

**BULLETIN N° 141
ACADÉMIE EUROPEENNE
INTERDISCIPLINAIRE
DES SCIENCES**



Séance du mardi 12 janvier 2010 :
Choix de la thématique du prochain congrès
Quelques réflexions sur le déterminisme
par nos Collègues Gilbert BELAUBRE et Michel GONDRAN

Prochaine séance : mardi 9 février 2010:
MSH, salle 215-18heures
Réflexion sur la modélisation en sciences sociales en présence de
Daniel COURGEAU Directeur de recherche émérite à l'INED

ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES

FONDATION DE LA MAISON DES SCIENCES DE L'HOMME

PRESIDENT : Michel GONDRAN
VICE PRESIDENT : Pr Victor MASTRANGELO
SECRETAIRE GENERAL : Irène HERPE-LITWIN
TRESORIER GENERAL : Bruno BLONDEL
MEMBRE DU CA Patrice CROSSA-RAYNAUD

PRESIDENT FONDATEUR : Dr. Lucien LEVY (†)
PRESIDENT D'HONNEUR : Gilbert BELAUBRE
SECRETAIRE GENERAL D'HONNEUR : Pr. P. LIACOPOULOS (†)

CONSEILLERS SCIENTIFIQUES :
SCIENCES DE LA MATIERE : Pr. Gilles COHEN-TANNOUDJI
SCIENCES DE LA VIE ET BIOTECHNIQUES : Pr François BEGON

SECTION DE NICE :
PRESIDENT : Doyen René DARS

SECTION DE NANCY :
PRESIDENT : Pr Pierre NABET

Janvier 2010

N°141

TABLE DES MATIERES

P. 03 Compte-rendu de la séance du mardi 12 janvier 2010
P.05 Annonces
P.08 Documents

Prochaine séance: mardi 9 février 2010 18h
MSH, salle 215-18heures :
Réflexion sur la modélisation en sciences sociales en présence de
Daniel COURGEAU Directeur de recherche émérite à l'INED

ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES
Maison des Sciences de l'Homme, Paris.

Séance du
Mardi 12 janvier 2010

Maison des Sciences de l'Homme, salle 215, à 18 h.

La séance est ouverte à 18 h. 00 sous la Présidence de Michel GONDRAN et en la présence de nos collègues Gilbert BELAUBRE, Bruno BLONDEL, Claude ELBAZ, Irène HERPELITWIN, Gérard LEVY, Jacques LEVY, Pierre MARCHAIS, Victor MASTRANGELO,

Etaient excusés : François BEGON, Alain CARDON, Gilles COHEN-TANNOUDJI, Françoise DUTHEIL, Jean -Pierre FRANCOISE, Marie-Louise LABAT, Saadi LAHLOU, Alain STAHL.

L'Ordre du jour appelle :

I) CONCLUSION SUR LE DEROULEMENT DU CONGRES
« PERSPECTIVES DES APPROCHES EXPERIMENTALES ET THEORIQUES DE L'EVOLUTION

Dans l'ensemble le congrès a été très apprécié par les intervenants et les participants pour le choix de ses thématiques et pour le contenu des interventions.

II) EXAMEN DES CANDIDATURES A L'ADHESION A L'AEIS

Trois demandes d'adhésion sont parvenues aux membres du Bureau. Après examen des CV il semble que le vote sur ces candidatures pourra avoir lieu après l'obtention de quelques informations complémentaires.

III) QUELQUES REFLEXIONS SUR LE DETERMINISME PAR NOTRE COLLEGE
Michel GONDRAN.

Notre Collègue nous propose d'abord de réfléchir sur des concepts très usités en physique classique, statistique, relativiste et quantique et qui sont cependant quelque peu flous comme celui d'action, de discernabilité des particules et de fonction d'onde. Il insiste particulièrement sur l'importance d'avoir à sa disposition des définitions pertinentes de ces mêmes concepts. Pour plus de précisions, nous vous engageons à lire en page 9 dans les documents le résumé et l'introduction de son projet d'article intitulé :

« Particules discernées et indiscernées en mécanique classique et interprétation de la mécanique quantique ».

IV) REFLEXION SUR LE CHOIX DU PROCHAIN COLLOQUE.

- Notre Collègue Gilbert BELAUBRE qui vient de relire le livre du Prix NOBEL de Physiologie en 1974, « *Singularités : Jalons sur les chemins de la vie*, [éditions Odile Jacob](#), 2005 » estime qu'il serait très intéressant de faire un congrès sur les origines de la vie, les conditions environnementales nécessaires et sur la probabilité d'émergence de la vie dans ces conditions. Cela poserait également la question du caractère déterministe de cette émergence. Pour plus de précisions, nous vous engageons à lire le document écrit par notre Collègue en page 13.
- Une autre proposition par plusieurs collègues vise l'étude des interférences entre des technologies très modernes telles que les nanotechnologies, l'informatique et la biologie et les sciences cognitives. Ces nouvelles technologies permettraient entre autres de modéliser des processus biologiques ou de sciences cognitives.
- Une autre proposition est relative à l'étude de l'évolution des sciences et des techniques avec une modélisation.
- Une dernière proposition concerne la modélisation en sciences humaines qui comporterait entre autres quels sont les paramètres pertinents. A ce propos, notre Président Michel GONDRAN insiste sur l'importance de disposer, comme c'est le cas en sciences physiques, de définitions rigoureuses à l'instar de savants comme Euclide, Spinoza et Newton...

Après quoi, la séance est levée à 20heures,

Bien amicalement à vous,

Irène HERPE-LITWIN

Annances

Notre Collègue, Marie-Louise LABAT nous informe de la tenue d'un colloque en mai 2010 sur la conscience organisé par la fondation IPSEN:

COLLOQUES MÉDECINE ET RECHERCHE

NEUROSCIENCES

Définir la conscience : de la cognition à la clinique

Paris – May 3, 2010

Caractériser les architectures computationnelles et les mécanismes neurobiologiques de la conscience est l'un des grands problèmes actuels en neurosciences cognitives. Diverses avancées dans les paradigmes cognitifs, les techniques d'imagerie, et les théories neurobiologiques l'ont ouvert à l'expérimentation. Cependant, un défi demeure: les théories et les paradigmes actuels suffiront-ils à aider le clinicien confronté aux patients comateux ou en état végétatif? Permettront-ils de définir de nouveaux outils diagnostics, voire thérapeutiques?

Dans ce colloque organisé par la Fondation Ipsen, treize scientifiques renommés confronteront leurs points de vue sur la recherche sur la conscience: est-elle mûre pour des applications cognitives et cliniques? Au niveau cognitif, des paradigmes tels que le masquage ou la rivalité binoculaire, couplés à des mesures quantitatives de l'introspection, permettent d'évaluer la profondeur des opérations subliminales et le point de départ de l'accès à la conscience. L'imagerie cérébrale, à l'aide notamment d'outils d'analyse tels que la classification multivariée, ouvre une fenêtre sur l'état cérébral conscient. Un état coordonné d'activité, qui émerge relativement tard après la présentation d'un stimulus et implique des régions cardinales des cortex préfrontal et pariétal, est fréquemment associé à la perception consciente. Des réseaux globaux similaires apparaissent spontanément dans l'état de veille, bien que la spécificité de leur association avec l'expérience consciente reste débattue. La plupart de ces résultats empiriques sont compatibles avec la théorie de l'espace de travail neuronal global, qui associe l'expérience consciente avec la décharge synchrone d'un ensemble distribué de neurones à axones longs, qui distribuent globalement l'information perçue et permettent donc de la rapporter verbalement ou non.

Il est aujourd'hui possible d'étudier l'état de conscience chez le primate non-humain. Au niveau électrophysiologique, la synchronisation de réseaux neuronaux est mieux comprise et améliore la communication cérébrale globale. De nouveaux paradigmes examinent les capacités 'méta-cognitives' des animaux, telles que l'auto-évaluation de leur compétence, et les réseaux neuronaux sous-jacents.

En direction de la clinique, l'imagerie cérébrale dans l'état de repos ou dans des paradigmes expérimentaux bien définis commence à répondre à trois questions fondamentales: ce patient est-il conscient? Recouvrera-t-il bientôt la conscience? Et si oui, avec quelles compétences cognitives résiduelles? La simulation cérébrale corticale ou profonde induit des altérations de l'état de conscience et pourrait même améliorer la capacité de communication chez certains patients dits 'minimalement conscients'. Ces premières applications laissent augurer, dans un futur proche, des avancées concrètes en clinique.

Programme

Comité Scientifique : Stanislas Dehaene (*Unité INSERM-CEA de Neuro-Imagerie Cognitive, Gif-sur-Yvette, France*) Yves Christen (*Fondation IPSEN, Paris, France*)

8:00 am *Registration:* (New) Centre de Conférences et de Réceptions Etoile St-Honoré 21-25, rue Balzac - 75008 Paris

8:30 am Stanislas Dehaene and Yves Christen: Welcoming remarks

8:45 am Herbert S. Terrace (*Columbia University, New York, USA*) Becoming human: why two minds are better than one

9:15 am Michael N. Shadlen (*University of Washington, Seattle, USA*) The neurobiology of decision making: A window on consciousness

9:45 am Christof Koch (*California Institute of Technology, Pasadena, USA*) On the difference between attention and consciousness

10:15 am Posters and Coffee-break

10:45 am Pascal Fries (*Radboud University Nijmegen, Nijmegen, The Netherlands*) Brain-wide synchronization subserves attentional selection

11:15 am Jean-Pierre Changeux, Stanislas Dehaene and Lionel Naccache The global neuronal workspace hypothesis:

Jean-Pierre Changeux (*Collège de France et Institut Pasteur, Paris, France*) The original proposal and its neuroanatomical basis

Stanislas Dehaene (*Unité INSERM-CEA de Neuro-Imagerie Cognitive, Gif-sur-Yvette, France*) Imaging workspace ignition

Lionel Naccache (*Institut du Cerveau et de la Moelle Epinière, CHU Pitié-Salpêtrière, Paris, France*) Clinical applications

12:15 pm Posters and Lunch

1:45 pm John-Dylan Haynes (*Charité-Universitätsmedizin, Berlin, Germany*) Title to be provided

2:15 pm Mathias Pessiglione (*Inserm U610, CHU Pitié-Salpêtrière, Paris, France*) Subliminal motivation of the human brain

2:45 pm Angela Sirigu (*Institut des Sciences Cognitives, Bron, France*) Neural basis of motor intention

3:15 pm Posters and Coffee-break

3:45 pm Marcus Raichle (*Washington University School of Medicine, St Louis, USA*) Intrinsic activity, slow cortical potentials and consciousness

4:15 pm Steven Laureys (*Université de Liège, Liège, Belgium*) Revelations from the unconscious: studying the brain coma and related states

4:45 pm Adrian Owen (*University of Cambridge, Cambridge, UK*) When thoughts become actions: imaging disorders of consciousness

5:15 pm Conclusion

INFORMATION

| | |
|---|--|
| <p><i>Secrétariat d'organisation</i> Fondation IPSEN Sonia Le Cornec Email: sonia.le.cornec@ipsen.com 65, quai Georges Gorse 92650 Boulogne-Billancourt cedex Tél. : 33 (0)1 55 30 50 00 Fax : 33 (0)1 55 30 50 01</p> | <p><i>Lieu :</i> Centre de Conférences et de Réceptions Etoile St- Honoré 21-25 rue Balzac 75008 Paris Parking public Etoile Friedland à 150 mètres Métro : Charles de Gaulle Etoile (lignes 1, 2 et 6) et RER A</p> |
| <p>Characterizing Consciousness: From Cognition to the Clinic Paris – May 3, 2010 Family name / <i>Nom</i> First name / <i>Prénom</i>..... Speciality / <i>Spécialité</i>..... Department or Unit / <i>Service ou Laboratoire</i>..... Affiliation / <i>Affiliation (Hôpital, Inserm, CNRS, etc)</i>..... Street / <i>N° et</i> <i>Rue</i>..... Area code / <i>Code postal</i>..... City / <i>Ville</i>..... Country / <i>Pays</i>..... Telephone / <i>Téléphone</i> Fax / <i>Télécopie</i> E-mail..... Date..... Signature :</p> | <p><i>Inscription au Colloque</i> 70 € before March 15, 2010 100 € after March 15, 2010</p> <p><i>Comprenant déjeuner, pauses-café, dossier du participant, livre des communications.</i></p> <p>Free for students but registration is compulsory and should be completed before April 15, 2010. Student / <i>Étudiant</i> Payment /</p> <p><i>Mode de règlement</i></p> <p><i>Chèque à l'ordre de la Fondation IPSEN.</i></p> |
| <p><i>À retourner avec les droits d'inscription à la Fondation IPSEN</i></p> | |

Documents

Pour illustrer la conférence de notre Président Michel GONDRAN sur le problème de l'indiscernabilité des particules nous vous proposons ::

p. 9 :« PARTICULES DISCERNEES ET INDISCERNEES EN MECANIQUE CLASSIQUE ET INTERPRETATION EN DE LA MECA NIQUE QUANTIQUE » Introduction d'un article à paraître par Michel GONDRAN et Alexandre GONDRAN

P.11 une réflexion de notre Collègue Claude ELBAZ sur le PRINCIPE DE MOINDRE ACTION

Pour étayer la proposition de recherche sur les origines de la vie, nous vous proposons un article de notre Collègue Gilbert BELAUBRE :

P.13 : « LA PROBABILITE D'APPARITION DE LA VIE»

Pour présenter les travaux de Daniel COURGEAU, Directeur de Recherches à l'INED, nous vous présentons un article épistémologique sur l'application des lois de probabilité en démographie et sciences sociales paru en 2004 dans , *Math. & Sci. hum. / Mathematics and Social Sciences* (42e année, n° 167, 2004(3), p. 27-50)

P.18 « PROBABILITÉS, DEMOGRAPHIE ET SCIENCES SOCIALES »
Par Daniel COURGEAU

P. 32 « METHOLOGICAL PROSPECTS in the SOCIAL SCIENCES » de Daniel COURGEAU paru dans METHODOS SERIES chez Springer.

Particules discernées et indiscernées en mécanique classique et interprétation de la mécanique quantique

Michel Gondran *

University Paris Dauphine, Lamsade, 75 016 Paris, France

Alexandre Gondran

Ecole Nationale de l'Aviation Civile, 31000 Toulouse, France

Abstract

Nous introduisons les concepts de particule discernée et indiscernée en mécanique classique. Les particules indiscernées donnent une solution très simple du paradoxe de Gibbs et correspondent à une action et une densité qui vérifient les équations statistiques d'Hamilton-Jacobi. Les particules discernées correspondent à une action particulière qui vérifie les équations ponctuelles d'Hamilton-Jacobi. Nous étudions alors la convergence de la mécanique quantique vers la mécanique classique, lorsque l'on fait tendre mathématiquement la constante de Planck \hbar vers 0, pour deux exemples représentant deux cas généraux: le premier cas correspond à la convergence vers des particules classiques indiscernées vérifiant les équations statistiques d'Hamilton-Jacobi; le second cas correspond à la convergence vers une particule classique discernée vérifiant les équations ponctuelles d'Hamilton-Jacobi. En fonction de ces convergences nous proposons une interprétation renouvelée de la mécanique quantique.¹

I. INTRODUCTION

La notion d'indiscernabilité si importante en mécanique quantique et en physique statistique, n'est pas bien définie dans la littérature. Dans son hommage à Einstein lors du centenaire de sa naissance en 1979, Alfred Kastler rappelait que déjà en 1924 " la distinction entre entités discernables et entités non discernables et la différence de comportement statistique entre ces deux types d'entités étaient restées une chose obscure ". Et il poursuit: " Boltzmann avait traité ces "molécules" comme des entités discernables, ce qui l'avait conduit à la statistique dite de Boltzmann. Planck, au contraire, avait traité implicitement les "éléments d'énergie" qu'il avait introduits comme des particules indiscernables, ce qui l'avait conduit à un décompte de probabilité W d'un état macroscopique différent de celui de Boltzmann. En 1909, Einstein devait, à juste titre, critiquer ce manque de rigueur."

