



HAL
open science

L'épistémologie sociologique confrontée aux avancées de la physique statistique

Dominique Raynaud

► **To cite this version:**

Dominique Raynaud. L'épistémologie sociologique confrontée aux avancées de la physique statistique. Thierry Martin. Les sciences humaines sont-elles des sciences?, Paris, Vuibert, pp.53-70, 2011. halshs-00645618

HAL Id: halshs-00645618

<https://shs.hal.science/halshs-00645618>

Submitted on 1 Dec 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'épistémologie sociologique confrontée aux avancées de la physique statistique

Dominique Raynaud*

*Université Pierre-Mendès-France, PLC (Grenoble), GEMAS (Paris)

1 Argument

1. Beaucoup de travaux d'épistémologie contemporaine tentent de spécifier la sociologie par un ensemble de caractères distinctifs dérivés de l'historicité et de l'intentionnalité des sujets humains¹. 2. Ces caractères doivent être abandonnés, ou réécrits, s'ils rentrent en contradiction avec des avancées scientifiques fondées. 3. Des avancées scientifiques sont fondées si elles ont un caractère de nouveauté, de robustesse et de disciplinarité. 4. La physique statistique exotique parvient à des résultats nouveaux. 5. Elle parvient à des résultats robustes. 6. Elle parvient à des résultats sociologiques. 7. La physique statistique exotique ne tire pas de l'historicité et de l'intentionnalité des sujets humains, une épistémologie spéciale : elle emploie des méthodes scientifiques ordinaires, des lois et des concepts analytiques quantitatifs. 8. Par conséquent, les caractères distinctifs de la sociologie doivent être réécrits sur un mode déflationniste, et critiqués quant à leur déductibilité de l'historicité et de l'intentionnalité.

2 Caractères distinctifs de la sociologie

L'épistémologie de la sociologie est aujourd'hui dominée par des tentatives visant à trouver des critères de spécification de cette discipline qui présupposent, en cela même, l'existence de différences entre la sociologie et les autres sciences. Le spectre des justifications utilisées est large, mais l'historicité et l'intentionnalité des conduites humaines, avec les corrélats méthodologiques de la compréhension et de l'interprétation, sont au coeur du dispositif argumentaire. On a voulu déduire de ces caractères que la sociologie est par nature rétive à l'axiomatisation, à la formalisation et à la quantification ; qu'elle ne peut assurer ni la reproductibilité, ni la cumulativité des données ; qu'elle est dans l'impossibilité d'énoncer des lois et de recourir au raisonnement expérimental (cf. Raynaud, 2006).

Cet échec présumé des méthodes scientifiques [1] sert souvent de socle pour redéfinir le projet sociologique. L'historicité [2] et l'intentionnalité [3] appellent la mise en œuvre de l'interprétation [4], laquelle conditionne une plus grande tolérance à l'égard de la subjectivité du chercheur [5] et une déflation théorique consistant à remplacer les concepts sociologiques par les pensées de la vie quotidienne des agents [6], à employer des concepts propres typologiques spécifiques [7] et à récuser les partages disciplinaires réputés stériles [8]. Cette réorientation est très nette dans les textes relatifs à la sociologie dite compréhensive, interprétative, phénoménologique ou herméneutique, mais elle est également visible en sociologie générale ².

¹Je remercie Michel Dubois de m'avoir fait des remarques sur une version préparatoire du texte.

²Pour la première : Gosselin, 2002, p. 94 [5] ; Schnapper, 1999, p. 2 [7] ; Schütz, 1987, p. 11 [6] ; Uhl, 2004, p.

La diversité de ces thèses se résume à quelques aspects principaux :

1. Certaines sont dualistes dans la mesure où elles reprennent le partage diltheyen entre *Natur-* et *Geisteswissenschaften* ; d'autres sont régionalistes, en ce qu'elles admettent une variation entre toutes les sciences.

2. Certaines considèrent que ces critères s'appliquent normativement, ce qui conduit à nier, ou à minimiser l'intérêt des approches sociologiques concurrentes de celle qui est placée sous le microscope ; d'autres visent plus modestement à spécifier un domaine de connaissance.

3. Ces caractères sont associés à des jugements d'existence, de possibilité ou de pertinence. Cela change considérablement leur portée : il n'est pas équivalent de dire que le raisonnement expérimental n'existe pas, est impossible ou sans valeur, en sociologie.

Mais cette diversité n'enlève rien au fait que les idées dualistes-régionalistes sont aujourd'hui dominantes par rapport aux thèses qui considèrent la sociologie comme un exercice scientifique ordinaire (Boudon, 1999 ; Cuin, 2001) et dont les modélisations, les simulations et les travaux de sociologie mathématique offrent généralement de bonnes illustrations.

3 Plan de l'étude

Les thèses dualistes-régionalistes se heurtent à des objections dont certaines remontent — ce n'est pas le moindre paradoxe — au fondateur de la « sociologie compréhensive ». Il est en effet difficile de faire de Max Weber leur promoteur, sachant qu'il ramenait la compréhension au mode dominant de la rationalité téléologique, donnait à la sociologie le statut d'une « science généralisante », lui reconnaissait le pouvoir de former des « lois » et des « abstractions » (Weber, 1995, p. 47-49). À force d'accentuer la composante interprétative de l'action sociale, on en vient à perdre de vue d'autres traits constitutifs de la sociologie compréhensive.

Objection faible : Weber rappelle tout d'abord que « pour toutes les sciences de l'activité, les processus et les objets étrangers à une signification [*sinnfremd*] entrent en ligne de compte comme occasion, résultat, élément qui favorise ou entrave l'activité humaine » (Weber, 1995, p. 32). La sociologie ne peut donc pas se focaliser sur la composante significative au point d'ignorer l'influence des objets et des processus qui n'ont pas de sens subjectif.

Objection forte : Weber définit la sociologie comme science de l'activité sociale, elle-même définie par deux critères : elle est activité quand elle possède un sens subjectif pour les agents ; elle est sociale quand elle se rapporte au comportement d'autrui (Weber, 1995, p. 28). Le gros plan opéré sur le sens subjectif a souvent pour effet de reléguer le rapport à autrui, par lequel une activité devient proprement sociale et, par là, objet scientifique de la sociologie. C'est là que l'herméneutique — émancipée de la sociologie compréhensive —, élude le caractère collectif de l'activité sociale y compris même lorsqu'elle fait une hypothèse agrégative rudimentaire : « s'il est avéré que plusieurs agents ont le même état intentionnel, alors leur addition détermine le phénomène collectif ». Cette supposition ignore largement la complexité des processus agrégatifs (Cherkaoui, 1997, p. 516-517). Max Weber était sans doute conscient du problème en refusant aux faits sociaux « uniformes » le statut d'activité sociale.

« Le comportement intime n'est une activité sociale qu'à la condition de s'orienter d'après le comportement d'autrui. Un comportement religieux par exemple ne l'est pas s'il n'est que contemplation, prière solitaire, etc. L'activité économique (d'un individu isolé) ne l'est que dans le cas et dans la mesure où elle fait intervenir le comportement de tiers [...] L'activité sociale n'est pas identique [...] avec une activité uniforme [*gleichmäßiges Handeln*] de plusieurs personnes » (Weber, 1995, p. 52-53).

