruiter, Den Hartigh, Cox, Van Geert et Kunnen (2014). Actuellement en poste à la *Faculty of Behavioural and Social Sciences* de l'Université de Groningen, Ruud Den Hartigh a soutenu, en 2015, à l'université de Montpellier, sa thèse de doctorat, co-encadrée par Christophe Gernigon, Professeur à l'UFR STAPS.

Billat, Mille-Hamard, Meyer & Wesfreid, 2009; Khalfa, Bertrand, Boudet, Chamoux & Billat, 2012; Wesfreid, Billat & Meyer, 2005). Celles-ci consistent à appliquer diverses méthodes de traitement du signal (analyse des fluctuations redressées, détection des points de rupture...) sur différents indicateurs physiologiques (fréquence et coût cardiaques, débit ventilatoire...), auprès de catégories distinctes de sujets (athlètes professionnels ou de loisir, ouvriers postés), placés dans des conditions variées (marathon *versus* 10 000 m, vitesse libre *versus* imposée, alpinisme...).

À partir de 2003, les directions de recherches mobilisant les fractales vont se diversifier. Après avoir contribué aux travaux *princeps* sur la dynamique fractale de l'estime de soi, Delignières va encadrer les thèses de Lemoine (2007) puis de Torre (2008) sur la problématique des processus de timing, respectivement déclinée aux niveaux uni- et bi-manuel. Par la suite, des analyses homologues vont être mises en œuvre sur des habiletés cycliques plus globales. Il en va ainsi du rythme des pas dans la marche chez Delignières et Torre (2009a) ou Malatesta et Caillaud (2004). Ces derniers proposent notamment une synthèse des travaux de l'équipe d'Hausdorff (dont Hausdorff *et al.*, 1996) qui étudie l'altération des fluctuations fractales chez les sujets âgés et pathologiques. Un pas de plus vers l'étude d'une tâche sportive est franchi récemment par Den Hartigh, Cox, Gernignon, Van Yperen et Van Geert (2015) démontrant la présence de bruit rose⁷ dans une situation de rame sur ergomètre.

Une autre thématique, le contrôle postural, a donné lieu à analyses fractales. Cela a été le cas avec la thèse de Mouzat (2003) et les travaux de Delignières, Torre et Bernard (2011a et 2011b) ou Delignières, Deschamps, Legros et Caillou (2003)⁸. Les thématiques du contrôle de la marche et de la posture partagent une réflexion sur l'effet du vieillissement quant à l'altération de la fractalité. Cette thématique anime aussi Temprado dont l'équipe étudie par exemple les effets de l'âge sur la variabilité de l'activité corticale (Sleimen-Malkoun *et al.*, 2015) ou de la force isométrique (Vieluf, Temprado, Berton, Jirsa & Sleimen-Malkoun, 2015). Plus fondamentalement, chez Temprado, l'âge apparaît plus qu'une simple variable indépendante. Il s'agit de resituer les modifications de variabilité dans une compréhension globale de la dynamique de réorganisations fonctionnelles liées à l'âge au sein du système neuro-musculo-comportemental (Rey-Robert, Temprado & Berton, 2011).

Le pendant inverse de cette série de travaux réside dans la démonstration du rôle positif de l'apprentissage

sur l'installation d'une fractalité optimale⁹, ce que tendent à démontrer expérimentalement Nourrit-Lucas, Tossa, Zélic et Delignières (2015). Ces derniers comparent les performances d'experts et de novices sur un simulateur à ski. Les fluctuations fractales des experts s'avèrent plus structurées que celles des novices (voir aussi Den Hartigh *et al.*, 2015).

Mentionnons une dernière thématique de recherche, à laquelle Delignières a également contribué, les coordinations interpersonnelles, objet de la thèse de Marmelat (2014), notamment dans le cadre de la marche (voir aussi Palut et Delignières (2005) ou Collo (2011) sur une tâche d'oscillation manuelle).

4.1.3 Remarques conclusives sur les conditions épistémiques du développement des fractales en Sciences du sport

Les chercheurs en STAPS ont « conquis », de 2003 à 2015, un spectre varié de phénomènes. L'ordre dans lequel ils ont été investis est-il contingent ou relève-t-il d'une succession en partie prédictible (Soler, 2006)? Sans prétendre trancher le débat, nous percevons la force d'une thèse « inévitabiliste »¹⁰ suivant laquelle il existerait une *logique* explicative à la succession des objets, logique qui pourrait se retrouver à d'autres périodes de l'histoire des sciences et pour d'autres paradigmes¹¹. Ainsi, les chercheurs ne pourraient faire autrement que d'étudier initialement un objet isolé avant d'en envisager ultérieurement sa *combinaison* avec un autre élément. Par exemple, Lemoine (2007) aborde le timing uni-manuel avant que Torre (2008) ne décline cette thématique au niveau bi-manuel; en outre, des séries temporelles sont d'abord étudiées indépendamment avant que leurs cou-

⁹ C'est-à-dire manifestant le meilleur compromis entre stabilité, adaptabilité et flexibilité (Delignières & Torre, 2009b).

¹⁰ Cela ne minimise en rien l'intérêt de l'hypothèse inverse, contingentiste, suivant laquelle l'ordre de conquête des objets aurait pu être différent si les circonstances avaient été autres. La succession pourrait avoir été influencée par des considérations pragmatiques locales ou des incitations politiques.

¹¹ Le paradigme, ici entendu au sens *large* et synonyme de « matrice disciplinaire », définit un ensemble de normes épistémiques, de postulats ontologiques et de syntaxes délimitant une vision singulière du monde. Toutefois, comme l'a reconnu Kuhn lui-même, le terme de paradigme est particulièrement polysémique. Dans le cadre du présent article, nous l'utilisons également suivant deux autres acceptions : d'une part, le paradigme *expérimental* (comme la tâche de *tapping*) qui correspond à un protocole méthodologique « canonique » fréquemment mis en œuvre dans des études indépendantes et facilitant la comparaison des résultats; d'autre part, le paradigme comme *exemple exemplaire commun* renvoyant à un travail largement repris et diffusé dans la communauté, servant de modèle et de guide pour des études ultérieures.

⁷ À la différence du bruit « blanc », représentant des fluctuations aléatoires, le bruit « rose » renvoie à des fluctuations corrélées, donc partiellement prédictibles (Delignières & Torre, 2009b).

⁸ Un numéro spécial, « Perspectives actuelles en contrôle postural », de *Movement & Sport Sciences* est paru en 2011. Il intègre plusieurs textes proposant des analyses fractales.

plages ne deviennent l'objet même de l'analyse¹². D'autre part, les paradigmes expérimentaux iraient en se *complexifiant* : des tâches mono-articulaires (*tapping* digital par exemple) précèdent ainsi des tâches plus globales (la posture, la marche) avant d'aboutir à une motricité plus « sportive » (simulateur de ski, ergomètre), c'est-à-dire poly-articulaire et possédant une certaine pertinence écologique. Un autre axe d'évolution consisterait en l'adjonction progressive de variables indépendantes. Ces variables de *différenciation* sont par exemple chez Billat l'impact de la fraîcheur *versus* fatigue physique ou d'une allure libre *versus* imposée; Torre (2010) mesure quant à elle l'effet de la fréquence d'oscillation sur la stabilité des fluctuations fractales; d'autres travaux proposent de comparer les fluctuations fractales produites par des individus sains *versus* malades (Malatesta & Caillaud, 2004), novices *versus* experts (Den Hartigh *et al.*, 2015; Nourrit-Lucas *et al.*, 2015), jeunes *versus* âgés (Vieluf *et al.*, 2015). On entrevoit un nouvel axe structurant la conquête progressive d'objets, la prise en considération de l'historicité. On retrouve ces efforts récents d'*historicisation* au travers de la problématique de l'apprentissage, du vieillissement et de la réhabilitation. Delignières encadre par exemple, depuis 2014, la thèse de Hajy-Almurad qui projette d'« appliquer à la rééducation de la marche chez les personnes âgées » l'analyse des « processus d'appariement des complexités lors du couplage de deux systèmes biologiques ». Ces dernières thématiques débouchent sur le dernier axe d'évolution, la conception d'*applications* dans les domaines thérapeutiques et pédagogiques.

Concentrons-nous à présent sur l'*étendue* du spectre des domaines soumis à analyse. Celui-ci peut à première vue surprendre de par son ampleur et sa diversité. Nous soutenons à l'inverse que l'appropriation a été sélective et restreinte (sans qu'il ne s'agisse pour autant d'un épiphénomène), et qu'il aurait pu en être autrement. Notons tout d'abord que la géométrie fractale, qui était pourtant à l'origine de la découverte de Mandelbrot, n'a pas été mise en œuvre en STAPS. Elle aurait pourtant pu l'être en sociologie (Cibois, 2012), en géographie (Tannier, 2009) ou en anthropologie (Dehouve, 2014). Concernant l'analyse des fluctuations temporelles, elle aurait pu se diffuser en histoire (Lepetit, 1996), en économie (Zajdenweber, 1991) ou en sciences de l'information (Bocquet, 2013), disciplines qui l'ont expérimentée dans le champ académique général.

Pourquoi ces restrictions? Notons tout d'abord que les chercheurs en Sciences du sport qui ont développé des analyses fractales se sont heurtés à des résistances,

comme le rapportent Delignières et Torre (2012) à propos de la remarque d'un expert sur un article traitant du timing : « ce *reviewer* nous a opposé l'objection : pourquoi modéliser une horloge qui ne donne pas l'heure exacte? On se situe ici face à un obstacle épistémologique central ». S'opposent des conceptions ontologiques, voire des *thêmata* (Holton, 1981), antagonistes et difficilement compatibles : d'un côté la centration sur le statisme, la moyenne, le déterminisme; d'autre part la valorisation de la dynamique, de la singularité et du probabilisme. Bien qu'exerçant un effet potentiellement freinateur, ces tensions ontologiques ne sont pas réhibitoires et ont pu être surmontées. D'autres résistances ont nécessairement dû intervenir et sont schématiquement de trois types : axiologique, technique et sociale. Au niveau *axiologique*, interviennent en STAPS des conceptions antagonistes de la scientificité et de ses normes (Gleyse, 1991; Liotard, 2001). De ces dissensions pourrait naître une certaine réticence, par exemple en sciences sociales, à adopter des approches quantitatives parfois taxées de réductionnistes. Imaginons maintenant qu'un chercheur lambda dépasse ces réticences et pressente un potentiel heuristique certain dans les fractales. Passera-t-il pour autant à l'« acte expérimental »? L'obstacle *technique* surgit ici, impliquant la compétence à mettre en œuvre effectivement de telles analyses. Leur maîtrise dépend tout à la fois de la formation initiale et des possibilités de formation continue offertes par l'environnement professionnel direct. Interrogé en 2007 (Quidu, 2009), Delignières en rend bien compte : « *Les analyses fractales m'ont demandé une auto-formation, ce qui ne veut pas dire que je sois autodidacte; une auto-formation, c'est saisir les opportunités, les colloques, les séminaires. Quand on fait de la recherche, on est toujours en auto-formation, on n'arrête pas d'étudier, cinq heures de formation par semaine en séminaire.* » L'appartenance à des réseaux de recherche offrant ces possibilités formatrices est également déterminante et renvoie au troisième obstacle, d'ordre *social*.

