

Vincent Bontems et Yves Gingras

De la science normale à la science marginale. Analyse d'une bifurcation de trajectoire scientifique: le cas de la Théorie de la Relativité d'Echelle

Résumé. Dans le champ scientifique, les agents peuvent choisir de collaborer à la science 'normale', se placer à l'avant-garde la plus légitime (les 'supercordes', la 'matière noire', etc.), ou encore développer leurs recherches dans un nouveau cadre théorique, avec tous les risques que cela comporte. La marginalité d'une théorie soulève la question de la stratégie de ceux qui y collaborent même au détriment de leur 'intérêt' à court terme, qui oriente plutôt vers la compétition immédiate pour occuper les positions centrales dans les domaines déjà constitués. La théorie de la relativité d'échelle (TRE) présente l'intérêt d'une telle situation car elle ouvre une possibilité qu'il faut créer de toutes pièces. S'y investir engage davantage que le choix d'un projet 'risqué' (par sa difficulté même) dans le cadre d'un paradigme existant car, d'une part, la TRE innove par rapport aux bases conceptuelles déjà acceptées par tous et, d'autre part, se trouve aussi marginalisée par rapport à l'avant-garde la plus légitime (comme celle des 'supercordes'). Ainsi, le cas de la TRE permet d'étudier une région du champ scientifique peu explorée par une sociologie des sciences qui fixe surtout son regard sur les cas extrêmes: histoire de théories devenues reconnues ou controverses spectaculaires. La TRE occupe encore, en 2006, une position marginale dans le champ de la physique. Son statut diffère toutefois radicalement des 'théories' produites à l'extérieur du champ, sans correspondre pour autant à celui de la science stabilisée et sanctionnée: comme nous allons le montrer par une analyse bibliométrique détaillée, sa diffusion au sein du champ scientifique est relativement modeste mais réelle, et ses résultats, quand ils reçoivent la sanction d'une publication scientifique, sont rarement pris en compte par les chercheurs qui n'y collaborent pas déjà. Cette

situation d'isolement au sein du champ révèle une tension conflictuelle entre la transformation que vise à opérer l'innovation théorique et les normes de l'évaluation normale entre pairs. En conclusion, nous comparerons la stratégie du fondateur de la TRE avec celle d'autres chercheurs ayant opéré, à un certain moment de leur carrière, une réorientation de leur trajectoire scientifique, afin de mettre en évidence les conditions sociales de bifurcations qui mettent en péril le capital scientifique cumulé jusque-là.

Mots-clés. *Controverse scientifique – Laurent Nottale – Relativité d'échelle – Science marginale*

Abstract. *In the scientific field, agents can choose to contribute to 'normal' science, operate within the most highly legitimated avant-garde science ('superstrings', dark matter, etc.) or instead, develop theories within an entirely new theoretical framework, despite the risks which this entails. But the marginality of such theories raises a problem of strategy: those who choose to work on them do so at the expense of their own short-term interests, which would normally be oriented towards occupying a central position in already well-established fields. The theory of scale-relativity (TSR) demonstrates the interest of such a situation: the door is open to new possibilities, but ones that must be built 'from scratch'. To pursue work in this direction is more demanding than to choose a project considered risky (due to its inherent difficulty) within the confines of an existing paradigm. On the one hand, TSR proposes to 'innovate' and branch out from already widely-accepted conceptual bases, while, on the other hand, it finds itself in a marginal position with respect to the most legitimate avant-garde theories, such as 'superstrings'. The case of the TSR thus allows us to study a region of the scientific field which has hardly been explored by a sociology of science that focuses primarily on 'extreme' cases: histories of theories which have since been vindicated or spectacular controversies. In 2006, TSR occupies a marginal position within the field of physics. Its status differs widely from 'theories' produced outside the field, yet does not correspond to any form of stable, accepted science. As we will show, using a detailed bibliometric analysis, the theory's diffusion throughout the scientific field has been limited – albeit real – and its results, when sanctioned by an official publication, are rarely taken into account by researchers who are not already TSR collaborators. This isolation within the field reveals conflict and tension between the transformation intended by a theoretical innovation and the norms of standard peer review. As a conclusion, we will compare the strategies of TSR's founder with those of other researchers who – at some point in their career – have attempted to reorient their scientific trajectory, which in turn reveals the social conditions of these bifurcations that put previously accumulated scientific capital at risk.*

Key words. *Laurent Nottale – Marginal science – Scale relativity – Scientific controversy*

Plusieurs articles ont étudié, en sociologie des sciences, la construction sociale des critères de démarcation entre science et non-science, que ce soit à travers le cas des para-sciences (Collins et Pinch, 1979; Wallis, 1979) ou de théories scientifiques controversées (Collins, 1975, 1981; Dolby, 1996), mais il existe encore peu de recherches sur les théories marginales produites à l'intérieur du champ scientifique mais ne suscitant guère de controverse et demeurant isolées du *mainstream* de la recherche. La plupart des travaux sur la 'science en action' se concentrent sur la recherche la plus légitime (qui mène souvent au prix Nobel) ou la plus visible (suscitant de vives controverses), mais rarement sur la 'science marginale'.¹ Il est pourtant aussi pertinent d'analyser la stratégie de scientifiques que leur trajectoire amène à occuper les marges du champ scientifique que celle des chercheurs qui parviennent à des positions centrales. La marginalité ne sanctionne en effet pas seulement l'échec dans la compétition au sein du champ, elle est aussi l'indice d'une lutte pour redéfinir sa hiérarchie existante.

S'il est certain que l'orientation des évolutions d'un champ dépend de l'état du système des possibilités qu'il offre à un moment de son histoire, il n'est pas moins certain qu'elle dépend aussi des intérêts (le plus souvent tout à fait 'désintéressés' au sens économique du terme) qui orientent les agents – en fonction de leur position au pôle dominant ou au pôle dominé du champ – vers les possibilités les plus sûres, les plus établies, ou vers les possibles les plus nouveaux parmi ceux qui sont déjà constitués socialement ou même vers des possibilités qu'il faut créer de toutes pièces (Bourdieu, 1994: 70).

Dans le champ de la physique, les agents peuvent ainsi collaborer à la science normale, même 'hypernormale' pour reprendre le terme de Gérard Lemaine (1980), ou à l'avant-garde la plus légitime (les 'super-cordes', la 'matière noire', etc.), ou encore développer leurs recherches dans un nouveau cadre théorique, avec tous les risques que cela comporte. C'est pourquoi la marginalité d'une théorie soulève la question de la stratégie de ceux qui y collaborent même au détriment de leur 'intérêt' à court terme qui oriente plutôt vers la compétition immédiate pour occuper les positions centrales dans les domaines déjà constitués.

La théorie de la relativité d'échelle (TRE) présente l'intérêt d'une telle situation car elle ouvre une possibilité 'qu'il faut créer de toutes pièces' pour reprendre les termes de Bourdieu. En cela, le cas de la TRE diffère de celui de la théorie des variables cachées de David Bohm, par exemple, dont l'interprétation déterministe de la mécanique quantique est certes marginale mais s'inscrit dans une lignée théorique préexistante (les travaux de Louis de Broglie). Bohm ne propose pas tant un nouveau

paradigme qu'une interprétation différente de l'équation de Schrödinger (Freire, 2005). Contrairement aux cas habituels de controverses, les résultats de la TRE ont par ailleurs peu d'échos même quand ils prétendent expliquer des phénomènes importants comme la quantification des orbites des planètes. Le choix de s'y investir engage davantage que le choix d'un projet 'risqué' (par sa difficulté même) dans le cadre d'un paradigme existant (Lemaine, 1980) car, d'une part, la TRE innove par rapport aux bases conceptuelles déjà acceptées par tous et, d'autre part, se trouve aussi marginalisée par rapport à l'avant-garde la plus légitime (comme les 'supercordes'). Ainsi, le cas de la TRE permet d'étudier une région du champ scientifique peu explorée par une sociologie des sciences qui fixe surtout son regard sur les cas extrêmes: histoire de théories devenues reconnues (paradigmes) ou controverses spectaculaires.

La TRE s'est développée à partir de 1984, sous l'impulsion de l'astrophysicien et physicien Laurent Nottale,² directeur de recherche en astrophysique extragalactique au laboratoire Univers et Théorie (LUTH) de l'Observatoire Paris-Meudon, avec pour ambition de réconcilier la physique relativiste et la mécanique quantique par-delà le 'schisme' de la physique (Popper, 1982). Sa relative popularité (surtout en France) auprès des amateurs de vulgarisation scientifique s'explique par la présentation enthousiaste qui en a été faite dans certaines revues de vulgarisation, et contraste avec les réticences ou l'indifférence rencontrées chez la plupart des physiciens.³ La TRE occupe encore, en 2006, une position marginale dans le champ de la physique. Son statut diffère toutefois radicalement des 'théories' produites à l'extérieur du champ, sans correspondre pour autant à celui de la science stabilisée et sanctionnée: comme nous allons le montrer par une analyse bibliométrique détaillée, sa diffusion au sein du champ scientifique est relativement modeste mais réelle, et ses résultats, quand ils reçoivent la sanction d'une publication scientifique, sont rarement pris en compte par les chercheurs qui n'y collaborent pas déjà. Comparée à une théorie non stabilisée mais dominante comme les supercordes, la TRE fait figure de petite entreprise et même d'artisanat qui contraste avec les nombreux chercheurs qui se consacrent à faire avancer la théorie controversée des supercordes.⁴

Cette situation d'isolement au sein du champ révèle une tension conflictuelle entre la transformation que vise à opérer l'innovation théorique et les normes de l'évaluation normale entre pairs. Le scientifique qui entend travailler au sein d'un cadre théorique identifié, à tort ou à raison, comme 'hétérodoxe', s'expose à un processus de marginalisation: les dynamiques dominantes des anticipations du champ orientent la plupart des agents vers d'autres positions, déjà occupées mais légitimes, les

conduisant à produire et à constater l'isolement du dominé, qui fait ainsi figure de 'loup solitaire', pour reprendre l'image de Fritz Zwicky (1898–1974), dont les idées sur les lentilles gravitationnelles et sur la matière noire offrent justement en astrophysique un exemple de travaux jugés déviants dans les années 1930, puis longtemps négligés, avant de devenir, 40 ans plus tard, la référence théorique dominante. Notre étude de la TRE traite donc un cas de 'science en action' encore ouvert.

Le développement de la TRE accompagne la trajectoire de son inventeur et principal promoteur, Nottale, depuis son champ d'origine, l'astrophysique extragalactique, jusque dans des champs éloignés de la physique théorique. Nous analysons cette trajectoire à partir d'éléments recueillis lors d'un long entretien et d'échanges de courriels avec Nottale, complétés par une analyse bibliométrique de ses travaux et de leur réception. L'entrevue nous permet d'avoir accès à la perception subjective du risque encouru par le choix de 'bifurquer' vers une trajectoire marginale après avoir été reconnu pour des travaux 'classiques' alors que l'étude du réseau des publications et des citations nous permet de positionner Nottale dans le champ scientifique par une analyse des usages de la TRE par d'autres chercheurs dans différentes spécialités. La TRE n'est pas encore devenue une théorie anonyme:⁵ citer la TRE ne signifie pas nécessairement en adopter le cadre théorique, mais établit tout de même un lien avec l'activité et la personnalité de son inventeur. Une analyse des contextes de citation précisera les modes d'appropriation de la TRE. Il va de soi que l'analyse des citations ne permet pas de couvrir tous les modes d'appropriation: des références implicites, des contacts directs avec l'auteur et des influences sur des travaux connexes mais non explicitement reliés à ceux de l'auteur sont possibles. Il demeure cependant très peu probable qu'un programme de recherche très visible et influent reste invisible dans les réseaux de citation. Nous examinerons donc le réseau des chercheurs citant les travaux de Nottale, et plus particulièrement ceux qui se réfèrent à la TRE. Le spectre de leur distribution par discipline, qui s'étend de l'astrophysique extragalactique jusqu'à la paléontologie, en passant par la mécanique quantique, est susceptible, au premier abord, d'éveiller un certain scepticisme, voire le soupçon d'une fuite en avant. Toutefois, sans approfondir ici les enjeux épistémologiques, la structure transdisciplinaire de la TRE sera analysée en fonction de la stratégie de Nottale et de ses déplacements dans l'espace scientifique durant les différentes phases de développement de ses relations avec les chercheurs venus d'horizons différents. En conclusion, nous comparerons la stratégie de Nottale avec celle d'autres chercheurs ayant opéré, à un certain moment de leur carrière, une réorientation de leur trajectoire

scientifique, afin de mettre en évidence les conditions sociales de telles bifurcations,⁶ qui mettent en péril le capital cumulé jusque-là.

Une trajectoire scientifique segmentée

Nous découperons cette trajectoire en deux segments: l'un 'classique', comparable à celui de ses collègues astrophysiciens, consacré à l'étude des lentilles gravitationnelles, qui lui a permis une première accumulation de capital scientifique légitime; l'autre 'non-classique', dédié à l'élaboration d'une théorie entièrement nouvelle, la TRE, très originale par la diversité des sous-champs de la physique, et même extérieurs au domaine de la physique, auxquels elle entend s'appliquer. Entre ces deux segments aux orientations différentes se pose la question des motivations de Nottale et de sa perception des risques qu'une telle bifurcation impliquait pour la suite de sa carrière.

Dans ses réflexions sur les rapports entre l'habitus des savants et les positions occupées dans le champ scientifique, Pierre Bourdieu proposait de 'distinguer des familles de trajectoires avec notamment l'opposition entre d'un côté les centraux, les orthodoxes, les continueurs et, de l'autre, les marginaux, les hérétiques, les novateurs qui se situent souvent aux frontières de leur discipline (qu'ils traversent parfois) ou qui créent de nouvelles disciplines à la frontière de plusieurs champs' (Bourdieu, 2001: 87). Dans le cadre de cette problématique, le cas de Nottale est intéressant, car c'est le même individu qui porte les deux types de trajectoire opposés.

Sur la Figure 1, qui retrace l'évolution des publications scientifiques de Nottale au cours des trente dernières années (1975–2005), on observe, malgré une certaine superposition, deux phases distinctes. La première correspond à une trajectoire 'classique' qui débute en 1975 et s'achève en 1991, même si dans les années suivantes l'auteur publie encore quelques textes de vulgarisation sur son premier thème de recherche. La seconde définit une trajectoire qu'on qualifiera de 'non-classique', qui commence avec le premier article consacré à l'espace-temps fractal (Nottale et Schneider, 1984) et se poursuit à l'heure actuelle. De 1975 à 1983, Nottale connaît une période de productivité intense dans des revues prestigieuses (comme *Nature* en 1976 et 1977: Karoji et Nottale, 1976; Nottale et Vigier, 1977). Les articles de cette période portent principalement sur les effets de 'lentilles gravitationnelles' dans le domaine de l'astrophysique extragalactique. A partir de 1984, vient se superposer à cette première trajectoire l'esquisse d'une

trajectoire non classique avec les premières publications consacrées à sa nouvelle théorie, qu'il baptise TRE en 1992 (Nottale, 1992). D'autres publications témoignent de la bifurcation qui s'opère: en 1993, Nottale publie un livre sur la TRE à destination du public scientifique, *Fractal Space-Time and Microphysics: Towards a Theory of Scale Relativity* (dorénavant cité par l'acronyme *FSTM*); et en 1998 paraît son livre de vulgarisation sur le même sujet *La relativité dans tous ses états*. Enfin, à partir de 1999, on observe l'exportation du formalisme de la TRE hors de la physique vers les sciences de la vie et les sciences sociales par le biais de collaborations transdisciplinaires prolongées, en particulier avec le paléontologue Jean Chaline et l'économiste Pierre Grou (Chaline, Nottale et Grou, 1999).