La définition actuelle est toujours aussi floue: "les particules indiscernables sont des particules identiques qui ne peuvent être différenciées l'une de l'autre, même en principe. Ce concept prend tout son sens en mécanique quantique, où les particules n'ont pas de trajectoire bien définie qui permettrait de les distinguer l'une de l'autre."²

Lorsque la définition devient précise comme "en mécanique classique, deux particules dans un système sont toujours discernables" et " en mécanique quantique, deux particules identiques sont indiscernables "³ p.328-329, elle entraîne des paradoxes, comme le paradoxe de Gibbs.

En donnant une définition précise de la discernabilité et de l'indiscernabilité en mécanique classique nous allons montrer comment sortir des ambiguïtés et des paradoxes. Nous verrons ensuite comment ces définitions entraînent la nécessité de l'interprétation de Broglie-Bohm pour les particules libres de la mécanique quantique. Dans cet article, nous nous restreignons au cas d'une particule unique ou d'un ensemble de particules identiques sans interaction entre elles et préparées de la même façon. Le cas d'un ensemble de particules identiques en interaction et du théorème spin-statistique est étudié dans un article ultérieur.⁴

Au paragraphe 2 nous introduisons les concepts de particule discernée et indiscernée en mécanique classique. Les particules indiscernées donnent une solution très simple du paradoxe de Gibbs et correspondent à une action et une densité qui vérifient les équations statistiques d'Hamilton-Jacobi. Les particules discernées correspondent à une action particulière qui vérifie les équations ponctuelles d'Hamilton-Jacobi.

Aux paragraphes 3 et 4, nous étudions la convergence de la mécanique quantique vers la mécanique classique, lorsque l'on fait tendre mathématiquement la constante de Planck \hbar vers 0, pour deux exemples représentant deux cas généraux: le premier cas correspond à la convergence vers des particules classiques indiscernées vérifiant les équations statistiques d'Hamilton-Jacobi; le second cas correspond à la

¹ A. Kastler, "Le photon d'Einstein", dans Einstein 1879-1955, Colloque du centenaire, Editions du CNRS, Paris, 1980.

² Wikipedia,

³ J. L. Basdevant et J. Dalibard, Mécanique Quantique, Les Editions de l'Ecole Polytechnique, Ellipses, 2005.

⁴ M. Gondran, and A. Gondran, "Une interprétation possible du théorème spin-statistique", en préparation.

convergence vers une particule classique discernée vérifiant les équations ponctuelles d'Hamilton-Jacobi. En fonction de ces convergences nous proposons une interprétation renouvelée de la mécanique quantique.

II. PARTICULES DISCERNÉES ET INDISCERNÉES

Définition 1 - Une particule classique est dite potentiellement *discernée* si on connaît, à l'instant initial, sa position initiale x_0 et sa vitesse initiale v_0 .

Notons que lorsque l'on parle d'une particule classique, nous faisons un abus de langage; nous devrions dire une particule étudiée dans le cadre de la mécanique classique.

Considérons maintenant une particule d'un faisceau de particules classiques identiques issues d'un canon de particules comme les canons à électrons, à atomes, à CO_2 ou à C_{60} . Au niveau très macroscopique, on peut considérer un canon à balles de tennis.

Pour une telle particule, on ne connaît, à l'instant initial, que la densité de probabilité $\rho_0(\mathbf{x})$ et le champ de vitesse initial $\mathbf{v}(\mathbf{x})$ par l'intermédiaire d'une action initiale $S_0(\mathbf{x})$; cette action est connue à une constante près à partir de l'équation

$$v_0(\mathbf{x}) = \nabla S_0(\mathbf{x})/m$$

où m est la masse des particules. On est alors conduit à la définition suivante:

Définition 2 - Une particule classique est dite potentiellement *indiscernée* si on ne connaît, à l'instant initial, que la densité $\rho_0(\mathbf{x})$ de sa position initiale ainsi que l'action initiale $S_0(\mathbf{x})$.

La notion de potentielle indiscernabilité que nous introduisons est donc intrinsèque à une particule. Elle en précise les conditions initiales, c'est à dire le mode de préparation de ladite particule. C'est une indiscernabilité sur la position de départ de la particule.

Nous nous intéressons dans cet article au cas de N particules identiques préparées de la même façon avec chacune la même densité initiale $\rho_0(\mathbf{x})$ et la même action initiale $S_0(\mathbf{x})$, soumises au même champ de potentiel $V(\mathbf{x})$ et qui vont avoir des comportements indépendants. C'est en particulier le cas de particules classiques identiques sans interaction entre elles et préparées de la même manière, comme par exemple un jet de fullerenes C_{60} ou de molécules neutres.

C'est encore le cas de particules classiques identiques comme des électrons, préparées de la même manière et qui, bien que pouvant entrer en interaction, vont avoir cependant des comportements indépendants car elles sont générées une à une dans le système.

Le cas général d'un ensemble de particules identiques non préparées de la même façon et en interaction est étudié dans un article ultérieur.⁴ Nous verrons qu'il s'y ajoute une indiscernabilité supplémentaire liée aux interactions.

Définition 3 - N particules classiques identiques préparées de la même façon avec chacune la même densité initiale $\rho_0(\mathbf{x})$ et la même action initiale $S_0(\mathbf{x})$, et soumises au même champ de potentiel $V(\mathbf{x})$ sont dites *indiscernées*.

Nous avons appelé ces particules indiscernées, et non indiscernables, car si on connaissait leurs positions initiales, on connaîtrait aussi leurs trajectoires. Cependant elles auront dans les dénombrements les mêmes propriétés que l'on accorde habituellement aux particules indiscernables.

Ainsi, si on tire au hasard dans la densité initiale $\rho_0(\mathbf{x})$ N particules identiques, les $N!$ permutations de ces N particules sont strictement équivalentes et ne correspondent, comme pour les particules indiscernables, qu'à une seule configuration.

On en déduit que, si X est l'espace des coordonnées d'un système d'une particule indiscernée, le vrai espace de configuration d'un système de N particules indiscernées n'est pas le produit cartésien X^N , mais l'espace obtenu par identification des points de X^N représentant la même configuration, c'est-à-dire l'espace X^N/S_N quotient de X^N par le groupe symétrique S_N .

Ce résultat est en accord avec la définition des particules indiscernables qui nous paraît la plus raisonnable:⁵ *On dit que des particules sont indiscernables quand les propriétés physiques d'un système qui en contient plusieurs sont invariantes sous l'échange de plusieurs d'entre elles.*

⁵ R. Taillet, L. Villain and P. Felvre, Dictionnaire de physique, de Boeck, Bruxelles, 2008.

Moindre action.

Réflexion de notre Collègue Claude ELBAZ

En prolongement de l'exposé de Michel Gondran sur « le principe de moindre action en mécanique quantique et le déterminisme » j'ai pensé qu'il se situait dans le contexte plus général, soit du *Principe général d'économie : chemin minimum*, selon les termes que l'on trouve dans wikipédia, soit encore, *Le Principe variationnel*, d'application générale en physique, soit *Le Principe d'optimisation*, etc.....

J'en ai discuté avec Gérard Lévy, qui a effectué des travaux très intéressants à ce sujet. Il m'a suggéré que, en mathématique, on pourrait demander un exposé à Roger Temam, (que vous aviez rencontré) qui a publié avec Ekeland sur ce sujet, (Ekeland : *Le meilleur des mondes possibles*, Le Seuil).

Par exemple, avec le GPS, le principe de Fermat trouve ses applications dans l'optimisation de chemins : chemin le plus court ? le plus rapide, le plus économe en essence ?,

Mais cette thématique est d'application dans les domaines de la biologie, l'urbanisme, l'écologie, l'économie etc...

A titre d'illustration, voici quelques éléments qui font le lien avec le programme d'Einstein, qui m'a toujours interpellé et intéressé.

Le constat expérimental.

En 1650, Fermat avait commencé par énoncer que *la lumière se propage d'un point à un autre sur des trajectoires telles que la durée du parcours soit minimale*, en le considérant comme un Principe d'économie naturelle.

Un siècle plus tard, en 1744, Maupertuis l'avait étendu à la matière avec le principe de moindre action. Avec Euler Lagrange, Jacobi, Helmholtz, il devint le principe de conservation de l'énergie : *Lorsqu'il arrive quelque changement dans la nature, la quantité d'action nécessaire pour ce changement est la plus petite possible.*

Le principe de moindre action, peut servir de base fondamentale pour formuler les équations de la mécanique classique non relativiste, en équivalence avec le principe de Newton. Mais il s'étend aussi à la mécanique relativiste, et aux théories quantiques des champs.

Il énonce que, *pour aller d'un point à un autre, la matière suit la trajectoire dont l'action est extrême : elle est maximum ou minimum, mais sa variation est nulle. Du point de vue mathématique, cela se traduit par le fait que, parmi toutes les trajectoires possibles, seule une trajectoire optimale est retenue.*

Un questionnement métaphysique.

Un tel comportement n'a pas manqué d'intriguer. Comment la matière pouvait-elle avoir, d'abord, la connaissance de tout son environnement, pour être ensuite en mesure de choisir, parmi tous les chemins possible, le chemin optimum, et ensuite comment fait-elle pour être en mesure de le suivre? Pour Maupertuis, la réponse est d'ordre métaphysique : « le principe, si sage, est digne de l'Être suprême ». Pour sa part, Lagrange avait démystifié le problème : il avait démontré en 1788 que le principe de moindre action était mathématiquement équivalent au principe fondamental de la dynamique de Newton. Il ramenait donc sa cause à une loi de la nature. Mais il ne faisait que repousser le problème métaphysique, car il fallait, toujours admettre, d'une part, que la matière avait comme qualité première, d'avoir une masse stable, originelle, indestructible, inaltérée par le mouvement, et d'autre part, comme qualité seconde, d'obéir à une loi fondamentale de la nature, dont la cause profonde nous échappait. Dans son traité sur l'*Optique*, (1704) Newton avait écrit : « il me paraît très probable que Dieu forma au commencement la matière de particules solides, pesantes, dures, impénétrables, mobiles...rien n'étant capable (suivant le cours ordinaire de la Nature) de diviser ce qui a été primitivement uni par Dieu même...Pour que l'ordre des choses puisse être constant, l'altération des corps ne doit donc consister qu'en séparations, nouvelles combinaisons, et mouvements de particules.... » [18]

Il faut reconnaître que le problème de la stabilité de la masse des particules matérielles, comme les électrons, créées très peu de temps après le Big Bang, reste toujours posé. Il s'est même aggravé depuis la découverte de l'équivalence de la masse avec l'énergie. Il a constitué le noyau des interrogations et de l'insatisfaction d'Einstein, et l'une des questions principales de son programme.

Il est certain qu'en faisant du champ le concept de base de la physique, pour en déduire à la fois la matière et les interactions, le programme d'Einstein admet également un fondement tout aussi arbitraire. Il présente cependant un triple mérite :

-il est en phase avec l'évolution technologique, qu'il devance même, et où des dispositifs électromagnétiques et informatiques remplacent progressivement, et avec de nombreux avantages, les moyens matériels traditionnels.

-il réduit les données de base en faisant dériver les propriétés de la matière de celles du champ. Il va dans le sens d'une unification, et d'une simplification de la physique, en prolongement de l'évolution qui a progressivement unifié le magnétisme avec l'électricité dans l'électromagnétisme, puis avec l'optique, puis avec la mécanique, structurellement dans le cadre de la relativité, etc.

-il propose une approche plus compréhensible du comportement de la matière, en rendant plus accessibles des propriétés expérimentales décrites par des équations mathématiques souvent abstraites.

La probabilité de l'apparition de la vie

*Notes et réflexions sur l'ouvrage de Christian de Duve « Singularités.
Jalons sur les chemins de la vie » (Odile Jacob 2005)*

Gilbert Belaubre.

L'opinion scientifique au 20^{ème} siècle sur la probabilité d'apparition de la vie

La probabilité de l'apparition de la vie fait l'objet de calculs visant à apprécier les probabilités d'apparition des événements successifs qui conduisent de la matière minérale à la matière organique puis aux arrangements successifs qui ont pu donner les séries supposées d'enchaînements conduisant à l'individuation cellulaire. A partir de la cellule, il est possible de considérer, d'un point de vue méthodologique, les développements qui conduisent à l'arborescence de l'évolution comme un domaine d'étude distinct. Toutefois, si l'on pousse le questionnement sur la vie jusqu'à l'apparition de la conscience, voire de la pensée, la question de la plausibilité de ces événements se pose également.

Les évaluations classiques concernant l'apparition d'une première cellule vivante, qui est généralement considérée comme l'ancêtre commun à tous les organismes vivant sur la Terre s'accordent sur une probabilité composée tellement infinitésimale que notre raison devrait conclure que la vie n'existe pas. Car c'est une des grandes idées développée particulièrement par Borel, qu'une probabilité qui est, soit extrêmement faible, soit très proche de 1 équivaut à une certitude soit de non existence, soit d'existence.

Or, la vie existe, et nous sommes donc dans un contexte où nous jugeons cette survenue comme tellement imprévisible que nous devons nous persuader qu'il s'agit d'un événement unique et qu'il est illusoire d'imaginer qu'il puisse se présenter une deuxième fois dans l'espace et la durée de l'univers.

En revanche, nous nous accordons à considérer que la vie a fait preuve sur la Terre d'une résistance phénoménale qui lui a permis non seulement de persister et de se développer, mais encore d'adopter une immense variété dans ses modalités de développement. Ce constat peut apporter une perplexité, aussi forte mais en sens inverse, que celle de l'apparition d'une unique cellule ancestrale.