4.2 Des conditions sociales de possibilité

4.2.1 Cartographie de la recherche sur les fractales en STAPS

Schématiquement, peuvent être identifiés trois pôles géographiques s'organisant, chacun, autour d'un chercheur fédérateur : Temprado à Marseille à l'*Institut des sciences du mouvement*; Delignières à Montpellier au laboratoire *Movement to Health*; Billat à Evry à l'*Unité de biologie intégrative des adaptations à l'exercice*. Le fonctionnement interne de chacun de ces réseaux est relativement homologue.

Tout d'abord, les auteurs fédérateurs écrivent avec leurs (ex-)doctorants, devenus parfois collègues : il en va ainsi de Fortes, Nourrit, Lemoine, Torre, Marmelat pour Delignières; de Sleimen-Malkoun et Rey-Robert pour Temprado; de Slavinsky et Petot pour Billat.

¹² Ce projet, récent, d'étudier les couplages est présent aussi bien chez Torre (qui encadre, depuis 2014, la thèse de Vergotte sur « les relations entre propriétés fractales de la variabilité sensorimotrice et des patterns d'activation corticale »), Temprado (Rey-Robert *et al.*, (2011) suggèrent d'étudier les couplages entre systèmes cognitifs et sensori-moteurs), ou Billat (voir Khalfa *et al.*, 2012).

D'autre part, les trois chercheurs cosignent fréquemment avec des auteurs qui appartiennent à la même institution qu'eux : Ninot et Bernard pour Delignières ; Berton et Jirsa pour Temprado ; Koralstein et Mille-Hamard pour Billat. Enfin, au gré des articles, les trois chercheurs nouent des collaborations plus ou moins durables avec des scientifiques extérieurs au champ hexagonal des STAPS, qu'il s'agisse de chercheurs étrangers en Sciences du mouvement ou de chercheurs extérieurs à ce domaine. Billat cosigne avec des médecins comme Chamoux et Boudet (CHU de Clermont-Ferrand) et des spécialistes de mathématiques appliquées : Meyer (ENS Cachan), Bardet (université Panthéon-Sorbonne), Bertrand (INRIA de Saclay)... De son côté, Temprado collabore avec Hong (Ohio Musculoskeletal and Neurological Institute), Perdakis et Müller (Max Planck Institute for Human Development, Berlin). Enfin, Delignières collabore avec des chercheurs en Sciences du mouvement comme Beek et Daffershofer (université d'Amsterdam), Repp (université de Yale) ou Balasubramaniam (université Merced) ainsi qu'avec des chercheurs plus « fondamentalistes » comme Kello (université Merced), Gilden (université du Texas), Madison (université d'Umea) ou Wagenmakers (université d'Amsterdam). Delignières et Torre (2012) évoquent leurs collaborations : « *Nous n'avons aucunement l'impression, comme d'aucuns ont pu le prédire voici quelques années, de subir une quelconque vassalisation au cours de ces échanges. Notre démarche est issue de problématiques liées au mouvement humain, nous empruntons des méthodes et des théories à d'autres champs mais nous les enrichissons en retour. C'est d'égal à égal que nous assumons collaborations et controverses, critiques et expertises.* »

4.2.2 Des réseaux indépendants et faiblement interpénétrés

Ces trois réseaux semblent se développer parallèlement, aussi bien en termes de coopérations effectives que de citations mutuelles. Ainsi, nous n'avons pas pu identifier de connexions entre d'une part les travaux de Billat et d'autre part ceux de Delignières et Temprado. Cette indépendance pourrait s'expliquer par une distance disciplinaire, thématique et méthodologique. Les relations entre les réseaux montpelliérain et marseillais sont également très rares, et ce en dépit d'une proximité d'objets, d'éclairages disciplinaires et d'implantations géographiques. Cette proximité pourrait justement être à l'origine d'une concurrence expliquant le peu d'interpénétration des réseaux. Une telle concurrence transparaissait dans l'entretien mené auprès de Delignières en 2007 : développer des analyses fractales, « *c'était un challenge, parce qu'il fallait faire son trou face au monstre marseillais. On n'est pas ridicule aujourd'hui, on tient la route* ». Quelques exceptions sont toutefois à noter dans ce développement parallèle global : Temprado a participé aux jurys de thèse de Torre et Lemoine et cite à quelques reprises les travaux de Delignières. Temprado, Delignières

et Torre ont également participé, en 2010, à un symposium commun dans le cadre du troisième congrès international « Complex systems in medicine and sport ».

Au-delà de ce paysage à trois réseaux, il existe quelques chercheurs plus isolés ayant proposé, de façon ponctuelle, des analyses fractales ; il en va ainsi de Collo (2011), de Malatesta et Caillaud (2004), qui étaient alors à Montpellier, ou de Mouzat (2003) dont la thèse a été co-encadrée par le statisticien Bertrand (qui collaborera à partir de 2008 avec Billat).

4.2.3 Des rapports contrastés aux fractales

Quels rapports les trois chercheurs fédérateurs entretiennent-ils vis-à-vis des analyses fractales ? La situation semble contrastée. Chez Billat, les analyses fractales s'inscrivent dans la continuité d'une approche physiologique de l'évolution des paramètres biologiques durant des efforts d'endurance en la prolongeant par une étude de la variabilité sur le long-terme. À l'inverse, chez Delignières et Temprado, la mise en œuvre des analyses fractales fait suite à une première « reconversion paradigmatique¹³ » qui les a vus s'éloigner du programme computationnel pour s'inscrire dans le paradigme des systèmes complexes. Après quelques travaux menés dans le cadre des approches « synergétique » et « physique naturelle » (Temprado & Montagne, 2001), les deux auteurs ont développé des analyses fractales qui viennent prolonger sur le long-terme les analyses dynamiques menées originellement à plus court-terme. Delignières rend compte de ce passage : « *Puis ensuite, les fractales, il faut à un moment donné se choisir un pôle d'excellence. On sentait l'intérêt, une vision sur les phénomènes rarement adoptée et puis une demande ; ce n'était pas idiot stratégiquement. C'est un peu bizarre, on voit passer l'opportunité et puis on bascule.* »

Delignières et Temprado se différencient toutefois quant à la nature et à l'intensité des rapports qu'ils entretiennent vis-à-vis des fractales. Pour le premier, qui s'y investit de façon intense, centrale et systématique¹⁴, il s'agit de relever un défi mathématique : « *Les recherches que je mène actuellement sont celles que j'aime mener. Mes analyses de la variabilité relèvent plus des mathématiques*

¹³ Notons que ces cas de reconversion paradigmatique sont finalement assez rares dans le champ des analyses fractales, notamment du fait de la difficulté à acquérir de nouveaux savoir-faire tacites, longs à incorporer, et *a fortiori* à changer de « monde subjectif » (Soler, 2014). La majorité des chercheurs y évoluant se sont d'emblée inscrits dans cette spécialité, en soutenant par exemple leur thèse dans le cadre de cette approche. Comme le suggèrent Kuhn (1968) et Favre (2012), les changements de génération de chercheurs seraient l'une des causes principales des mutations paradigmatiques.

¹⁴ La quasi-totalité des publications de Didier Delignières depuis 2003 propose des analyses fractales des fluctuations à long-terme, cet objet apparaissant de façon quasi-systématique dans le titre des articles.

appliquées¹⁵ que du contrôle moteur. Je n'ai pas écrit un article sans une équation dedans. Ce qui unifie mon parcours, c'est un regard quantitatif et mathématique sur les phénomènes. J'aime produire des articles avec de belles équations. J'essaie de faire parler ces systèmes d'équations, de leur donner du sens pour comprendre le vivant et l'humain. » Cette sensibilité à l'outil se concrétise dans la publication de nombreux papiers à teneur méthodologique visant à perfectionner la précision et la robustesse des outils mobilisés. L'attachement de Delignières vis-à-vis des objets fractals revêt enfin une certaine teneur affective : « Marks-Tarlow dit vous aimez les fractales, tout simplement parce que vous l'êtes vous-mêmes. Nous sommes une structure fractale, c'est pour cela qu'on se retrouve dans ces images. »

Cette adhésion semble beaucoup moins prononcée chez Temprado pour qui les fractales, qu'ils mobilisent de manière beaucoup plus ponctuelle, instrumentale et périphérique, représentent davantage un détour méthodologique au service de questionnements théoriques (en l'occurrence en lien avec la dynamique de vieillissement du système neuro-musculo-comportemental) qu'une finalité en soi : « L'outil mathématique est au service de la théorie. Ce qui m'a amené à m'intéresser à ces nouveaux outils, c'est de répondre aux questions théoriques : quel est le statut de la variabilité et de la complexité du système musculo-squelettique au cours du vieillissement ? Et pour alimenter les réponses à ces questionnements théoriques, il me faut recourir aux analyses fractales ou d'entropie. Mais je n'ai pas d'attraction ni de fascination particulières pour les fractales. Un outil est intéressant parce qu'il permet d'expliquer les choses. Ce n'est pas l'équation en elle-même ; je n'ai pas de curiosité mathématique pour l'outil ; ce qui m'intéresse, c'est bien de jouer avec les concepts. »

4.2.4 Remarques conclusives sur les conditions sociales du développement des fractales en Sciences du sport

La diffusion des fractales en STAPS s'est opérée *via* le développement de trois réseaux de recherche qui fonctionnent essentiellement de façon indépendante. En leur sein, les chercheurs qui les fédèrent entretiennent des rapports contrastés aux analyses fractales, oscillant entre une sensibilité mathématique pour l'outil et une curiosité théorique pour les problématiques. Au-delà de ces conditions « locales », le développement des fractales en STAPS a bénéficié d'un climat intellectuel pro-

pice, d'influences symboliques plus vastes, irréductibles au champ des STAPS. Durand (1996) qualifie de « bassin sémantique » cette influence imaginaire diffuse qui affecterait un large spectre d'activités humaines. Nous avons démontré ailleurs (Quidu, 2012a) que la réorientation symbolique contemporaine se construisait sur une contestation des thèmes suivants : division, hiérarchisation, régularité, géométrisme euclidien, linéarité, fixité (structure « schizomorphe » pour Durand (1968)). À l'inverse, le bassin sémantique contemporain valoriserait le régime « nocturne » de l'image composé des structures « mystique » (singularité, subjectivité, opacité) et « synthétique » (historicité, rythme, système, totalité, relation). Pour Quidu (2012a), la majorité des programmes de recherche innovants en Sciences du sport (action située, psycho-phénoménologie, approche écologique...) s'inscrivent dans ce régime nocturne et les analyses fractales n'y font pas exception (affinité ontologique avec la structure synthétique).