43 [2], 120 [1], 138 [8] ; Watier, 2002, p. 13 [3, 4]. Pour la seconde : Berthelot, 1996, p. 25 [2'] ; Bouilloud, 1997, p. 213, 271 [4'] ; Busino, 1992, p. 262 [5'] ; Morin, 1994, p. 11 [3', 6', 8'] ; Passeron, 1991, p. 25 [1'], 369 [7'].

Nous laisserons ce type de critiques sans discussion, car nous avons en vue d'autres objections, qui naissent de la mise à l'épreuve de ces thèses épistémologiques. Berthelot a bien montré que l'unité de la sociologie ne pouvait être conçue en dehors de règles de confrontation épistémologique des programmes de recherche : identification des compatibilités et des incompatibilités, travail sur les modèles de réduction et surtout « hiérarchisation du raisonnable, en proposant des observations ou des expériences de mise à l'épreuve différentielle » (2003, p. 48). Nous retiendrons cette idée de confronter les programmes par des tests empiriques. La mise à l'épreuve des épistémologies contemporaines est suggérée par le fait que, très souvent, les traits présumés distinctifs de la sociologie ont le caractère de présuppositions. Présupposition, en effet, que de prendre appui sur les ordres de faits séparés pour justifier la différence des méthodes des sciences sociales et naturelles : « Quelle causalité, quels enchaînements significatifs, quelles méthodes, sont appropriées aux faits humains *en opposition ou en complémentarité* avec ceux qui caractérisent les phénomènes [...] de la nature inanimée ? » (Watier, 2002, p. 11, mes italiques). Pour quel motif, autre que l'autorité de Dilthey, devrions-nous rechercher des différences plutôt que des différences et des similitudes ?

Les thèses dualistes-régionalistes ont pour point commun d'énoncer des différences. Quand on prétend que des sciences sont différentes, qu'est-ce que cela veut dire ? Cela veut dire qu'il existe une différence significative quant aux théories d'arrière-plan, aux concepts, aux méthodes ou à tout autre élément fonctionnel de l'activité scientifique. La formulation de caractères distinctifs est en cela risquée, car elle s'expose à la découverte de contre-exemples. La question n'est pas de suspecter ces différences mais de les *établir*. On peut éprouver leur robustesse par le test suivant :

« La thèse " p est une propriété épistémologique distinctive de la science S " est fausse, si p est une propriété d'une science S' différente de S , ou bien si non- p est une propriété de S » (Raynaud, 2006, p. 20).

Dans *La Sociologie et sa vocation scientifique*, j'ai utilisé ce critère pour comparer la sociologie aux sciences qui servent généralement de repoussoir aux théoriciens du courant dualiste-régionaliste. Mais il est un cas que je n'ai pas considéré : celui où les résultats échappant à l'épistémologie ordinaire sont produits à la périphérie de la sociologie, si bien que les sociologues peuvent à loisir les accepter ou les rejeter, en fonction de leurs préférences personnelles. L'épistémologie n'étant pas le règne de l'opinion, il faudra compléter le critère de test précédent par deux modules visant à savoir : 1) si les résultats de ce courant périphérique sont scientifiquement fondés ; 2) comment ce courant s'accommode de l'épistémologie dominante de la sociologie. C'est à cette enquête de terrain que nous allons nous tenir, en considérant le cas de la physique statistique dite « exotique » qui étudie, depuis une dizaine d'années, des objets qui ont, au moins à première vue, un caractère sociologique.

4 Émergence de la physique statistique exotique

Paul F. Lazarsfeld était physicien de formation (Lautman et Lécuyer, 1998). Harrison C. White et Duncan J. Watts, deux promoteurs de l'analyse des réseaux sociaux avec Linton C. Freeman, sont aussi des physiciens théoriciens convertis à la sociologie. Si l'intérêt des physiciens pour la sociologie ne s'est jamais démenti, il s'est récemment accentué avec le développement de la physique statistique appliquée aux phénomènes sociaux. L'idée fondamentale de ces physiciens hors champ est d'exploiter une analogie entre sociologie et physique. La physique statistique cherche à expliquer des états ou processus physiques macroscopiques à partir des propriétés microscopiques de leurs constituants (molécules, atomes, ions, électrons), ces éléments étant en grand nombre (10^{22} molécules par litre de gaz ; 10^{23} atomes par gramme). Cette situation n'est pas inconnue en sociologie, l'une de ses spécialités étant l'étude, inscrite dans la tradition

Borda-Condorcet-Arrow, des transitions micro-macro et des processus agrégatifs (Boudon, 1977 ; Schelling, 1978 ; Collins, 1981 ; Alexander et al., 1987 ; Axelrod, 1997 ; Cherkaoui, 1997, 2003).

Physique : « Les molécules d'un gaz par-fait s'agitent en tous sens [comme si elles étaient libres de choisir leur direction] et néanmoins, toutes ensemble, elles exhibent des régularités (énergie cinétique, pression, etc.) qui peuvent être traduites par des lois macroscopiques »

Sociologie : « Les individus vont à leurs affaires [et ont des raisons particulières d'agir comme ils le font], et néanmoins, tous ensemble, ils composent un phénomène exhibant des régularités (normes, choix collectifs, etc.). Sont-elles traduisibles par des lois macroscopiques ? »

Perelman et Tyteca (1970, p. 512) nous ont appris à nous méfier des analogies et des métaphores qui fondent, plus qu'elle ne résument, la structure du réel. Le transfert du phore sur le thème peut occulter certains aspects importants du problème appréhendé par une analogie. Y a-t-il plus qu'un rapport superficiel entre la sociologie et la physique statistique ? Explicitons les similitudes et les différences entre les deux sciences. Les similitudes sont : 1) le passage d'états microscopiques à des états macroscopiques ; 2) l'indétermination des comportements élémentaires (molécules / individus), quoiqu'elle ait une origine différente (mouvements aléatoires / actions intentionnelles). Les différences tiennent : 3) au caractère intentionnel des conduites humaines ; 4) au nombre de variables explicatives utilisées, grand en sociologie (variables démographiques, ethniques, religieuses, idéologiques, historiques, économiques, etc.), plus restreint en physique (température, pression, etc.) ; 5) à la taille des groupes (10^{22} molécules par litre de gaz / quelques centaines à quelques milliers d'individus). Les physiciens sont cependant bien conscients de cette limite comme le montre ce commentaire du « séminaire mourant » de Schelling (1978) :

« Pour une dynamique stochastique (les agents décidant de venir avec une probabilité d'autant plus grande que le nombre de participants est plus grand que leur seuil n_i), les conclusions seraient qualitativement les mêmes que dans le cas déterministe à la condition d'avoir un très grand nombre d'agents ($N \rightarrow \infty$). Pour un petit nombre d'individus, en dynamique stochastique, la proportion de participants, $\eta(t) = n(t)/N$, est une variable ayant de fortes fluctuations d'un instant t à l'autre. Dans la limite $N \rightarrow \infty$, un ordre apparaît, $\eta(t) = n(t)/N$ devenant un nombre quasi constant (avec des fluctuations d'ordre $1/\sqrt{N}$). [...] C'est dans cette limite des grands systèmes, en présence de fonctions de choix stochastiques, que l'analogie avec la physique prend tout son sens » (Nadal et Gordon, 2005, p. 71).