La production de la TRE est avant tout liée au second segment de la trajectoire de Nottale et il est nécessaire d'en analyser la réception et les modes de diffusion au sein du champ scientifique en reproduisant cette démarcation. La Figure 2 confirme l'existence de deux périodes distinctes: les références à la TRE ne décollent qu'en 1994, soit un an après la publication de *FSTM*. Elles dépassent en nombre les références faites à ses articles classiques à partir de 1996, ce qui est un indice du nouveau capital scientifique et de ce que la perception de la trajectoire de Nottale par les autres agents du champ scientifique se modifie. Si les deux courbes (classique et non-classique) fluctuent similairement entre 1994 et 2001, elles évoluent de manière dissociée ensuite: les références aux travaux sur les lentilles gravitationnelles s'amenuisent progressivement (le dernier article savant datant de 1991), tandis que les références à la TRE remontent jusqu'à atteindre 35 par an la dernière année étudiée (2005). Le pic de la production classique de Nottale, en 1986 (5 articles), est suivi de l'accroissement de ses citations qui se maintiennent en moyenne au-dessus de 15 par an jusqu'en 1998 et ne s'effondrent qu'en 2001, soit dix ans après son dernier article classique. Les articles classiques de Nottale, même s'ils ont une durée de vie assez longue, sont soumis au phénomène de 'l'oblitération par incorporation': tous les astrophysiciens connaissent le *weak lensing*, mais personne ne cite plus Nottale comme en étant l'un des initiateurs.⁷ En revanche, la TRE n'est pas encore incorporable, au sens où les autres chercheurs pourraient s'en approprier des résultats sans avoir à en signaler la provenance.

Un autre indice de la différence entre les trajectoires classique et non-classique de Nottale, et de son déplacement hors du champ de l'astrophysique, est que l'éventail des revues qui accueillent ses articles classiques diffère presque totalement de celui des revues qui publient ses travaux sur la TRE. Sur la Figure 3, *Astronomy and Astrophysics* (A&A)

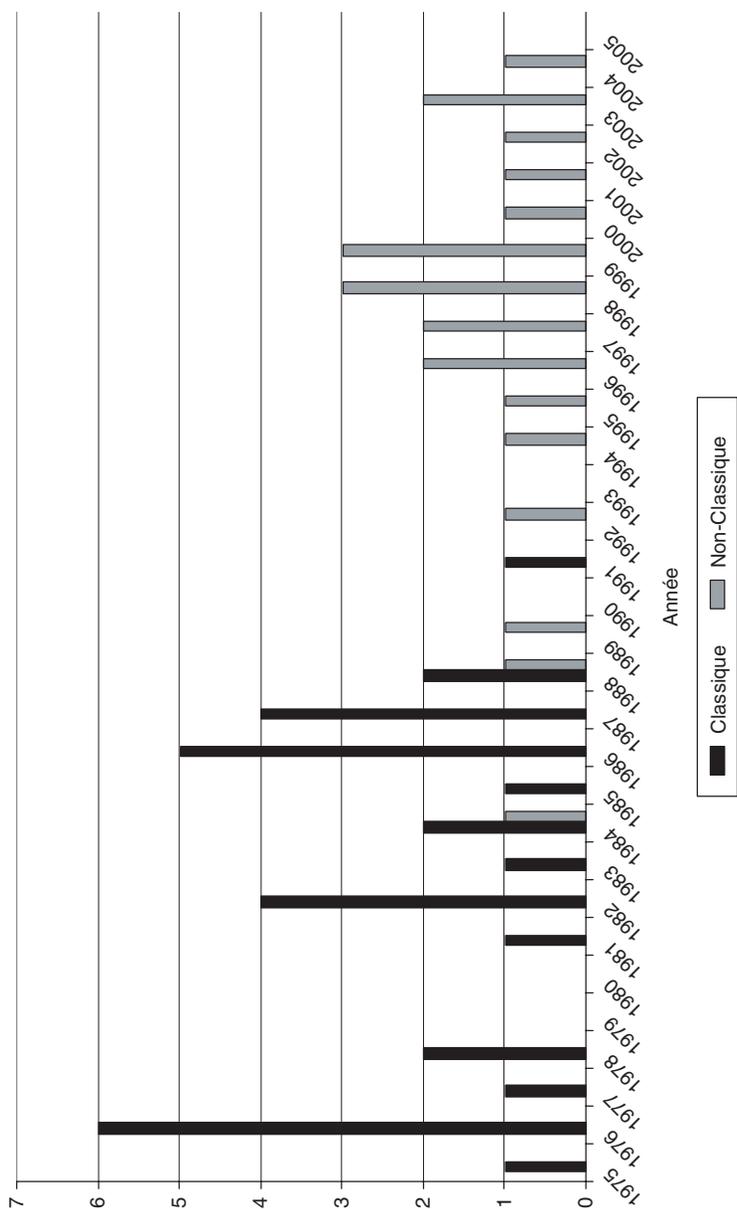


FIGURE 1
Evolution des publications de Notale, selon le type d'article, 1975–2005

Source: Web of Science (décembre 2005)

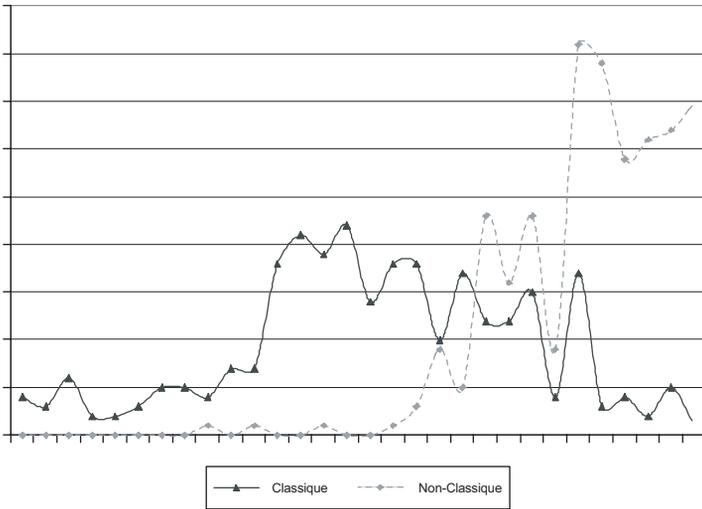


FIGURE 2

Evolution des citations à Nottale, selon le type d'article cité, 1975–2005

Source: Web of Science (décembre 2005)

représente un peu plus de la moitié de ses publications sur les lentilles gravitationnelles et l'on retrouve aussi *Nature*, la revue scientifique la plus prestigieuse.

Par contraste, la Figure 4 montre que c'est une revue plus interdisciplinaire, *Chaos, Solitons and Fractals (CSF)*, qui publie la moitié des articles non-classiques, *A&A* arrivant en second avec 17 pour cent. Cette distinction des trajectoires se confirme du côté de la réception: 53 pour cent des articles citant (sans auto-citation) des travaux classiques de Nottale ont été publiés dans *A&A* tandis que 55 pour cent des articles faisant référence à la TRE (sans auto-citation) l'ont été dans *CSF*. On observe donc un découplage quasi-complet des deux trajectoires en termes d'accès à la publication et à la visibilité.

Le cadre général de l'analyse étant établi, revenons maintenant en détail sur le parcours de Nottale, car il permet de comprendre les raisons de la 'bifurcation' qui intervient dans le passage de sa trajectoire classique à sa trajectoire non-classique et de nuancer le caractère 'classique' de ses débuts en rappelant son association à des travaux alors jugés marginaux en astrophysique.

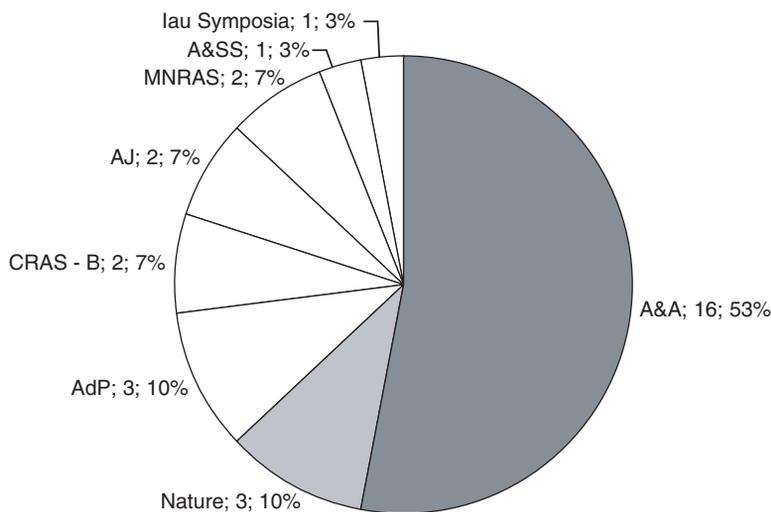


FIGURE 3
Répartition par revue des 30 articles classiques de Nottale (1976–91)

Note: Voir la Table des acronymes en annexe.

Source: Web of Science (décembre 2005)

La phase classique: une ‘étoile montante’ de l’astrophysique

En 1969, Nottale intègre une classe préparatoire du Lycée Hoche de Versailles, établissement aussi élitiste dans son recrutement que les lycées parisiens Louis le Grand ou Henry IV, avant de réussir le concours d’entrée à l’Ecole Centrale de Paris en 1972: ‘Pour moi, Centrale n’était pas un but en soi. Mon idée était de rentrer dans une classe préparatoire, puis une grande école, avec pour objectif de faire de la recherche’.⁸ En 1975, jeune diplômé d’une ‘grande école’, il poursuit en effet sa carrière dans la recherche et entame une thèse sur la ‘Perturbation de la relation de Hubble par les amas de galaxies’ à l’université de Paris VI sous la direction de Jean-Claude Pecker, alors directeur de l’Institut d’astrophysique de Paris (IAP), titulaire de la chaire d’astrophysique théorique au Collège de France et président de la Société Astronomique de France. Pecker est alors aussi connu pour ses travaux hétérodoxes sur le ‘vieillessement des photons’, auxquels Nottale dit ne pas adhérer: ‘Comme je travaillais avec lui, et qu’il avait ces vues hétérodoxes, on me les attribuait, et aujourd’hui encore, je ne

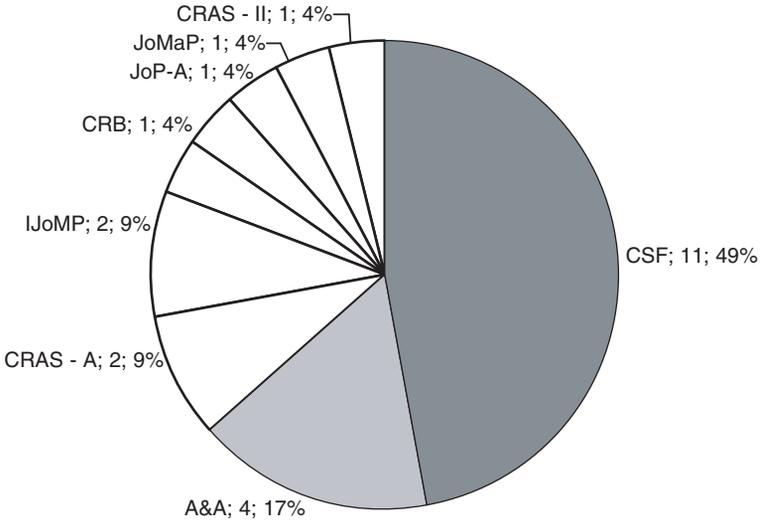


FIGURE 4

Répartition par revue des 30 articles non-classiques de Nottale (1984–2005)

Note: Voir la Table des acronymes en annexe.

Source: Web of Science (décembre 2005)

suis pas sûr qu'on sache que je n'y ai jamais adhéré'.⁹ Il demeure cependant que plusieurs de ses premiers articles signés avec J.C. Pecker et J.P. Vigier portent sur des questions liées à la 'lumière fatiguée' comme celle des red-shifts dits 'anormaux' qui sont interprétés dans ce cadre théorique marginal.¹⁰ Il est donc plausible que les lecteurs de ces travaux l'aient associé à un programme de recherche hétérodoxe:

Pecker travaillait en collaboration avec [Jean-Pierre] Vigier, et ils essayaient d'expliquer par un vieillissement de la lumière certaines anomalies du modèle standard. Il y avait, en effet, un grand nombre d'observations astronomiques qui avaient l'air incompréhensibles et contradictoires avec les idées dominantes. Ils supposaient que le photon avait une masse et pouvait éventuellement interagir faiblement avec des particules (ce qui changeait la physique des particules de manière assez profonde). Alors, Pecker et Vigier acceptaient l'existence de ces effets-là et proposaient à leurs étudiants un double travail: un travail d'analyse des données, pour montrer que de tels effets existent, puis un travail d'interprétation, et ce qu'ils proposaient, c'était la 'lumière fatiguée', etc. Je suis entré là-dedans, j'ai commencé à faire de l'analyse des données, prouvant que les effets étaient vraiment une réalité, en tout cas, qu'ils étaient extrêmement probables, et puis j'en ai même trouvé d'autres, en particulier, des effets de distorsion de la relation de Hubble par les amas de galaxies.¹¹

A la fin des années 1960, les prédictions de Zwicky (1937a, 1937b)¹² quant à la possibilité de détecter des effets de lentille gravitationnelle sont encore jugées fantaisistes par la plupart des astronomes et astrophysiciens. Inspiré par la lecture d'un ouvrage de ce physicien (*Morphological Astronomy*), Nottale décide de travailler à vérifier l'hypothèse de Zwicky:

Je me suis mis à bosser sur les lentilles gravitationnelles sans être en accord avec la communauté extérieure, pour laquelle de tels effets n'existaient pas. On ne les avait jamais détectés, et la plupart des chercheurs en étaient restés à ce que disait Einstein en 1936 [Einstein, 1936]: 'on ne les trouvera pas, c'est trop petit, c'est un effet négligeable'.¹³

A l'aide de modèles théoriques de distribution (solutions localement inhomogènes de la relativité générale), Nottale arrive à la conclusion que les lentilles gravitationnelles doivent exister en grand nombre et à toutes les échelles. Ainsi, ce qui n'était qu'une conséquence virtuelle de la théorie d'Einstein, et, somme toute, considérée comme un aspect secondaire, devient, dans la perspective de sa recherche, une généralité et une source potentielle d'observations inédites. Les effets de lentilles, loin d'être un phénomène exceptionnel, peuvent jouer un rôle important en cosmologie observationnelle, en particulier dans les amas de galaxies (au-delà des effets de galaxies individuelles), qui deviennent ainsi le plus puissant des 'télescopes gravitationnels'. Nottale étudie leur impact sur la relation de Hubble effective dont les fluctuations, loin d'être une anomalie, sont, au contraire, par la prise en compte des effets de lentilles, une confirmation de la relativité générale. Dès avant sa première année de thèse, il publie donc, avec Hiroshi Karoji (professeur à l'Observatoire astronomique national du Japon) et Jean-Pierre Vigier, chercheur à l'Institut Henri Poincaré (et disciple de Louis de Broglie), un article sur les déviations à la relation de Hubble, dans les *Comptes-Rendus Hebdomadaires de l'Académie des Sciences* série B (Karoji, Nottale et Vigier, 1975). A peine un an plus tard, encore avec Karoji, paraît son premier article dans la revue *Nature* (Karoji et Nottale, 1976). Celui-ci établit statistiquement qu'un échantillon de 'chandelles' standards situées derrière les amas les plus riches en galaxie est plus brillant que les autres. Les auteurs interprètent ce résultat comme étant un effet de lentille gravitationnelle dû aux amas de galaxies. Bien que certains astronomes expriment leur scepticisme (Dyer et Roeder, 1976), d'autres articles sont ensuite acceptés dans des revues majeures du champ de l'astrophysique (*Astrophysical Journal*, *Astronomy and Astrophysics*), confirmant la fécondité des perspectives ouvertes. L'interruption des publications d'articles, entre 1979 et 1980, s'explique par son départ pour le service national comme scientifique du contingent (août 1979 à juillet 1980). Nottale con-

sacre aussi cette année à son doctorat d'Etat ès sciences physiques, qu'il soutient avec succès le 9 juin 1980 à l'université Paris VI, avant d'être recruté l'année même, à 28 ans, comme chargé de recherche (c'est-à-dire, aujourd'hui, en tant que 'chargé de première classe' par différence avec un 'chargé de seconde classe' alors appelé 'attaché de recherche') au Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS).

Comme on peut en juger par ce qui précède, la trajectoire de Nottale est alors relativement 'classique' dans le champ des institutions françaises. Elle se conforme aux canons de l'excellence: issu d'une classe préparatoire, il intègre une grande école, puis accumule rapidement un capital scientifique prometteur (par des publications dans des revues internationales prestigieuses) et obtient une position institutionnelle, modeste mais néanmoins appréciable, avec l'obtention de son poste au CNRS. Sa nouvelle position lui offre une certaine autonomie dans la poursuite de ses recherches. Il cumule des compétences théoriques et observationnelles rarement réunies, car plus souvent scindées entre les deux pôles (théorie/observation) qui structurent la division du travail scientifique.