Il n'est pas question d'avancer que cette influence symbolique a *causé* le développement des fractales en STAPS ; elle a plus vraisemblablement agi comme une *influence indirecte macro-sociale*. Cette structure favorable n'a pas dispensé les chercheurs de devoir lutter contre une série d'inerties institutionnelles et d'habitudes ontologiques pour imposer la légitimité de leur approche. Dans une situation de crise paradigmatique, cette lutte passe notamment par des joutes argumentaires (Bouvier, 1995). Nous avons montré (Quidu, 2012b), à partir d'une étude des stratégies argumentatives mises en œuvre par Ninot et Fortes (2007), que les chercheurs innovants déployaient une « rhétorique spécifique de l'innovation ». De façon schématique, l'argumentation consiste d'abord à fustiger les insuffisances jugées rédhibitoires du paradigme concurrent : réductionnisme, formalisme, décontextualisation. Sur cette base, l'alternative paradigmatique est exposée et sa supériorité est démontrée, aussi bien aux niveaux ontologique que théorique et méthodologique. L'enjeu est d'insister sur l'originalité voire la radicalité de l'innovation (Gingras, 1995). Au final, l'efficacité de la rhétorique de l'innovation sera l'*une des causes* (en sus de l'efficacité prédictive et des succès empiriques) qui permettront aux analyses fractales de se développer jusqu'à s'affirmer comme paradigme structurant une nouvelle activité de science normale.

5 Vers la « science normale des fractales »

Les analyses fractales développées en STAPS participent aujourd'hui d'une activité de recherche qui présente de nombreux traits de la « science normale » (Kuhn, 1983). Toutefois, avancer que les analyses fractales possèdent plusieurs caractéristiques de la science normale ne revient *en aucun cas* à soutenir qu'elles représentent un courant massif et hégémonique en Sciences du sport. La situation effective accrédite plutôt l'inverse : les analyses fractales sont quantitativement peu diffusées en STAPS ;

¹⁵ Dans le cadre d'échanges privés, Didier Delignières nous a révélé être particulièrement fier de son dernier article (Delignières, 2015) paru dans *Mathematical Problems in Engineering* et intitulé « Correlation properties of (discrete) fractional Gaussian noise and fractional Brownian ». L'auteur y propose une analyse formelle et « fondamentale » des propriétés corrélationnelles du bruit 1/f au sein de laquelle les problématiques liées au contrôle du mouvement demeurent très en retrait et ne sont guère évoquées qu'en termes de perspectives potentielles d'application.

elles ne constituent pas une approche dominante ; aucun programme adverse n'a disparu sous leur pression.

5.1 Une dialectique fluctuante de l'extraordinaire et du banal

En 2003, la détection de corrélations dans les séries temporelles était considérée comme un résultat remarquable, voire exceptionnel, qu'il convenait d'interpréter. Dix ans plus tard, la présence de corrélations dans une série est devenue banale, voire attendue. Témoin de ce renversement, la critique de la pertinence de l'hypothèse nulle des tests inférentiels, laquelle correspond à l'absence de corrélations dans la série. En effet, dans la mesure où l'absence de corrélations dans les séries biologiques et psychologiques est devenue plus l'exception que la règle, il semble désormais plus pertinent d'interroger la nature (à court *versus* long-terme ?) des dépendances dans la série et ce au moyen de « tests de vraisemblance » rendus possibles par la modélisation ARFIMA – *autoregressive fractionally integrated moving average* (Wagenmakers, Farrell & Ratcliff, 2004 ; Torre, Delignières & Lemoine, 2007).

C'est désormais l'absence de corrélations à long-terme qui interroge en tant que fait exceptionnel et devient l'objet de la discussion. Des hypothèses ont été formulées pour expliquer l'altération de la complexité. En confrontant les travaux de Nourrit *et al.* (2015) sur l'apprentissage et de Rey-Robert *et al.* (2011) sur le vieillissement, il apparaît que la fractalité témoigne d'un système jeune, sain et adaptatif. L'apprentissage conduirait à l'installation d'un niveau optimal de fractalité, combinant robustesse et adaptabilité. À l'inverse, le vieillissement, la maladie ou la fatigue altéreraient la complexité d'une série en la rendant tantôt trop prévisible, tantôt trop aléatoire. L'hypothèse de la perte de complexité des systèmes vieillissants a été proposée par Lipsitz (2002). La *neurobiological degeneracy* pourrait être à l'origine de la « fractalité optimale » d'un système fonctionnel (Delignières & Marmelat, 2013) : ce concept renvoie à l'idée qu'au sein d'un système, une même fonction puisse être réalisée, suivant les conditions, par différents composants structurellement distincts ; ceux-ci sont donc capables, par extension, d'assumer différents rôles suivant les contraintes du moment (Edelman & Gally, 2001 ; Komar, Seifert & Thouvarcq, 2015), ce qui permettrait de produire des réponses flexibles et multi-échelles. De leur côté, Sleimen-Malkoun, Temprado et Hong (2014) soutiennent que la perte de complexité associée à l'âge pourrait être liée à un processus de « dé-différenciation » défini comme « *the process by which structures, mechanisms or behavior that were specialized for a given function lose their specialization and become simplified, less distinct and common to different functions or task-goals* ». Un trop grand couplage entre systèmes (par exemple cognitifs et sensorimoteurs) pourrait ainsi être responsable de la perte de complexité et de la diminution de l'adaptabilité.

Interrogé en 2007, Delignières synthétisait cette dialectique d'inversion : « *On peut s'enivrer, les fractales, un peu comme une religion ; comme on va mettre Dieu partout, on va mettre des fractales partout. Et ça va donner une explication au monde. Dans notre laboratoire, on se remet le nez dans le cambouis, on a des séries de chiffres avant tout et on ne retrouve pas des fractales partout, parfois ça coïncide ; et alors on cherche à savoir pourquoi ça coïncide. La simplification du système le rend vulnérable. La force du système, c'est sa complexité, sa redondance.* »

5.2 La science normale des fractales comme activité de résolution d'énigmes

Dans le cadre de la science normale, les chercheurs exploitent toutes les potentialités du paradigme, en profondeur et en extension, plutôt que de s'acharner à le renverser (Soler, 2007). L'enjeu est donc d'augmenter « la portée et la précision du paradigme ». Nous avons décrit ci-avant l'intense activité de conquête de nouveaux territoires pour les fractales.

5.2.1 Une activité de sophistication méthodologique

Le perfectionnement des analyses fractales consiste en premier lieu à *améliorer l'adéquation* des outils d'analyse à la spécificité des séries temporelles obtenues. Lemoine et Delignières (2009) ont par exemple mis en place une méthode permettant de distinguer la signature temporelle de deux types de *timers*. Un enjeu encore plus fondamental a résidé dans l'amélioration des méthodes d'analyse des séries courtes (Delignières *et al.*, 2006). Originellement, les séries devaient comporter plus de mille événements pour être soumises à analyses fractales. Ce nombre suppose un protocole long, générant fatigue et lassitude chez les sujets, ce qui risque d'altérer la stationnarité des séries. Or, cette propriété était une condition *sine qua non* de l'applicabilité de maintes méthodes. Il a donc fallu à Delignières et ses collaborateurs réfléchir à des méthodes applicables sur des séries deux fois plus courtes sans perdre en robustesse.

À un second niveau, il s'est agi d'*accroître la valeur de preuve* des méthodes d'analyse. Pour attester la présence de corrélations à long-terme, les chercheurs ne se contentent plus d'une appréciation visuelle et qualitative du spectre de puissance mais en assurent désormais la démonstration statistique (Delignières, 2007), en se prémunissant d'éventuels biais (la combinaison de processus à court-terme peut mimer des processus fractals). Faire la preuve de corrélations à long-terme authentiques peut passer par la randomisation des données au sein d'une série ; la série de substitution obtenue (qui diffère seulement par l'ordre des valeurs) est ensuite confrontée à la série empirique.

Une telle réflexion méthodologique permet de réinterroger des études classiques, *via* un traitement de seconde

main de leurs jeux de données. Il en va ainsi de Delignières et Torre (2009a) à propos d'Hausdorff *et al.* (1996) ou de Delignières *et al.* (2003) à propos de Collins & De Luca (1993) sur le contrôle postural. Concernant cette dernière publication, les auteurs démontrent que « *the open- and closed-loop model* » repose sur un artefact statistique dans la mesure où l'approche déployée par ces derniers « *is not adapted to the analysis of bounded time series* ». En appliquant des méthodes plus appropriées à ces séries bornées, Delignières démontre que la trajectoire du centre de pression se comporte bien comme du bruit rose. Dans une publication ultérieure, Delignières, Torre et Bernard (2011a et 2011b) vont plus loin en suggérant que, là où Collins et De Luca pensaient avoir appliqué leurs analyses à la trajectoire du centre de pression, ils travaillaient en réalité sur sa vitesse.