Le fait que ces conditions d'application concernent des aspects fondamentaux de l'objet sociologique (en particulier les états intentionnels) fait de cette enquête un test crucial. Car du succès ou de l'insuccès de la physique statistique exotique dépendra celui de l'épistémologie sociologique dominante. On trouvera une revue des méthodes et des résultats de la physique statistique exotique dans Kulakowski (2007), Stauffer et Solomon (2007), Castellano et al. (2007). Les réseaux sociaux (598 preprints) constituent le premier thème de recherche de la physique statistique exotique, ce qui explique la fréquente référence faite à ces travaux dans la suite du texte³. Quoique ces recherches fassent suite aux travaux pionniers de Weidlick (1971, Schelling (1978) et Galam et al. (1982), les physiciens ne se sont mis à étudier *collectivement* les réseaux sociaux qu'après la publication de l'article de Watts et Strogatz (1998). Le développement de la physique statistique s'est pour l'instant traduit par quatre phénomènes concomitants :

³On mesurera le dynamisme de ce courant en lançant une requête 'soci*' sur la base <http://arXiv.org/physics> : 'sociology' (746 articles), 'societies' (648), 'social network' (598), 'sociological' (487), 'sociophysics' (180), 'social phenomena' (128), 'social net' (116), 'social structure' (111), 'social interaction' (100), etc. Parmi ses représentants, on peut citer Steven H. Strogatz, Duncan J. Watts, Albert-L. Barabási ou Mark. E. J. Newman.

1. L'acceptation par les revues de sociologie — le plus souvent à orientation mathématique, comme le *Mathematical Journal of Sociology* — d'articles émanant de physiciens statisticiens (Galam et al., 1982; Holme et al., 2004; Nadal et Gordon, 2005; Newman, 2005a).
2. L'apparition d'entrées sociologiques dans les revues de physique, y compris celles à facteur d'impact élevé comme *Nature*, *Science* ou *Physica A* (Durlauf, 1999; Barabási, 1999; Newman et Park, 2003; Watts et Strogatz, 2002; Toivonen et al., 2006).
3. La récente création d'une rubrique de sociologie dans les archives de physique. L'archive ouverte <http://arXiv.org/archive/physics.soc-ph> [Physics and Society] a été créée en 2002, par scission de la base <http://arXiv.org/archive/cond-mat> [Condensed Matter], créée en 1992, qui absorbait jusqu'alors tous les articles à caractère sociologique.
4. Enfin, le développement de collaborations scientifiques, encore rares, entre physiciens et spécialistes de sciences sociales (par exemple : Ehrhardt, Marsili et Vega-Redondo, 2004; Gordon, Nadal, Phan et Semeshenko, 2007).

Le développement de la physique statistique exotique brouille les partages disciplinaires auxquels les sociologues sont habitués. Mais pour que ces derniers s'inquiètent des avancées de cette spécialité, faut-il encore qu'elle satisfasse certaines conditions. Si les physiciens ne font que répéter ce que savent déjà les sociologues (les cas de redites ne sont pas rares à l'ère du *publish or perish*); ou si leurs résultats sont peu fondés (la physique théorique contemporaine est peuplée d'hypothèses sans corrélats empiriques); ou si ces résultats n'intéressent pas la connaissance sociologique (on connaît leur tendance à nommer « sociologie » tout facteur parasitant la recherche scientifique); alors l'épistémologie sociologique n'a nul besoin d'être amendée. Dans le cas contraire, une révision s'impose. Le caractère fondé d'une spécialité peut être restitué par trois critères : nouveauté, robustesse et caractère disciplinaire.

Nouveauté. La nouveauté est un point de passage obligé de toute analyse épistémologique, qu'elle soit envisagée sous la modalité du « progrès », de la « révolution » ou de l'« émergence » (Fagot-Largeault, 2002). Quelles que soient ses difficultés particulières d'appréhension selon ces modalités, la nouveauté est un critère essentiel pour apprécier l'intérêt d'une découverte présumée. Un autre aspect de la nouveauté est envisagé par la sociologie des sciences, qui cerne par une « norme de priorité » les procédés empiriques d'élimination des redites (Merton, 1973).

Robustesse. Le concept de robustesse a été introduit par Wimsatt (1981) à partir des idées de « multiplicité des arguments » (Peirce, 1936), d'« intersection des modèles » (Levins, 1966) et de « triangulation » (Campbell, 1969). Le concept est apparenté à celui d'« alignement des modèles » ou de *docking* (Axelrod, 1997). Pour la ramener à sa plus simple expression, la robustesse caractérise l'inférence de la vérité par détermination multiple. Un résultat sera dit robuste s'il n'est pas affecté par le changement de la procédure utilisée pour l'établir. Le concept de robustesse a des applications multiples — de l'axiomatique à la théorie du signal. Nous ne retiendrons ici que ses rapports à la testabilité (Wimsatt, 1981, p. 135-139). Il signifie, dans ce cas, qu'on peut s'assurer de la robustesse d'un résultat par des tests indépendants.

Disciplinarité. Nous introduisons ce dernier critère — qui ne peut être défini qu'en se référant à des traditions scientifiques constituées — pour des raisons pratiques et non de principe. Peu importe au fond l'assignation d'un résultat scientifique à telle ou telle discipline s'il est doté de nouveauté et de robustesse. Le caractère disciplinaire d'un résultat ne doit être examiné qu'en cas de dissensus. Des scientifiques conservateurs peuvent en effet écarter des résultats nouveaux et robustes, au motif qu'ils ne relèvent pas de leur discipline. Mais que signifie relever d'une discipline? Nous nommerons disciplinaire un résultat qui ne peut être transposé d'une science à une autre sans perdre ses caractéristiques essentielles. La loi de gravitation (loi de Newton) est transposable à l'électrostatique (loi de Coulomb); elle n'est pas transposable aux interactions moléculaires en raison de leur décroissance rapide $\propto 1/r^6$ (lois de Keesom, Debye et London).

Les trois points : nouveauté, robustesse et disciplinarité, qui établissent l'intérêt de la physique statistique, seront développés en parallèle (sections 5, 6, 7).