Toutefois, aussi polyvalent qu'il ait été à son entrée au CNRS, la mise en œuvre de son programme de recherche sur les lentilles gravitationnelles supposait la collaboration avec d'autres agents du champ et, surtout, la disponibilité des appareils d'observation permettant la confirmation de ses prédictions théoriques. De 1980 à 1983, Nottale publie 6 articles dans *A&A*, dont 2 en collaboration. Il constitue avec Guy Mathez un centre de données sur les amas de galaxies. Il collabore ensuite avec Bernard Fort (qui deviendra directeur de l'IAP en 1998) pour détecter des objets situés derrière les amas de galaxies. Il formule aussi en collaboration avec Mathez et Fort de nombreuses demandes de temps d'observation. Mais ces demandes de missions régulières au Télescope Canada – France – Hawaï, si elles reçoivent le soutien des théoriciens, se heurtent au scepticisme des astronomes observateurs et seront toutes rejetées.¹⁴ Fort continuera seul ses demandes pour l'observation des secteurs concernés, sans plus mentionner la détection d'effet de lentilles gravitationnelles comme étant son objectif, et finira ainsi par obtenir du temps d'observation, ce qui conduira, en 1987, à la publication d'un article qui sera, après coup, considéré comme la première mise en évidence de l'existence 'd'arcs gravitationnels' (Soucail, Fort et Mellier, 1987). Entre temps, la frustration éprouvée suite à la difficulté de pouvoir mener des observations expérimentales contribue sans doute à l'orientation beaucoup plus théorique que vont prendre les recherches de Nottale.

La Figure 5 recense les chercheurs ayant fait référence aux travaux de Nottale au moins une fois de 1980 à 1986. On y observe la formation de

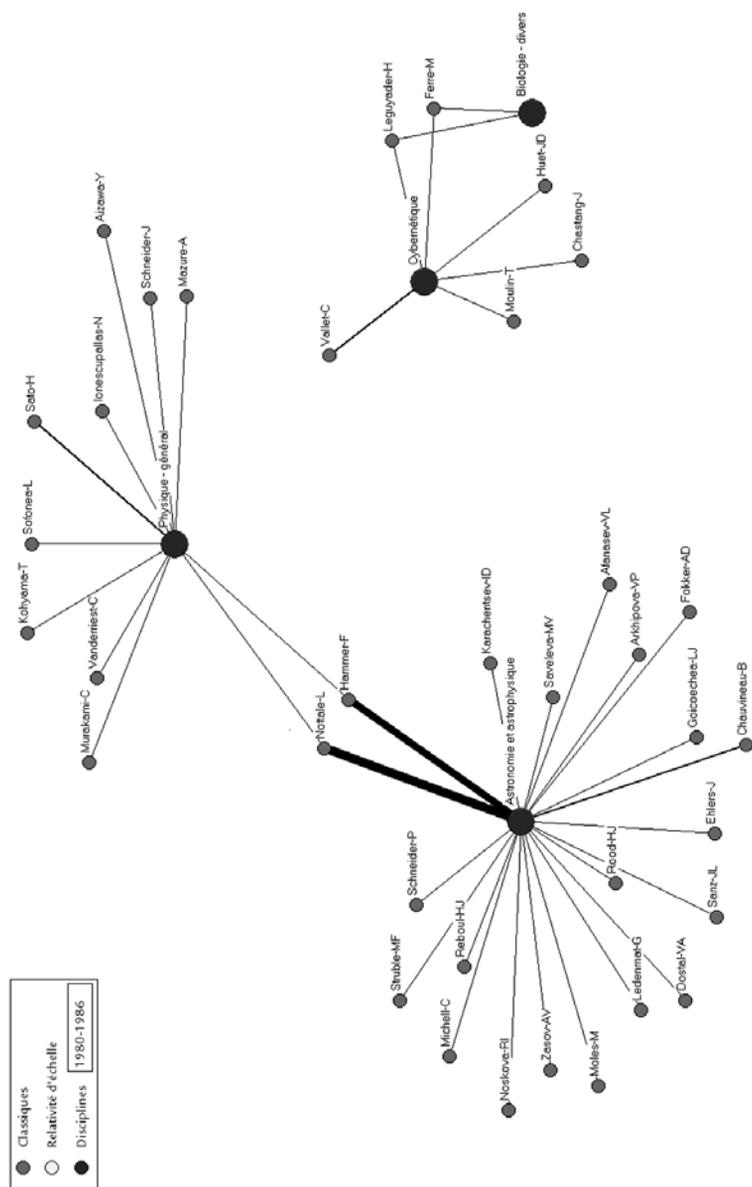


FIGURE 5
Réseau des auteurs citant Nottale, selon la discipline (1980-86)

deux réseaux distincts de citations. Le plus important s'organise autour de travaux sur les lentilles gravitationnelles. On remarque que ce ne sont pas seulement des astrophysiciens, mais aussi des physiciens qui citent ces travaux. Le point jumeau de Nottale, François Hammer, n'est autre que le premier doctorant qu'il a dirigé. Dans le second réseau, T. Moulin est le spécialiste des automates cellulaires avec qui Nottale a travaillé parmi les scientifiques du contingent durant son service militaire.¹⁵

À la fin des années 1980, la prise en compte des lentilles gravitationnelles se généralise en astrophysique extragalactique et en cosmologie. Nottale y contribue en publiant 16 articles de 1984 à 1991: 5 en son nom seul, le reste en collaboration.¹⁶ L'observation des deux premiers arcs gravitationnels derrière les amas A370 et A2218 par B. Fort, en 1987, confirme le bien fondé des demandes d'observations antérieures et contribue à asseoir sa réputation d'astrophysicien: il reçoit, en 1987, le prix 'Digital' de la Société française des spécialistes en Astronomie, et un prix de l'Académie des sciences de Paris. En 1989, sa situation institutionnelle s'améliore: il devient, à 37 ans, directeur de recherche au CNRS, ce qui lui confère une grande autonomie. Il semble d'ailleurs que cet objectif atteint, il se soit progressivement désinvesti de la compétition autour des lentilles gravitationnelles (son dernier article scientifique sur le sujet paraît en 1991) pour se consacrer à l'élaboration de la TRE.

Lorsque nous l'avons interrogé sur ce '*coming out*', Nottale a souligné qu'il avait conscience des risques encourus à s'engager dans cette voie depuis le tout début de ses réflexions. Il dit ainsi avoir développé précocement la stratégie du 'profil bas' afin de conserver toutes ses chances de devenir chercheur:

Dès que j'ai eu cette idée-là, je ne me suis pas dit (je n'étais pas encore au CNRS): 'Tiens, je vais annoncer cela comme orientation de recherche lors de ma candidature au CNRS! Je vais travailler là-dessus'. Je n'aurais jamais fait une chose pareille. Je n'ai pas mis dans mes rapports d'activité au CNRS, avant la fin des années 80, que je travaillais là-dessus. Je faisais cela en parallèle, en plus, comme si c'était dans mes heures de loisir ... Je savais que ce n'était pas publiable. Je savais que je ne pouvais pas faire carrière ou même simplement avoir un poste, si je faisais état de pareilles recherches. Si j'avais annoncé que je travaillais dans cette voie, j'aurais supprimé toute possibilité d'avoir un poste dans la recherche, malgré mes treize articles dans les revues à *referees*, mon doctorat d'état, etc. Ensuite, pendant dix ans, je gardais ça en tâche de fond, et c'est, effectivement, quand j'ai été reconnu pour mon travail sur les lentilles (le prix Digital et d'autres récompenses), que j'ai été nommé directeur de recherche au CNRS, et que je me suis dit: 'Maintenant, je prends le risque'.¹⁷

La bifurcation intervient donc selon une chronologie relevant strictement des conditions sociales d'exercice de la profession. Nottale a pratiqué une stratégie d'autocensure pour faire carrière et ce n'est qu'une

fois assurée sa position, et l'autonomie qu'elle confère, qu'il a pu envisager de développer ses idées sur l'espace-temps fractal. Sa trajectoire scientifique classique s'achève donc en 1991, même si ses travaux antérieurs continuent d'attirer l'attention.

La bifurcation vers l'espace-temps fractal

Nottale découvre *Les objets fractals: forme, hasard et dimension* de Benoît Mandelbrot en 1980, par l'entremise de T. Moulin:

Quand j'ai commencé à penser que la mécanique quantique manquait d'un espace-temps, et que cet espace-temps dépendait explicitement de l'échelle, j'en ai parlé à Moulin et il m'a dit 'ce que tu décris ce sont les fractales de Mandelbrot'. Je connaissais ce nom de 'fractal' de loin, à partir des articles de vulgarisation, mais sans plus, alors qu'ensuite j'ai plongé dans le bouquin de Mandelbrot.¹⁸

Nottale soupçonne la géométrie fractale, qui rend compte de la structure des amas de galaxie, de recéler aussi la solution d'une énigme bien plus grande encore: celle du 'schisme' de la physique entre physique relativiste et mécanique quantique.

Selon Mandelbrot, les fonctions fractales, c'est-à-dire continues non différentiables, loin de former une collection de monstres théoriques, fournissent des modèles d'une grande universalité pour comprendre les phénomènes naturels, parmi lesquels les distributions et les structures observées en cosmologie. L'idée de Nottale est d'aller plus loin en faisant de la fractalité le cas général de la géométrie: il abandonne le principe (implicite) de la différentiabilité et postule un espace-temps 'fractal', dont la rugosité demeure imperceptible à notre échelle, mais se manifeste en revanche aux petites échelles de la microphysique et explique certaines propriétés quantiques. Il rédige alors, avec Jean Schneider, un article intitulé 'Fractals and Nonstandard Analysis: a model for the microstructure of space', où les coordonnées intrinsèques d'une courbe fractale (continue non différentiable) sont définies au moyen de l'analyse non-standard. L'article mentionne la possibilité d'une description spatio-temporelle de la mécanique quantique, développe la description de l'outil mathématique et présente certaines applications en cosmologie.

Soumis au *Journal of Physics* série A (*JoP-A*), en 1981, cet article fournit l'occasion de voir à l'œuvre le processus d'évaluation par les pairs auquel sera constamment confronté Nottale dans ses tentatives de publier ses travaux non-classiques dans les revues centrales de la physique. Alors que l'article est accepté par l'un des évaluateurs, sans

commentaire particulier, il est refusé par l'autre, qui met en doute le sens physique du concept d'espace fractal, ainsi que son éventuelle application en mécanique quantique. Un troisième scientifique est alors sollicité pour départager les évaluateurs. Moins sceptique, il refuse néanmoins finalement l'article, le 7 avril 1982: 'The idea of using non standard analysis to analyse (or to provide new models for) fractals is a reasonable one ... The article should not be published, but the authors should be encouraged to pursue their investigations more profoundly'.¹⁹ Nottale se trouve alors dans une situation qui se répétera souvent: obtenir des évaluations contradictoires de ses travaux non classiques. Il doit aussi trouver un autre débouché s'il ne veut pas abandonner son idée. Remanié, amputé de la partie d'application à la mécanique quantique (suivant en cela les recommandations des évaluateurs, mais aussi du fait des réticences de Schneider à s'engager sur ce terrain), les deux auteurs soumettent l'article, désormais intitulé 'Fractals and Nonstandard Analysis', au *Journal of Mathematical Physics (JoMaP)* lieu de publication habituel des travaux en physique mathématique. Soumis le 2 novembre 1982, il y est accepté le 22 juillet 1983, et paraît, en 1984, sous un titre qui ne fait plus référence à la structure de l'espace, l'idée centrale de la future TRE.

Entre temps, un article signé par Garnet Ord (Ord, 1982), et intitulé 'Fractal space-time: a geometric analogue of relativistic quantum mechanics', est paru dans le *Journal of Physics* série A. Cet article avait été soumis à la revue le 13 septembre 1982, soit quelques mois après le refus de l'article de Nottale et Schneider. Ord y introduit un concept d'espace-temps fractal similaire, surtout en ce qui regarde les applications en mécanique quantique. Le titre suggère une analogie formelle, et tout porte à croire qu'il s'agit d'un cas d'invention simultanée, car Nottale et Ord ne découvriront leur existence respective qu'en 1992 et n'engageront aucune querelle de priorité. Dans *FSTM*, son ouvrage paru en 1993, Nottale indique:

It is only after the completion of this book that I became aware of the interesting work of G. N. Ord [who] introduces the concept of fractal space-time as a geometric analog of quantum mechanics. He obtains results quite similar to those described in Chapter 4 of the present book, including the interpretation of a fractal time of dimension 2.... (Nottale, 1993: 193)

L'article de Ord passa d'ailleurs complètement inaperçu (aucune citation) avant 1993. Par la suite, 70 des 81 articles se référant à cet article citent aussi les travaux de Nottale, bon indice de leur proximité théorique. Au-delà de l'accord sur le concept d'espace-temps fractal, c'est dans le cadre théorique proposé par la TRE que va se développer leur collaboration.

Après cette première publication, Nottale éprouve sans doute une insatisfaction à ne pas avoir pu communiquer de manière intégrale et cohérente le cadre théorique et le programme de recherche qu'il entend promouvoir, surtout en ce qui regarde les applications à la mécanique quantique. Dans sa situation, il se trouve conduit à arbitrer en fonction des ressources et des contraintes pour choisir les revues susceptibles d'accueillir ses travaux. Il doit, certes, publier au plus vite ses résultats, car d'autres pourraient le faire à sa place, et surtout parce que plus vite ses travaux seront connus, plus vite ils pourront servir de références à d'autres qui les approfondiront et leur conféreront une légitimité. Toutefois, il doit aussi éviter de mal les publier, c'est-à-dire dans des revues trop peu sélectives, ce qui risquerait de les dévaluer.

En 1988, l'Académie des sciences de Paris, institution prestigieuse, dont il a été le lauréat l'année précédente, lui offre une occasion de présenter ses réflexions sur la mécanique quantique (Nottale, 1988). Le règlement des *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences* est plus souple que les procédures d'évaluation des revues scientifiques: il suffisait naguère pour publier d'y avoir été invité par un membre de l'Académie. Une telle institution offrait alors une certaine visibilité ainsi que la possibilité de faire enregistrer ses résultats, sans apporter toutefois beaucoup de crédit. Au début des années 1980, l'institution modifie sa procédure et s'aligne davantage sur la méthode d'évaluation par les pairs, l'académicien présentant la note jouant alors plutôt le rôle d'un éditeur. L'article de Nottale a donc été évalué, même si, en dernier ressort, la décision de publier relève toujours de l'académicien qui joue le rôle d'éditeur.

L'année suivante, en 1989, Nottale parvient à placer un premier article synthétique (il fait plus de 70 pages): 'Fractals and the Quantum Theory of Space-Time' (Nottale, 1989) dans l'*International Journal of Modern Physics* série A (*IJoMP*). Cette revue d'assez bonne réputation ne fait toutefois pas partie des plus influentes du champ (son facteur d'impact évolue autour de 1,5). Si l'article de 1984 vaut comme point de départ (avec l'article de Ord), celui de 1989 présente pour la première fois les principes et les concepts fondateurs de la théorie: espace-temps fractal et non différentiable, dépendance explicite des mesures en fonction des résolutions, extension du principe de relativité, covariance d'échelle, définitions intrinsèques de courbes et d'espaces fractals. Il applique en outre cette approche à la mécanique quantique en proposant de rendre compte de certaines propriétés quantiques en termes de trajectoires fractales. Il s'agit, à ce stade, d'une modélisation fractale, comme l'article de Ord, et non de la TRE elle-même (qui entend justifier l'émer-

gence d'une telle modélisation). Cet article joue un rôle fondamental dans le système des citations consacrées à la TRE: il est l'un des plus cités, avec 53 citations dont 13 auto-citations (*Web of Science*, décembre 2005). Un article non classique, consacré à la future TRE, a donc enfin franchi l'obstacle des évaluateurs.