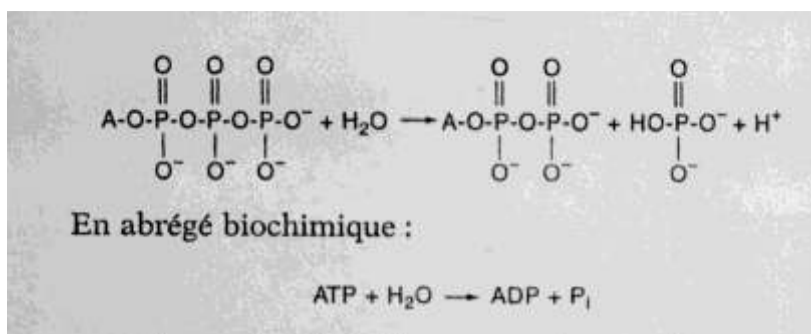
Apparition d'un franc-tireur, peut-être débordé par sa théorie.

Christian de Duve, Prix Nobel de Biologie et Médecine pour sa découverte de deux organes concourant au métabolisme cellulaire a produit, en 2005, un ouvrage de synthèse sur ce sujet dans lequel il propose un schéma de développement des constructions moléculaires qui jalonnent l'apparition de la vie. Ce schéma est strictement commandé par les mécanismes de la chimie, y compris les catalyses qui y jouent un rôle majeur.

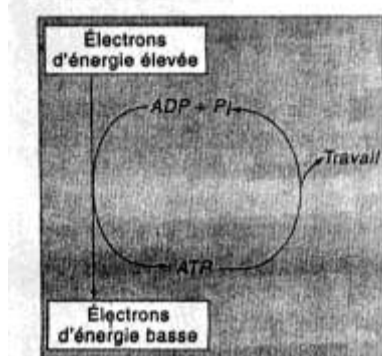
Son analyse des phénomènes se présente généralement à trois niveaux : celui, classique, des groupements atomiques formant la structure des molécules ; une présentation condensée symbolisant les radicaux moléculaires par leur acronyme ; enfin, celui du schéma électronique qui explique la transformation. La réflexion sur l'intensité du couplage électronique dans une association moléculaire, lorsqu'il s'agit de molécules très complexes, est du plus haut intérêt car il commande la stabilité et la résistance de ces associations.

Après un premier chapitre où, comme par bravade, il positionne son interprétation du mécanisme global comme le plus pertinent, -je reviendrai sur cette classification très intéressante -, l'auteur aborde l'étude de la chimie de la vie par celle du radical qui joue, et de loin, le rôle primordial, l'ion phosphate . Les trois molécules adénosine mono- di- et triphosphate sont le résultat des associations et dissociations qui procurent aux molécules en présence l'énergie nécessaire au développement biologique. L'ion phosphate est le moteur de la vie.

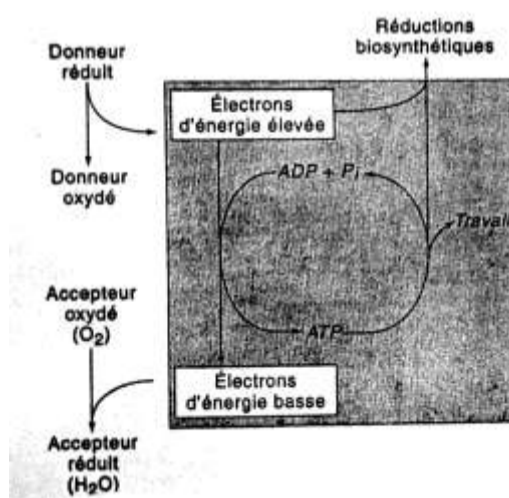
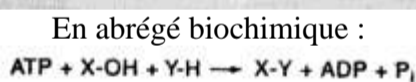
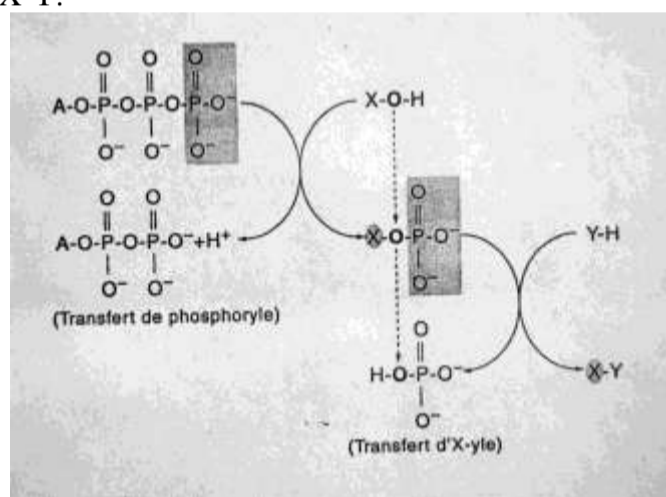
Selon la troisième présentation évoquée ci-dessus, les divers événements chimiques mettant en jeu l'ion phosphate sont provoqués par le changement d'état énergétique d'un ou de deux électrons. C'est ainsi que le passage de l'adénosine monophosphate AMP au di ou triphosphate ADP, ATP exige un apport d'énergie, souvent fourni par le milieu ambiant. En revanche, l'énergie libérée par la dissociation d'un ion phosphate et la formation d'une molécule de phosphate inorganique est la source d'énergie chimique la plus généralement à l'œuvre dans les réactions biologiques, selon les schémas ci-après empruntés à de Duve.



L'hydrolyse de la liaison pyrophosphate terminale de l'ATP est la source d'énergie fondamentale par changement d'état énergétique d'un électron comme figuré dans le schéma ci-après :



Transfert de groupe séquentiel dépendant d'un transfert de pyrophosphoryle. Cette réaction conduit à la production de la molécule X-Y.



Le schéma électronique ci-dessus correspond à la production d'énergie par émission d'électron dans l'oxydo-réduction qui conduit finalement à la production de la molécule X-Y.

L'enchaînement des molécules nucléotidiques dans les ARN, les protéines et les ADN est fondé sur un processus tout à fait analogue, très souvent strictement identique.

Sur ces bases fondamentales, de Duvé construit un déterminisme chimique qui va du prébiotique à la cellule vivante. En regardant de plus près comment ces enchaînements peuvent être aussi précis et robustes, on constate que les enzymes et d'autres molécules y jouent un rôle majeur de catalyseurs. Bien entendu, ces catalyseurs ne défont pas les lois de la thermodynamique. Mais c'est sans doute l'insuffisance de prise

en compte de ces « facilitateurs » chimiques qui a souvent conduit les biologistes sur la voie sans issue où ils attendent l'avènement de lois spécifiques de la biologie.

L'ouvrage de de Duve est donc une des meilleures synthèses de l'activité biologique.

Au-delà de cette synthèse, et dans la rigueur de sa présentation déterministe, de Duve pose la question : qu'est-ce qui est singulier dans l'apparition et le développement de la vie ? Sa réponse, nous le verrons, est dans l'agencement favorable des conditions initiales. Toutefois, il accepte, sous différentes variantes qu'il analyse avec profondeur, des cas d'évènements produits par des concours de circonstances (disons par hasard) et qui entraînent un choix quasi-irréversible (par exemple la chiralité des molécules dissymétriques presque exclusivement lévogyres).

Réflexions sur les deux points forts de Duve : le déterminisme et les conditions initiales.

Je ne veux pas évoquer tous ces aspects fascinants de cette œuvre, mais je désire en reprendre certains points pour exprimer les réflexions qu'ils ont pu m'inspirer.

Je me bornerai donc à trois questions cruciales :

1 – Le déterminisme moléculaire. Qu'en est-il à l'échelle d'espace et de temps de la molécule ?

Cette question a deux aspects : concentration et proximité de la « bonne » molécule

2 – Comment la présence simultanée de la variété d'éléments, dans des concentrations convenables et dans un milieu aqueux s'est-elle produite ? Est-ce là l'origine possible d'un nouveau paradigme sur l'apparition de la vie ?

3 – Si ce paradigme s'impose, quelles sont les conséquences possibles sur notre vision de la pluralité des vies extraterrestres... Et sur l'unicité de l'ancêtre commun ?

Première question : le déterminisme chimique comme hypothèse suffisante de l'apparition de la vie
Pour situer cette question dans sa problématique générale, je donne ci-après le classement selon de Duve des diverses approches possibles de la question :

De DUVE qualifie les diverses approches « Mécanismes de la singularité ». Par singularité, il faut entendre l'ensemble des conditions très particulières qui ont permis l'enclenchement du processus. Par mécanisme, il faut entendre la représentation que nous nous faisons de ce processus.

Par ordre de pertinence décroissante :

Apparitions ont pu se rencontrer, se répandre, éventuellement se fusionner

Les sept mécanismes de la singularité

1 – *Nécessité déterministe* : à partir des conditions initiales qui favorisent l'enclenchement du processus, tous les stades de ce processus sont commandés par les lois naturelles de la physique et de la chimie. Cette obéissance est nécessaire et suffisante. De Duve note au passage que l'invocation de phénomènes quantiques incluant un « indéterminisme fondamental » (Cf. Penrose, Eccles...) est hors de propos.

2 – *Goulet sélectif* : il s'agit de situations dans lesquelles l'environnement joue un rôle sélectif, à quelque niveau que ce soit (pour les espèces, la sélection darwinienne). Quand plusieurs formes variantes apparaissent, la probabilité pour que l'une d'elles soit offerte à la sélection dépend du nombre de ses apparitions et de sa probabilité « p » d'apparition. Pour n occurrences, la probabilité de non apparition est $(1 - p)^n$, et la probabilité d'apparition est $1 - (1 - p)^n$. Il est clair que, si faible que soit p, cette formule donne la valeur de n pour laquelle la variante considérée est offerte à la sélection avec une « certitude pratique » (terme de Borel).

3 – *Goulet restreint* : Il s'agit du résultat de facteurs internes qui limitent progressivement les possibilités d'évolution. Les morphogénèses sont très largement conditionnées par ces choix directionnels.

4 – *Pseudo-goulet* : Lorsque plusieurs voies d'évolution sont en compétition, des *contingences historiques conduisent à l'extinction de toutes les voies sauf l'une d'elles*.

5 – *Accident gelé* : Situation dans laquelle, au cours de l'évolution, une alternative se présente, et qu'un choix irréversible est le résultat d'un concours local de circonstances (en général, on parle de hasard). On peut interpréter ainsi le choix de la chiralité lévogyre.

6 – *Coup de chance extraordinaire* : la singularité est ici l'apparition d'un événement hautement improbable, qui n'a dès lors aucune « chance pratique » de se renouveler où et quand que ce soit. Cette conception de l'apparition de la vie est encore assez largement adoptée.

7 – *Le dessein intelligent* : p. m.

De Duve justifie son choix du déterminisme par la conviction que les seuls phénomènes chimiques suffisent à expliquer la vie, et que, dès lors que les conditions initiales sont réunies, la vie doit inévitablement en surgir.

A l'appui de cette idée forte, il rappelle deux ordres de constats :

- Les expériences de Miller et Urey qui, en 1953, en faisant des hypothèses sur les conditions initiales d'apparition des molécules fondamentales du monde vivant, voient apparaître spontanément ces molécules dans leur expérience.
- La découverte, dans les matériaux tombés du ciel, de molécules organiques identiques à celles qui sont à la base du vivant sur terre. On peut épiloguer, dans ce dernier cas, sur l'éventuelle unicité d'origine de ces molécules et des molécules terrestres. On pourrait aussi espérer, pour pouvoir en inférer l'existence de vies extraterrestres, trouver des structures complexes bâties avec d'autres « briques fondamentales » que celle de la Terre. Duve pose ces questions et sa réponse est la suivante : qu'est-ce qui est singulier, sinon la conjonction d'un ensemble de conditions initiales, puisqu'à partir d'elles, tout peut être expliqué par le déterminisme chimique.

Ici, je me pose deux questions :

1 – concernant l'hypothèse du déterminisme : pour que l'assemblage sans faille des diverses briques, et sa poursuite dans une complexité croissante, se produise, il faut que, pour opérer la construction chimique, les deux bonnes briques à unir soient présentes ensemble et à proximité suffisante pour que l'activité chimique se produise.. N'est-ce pas miraculeux ?

2 – Concernant la singularité des conditions initiales : quelles sont ces conditions ? Peuvent-elles se présenter ailleurs dans l'univers ? Cette question, de Duve se la pose. Une autre question, qu'il ne pose pas, est celle de l'unicité de cette occurrence sur terre.

A réfléchir sur la première question, j'en viens à me poser la question : ne devrait-on pas poser cette question des rencontres moléculaires à l'échelle de temps et d'espace de la molécule ? Les molécules baignent dans un « chaos moléculaire », en milieu aqueux. Dans ce milieu, les molécules ont une énergie cinétique de la forme kT . Elles sont donc soumises à un mouvement brownien (formulé mathématiquement par Einstein). Suivons le parcours de deux molécules A et B qui produiront l'assemblage AB. Chacune suit un parcours erratique. Quelques microsecondes, voire nanosecondes s'écoulent entre deux chocs. Parfois, un temps beaucoup plus long, jusqu'à des millisecondes... c'est comme si, à notre échelle qui est celle de la seconde (pour fixer les idées), nous mettions près de deux jours pour rencontrer quelque chose ou quelqu'un. (si la molécule a une durée de parcours d'une seconde, cela correspond à trente ans dans notre échelle de temps). Donc nos molécules vont et viennent. Elles peuvent rencontrer des molécules C ou D pour lesquelles elles ont une certaine affinité, et s'y assemblent. Mais il s'agit d'une liaison éphémère qui ne résiste pas à l'épreuve d'un choc ultérieur. Et voici qu'au bout d'une très longue pérégrination, peut-être plusieurs dizaines de millisecondes, A rencontre B, et cette liaison est forte et elle perdure. Pour A et B, au terme de ce parcours essentiellement aléatoire, elles ont fini par se rencontrer. Pour nous, observateurs humains, B et A se sont instantanément unies par le déterminisme chimique.

Je ne conteste pas ce déterminisme. J'exprime l'idée que, dans le milieu moléculaire, il faut le hasard des rencontres pour qu'il se produise.

Dès lors, dans l'échelle de temps et d'espace des molécules, si les paramètres qui caractérisent le milieu subissent des variations sans grande ampleur, on peut conjecturer que les parcours moléculaires en seront affectés dans leur durée mais pas dans leur résultat final : l'aléa finira par rencontrer le déterminisme chimique. Et cette vision apporte une capacité de robustesse à l'événement chimique, que le seul déterminisme ne peut pas revendiquer. S'il en est ainsi, les divers paramètres de ces rencontres (concentrations, température, viscosité, force gravitationnelle, magnétisme terrestre, etc) ne nécessitent pas forcément un ajustement très précis pour que le « déterminisme chimique » s'accomplisse.

La deuxième question est liée à celle-ci ; qu'est-ce qui est singulier ?

De Duve, considérant que le déterminisme chimique apporte une certitude de développement de la vie sous réserve que les conditions initiales soient favorables, pose la singularité au niveau des conditions initiales. Quelles sont ces conditions initiales ?