5.2.2 Une activité de résolution théorique

Comme entrevu précédemment, à ces perfectionnements méthodologiques s'ajoutent des efforts de théorisation et de modélisation. Le passage d'un stade strictement descriptif à une étape plus explicative révèle également l'installation d'une activité de science normale. L'effort de modélisation porte tout d'abord sur l'intégration des corrélations à long-terme, comme chez Torre et Delignières (2008) qui proposent un modèle *unifié* du timing évènementiel permettant de rendre compte des fluctuations fractales dans les tâches de *tapping* réalisées en conditions libre, synchronisation et syncopation.

À un niveau plus théorique, Marmelat (2014) est engagé dans un débat concernant la nature des processus de coordination interpersonnelle où s'opposent les hypothèses de l'anticipation faible et les versions locale *versus* globale de l'anticipation forte. Marmelat met à l'épreuve ces trois modèles, à partir d'une tâche d'oscillation manuelle, réalisée par paires, en manipulant l'information disponible sur les mouvements du partenaire. Il apparaît que « les systèmes se coordonnent de façon globale en adoptant des structures statistiques similaires ».

Un effort théorique fondamental a enfin trait au débat sur l'origine du bruit rose (Delignières, Torre, Kello & Gilden, 2008; Diniz *et al.*, 2011; Torre & Wagenmakers, 2009). S'opposent des approches nomothétiques *versus* mécanistiques. Les premières considèrent que les fluctuations fractales seraient la signature naturelle de tout système complexe, composé de nombreux sous-systèmes agissant à de multiples échelles temporelles. À l'inverse, les secondes émettent l'hypothèse d'une certaine localisation statistique et fonctionnelle des sources de fractalité (Delignières & Torre, 2012).

Au final, cette série ordonnée de perfectionnements théoriques et méthodologiques s'inscrit dans ce que Lakatos (1994) considère comme « l'unité pertinente de reconstruction rationnelle en philosophie des sciences », à savoir le « programme de recherche » : différentes versions successives et rectificatrices (soit autant d'amendement

des « hypothèses auxiliaires ») sont produites sans que le noyau dur, composé d'un ensemble de présupposés ontologiques et épistémiques, qui les structure et les unifie ne soit affecté ou contesté (Quidu, 2015).

5.3 Des travaux « exemplaires »

Pour Soler (2014), l'un des apports majeurs de Kuhn réside dans la définition « restreinte » qu'il donne du paradigme entendu comme « modèle en acte » : un accomplissement scientifique passé s'avère suffisamment solide et stimulant pour servir de point de départ à d'autres travaux. C'est par une confrontation régulière de ces textes canoniques que les chercheurs en formation acquerront un savoir-faire tacite leur permettant de reconnaître les problèmes dignes d'intérêt et de les résoudre en manipulant un certain nombre d'outils, de normes et de règles. Peut-on identifier des travaux exemplaires communs dans le champ des fractales ?

Plusieurs travaux sont uniformément cités par les chercheurs des trois réseaux : Hausdorff *et al.* (1996) sur la variabilité de la marche ; Goldberger *et al.* (2002) ou Yamamoto *et al.* (1995) sur la variabilité cardiaque. Ces travaux ont fourni des paradigmes expérimentaux largement repris. D'autres auteurs sont cités sur des hypothèses spécifiques comme Lipsitz (2002) et la perte de complexité. Des travaux français semblent aussi érigés en « modèles en acte » comme Delignières, Lemoine, *et al.* (2004).

Au final, les pratiques de recherche développées au sein des trois réseaux indépendants de chercheurs possèdent de nombreux traits caractéristiques d'une science normale : une activité de conquête de nouveaux territoires empiriques, de sophistication méthodologique et d'affinement théorique, le tout structuré par des exemples communs. D'autres indicateurs convergent : l'existence de textes programmatiques et de revues de littérature (Sleimen-Malkoun *et al.*, 2014) ; une disparition progressive de la référence aux concurrents paradigmatiques, alors que ceux-ci étaient originellement cités (par exemple chez Ninot & Fortes, 2007). Désormais, les auteurs se situent d'emblée dans le cadre de référence des analyses fractales, ce que corroborent Delignières et Temprado, interrogés en 2007 : le second « *essai de faire avancer la connaissance dans ce domaine sans essayer de démontrer que les autres ont tort* ». Quant au premier, « *les discussions inter-paradigmes sont impossibles, ça n'utilise pas les mêmes présupposés, les mêmes concepts, les mêmes tâches, c'est perdre du temps. On échange avec les gens qui partagent le même cadre de référence* ».

Pour Kuhn, l'activité, convergente, de la science normale est un gage de progrès des connaissances. Cette conclusion se vérifie-t-elle pour la science normale des fractales ?

6 Effets de connaissance des recherches sur les fractales en STAPS

6.1 Effets liés aux changements d'échelles

Les analyses des fluctuations fractales proposent un double changement d'échelle, les systèmes étant désormais étudiés dans leur évolution singulière sur une historicité longue. Ce changement de focale, qualifié d'« idiosyncrasie quantitative », a rempli une fonction de « décentration critique » (Morin, 1991). Celle-ci révèle après-coup, et par effet de contraste, les présupposés ontologiques devenus transparents des programmes traditionnels (Revel, 1996). Parmi ces habitudes naturalisées, le « dépaysement fractal » a permis de déconstruire le postulat de la distribution normale des valeurs.

Le double changement d'échelle a permis à Fortes (2003) de re-problématiser la controverse opposant trois grandes conceptions classiques de l'estime de soi (dispositionnelle, situationniste et interactionniste). Au moyen d'un protocole longitudinal, l'auteure démontre que les fluctuations de l'estime de soi résultent d'un « ajustement dynamique où la préservation et l'adaptation s'équilibrent de façon différentielle selon les sujets ». Fortes (2003) ré-interroge également le fonctionnement dans le temps du modèle hiérarchique de Fox et Corbin (1989) établi à partir de mesures groupales. L'auteure met alors en évidence des fluctuations permanentes du flux causal.

6.2 Effets empiriques, théoriques et méthodologiques

L'équipe de Delignières a développé d'intenses efforts de modélisation destinés, non pas à faire table rase des modèles existants, mais à les ajuster pour rendre compte des fluctuations fractales en injectant un terme capable de générer d'authentiques corrélations à long-terme (Delignières, Torre & Lemoine, 2008). L'effort de modélisation fait parfois suite à une critique d'études classiques : dans le cas de la réévaluation des données d'Hausdorff *et al.* (1996), Delignières et Torre (2009a), contestant la disparition du bruit rose dans la condition « synchronisation avec métronome », proposent un modèle qui fait l'économie d'une influence supra-spinal.

Cette dernière remarque est d'importance car elle renvoie à la nature même des processus sous-tendant le contrôle moteur. Les chercheurs en STAPS participent à des débats théoriques et métathéoriques fondamentaux à l'instar de l'équipe de Temprado. Delignières, Lemoine et Torre (2004) apportent aussi une contribution épistémologique majeure¹⁶ en démontrant que les deux processus

de timing, évènementiel (impliquant une horloge interne prescrivant au système effecteur) *versus* émergent (impliquant les propriétés dynamiques des effecteurs considérés comme des oscillateurs auto-entretenus), qui sont alternativement mis en œuvre suivant la nature (dis)continue des tâches, la fréquence du mouvement, le degré d'expertise des sujets, etc., résonnent respectivement avec les paradigmes computationnel et dynamique : dès lors, « les approches cognitivistes et dynamiques, généralement considérées comme irréductibles, pourraient représenter deux facettes complémentaires et alternatives du contrôle moteur » (Lemoine, 2007 ; Quidu, 2010). Le développement récent des fractales a donc pris une tournure « explicative » qui contraste avec certaines critiques émises par le passé les accusant d'être « purement descriptives » (Woodman & Hardy, 2007).

Ces avancées théoriques reposent, pour une grande part, sur des progrès méthodologiques. Ceux-ci ont d'abord porté sur les modes de recueil des données : ne pouvant se satisfaire d'outils rétrospectifs, Fortes (2003) a élaboré, sous la forme d'une échelle visuelle analogique, des questionnaires brefs et sensibles d'estime de soi, permettant des passations répétées. Les effets méthodologiques ont ensuite concerné les outils d'analyse : Bardet *et al.* (2009) démontrent, par rapport à la *Detrended fluctuation analysis* (DFA), la supériorité de la méthode de détection des ruptures lorsque les séries présentent une tendance. Cette méthode leur permet de découper un marathon en trois phases puis d'appliquer sur chacune d'elles des analyses fractales. Une telle procédure permet aux auteurs de revenir sur une étude préalable (Wesfreid *et al.*, 2005) au cours de laquelle ils n'étaient pas parvenus à démontrer l'effet significatif de la fatigue sur la variabilité cardiaque. Cet effet est désormais démontré grâce à la détection des points de changement.

6.3 Effets ontologiques

Les analyses fractales ont conduit à des bouleversements profonds dans la façon d'appréhender l'essence de plusieurs notions fondamentales. Concernant tout d'abord l'ontologie de l'*identité*, l'individu est défini désormais moins par une somme d'attributs fixes que par sa façon d'évoluer. Dans le domaine de la psychologie sociale (Ninot & Fortes, 2007), un sujet n'est plus caractérisé par un niveau (haut *versus* bas) d'estime de soi mais par « un exposant fractal spécifique, caractérisant la nature de sa résistance aux perturbations quotidiennes ».

L'identité étant devenue dynamique, ce qui l'altère, c'est-à-dire la maladie, ne peut qu'être pensée en termes d'évolution. Delignières et Torre (2009b) ont « proposé le concept de maladie dynamique pour désigner ces pathologies qui affectent davantage la dynamique des systèmes que des éléments particuliers les constituant ». La santé se définit, par contraste, comme un équilibre entre robustesse et adaptabilité.

¹⁶ Celle-ci a d'ailleurs fait débat. Voir par exemple Repp et Steinman (2010) qui considèrent que ces deux modes de timing peuvent être déployés simultanément en se combinant, ce que contestent fortement Delignières et Torre (2011). Ces derniers réaffirment à l'inverse que les processus émergent et évènementiel ne se distribuent pas sur un même continuum, sont mutuellement exclusifs et déployés alternativement.