Il faut dire que cet article avait été présenté et recommandé à l'*IJoMP* par l'astrophysicien indien Jayant Vishnu Narlikar, connu pour son opposition à la théorie du Big Bang et sa défense de la théorie cosmologique de l'état quasi-stationnaire (Kragh, 1996; Lepeltier, 2005).²⁰ Cela montre encore, comme avec Pecker et Vigier, que, parmi les astrophysiciens jouissant d'un grand capital scientifique, ce sont les hétérodoxes qui sont les plus susceptibles de prêter une attention bienveillante à la TRE. Dans son avis, Narlikar écrit: 'I had an occasion to discuss with Dr Nottale the work which he proposes to describe in this article. I feel that it is novel and yet very pertinent to the basic issue of the space-time structure. I strongly recommend the publication of the review article.'²¹

La Figure 6 recense les chercheurs ayant cité au moins deux fois Nottale de 1987 à 1992: le réseau demeure centré sur l'astrophysique et constitué par les références aux travaux de Nottale sur les lentilles gravitationnelles. Après 1987, et la confirmation expérimentale des hypothèses sur le *weak lensing*, ce réseau s'étoffe considérablement, ce qui explique la nécessité de ne retenir (pour la lisibilité) que les chercheurs faisant référence au moins deux fois à Nottale. Dans des positions jumelées avec Nottale, on retrouve ses deux doctorants, Hammer et Lefevre, avec qui il cosigne trois articles sur les lentilles gravitationnelles durant la période, dont un dans *Nature* en 1987. Si la croissance des citations des travaux de Nottale porte uniquement sur ses recherches classiques, c'est aussi la période où, après son premier article de 1984, il commence à se citer lui-même dans la perspective de l'élaboration de la TRE (qui est baptisée ainsi en 1992). On remarque qu'il alimente seul les références à ces travaux dans le champ de la physique générale. Cette période apparaît donc comme une transition, le moment de la conversion solitaire: Nottale investit dans un cadre théorique auquel il est le seul, pour l'instant, à reconnaître de la valeur.

L'*IJoMP* publiera aussi l'article introduisant le label 'scale relativity' en 1992, si bien qu'une relation de confiance se développe entre l'éditeur de la revue et Nottale, à qui l'on propose un autre type de collaboration: 'We have received your review article on the above topic for our Scientific Publishing, we would like to invite you to expand the article into a lecture note for us'.²² Devant l'importance des enjeux théoriques, et le besoin de Nottale d'avoir toute latitude pour exposer sa théorie,

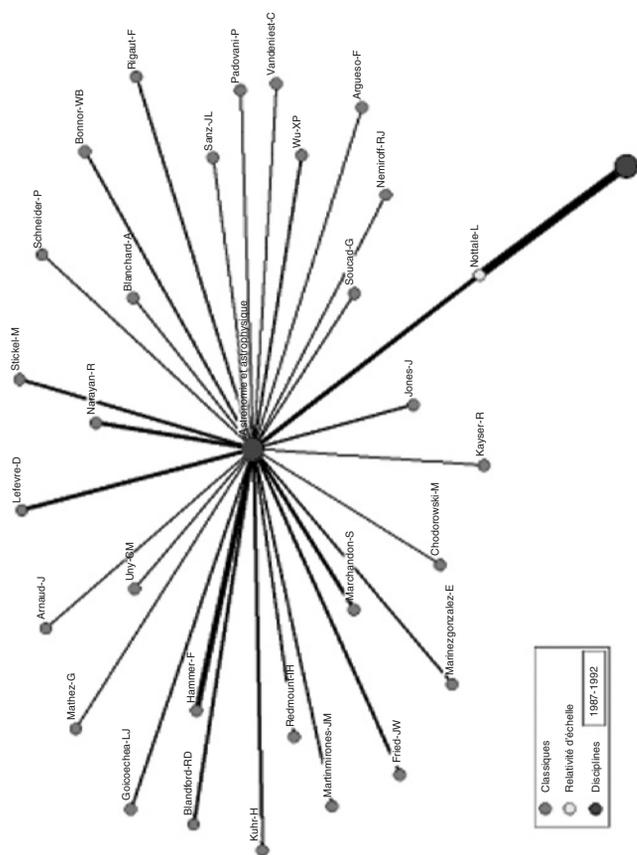


FIGURE 6
Réseau des auteurs citant Nottale, selon la discipline (1987-92)

World Scientific Publishing l'engage donc à écrire un livre sur la TRE. C'est pour Nottale le moment de franchir un cap: il a pu mesurer le degré de résistance du champ à ses articles sur l'espace-temps fractal, avant de trouver de premiers appuis auprès d'une revue et de son éditeur, relativement dominés dans le champ, qui acceptent de 'miser' sur lui. Il a conscience du danger auquel il s'expose de perdre le capital scientifique accumulé en cherchant à imposer ses nouveaux travaux mais, dit-il: 'je n'imaginai pas que le risque était si fort que cela et je n'imaginai tout de même pas que j'allais perdre si vite les acquis, le respect et la reconnaissance de certains de mes pairs'.²³

Ecrire un livre pour exposer des travaux originaux est un procédé assez peu commun dans le champ de la physique contemporaine: même si le comité éditorial qui supervise *FSTM* comporte plusieurs prix Nobel et autres sommités, les livres scientifiques sont principalement des manuels ou des essais écrits par des chercheurs en fin de carrière, et ce moyen de communication ne sert guère à divulguer des résultats inédits. Si Nottale se résout à présenter sa théorie sous cette forme, c'est qu'il n'est pas parvenu à publier la plupart de ses projets d'articles et que le format du livre est le seul à lui permettre de présenter sa démarche de manière cohérente.

L'ouvrage débute par une justification de l'intégration des conditions d'échelles à la théorie physique: 'What determines the universal scales in Nature? What is the origin of the elementary particles scales, of the unification and symmetry breaking scales, of the large scale structures in the Universe?' (Nottale, 1993: 1). Suit une présentation détaillée des outils mathématiques, de leur application à la mécanique quantique, et un ensemble de résultats provisoires et de prédictions qui portent sur les marges de la science classique: 'scale laws and scaling behaviours are encountered in many situations, at small scales (microphysics), large scales (extragalactic astrophysics and cosmology) and intermediate scales (complex self-organized systems)' (Nottale, 1993: 1). *FSTM* est ainsi destiné à répondre aux questions et aux objections des chercheurs désorientés par la complexité et l'originalité du cadre théorique dont se réclament les articles de Nottale. Il constitue un point de ralliement pour les chercheurs associés à la TRE: c'est d'ailleurs, de loin, la production de Nottale la plus citée, avec 173 citations (dont seulement 15 auto-citations).

Parmi les chercheurs qui se réfèrent massivement à l'ouvrage, on trouve d'abord El Nashie (22 citations pour 12,7% du total), Nottale lui-même (9,8%), puis Sidharth (8%), Agop (7%) et Ord (7%). L'évolution des citations prouve que la réception est plus étalée dans le temps et persistante que s'il s'agissait d'un simple article: *FSTM* est cité plus de

10 fois à partir de 1996 et environ 20 fois par an à partir de 2001. Il constitue un point d'accumulation du nouveau capital scientifique de Nottale: plus de 70 pour cent des citations de *FSTM* sont effectuées dans le contexte de la physique multidisciplinaire, seulement 5 pour cent dans son champ d'origine, l'astronomie et l'astrophysique, c'est-à-dire moins qu'en physique des particules et des champs (6,5%). Toutefois, du point de vue de Nottale, c'est un échec relatif dans la mesure où de nombreux scientifiques, et la plupart des évaluateurs, ne l'accepteront pas comme mode de communication scientifique et référence légitime: 'ça n'a pas marché du tout: aucun des *referees* n'a voulu aller voir dans ce livre...'.²⁴

Le recours à une technique aussi surannée de diffusion des idées scientifiques n'est cependant pas seulement un expédient pour contourner la difficulté de publier des articles. Le format du livre séduit donc peut-être aussi Nottale parce qu'il lui permet de présenter la TRE selon une certaine perspective historique sur l'évolution des théories physiques. L'ensemble de sa démarche vise en effet à refonder la physique par analogie avec la 'révolution' accomplie par Einstein en 1905. Le principe de relativité est mobilisé pour maîtriser la relativité d'échelle par analogie avec la relativité de mouvement, et l'adoption de la géométrie non différentiable est présentée comme une transformation analogue au remplacement de la géométrie euclidienne par la géométrie non-euclidienne dans la relativité générale d'Einstein. Dans cette perspective, le cadre théorique proposé par la TRE pourrait aussi être qualifié de 'non-classique', au sens où l'entendait l'épistémologue Gaston Bachelard (1975), c'est-à-dire comme une rupture épistémologique qui vise à une refondation récurrente, par analogie avec la généralisation de la géométrie euclidienne par la géométrie *non*-euclidienne. Nottale s'inscrit ainsi dans une filiation au moment même où il propose de changer de cadre théorique. Il ne s'agit pas selon lui de créer une variété déviante de travaux scientifiques: il affirme agir au nom d'un principe récurrent de la physique mathématique, le 'principe de relativité'. Ainsi, les deux premiers chapitres de *FSTM*, consacrés à l'histoire des sciences et aux réflexions épistémologiques, visent à présenter la TRE comme la digne héritière d'une lignée relativiste, initiée par Galilée et régénérée par Einstein:

Our proposal is that such a fundamental principle upon which a theory of scale laws may be founded is the principle of relativity itself. But, by 'principle of relativity' we mean something more general than its application to particular laws: we actually mean a universal method of thought. Following Einstein, we shall express it by postulating that the laws of Nature must be such that they apply to reference systems whatever their state. The present theory of relativity, after the work of Galileo, Poincaré and

Einstein, results from the application of this principle to space and time coordinate systems and to their state of position (origin and axis orientation) and of motion (which may be eventually included into axis orientation in space-time). We have suggested that the principle of relativity also applies to laws of scale. The present book is an account of this proposal and of its possible first implications. (Nottale, 1993: 2)

La parution du livre a profondément modifié la perception de Nottale par les autres agents du champ (même si ce n'est pas dans le sens espéré) et, par la suite, l'activité de Nottale se réoriente et tend à se diversifier: elle ne vise plus tant à faire fructifier son capital spécifique d'astrophysicien qu'à asseoir son statut de théoricien indépendant en produisant des résultats en physique des particules, ou sur les systèmes chaotiques, aussi bien qu'en cosmologie. Toutefois, le problème essentiel de Nottale demeure: s'il veut communiquer le cadre théorique de la TRE à d'autres chercheurs, il doit le faire par un canal légitime de communication scientifique, c'est-à-dire trouver un débouché dans des revues du champ scientifique pour ses articles sur la TRE.

Chaos, Solitons and Fractals: un asile pour hétérodoxes

La première revue disposée à accueillir de manière régulière les travaux de Nottale sur la TRE sera la revue interdisciplinaire *Chaos, Solitons and Fractals (CSF)*. Fondée en 1991, et toujours dirigée depuis par le physicien Mohamed Salah El Nashie, la revue *CSF* accepte en mars 1994 'Scale Relativity, Fractal Space-Time and Quantum Mechanics' (Nottale, 1994), dont le titre explicite les points principaux de la TRE, ce qu'il n'avait pu faire auparavant dans les revues centrales du champ. Par la suite, Nottale présentera aussi dans cette revue des résultats sur la cosmologie et publiera 6 autres articles sur la TRE de 1994 à 1998. *CSF* possède, en 2005, un fort coefficient d'impact (1,9), mais si le ratio entre le nombre d'articles publiés et le nombre de citations recueillies est avantageux pour la revue, le pourcentage important d'auto-citation suggère d'en relativiser la portée en termes de visibilité dans le champ scientifique. Qui plus est, le fait que *CSF* soit la revue la plus citée *dans CSF* ainsi que la revue *citant* le plus *CSF* renforce l'impression d'avoir affaire à une communauté dense mais faiblement connectée aux autres revues du champ scientifique.

Les contributeurs de cette revue transdisciplinaire ont en commun une familiarité avec des modèles mathématiques sophistiqués, et la structure et le formalisme de la TRE leur apparaît donc sans doute moins déroutants qu'à d'autres évaluateurs. Cet 'air de famille' entre les

différents contributeurs de *CSF* qui font référence aux travaux de Nottale est toutefois quelque peu trompeur: il ne signifie pas que tous ces chercheurs aient intégré le cadre théorique de la TRE. Quoi qu'il en soit, en diffusant ses articles non-classiques dans cette revue, Nottale trouve enfin un lieu de publication régulier et change d'audience: il publie désormais en tant que théoricien des fondements de la physique. Les autres contributeurs de *CSF* ne le connaissent d'ailleurs qu'en tant qu'inventeur de la TRE: ils ne citent jamais ses travaux sur les lentilles gravitationnelles.

En dépouillant les 174 articles de *CSF* citant Nottale, entre 1991 et 2005, afin d'analyser le contexte où interviennent les références à la TRE, nous avons constaté que Nottale y est cité en moyenne deux fois par article. Les chercheurs le citant le plus sont El Naschie (35), Sidharth (17), Agop (15), Castro (11), et Ord (10). En plus de *FSTM* et de ses principaux articles,²⁵ on trouve aussi, ce qui est plus surprenant, l'ouvrage de vulgarisation *La Relativité dans tous ses états* (15 citations). La plupart des citations renvoient à l'ouvrage ou à l'article dans leur ensemble (131) plutôt qu'à un résultat précis ou une équation particulière (43), car les auteurs se réfèrent avant tout à Nottale pour justifier le recours au concept 'd'espace-temps fractal' sans adopter nécessairement la TRE.

En règle générale, plus les citations sont précises, plus l'article respecte le cadre théorique de la TRE, sans que cet indicateur soit absolument fiable: la citation d'un résultat ou d'une équation est parfois le signe d'un accord ponctuel n'impliquant pas que l'auteur adopte intégralement la TRE et, à l'inverse, une référence vague ne signifie pas davantage qu'il s'abstienne d'utiliser des démonstrations. Si bien que sur 174 articles, seuls 31 s'inscrivent explicitement et exclusivement dans le programme de recherche de la TRE. Les auteurs en sont Nottale et ses étudiants et collaborateurs directs (Da Rocha, Pissondes, Cresson, Le Méhauté) mais aussi d'autres chercheurs autonomes (comme Adda, Khalil, Liu, Neto, Okninski et Jumarie). On trouve aussi des contributions ponctuelles par Argyris, Castro et Sidharth, qui revendiquent aussi d'autres 'labels': Argyris invoque le 'Superchaos', Castro une 'New Relativity', et Sidharth le 'Quantized fractal spacetime'. A cette trentaine d'articles, il convient d'ajouter les 10 articles de Ord, qui présente ses travaux sous le nom de 'Random walk' ou 'Spiral model' mais manque rarement de rappeler leur convergence et leur compatibilité avec la TRE. D'autres articles citent Nottale sans revendiquer l'appartenance à la TRE et se présentent comme des contributions à la 'Loop quantum theory', au modèle d'Everett, ou à la 'Quantum superstring theory'.