La première est un milieu aqueux. S'il n'est pas liquide dès le départ ; il doit le devenir pour que se développent les molécules de grande complexité. La réaction énergétique de base étant fondée sur des transferts d'ions phosphates, il y faut une forte présence de phosphore. Il y faut aussi tous les constituants de base des « briques » : outre l'Hydrogène, l'Oxygène et le Phosphore, le Carbone, l'Azote, le Soufre essentiellement. Cette grande variété d'éléments doit se rencontrer dans les failles volcaniques dont les remontées vont se dissoudre dans les eaux pour former la « soupe primordiale ». Ces conditions, quelles qu'elles soient, se sont trouvées réalisées sur terre. Si elles ont suffi pour assurer l'apparition de la vie sur la Terre, on peut conjecturer que, sur des planètes possédant la même origine que la Terre (quelle que soit cette origine) si les mêmes conditions apparaissent à un moment de leur histoire (quelles que soient ces conditions), alors, la même forme de vie (dans ses constituants de base, mais avec peut-être des développements différents) devrait y apparaître.

Sur ce point, de Duve est formel. Il ajoute qu'aucune connaissance de la chimie ne nous permet d'imaginer une vie fondée sur d'autres constituants de base.

En revanche, de Duve ne semble pas se poser la question, pertinente me semble-t-il, de la possibilité que ces conditions, apparues localement sur la Terre, l'aient été en de nombreux sites, simultanément ou non, et qu'elles y aient produit, ça et là, la même forme de vie. On ne peut pas écarter cette hypothèse qui modifierait le point de vue généralement adopté sur l'ancêtre commun.

Je voudrais, pour conclure, rappeler les points majeurs de la pensée de C. de Duve, en les assortissant des remarques qu'ils m'ont inspirées

1 – *Les molécules de la vie sont constituées à partir d'assemblages qui, dans la chimie, forment un ensemble unique. Nous ne savons ni ne pouvons imaginer d'autres constituants développant, dans des conditions qui leur soient favorables des enchaînements du même ordre vers une complexification aussi vaste.*

2 – *les réactions chimiques, spontanées ou aidées par des catalyseurs, ne peuvent pas ne pas se produire si les conditions physiques du milieu permettent les assemblages. Déterminisme strict d'après de Duve. Je préfère imaginer un déterminisme apparent, à notre échelle, comme résultante d'un aléa au niveau moléculaire, surtout pour des raisons de robustesse.*

3 – *s'il y a de la vie hors de la Terre, et indépendante dans son origine de la vie sur terre, elle doit procéder des mêmes assemblages de base (au moins jusqu'aux protéines et aux membranes)*

4 – *Les conditions initiales du milieu prébiotique doivent être assez bien ajustées pour permettre ces développements chimiques (surtout en termes de concentrations des divers éléments essentiels pour la formation des briques élémentaires. L'hypothèse de failles telluriques (volcanisme) alimentant des océans primordiaux est privilégiée.*

5 – *La question se pose alors de la présence à la surface de la Terre de nombreux sites qui ont pu être le siège de l'éclosion de la vie, et, dans cette hypothèse, il faudrait imaginer comment ces diverses apparitions ont pu se rencontrer, se répandre, éventuellement fusionner. Y a-t-il un seul ancêtre commun ?*

J'ajoute quelques termes d'un échange avec François Molino au sujet de la probabilité de réalisation d'événements chimiques :

François Molino : J'ai lu ton texte, qui me paraît rendre justice à de Duve, et développer un point de cinétique spatio-temporelle pertinent. Evidemment, comme j'aime à le dire à mes collègues biologistes, on manque de données! Concentrations ? Compositions ?

Quant au caractère inéluctable de la rencontre chimique, il y a un point assez drôle. Mathématiquement parlant, la probabilité de rencontre de deux marches aléatoires à 3D est nulle ! Alors qu'à 2D elle vaut 1! C'est un des arguments pour penser que la vie est apparue à des interfaces. C'est ce qu'a défendu Antoine Danchin, dont tu as sans doute entendu parler.

Cela dit, cet argument a ses limites, puisqu'il suppose que l'objet quimarche est ponctuel! Si l'argument était vrai aucune réaction chimique ne se produirait JAMAIS ! Mais il est exact que le confinement renforce les probabilités, et qu'il y a eu très vraisemblablement à l'origine de la vie une forme de confinement des composants. Dans des vésicules ?

Je crois que dès son origine la vie est SYMBIOSE, en quelque sorte : des mécanismes se rencontrent et se stabilisent ensemble (ici des vésicules spontanément formées, et des réactions de catalyses chimiques qui sont renforcées par le confinement, et qui donc, dès qu'il leur arrive d'être confinées, explosent).

En réponse (et accord sur ces réflexions)

Si, dans le modèle des rencontres à deux ou à trois dimensions, on prenait, à la place de points, des sphères correspondant à la dimension "efficace" des nuages électroniques, si on tenait compte des concentrations (donc des distances), et des vitesses, on n'aurait pas 0 ou 1, et on pourrait peut-être mieux apprécier les probabilités de rencontre et d'assemblages moléculaires. En tout état de cause, ces rencontres se produisent avec une efficacité que de Duve qualifie de déterministe. Quant à moi, je pense qu'il s'agit plutôt du schéma de représentation qui appelle la probabilité de rencontre qui devient une quasi certitude au bout d'une durée négligeable à notre échelle. Je trouve très utile la classification de Duve concernant les mécanismes de la singularité.

PROBABILITÉS, DEMOGRAPHIE ET SCIENCES SOCIALES

Daniel COURGEAU / courgeau@ined.fr

Math. & Sci. hum. / Mathematics and Social Sciences (42e année, n° 167, 2004(3), p. 27-50)

1 Article reçu le 5 mai 2004, révisé le 2 juillet 2004 ; accepté le 28 juillet 2004.

2 Institut national d'études démographiques, 133 bd Davout Paris 75980 cedex 20

RÉSUMÉ — *Cet article replace les diverses notions de probabilité, apparues dès le XVIIe siècle, dans le développement simultané des sciences sociales. Si l'approche objectiviste, pour laquelle la probabilité est la fréquence limite atteinte après un nombre infini d'épreuves, a longtemps prévalu, l'approche épistémique, pour laquelle la probabilité concerne l'évaluation des degrés auxquels il est raisonnable de croire en la vérité de propositions, semble mieux convenir pour les sciences sociales. Une présentation et une discussion de ces deux approches sont faites ici, avec de nombreux exemples d'application aux sciences sociales.*

MOTS-CLÉS — Démographie, Inférence statistique, Probabilité objectiviste, Probabilité épistémique, Sciences sociales

Le concept moderne de probabilité émerge avec les réflexions de Fermat et de Pascal, publiées à la fin de la monographie de ce dernier sur le triangle arithmétique [Pascal, 1651], en vue de résoudre le problème des partis ; la démographie, l'épidémiologie et bien d'autres sciences sociales trouvent leur origine dans l'ouvrage de Graunt [1662], qui estime, entre autres, les probabilités de mortalité par cause dans la ville de Londres, en transformant des listes d'individus en des tableaux statistiques ; la même année paraît la *Logique* de Port Royal [Arnauld et Nicole, 1662], dont les derniers chapitres sont à l'origine d'une nouvelle forme d'inférence non-déductive, l'inférence probabiliste en contexte d'incertitude. La convergence de ces dates, montre la simultanéité d'apparition de ces concepts, et nous allons voir ici les liens étroits qui se sont établis entre probabilités, démographie, sciences sociales et inférence probabiliste.

Nous avons développé dans un article précédent de cette même revue [Courgeau, 2002], l'évolution de la démographie au cours du temps. Nous n'essayerons pas ici de développer l'évolution des idées sur la probabilité au cours du temps, qui a maintenant fait l'objet de nombreux ouvrages (par exemple [Hacking, 1975, 1990 ; Krüger *et al.*, 1986; Porter, 1986; Suppes, 2002]), mais plutôt de démêler les liens qui se sont établis entre les probabilités et les sciences sociales. Cependant, avant d'aborder le thème principal de cet article, il est nécessaire d'indiquer rapidement les divers points de vue pris sur les probabilités, pour pouvoir mieux voir ensuite comment la démographie et les sciences sociales se situent par rapport à eux et les problèmes posés par l'inférence statistique considérée comme une méthode d'induction.

1. PROBABILITES : DIVERSES THEORIES

Si en mathématiques les problèmes des fondements sont résolus dès qu'une axiomatique satisfaisante a été élaborée à partir d'une logique déductive, il n'en est pas de même pour le calcul des probabilités. En effet, ce calcul est maintenant complètement axiomatisé⁶ depuis plus d'un demi-siècle [Kolmogorov, 1933], et cependant des controverses se poursuivent, sans discontinuer, sur la nature des probabilités et les possibilités d'inférences qu'elles permettent, en particulier en sciences sociales⁷. Cela vient de ce que les chercheurs, qui utilisent le calcul des probabilités, tendent à le considérer non pas comme un simple objet de calcul, mais comme la formalisation d'un mode de connaissance qu'il importe de mettre en évidence. En effet, les propriétés mathématiques des probabilités s'appliquent à de nombreuses caractéristiques, qui peuvent n'avoir aucun lien entre elles, mais seulement un parallélisme formel avec ces notions : par exemple, la distribution de la masse totale du mobilier présent dans une pièce donnée a les mêmes propriétés qu'une distribution de probabilité [Savage, 1967] mais n'est pas revêtue de la même signification. Enfin l'axiomatisation de Kolmogorov porte sur des ensembles, alors que les probabilités peuvent porter sur des propositions : il n'est pas toujours possible de considérer une proposition se référant au monde réel comme une réunion de propositions élémentaires disjointes d'un ensemble qui aurait une signification dans le cas du problème étudié [Jaynes, 2003]. Il nous faut donc d'abord cerner la nature de ces problèmes et présenter les diverses théories sur la probabilité, avant de voir leur utilisation dans le domaine des sciences sociales.

1.1 UNE APPROCHE OBJECTIVISTE: CONCEPTION FRÉQUENTISTE OU PROPENSIONISTE

Le point de vue objectiviste s'appuie sur la loi des grands nombres établie par Jacques Bernoulli⁸ [1713], qui nous indique que la valeur du rapport entre le nombre d'événements observés et le nombre

⁶ On peut dire de façon synthétique que la probabilité est une fonction numérique non négative et additive, définie sur une tribu (collection de sous-ensembles), dont la masse totale est l'unité.

⁷ sciences physiques et biologiques sont également concernées par ces controverses.

⁸ Il est intéressant de voir que Jacques Bernoulli est considéré à la fois comme un objectiviste exemplaire [von Mises, 1928] et comme le père de la première conception subjectiviste de la probabilité [Hacking, 1975].

d'individus soumis au risque, tend vers la probabilité de cet événement, lorsque la population soumise au risque, tend vers l'infini.

Il est donc possible de donner un statut objectif à la notion de probabilité, pour des événements susceptibles de se produire indéfiniment dans des conditions identiques. Les axiomes de Kolmogorov ont été conçus en fait pour servir de fondation mathématique à cette conception objectiviste des probabilités. Ils permettent cependant de définir, sans tenir compte de la façon dont les données sont recueillies, des probabilités comme des nombres associés à des ensembles et remplissant certaines règles [Shafer, 1990].

La conception fréquentiste, qui consiste à considérer la fréquence relative à laquelle un événement survient lorsque le nombre d'essais tend vers l'infini, existe depuis l'origine des probabilités. Ainsi Pascal en s'attaquant au « problème des partis » [1651] aborde une question que l'on peut considérer comme fréquentiste : comment distribuer le restant des mises lorsque la partie est soudainement interrompue. Les *Observations* de Graunt, qui sont consacrées à l'utilisation statistique des bulletins de mortalité, se placent parfaitement dans le point de vue fréquentiste. Cette approche a été reprise et développée par Venn [1866], pour prédominer pendant une grande partie du XXe siècle en particulier avec les travaux de Fisher [1925], de von Mises [1957], etc.

La conception propensioniste est apparue plus tard avec les travaux de Popper [1959, 1990]. Cette interprétation conserve l'idée que les probabilités sont des estimations portant sur des fréquences statistiques observées dans des suites longues (réelles ou virtuelles). Mais elle prend en considération le fait que ces suites sont définies par la façon dont leurs éléments sont engendrés : il en résulte que ces probabilités dépendent des conditions d'engendrement, et qu'elles peuvent changer lorsque ces conditions changent [Popper, 1990, p. 371-372]. Cette conception est particulièrement utile pour l'étude des processus stochastiques que l'on trouve dans la nature, tels que la radioactivité de certaines sources. Comme l'indique Popper, l'interprétation propensioniste est adéquate pour comprendre les théories physiques probabilistes, ainsi que les théories des jeux de hasard. Elle n'a guère été utilisée en sciences humaines.

Ce point de vue objectiviste va généralement refuser de considérer comme relevant du calcul des probabilités toute notion d'incertitude autre que celle qui joue sur l'arrivée de tels événements indéfiniment reproductibles et qui peut être vérifiée empiriquement. En particulier parler de la probabilité pour qu'une proposition donnée soit vraie n'a aucun sens pour un objectiviste, car on ne peut parler de la probabilité d'un événement par nature unique : la proposition est vraie ou fausse, en logique aristotélicienne. Popper [1990, p. 242] indique clairement que la probabilité d'une hypothèse en fonction des tests qu'elle a passés n'obéit pas aux règles du calcul des probabilités

De ce point de vue, l'inférence statistique peut permettre de tester, à partir de l'observation d'un échantillon, la validité d'une hypothèse pour la population dont est extrait l'échantillon mais pas la probabilité qu'elle soit vérifiée. Cela est possible si l'on suppose que l'échantillon observé fait partie d'un ensemble beaucoup plus vaste d'échantillons tirés au hasard dans cette même population. C'est alors sur la probabilité d'obtenir l'échantillon observé, si l'hypothèse est vraie, que l'on va raisonner, et non sur la probabilité que l'hypothèse soit vraie, qui n'a aucun sens pour un objectiviste comme nous l'avons déjà indiqué.

1.2. UNE APPROCHE ÉPISTÉMIQUE⁹ : CONCEPTION SUBJECTIVISTE OU LOGICISTE

L'approche épistémique considère que l'on peut appliquer le calcul des probabilités pour évaluer les degrés auxquels il est raisonnable de croire en la vérité de propositions. Elle va donc prendre en compte le plus grand nombre possible de sentiments d'incertitude, aussi subjectifs soient-ils, mais surtout d'origine non-fréquentielle. Dans la mesure où les axiomes de Kolmogorov ne nécessitent pas le concept de répétition pour fonder mathématiquement les probabilités -car il n'intervient qu'à titre optionnel-ces axiomes peuvent aussi bien fonder les probabilités épistémiques.