Cet équilibre suppose un état optimal de complexité au sein du *système* qui nécessite la coopération d'un nombre important de composants interconnectés. Ceux-ci contribuent, de façon équitable, au fonctionnement global de l'ensemble sans que l'un d'eux ne prenne une place hégémonique. L'auto-organisation du système fait sa force là où un pilotage hiérarchique (ou, à l'inverse, une désorganisation totale) pourrait l'affaiblir.

6.3.1 Effets pratiques

L'effort de description du réel se double d'une volonté de le transformer, notamment dans les domaines de la réhabilitation. Marmelat (2014) envisage de rééduquer un système ayant perdu sa complexité en le faisant se coordonner avec un système sain aux propriétés fractales. Cités par Malatesta et Caillaud (2004), Hausdorff *et al.* (2001) ont mis en œuvre un protocole « interventionniste » démontrant la réversibilité de l'instabilité de la marche après six mois d'entraînement varié. Les analyses fractales autorisent également un suivi clinique de patients dépressifs ou bipolaires (Vachon, Thomas, Ninot, & Fortes, 2014) en permettant une mesure contextuelle et en temps réel des effets d'un traitement. L'équipe de Billat travaille enfin sur la prévention des accidents cardiaques, lors des efforts épuisants du marathon : une trop grande valeur du paramètre fractal basse fréquence indiquerait un danger, alors même que les fréquences instantanées ne sont pas alarmantes. Ici, les « fluctuations s'avèrent plus informatives que les valeurs ».

Au niveau pédagogique, Delignières (2009, 2014) développe la notion d'« éducation fractale » : « *L'éducation physique ne se limite pas au cours d'EPS : elle se prolonge à l'extérieur de l'école, avec les pairs, la famille, les clubs sportifs... L'éducation fractale vise à mettre en symbiose ces divers systèmes et réseaux.* » L'auteur prend toutefois le soin de spécifier le caractère « exploratoire » et « non démontré » de ces hypothèses. De leur côté, Komar *et al.* (2015) préconisent une « pédagogie non linéaire ». Celle-ci reconnaît et valorise les différences interindividuelles dans l'acquisition d'une habileté motrice donnée : les apprenants sont incités à exploiter de façon optimale leurs singularités anatomiques et physiologiques là où une pédagogie linéaire traditionnelle tendrait, à l'inverse, à produire des comportements stéréotypés d'un sujet à l'autre.

6.3.2 Effets en droit », « effets en faits »

Les divers effets théoriques, méthodologiques et pratiques dégagés constituent des *apports en droit*, c'est-à-dire des progrès de la connaissance indépendamment de leur impact réel sur le collectif des chercheurs. Nous devons compléter cette notion par celle d'*apports en faits*, décrivant l'influence effective des travaux sur la communauté scientifique. Cela résonne avec les propositions de Latour (2001) pour qui un travail scientifique n'existe que s'il est

repris par les pairs : s'il ne mobilise pas, ne suscite pas l'enthousiasme ou la controverse, il n'existe tout simplement pas, il est insignifiant. Dès lors, « *être un scientifique suppose de convaincre et d'intéresser pour devenir un point de passage obligé au sein d'un réseau que l'on a soi-même créé* ». Nous tentons, à titre exploratoire, d'apprécier l'apport en faits des travaux de Delignières¹⁷.

Un premier indicateur a trait aux revues-cibles des publications et, plus précisément, à leur nature ainsi qu'à leur Facteur d'Impact (ou *Impact Factor*). Bien qu'indirect, discutable et incomplet¹⁸, ce dernier indicateur renseigne sur la visibilité globale d'une revue. Le spectre des revues dans lesquelles Delignières publie est large : revues de Sciences du mouvement (*Journal of Motor Behavior*, *Motor Control...*), de psychologie (*Journal of Sport & Exercise Psychology*, *Quarterly Journal of Experimental Psychology...*), de neurosciences (*Experimental Brain Research*, *Neurosciences Letters...*), de biologie/sciences médicales (*Journal of Applied Physiology*, *Advances in Experimental Medicine and Biology...*), de physique (*Physica A*) ou enfin revues spécifiques aux approches non linéaires (*Chaos*, *Nonlinear Dynamics in Psychology and Life Science...*). Les champs les plus représentés sont la psychologie et les neurosciences. Quels sont les Facteurs d'Impact de ces revues ? Ces Facteurs croissent-ils ? (voir le tableau 1). Notons que ce critère importe à Delignières, interrogé en 2007 : « *Je pense qu'on ne peut pas faire moins bien que ce que l'on a fait, ce serait insupportable. Il faut une progression dans les Impacts dans une carrière. Je me rappelle mon premier Facteur à 1, j'étais aux anges. Aujourd'hui, je taquine les 2 et j'espère aller plus loin.* » La moyenne des *Impact Factors* est de 1,93 ; la médiane est de 1,96, l'écart-type est de 0,87. De 2003 à 2015, la tendance est légèrement ascendante (Fig. 1).

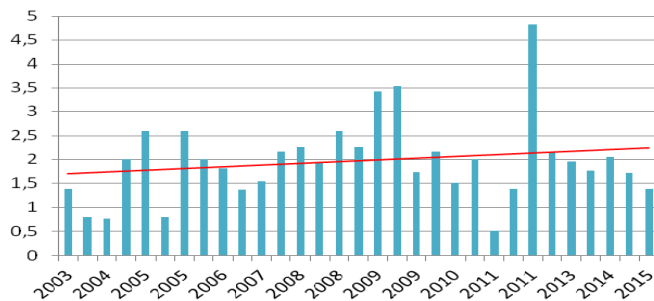
Analysons les articles publiés dans les trois revues à plus gros *Impact Factors*. L'article classé n° 1 est Delignières, Torre et Bernard (2011a) publié dans

¹⁷ Précisons qu'il ne s'agit ici en aucun de réaliser une quelconque « hagiographie » de Didier Delignières, notre attitude épistémologique se voulant *analytique* et descriptive et non normative. Le parti-pris de n'appliquer les indicateurs scientométriques qui suivront qu'à un seul chercheur doit être compris dans le contexte *exploratoire* de l'étude. En outre, le chercheur envisagé comme cible de l'analyse a été retenu tout à la fois parce qu'il constituait le nœud d'un important réseau de chercheurs publiant sur les fractales dans le champ francophone des Sciences du sport et parce que son activité de publication sur les fractales s'avérait intensive d'un point de vue quantitatif.

¹⁸ Par exemple, l'*Impact Factor*, qui mesure le poids « global » d'une revue sur la communauté scientifique, pourrait être utilement complété, en vue de saisir l'influence « spécifique » d'un auteur sur son champ, par l'*H-Index* (et son évolution dans le temps). Proposé par Hirsch (2005), cet indice mesure l'impact précis d'un chercheur donné en mettant en rapport son nombre de publications et le nombre de citations reçues par publications.

Tableau 1. *Impact Factor* des revues-cibles des publications de Delignières sur les fractales.

Année	Impact Factor	Revues-cibles
2015	1,40	<i>Journal of Motor Behavior.</i>
2014	2,06	<i>Neurosciences Letters.</i>
	1,72	<i>Physica A.</i>
2013	1,96	<i>Advances in Experimental Medicine and Biology.</i>
	1,76	<i>Chaos.</i>
2012	2,17	<i>Experimental Brain Research.</i>
2011	0,51	<i>Medicina Kaunas.</i>
	2,00	<i>Human Movement Science.</i>
	1,40	<i>Journal of Motor Behavior.</i>
	4,83	<i>Plos Computational Biology.</i>
2010	1,50	<i>Motor Control.</i>
2009	3,53	<i>Plos One.</i>
	3,43	<i>Journal of Applied Physiology.</i>
	2,17	<i>Experimental Brain Research.</i>
	1,73	<i>Quarterly Journal of Experimental Psychology.</i>
2008	2,26	<i>Acta Psychologica.</i>
	2,26	<i>Acta Psychologica.</i>
	1,93	<i>Biological Cybernetics.</i>
	2,60	<i>Journal of Sport & Exercise Psychology.</i>
2007	2,17	<i>Experimental Brain Research.</i>
	1,53	<i>British Journal of Mathematical and Statistical Psychology.</i>
2006	1,81	<i>Journal of Mathematical Psychology.</i>
	1,37	<i>Canadian Journal of Experimental Psychology.</i>
2005	0,80	<i>Nonlinear Dynamics in Psychology and Life Science.</i>
	2,60	<i>Journal of Sport & Exercise Psychology.</i>
	2,60	<i>Journal of Sport & Exercise Psychology.</i>
	2,00	<i>Human Movement Science.</i>
2004	0,80	<i>Nonlinear Dynamics in Psychology and Life Science.</i>
	0,76	<i>Quality and Quantity.</i>
	2,00	<i>Human Movement Science.</i>
2003	1,40	<i>Journal of Motor Behavior.</i>

**Fig. 1.** Évolution de 2003 à 2015 des *Impact Factors* des publications de Delignières sur les fractales (en droite, la courbe de tendance).

PLoS Computational Biology. Ce texte, qui est la suite d'une critique méthodologique des travaux de Collins et De Luca (Delignières *et al.*, 2003), propose un modèle de contrôle postural basé non pas sur la position du centre de pression mais sur sa vitesse. L'article classé n° 2 est Delignières, Torre et Lemoine (2009) publié dans *PLoS One*. Les auteurs proposent un amendement des modèles classiques afin d'intégrer les dépendances à long-terme. Enfin, l'article classé n° 3 est Delignières et Torre (2009a),

publié dans *Journal of Applied Physiology*. Ici encore, les auteurs proposent une réévaluation de données classiques, celles Hausdorff.

Un indicateur complémentaire, qui s'inscrit davantage dans la logique de l'*H-Index*, a trait aux citations par les pairs des articles de Delignières. Nous avons retenu, en travaillant sur *Researchgate*¹⁹ principalement²⁰ les trois articles de Delignières les plus cités²¹. Notons d'abord que

¹⁹ *Researchgate* est un site gratuit, utilisé par les chercheurs, de partage de bibliographies et de fichiers. Cet outil, bien qu'incomplet (tous les chercheurs n'y sont pas inscrits), convient néanmoins à la présente étude exploratoire. Delignières y a par exemple déposé 120 textes.