5 La physique statistique obtient des résultats nouveaux

On doit mettre au compte de la physique statistique d'avoir découvert certaines propriétés fondamentales des réseaux sociaux en comparant de nombreux réseaux réels (collaboration scientifique, partenariat économique, communication téléphonique, sociabilité, sexualité à risque, etc.) à des graphes aléatoires (Erdős et Rényi, 1959). Voici quelques unes de ces propriétés :

1) *Les réseaux sociaux se distinguent des graphes de Erdős-Rényi par une distribution de degré ne suivant pas une loi binômiale ou de Poisson* (Barabási et Albert, 1999). Soit un graphe aléatoire de n sommets, p la probabilité que deux sommets soient connectés. Le degré moyen d'un sommet est :

$$z = \frac{n(n-1)p}{n} = p(n-1)$$

où $z \approx np$, lorsque n est suffisamment grand. La probabilité p_k qu'un sommet du graphe soit de degré k est une distribution binômiale (éq. 1) qui devient une distribution de Poisson quand $n \gg kz$ (éq. 2) :

$$(1) \quad p_k = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k} \quad (2) \quad p_k \approx \frac{e^{-z} z^k}{k!}$$

Ces distributions montrent un pic autour de la moyenne z . Il a été montré que les réseaux réels se distinguent par des distributions de degré fort différentes, suivant en général une loi de puissance $p_k = k^{-\gamma}$, γ constante, avec un degré maximum $k_{max} \approx n^{1/(\gamma-1)}$.

2) *Les réseaux sociaux se distinguent des graphes aléatoires de Erdős-Rényi par leur forte transitivity* (Watts et Strogatz, 1998). La transitivity (*clustering*) est définie comme la probabilité que deux sommets d'un graphe soient connectés entre eux s'ils sont connectés à un troisième sommet. Cette propriété se traduit par le coefficient C , rapport du nombre de boucles de longueur 3 (triangles) au nombre total de triplets constructibles dans le graphe :

$$C = \frac{3N_{\Delta}}{N_3}$$

Il est aisé de voir que, dans un graphe aléatoire, cette probabilité est indépendante du fait que deux sommets soient connectés ou non à un troisième. Dans un graphe de Erdős-Rényi, la valeur approchée de ce coefficient est donc $C = p \approx z/n$.

3) *Les degrés de sommets adjacents sont corrélés positivement dans les réseaux sociaux, négativement dans les autres réseaux* (Pastor-Satorras, Vázquez et Vespignani, 2001 ; Newman et Park, 2003). Dans les réseaux routiers, électriques ou neuronaux, qui sont homogènes (*disassortative networks*), le degré moyen des sommets adjacents à n décroît en fonction du degré k de n — en général comme $\langle k_{nn} \rangle \approx \sqrt{k}$. Les réseaux sociaux ne satisfont pas à cette relation. Une tactique de différenciation plus précise consiste à mesurer le coefficient de corrélation de degré :

$$r = \frac{1}{\sigma_q^2} \sum_{jk} jk (e_{jk} - q_j q_k)$$

q_k étant la distribution de « degré excédentaire » k (pour un sommet de degré total $k+1$) ; e_{jk} étant la probabilité qu'un lien connecte des sommets de degré excédentaire j et k . Ce coefficient est négatif dans les réseaux matériels ; positif dans les réseaux sociaux. Par exemple :

$r = -0,193 \pm 0,002$ (réseau internet); $r = +0,171 \pm 0,045$ (réseau de collaboration entre des physiciens); $r = +0,276 \pm 0,004$ (réseau de chefs d'entreprises), etc.

6 La physique statistique obtient des résultats robustes

La robustesse des propriétés des réseaux que nous venons d'exposer peut être testée par le biais de mesures indépendantes. Dans le cadre d'une étude de la diffusion de l'optique au sein des universités médiévales, nous avons modélisé les échanges entre universités au moyen d'un réseau relationnel étendu sur tout l'espace européen. Cet exemple peut offrir un test de robustesse parce que le réseau des universités médiévales présente des particularités intéressantes : 1) c'est un réseau ancien, 2) composé de macro-individus, 3) dépendant de la distance spatiale, au contraire des réseaux étudiés par les physiciens, qui sont le plus souvent des réseaux sociaux contemporains composés d'individus-personnes. Ces différences invalident-elles les propriétés identifiées par les physiciens ? Le calcul montre que le réseau des universités médiévales satisfait pleinement à ces propriétés (Raynaud, 2004, p. 49-52) :

- 1) La distribution de degré est mal ajustée à une distribution binômiale (Figure 1a).
- 2) La corrélation de degré n'est pas une loi en $\langle k_{nn} \rangle \approx \sqrt{k}$ (Figure 1b). Le coefficient de corrélation de degré est positif :

$$r = \frac{1}{\sigma_q^2} \sum_{jk} jk(e_{jk} - q_j q_k) = +0,6588$$

- 3) Le réseau est fortement structuré : la transivité $C = 0,588$ est supérieure à la valeur $z/n = 0,09$ qui constitue une estimation de la transivité dans un graphe aléatoire (Figure 1c).

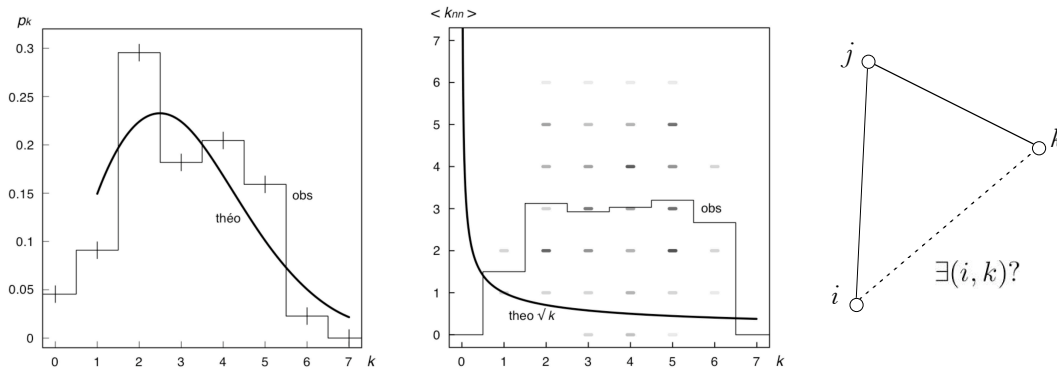


FIG. 1 – Distribution de degré (a), corrélation de degré (b), transivité (c)

7 La physique statistique obtient des résultats sociologiques

Que la physique statistique exotique obtienne des résultats nouveaux et robustes est une chose ; que ces résultats intéressent la sociologie en est une autre. Comment savoir si les propriétés des réseaux sociaux (distribution de degré, corrélation de degré, transivité) sont des résultats de sociologie, quoiqu'issus de la physique statistique, ou des résultats de physique, quoiqu'appliqués à la sociologie ? Un moyen de lever l'ambiguïté est de s'interroger sur les possibilités de transfert d'un résultat d'une science à l'autre. Si le résultat est transposable, alors il n'est pas proprement

disciplinaire car, en ce cas, on ne peut exclure qu'il ait été imaginé dans la discipline-source (physique) *avant* d'être réécrit dans la discipline-but (sociologie). Inversement, si le résultat n'est pas transposable, il est disciplinaire, même s'il n'est pas reconnu comme tel par les membres de la communauté scientifique ; il est difficile de se prononcer sur le caractère disciplinaire d'une nouveauté radicale.