La conception subjectiviste, d'une part, va chercher à montrer que si un individu est cohérent dans ses comportements face à l'incertain, alors les degrés de probabilité qu'il attribue aux hypothèses possibles, peuvent être représentés par des nombres réels qui vérifient les axiomes du calcul des probabilités. Les différents auteurs qui ont utilisé de tels concepts considèrent la probabilité comme « une mesure du degré de crédibilité d'un événement » [Granger, 1988], compte tenu de ce qu'ils savent des autres circonstances. La probabilité devient alors une mesure du degré d'intensité de l'attente d'un individu, variable de l'un à l'autre, et non plus la propriété d'un événement comme c'était le cas chez les fréquentistes. Mais, cependant, en introduisant des contraintes rationnelles de cohérence sur les comportements individuels, on peut retomber sur des plausibilités satisfaisant aux axiomes de Kolmogorof (voir [Allais, 1953] et [Matalon, 1967] pour une discussion de la validité de ces contraintes).

Cette notion de probabilité, comme les notions objectivistes, est présente dès le début du calcul des probabilités, par exemple dans le pari de Pascal, où il applique la théorie des jeux à la croyance en Dieu. Jacques Bernouilli, dans la partie IV de *l'Art de conjecturer* [1713] revendique explicitement une conception subjectiviste de la probabilité, en introduisant la notion de degré de certitude. Elle a été développée plus récemment par des mathématiciens et des statisticiens, tels que Ramsey [1931], de

⁹ Le terme épistémique est pris ici dans le sens de « relatif à la connaissance ». Nous préférons parler ici d'approche épistémique plutôt que d'approche bayésienne, car cette dernière est souvent synonyme d'approche subjectiviste.

Finetti [1937], Savage [1954], etc. C'est à Savage que l'on doit la définition axiomatique la plus complète de ce point de vue.

Par rapport à cette conception subjectiviste, le point de vue logiciste ne se contente pas des contraintes de cohérence utilisées par les subjectivistes pour asseoir les probabilités. Ses représentants partagent bien la conception de la probabilité comme traduisant un degré de croyance, cependant ce degré ne représente pas un sentiment personnel, mais une relation logique valable pour tous. Ils proposent dès lors d'assigner des probabilités à l'aide d'une analyse logique de l'information incomplète rencontrée habituellement dans tous les problèmes d'analyse statistique. Cette nouvelle logique est différente d'une logique déductive : un énoncé de probabilité logique n'est donc pas un énoncé formulé à partir d'un fait ou d'une observation, comme l'est un énoncé de probabilité objectiviste, mais un énoncé formulé à propos de la relation logique qu'entretiennent entre eux deux énoncés [Nadeau, 1999]. Elle permet également de justifier des formes de raisonnement plus faibles que le syllogisme, telles que : si P alors N!; mais N est vrai ; alors P devient plus plausible.

À nouveau cette notion de probabilité logique existe dès le début du calcul des probabilités : Leibniz pensait déjà que le raisonnement probabiliste deviendrait une nouvelle forme de logique. Les travaux de Bayes [1763] et de Laplace sur la probabilité des causes tentent d'évaluer ce que l'on appelle aujourd'hui une probabilité inductive. Mais, après une période où l'approche objectiviste écrasa toute velléité subjectiviste ou logiciste [Hacking, 1990], il a fallu attendre les années 1920 pour que cette nouvelle logique prenne forme avec les travaux de Keynes [1921], de Jeffreys [1939], de Carnap [1950], et plus récemment de Jaynes [2003].

De ce point de vue, les énoncés de probabilité ne font plus référence au hasard ou à des variables aléatoires mais sont basés sur des principes logiques clairement définis et rendent la distinction entre théorie des probabilités et inférence statistique inutile. Ces principes logiques sont en effet des règles uniques et consistantes pour mener des inférences de tout type, lorsque toute l'information nécessaire pour mener un raisonnement n'est pas disponible. Bien entendu, lorsqu'elle l'est, le raisonnement déductif reprend sa place comme forme limite du raisonnement plausible.

Sous cette approche épistémique, l'inférence statistique, considérée comme la révision d'une probabilité à la lumière d'informations nouvelles, peut alors utiliser le théorème de Bayes [1763]. En effet, le problème abordé dans ce cas est celui de déterminer comment la probabilité d'une hypothèse *a priori* peut être modifiée par l'observation d'une expérience postérieure. On voit facilement pourquoi les fréquentistes sont amenés à rejeter cette méthode d'inférence statistique, car ils se refusent à parler de la probabilité d'une hypothèse qui est un événement unique. En revanche pour les épistémistes la notion de probabilité d'une hypothèse constitue la notion centrale du calcul des probabilités tel qu'ils le conçoivent et le théorème de Bayes leur permet d'interpréter l'inférence comme un processus de décision [Rouanet *et al.*, 1998].

2. DEMOGRAPHIE, SCIENCES SOCIALES ET POINT DE VUE PROBABILISTE

L'article précédemment publié dans cette revue [Courgeau, 2002] avait montré une évolution de la pensée démographique, qui se retrouvait, au moins en partie, dans d'autres sciences sociales, comme l'épidémiologie, la géographie humaine, les sciences de l'éducation, etc. [Courgeau, 2003]. Partant d'une approche du moment [Durkheim, 1895], passant par une approche longitudinale agrégée, toutes deux étant des holismes, puis par une approche biographique individualiste, la démographie aboutit à une approche contextuelle et multiniveau, qui permet de dépasser l'opposition entre holisme et individualisme méthodologique. Nous allons d'abord montrer comment le point de vue objectiviste a longtemps prévalu dans la plupart des sciences sociales, puis montrer ce qu'une approche bayésienne subjectiviste ou logiciste peut apporter dans ce domaine.

2.1 L'APPROCHE OBJECTIVISTE EN SCIENCES SOCIALES

Nous allons d'abord voir comment et pourquoi la démographie et les autres sciences sociales ont essentiellement utilisé une approche objectiviste tout au long de leur histoire. Nous verrons ensuite les critiques que l'on peut apporter à cette approche en les illustrant à l'aide d'un exemple.

2.1.1 L'histoire de cette approche en démographie et en sciences sociales

Comme nous l'avons déjà indiqué, dès le départ Graunt [1662] se situe dans l'approche objectiviste lorsqu'il utilise les bulletins de mortalité pour en tirer, par exemple, des fréquences de décès selon la cause. En fait les fondateurs des sciences sociales au XVIIe et au XVIIIe siècles recherchent des lois simples et universelles pour expliquer le monde des phénomènes aussi bien physiques qu'humains. Ainsi, le mémoire de Halley utilise les données de la ville de Breslau pour fournir une estimation de la mortalité du genre humain [1693] ; Kersseboom [1742] part de l'observation des décès survenus d'année en année dans les négoce pour construire une table de survie, dont il dit : «J'ai tant de preuves de la précision de cette table que j'ose la présenter comme généralement valable ». Les conditions d'une approche fréquentiste sont parfaitement vérifiées, dès lors que l'on cherche à estimer la fréquence d'un phénomène démographique, qui est posé comme universel.

Cependant, très rapidement, l'observation de nombreuses populations montra que ces probabilités étaient loin d'être universelles et qu'elles vont dépendre de caractéristiques individuelles telles que le sexe et l'âge, de caractéristiques plus générales telles que la résidence en ville ou en campagne, dans des climats nordiques ou des pays plus méridionaux, etc., et qu'elles vont varier au cours du temps. Ainsi Laplace pouvait écrire en 1812 : « Tant de causes variables influent sur la mortalité que les tables qui la représentent doivent changer suivant les lieux et les temps ». Cependant cela ne change en rien l'approche objectiviste suivie : il suffit de considérer maintenant des populations de définition plus restreinte que l'ensemble de l'humanité, pour y estimer des probabilités de même type que précédemment. En fait jusqu'à la fin du XVIIIe siècle, l'essentiel des fréquences statistiques que l'on pouvait estimer concernait les phénomènes démographiques tels que la mortalité, la fécondité, la nuptialité.

Lors du XIXe siècle, la mise en place dans de nombreux pays de recensements non seulement de la population mais également de nombreux faits sociaux, tels que la profession, la maladie, le suicide, le crime, la folie, etc., vient renforcer l'approche objectiviste dans de nombreuses sciences sociales. Ainsi Durkheim [1895] indique que « la statistique nous fournit le moyen de les isoler. Ils sont, en effet, figurés, non sans exactitude, par le taux de natalité, de la nuptialité, des suicides, ... ». Il continue en indiquant que « comme chacun de ces chiffres comprend tous les cas particuliers indistinctement, les circonstances individuelles qui peuvent avoir quelque part dans la production du phénomène s'y neutralisent mutuellement et, par suite, ne contribuent pas à le déterminer. Ce qu'il exprime, c'est un certain état de l'âme collective ».

Il propose dès lors une analyse, qui ne va pas considérer les circonstances sous lesquelles un individu a connu un fait donné mais va considérer « les faits sociaux comme des choses », et cherche ainsi à unifier l'analyse tant sociologique que démographique. Il précise que l'individu trouve les faits sociaux comme des choses « toutes formées et il ne peut pas faire qu'elles ne soient pas ou qu'elles soient autrement qu'elles sont ». Ces faits sociaux, dans un type de société donné, ont également une grande permanence dans le temps, de même que les « institutions sociales nous sont léguées toutes faites par les générations antérieures ». Ces faits sociaux, qui existent hors de la conscience individuelle et qui sont indépendants des diverses actions qu'ils déterminent, s'expriment dans les statistiques, qui fournissent le moyen de les isoler. La méthode des variations concomitantes, qu'il propose pour ce faire et qui n'est autre qu'une méthode de régression linéaire, utilise l'hypothèse d'une probabilité objective : l'existence d'une telle probabilité, différente pour le suicide des protestants et celui des catholiques [Durkheim, 1897], lui permet de justifier l'utilisation de la méthode des variations concomitantes pour montrer que les protestants se suicident moins que les catholiques.

Plus tard, lorsque Henry [1959] recherche la probabilité d'arrivée d'un événement en fonction de l'âge d'un individu d'une cohorte donnée, il fait l'hypothèse d'une cohorte homogène, où les probabilités de connaître cet événement « sont les mêmes à chaque âge, pour tous les membres de la cohorte ». C'est donc bien encore le concept de probabilité objective qu'il utilise. Même lorsqu'il considère ensuite des cohortes hétérogènes, il raisonne « comme si chaque cohorte hétérogène était formée par la réunion de cohortes homogènes d'effectif infini ».

De façon semblable l'analyse des biographies en sciences sociales s'est essentiellement développée dans le cadre objectiviste. L'article fondateur de David Cox [1972] se place dans ce cadre et suppose que les observations sont disponibles sur une sous-population d'individus indépendants, étant sous-entendu que cette sous-population est issue d'une population plus large de mêmes caractéristiques. Des sociologues [Tuma et Hannan, 1984 ; Blossfeld *et al*, 1986], des démographes [Courgeau et Lelièvre, 1989], des économistes [Lancaster, 1990], etc., envisagent tous cette analyse de façon objectiviste. Aucun de ces ouvrages ne comporte même le terme « bayésien » dans son index.

Enfin l'analyse multiniveau s'est également développée au départ dans le cadre objectiviste. De ce point de vue, on peut considérer les différents niveaux comme un échantillon aléatoire de contextes dont les effets peuvent être considérés comme distribués de façon approximativement normale. Ainsi lorsque l'on dispose en sciences de l'éducation, par exemple, de notes d'élèves à deux âges, répartis dans différentes classes [Goldstein, 2003], on peut considérer les classes observées dans l'échantillon comme un échantillon aléatoire d'une population beaucoup plus vaste de classes, de la même façon que les élèves sont issus d'une population également plus vaste d'élèves. De la même façon que l'échantillon d'élèves peut fournir des estimations des moyennes et variances de la population qu'ils représentent, l'échantillon de classes pourra fournir des informations sur les caractéristiques de la population formée par les classes. Ainsi, il est possible de fournir des estimations de la variance et de la covariance entre écoles des paramètres estimés, lorsque l'on essaye par exemple d'expliquer les notes à un âge donné en fonction des notes antérieures et de diverses caractéristiques individuelles (modèle multiniveau), et de comparer des écoles avec différentes caractéristiques agrégées correspondant à chaque classe (modèle contextuel).

2.1.2 L'inférence statistique objectiviste

Cependant, le raisonnement par lequel on arrive à une inférence statistique fréquentiste, à partir de données observées, n'est pas aussi clair qu'il pourrait le paraître à première vue, et il nous faut examiner plus en détail son déroulement. Ainsi, l'énoncé, selon lequel l'intervalle de confiance à 95 % pour un paramètre inconnu, q (par exemple l'âge moyen à la naissance du premier enfant, dans la génération née en 1920 en France, estimé à partir d'un échantillon représentatif de cette génération), est compris entre deux

valeurs q_1 et q_2 , semble indiquer que le paramètre se trouve dans cet intervalle avec une probabilité de 95 %, mais cela n'est pas vérifié, car cet intervalle ne peut être défini que par rapport à l'estimation de ce paramètre et non par rapport à ce paramètre lui-même, qui est inconnu. Dans ce cas on peut seulement affirmer que, si l'on effectue de nombreux tirages d'échantillons de même taille et si nous construisons un tel intervalle autour de la moyenne de chaque échantillon, alors on peut s'attendre à ce que 95 % des intervalles de confiance ainsi construits contiennent le paramètre inconnu. Il s'agit là d'une réponse à une question beaucoup plus complexe, que la première, qui paraissait beaucoup plus claire : quelle est la probabilité pour que le paramètre inconnu se trouve dans un intervalle donné ? La réponse à cette question n'existe pas, en fait, dans la théorie fréquentiste.

Allons plus loin, en essayant de voir plus précisément ce que l'inférence statistique objectiviste peut montrer. Supposons que l'on cherche à voir si un certain facteur affecte ou non le phénomène que l'on étudie : ainsi dans l'exemple que nous détaillerons plus loin, il s'agit de voir si le fait d'être agriculteur affecte la probabilité de migrer d'une certaine sous-population donnée. On se demande alors si les différences entre les probabilités estimées de migrer des agriculteurs et du reste de la population peuvent s'expliquer par le hasard seul ou si elles sont significativement différentes. Si ces probabilités se révèlent différentes à un seuil fixé d'avance, par exemple un « niveau de signification » à un pour cent, alors on pourra conclure qu'elles le sont, puisque le résultat observé n'a que peu de chances d'avoir été obtenu au hasard. On interprète donc ici ces probabilités en termes fréquentiels, en imaginant une population plus vaste que celle observée de laquelle on peut tirer au hasard un grand nombre de sous-populations, dont celle observée. Si la probabilité de l'échantillon observé est trop faible, on rejettera alors l'hypothèse testée. Cette constatation rejoint ce que nous avons dit précédemment : l'inférence statistique objectiviste permet de tester la probabilité d'obtenir l'échantillon observé, si l'hypothèse est vraie, mais non la probabilité de cette hypothèse elle-même, qui est soit vraie soit fausse [Matalon, 1967].