²⁰ Nous avons également, dans un souci de triangulation méthodologique, appliqué le même questionnement sur la plateforme *ISI Web of Science*. Il apparaît que les trois articles les plus cités de Delignières sont les mêmes (et dans le même ordre) d'après *Researchgate* et *ISI Web*, ce qui renforce la validité empirique des résultats obtenus.

²¹ Mentionnons, en contre-point et en toute honnêteté intellectuelle, que d'autres articles sur les fractales de Didier Delignières sont beaucoup moins cités. Par exemple, si l'on se réfère à *ISI Web*, Marmelat, Torre et Delignières (2012) n'a été cité qu'à trois reprises en trois ans et demi.

ceux-ci ne correspondent pas aux papiers publiés dans les trois revues à plus gros *Impact Factor*²². Nous émettons donc l'hypothèse qu'ils possèdent certaines caractéristiques intrinsèques susceptibles d'intéresser la communauté. Le texte le plus cité (103 occurrences d'après *Researchgate* et 117 d'après *ISI Web*) est Delignières *et al.* (2006) paru dans *Journal of Mathematical Psychology* (*Impact Factor* : 1,81). La capacité d'intéressement de ce texte, renforcée par la nature de la revue-cible, réside dans la large audience²³ susceptible d'être interpellée par l'analyse méthodologique. Ce texte est cité par des chercheurs en Sciences du mouvement (dont Repp, Van Orden ou encore Riley, dans le cadre d'études sur la marche, la coordination interpersonnelle, l'imagerie motrice) ; des chercheurs « fondamentalistes » en neurosciences (dont Wagenmakers) ; des chercheurs travaillant sur les fractales en dehors des Sciences du mouvement (dans des disciplines diverses comme la géologie de l'écoulement des fleuves, la climatologie des cyclones tropicaux, la chimie de la catalyse, la biologie de la densité minérale osseuse).

Le deuxième article le plus cité (70 occurrences selon *Researchgate* et 59 selon *ISI Web*) est Delignières, Lemoine, *et al.* (2004), publié dans *Human Movement Science* (*Impact Factor* : 2). Sa forte reprise réside, selon nous, dans le traitement comparatif de deux tâches paradigmatiques (le *tapping* et l'oscillation de l'avant-bras) et la modélisation de deux processus distincts de timing. Les chercheurs qui ont cité ce papier évoluent, à la différence de l'article précédent, pour une très grande majorité dans le champ des Sciences du mouvement (domaine coïncidant avec l'objet de la revue-cible). Ils travaillent pour une majorité sur les aspects temporels du mouvement (tâches de *tapping*, synchronisation auditive-motrice) mais aussi sur d'autres thématiques comme les coordinations interpersonnelles (Turvey). Quelques chercheurs extérieurs aux Sciences du mouvement mentionnent ce travail dans le cadre d'études sur les sciences de la communication, les performances des chanteurs, les comportements alimentaires...

Le troisième article le plus cité (66 occurrences sur *Researchgate* et 52 sur *ISI Web*) est Delignières *et al.* (2003), publié dans *Journal of Motor Behavior* (*Impact Factor* : 1,4). La force d'intérêt de cet article ré-

sider dans sa valence critique : il s'agit de réinterroger, en seconde analyse, les données classiques d'un texte paradigmatique sur le contrôle postural. Ce texte est cité quasi exclusivement par des chercheurs en Sciences du mouvement spécialistes du contrôle postural (comme Beek, Daffertshofer, Stergiou). Cette (quasi-)exclusivité est la triple résultante de la nature de la revue-cible, de la spécificité de l'objet travaillé et de la critique d'un texte paradigmatique.

Au final, l'investissement de Delignières semble avoir indéniablement impacté, en droit mais aussi en faits²⁴ (voir également ses co-signatures, témoignant d'une capacité à faire réseau), la communauté internationale des chercheurs en Sciences du mouvement mais aussi de scientifiques évoluant dans d'autres espaces. L'image d'un champ, les Sciences du mouvement, qui importerait une innovation exogène avant d'apporter, dans un second temps, une contribution en retour à l'espace académique général doit être relativisée : les pratiques de recherche ne se déploient pas dans des espaces cloisonnés mais le long de réseaux internationaux connectant des chercheurs issus de domaines variés. Soyons toutefois prudents avant d'étendre cette représentation, construite à partir de l'étude du cas des fractales, aux STAPS dans leur ensemble : en effet, si de telles relations fructueuses et réciproques ont déjà été soulignées entre les STAPS et les sciences cognitives (Erhani, Cadopi & Thon, 1998), il ne semble pas en aller de même dans tous les espaces disciplinaires. Collinet et Taleb (2007) soutiennent que les sociologues rattachés aux STAPS sont « faiblement intégrés au grand espace sociologique français » et développent des recherches à « faible visibilité ». Comment rendre compte d'une telle divergence de situations entre les fractales et la sociologie du sport en STAPS ? Serait-elle liée à la nature des objets (le « mouvement » serait-il plus *noble*, dans la hiérarchie académique des objets, que le « sport », plus fédérateur, plus à même de susciter des échanges avec les disciplines fondamentales ?) et/ou aux modes de structuration des réseaux (les chercheurs en Sciences du mouvement seraient-ils plus ouverts sur l'espace institutionnel hors-STAPS et sur l'international ?) et/ou aux modes de socialisation différenciés des sociologues et des neuroscientifiques ? D'autres études de cas doivent être menées afin d'aboutir à une cartographie précise des STAPS dans leurs rapports différenciés au champ académique général.

²² Cette remarque nous incite à relativiser la pertinence de l'indicateur « Facteur d'Impact » lorsqu'il s'agit d'apprécier le poids spécifique d'un chercheur donné sur son champ au profit de l'Indice H s'intéressant aux citations effectives. En effet, c'est davantage la citation d'un auteur par ses pairs qui permet d'apprécier son impact que la visibilité globale et le prestige de la revue dans laquelle il publie.

²³ Il serait intéressant d'apprécier dans quelle mesure d'autres travaux que l'on pourrait considérer comme plus « spécifiques » et « disciplinaires » (par exemple ceux de Billat sur la variabilité des signaux biologiques durant les efforts d'endurance) « mobilisent » et « intéressent » la communauté scientifique dans son ensemble au-delà de son champ propre d'appartenance (en l'occurrence la sous-communauté des physiologistes de l'exercice).

²⁴ *ISI Web* donne accès à d'autres indicateurs scientométriques intéressants comme la moyenne de citations d'un article par an ou encore l'évolution du nombre de citations d'un article d'une année à l'autre. Ce dernier analyseur est doublement pertinent en ce qu'il permet de dessiner la courbe d'impact d'une publication en fonction du temps et d'identifier des articles récents mais à fort potentiel de citations ultérieures ; c'est par exemple le cas de Marmelat et Delignières (2012), cité 13 fois en 2014 et possédant une moyenne annuelle de citations de 5.

7 Conclusions et perspectives

Au final, il est apparu que la diffusion des analyses fractales en STAPS s'est opérée conformément au développement d'un programme de recherche jusqu'à l'installation d'une nouvelle activité de science normale. Celle-ci s'est manifestée par la conquête d'un nombre croissant d'objets empiriques, explorés depuis des disciplines variées et donnant lieu à une succession de perfectionnements méthodologiques et d'amendements théoriques. Ceux-ci partagent néanmoins un corpus de conceptions ontologiques fondamentales. La croissance paradigmatique a été soutenue par le biais de trois réseaux de chercheurs fonctionnant principalement de façon indépendante mais développant des coopérations nationales et internationales multiples avec des savants évoluant aussi bien dans le champ des Sciences du mouvement que dans l'espace académique général. L'image d'une section universitaire, les STAPS, qui s'approprierait une innovation épistémique originellement formalisée ailleurs a fortement été relativisée. La contribution des chercheurs affiliés à la 74^e section a été mise en évidence aussi bien en droit qu'en faits bien que certaines menaces de dérives épistémiques auraient pu être davantage pointées²⁵.

Plusieurs directions de recherche peuvent être ensuite dégagées afin d'approfondir, dans un premier temps, l'étude de l'appropriation des fractales par les Sciences du sport. Nous devons tout d'abord poursuivre l'activité de veille bibliographique afin d'apprécier la conquête d'objets supplémentaires et d'en formaliser les logiques sous-jacentes. Sur la base de l'ordre de conquête de nouveaux objets empiriques ci-avant identifié, nous émettons l'hypothèse que les processus de coordination interpersonnelle (par exemple au sein d'une équipe) et d'acquisition de l'expertise dans des habiletés sportives authentiques (Komar *et al.*, 2015) représenteront, dans un futur proche, des enjeux majeurs d'étude en même temps que les travaux sur le vieillissement se multiplieront. Nous pensons également qu'iront en se développant les études visant à corréliser les fluctuations de plusieurs systèmes jusqu'alors étudiés isolément.

D'autre part, l'ébauche d'analyse « pragmatique » ici proposée, visant à quantifier l'apport *en faits* des analyses fractales, devra être étendue aux trois réseaux iden-

tifiés et aux différents chercheurs qui les composent. Notre dispositif méthodologique pourra ensuite être complété par une série d'entretiens à mener auprès de Delignières, Torre, Marmelat, Fortes, Temprado, Billat... L'enjeu serait de cerner les motifs qui les ont incités à développer ces analyses, les rapports qu'ils nouent à leur égard, leur participation à des réseaux, les apports auxquels ils considèrent avoir contribué, les travaux marquants selon eux, les objets prometteurs...

Les résultats obtenus à partir de l'analyse de l'appropriation des fractales en STAPS devront être confrontés à des études de cas portant sur d'autres innovations théoriques. Nous avons par exemple étudié le développement récent en Sciences du sport d'une méthodologie originale articulant données en première et troisième personnes (Quidu & Favier-Ambrosini, 2014). Nous disposons également d'un ensemble d'études de cas (psychophénoménologie, action située, psychologie écologique...) réunies dans Quidu (2014, 2012c). La confrontation de ces diverses monographies doit permettre d'abstraire d'éventuels mécanismes génériques de l'innovation théorique dans un champ de recherche. La diffusion se fait-elle toujours le long d'un réseau noyauté par un chercheur fédérateur? Existe-t-il un ordre récurrent dans la conquête des objets? La science normale parvient-elle systématiquement à s'installer?