Certains résultats sont de simples transpositions. Considérons le modèle introduit par Ernst Ising pour décrire le ferromagnétisme (Ising 1925 ; Schwabl, 2002). Supposons un réseau d'atomes de fer $i \in \{1, 2, 3 \dots, N\}$, dans lequel chaque atome peut prendre l'un des deux états $S = \{+1, -1\}$, $s_i = +1$ désignant le spin « up » et $s_i = -1$ le spin « down ». En dessous d'une certaine température (température de Curie T_C pour le ferromagnétisme, température de Néel T_N pour l'antiferromagnétisme), on observe un appariement des spins des atomes, de sorte qu'une aimantation apparaît au niveau macroscopique. Le hamiltonien H , qui exprime l'énergie totale mise en jeu, s'écrit :

$$H = \sum_j^n \sum_i^N J_{ij} s_i s_j - B \sum_i^N s_i$$

Négligeons tout d'abord la seconde sommation en B . Le terme $J_{ij} s_i s_j = \pm J_{ij}$ représente l'interaction entre plus proches voisins i et j . La double sommation mesure donc l'énergie totale d'interaction en considérant successivement tous les $j \in \{1, 2, 3 \dots, n\}$ et tous les $i \in \{1, 2, 3 \dots, N\}$; $n \ll N$. La recherche d'un état de moindre énergie favorise le changement de spin des atomes, qui le feront d'autant plus massivement que les atomes $s_j \neq s_i$ sont plus nombreux. La sommation simple signifie que le spin d'un atome i changera dans la direction du champ B , si celui-ci est non nul. L'état de moindre énergie est alors réalisé. Si ce n'était l'anthropomorphisme de cette description, on pourrait dire que le « choix » d'un atome est « influencé » par celui de ses voisins. En cela, le modèle de Ising est proche de la sociologie des processus agrégatifs : il explique une propriété macroscopique (aimantation) à partir de propriétés microscopiques (états et interactions atomiques).

Quoiqu'il ait été étendu au cas de variables discrètes (modèle de Potts à q états) ou continues (modèle de Deffuant), le modèle de Ising reste dans les sciences sociales souvent appliqué à l'étude de choix discrets binaires : achat d'un bien, adoption d'une innovation, affiliation à un club, préférence pour une opinion (Weidlick, 1971 ; Axelrod, 1997 ; Gordon et Nadal, 2006 ; Stauffer, 2007). Il peut être appliqué à l'étude des ordres émergents et des transitions de phase. Pourquoi les Anglais roulent-ils à gauche, n'utilisent pas le système métrique ? Pourquoi dans certains pays paye-t-on au restaurant tantôt avant, tantôt après le repas ? Pour rendre compte de ces situations, on remplacera les atomes $i \in \{1, 2, 3 \dots, N\}$ par des individus ; l'énergie d'interaction J_{ij} par la force de l'interaction sociale ; le spin par un choix binaire $\Omega = \{+1, -1\}$, où $\omega_i = +1$ désigne « rouler à droite », « utiliser le mètre », « payer après », etc. et $\omega_i = -1$ l'option contraire. Le modèle de Ising peut alors rendre compte de l'appariement des choix et l'émergence d'un ordre collectif. Plusieurs critiques peuvent être énoncées :

1. Le choix d'un individu peut être déterminé non seulement par ses plus proches voisins, mais aussi par des leaders d'opinion qui ne sont pas nécessairement en contact avec lui ;
2. L'exposition à une nouveauté n'implique pas nécessairement son adoption, or les interactions interindividuelles sont exclusivement responsables de l'exposition ;
3. Il est vital de rouler du bon côté de la route, agréable seulement de partager une opinion. Le modèle de Ising est d'autant plus efficace que l'action a un caractère nécessaire et les liens sociaux, un caractère coercitif.

En résumé, plus l'action est soumise à l'autodétermination, moins le modèle de Ising est heuristique : preuve que son succès en sociologie est le résultat d'une transposition.

D'autres résultats sont spécifiques. C'est notamment le cas des propriétés des réseaux sociaux exposées plus haut. Que les réseaux sociaux se distinguent par une corrélation de degré positive n'est pas la transposition d'un résultat de physique puisque les réseaux matériels se caractérisent au contraire par une corrélation de degré négative. Entre ces extrêmes, il existe des situations intermédiaires. Même dans les transpositions strictes du modèle de Ising, les phénomènes étudiés restent attachés au terrain empirique de la sociologie. Un physicien généraliste peut encore s'intéresser aux ventes de téléphones portables ou aux applaudissements des spectateurs de la Maison de la Radio, dans la mesure où ces phénomènes sont remarquablement ajustés à la loi de puissance $h \sim w^\gamma$ avec $\gamma = -2/3$ qui se déduit du modèle de Ising (Michard et Bouchaud, 2005). Mais dès que l'intérêt du modèle concerne les caractères propres ou la prédictibilité du phénomène social, l'intérêt physique disparaît. Lorsqu'il est question de la polarisation d'une communauté fermée vers la dictature *vs.* l'attentisme démocratique (Sznajd-Weron et Sznajd, 2001), les enjeux sociopolitiques surpassent ceux de la physique. Cela n'est pas sans rapport avec certains témoignages à propos de l'« hostilité » de la physique ordinaire à l'encontre de la physique exotique (Galam, 2004). Par ailleurs, il faut observer que les physiciens qui étudient les phénomènes collectifs font rarement une application à la lettre du modèle de Ising : celui-ci est adapté, révisé, ou reformulé de manière à tenir compte des situations inédites qui n'ont pas leur équivalent en physique statistique. Nous sommes déjà dans une zone où les résultats ne sont plus transposables : ils sont spécifiques et dépendent de la sociologie bien qu'ils soient produits par des physiciens professionnels.

Ce jeu de bascule n'est pas inconnu. Dans deux articles remarquables — « Rôles et innovation en médecine » [1960] et « Facteurs sociaux dans la genèse d'une nouvelle science » [1966] — Ben-David (1997, p. 60, 82) avait décrit l'hybridation des rôles comme le processus par lequel une personne accomplit des objectifs qui ne dépendent pas de son rôle, et souligné qu'elle se traduit par la production de connaissances *implantées* au sens que, si les méthodes des marginaux-sécants sont issues d'une discipline-source, les résultats relèvent de la discipline-but. C'est exactement le cas de la physique statistique appliquée aux phénomènes sociaux.

L'avenir dira si le développement de la physique statistique exotique a résulté de sa capacité à transposer des modèles ou — comme nous le pensons — de son aptitude à porter une analyse *spécifique* des phénomènes sociaux.

8 Caractères épistémologiques de la physique statistique

Dès lors que les résultats de cette spécialité sont nouveaux, robustes et sociologiques, se pose la question de leur compatibilité avec les thèses dualistes-régionalistes qui prévalent en sociologie. Il faut alors détailler les caractères de la physique statistique pour mieux cerner les points d'accord et de désaccord. Dans l'ensemble, il est frappant de voir que cette spécialité est indifférente aux préceptes de la nouvelle épistémologie sociologique. Contentons-nous d'en faire la démonstration sur deux des critères distinctifs énoncés en début d'article [1-8].