Toutefois, le label qui domine au sein de *CSF* est celui du 'Cantorian space-time' développé par le rédacteur en chef de la revue, El Naschie

(94 articles se situent explicitement dans ce cadre théorique). Pourquoi autant d'articles font-ils référence à la TRE, alors même qu'ils revendiquent leur appartenance à un autre programme de recherche? C'est ici l'occasion de souligner l'importance de l'éditeur, car El Naschie dispose d'un puissant capital social et publie abondamment dans la revue qu'il dirige (plus de 90 pour cent de sa propre production est publiée dans *CSF*). Cette double fonction explique la facilité avec laquelle El Naschie, prenant appui sur certains acquis de la TRE, a pu développer son propre programme de recherche et y attirer de nombreux chercheurs. Au départ, selon Nottale, El Naschie prétend promouvoir la TRE dans *CSF*:

Il m'a proposé de faire un numéro spécial sur l'espace-temps fractal, qui devait être organisé autour de l'article que j'allais lui donner (c'est le numéro paru en 94), mais entre temps, il s'est connecté avec Prigogine et donc le projet a évolué: au début, je recevais des lettres se référant au 'numéro sur la relativité d'échelle', et puis (je le comprends: il voulait lancer sa revue, un prix Nobel, ça ne se refuse pas) il y a eu un changement d'orientation et du coup mon article n'était plus qu'un article au milieu des autres et non le centre (logiquement attribué à Prigogine). Quant à El Naschie, il n'utilise pas mes méthodes. Il faut être clair là-dessus: la chose qu'il a récupéré, c'est le concept d'espace-temps fractal. Mais il est parti d'emblée sur un espace-temps discontinu, c'est pourquoi il appelle cela un espace-temps 'Cantorien' (ou $E^{(c)}$, ce que je comprends moins bien) et donc, ayant opté pour la discontinuité, il a suivi la piste de la théorie des nombres. Alors que je fais une physique de la continuité, cela fait une différence essentielle. On a eu plein de discussions, parfois animées, parce que je tiens sur mes positions et lui sur les siennes. Je respecte ce qu'il fait, mais en même temps je pense qu'il ne faut pas confondre les deux démarches.²⁶

L'évolution des références aux travaux de Nottale dans les articles d'El Naschie est instructive sur la confusion parfois entretenue délibérément entre la TRE et d'autres cadres théoriques. En 1994, 'l'espace-temps cantorien' est, selon El Naschie, une 'légère radicalisation' de la TRE:

More precisely, we mean the implications to the comprehensive effort of Nottale (4) to give up differentiability and assume micro space-time to be a fractal and our own slightly more radical proposal to give up even continuity and regard micro space-time as a multidimensional Cantor set. (El Naschie, 1994a: 177)

Dans un autre article (El Naschie, 1994b), paru la même année dans *CSF*, il souligne combien certains des résultats de sa propre théorie s'éloignent des hypothèses de la TRE (ainsi que des travaux de Ord), mais, cinq ans plus tard, il a opté pour une stratégie d'amalgame au sein du label 'Cantorian-fractal spacetime' censé englober ses propres travaux en même temps que ceux de Nottale et de Ord: 'the theory of Cantorian-fractal spacetime, developed by Nottale, Ord and the author' (El Naschie, 1999a: 17). En 2004, le double mouvement d'appropriation

et de démarcation opéré par El Naschie a évolué. Il donne désormais ses recherches comme un prolongement de la TRE en même temps qu'il insiste sur l'originalité de son programme et sur sa compatibilité avec la théorie physique non stabilisée dominante, les Supercordes. S'il lui arrive de diluer l'importance de la contribution théorique de Nottale, il n'en persiste pas moins à revendiquer son autorité pour justifier sa propre théorie: 'Nottale has acknowledged the importance of the $E^{(s)}$ and that it goes much further than his own theory' (El Naschie, 2006: 320).

En somme, l'évolution des références à la TRE dans les articles d'El Naschie semble obéir à deux tendances opposées: une stratégie de légitimation, qui exige de faire référence aux travaux de Nottale comme à des travaux fondateurs et décisifs, et une stratégie de distinction, consistant à présenter le 'Cantorian spacetime' comme la théorie la plus aboutie par rapport à laquelle les autres programmes de recherche, tant la TRE que les travaux de Ord, sont tenus pour des étapes préparatoires, moins radicales. Cette ambivalence symbolique a un effet sur les autres chercheurs publiant dans *CSF*.²⁷ Sur 174 articles citant Nottale dans *CSF*, 154 citent aussi El Naschie, créant une forte association entre ces deux auteurs au sein de *CSF*. L'association systématique de Nottale au développement d'une théorie qui s'écarte profondément du cadre théorique de la TRE, produit un effet de 'halo' qui masque sa singularité théorique. Par mimétisme (peut-être aussi par complaisance vis-à-vis de l'éditeur), nombreux sont les chercheurs qui citent Nottale alors qu'ils développent leur recherche dans le cadre théorique de l'espace-temps cantorien. En guise de comparaison: les travaux de Ord n'y sont cités que 92 fois. Le label 'Cantorian-fractal spacetime' est, certes, parfois détaché de Nottale dans certains articles,²⁸ mais la référence à la TRE y demeure. La solidarité conceptuelle de la TRE avec ces travaux paraît, au demeurant, faible et ambiguë: ils ont en commun de postuler l'existence d'un 'espace-temps fractal', mais celui de la TRE est continu et résulte de l'abandon de la différentiabilité, tandis que l'espace-temps cantorien est discontinu. L'alliance objective entre ces théories hétérodoxes est travaillée par leurs rivalités internes, et le label qui vise à additionner leurs forces symboliques dissimule à peine les tentations hégémoniques d'El Naschie.

Un autre indice de l'influence d'El Naschie sur les autres chercheurs, nous est livré par les références à *La Relativité dans tous ses états*, qui se multiplient dans *CSF* après qu'il ait lui-même élogieusement mentionné l'ouvrage: 'An excellent popular account of the theory of fractal space by Nottale has just appeared in French and an English translation may not be too far away in the future' (El Naschie, 1999b: 579). De manière assez surprenante, cet ouvrage conçu pour le grand public est

souvent considéré comme une source primaire d'information sur la TRE, et l'on peut supposer que la majorité des jugements positifs ou négatifs exprimés à l'égard de la théorie s'appuient sur la seule lecture de cet ouvrage. On trouve, dans l'ensemble des articles scientifiques citant Nottale, 24 références à *La relativité dans tous ses états* (dont 16 dans *CSF*). Carlos Castro s'y réfère 15 fois, El Naschie 5 fois. En revanche, les chercheurs s'inscrivant explicitement au sein du cadre théorique de la TRE ne se réfèrent presque jamais à la vulgarisation (une seule citation). Les étudiants et collaborateurs de Nottale n'entretiennent pas non plus la confusion entre la TRE et l'espace-temps cantorien, s'ils citent El Naschie dans deux tiers des cas lorsqu'ils publient dans *CSF*, ils ne le font jamais lorsqu'ils publient ailleurs (Nottale cite une fois El Naschie dans *A&A*). Tout en donnant ainsi des gages et des marques d'estime à leur 'hôte', leur positionnement s'effectue en fonction de la TRE et non au sein de la communauté 'fractalo-cantorienne'.

Entre ces deux pôles, l'inscription stricte dans la TRE et la dissolution au sein du 'Cantorisme', certains oscillent, comme Castro, qui se revendique tantôt de la TRE, tantôt d'El Naschie, parfois de sa propre 'New Relativity', et présente ses recherches en relation avec la théorie des Supercordes: 'Nottale's special scale-relativity principle was proposed earlier by the author as a plausible geometrical origin to string theory and extended objects. Scale relativity is to scales what motion relativity is to velocities' (Castro, 1999: 295). Castro utilise la TRE en physique des particules. Sa principale référence, après *FSTM*, est *La relativité dans tous ses états* (citée 9 fois en 11 articles), et il cite aussi *Les arbres de l'évolution* (Nottale, Chaline et Grou, 2000) au sujet des lois log-périodiques: 'we will show that complex dimension is not just a mathematical artefact but that it is deeply related to the log-periodic laws in Nature discussed amply by Nottale et al. in their theories of the fractal tree of life and fractal evolution' (Castro, 2002: 1343). Plutôt que des références, ces citations constituent un prolongement de la popularisation au sein du champ scientifique.

Il y a aussi dans les articles de Castro des références à des points épistémologiques précis: 'Nottale has argued in numerous occasions that there is a deep link between the renormalization group process, that is based in scaling arguments, and scale relativity' (Castro, 2000: 1668) et, c'est assez rare pour être souligné, la mention de résultats, tels que les prédictions des orbites préférentielles par l'équation de Schrödinger généralisée: 'As the years pass by, more and more planets have been found confirming Nottale's predictions within his framework of Scale-Relativity' (Castro et Granik, 2000: 2169).

Au final, les chercheurs qui citent Nottale dans *CSF* le font toujours de manière laudative même si c'est pour abandonner l'instant d'après la TRE, l'amalgamer au Cantorisme, ou développer leur travail dans un autre cadre théorique. Les références à *FSTM* jouent pour les Cantoriens le rôle d'une justification de l'abandon de la différentiabilité *et* de la continuité. Les citations plus précises d'équations ou de résultats soulignent souvent davantage une convergence d'intérêts théoriques pour rompre avec l'orthodoxie, ou un accord ponctuel, qu'une adoption de la théorie dans son ensemble. Les noms de Ord et Nottale sont fréquemment associés à celui d'El Naschie dans les généalogies du concept 'd'espace-temps fractal', et l'on y constate des variations importantes dans l'ordre des priorités théoriques. L'ensemble des articles se référant à Nottale au sein de *CSF* produit enfin un effet de halo, à travers le concept d' 'espace-temps cantorien-fractal', qui ne facilite guère la perception de la spécificité du cadre théorique de la TRE.

La barrière des évaluateurs

En 1996, une autre porte s'ouvre devant Nottale, ou plutôt devant la TRE, car cette porte était déjà ouverte à Nottale du temps qu'il travaillait sur les lentilles gravitationnelles: la revue *Astronomy and Astrophysics (A&A)*. Cette revue européenne, dirigée alors par James Lequeux,²⁹ accepte, 5 ans après son dernier article sur les lentilles gravitationnelles, un article sur la TRE: 'Scale-relativity and quantization of extra-solar planetary systems' (Nottale, 1996b). Nottale publiera 3 autres articles (dont 2 en collaboration, l'un avec Gérard Schumacher et Jean Gay, l'autre avec Schumacher et Éric Lefèvre) dans la même revue. Or, l'on constate qu'après le départ de la direction de Lequeux, en 1999, Nottale ne parvient plus à publier dans cette revue. Cela met en évidence le rôle crucial que cet éditeur a joué dans la sélection des évaluateurs et l'interprétation de leurs avis. Selon Nottale, Lequeux était, au départ, tout aussi sceptique que ses autres collègues à l'égard d'une théorie faisant intervenir en astrophysique une équation de Schrödinger. Mais il connaissait aussi Nottale pour ses travaux sur les lentilles gravitationnelles: 'il savait que je n'étais pas quelqu'un qui raconte n'importe quoi'.³⁰ Cet éditeur, sans sacrifier ses exigences sur les critères de scientificité, ne tolérait pas qu'on jugeât la TRE avec des arguments d'autorité (sollicitant parfois successivement plusieurs évaluateurs avant d'obtenir un avis argumenté) et refusait l'amalgame entre la TRE et les théories fantaisistes qui fleurissent dans les revues de vulgarisation: 'Vous savez, ceux qui vous racontent comment

Einstein s'est trompé, moque James Lequeux, Nottale n'a rien à voir avec ça'.³¹ Cette estime préalable aura eu son importance quand Lequeux, lisant les premiers avis d'évaluateur sur la TRE, s'en montra insatisfait:

Surtout, il s'est rendu compte que les avis des *referees* n'étaient pas rationnels: il voyait arriver des avis ahurissants, sans argumentation logique, c'était 'sociologique', pas scientifique. Donc il s'est dit: tout de même, il doit exister des physiciens capables d'évaluer correctement, de mettre leur nez dedans et de dire si c'est sérieux ou pas. Il a cherché, il a trouvé, et je me suis retrouvé avec des avis de *referees* qui disaient: c'est une découverte importante, c'est très important, il faut absolument publier, c'est une nouvelle vue de la formation des structures³²

Il n'est pas rare que l'éditeur d'une revue scientifique, qui est normalement le seul à connaître l'identité de l'évalué et des évaluateurs, puisse deviner le résultat d'une évaluation en fonction des divergences théoriques ou d'affinités qui structurent le champ. Ayant lui-même des compétences en astrophysique et ayant examiné personnellement les travaux de Nottale, Lequeux pouvait faire le tri entre des avis motivés et des refus reposant sur des arguments d'autorité. Pour Nottale, l'éditeur n'a fait ainsi que rétablir les conditions satisfaisantes du bon fonctionnement de la procédure d'évaluation:

Pour en revenir aux enjeux de l'évaluation: qu'un *referee* affirme 'je comprends parfaitement et donc je sais que c'est faux', c'est chose parfaitement normale; il est maintenant totalement illégitime qu'un *referee* dise 'je n'y comprends rien, donc je refuse'; s'il s'estime incompetent, il doit se désister. C'est là où Lequeux a fait son boulot comme éditeur: il a récusé un certain nombre d'avis de ce genre, cherchant un *referee* compétent jusqu'à ce que cette personne dise 'je comprends', et quand il l'a trouvée, cette personne, qui a dit finalement 'je comprends', a dit 'ça marche': 'Je comprends donc ça marche'. Tous les 'je ne comprends pas' aboutissent à des 'ça ne marche pas'.³³

Constatant ainsi que la TRE rencontre un grand scepticisme chez les astrophysiciens (qui ne sont pas familiers avec certains des outils mathématiques), Lequeux va solliciter des physiciens pour évaluer les articles de Nottale. Il obtient ainsi des avis d'une toute autre tonalité et accepte deux autres articles sur la TRE dans *A&A*, le premier sur la quantification des orbites du système solaire, le second sur les applications de la TRE en cosmologie en général. Certains avis d'évaluateurs sont même très positifs: 'The ideas involved in this work are extremely interesting and important, and the potential scope of scale relativity is quite extraordinary. The manuscript is definitely worth publishing, as it could mark the beginning of a very different approach to physics over many scales.'³⁴

C'est donc en sortant du sous-champ spécifique de l'astrophysique qu'il obtient une procédure d'évaluation qui lui semble fiable. Cette adaptation peut être mise en relation avec la structure de la TRE, qui déborde l'ensemble des sous-champs qu'elle entend réunifier, mais elle

montre surtout que l'évaluation des travaux non-classiques s'accorde mal aux procédures d'évaluation de la science normale, problème sur lequel nous reviendrons dans la section suivante. Bien que la stratégie de Lequeux ait permis à Nottale de publier dans *A&A*, elle ne contribua pas à renforcer la légitimité de la TRE, tant auprès des physiciens que des astrophysiciens. Selon Nottale, en effet, les physiciens, ignorant que c'étaient certains des leurs qui avaient accepté ces travaux non-classiques, continueront de penser que la TRE est une affaire d'astrophysiciens, tandis que ces derniers en déduiront que la TRE n'est pas sérieuse, puisque les physiciens ne s'y intéressent pas. Malgré l'action déterminée de Lequeux, *A&A* ne sera pas un tremplin pour la légitimation de la TRE, ces articles restant peu cités.³⁵

La période 1993–8 voit donc tout de même l'émergence du réseau non-classique. La Figure 7 recense les chercheurs ayant cité les articles de Nottale au moins deux fois de 1993 à 1998. Un basculement du centre de gravité du réseau s'opère de l'astrophysique vers la physique générale en même temps que le remplacement presque complet des références aux travaux classiques par des citations à des articles sur la TRE ou à l'ouvrage *FSTM*. La substitution a lieu sans qu'il y ait de conversion des autres agents: aucun chercheur citant Nottale pour ses travaux classiques ne cite par la suite la TRE. D'autre part, les références résiduelles aux travaux classiques se cantonnent à l'astrophysique (à l'exception d'Hermann). Parmi les quatre chercheurs faisant référence à la TRE dans le domaine de l'astrophysique, deux sont des collaborateurs directs (Gay et Schumacher) et cosignent un article avec Nottale dans *A&A* en 1997, et un troisième (Guyard) est un stagiaire de Schumacher. Du côté de la physique générale, on remarque les références assez nombreuses de Ord qui vient s'associer aux travaux de Nottale, la présence d'un autre doctorant de Nottale, Jean-Claude Pissondes, et la contribution de Frédéric Héliodore et Alain Le Méhauté, qui introduisent les références à la TRE dans le domaine des sciences de l'ingénieur et de l'électronique. Un autre groupe, sans relation avec Nottale, mobilise la TRE pour traiter des problèmes liés à la physique de l'état solide.

Cette nouvelle configuration tend à prouver que Nottale, s'il n'est pas parvenu, malgré l'attention bienveillante de l'éditeur d'*A&A*, à imposer sa position dans son champ d'origine, l'astrophysique, a réussi, en revanche, son passage vers la physique théorique via la revue interdisciplinaire *CSF*. Les champs qui s'ouvrent à la TRE correspondent à des domaines où les outils mathématiques liés aux fractales sont déjà employés: la physique des solides utilise les fractales pour comprendre la résistance des matériaux et l'électronique pour toute une série de phénomènes (Le Méhauté, 1990).