Cela rejoint également ce que dit Fisher [1956], qui exprime les idées d'un objectiviste¹⁰ sur ces questions : *“This fundamental requirement [of no recognisable subset] for the applicability to individual cases of the concepts of classical probability shows clearly the role of subjective ignorance, as well as that of objective knowledge in a typical probability statement. It has been often recognized that any probability statement, being a rigorous statement involving uncertainty, has less factual content than an assertion of a certain fact would have, and at the same time has more factual content than a statement of complete ignorance. The knowledge required for such a statement refers to a well-defined aggregate, or population of possibilities within which the limiting frequency ratio must be exactly known. The necessary ignorance is specified by our inability to discriminate any of the different subaggregates having different limiting frequency ratios, such as must always exist”¹¹*

Cette citation généralise la difficulté de définir un intervalle dans lequel se trouve un paramètre inconnu, en indiquant l'incapacité pour un fréquentiste de discerner avec une clarté suffisante les différentes sous-populations ayant différentes fréquences limites.

Ainsi, lorsque nous travaillons sur un échantillon issu d'une population plus vaste, les résultats d'une analyse statistique de ces données permettent, sous certaines hypothèses, une inférence sur le comportement étudié d'un membre de cette population, qui se trouve hors de l'échantillon, mais a certaines caractéristiques observées. Pour ce faire, il faut supposer que ce membre est semblable aux individus de l'échantillon ayant ces caractéristiques et qu'il fait partie du même sous-groupe, qui ne peut dès lors être divisé plus finement.

La situation est encore plus complexe lorsque l'on travaille non plus sur un échantillon mais sur l'ensemble de la population. On doit alors supposer que cette population observée est un échantillon issu d'une « super-population », dans laquelle on n'a pu faire qu'un seul tirage, sur lequel on doit donc raisonner. C'est bien ce qui est fait lorsque l'on cherche à projeter cette population vers l'avenir en faisant l'hypothèse que son comportement reste identique à celui que l'on avait observé. Les méthodes démographiques de projection de population ou de micro-simulation utilisent cette hypothèse [Van Imhoff et Post, 1997, 1998].

¹⁰ Si dans une majorité de ses écrits Fisher peut être considéré comme un fréquentiste, il donne à la fin de sa vie une définition différente de la probabilité, en ce qu'il indique que “ l'on ne peut reconnaître aucun sous-ensemble dans la fraction possédant la caractéristique, qui l'ait dans une proportion différente de l'ensemble ” (“no sub-set may be recognizable having a fraction possessing the characteristic differing from the fraction P of the whole ”, [Fisher, 1960]). Ce concept de probabilité est généralement considéré comme peu clair et n'a guère été utilisé par la suite [Savage, 1976].

¹¹ « Cette nécessité fondamentale [le fait qu'on ne peut pas identifier de sous-ensemble] pour pouvoir appliquer à des cas individuels le concept de probabilité classique montre clairement le rôle de l'ignorance subjective, aussi bien que celui de la connaissance objective dans un énoncé probabiliste typique. Il a souvent été reconnu que tout énoncé probabiliste, étant un énoncé rigoureux impliquant l'incertitude, a un contenu moins relié aux faits qu'un énoncé portant sur un fait certain, et en même temps a un contenu factuel plus certain qu'un énoncé de parfaite ignorance. La connaissance exigée par un tel énoncé se rapporte à une sous-population bien-définie, ou à une population de possibles à l'intérieur de laquelle la fréquence limite doit être parfaitement connue, lorsque le nombre d'essais tend vers l'infini. L'ignorance inéluctable est liée à notre incapacité de distinguer aucun des sous-groupes différents qui ont différentes fréquences limites, tels qu'ils devraient toujours exister ».

Seul un postulat d'ignorance permet dans ces cas une inférence statistique, en disant que certaines choses sont inconnues et que la validité de l'argument implique qu'elles n'aient pas à l'être [Fisher, 1958]. Voyons plus en détail sur un exemple la difficulté de définir une sous-population dans laquelle une probabilité reste constante.

2.1.3 Un exemple en démographie

Prenons pour ce faire l'exemple développé dans l'article précédemment publié dans cette revue [Courgeau, 2002]. Nous y étudions l'effet d'être agriculteur sur la probabilité d'émigrer des diverses régions du pays à un âge donné, d'un individu né en Norvège en 19489. Voyons, selon le type d'analyse faite, comment nous pouvons définir les sous-groupes ayant la même fréquence limite de migrer.

Supposons d'abord que la probabilité de migrer des agriculteurs soit identique pour tous les individus de la population totale, et qu'il en soit de même pour les non agriculteurs. Sous cette hypothèse, on a deux possibilités d'estimer ces probabilités. En premier lieu on peut utiliser la méthode proposée par Durkheim, ce qui amène à travailler sur les proportions de migrants et d'agriculteurs dans chaque région norvégienne, et qui conduit à une probabilité de migrer égale à 0,597 pour les agriculteurs et à 0,119 pour les non-agriculteurs. En second lieu on peut travailler sur l'ensemble de la population norvégienne, qui conduit à une probabilité de migrer égale à 0,094 pour les agriculteurs et à 0,150 pour les autres. Le fait que ces résultats soient contradictoires nous indique que l'hypothèse initiale n'est pas vérifiée. Si la première possibilité d'estimation implique forcément cette hypothèse et doit donc être rejetée, la seconde peut toujours être vérifiée si l'on estime la valeur moyenne d'une probabilité de migrer, qui peut cette fois-ci varier selon les individus considérés. Comment dès lors¹² Nous remercions ici les services statistiques norvégiens qui nous ont permis d'avoir accès à des fichiers créés à partir des données du Registre de Population et des recensements de 1970 et 1980 par Kjetil Sørli et Øjsten Kravdal. estimer cette hétérogénéité non observée avec les données dont nous disposons ? Deux nouvelles possibilités se présentent à nous.

En utilisant d'abord la proportion d'agriculteurs présents dans chaque région, on peut estimer un modèle contextuel faisant intervenir non seulement le fait d'être agriculteur, mais également cette proportion et une interaction entre le fait d'être agriculteur et cette proportion. Le modèle ainsi estimé nous montre que, si pour les agriculteurs leur taux d'émigration ne dépend pas de cette proportion de façon significative, pour les non-agriculteurs la probabilité de migrer, toujours plus forte que pour les agriculteurs, augmente fortement avec cette même proportion. Ce modèle permet dès lors d'harmoniser les contradictions précédentes : une forte densité d'agriculteurs dans une zone va augmenter les chances de migrer des autres professions, sans affecter celle des agriculteurs. Les sous-populations, dont la probabilité de migrer sera identique pour tous leurs membres, sont dans ce cas celles des agriculteurs ou des non-agriculteurs, présents dans une ou plusieurs régions dont le pourcentage d'agriculteurs est constant.

Une autre approche consiste à travailler en multiniveau, avec en plus du niveau individuel, un niveau régional. Un tel modèle, sans faire intervenir en premier lieu, les pourcentages de migrants dans chaque région, nous permet d'estimer des probabilités de migrer qui dépendent à la fois du fait d'être agriculteur et du fait d'habiter une région donnée. Un tel modèle donne un aléa tout à fait significatif pour les non-agriculteurs. Mais lorsque l'on fait intervenir dans ce même modèle les pourcentages d'agriculteurs, au niveau des paramètres fixes, cet aléa se réduit de moitié et devient beaucoup moins significatif. En revanche l'aléa pour les agriculteurs reste au même niveau que dans le modèle précédent, et n'est pas significativement différent de zéro (voir le modèle objectiviste présenté dans le Tableau 1, p.32). Cela montre à nouveau clairement que l'introduction des pourcentages d'agriculteurs vient expliquer une part importante de la variance au niveau régional correspondant aux non-agriculteurs. Les sous-populations, dont la probabilité de migrer peut être considérée comme identique, seront dans ce cas celles des agriculteurs ou des non-agriculteurs présents dans chaque région.

Comme on peut le voir, on teste chaque fois la probabilité d'obtenir l'échantillon ici observé si une hypothèse donnée est vraie. Cette hypothèse est d'abord celle d'une probabilité de migrer des agriculteurs identique dans toutes les régions de même que celle des non-agriculteurs : l'échantillon observé ne vient pas soutenir cette hypothèse. Notons ici que cet échantillon bien que constitué par l'ensemble des individus observés (données exhaustives du registre de population), est considéré ici comme un des tirages possibles d'une population hypothétique beaucoup plus vaste, que les objectivistes appellent souvent une « super population ». L'hypothèse devient ensuite celle d'une probabilité de migrer des agriculteurs et des non-agriculteurs dépendant de façon différente du pourcentage d'agriculteurs présents dans chaque région : l'échantillon observé soutient alors cette hypothèse.

2.2 L'APPROCHE ÉPISTÉMIQUE EN SCIENCES SOCIALES

Si l'approche épistémique est apparue simultanément à l'approche objectiviste dans l'histoire des probabilités, elle ne s'est développée que beaucoup plus récemment, en particulier en sciences humaines. Nous présenterons d'abord l'histoire de cette approche et les raisons qui ont retardé son application aux

¹² Nous remercions ici les services statistiques norvégiens qui nous ont permis d'avoir accès à des fichiers créés à partir des données du Registre de Population et des recensements de 1970 et 1980 par Kjetil Sørli et Øjsten Kravdal

sciences sociales, en particulier à la démographie. Nous verrons ensuite qu'elle conduit à une inférence statistique dont la signification nous paraît plus claire que lorsqu'on utilise une approche objectiviste des probabilités.

2.2.1 L'histoire de cette approche en sciences humaines et sociales

Cette approche épistémique concerne l'évaluation des degrés auxquels il est raisonnable de croire en la vérité de propositions non assurées. Ces propositions sont de type beaucoup plus général que celles portant sur l'occurrence d'événements susceptibles de se répéter dans des conditions identiques, comme pour les probabilités objectivistes.

Comme nous l'avons déjà indiqué, cette approche s'est développée, simultanément à l'approche objectiviste, tout au long du XVII^e et XVIII^e siècles. Le pari de Pascal, qui se trouve dans un passage intitulé *Infini-rien* des *Pensées* [1670], montre comment des considérations sur l'aléatoire peuvent conduire à une prise de décision dans le domaine *théologique*. Il n'est pas question ici de donner une vue détaillée des raisonnements suivis par Pascal [Hacking, 1975], mais d'en donner les principes. Sa démarche est la suivante. Considérons un individu qui hésite entre la foi et l'incrédulité, mais ne veut pas se fier aux témoignages des croyants, aux docteurs de l'Église ni aux miracles. En l'absence de données expérimentales, il faut parier sur l'existence de Dieu : « Pesons le gain et la perte, en prenant croix que Dieu est. Estimons ces deux cas : si vous gagnez, vous gagnez tout ; si vous perdez, vous ne perdez rien. Gagez donc qu'il est, sans hésiter ». C'est donc bien sur une hypothèse, celle de l'existence de Dieu, que porte le raisonnement.

Leibniz utilise également cette approche lorsqu'il s'intéresse aux degrés de preuve dans le *domaine juridique*. C'est également sur l'hypothèse de l'existence d'un fait extraordinaire, comme un miracle, que Hume [1748] s'interroge, faisant intervenir d'une part la fiabilité d'un témoin oculaire, d'autre part la crédibilité du phénomène indépendamment de ce témoignage.

Il nous faut présenter rapidement ici l'article de Bayes [1763], publié après sa mort, qui pose de façon plus précise le problème des probabilités épistémiques. Dans les problèmes de probabilité classiques, on spécifie à l'avance la nature d'une expérience ou d'un jeu, pour poser ensuite une question relative à un ou plusieurs résultats attendus de cette expérience ou de ce jeu. Ici, on va se poser la question inverse : on dispose des résultats d'une expérience ou d'un jeu sans savoir leur nature, et l'on se demande quelle est la probabilité que cette expérience ou que ce jeu soit d'un type donné parmi de nombreux autres [Molina, 1931]. Bayes pose alors le problème de la façon suivante : ayant observé le nombre de fois où un événement inconnu se produit ou non, quelle est la probabilité (chance) que sa probabilité d'occurrence dans une expérience unique se trouve entre deux valeurs données? En s'exprimant avec les termes et les notations actuels, Bayes montre, en prenant d'abord l'exemple d'une table de billard, que l'on peut calculer la probabilité pour qu'elle se situe entre deux valeurs a et b :

$$P(a < \theta < b \mid X = p) = \frac{\int_a^b \binom{n}{p} \theta^p (1-\theta)^{n-p} d\theta}{\int_0^1 \binom{n}{p} \theta^p (1-\theta)^{n-p} d\theta} = \frac{\int_a^b \theta^p (1-\theta)^{n-p} d\theta}{\int_0^1 \theta^p (1-\theta)^{n-p} d\theta}$$

où p est la proportion du nombre de fois où l'événement X se produit rapporté au nombre d'observations antérieures et q la probabilité inconnue recherchée. C'est donc bien la probabilité d'une hypothèse qu'il cherche à calculer.

Il généralise ensuite cet exemple, dans un *Scholium*, au cas où X serait un événement dont on ignore tout, avant l'expérience, qui doit donc être uniformément distribué et dont la probabilité inconnue est posée égale à θ , pour aboutir à une formule identique à la précédente. Diverses interprétations ont été données de cette distribution initiale uniforme. Molina [1931] a montré qu'une probabilité initiale (prior) uniforme sur toutes les valeurs possibles de θ est une condition nécessaire pour une probabilité uniforme sur les résultats observés. Stigler [1982] amoindrit l'argument utilisé par la suite, selon lequel la distribution uniforme s'applique à la distribution inobservable de q , pour dire qu'elle s'applique en fait à la distribution observable de X . Dans ce cas ce n'est que lorsque la distribution de X , $p(x)$, permet de déterminer la distribution de q , $p(\theta)$, que l'inférence bayésienne est possible. Ainsi dans le cas binomial où l'on a une séquence échangeable¹³ de 0 et de 1, alors, si $p(x_1, \dots, x_n)$ est spécifié pour tout n , le théorème de de Finetti [1974] montre que cela est une condition suffisante pour que $p(\cdot \mid \theta)$ et $p(\theta)$ soient déterminés.