1) *La physique statistique utilise des concepts analytiques quantitatifs.* Certains auteurs ont tenté de définir la spécificité de la sociologie par l'usage exclusif de concepts typologiques (idéotypes, désignateurs semi-rigides). De manière à ne pas neutraliser artificiellement l'argument dualiste-régionaliste, rapprochons maintenant d'une définition exigeante des concepts analytiques, un concept élémentaire de physique statistique exotique. Soit un graphe $G = (N, L)$ composé de sommets $N = \{n_1, n_2, \dots, n_g\}$ et d'arcs $L = \{l_1, l_2, \dots, l_L\}$. Le rapport du nombre d'arcs observés au nombre d'arcs du graphe complet correspondant $\delta = L/g(g-1)$ est une mesure de densité du réseau social. Ce concept se plie aux cinq règles énoncés par Carnap (1973, p. 64-80) pour définir un concept analytique quantitatif :

1. Relation d'équivalence. Il y a un sens à dire que deux réseaux ont la même densité.
2. Relation d'ordre. Il y a un sens à dire qu'un réseau est plus dense qu'un autre.
3. Zéro. La densité est nulle dans une collection de sommets déconnectés, $L = 0$.
4. Choix de l'unité. La densité vaut $\delta = 1$ dans un graphe complet.
5. Choix de l'échelle. Une mesure de densité est toujours prise sur $0 \leq \delta \leq 1$.

Par ces cinq propriétés, on vérifie que la physique exotique utilise un concept analytique quantitatif régulier. Carnap explique pourquoi de tels concepts peuvent être utilisés dans toutes les sciences : « Les concepts quantitatifs ne nous sont pas donnés par la nature ; ils découlent de la pratique qui consiste à appliquer des nombres aux phénomènes naturels » (Carnap, 1973, p. 64). La présence ou l'absence de ces concepts ne tient donc pas à la nature des faits étudiés, mais à une *décision de l'observateur* de se donner des définitions et un système de mesure adéquat.

2) *La physique statistique exotique connaît des lois.* Le mathématicien Paul Lévy a attaché son nom à l'étude de la composition des variables aléatoires. Une loi est stable par rapport à l'addition si, X_1 et X_2 étant deux variables aléatoires indépendantes tirées de cette loi, c_1 et c_2 étant deux constantes positives quelconques, on a $c_1X_1 + c_2X_2 = cX$. On peut étendre le raisonnement au cas des sommes infinies $S_n = X_1 + \dots + X_n$. On nomme type, l'ensemble des lois qui se déduisent de l'une d'entre elles par changement d'unité ($X \rightarrow aX$) ou d'origine ($X \rightarrow X + b$). La question est alors de distinguer les types de lois stables. Paul Lévy a montré qu'il en existait plusieurs. Le type le plus commun est celui des lois de Gauss : si G_1 et G_2 sont deux gaussiennes, alors $G = G_1 + G_2$ est aussi une gaussienne. Les lois de Gauss sont des distributions convergentes, de variance finie. Mais les lois de Gauss ne sont pas les seules lois stables. Il existe aussi des distributions *Lévy-stables non convergentes*. Ce sont les lois de puissance $P(X > x) = K(x+c)^{-\gamma}$, avec $0 < \gamma \leq 2$, de variance infinie ou indéfinie (Lévy, 1937). Les lois de puissance négative, d'écriture générale $P(x) = a.x^{-\gamma}$, sont de décroissance d'autant plus rapide que γ est grand. Comme l'a proposé Barbut (1998, 2003), on peut les nommer lois de Lévy-Pareto, de manière à associer le nom de leur inventeur (Pareto, 1896) et celui de leur premier théoricien (Lévy, 1937). Ces lois de puissance négative connaissent quantité de noms régionaux : lois de Pareto, Lotka, Zipf, Yule, etc. (cf. Raynaud, 2006, p. 144-163). Elles expriment toujours l'inégale distribution d'un caractère donné dans une population. Elles sont saillantes en physique statistique (Sznajd-Weron et Sznajd, 2001 ; Strogatz, 2001 ; Newman, 2005b ; Toivonen et al., 2006). L'un des motifs les plus fréquemment invoqués pour bannir l'usage de lois en sociologie est qu'elles renverraient au déterminisme laplacien. L'argument ne distingue pas entre les diverses espèces de lois (Vuillemin, 1982). Or les physiciens statisticiens étudient des lois de probabilité, comme les lois de Lévy-Pareto, qui se distinguent des lois déterministes en n'interférant pas avec la liberté individuelle (Granger, 1960, p. 152). De sorte que la critique du déterminisme tombe à plat, puisque les lois du domaine se soustraient à l'antinomie déterminisme / liberté.

Conclusion : les physiciens statisticiens obtiennent des résultats robustes en sociologie, en utilisant des lois et des concepts analytiques quantitatifs qui violent à peu près intégralement tous les principes des nouvelles épistémologies. Par voie de conséquence, ces dernières constituent — en dépit de leur pluralisme affiché — des *épistémologies normatives* opposables.

9 Retour sur les nouvelles épistémologies

L'épistémologie sociologique dominante ne sort pas indemne de l'épreuve que lui fait subir la physique statistique exotique. Toute normativité universalisante — « mal posé » [1]⁴, « idée même, institue, fondamental » [3], « spécificité » [4], « caractéristique, consubstantielle » [7],

⁴Cf. note 1 pour les références détaillées.

« morcellement, dissout, inutile » [8]; « insuffisante, ne peut être, impossibilité » [1'], « essentielle » [2'], « spécificité » [4'], « impossibilité » [5'], « introuvable » [6'], « nécessairement » [7'], « ne saurait » [8'] — doit être suspendue. Si l'on veut sauver une partie de ces thèses, il faut au minimum les réécrire sur un mode existentiel *vs.* universel, contingent *vs.* nécessaire, permissif *vs.* normatif. Mais y aurait-il encore un sens à déclarer que « l'intentionnalité signifiante qui donne sens à l'idée même de la recherche » est une option parmi tant d'autres ? La confrontation des résultats de la physique statistique avec les points de la nouvelle épistémologie sociologique pose un autre problème. En effet, ce courant de recherche n'invalide pas chacun des huit points examinés, mais seulement six d'entre eux. Les physiciens statisticiens ne critiquent pas la science [1], n'adoptent pas une approche herméneutique [4], n'utilisent pas les ressources de leur subjectivité [5], ne cèdent pas à la déflation théorique [6], n'usent pas de concepts particuliers [7] et ne se préoccupent guère des partages disciplinaires en vigueur [8]. Par contre, ils admettent pleinement l'historicité [2] des faits sociaux, par exemple quand ils étudient l'évolution de phénomènes collectifs dans la perspective d'y découvrir l'émergence de phénomènes inédits, comme l'irruption d'une grève ou l'apparition d'un régime dictatorial (Galam, Gefen et Shapir, 1982; Sznajd-Weron et Sznajd, 2001). Ils ne sont pas davantage indifférents aux états intentionnels [3], comme le montre l'exemple suivant. L'incertitude a été rapprochée de la notion de température : $T = 0$ si un état est certain (avenir figé), $T = +\infty$ si un état est improbable (avenir ouvert). Mais peut-on connaître l'état objectif du monde ? Cela n'a aucune importance car la température de l'état peut être inférée des croyances individuelles, comme le rappelle un physicien qui cite le théorème de Thomas : « Les choses qui sont perçues comme réelles ont des conséquences réelles » (Kulakowski, 2007, p. 7).