Enfin, nous pourrions prendre appui sur l'étude des fractales pour investiguer les effets de connaissance générés par un changement d'échelle²⁶ (de temps, d'espace ou d'entité) dans l'appréhension du réel : que se passe-t-il lorsqu'une approche modifie la focale d'analyse? Retrouve-t-on les mêmes effets de connaissance que pour les fractales, à savoir un amendement des modèles traditionnels, une relecture des controverses classiques et une série de transformations ontologiques?

Bibliographie

*Les références associées à une astérisque constituent notre corpus d'étude sur le développement des fractales en Sciences du sport.

Bardet, J.-M., Billat, V., & Kammoun, I. (2009)*. Modélisation des fréquences cardiaques instantanées durant un marathon et estimation de leurs paramètres fractals. *Journal de la Société Française de Statistique*, 150 (1), 101–126.

Billat, V., Wesfreid, E., Cottin, F., Kapfer, C., Koralstein, J.-P., & Meyer, Y. (2003)*. Fractal analysis of speed and physiological oscillations in Long- and Middle-Distance Running: Effect of training. *International Journal of Computer Science in Sport*, 2, 16–30.

Billat, V., Wesfreid, E., Kapfer, C., Koralstein, J.-P., & Meyer, Y. (2006)*. Nonlinear dynamics of heart rate and oxygen

²⁵ Il en va par exemple de l'usage « analogique » (Dehouve, 2014) de l'étiquette « fractale » dans le domaine de l'éducation (Delignières, 2009) : en effet, qu'apporte, en termes de supplément de sens, le fait de qualifier de « fractale » une éducation qui prendrait acte que l'école n'a plus le monopole de la transmission des connaissances et que son rôle est de coordonner les différentes sphères où l'élève pourra acquérir du savoir? Ce recours au label « fractal », s'il est *indifférent du point de vue du contenu* (c'est-à-dire qu'il n'apporte rien de plus à la démonstration qui aurait pu s'en passer sans que rien n'y soit changé), ne l'est pas en tant que *techniques de faire-croire* et de faire-sensation en vue de l'acquisition d'un pouvoir symbolique (Bouveresse, 1999).

²⁶ Voir Lahire (1998) sur une sociologie des dispositions à l'échelle intra-individuelle ou Revel (1996) sur la micro-histoire.

- uptake in exhaustive 10,000 m runs: influence of constant vs. freely paced. *The Journal of Physiological Sciences*, 56, 103–111.
- Billat, V., Mille-Hamard, L., Meyer, Y., & Wesfreid, E. (2009)*. Detection of changes in the fractal scaling of heart rate and speed in a marathon race. *Physica A*, 388, 18, 3798–3808.
- Bocquet, M. (2013). Dynamiques socio-sémiotiques : compréhension, processus, diachronie et fractales. *Revue Française des Sciences de l'Information et de la Communication*, 3.
- Bouveresse, J. (1999). *Prodiges et vertiges de l'analogie. De l'abus des belles-lettres dans la pensée*. Paris : Raisons d'agir.
- Bovier, A. (1995). *Sociologie de l'argumentation philosophique*. Paris : PUF.
- Cibois, P. (2012). La reproduction fractale de la sélection dans le secondaire. *Quanti/sciences sociales*, <http://quanti.hypotheses.org/631/>
- Collinet, C. (2003). *La recherche en STAPS*. Paris : PUF.
- Collinet, C., & Taleb, A. (2007). Sociologues et sociologies du sport en France. *Sociologie et Sociétés*, 39 (2), 225–249.
- Collinet, C., & Terral, P. (2006). Une controverse scientífico-technique dans le monde des sciences du sport : le cas de l'électrostimulation. *Sociétés Contemporaines*, 64, 67–93.
- Collins, J.J., & De Luca, C.J. (1993). Open-loop and closed-loop control of posture: a random-walk analysis of center-of-pressure. *Experimental Brain Research*, 95, 308–318.
- Collo, A. (2011)*. *Caractérisation de fluctuations fractales dans une activité motrice complexe*. Mémoire de Master, École centrale de Nantes.
- De Ruiter, N., Den Hartigh, R., Cox, R. Van Geert, P., & Kunnen, S. (2014)*. The Temporal Structure of State Self-Esteem Variability During Parent-Adolescent Interactions: More Than Random Fluctuations. *Self and Identity*, DOI : 10.1080/15298868.2014.994026.
- Dehouve, D. (2014). La notion de fractales en anthropologie. *Ethnographiques*, 29.
- Delignières, D. (2007)*. La dynamique fractale de l'estime de soi : une validation statistique. *Science & Motricité*, 60, 69–73.
- Delignières, D. (2009)*. *Complexité et compétences*. Paris : Editions revue EPS.
- Delignières, D. (2014)*. Vers une pédagogie des compétences : apprendre à gérer la complexité. In M. Quidu (Ed.). *Innovations théoriques en STAPS et implications pratiques en EPS*. Paris : L'Harmattan.
- Delignières, D. (2015)*. Correlation properties of (discrete) fractional Gaussian noise and fractional Brownian. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 485623.
- Delignières, D., & Marmelat, V. (2013)*. Degeneracy and Long-Range Cross-Correlation. *Chaos*, 23 (4), 043109.
- Delignières, D., & Torre, K. (2009a)*. Fractal dynamics of human gait: a reassessment of the 1996 data of Hausdorff et al. *Journal of Applied Physiology*, 106, 1272–1279.
- Delignières, D., & Torre, K. (2009b)*. Vers une nécessaire prise en compte de la complexité : variabilité et fractalité dans la motricité rythmique. *Intellectica*, 52, 41–54.
- Delignières, D., & Torre, K. (2011)*. Event-based and emergent timing: dichotomy or continuum? A reply to Repp and Steinman (2010). *Journal of Motor Behavior*, 43, 311–318.
- Delignières, D., & Torre, K. (2012)*. Les fractales : un regard nouveau sur la complexité. In M. Quidu. (Ed.). *Les Sciences du sport en mouvement. Innovations et traditions théoriques en STAPS*. Paris : L'Harmattan.
- Delignières, D., Deschamps, T., Legros, A., & Caillou, N. (2003)*. A methodological note on non-linear time series analysis: Is Collins and De Luca (1993)'s open- and closed-loop model a statistical artifact? *Journal of Motor Behavior*, 35, 86–96.
- Delignières, D., Fortes, M., & Ninot, G. (2004)*. The fractal dynamics of self-esteem and physical self. *Nonlinear Dynamics in Psychology and Life Science*, 8, 479–510.
- Delignières, D., Lemoine, L., & Torre, K. (2004)*. Time intervals production in tapping and oscillatory motion. *Human Movement Science*, 23, 87–103.
- Delignières, D., Ramdani, S., Lemoine, L., Torre, K., Fortes, M., & Ninot, G. (2006)*. Fractal analysis for short time series: A reassessment of classical methods. *Journal of Mathematical Psychology*, 50, 525–544.
- Delignières, D., Torre, K., & Lemoine, L. (2008)*. Fractal models for event-based and dynamical timers. *Acta Psychologica*, 127, 382–397.
- Delignières, D., Torre, K., Kello, C.T., & Gilden, D.L. (2008)*. On the origins of 1/f noise in human motor behavior. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 30, 58–59.
- Delignières, D., Torre, K., & Lemoine, L. (2009)*. Long-range correlation in synchronization and syncopation tapping: a linear phase correction model. *PLoS One*, 4, 11.
- Delignières, D., Torre, K., & Bernard, P.L. (2011a)*. Transition from persistent to anti-persistent correlations in postural sway indicates velocity-based control. *PLoS Computational Biology*, 7 (2), e2002089.
- Delignières, D., Torre, K., & Bernard, P.L. (2011b)*. Interest of velocity variability and maximal velocity for characterizing center-of-pressure fluctuations. *Science & Motricité*, 74, 31–37.
- Den Hartigh, R., Cox, R., Gernignon, C., Van Yperen, N., & Van Geert, P. (2015)*. Pink Noise in Rowing Ergometer Performance and the Role of Skill Level. *Motor control*, 19 (4), 355–69.
- Diniz, A., Wijnants, M.L., Torre, K., Barreiros, J., Crato, N., Bosman, A.M.T., Hasselman, F., Cox, R.F.A., Van Orden, G.C., & Delignières, D. (2011)*. Contemporary theories of 1/f noise in motor control. *Human Movement Science*, 30 (5), 889–905.
- Durand, G. (1968). *Les structures anthropologiques de l'imaginaire*. Paris : Dunod.
- Durand, G. (1996). *Introduction à la mythodologie*. Paris : Albin Michel.