Le problème épistémique est repris, en particulier par Condorcet dans la cinquième partie de son *Mémoire sur le calcul des probabilités* [1786, 1994], intitulée *Sur la probabilité des faits extraordinaires*. Si u et e représentent les probabilité de la vérité et de la fausseté du fait et si u' et e' représentent la probabilité qu'un témoignage sera ou non conforme à la vérité alors que le témoin aura assuré la vérité de

cet événement, alors sa probabilité conditionnelle au fait que le témoin le confirme est: $\frac{uu'}{uu' + ee'}$

¹³ Voir le paragraphe suivant pour la définition plus précise du terme « échangeable »

Si l'on suppose, comme Condorcet, que

$$e = \frac{999999}{1000000}, \quad u = \frac{1}{1000000}, \quad u' = \frac{999}{1000}, \quad e' = \frac{1}{1000}$$

nous aurons alors :

$$\frac{uu'}{uu' + ee'} = \frac{999}{1000998}$$

On voit alors que le fait que le témoin confirme un événement très extraordinaire dont la probabilité est égale à un millionième, donne toujours une très faible probabilité conditionnelle de cet événement au fait que le témoin le confirme, moindre que le millième. Ce raisonnement est conforme à la règle de Bayes-Laplace pour l'évidence d'un témoignage [Sobel, 1987].

Enfin, comme bien d'autres auteurs de son temps, Laplace [1812] développe les applications du calcul des probabilités aux sciences morales, pour l'étude de la probabilité des témoignages, des choix et des décisions des assemblées, des élections, des jugements des tribunaux, de l'effet de l'inoculation de la vaccine sur la mortalité par petite vérole, etc.

Ces raisonnements très fréquents tout au long du XVIIIe siècle vont disparaître au XIXe et au début du XXe siècles, alors qu'en sciences humaines les recensements de population prennent de l'ampleur et que l'approche fréquentiste devient prépondérante. Ce n'est que vers le début des années vingt que diverses sciences sociales vont reprendre cette approche épistémique.

L'économiste Keynes [1921] introduit les probabilités dans une conception logiciste. Il y indique clairement : "*In the sense important to logic, probability is not subjective. A proposition is not probable because we think it so. When once the facts are given which determine our knowledge, what is probable or improbable in those circumstances has been fixed objectively, and is independent of our opinion*"¹⁴. Il est intéressant de voir que, si sa position logiciste a pu être développée de façon plus précise au cours de la fin du XXe siècle [Jeffreys, 1939 ; Carnap, 1950 ; Jaynes, 2003], la position subjectiviste est apparue très peu de temps après. En effet en 1926 Ramsey publie un article, repris dans l'ouvrage publié après sa mort en 1931, qui critiquait la position de Keynes et proposait une théorie basée sur les comportements rationnels face à l'incertitude. Les probabilités subjectives vont mesurer des degrés de certitude pour définir les probabilités. Cette approche a été prolongée par les travaux non seulement d'économistes mais de statisticiens [de Finetti, 1937 ; Savage, 1954 ; etc.].

L'approche épistémique va par la suite se développer dans diverses sciences humaines. Mais plutôt que de les prendre séparément, ce sont des nouvelles analyses, applicables à de nombreuses sciences, qui vont utiliser ces méthodes. Ainsi l'analyse des biographies, utilisée en épidémiologie, en sciences actuarielles, en biologie, en médecine, en économie, en démographie, etc., va développer une approche bayésienne [Ibrahim *et al.*, 2001 ; Gustafson *et al.*, 2003]. Les difficultés de l'analyse biographique bayésienne, à la fois pour les concepts et les calculs, viennent des difficultés de modéliser les quotients cumulés avec des distributions *a priori* non-paramétriques, par exemple, des processus beta ou gamma, dont la théorie et le calcul sont très souvent redoutables pour les chercheurs. Pour éviter ces difficultés des méthodes pleinement bayésiennes, on tend de plus en plus à utiliser des méthodes de simulation (*bootstrap* bayésien, par exemple), que la puissance des ordinateurs actuels permet de traiter en des temps non-prohibitifs [Kim et Lee, 2003]. On peut maintenant dire que cette approche présente de nombreux avantages par rapport à une approche plus objectiviste : la signification des intervalles de confiance y est plus claire que dans le cas objectiviste, il y a la possibilité d'introduire simplement des informations antérieures sur les estimations à réaliser, etc.

De même, l'analyse multiniveau conduit à des modèles hiérarchiques bayésiens [Draper, 1995] plus parfaitement adaptés à ces travaux. À nouveau les difficultés de calcul ont pu être surmontées par l'utilisation de simulations telles que les méthodes de Monte Carlo par chaînes de Markov (*MCMC*) ou par la méthode du *bootstrap*. On peut en particulier voir le chapitre sur les *Modèles hiérarchiques* dans l'ouvrage de Lee [1989], le chapitre sur les *Modèles multiniveau, l'analyse multivariée et les modèles longitudinaux* de l'ouvrage de Congdon [2001] et les chapitres sur l'estimation bayésienne de divers types de modèles multiniveau dans la dernière version de l'ouvrage de Goldstein [2003]. Cette analyse se trouve en fait au coeur des modèles bayésiens lorsque l'on doit faire des hypothèses sur la structure du phénomène étudié, qui ne dépend pas seulement des caractéristiques individuelles mais également d'autres caractéristiques contextuelles telles que la présence d'un professeur pour les élèves d'une classe, la qualité des soins pour les patients traités dans un hôpital, etc. Voyons un peu plus en détail les cas où l'approche objectiviste n'est plus utilisable en multiniveau, et où une approche épistémique permet de résoudre ce problème.

¹⁴ « Dans toute l'acception logique du terme, la probabilité n'est pas subjective. Une proposition n'est pas probable parce que nous pensons qu'elle l'est. Une fois que les faits qui déterminent nos connaissances sont établis, ce qui est probable ou improbable dans ces conditions a été fixé objectivement, et est indépendant de notre opinion ».

Tant que les niveaux d'agrégation introduits (classes, écoles, communes, etc.), peuvent être considérés comme tirés d'une population sinon infinie du moins suffisamment vaste, l'approche objectiviste peut être appliquée dans de tels modèles multiniveau. En revanche supposons que l'on travaille sur un découpage exhaustif du territoire national, en régions, comme en géographie humaine, et que l'on dispose d'un échantillon de la population tiré dans chaque région pour déterminer, par exemple, si un individu est fumeur habituel ou non, en fonction de caractéristiques individuelles et régionales [Jones, 1993]. Dans ce cas, il est difficile de considérer que ces régions sont issues d'un échantillon plus vaste de régions puisqu'elles recouvrent tout le territoire. On peut bien sûr ajouter des régions d'autres pays pour élargir l'échantillon, mais la condition de normalité risque fort de ne plus être vérifiée et l'on a de fortes chances d'avoir une distribution qui aura, par exemple, deux ou plusieurs maxima locaux. Il est dès lors utile de voir si un point de vue subjectiviste ne permet pas de résoudre cette difficulté.

On montre dans ce cas que l'utilisation d'un estimateur de Bayes empirique (empirical Bayes estimator), par exemple, est possible sans avoir à faire intervenir un nombre infini de régions. En partant d'une estimation *a priori* (prior estimation) faite sur l'ensemble du pays et en appliquant le théorème de Bayes aux observations régionales, on obtient une telle estimation *a posteriori* du fait que l'individu soit un fumeur habituel. On montre que cet estimateur est bien plus précis qu'un estimateur conventionnel [Greenland, 2000]. Cependant l'application de cette méthode n'est valable que si une hypothèse d'échangeabilité des estimateurs *a priori* peut être considérée comme applicable dans ce cas. Il nous faut donc voir plus en détail ce que cette hypothèse implique, pour pouvoir ensuite justifier cette approche.

2.2.2 L'inférence statistique épistémique

Ce concept d'échangeabilité, introduit par de Finetti [1974], va jouer un rôle comparable à celui de l'appartenance à une sous-population, que nous avons présenté plus haut et qui a été introduit par Fisher [1974].

La notion d'échangeabilité, prise ici dans son sens subjectif, implique des jugements de similarité des comportements entre individus, qui permettent de faire des prévisions basées sur ce qui a été observé. Ainsi on peut regarder deux quantités inconnues comme échangeables si, pour tout jugement impliquant l'une ou les deux simultanément, les affectations de probabilités (probability assignments) ne changent pas lorsque les deux quantités sont échangées. Ainsi, dans l'exemple traité plus haut, on va supposer qu'avant d'observer les données régionales, la seule observation des données nationales ne nous donne aucune possibilité de dire si les données régionales sont ou non-différentes entre elles. Il est donc alors légitime de considérer ces données régionales comme échangeables entre elles. En revanche les estimateurs *a posteriori* peuvent, bien entendu, ne plus être échangeables, si des différences importantes apparaissent entre les régions. On peut montrer que ces estimateurs auront de toute façon une bien meilleure précision que les estimateurs conventionnels, même si les hypothèses d'échangeabilité des estimateurs *a priori* sont très incorrectes [Greenland, 2000].

Cette notion peut se généraliser à celle d'échangeabilité conditionnelle, si la distribution jointe de n variables aléatoires, X , conditionnée par la valeur d'une autre variable aléatoire, Y , qui peut être multidimensionnelle, est invariante quelle que soit la permutation des unités [Lindley and Novik, 1981 ; Draper *et al.*, 1993; Greenland, 1998a]. Ainsi dans l'exemple précédent, si l'on observe deux individus, dont on ne sait pas s'ils sont fumeurs habituels ou non, mais dont les caractéristiques considérées comme jouant sur ce fait sont identiques, on peut considérer que leur statut de fumeur habituel sera échangeable.

Cela permet également une possibilité d'inférence statistique à partir de cet échantillon. Ainsi, lorsque la variable aléatoire X dépend d'un certain nombre de caractéristiques Y , pour n individus, un nouvel individu ayant toutes ses caractéristiques Y identiques à celles des précédents, pourra être également considéré comme échangeable en X . Par exemple, pour un individu dont on ignore s'il est fumeur habituel, mais dont toutes les caractéristiques, connues pour jouer sur ce fait (âge, sexe, profession, statut matrimonial, etc., par exemple) sont identiques à celles de n individus, jugés échangeables quant au fait qu'ils fument ou non, ce nouvel individu aura également son statut de fumeur échangeable avec celui des précédents.

On peut voir que cette notion d'échangeabilité conditionnelle d'individus peut être rapprochée de celle de leur appartenance à une sous-population, due à Fisher, où la discrimination indiquée par ce dernier se rapporte à la condition qu'ils fassent partie de la sous-population dont les caractéristiques Y sont identiques. Cependant il y a deux différences importantes entre ces concepts [Lindley and Novik, 1981]. En premier lieu, l'échangeabilité d'individus se réfère explicitement à une variable aléatoire, alors qu'une sous-population ne peut pas s'y référer. Ainsi les individus peuvent être échangeables en Y étant donné X , mais pas en X : si nous tirons un nouvel individu vivant dans un autre pays on peut, par exemple, penser que la propension à fumer diffère de façon importante selon les pays, mais que les caractéristiques considérées jouent de la même façon sur cette propension, c'est-à-dire que $P(Y|X)$ et $P(Y|\bar{X})$ sont les mêmes dans les deux pays considérés. Mais en revanche la propension à être un fumeur ayant les caractéristiques Y ne pourra plus être estimée, car le théorème de Bayes nous donne :

$$P(X|Y) = \frac{P(Y|X)P(X)}{P(Y)}$$

et dans ce cas, sans jugement d'échangeabilité en X , il n'est plus possible d'obtenir la probabilité d'être un fumeur dans le nouveau pays considéré si l'on a certaines caractéristiques Y . En second lieu, nous avons indiqué la difficulté, sinon l'impossibilité, de placer un individu réel dans une sous-population bien définie du point de vue objectiviste. En revanche, l'échangeabilité étant un jugement sur une caractéristique individuelle, il permet de dire si l'ajout d'un individu à un ensemble d'individus échangeables entre eux, maintient cette échangeabilité ou non. L'inférence statistique est maintenant vue "as a passage from data to a unit and not, except as an intermediary, to a parameter"¹⁵ [Lindley and Novik, 1981].

Bien entendu, il n'est pas possible de donner ici toute la richesse de cette approche bayésienne multiniveau, qui peut utiliser un nombre beaucoup plus élevé de niveaux et mettre en place des méthodes d'analyse très diverses et complexes [Lindley and Smith, 1972 ; Gelman *et al.*, 1995 ; Lee, 1997]. Ces progrès techniques, permis par l'approche subjective, sortent du cadre de cet article et ne seront pas détaillés ici. Nous allons plutôt essayer de montrer en quoi l'approche « logiciste » qui, comme nous l'avons déjà indiqué, formalise le degré de croyance personnel de l'approche subjective en une relation logique valable pour tous, permet de dépasser celle-ci.

L'approche « logiciste » reprend, bien entendu, tous les apports de l'approche bayésienne, mais elle permet d'aller plus loin, en particulier lors d'une phase exploratoire que tous les chercheurs en sciences humaines rencontrent. En effet, elle propose un moyen précis d'assigner une distribution de probabilité *a priori*, alors que les hypothèses fréquentistes sont invalides et les méthodes bayésiennes ne sont pas encore disponibles et développe l'assignation précise de cette distribution dans les cas où l'on ne dispose que d'une information parcellaire. Elle utilise pour ce faire le principe de l'entropie maximum (principe of maximum entropy), qui permet d'assigner, sans aucune hypothèse, autre que ce qui est contenu dans les données, un modèle unique qui utilise toute l'information disponible, mais évite de supposer que des informations que l'on n'a pas sont cependant utilisables. Ce modèle est optimal sous de très nombreux critères. On peut dire, par exemple, que ce modèle est le plus simple qui capture toute l'information contenue dans les contraintes ; c'est le seul modèle pour lequel ces contraintes "would have been sufficient statistics" ; etc. [Jaynes, 2003]. Il permet de fournir une distribution *a priori* (prior) satisfaisante dans un modèle multiniveau.

Plus généralement on voit que cette approche permet de raisonner sur une information incomplète, en la codifiant logiquement et numériquement sous la forme de probabilités. Celles-ci ne décrivent plus un état des choses, comme dans l'approche fréquentiste, mais un état de connaissance. Elles ne sont plus « mesurées », mais assignées selon un processus basé sur l'évidence qui conduit à la même assignation de probabilité, quelle que soit la personne qui effectue cette assignation, contrairement à l'approche subjective.

Cette approche, surtout développée pour le moment dans les sciences dures, pourrait apporter aux sciences humaines une meilleure cohérence. Les premiers essais de Jaynes [1991] d'appliquer le principe de l'entropie maximum à l'économie, en distinguant macro-économie et micro-économie, ne permettent pas encore de dire ce que cette utilisation peut amener dans ce domaine, car il s'agit plus d'idées lancées en vue de stimuler une discussion avec des économistes que d'une théorie bien avancée. Seuls des travaux à venir montreront si ce point de vue logiciste peut permettre de nouvelles avancées en analyse multiniveau.

2.2.3 Poursuite de l'exemple démographique

Pour estimer des modèles multiniveau épistémiques, les méthodes classiques bayésiennes n'étaient pas applicables car elles conduisaient à des intégrations d'une trop grande complexité pour permettre l'estimation de leurs paramètres. Seule l'utilisation de simulations permettent cette estimation par des méthodes de Monte Carlo par chaînes de Markov (*MCMC*) ou par la méthode du *bootstrap*, que la puissance des ordinateurs actuels permet d'utiliser. La présentation de ces méthodes n'étant pas l'objet de cet article nous renvoyons à la thèse de Browne [1998], pour les méthodes *MCMC*, et aux articles de Carpenter *et al.* [1999], et de Hutchinson *et al.* [2003].