La réponse originale de la physique exotique pose le problème de la déductibilité des propriétés épistémologiques, selon laquelle les caractères distinctifs de la sociologie pourraient être déduits de l'historicité et de l'intentionnalité. Pourquoi l'enchaînement contingent [2-3] \rightarrow [4-8] est-il perçu comme nécessaire ? Ce jugement résulte d'une confusion pareille à celle qui assimile toute loi au déterminisme laplacien. De bonnes clarifications figurent déjà dans les textes classiques. Rickert (1997, p. 144-145) a montré que l'historicité n'est pas une propriété spécifique des faits sociaux, mais une propriété transversale qui imprime aussi sa marque sur les sciences naturelles. C'est donc une propriété « sociologique » dont on ne peut tirer aucune conséquence spécifique. Weber (1995, 1, p. 29) a montré que l'intentionnalité n'appelle les procédés d'empathie et de reviviscence — qui ouvrent la voie à l'herméneutique [4], à la subjectivité [5] et à la déflation théorique [6] — que dans certains cas seulement : ceux où les déterminants rationnels de l'action sont absents. Est-ce toujours le cas ?

Dernière difficulté, les promoteurs des nouvelles épistémologies sociologiques se réclament du pluralisme et de la pluridisciplinarité [8], cependant qu'ils excluent tout rapport aux sciences naturelles [1]. Mais, si l'on prône la pluridisciplinarité, pourquoi ne pas s'ouvrir à celles qui ont un rapport direct avec l'analyse sociologique ? On voit ici ce qu'il y a d'artificiel à rapprocher au sein des *Geisteswissenschaften* la sociologie, la psychanalyse et l'histoire des religions — ces disciplines n'ayant jamais contribué à l'analyse des processus agrégatifs. On voit ce qu'il y a d'arbitraire à recommander aux sociologues de ne pas être curieux des résultats obtenus par les physiciens.

10 La sociologie n'est pas une science naturelle

Jusqu'à quel point les résultats de la physique statistique bousculent-ils nos croyances à propos de la sociologie ? Ils obligent certes à une révision drastique de sa description épistémologique. Mais ils n'appuient guère l'utopie d'une renaissance de la « physique sociale » ou d'une « socio-

physique ». Les obstacles sont nombreux. La médiocre interconnexion des physiciens statisticiens et des spécialistes des sciences sociales a été établie par l'analyse des réseaux (Kulakowski, 2007). La diffusion de la physique statistique est plus lente que prévue. Cette lenteur — hormis le problème général de la dépendance à l'échantillon qui entrave le progrès des connaissances — a été attribuée au délai d'acceptation des découvertes (Stauffer, 2003) et aux visées de typification qui prévalent en physique (Stauffer, 2007 ; Kulakowski, 2007). Le deuxième argument paraît à tout le moins douteux : l'exigence de la typification est un poncif de la sociologie (Weber, 1995, p. 49). Cette résistance peut résulter aussi d'une moindre sensibilité aux informations discordantes, du conservatisme académique, et du fait que seule une partie de la physique statistique est allée au-delà d'une simple transposition des résultats. Ses chances de succès seront probablement conditionnées par son aptitude à énoncer des propriétés spécifiquement sociologiques. Mais les chances de succès de ce courant de recherche ne doivent pas être sous-estimées : lorsqu'ils jouent le jeu de produire des résultats proprement sociologiques — comme c'est déjà le cas lorsqu'ils étudient les réseaux sociaux —, alors les physiciens statisticiens ne font plus de la physique, ils font de la science tout court.

Cette étude s'est limitée à mettre en regard les obstacles que rencontre la physique statistique dans son projet d'étudier les phénomènes sociaux et les difficultés symétriques des épistémologies normatives qui veulent circonscrire trop étroitement les principes de l'analyse sociologique. Il ressort de cette étude que le style d'analyse scientifique est loin d'être entièrement déterminé par l'objet étudié, et que l'on peut, dans l'analyse des phénomènes sociaux, recourir à des principes heuristiques variés. La rigueur est le prix de cette liberté.

11 Références

- ALEXANDER J.C. et al., eds., 1987, *The Micro-Macro Link*, Berkeley : University of California Press.
- Axelrod R., 1997, *The Complexity of Cooperation*, Princeton : Princeton University Press.
- Barabási A.L., 1999, « Emergence of Scaling in Random Networks », *Science*, 286, 509-512.
- Barbut M., 1998, « Une famille de distributions : des parétiennes aux contra-parétiennes », *Mathématiques, Informatiques et Sciences humaines*, 141, 42-72.
- Barbut M., 2003, « Homme moyen ou homme extrême ? de Vilfredo Pareto (1896) à Paul Lévy (1936) en passant par Maurice Fréchet », *Journal de la Société française de Statistique*, 144, 113-133.
- Ben-David J., 1997, *Éléments de sociologie historique des sciences*, Paris : PUF.
- Berthelot J.-M., 1996, *Les Vertus de l'incertitude. Le travail de l'analyse dans les sciences sociales*, Paris : PUF.
- Berthelot J.-M., 2003, « Plaidoyer pour un pluralisme sous contraintes », *Revue européenne des sciences sociales*, 126, 35-49.
- Boudon R., 1977, *Effet pervers et ordre social*, Paris : PUF.
- Boudon R., 1999, « Qu'est-ce qu'une bonne théorie ? », *Le Sens des valeurs*, Paris : PUF, 349-385.
- Bouilloud J.-P., 1997, *Sociologie et Société*, Paris : PUF.
- Busino G., 1992, *La Sociologie sens dessus dessous*, Genève-Paris : Droz.
- Campbell D.T., 1969, « Definitional Versus Multiple Operationalism », *Et. Al.*, 2, 14-17.
- Carnap R., 1973, *Fondements philosophiques de la physique*, Paris : A. Colin.