- Edelman, G.M., & Gally, J.A. (2001). Degeneracy and complexity in biological systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98 (24), 13763–13768.
- Erbani, E., Cadopi, M., & Thon, B. (1998). STAPS et sciences cognitives, quelles relations ? In G. Klein (Ed). *Quelles sciences pour le sport ?* (pp. 67–72). Toulouse : LARAPS & AFRAPS.
- Favre, P. (2012). *Politix*, 1988–2012 : changement de génération, basculement de paradigmes. *Politix*, 100, 41–62.
- Fortes, M. (2003)*. *La dynamique de l'estime de soi et de soi physique*. Thèse de doctorat, Université Montpellier I.
- Fortes, M., & Ninot, G. (2012)*. Développement par les STAPS de l'approche dynamique en psychologie sociale. In M. Quidu (Ed.). *Les Sciences du sport en mouvement. Innovations et traditions théoriques en STAPS*. Paris : L'Harmattan.
- Fortes, M., Delignières, D., & Ninot, G. (2004)*. The dynamics of self-esteem and physical self: Between preservation and adaptation. *Quality and Quantity*, 38, 735–751.
- Fox, K.R., & Corbin, C.B. (1989). The physical self perception profile: Development and preliminary validation. *Journal of Sports and Exercise Psychology*, 11, 408–430.
- Gingras, Y. (1995). Un air de radicalisme : sur quelques tendances récentes en sociologie de la science et de la technologie. *Actes de la Recherche en Sciences Sociales*, 108, 3–17.
- Gleyse, J. (1991). Questionnement épistémologique des STAPS-EPS. *Revue STAPS*, 24.
- Gleyse, J. (1995). À propos d'axiologie implicite en STAPS. *Corps et Culture*, 1.
- Goldberger, A.L., Amaral, L.A.N., Hausdorff, J.M., Ivanov, P. Ch., Peng, C.-K., & Stanley, H.E. (2002). Fractal dynamics in physiology: Alterations with disease and aging. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99, 2466–2472.
- Hausdorff, J.M., Purdon, P.L., Peng, C.K., Ladin, Z., Wei, J.Y., & Goldberger, A.R. (1996). Fractal dynamics of human gait: stability of long-range correlations in stride interval fluctuation. *Journal of Applied Physiology*, 80, 1448–1457.
- Hirsch, J.E. (2005). An index to quantify an individual's scientific research output. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102 (46), 16569–16572.
- Holton, G. (1981). *L'imagination scientifique*. Paris : Gallimard.
- Jarnet, L. (2004). Pour une épistémologie aposterioriste des STAPS. *STAPS*, 65, 27–41.
- Khalfa, N., Bertrand, P., Boudet, G., Chamoux, A., & Billat, V. (2012)*. Heart rate regulation processed through wavelet analysis and change detection. Some case studies. *Acta Biotheoretica*, 60, 1–2, 109–129.
- Komar, J., Seifert, L., & Thouwarecq, R. (2015)*. What variability tells us about motor expertise: measurements and perspectives from a complex system approach. *Movement & Sport Sciences – Science & Motricité*, 89, 65–77.
- Kuhn, T. (1983). *La structure des révolutions scientifiques*. Paris : Champs Flammarion.
- Lahire, B. (1998). *L'homme pluriel*. Paris : Nathan.
- Lakatos, I. (1994). *Histoire et méthodologie des sciences : programme de recherche et reconstruction rationnelle*. Paris : PUF.
- Latour, B. (2001). *Le métier de chercheur, regard d'un anthropologue*. Paris : INRA.
- Lemoine, L. (2007)*. *Implication des processus de timing événementiels et émergents dans la gestion des aspects temporels du mouvement*. Thèse de doctorat, Université Montpellier I.
- Lemoine, L., & Delignières, D. (2009)*. Detrended windowed (lag one) auto-correlation: A new method for distinguishing between event-based and emergent timing. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 62, 585–604.
- Lepetit, B. (1996). De l'échelle en histoire. In J. Revel (Ed.). *Jeux d'échelles* (pp. 71–94). Paris : Gallimard/Seuil.
- Liotard, P. (2001). Le hibou et l'alouette, approches plurielles et enjeux de recherches. In C. Collinet (Ed.). *Education physique et sciences* (pp. 191–218). Paris : PUF.
- Lipsitz, L.A. (2002). Dynamics of stability: the physiologic basis of functional health and frailty. *The Journals of Gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, 57, B115–B125.
- Malatesta, D., & Caillaud, C. (2004)*. Analyse fractale de la marche : application au sujet âgé. *Science & Motricité*, 53, 83–103.
- Mandelbrot, B. (1967). How long is the coast of Britain ? Statistical self-similarity and fractal dimensions. *Science*, 155, 636–638.
- Mandelbrot, B. (1995). *Les objets fractals*. Paris : Flammarion.
- Marmelat, V. (2014)*. *Synchronisation avec des rythmes fractals : Appariement de la complexité des structures statistique*. Thèse de Doctorat, Université Montpellier I.
- Marmelat, V., & Delignières, D. (2012)*. Strong anticipation: Complexity matching in interpersonal coordination. *Experimental Brain Research*, 222, 137–148.
- Marmelat, V., Torre, K., & Delignières, D. (2012)*. Relative Roughness: An index for testing the suitability of the monofractal model. *Frontiers in Physiology/Fractal Physiology*, 3, 208.
- Morin, E. (1991). *La méthode, tome 4, les idées*. Paris : Seuil.
- Mouzat, A. (2003)*. *Étude statistique de l'équilibre orthostatique chez l'homme*. Thèse de Doctorat, Université Clermont-Ferrand.
- Ninot, G., & Fortes, M. (2007)*. Étudier la dynamique de construits en psychologie sociale. *Science & Motricité*, 60, 11–42.
- Nourrit-Lucas, D., Tossa, A.O., Zélic, G., & Delignières, D. (2015)*. Learning, motor skill and long-range correlations. *Journal of Motor Behavior*, 47 (3), 182–189.

- Palut, Y., & Delignières, D. (2005)*. Propriétés fractales dans les coordinations rythmiques interpersonnelles. *Actes du congrès de l'ACAPS*.
- Quidu, M. (2009). Les *thématiques* dans la recherche en STAPS. *STAPS*, 84, 7–25.
- Quidu, M. (2010). Exigences logiques et paradigmes analytiques du programme de recherche « mouvement de régionalisation » : illustrations dans les domaines du contrôle moteur et de la perception humaine. *Science & Motricité*, 69, 39–55.
- Quidu, M. (2012a). Les résonances symboliques des innovations paradigmatiques contemporaines. In M. Quidu (Ed.). *Les Sciences du sport en mouvement*. Paris : L'Harmattan.
- Quidu, M. (2012b). Critique des notions d'innovation et de tradition théoriques. In M. Quidu (Ed.). *Les Sciences du sport en mouvement*. Paris : L'Harmattan.
- Quidu, M. (Ed.) (2012c). *Les Sciences du sport en mouvement*. Paris : L'Harmattan.
- Quidu, M. (Ed.) (2014). *Innovations théoriques en STAPS et implications pratiques en EPS*. Paris : L'Harmattan.
- Quidu, M. (2015). Programme de recherche. In B. Andrieu (Ed.). *Vocabulaire international de philosophie du sport, Volume I, Les origines* (pp. 449–460). Paris : L'Harmattan.
- Quidu, M., & Favier-Ambrosini, B. (2014). L'articulation des données en 1^{ère} et 3^e personnes. *Intellectica*, 62, 7–34.
- Repp, B.H., & Steinman, S.R. (2010). Simultaneous event-based and emergent timing: Synchronization, continuation, and phase correction. *Journal of Motor Behavior*, 42, 111–126.
- Revel, J. (1996). Micro-analyse et construction du social. In J. Revel (Ed.). *Jeux d'échelles* (pp. 15–36). Paris : Gallimard/Seuil.
- Rey-Robert, B., Temprado, J.-J., & Berton, E. (2011)*. Aging and changes in complexity in the neurobehavioral system. *Medicina*, 47, 1, 1–10.
- Sapoval, B. (1997). *Universalités et fractales*. Paris : Flammarion.
- Sleimen-Malkoun, R., Temprado, J.-J., & Hong, L. (2014)*. Aging induced loss of complexity and dedifferentiation: Consequences for coordination dynamics within and between brain, muscular and behavioral levels. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 6, 140.
- Sleimen-Malkoun, R., Perdakis, D., Müller, V., Blanc, J.-L., Huys, R., Temprado, J.-J., & Jirsa, V. (2015)*. Brain Dynamics of Aging: Multiscale Variability of EEG Signals at Rest and during an Auditory Oddball Task. *ENEURO*, 2 (3), ENEURO.0067–14.2015.
- Soler, L. (2006). Contingence ou inévitabilité des résultats de notre science? *Philosophiques*, 33 (2), 363–378.
- Soler, L. (2007). Popper et Kuhn sur la question des choix inter-théoriques. *Philosophia Scientiae*, 11(1), 99–130.
- Soler, L. (2014). Regard extérieur sur la pluralité théorique par une philosophe de la physique. In M. Quidu (Ed.). *Innovations théoriques en STAPS et implications pratiques en EPS*. Paris : L'Harmattan.
- Tannier, C. (2009). Formes de villes optimales, formes de villes durables. Réflexions à partir de l'étude de la ville fractale. *Espaces et Sociétés*, 138, 153–171.
- Temprado, J.-J., & Montagne, G. (2001). *Les coordinations perceptivo-motrices*. Paris : Armand Colin.
- Terral, P. (2003). *La construction sociale des savoirs du monde sportif*. Thèse de doctorat, Université Paris IV.
- Torre, K. (2008)*. *Timing absolu et relatif dans les coordinations bi-manuelles*. Thèse de doctorat, Université de Montpellier I.
- Torre, K. (2010)*. The correlation structure of relative phase variability influences the occurrence of phase transition in coordination. *Journal of Motor Behavior*, 42, 99–105.
- Torre, K., & Delignières, D. (2008)*. Unraveling the finding of 1/f noise in self-paced and synchronized tapping: A unifying mechanistic model. *Biological Cybernetics*, 99, 159–170.
- Torre, K., & Wagenmakers, E.J. (2009)*. Theories and models for 1/f noise in human movement science. *Human Movement Science*, 28, 297–318.
- Torre, K., Delignières, D., & Lemoine, L. (2007)*. Detection of long-range dependence and estimation of fractal exponents through ARFIMA modeling. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 60, 85–106.
- Vachon, H., Thomas, V., Ninot, G., & Fortes, M. (2014)*. Intérêts et implications thérapeutiques de l'approche dynamique. In M. Quidu (Ed.). *Innovations théoriques en STAPS et implications pratiques en EPS*. Paris : L'Harmattan.
- Vieluf, S., Temprado, J.-J., Berton, E., Jirsa, V., & Sleimen-Malkoun, R. (2015)*. Effects of task and age on the magnitude and structure of force fluctuations. *BMC Neuroscience*, 16, 12.
- Wagenmakers, E.J., Farrell, S., & Ratcliff, R. (2004). Estimation and interpretation of 1/f noise in human cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, 11, 579–615.
- Wesfreid, E., Billat, V., & Meyer, Y. (2005)*. Multifractal analysis of heartbeat time series in human races. *Applied Computational Harmonic Analysis*, 18, 329–335.
- Woodman, T., & Hardy, L. (2007). Dynamic Systems, Catastrophe Models, and Performance. *Science & Motricité*, 60, 63–67.
- Yamamoto, Y., Nakamura, Y., Sato, H., Yamamoto, M., Kato, K., & Hughson, R.L. (1995). On the fractal nature of heart rate variability in humans. *American Journal of Physiology*, 69, R830–837.
- Zajdenweber, D. (1991). Chronique d'un randonneur centenaire, le Dow Jones. *Histoire et Mesure*, 6, 1–2, 121–136.