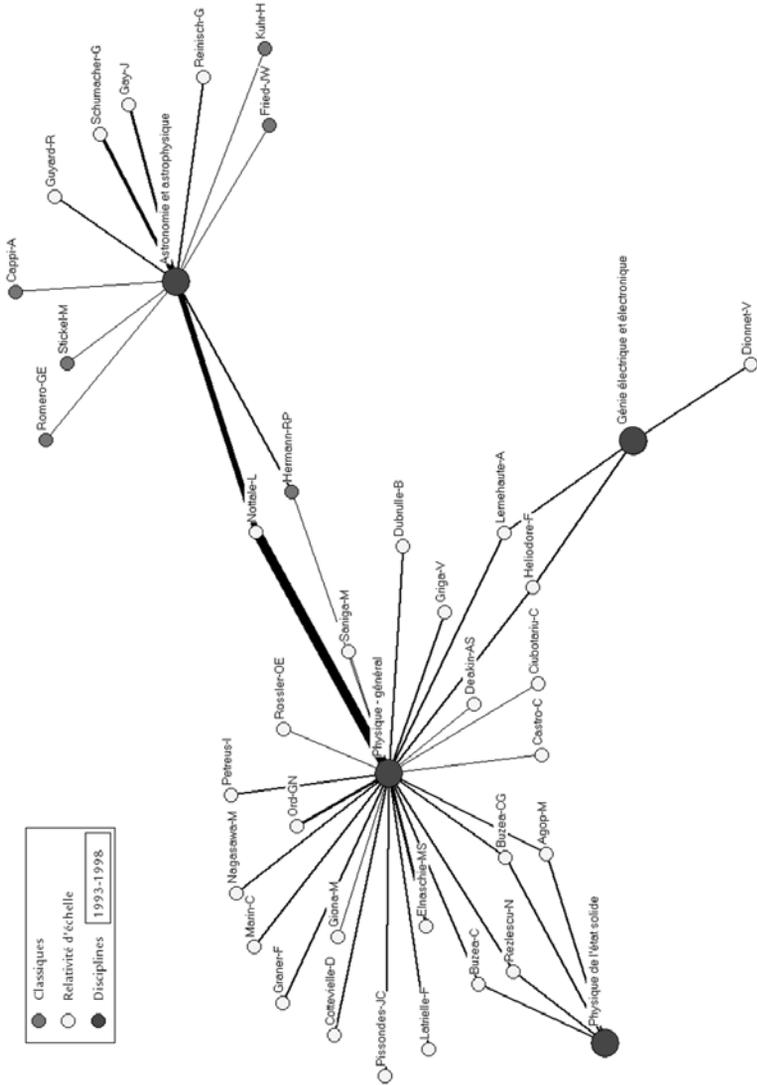


FIGURE 7
Réseau des auteurs citant Nottale, selon la discipline (1993-98)

Le développement du réseau de la TRE essentiellement hors du champ de l'astrophysique est quelque peu surprenant. Le premier article accepté par *A&A* traitait pourtant d'un type de prédiction très spectaculaire et aisément falsifiable: les orbites préférentielles des planètes dans les systèmes extra-solaires. La TRE justifie statistiquement la distance des planètes au soleil (d'une manière tout à fait différente de celle de la 'loi' empirique proposée par Titius-Bode), et elle prédit, à partir d'une 'équation de Schrödinger généralisée', des pics de probabilité pour tous les systèmes planétaires. Ces prédictions, exposées dès ses premiers travaux, notamment dans *FSTM*, sont, aux yeux de Nottale, autant d'occasions de falsification ou de confirmation. Force est de constater qu'elles seront ignorées par les autres astronomes, cosmologistes et astrophysiciens. Comme l'indique son résumé, l'article paru en 1996 dans *A&A* procède lui-même à l'enregistrement de précédentes confirmations expérimentales: 'We show in the present letter that the planetary companions recently discovered around nearby stars agree with the predictions made four years ago in the framework of the theory of scale relativity (Nottale, 1993)' (Nottale, 1996b: 9). La difficulté à faire prendre en compte des confirmations observationnelles par les agents qui ne partagent pas le même cadre théorique ne concerne pas que la TRE, mais, à la différence des théories controversées, celle-ci ne suscite aucune critique de ses résultats et de ses hypothèses. Elle est juste ignorée:

Prends l'article avec Da Rocha de 2003 [paru dans *CSF*], il est truffé de confirmations expérimentales qui sont toutes vérifiées ... Ce sont des résultats qui sont volontairement ignorés par le *mainstream*. Dans cet article, j'en ai profité pour citer tous les résultats contenus dans des articles systématiquement refusés. Actuellement, je ne suis plus du tout publié en astronomie.³⁶

En 2006, les prédictions des orbites préférentielles des planètes par la TRE font donc toujours figure de prédictions de 'science-fiction' (elles sont jugées fantaisistes en même temps que leur examen est renvoyé à un futur indéterminé), alors que l'un des évaluateurs de l'article paru dans *A&A* en 1996 écrivait déjà:

Cette lettre présente un test de certains résultats obtenus dans le cadre d'une théorie de relativité d'échelle développée par ailleurs par l'auteur. Selon cette théorie, les positions (et d'autres paramètres caractéristiques de l'orbite) dans des systèmes en interaction gravitationnelle doivent être quantifiés selon une loi simple, SANS PARAMETRES AJUSTABLES, puisque la principale constante apparaissant dans la loi (de dimension d'une vitesse) est, selon l'auteur, une constante universelle qui apparaît aussi bien à l'échelle des galaxies que des systèmes planétaires et qui vaut environ 144 km/s ... L'auteur montre dans cette lettre comment les différentes planètes découvertes récemment suivent cette loi. Un des principaux intérêts de cette lettre est donc qu'elle présente un test possible et très contraignant de la théorie de la relativité d'échelle. Je connais peu

de théoriciens qui ont le courage ou la possibilité de donner des tests aussi sévères (pas de paramètre ajustable) de leur théorie. Je pense donc qu'une telle démarche devrait être publiée, afin de susciter de nouvelles investigations et permettre de confirmer ou d'infirmes les résultats préliminaires exposés dans cette lettre.³⁷

La Figure 8 présente la dernière période d'évolution des citations à Nottale et recense les chercheurs l'ayant cité au moins trois fois entre 1998 et 2004. Le nombre de chercheurs faisant référence aux travaux classiques diminue encore. En revanche, celui des chercheurs mobilisant la TRE augmente assez considérablement, surtout en physique générale, mais aussi dans un domaine comme la physique nucléaire et des particules, qui était resté hermétique jusque-là à la TRE (alors que la mécanique quantique y est concernée au premier chef), ainsi que la chimie physique, et, de manière plus surprenante, la biologie et la science de la terre (en fait, la paléontologie), d'abord à travers la collaboration avec Chaline et Grou (Chaline, Nottale et Grou, 1999), puis, avec les mêmes et Roland Cash du Centre national d'expertise hospitalière: cette fois, les lois log-périodiques ne sont plus appliquées à l'évolution des lignées du vivant, mais produisent des prédictions à l'échelle individuelle de l'ontogenèse humaine (Cash et al., 2002). Nottale s'est ainsi engagé durablement dans un transfert des lois log-périodiques développées grâce au formalisme de la TRE – et à partir des travaux de Didier Sornette (1998) – vers les sciences du vivant.³⁸ Toutefois, cet engagement de Nottale hors de la physique contribue à brouiller l'image de la TRE, pouvant même semer le doute, chez certains, sur le sérieux de la théorie.

En astrophysique, seuls des collaborateurs directs de Nottale font encore référence à la TRE: Schumacher, Lefèvre et Gay. Autre indice de la marginalisation: de nombreux articles traitant de cosmologie dans le cadre de la TRE, comme ceux de Daniel Da Rocha, autre doctorant de Nottale, ne trouvent plus de débouché en astrophysique et sont publiés dans des revues indexées en physique générale. Alors que sa thèse, *Structuration gravitationnelle en Relativité d'échelle*, est en astrophysique, Da Rocha en publie les résultats dans *CSF* (Da Rocha et Nottale 2003). En outre, on observe la constitution d'un 'noyau dur' autour de Nottale: Ord est maintenant un allié, Cresson et Pissondes des collaborateurs. Marie-Noëlle Célérier cosigne avec Nottale un article en 2004 dans le *Journal of Physics* (Célérier et Nottale, 2004).

La dernière partie de la trajectoire, après une accélération de la cadence de publication (trois articles en 1998 et 1999) voit un net fléchissement des publications de Nottale sur la TRE: de 2000 à 2005, il publie seulement un article par an en moyenne. Plusieurs facteurs sont

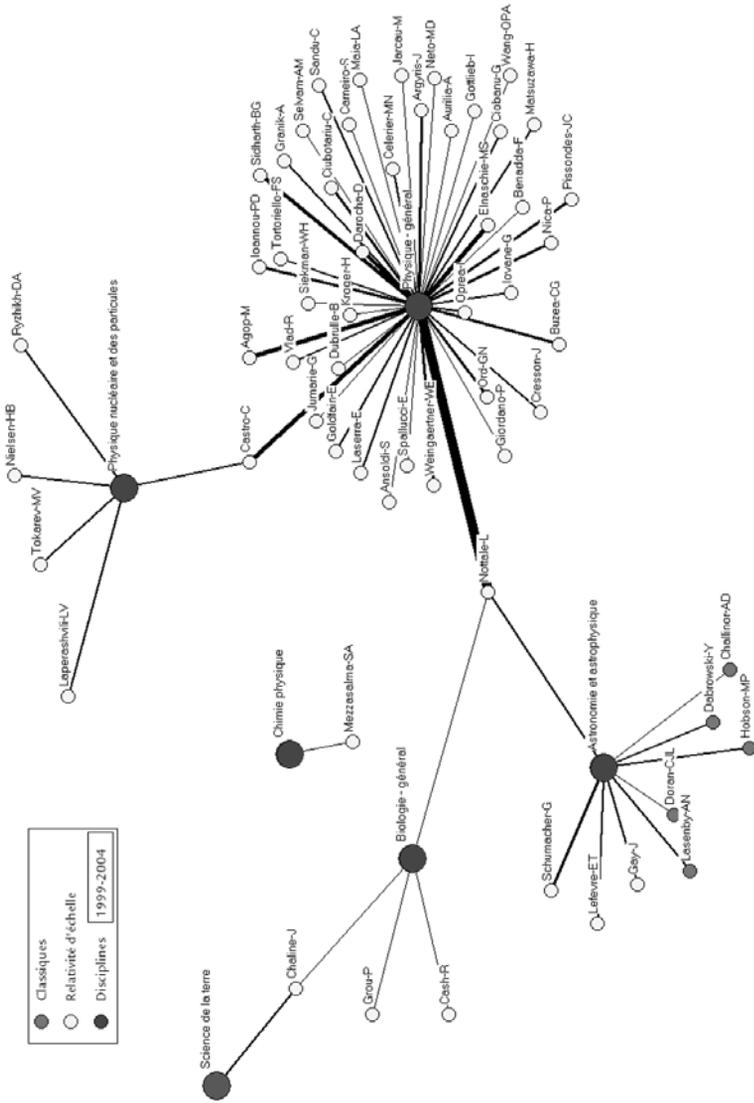


FIGURE 8 Réseau des auteurs citant Nottale, selon la discipline (1998-04)

susceptibles de l'expliquer. Parmi eux, la fragilité du réseau social semble primer. La cessation des publications dans *A&A*, à partir de 2000, correspond au départ, en 1999, de Lequeux. Nottale est désormais leader du programme de recherche de la TRE, mais le coût du transfert a été élevé: sa théorie ne s'est pas imposée en cosmologie, où, à en croire certains, elle possède pourtant le plus de prédictions falsifiables, et, à mesure que Nottale s'éloigne de ses premiers travaux, son champ d'origine semble se refermer derrière lui.

L'enjeu d'une évaluation du système d'évaluation

La distinction des trajectoires et des réseaux classiques et non-classiques, établie à travers la publication dans deux éventails distincts de revues scientifiques, résulte de l'action du filtre constitué par le système d'évaluation par les pairs, c'est-à-dire les évaluateurs qui recommandent ou déconseillent la publication des articles soumis aux revues. La trajectoire non-classique de Nottale est caractérisée par la difficulté de franchir l'obstacle que représente le barrage des évaluateurs dans les revues les plus importantes du champ. Lors de nos entretiens, Nottale a insisté sur le fait que les avis sur la TRE étaient souvent contradictoires, et que les refus de publication étaient parfois motivés par des arguments d'autorité.

En voici un exemple: Nottale soumet, le 10 novembre 1987, un article intitulé 'Towards a Space-Time Theory of Microphysics' à une revue scientifique à comité d'évaluation (que nous désignerons comme la revue X). Il sera refusé le 6 janvier 1988 à la suite d'un avis particulièrement sévère: 'l'auteur utilise un attirail mathématique mal défini et peu approprié pour attaquer des problèmes physiques mal posés et encore plus mal résolus. Je le renvoie à ses prochaines publications, comme il le fait lui-même abondamment.'³⁹ L'ironie finale sur les auto-citations montre la difficulté à faire admettre un cadre théorique autonome. L'article a été refusé sans que Nottale y trouve une objection scientifique argumentée à l'encontre de son raisonnement. Une version augmentée a été soumise ensuite, le 12 août 1988, sous le titre 'Fractals and the Quantum Theory of Space-Time' à l'*International Journal of Modern Physics*, et fut acceptée le 20 mai 1989.

Sans doute, l'évaluation des travaux non-classiques de Nottale par ses pairs se heurte à des obstacles particuliers. D'abord, l'intelligence de chaque article exige la compréhension de la TRE, si bien que pour mettre en valeur des résultats théoriques ou expérimentaux, Nottale

doit à chaque fois faire admettre la légitimité d'un cadre théorique dont il ne peut éclairer la cohérence qu'en renvoyant à *FSTM* ou aux autres articles (d'où l'agacement de certains évaluateurs devant l'abondance des auto-citations). Par ailleurs, les résultats de la TRE sont fondamentalement transdisciplinaires au regard de la division du travail scientifique habituelle, si bien qu'ils déroutent souvent les spécialistes d'un seul domaine. Il faut aussi noter que le formalisme de la théorie est sophistiqué du point de vue mathématique et mobilise des concepts issus de domaines parfois méconnus (la fortune esthétique des fractales n'a engendré bien souvent qu'une connaissance superficielle [Bontems, 2001] et l'analyse non standard est 'passée de mode' chez les mathématiciens avant qu'on ne lui découvre des applications originales en physique). Enfin, l'ambition même de refonder la physique apparaît mégalomane à certains chercheurs et rebute plus particulièrement ceux des physiciens pour qui le schisme entre mécanique quantique et physique relativiste est devenu une structure 'évidente' et permanente de la culture scientifique plutôt qu'une énigme ou une anomalie à étudier.

Le rejet systématique des articles sur la TRE s'explique, selon Nottale, par un dysfonctionnement du système d'évaluation par les pairs. Alors que l'habitude de voir ses publications acceptées par les revues peut amener un scientifique à considérer la fiabilité du système d'évaluation par les pairs comme allant de soi, l'accumulation de refus ne peut que susciter une prise de conscience et un recul de la part du scientifique, qui le portent à s'interroger de manière quasi-sociologique sur le fonctionnement du champ. Ainsi, dans 'La crise du système d'évaluation scientifique', paru dans la revue *Commentaire* en 2005, Nottale soulève l'enjeu d'une évaluation du système d'évaluation scientifique et met en cause l'intervention de l'arbitraire au sein des mécanismes de la légitimation scientifique. Reprenant les critiques habituelles du système d'évaluation anonyme des articles, lequel peut donner lieu à des abus de pouvoir et des conflits d'intérêts, il le fait de manière à ne pas être assimilé aux accusations paranoïaques des pseudosciences dénonçant la 'science officielle'. Il assure ainsi ne pas contester le principe du contrôle par les pairs mais critique, en revanche, la transformation des évaluateurs, initialement conçus comme des rapporteurs devant éclairer le choix de l'éditeur par leurs conseils, en une fonction inquisitoriale 'qui s'accompagne du pouvoir de vie et de mort sur le travail des chercheurs, et donc sur la vie des idées elles-mêmes, qui n'ont d'existence sociale que sous forme de publication et de diffusion pour le plus grand nombre' (Nottale, 2005: 113). Car la censure des évaluateurs s'exerce sans recours possi-

ble devant une instance d'arbitrage indépendante. Si la marginalisation d'une théorie à prétention révolutionnaire, telle que la TRE, résulte simplement du fonctionnement de la science normale, elle apparaît évidemment comme un dysfonctionnement à celui qui la subit. Sans doute le système d'évaluation scientifique par les pairs est-il la seule garantie du fonctionnement de la science normale, mais il semble inadapté aux travaux proposant des voies radicalement nouvelles et non plus simplement des prolongements de la science normale. L'exacerbation de la concurrence des agents due à la massification de la recherche contribue, en outre, à expliquer la difficile réception des travaux sur la TRE:

les scientifiques, dans leur très grande majorité, sont amenés à ne travailler que sur des sujets publiables et directement reconnaissables par leur communauté, sans réel enjeu fondamental, car c'est à une menace mortelle sur la possibilité même de poursuivre leur recherche (moyens et/ou salaires) qu'ils sont soumis par la dérive de ce système. Les réflexions profondes et à long terme, les recherches sur des thèmes vraiment fondamentaux, les remises en question sans garantie de résultat à court ou moyen terme, les innovations imprédictibles sont exclues dès l'origine dans ce type d'organisation. (Nottale, 2005: 115)

Pour Nottale, l'optimisation de la stratégie individuelle des agents en concurrence au sein du champ est devenue contre-productive. Un système d'évaluation, parfaitement adapté au renouvellement permanent de la science en régime normal, atteint ses limites quand il s'agit d'intégrer les idées 'révolutionnaires', qui transforment les normes de la scientificité. Nottale milite par conséquent pour une politique de publication scientifique donnant leur chance aux idées nouvelles qui n'ont pas été réfutées sur la base d'une argumentation scientifique.