- Castellano C., Fortunato S., Loreto V., 2007, « Statistical Physics of Social Dynamics », preprint : <http://arXiv.org/physics.soc-ph/0710.3256v1> (2007).
- Cherkaoui M., 1997, « Le réel et ses niveaux : peut-on toujours fonder la macrologie sur la micrologie? », *Revue française de Sociologie*, 38, 497-524.
- Cherkaoui M., 2003, « Les transitions micro-macro. Limites de la théorie du choix rationnel », *Revue française de Sociologie*, 43, 231-254.
- Collins R., 1981, « On the Microfoundations of Macrosociology », *American Journal of Sociology*, 86/5, 984-1014.
- Cuin C.-H., 2001, *Ce que (ne) font (pas) les sociologues*, Paris-Genève : Droz.
- Durlauf S.N., 1999, « How Can Statistical Mechanics Contribute to Social Science? », *Proceedings of the National Academy of Science of the USA*, 96, 10582-10584.
- Ehrhardt G., Marsili M., Vega-Redondo F., 2004, « Emergence and Resilience of Social Networks », preprint : <http://merlin.fae.ua.es/fvega> (2004).
- Erdős P., Rényi A., 1959, « On Random Graphs », *Publicationes Mathematicae*, 6, 290-297.
- Fagot-Largeault A., 2002, « L'émergence », ANDLER D., FAGOT-LARGEAULT A., SAINT-SERNIN B., eds., *Philosophie des sciences*, Paris : Gallimard, 939-1048.
- Galam S., Gefen Y, Shapir Y., 1982, « Sociophysics : A Mean Behaviour Model for the Process of Strike », *Mathematical Journal of Sociology*, 9, 1-13.
- Galam S., 2004, « Sociophysics : A Personal Testimony », *Physica A*, 336, 49-55.
- Gordon M.B., Nadal J.-P., Phan D. et Semeshenko V., 2007, « Discrete Choices Under Social Influence : Generic Properties », preprint : <http://arXiv.org/physics.soc-ph/0742333v1> (2007).
- Gosselin G., 2002, *Sociologie interprétative*, Paris : L'Harmattan.
- Granger G.-G., 1960, *Pensée formelle et sciences de l'homme*, Paris : Aubier-Montaigne.
- Hägerstrand T., 1965, « A Monte Carlo Approach to Diffusion », *European Journal of Sociology*, 6 : 43-67.
- Holme P., Edling C.R., Liljeros F., 2004, « Structure and Time Evolution of an Internet Dating Community », *Social Networks*, 26, 155-174.
- Kulakowski K., 2007, « Around the Gap between the Sociophysics and the Sociology », preprint : <http://arXiv.org/physics.soc-ph/0711.2880v1> (2007).
- Ising E., 1925, « Beitrag zur Theorie des Ferromagnetismus », *Zeitschrift für Physik*, 31, 253-258.
- Lautman J., Lécuyer B.-P., eds., 1998, *Paul Lazarsfeld (1901-1976). La Sociologie de Vienne à New York*, Paris : L'Harmattan.
- Levins R., 1966, « The Strategy of Model Building in Population Biology », *American Scientist*, 54, 421-431.
- Lévy P., 1937, *Théorie de l'addition des variables aléatoires*, Paris : Gauthier-Villars.
- Merton R.K., 1973, *Sociology of Science*, Chicago : University of Chicago Press.
- Michard Q., Bouchaud J.-P., 2005, « Theory of Collective Opinion Shifts : From Smooth Trends to Abrupt Swings », *European Physical Journal B*, 47, 151-159.
- Morin E., 1984, *Sociologie*, Paris : Fayard.
- Nadal J.-P., Gordon M.B., 2005, « Physique statistique des phénomènes collectifs en sciences économiques et sociales », *Mathématiques et Sciences Humaines*, 172, 67-77.

- Newman M.E.J., 2005a, « A Measure of Betweenness Centrality Based on Random Walks », *Social Networks*, 27, 39-54.
- Newman M.E.J., 2005b, « Power laws, Pareto distributions and Zipf's law », *Contemporary Physics*, 46, 323-351.
- Newman M.E.J. et Park J., 2003, « Why Social Networks Are Different From Other Types of Networks », *Physical Review E*, 68, 036122.
- Pareto V., 1965 [1896], *Écrits sur la courbe de la répartition de la richesse*, Genève : Droz.
- Passeron J.-C., 1991, *Le Raisonnement sociologique. L'espace non-poppérien du raisonnement naturel*, Paris : Nathan.
- Pastor-Satorras R., Vázquez A., Vespignani A., 2001, « Dynamical and Correlation Properties on the Internet », *Physical Review Letter*, 87, 258701
- Perelman C., Olbrechts-Tyteca L., 1970, *Traité de l'argumentation*, Bruxelles : Éditions de l'Université de Bruxelles.
- Raynaud D., 2004, *Études d'épistémologie et de sociologie des sciences*, tome 2, *Pourquoi la perspective a-t-elle été développée en Italie centrale ?* HDR, Paris : Université de Paris-Sorbonne (Paris IV).
- Raynaud D., 2006, *La Sociologie et sa vocation scientifique*, Paris : Hermann.
- Rickert H., 1997 [1899], *Science de la culture et science de la nature*, Paris : Gallimard.
- Schelling T.S., 1978, *Micromotives and Macrobehaviour*, New York : W.W. Norton and Co.
- Schnapper D., 1999, *La Compréhension sociologique*, Paris : PUF.
- Schütz A., 1987, *Le Chercheur et le Quotidien. Phénoménologie des sciences sociales*, Paris : Méridiens-Klincksieck.
- Schwabl F. (2002), *Statistical Mechanics*, Heidelberg : Springer Verlag.
- Stauffer D., Solomon S., 2007, « Applications of Physics and Mathematics to Social Science », preprint : <http://arXiv.org/physics.soc-ph/0801.01121v1> (2007).
- Strogatz S.H., 2001, « Exploring Complex Networks », *Nature*, 410, 268-276.
- Sznajd-Weron K., Sznajd J., 2001, « Opinion Evolution in Closed Community », *International Journal of Modern Physics C*, 11, 1157-1165.
- Toivonen R., Onnela J.P., Saramäki J., Hyvönen J., Kaski K., 2006, « A Model for Social Networks », *Physica A*, 371, 851860.
- Uhl M., 2004, *Subjectivité et sciences humaines. Essai de métasociologie*, Paris : Beauchesne.
- Vuillemin J., 1982, « Comparative Philosophy as Applied to the Concept of Natural Law », *The Monist*, 65, 3-12.
- Wasserman S., Faust K., 1994, *Social Network Analysis*, Cambridge : Cambridge University Press.
- Watier P., 2002, *Une Introduction à la sociologie compréhensive*, Paris : Circé.
- Watts D.J., Strogatz, S.H., 1998, « Collective Dynamics of Small World Networks », *Nature*, 393, 440-442.
- Watts D.J., Strogatz, S.H., 2002, « Random Graph Models of Social Networks », *Proceedings of the National Academy of Science of the USA*, 99, 2566-2575.
- Weber M., 1995 [1921], *Économie et société*, 1. *Les catégories de la sociologie*, 2. *L'organisation et les puissances de la société dans leur rapport avec l'économie*, Paris : Plon-Pocket.

- Weidlick W., 1971, « Statistical Description of Polarization Phenomena in Society », *British Journal of Mathematical Statistical Psychology*, 24, 251-266.
- Wimsatt W.C., 1981, « Robustness, Reliability and Overdetermination », in BREWER M. et COLLINS B., eds., *Scientific Inquiry and the Social Sciences*, San Francisco : Jossey-Bass, 124-163.

Dominique Raynaud est maître de conférences à l'Université Pierre-Mendès-France, membre du groupe de recherches PLC Philosophie, langage, cognition (Grenoble) et du GEMAS Groupe d'études des méthodes de l'analyse sociologique (Paris). Spécialiste de sociologie et d'histoire des sciences, il a publié récemment *Sociologie des controverses scientifiques*, Paris, PUF, 2003 et *La Sociologie et sa vocation scientifique*, Paris, Hermann, 2006.