Conclusion: les conditions sociales d'une bifurcation scientifique

Nottale a fait la preuve, au cours de sa première trajectoire, qu'il pouvait produire des travaux scientifiques de haute qualité. Ses articles sur les lentilles gravitationnelles étaient publiés dans des revues à très haut facteur d'impact (en moyenne: 2,57). La barrière exercée par le système d'évaluation l'a amené à publier ses articles sur la TRE dans des revues d'un niveau bien inférieur (leur facteur d'impact moyen est moitié moindre: 1,36). Cela dit, chacun des articles classiques recueille en moyenne 14 citations sur la période, tandis que les articles non-classiques, plus récents, en recueillent 13, soit un nombre à peu près identique mais provenant d'un secteur différent du champ scientifique. Si le nouveau capital scientifique

de Nottale ne semble reconnu que parmi les hétérodoxes et que ses travaux ne circulent dans le champ qu'au travers de circuits marginaux, il paraît aussi relativement stable: la démarcation entre science normale et science marginale serait-elle persistante? Une nouvelle théorie physique peut-elle ainsi durablement se développer aux marges du champ? L'exemple de Zwicky montre, en tout cas, que certains éléments théoriques peuvent demeurer longtemps dans l'ombre avant d'être sérieusement considérés, voire adoptés. En l'absence d'examen collectif, la TRE semble, elle aussi, condamnée à ce statut marginal prolongé: ni intégrée à la science normale (même comme objet de controverse), ni expulsée du champ.

L'analyse de la trajectoire de Nottale a permis de mettre en évidence les effets sur la carrière d'un chercheur du choix stratégique de se consacrer à l'élaboration d'une nouvelle théorie en rupture avec la science normale. En travaillant dans un cadre théorique à part, au lieu de s'inscrire dans une tradition de recherche établie, Nottale trouve difficilement des appuis parmi ses collègues. Comme l'a observé Andrew Pickering, la fortune d'une nouvelle théorie ou d'un modèle inédit est liée aux ressources théoriques préexistantes dans le champ, car c'est leur mobilisation efficace qui permet à une théorie de prendre le dessus sur ses rivales. Analysant la rivalité entre deux modèles (la 'couleur' et le 'charme' des quarks), Pickering conclut: 'one of two competing theoretical models was preferentially incorporated into the practice of the physics community because of their relationship to existing interests' (Pickering, 1982: 127). Il existe ainsi une forme de 'dépendance de chemin' au sein des évolutions du champ scientifique qui explique pourquoi certaines avancées théoriques trouvent immédiatement leur place dans la science normale, en attirant de nombreux adeptes, parce qu'elles prolongent les recherches en cours, tandis que d'autres, même si elles représentent aussi un progrès potentiel pour la discipline, sont ignorées, car la rupture qu'elles opèrent avec le cadre théorique dominant a un 'coût' très élevé pour les autres agents (qui doivent changer d'objets et intégrer de nouveaux outils conceptuels pour se reconverter). Nottale se place, il est vrai, dans la tradition relativiste, mais ce retour à une problématique datée, montre justement la difficulté de faire valoir, auprès d'agents investis dans d'autres programmes de recherche, la TRE dans le champ scientifique actuel: il faut remonter loin (par rapport à l'horizon habituel de rétention du champ) pour comprendre les motivations théoriques de la bifurcation proposée. Tout cela s'oppose donc à la science 'hypernormale' et routinisée analysée par Lemaine (1980).

Comme l'a observé Larry Laudan (Laudan, 1977), il faut aussi tenir compte du fait qu'une nouvelle théorie offre de nouveaux problèmes

à étudier aux scientifiques qui l'adoptent, mais qu'elle en fait aussi disparaître, au grand dam des traditions de recherche qui tentent de répondre à ces problèmes. Ainsi la théorie MOND (Modified Newtonian Dynamics), développée par Milgrom, est analogue, dans sa marginalité, à la TRE. Elle propose une explication de la courbe de rotation plate des galaxies spirales sans faire appel à l'hypothèse de la 'matière noire' (Milgrom et Sanders, 2005). Or, ce qui pourrait sembler un atout en sa faveur, ne suffit pas à soulever l'intérêt des chercheurs car l'hypothèse de la matière noire est plus utile aux astrophysiciens et aux physiciens des particules que celle promue par MOND ou même par la TRE qui elle aussi entend expliquer les anomalies de la cosmologie contemporaine sans recourir à l'hypothèse de la matière noire. Adopter le cadre théorique de la TRE (ou de MOND) signifierait, donc, pour les agents, accepter un bouleversement de la hiérarchie des positions théoriques et produire inévitablement une crise des positions institutionnelles qui correspondent à l'état actuel du champ. Si l'importance de l'enjeu – la réunification de la théorie physique – peut enthousiasmer les agents extérieurs (philosophes et épistémologues), qui n'en subiraient pas les conséquences ou pourraient même les exploiter dans leur propre champ, il incline au contraire les physiciens, c'est-à-dire les agents dont la carrière dépend de leur capacité à s'orienter au sein de la hiérarchie actuelle du champ, à la plus grande prudence, voire à la procrastination dans l'examen des 'résultats' mis de l'avant par la TRE.

L'analyse des trajectoires des chercheurs qui s'engagent dans des directions risquées qui mènent à leur marginalisation dans le champ, suggère que de telles bifurcations se font le plus souvent sur la base d'un capital scientifique légitime accumulé lors d'une phase antérieure. Outre le cas de Nottale, analysé ici, les histoires de la fusion froide ou de la mémoire de l'eau, quoique les enjeux épistémologiques diffèrent à chaque fois, montrent que les chercheurs impliqués avaient accumulé un capital scientifique légitime avant de s'engager dans une recherche originale au point de paraître déviante sinon absurde. De même, plusieurs de ceux qui ont pris le risque d'appuyer ces recherches misaient aussi leur réputation de sérieux. Ainsi, le prix Nobel de physique Julian Schwinger jugea légitime la réflexion sur la fusion froide et tenta même d'en élaborer la théorie, s'attirant les foudres de nombreux collègues (Simon, 2002). Un autre prix Nobel de physique, Brian Josephson, a non seulement cautionné la recherche sur la fusion froide mais également préfacé le récit autobiographique de Jacques Benveniste sur la mémoire de l'eau (Benveniste, 2005). A

ceux qui voudraient distinguer *a priori* ces cas (mémoire de l'eau et fusion froide) en disant qu'ils sont farfelus alors que la TRE est au moins plausible, il faut rappeler qu'il est facile *après coup* de porter un jugement sur la valeur de ces théories mais que la question soulevée ici est celle du choix du moment de la bifurcation et non de sa réussite ou non. Or, de ce point de vue, les cas sont ici de même nature: la bifurcation radicale se produit après avoir accumulé assez de crédibilité pour prendre un risque calculé. Ainsi, là où les agents du champ ont tendance à ne voir qu'un accès de 'folie' de la part de savants complaisants ou dépassés, le sociologue verra plutôt l'indice des conditions sociales de la 'déviance' au sens d'écart à la trajectoire typique (normale): une position scientifique déjà fermement établie fournit les conditions sociales (et psychologiques) d'un engagement dans un programme de recherche très risqué. Car une fois établie, la position peut certes redevenir marginale, mais conserve des chances de demeurer à l'intérieur des frontières du champ scientifique et de conserver les bases institutionnelles suffisantes pour faire avancer le nouveau programme de recherche. A l'inverse, il paraît évident, aux futurs agents eux-mêmes, que miser en tout début de carrière, avant même l'obtention d'un poste, sur des sujets marginaux (selon les normes dominantes), a toutes les chances d'interdire l'accès au champ et de le ramener à des positions à l'extérieur du champ, celle de l' 'illuminé' ou du 'charlatan'. Ce n'est qu'après avoir d'abord travaillé sur des objets légitimes du champ à un moment donné, et accumulé un capital scientifique 'classique' qu'un agent peut donc accéder à des positions institutionnelles qui rendent possible la bifurcation ultérieure vers une recherche 'non-classique'.

Dans le cas de la fusion froide, rappelons que, dans le couple Martin Fleischman et Stanley Pons, le chercheur sénior, Fleischman, était en fin de carrière et avait accumulé un capital scientifique important dans le champ de l'électrochimie avant de se lancer dans l'aventure de la fusion de l'hydrogène dans un réseau de palladium. Il était d'ailleurs parfaitement conscient qu'en annonçant, en 1989, la 'découverte' de la fusion froide, il serait ridiculisé par la plupart de ses collègues. De même, Benveniste était aussi un chercheur très reconnu dans son domaine (l'allergie) avant de se lancer à son tour dans une aventure qui lui a coûté son laboratoire et ruiné sa carrière.

On comprend ainsi que le choix d'un objet de recherche de la part d'un nouvel entrant au niveau doctoral ait peu de chance de se porter sur des objets stigmatisés au sein du champ. Car cela reviendrait à se faire interdire l'accès aux postes institutionnels qui permettent la

participation active au champ scientifique. Un tel choix signerait une sorte de suicide précoce, en contradiction avec le projet même de promouvoir une théorie scientifique nouvelle. Une telle tendance n'est bien sûr pas absolue et le cas de J.V. Narlikar, qui a appuyé Nottale, montre que dans les années 1960 il était encore possible de faire une carrière entière et respectable (encore que dans un pays périphérique) en misant sur une théorie marginale comme la cosmologie de l'état stationnaire qu'il a développé avec Fred Hoyle lors de ses études à l'université de Cambridge (Kragh, 1996). Tout porte à croire cependant que ce type de trajectoire est aujourd'hui peu probable, dans l'état actuel d'un champ scientifique hautement massifié et aux conditions d'accès très normées, et que l'orientation vers 'des possibilités qu'il faut créer de toute pièce', comme l'écrit Bourdieu, ne soit possible qu'en adoptant d'abord une trajectoire 'classique' donnant accès à une position institutionnelle, qui rendra ensuite pensable une bifurcation vers un engagement théorique beaucoup plus risqué. Cette condition devenue presque nécessaire n'est, bien sûr, nullement suffisante pour garantir le succès dans la nouvelle voie proposée, les cas de la fusion froide, de la mémoire de l'eau et même de la théorie de l'état stationnaire l'ayant amplement montré.

Vincent Bontems est ancien élève de l'Ecole Normale Supérieure de Lettres et Sciences Humaines, agrégé de philosophie et docteur en philosophie et histoire des sciences. Ses recherches portent sur la philosophie de Gilbert Simondon, l'épistémologie des théories physiques contemporaines, et la circulation et le contrôle des analogies. Sa thèse a porté sur la théorie de la relativité d'échelle d'un point de vue épistémologique. Il a ensuite effectué un stage postdoctoral au Centre Interuniversitaire de Recherche sur la Science et la Technologie (CIRST) à l'université du Québec à Montréal. Il travaille actuellement au Commissariat à l'Energie Atomique sur les nanosciences et les nano-technologies. Dernier article paru: 'Aura artistique et halo technique. Le cas de l'objet surréaliste', *Alliage*, no. 49, 2007. *Adresse de l'auteur*: CEA/Saclay – DSM/DREC AM/SPEC/LARSIM – Bât. 772 Orme des Merisiers, F-91190 Gif sur Yvette Cedex, France. [email: v.bontems@laposte.net]

Yves Gingras est professeur au département d'histoire et titulaire de la chaire de recherche du Canada en histoire et sociologie des sciences à l'université du Québec à Montréal. Il est également chercheur au CIRST. Ses travaux actuels portent sur la transformation du champ scientifique entre 1900 et 1945 et sur la dynamique des théories scientifiques marginales. Il a récemment publié *Éloge de l'homo techno-logicus* (Montréal: Fides, 2005) et dirigé (avec Lyse Roy) un ouvrage sur *Les transformations des universités du XIIIe au XXIe siècle* (Sainte-Foy: Presses de l'université du Québec, 2006). *Adresse de l'auteur*: CIRST, UQAM, CP 8888, Suc. Centre-Ville, Montréal, Québec, Canada, H3C 3P8. [email: gingras.yves@uqam.ca]

Notes

1. L'attrait des objets dominants est tel que même ceux qui se fixent comme règle 'd'éviter d'étudier un scientifique trop connu, afin de ne pas avoir le "sentiment d'arriver après la bataille"' ('avoid observing a scientist who is too well known, so as not to have the impression of "arriving on the scene too late"'), n'en consacrent pas moins la moitié de l'analyse à Stephen Hawking, une figure centrale de la cosmologie contemporaine (Mialet, 1999: 554; Wallis, 1979).

2. Les auteurs tiennent à remercier Laurent Nottale pour sa collaboration à cet article, et plus particulièrement pour leur avoir donné accès à des avis d'évaluateurs. Les auteurs demeurent cependant les seuls responsables des interprétations et analyses présentées dans cet article.

3. Alors que peu de physiciens se sont intéressés de façon sérieuse à la TRE, certains épistémologues ont prêté une attention bienveillante à cette théorie. Voir, par exemple, Barthélémy et Bontems (2001) et Parrochia (1997: 380–4).

4. La situation de la TRE est comparable à celle d'autres théories innovantes marginalisées, à des degrés divers, par le quasi-monopole des supercordes, telles que la 'loop quantum theory', par exemple, dont l'un des promoteurs dénonce justement les effets (qu'il juge négatifs): 'string theory, in spite of a dearth of experimental predictions, has monopolized the resources available to advance fundamental physics, with choking off the investigations of equally promising alternative approaches' (Smolin, 2006: 268).

5. Un facteur important de cette personnalisation est que Nottale s'est adonné à la vulgarisation de ses recherches sur les lentilles gravitationnelles jusqu'en 1994, puis de la TRE, notamment avec le livre de vulgarisation *La Relativité dans tous ses états*. L'analyse de cette trajectoire médiatique et des effets de la popularisation, qui éclaire la question des interactions entre le champ scientifique et le champ journalistique, est réservée pour un autre article.

6. Pour une réflexion approfondie sur la notion de bifurcation, voir Grossetti (2004).

7. En 1991, dans son article sur la découverte des lentilles gravitationnelles, Hewitt cite un article de 1987, dont Nottale est l'un des auteurs, sans l'identifier pour autant comme un acteur digne d'intérêt (Hewitt, 1991).

8. Entrevue avec Nottale le 11 avril 2006.

9. Ibid.

10. Voir par exemple, Karoji, Nottale et Vigier (1975); Nottale et al. (1976); Nottale et Moles (1978).

11. Entrevue avec Nottale le 11 avril 2006.

12. Pour plus de détails, voir Koenig (2004).

13. Entrevue avec Nottale le 11 avril 2006.

14. Il est intéressant de noter que Zwicky s'était lui aussi vu refuser ses demandes d'accès aux télescopes (cf. Koenig, 2004).

15. Le rapport de Nottale cité s'intitule *Modélisation d'atomes et de molécules au moyen de relateurs arithmétiques*.

16. Trois avec son doctorant Hammer, quatre avec Hammer et Olivier Lefèvre, docteur d'un collègue (Guy Mathez) et devenu depuis directeur du laboratoire d'astrophysique de Marseille, et trois autres en collaboration avec d'autres chercheurs.

17. Entrevue avec Nottale le 11 avril 2006.

18. Ibid.

19. Avis d'évaluateur.

20. Il est intéressant de noter que Narlikar fait partie du réseau de Jean-Claude Pecker, directeur de thèse de Nottale, qui l'a invité au Collège de France en 2003. Voir sa leçon inaugurale sur 'Faits et spéculations en cosmologie' (Narlikar, 2004). C'est probablement aussi à l'initiative de Pecker que la Société astronomique de France lui a octroyé en 2004 le Prix Janssen, décerné en 'récompense de travaux astronomiques importants'.

21. Avis d'évaluateur.

22. Lettre du 22 mai 1989 d'Elsevier à Nottale.

23. Entrevue avec Nottale le 11 avril 2006.

24. Ibid.

25. Ses travaux les plus cités sont *FSTM* (99); 'Fractals and the Quantum-theory of Spacetime' (Nottale, 1989) avec 15 citations; 'Scale relativity and fractal space-time: Applications to quantum physics, cosmology and chaotic systems' (Nottale, 1996a) avec 13 citations, ce dernier article figurant en seconde position dans le classement, établi en 2003 par l'éditeur Elsevier (auquel appartient *CSF*), pour les articles les plus cités parus depuis 1995 dans *CSF* (47).

26. Entrevue avec Nottale le 11 avril 2006.

27. Voici un florilège de citations (parmi beaucoup d'autres) montrant comment s'opère l'amalgame entre la référence à Nottale et la théorie de l'espace-temps cantorien:

'El Naschie has proposed that the Cantorian-fractal conception of spacetime may effect reconciliation between quantum mechanics and gravity. Similar ideas were presented by Nottale (63) and Ord (64), all independently.' (Selvam et Fadnavis, 1999: 1324)

'This idea is in generally good agreement with the philosophy of Cantorian-Fractal space time advanced by Ord, Nottale and El Naschie (12).' (Agop et Nica, 1999: 1302)

'a remarkably fruitful Cantorian fractal spacetime approach pursued by El Nashie, Nottale and Ord.' (Saniga, 2001: 2127)

'Noteworthy contributions include results due to Nottale and El Naschie, based upon fractal space-time in quantum physics and geometrical attributes to the Cantorian $E^{(\infty)}$ manifold.' (Goldfain, 2003: 813)

28. Pitkänen (2002: 1206): 'Fractality of the space-time at the fundamental level has also been suggested by other authors: namely Cantorian fractal space-time model of Ord and of Mohammed El Naschie.'

29. Nous remercions James Lequeux pour ses commentaires sur une version antérieure de ce texte.

30. Entrevue avec Nottale le 11 avril 2006.

31. Propos de James Lequeux rapportés par Leglu (1998).

32. Entrevue avec Nottale le 11 avril 2006.

33. Ibid.

34. Avis d'évaluateur.

35. Sur les 17 citations que recueille l'article 'Scale-relativity and quantization of extra-solar planetary systems' (Nottale, 1996b), 9 sont des auto-citations; du côté des revues, 8 citations proviennent d'articles parus dans *CSF*, 5 dans *A&A*, si bien que seules 4 citations contribuent à élargir le spectre des revues où la TRE obtient droit de cité: *Monthly Notices of The Royal Astronomical Society*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, *Australian Journal of Physics*, *Physical Review A*.

36. Entrevue avec Nottale le 11 avril 2006.

37. Avis d'évaluateur.

38. Les enjeux théoriques d'une telle exportation de la TRE hors du champ de la physique, ainsi que la controverse dite des 'lois de l'évolution' qu'elle a entraînée, méritent une analyse approfondie que nous réservons pour un autre article.

39. Avis d'évaluateur.

Références

- Agop, M. et Nica, P. (1999) 'On the Cantorian Structure of Time in Relativity', *Chaos, Solitons and Fractals* 10(8): 1295–302.
- Bachelard, G. (1975) *La Philosophie du non*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Barthélémy, J.-H. et Bontems, V. (2001) 'Relativité et réalité. Nottale, Simondon et le réalisme des relations', *Revue de synthèse* 12(1): 27–54.
- Benveniste, J. (2005) *Ma vérité sur la 'mémoire de l'eau'*. Paris: Albin Michel.
- Bontems, V. (2001) 'L'Art au temps des fractals', *Revue de synthèse* 12(1): 117–44.
- Bourdieu, P. (1994) *Raisons pratiques. Sur la théorie de l'action*. Paris: Seuil.
- Bourdieu, P. (2001) *Science de la science et réflexivité*. Paris: Raisons d'agir.
- Cash, R., Chaline, J., Nottale, L. et Grou, P. (2002) 'Human development and log-periodic laws', *Comptes Rendus Biologies* 325(5): 585–90.
- Castro, C. (1999) 'Beyond Strings, Multiple Times and Gauge Theories of Area-Scalings Relativistic Transformations', *Chaos, Solitons and Fractals* 10(2–3): 293–309.
- Castro, C. (2000) 'Is Quantum Space-Time Infinite Dimensional?', *Chaos, Solitons and Fractals* 11(11): 1663–70.
- Castro, C. (2002) 'Fractal Strings as an Alternative Justification for El Naschie's Cantorian Spacetime and the Fine Structure Constant', *Chaos, Solitons and Fractals* 14(9): 1341–59.
- Castro, C. et Granik, A. (2000) 'How the New Scale Relativity Theory Resolves Some Quantum Paradoxes', *Chaos, Solitons and Fractals* 11(14): 2167–78.
- Célérier, M.N. et Nottale, L. (2004) 'Quantum-Classical Transition in Scale Relativity', *Journal of Physics A – Mathematical and General* 37(3): 931–55.
- Chaline, J., Nottale, L. et Grou, P. (1999) 'L'arbre de la vie a-t-il une structure fractale?', *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences II-A*, 328(11): 717–26.
- Collins, H.M. (1975) 'The Seven Sexes: A Study in the Sociology of a Phenomenon, or the Replication of an Experiment in Physics', *Sociology* 9: 205–24.
- Collins, H.M. (1981) 'Son of Seven Sexes: The Social Destruction of an Experiment in Physics', *Social Studies of Science* 11: 33–62.
- Collins, H.M. et Pinch, T.J. (1979) 'Construction of the Paranormal: Nothing Unscientific Is Happening', *Sociological Review Monograph* 27: 237–70.
- Da Rocha, D. et Nottale, L. (2003) 'Gravitational Structure Formation in Scale Relativity', *Chaos, Solitons and Fractals* 16(4): 565–95.
- Dolby, R.G.A. (1996) *Uncertain Knowledge. An Image of Science for a Changing World*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Dyer, C.C. et Roeder, R.C. (1976) 'Clusters of Galaxies as Gravitational Lenses?', *Nature* 260(5539): 764–5.
- Einstein, A. (1936) 'Lens-like Action of a Star by the Deviation of Light in the Gravitational Field', *Science* 84: 506.
- El Naschie, M.S. (1994a) 'Is Quantum Space a Random Cantor Set with a Golden Mean Dimension at the Core?', *Chaos, Solitons and Fractals* 4(2): 177–9.
- El Naschie, M.S. (1994b) 'Quantum Measurement, Diffusion and Cantorian Geodesics', *Chaos, Solitons and Fractals* 4(7): 1235–47.

- El Naschie, M.S. (1999a) 'Radioactive Decay and the Structure of $E(\infty)$ Quantum Spacetime', *Chaos, Solitons and Fractals* 10(1): 17–23.
- El Naschie, M.S. (1999b) 'Nuclear Spacetime Theories, Superstrings, Monster Group and Applications', *Chaos, Solitons and Fractals* 10(2–3): 567–80.
- El Naschie, M.S. (2006) 'Elementary Number Theory in Superstrings, Loop Quantum Mechanics, Twisters and E-Infinity High Energy Physics', *Chaos, Solitons and Fractals* 11(27): 297–330.
- Freire, O. (2005) 'Science and Exile: David Bohm. The Cold War, and a New Interpretation of Quantum mechanics', *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 36(1): 1–34.
- Goldfain, E. (2003) 'Derivation of the Fine Structure Constant Using Fractional Dynamics', *Chaos, Solitons and Fractals* 17: 811–18.
- Grossetti, M. (2004) *Sociologie de l'imprévisible: dynamiques de l'activité et des formes sociales*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Hewitt, J.N. (1991) 'Gravitational Lenses: The Current Sample, Recent Results, and Continuing Searches', *Proceedings from the US-USSR Workshop on high energy astrophysics. High Energy Astrophysics: American and Soviet Perspectives*: 192–203.
- Karaji, H. et Nottale, L. (1976) 'Possible Implication of the Rubin–Ford Effect', *Nature* 259(5538): 31–3.
- Karaji, H., Nottale, L. et Vigier, J.P. (1975) 'Observation of Excess Redshifts when Light Travels through Galactic Clusters', *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences série B* 281(17): 409–12.
- Koenig, T. (2004), *Dark Matters: The Pre-controversial Years of a Contemporary Controversy*. Strasbourg: DEA, Université Louis Pasteur.
- Kragh, H. (1996) *Cosmology and Controversy: The Historical Development of Two Theories of the Universe*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Laudan, L. (1977) *Progress and Its Problems: Toward a Theory of Scientific Growth*. Berkeley: University of California Press.
- Leglu, D. (1998) 'Le hérissé de l'espace-temps', *Libération* 16 Déc.
- Lemaine, G. (1980) 'Science normale et science hypernormale. Les stratégies de différenciation et les stratégies conservatrices dans les sciences', *Revue française de sociologie* 21: 499–527.
- Le Méhauté, A. (1990) *Les géométries fractales*. Paris: Hermès.
- Lepeltier, T. (2005) 'Nouveau dialogue sur les deux grands systèmes du monde', *Revue des Questions Scientifiques* 176(2): 163–86.
- Mialet, H. (1999) 'Do Angels Have Bodies? Two Stories about Subjectivity in Science', *Social Studies of Science* 29(4): 551–81.
- Milgrom M. et Sanders, R.H. (2005) 'MOND Predictions of "halo" Phenomenology in Disc Galaxies', *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 357(1): 45–8.
- Narlikar, J.V. (2004) *Faits et spéculations en cosmologie*. Paris: Collège de France/Fayard.
- Nottale, L. (1988) 'On Time in Microphysics', *Comptes Rendus hebdomadaires de l'Académie des Sciences série II* 306(5): 341–6.
- Nottale, L. (1989) 'Fractals and the Quantum-Theory of Spacetime', *International Journal of Modern Physics A* 4(19): 5047–117.
- Nottale, L. (1992) 'The Theory of Scale Relativity', *International Journal of Modern Physics A* 7(20): 4899–936.
- Nottale, L. (1993) *Fractal Space-Time and Microphysics: Towards a Theory of Scale Relativity*. London: World Scientific.

- Nottale, L. (1994) 'Scale Relativity, Fractal Space-Time and Quantum Mechanics', *Chaos, Solitons and Fractals* 4(3): 361–88.
- Nottale, L. (1996a) 'Scale Relativity and Fractal Space-Time: Applications to Quantum Physics, Cosmology and Chaotic Systems', *Chaos, Solitons and Fractals* 7(6): 877–938.
- Nottale, L. (1996b) 'Scale Relativity and Quantization of the Solar System', *Astronomy and Astrophysics* 315(1): L9–12.
- Nottale, L. (1998) *La relativité dans tous ses états: au delà de l'espace-temps*. Paris: Hachette.
- Nottale, L. (2005) 'La crise du système d'évaluation scientifique', *Commentaire* 109: 111–16.
- Nottale, L., Chaline, J. et Grou, P. (2000) *Les arbres de l'évolution*. Paris: Hachette.
- Nottale, L. et Moles, M. (1978) 'Statistical Analysis of Discrepant Redshift Associations. I – Quintets of Galaxies', *Astronomy and Astrophysics* 66(3): 355–8.
- Nottale, L. et Schneider, J. (1984) 'Fractals and Non Standard Analysis', *Journal of Mathematical Physics* 25(5): 1296–300.
- Nottale, L., Schumacher, G. et Gay, J. (1997) 'Scale Relativity and Quantization of the Solar System', *Astronomy and Astrophysics* 322(3): 1018–25.
- Nottale, L. et Vigier, J.P. (1977) 'Continuous Increase of Hubble Modulus behind Clusters of galaxies', *Nature* 268: 608.
- Nottale, L., Vigier, J.-P., Yourgrau, W. et Pecker, J.-C. (1976) 'La constante de Hubble mise en question', *La Recherche* 7: 529–40.
- Ord, G.N. (1982) 'Fractal Space-Time: A Geometric Analog of Relativistic Quantum Mechanics', *Journal of Physics series A* 15(1): L29–31.
- Parrochia, D. (1997) *Les grandes révolutions scientifiques du XXe siècle*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Pickering, A. (1982) 'Interests and Analogies', in B. Barnes et D. Edge (eds) *Science in Context: Readings in the Sociology of Science*, pp. 125–45. London: Open University Press.
- Pitkänen, M. (2002) 'Topological Geometroynamics, Part I: General Theory', *Chaos, Solitons and Fractals* 13: 1205–16.
- Popper, K. (1982) *Quantum Theory and the Schism of Physics*. London: Routledge.
- Saniga, M. (2001) 'Cremona Transformations and the Conundrum of Dimensionality and Signature of Macro-Spacetime', *Chaos, Solitons and Fractals* 12: 2127–42.
- Selvam, A.M. and Fadnavis, S. (1999) 'Superstrings, Cantorian-fractal Spacetime and Quantum-like Chaos in Atmospheric Flows', *Chaos, Solitons and Fractals* 10(8): 1321–34.
- Simon, B. (2002) *Undead Science: Science Studies and the Afterlife of Cold Fusion*. London: Rutgers University Press.
- Smolin, L. (2006) *The Trouble with Physics. The Rise of String Theory, the Fall of a Science, and What Comes Next*. Boston/New York: Houghton-Mifflin.
- Sornette, D. (1998) 'Discrete Scale Invariance and Complex Dimensions', *Physics Reports* 297: 239–70.
- Soucail, G., Fort, B. and Mellier, Y. (1987) 'A Blue Ring-Like Structure in the Center of the A-370 Cluster of Galaxies', *Astronomy and Astrophysics* 172: L14–6.
- Wallis, R., ed. (1979) *On the Margin of Science: The Social Construction of Rejected Knowledge*. Keele, Staffs: University of Keele.
- Zwicky, F. (1937a) 'Nebulae as Gravitational Lenses', *Physical Review* 51: 290.
- Zwicky, F. (1937b) 'On the Probability of Detecting Nebulae which Act as Gravitational Lenses', *Physical Review* 51: 679.

Annexe: table des acronymes

<i>A&A</i>	<i>Astronomy and Astrophysics</i>
<i>A&SS</i>	<i>Astrophysics and Space Science</i>
<i>AdP</i>	<i>Annales de physique</i>
<i>AJ</i>	<i>Astrophysical Journal</i>
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
<i>CRAS-A</i>	<i>Comptes Rendus Hebdomadaires de l'Académie des Sciences série A</i>
<i>CRAS-B</i>	<i>Comptes Rendus Hebdomadaires de l'Académie des Sciences série B</i>
<i>CRB</i>	<i>Comptes Rendus Biologie</i>
<i>CSF</i>	<i>Chaos, Solitons and Fractals</i>
<i>FSTM</i>	<i>Fractal Space-Time and Microphysics: Towards a Theory of Scale Relativity</i>
IAP	Institut d'astrophysique de Paris
<i>IjoMP</i>	<i>International Journal of Modern Physics série A</i>
<i>JoMaP</i>	<i>Journal of Mathematical Physics</i>
<i>JoP-A</i>	<i>Journal of Physics série A</i>
LUTH	Laboratoire Univers et Théorie
<i>MNRAS</i>	<i>Monthly Notices of The Royal Astronomical Society</i>
MOND	Modified Newtonian Dynamics
TRE	Théorie de la relativité d'échelle
TSR	Theory of scale-relativity