Reprenons l'exemple précédent des migrations norvégiennes des agriculteurs et des non-agriculteurs. Le tableau 1 donne les paramètres estimés avec une approche objectiviste dans l'article antérieur ([Courgeau, 2002], Tableau 3, Modèle multiniveau contextuel) et ceux estimés sous une approche épistémique par des méthodes de Monte Carlo par chaînes de Markov (*MCMC*). Ces méthodes permettent en effet, à partir d'une distribution *a priori* uniforme ou de type Gamma, d'estimer par itérations successives les paramètres du modèle et leur écart-type.

¹⁵ « comme un passage des données vers un individu et non pas vers un paramètre, sauf s'il s'agit d'un intermédiaire vers l'individu ».

| Paramètres | Modèle objectiviste | Modèles épistémiques <i>MCMC</i> avec distributions <i>a priori</i> de type: | |
|------------------------------------|---------------------|--|----------------|
| | | Gamma | Uniforme |
| Fixes | | | |
| α_0 (non-agriculteur) | -2,067 (0,119) | -2,073 (0,129) | -2,090 (0,120) |
| α_1 (agriculteur) | -2,017 (0,340) | -2,023 (0,306) | -2,118 (0,364) |
| α_2 (part d'agriculteurs) | 5,420 (1,209) | 5,580 (1,690) | 5,597 (1,400) |
| α_3 (agr. X part d'agr.) | -8,691 (3,238) | -8,556 (2,988) | -7,984 (3,660) |
| Aléatoires | | | |
| $\sigma_{u_0}^2$ (non-agriculteur) | 0,047 (0,024) | 0,060 (0,024) | 0,084 (0,041) |
| $\sigma_{u_{01}}$ (covariance) | 0,085 (0,042) | 0,105 (0,048) | 0,142 (0,089) |
| $\sigma_{u_1}^2$ (agriculteur) | 0,181 (0,119) | 0,237 (0,121) | 0,431 (0,281) |

Tableau 1. Paramètres estimés avec deux aléas (écart-types entre parenthèses)

Les paramètres fixes estimés avec un modèle épistémique sont peu différents de ceux estimés avec un modèle objectiviste. Cependant l'intervalle de confiance à 95 % par exemple, que l'on peut tracer autour de ces estimations correspond maintenant bien à ce que l'on attend : il s'agit de l'intervalle dans lequel on a une probabilité égale à 0,95 de trouver le paramètre inconnu. Également l'hypothèse de normalité de ces estimateurs n'est plus nécessaire et l'on peut disposer de leur distribution dans tout son détail.

Pour les aléatoires cependant, les différences sont beaucoup plus importantes : l'estimateur de la variance pour les agriculteurs est plus du double dans l'estimation *MCMC*, avec distribution *a priori* uniforme, que dans l'estimation objectiviste. Ce fait a déjà été observé [Browne, 1998] pour des modèles de régression linéaire, où les variances au niveau agrégé sont beaucoup plus faibles qu'au niveau individuel. Mais malheureusement pour les modèles logistiques il est difficile de comparer les variances des niveaux agrégés et individuels. On peut cependant penser que cela est dû au fait que la variance estimée n'est pas toujours significative. Qui plus est, si l'on cherche à estimer un modèle épistémique par la méthode du *bootstrap* le modèle ne converge pas et ne permet plus aucune estimation. On voit donc que les modèles épistémiques sont beaucoup plus sensibles, et ne fournissent plus d'estimateur stable lorsqu'une caractéristique n'est pas vraiment significative.

Il nous faut donc maintenant considérer uniquement les effets significatifs: supprimer l'aléa régional correspondant aux agriculteurs, remplacer les termes contextuels correspondant aux précédents paramètres α_2 et α_3 , pour ne considérer qu'un seul terme contextuel correspondant à la part d'agriculteurs présents dans la région, où se trouvent les non-agriculteurs. Le tableau 2 porte ces résultats pour un modèle multiniveau objectiviste et des modèles épistémistes utilisant des estimations du type *MCMC* et *bootstrap*.

| Paramètres | Modèle objectiviste | Modèles épistémistes | | |
|------------------------------------|---------------------|----------------------|------------------------|------------------|
| | | <i>MCMC</i> (Gamma) | <i>MCMC</i> (Uniforme) | <i>Bootstrap</i> |
| Fixes | | | | |
| α_0 (non-agriculteur) | -2,062 (0,113) | -2,072 (0,114) | -2,052 (0,118) | -2,050 (0,110) |
| α_1 (agriculteur) | -2,260 (0,084) | -2,262 (0,084) | -2,264 (0,084) | -2,263 (0,089) |
| α_2 (non ag. x part ag.) | 5,329 (1,475) | 5,475 (1,503) | 5,379 (1,561) | 5,266 (1,507) |
| Aléatoires | | | | |
| $\sigma_{u_0}^2$ (non-agriculteur) | 0,054 (0,020) | 0,061 (0,026) | 0,071 (0,032) | 0,053 (0,020) |

Tableau 2. Paramètres estimés avec un seul aléa (écart-types entre parenthèse)

Maintenant les aléas estimés avec les divers modèles sont beaucoup plus proches et l'estimation *bootstrap* converge sans problème.

3. CONCLUSION

La plupart des sciences sociales suivent très souvent une approche objectiviste des phénomènes humains et, rares sont encore les chercheurs dans ce domaine qui prennent une approche pleinement épistémique. Il nous semble cependant que cette situation soit difficile à justifier d'un point de vue logique lorsque l'on examine plus en détail les bases de ces approches. Reprenons et complétons dans cette conclusion les principaux résultats auxquels cet article nous a conduits.

En premier lieu l'utilisation de données de recensements ou de registres de population en démographie, conduit à une observation exhaustive mais qui ne peut être répétée, car les conditions dans lesquelles vivent ces populations vont changer en permanence au cours du temps. Il en est de même en économie, où à nouveau les expériences ne peuvent être répétées. Si l'on désire utiliser des probabilités objectives, il est alors nécessaire d'inventer un ensemble d'univers imaginaires pour pouvoir définir un espace d'échantillonnage. L'existence d'une telle « super population » est une hypothèse superflue par rapport à l'objectif du chercheur en sciences sociales, qui est de tester si une relation peut être considérée comme vérifiée ou non dans la population observée. Il paraît dès lors préférable d'utiliser une approche épistémique qui évite de poser de telles conditions et qui permet une estimation utilisant seulement les données observées.

Supposons maintenant que l'on fasse une enquête, ce qui revient à dire que l'on tire un échantillon d'individus, par exemple d'une même génération, et que l'on cherche à estimer à partir des réponses à cette enquête la probabilité pour qu'un individu de cette génération connaisse un événement donné, à partir de la fréquence observée dans cet échantillon.

Si, dans ce cas, on dispose bien d'un échantillon que l'on peut tirer autant de fois que possible de l'ensemble de la population, il est important de définir et de situer avec précision un intervalle de confiance dans lequel on puisse assurer que se situe une telle probabilité. Sa définition devrait être du type suivant : il fournit l'intervalle dans lequel le statisticien peut être certain de trouver la probabilité recherchée avec une probabilité de 95 % par exemple. L'interprétation objectiviste conduit à considérer l'échantillon sur lequel on travaille comme issu d'une population plus vaste, d'où l'on peut tirer un grand nombre d'échantillons de même taille. On ne peut alors définir qu'un intervalle, dans lequel se trouvera la probabilité que l'on cherche à estimer, cela dans 95 % des tirages. Or ce n'est pas cela que l'on désire estimer, comme nous l'avons indiqué plus haut. Seule une approche épistémique permet en fait de répondre à cette question. La probabilité ne peut plus se définir en termes absolus, mais en termes de degré d'évidence d'une hypothèse donnée. On peut alors dire que l'intervalle de confiance représente bien un intervalle dans lequel le statisticien peut penser à juste titre qu'il y a une probabilité de 95 % d'y trouver la probabilité pour qu'un individu connaisse l'événement étudié, qui est une hypothèse que l'on peut maintenant tester [Lee, 1989]. Cette approche justifie l'utilisation du théorème de Bayes qui parle de la probabilité d'une hypothèse, notion n'ayant pas de sens pour un objectiviste, alors qu'elle est fondamentale dans l'approche épistémique.

La notion de sous-population, introduite par Fisher pour définir l'inférence statistique dans l'approche objectiviste, pose également de nombreux problèmes en sciences sociales. Le chercheur se trouve dans l'incapacité de discerner et de définir avec clarté les différentes sous-populations à considérer. En revanche, la notion d'échangeabilité, introduite par de Finetti dans l'approche épistémique, se réfère explicitement à des variables aléatoires précises, tandis qu'une sous-population ne le peut : ainsi des individus peuvent être échangeables par rapport à une variable aléatoire, mais non par rapport à une autre ni aux deux simultanément. De même Fisher ne donne aucun moyen de reconnaître si un individu fait partie ou non d'une sous-population, alors que l'échangeabilité, étant un jugement sur des individus, le permet : un individu ne peut changer une fréquence limite, tandis qu'il peut changer l'échangeabilité d'un groupe d'individus auquel on veut le rajouter [Lindley et Novick, 1981].

Enfin, parmi les théories épistémiques, la conception logiciste nous semble la plus prometteuse. Elle permet à partir de principes généraux de logique, ne faisant plus référence au hasard ni aux variables aléatoires, de définir avec précision les règles du calcul des probabilités. Ces règles sont les seules consistantes pour mener une inférence probabiliste [Jaynes, 2003]. Ces principes font disparaître la distinction entre *théorie des probabilités* et *inférence statistique*. Ils permettent de replacer les probabilités objectivistes, de même que les probabilités subjectivistes ou bayésiennes, dans une théorie plus générale des probabilités vue comme une nouvelle logique. Il reste à voir comment on peut les appliquer aux sciences sociales.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLAIS M., «!Le comportement de l'homme rationnel devant le risque!: critique des postulats et axiomes de l'école américaine!», *Econometrica* 21, 4, 1953, p. 503-546.
- ARNAULD A., NICOLE P., *La Logique ou l'Art de penser*, Paris, 1662.
- BAYES T. R., "An essay towards solving a problem in the doctrine of chances", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 53, 1763, p.370-418.
- BERNOULLI J. I, *Ars conjectandi*, Bâle, Impensis Thurnisiorum fratrum, 1713.
- BLOSSFELD H.-P., HAMERLE A., MAYER K.U., *Ereignisanalyse*, Frankfurt/New York, Campus Verlag, 1986.
- BRESLOW, N., "Biostatistics and Bayes" (with comments), *Statistical Science* 5, 3 1990, p. 269-298.
- BROWNE W. J., *Applying MCMC methods to multi-level models*, PhD Thesis, University of Bath, 1998, [accessible via le site internet : <http://www.maths.nott.ac.uk/personal/pmzwjb/bill.html>].
- CARDANO J., *Opera Omnia*, vol. I *De Ludo Aleae*, Amsterdam, 1663.
- CARNAP R., *The logical foundations of probability*, Chicago, University of Chicago Press, 1950.
- CARPENTER J., GOLDSTEIN H., RASBASH J., "A non-parametric bootstrap for multilevel models", *Multilevel Modelling Newsletter* 11, 1, 1999, p. 2-5.
- CONDORCET, « Mémoire sur le calcul des probabilités. Cinquième partie. Sur la probabilité des faits extraordinaires », *Mémoire pour l'Académie Royale des Sciences pour 1783*, 1786, p. 553-559. [Repris dans *Arithmétique politique. Textes rares ou inédits (1767-1789)*, Paris, Institut National d'études démographiques, 1994, p. 431-436].
- CONGDON P., *Bayesian statistical modelling*, Chichester, John Wiley & Sons, Ltd., 2001.
- COURGEAU D., « Évolution ou révolutions dans la pensée démographique ? », *Mathématiques et Sciences humaines* 160, 2002, p. 49-76.
- COURGEAU D. (éd.), *Methodology and epistemology of multilevel analysis. Approaches from different social sciences*, Methodos Series, vol. 2, Dordrecht/Boston/London, Kluwer Academic Publishers, 2003.
- COURGEAU D., LELIÈVRE E., *Analyse démographique des biographies*, Paris, Ined, 1989. (Traduction anglaise, *Event history analysis in demography*, Oxford: Clarendon Press, 1992. Traduction espagnole, *Análisis demográfico de las biografías*, México, El Colegio de México, 2001).
- COX D. R., "Regression models and life-tables" (with discussion), *Journal of the Royal Statistical Society* 34, 2, 1972, p. 187-220.
- COX R., "Probability, frequency, and reasonable expectation", *American Journal of Physics* 14, 1946, p. 1-13.
- DRAPER D., "Inference and hierarchical modelling in the social sciences" (with discussion), *Journal of Educational and Behavioural Statistics* 20, 1995, p. 115-147, 233-239.
- PROBABILITÉS, DÉMOGRAPHIE ET SCIENCES SOCIALES 47
- DRAPER D., HODGES J. S., MALLOWS C. L., PREGIBON D., "Exchangeability and data analysis", *Journal of the Royal Statistical Society* A, 156, 1993, p.9-37.
- DURKHEIM E., *Les règles de la méthode sociologique*, Paris, Alcan, 1895.
- DURKHEIM E., *Le suicide*, Paris, Alcan, 1897.
- FINETTI (de) B., « La prévision!: ses lois logiques, ses sources subjectives », *Annales de l'Institut Henri Poincaré* 7, Paris, 1937, p. 1-68.
- FINETTI (de) B., *Theory of probability*, 2 vols., London/New York, Wiley & Sons, 1974.
- FISHER R. A., *Statistical Methods for Research Workers*, Edimburgh, Olivier and Boyd, 1925.
- FISHER R. A., *Statistical Methods and Scientific Inference*, Edimburgh, Oliver and Boyd, 1956.
- FISHER R. A., "The nature of probability", *Centennial Review* 2, 1958, p. 261-274.
- FISHER R. A., "Scientific thought and the refinement of human reasoning", *Journal of the Operations Research Society of Japan* 3, 1960, p. 1-10.
- FRANCK R. (ed.), *The explanatory power of models. Bridging the gap between empirical and theoretical research in the social sciences*, Boston/Dordrecht/London, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- FRIEDMAN M., SAVAGE L. J., "The utility analysis of choices involving risk", *The Journal of Political Economy* LVI, 4, 1948, p. 279-304.
- GELMAN A., KARLIN J. B., STERN H. S., RUBIN D. B., *Bayesian data analysis*, New York, Chapman and Hall, 1995.
- GOLDSTEIN H., *Multilevel statistical models*, London, Edward Arnold, 2003.
- GRANGER G.-G., *Essai d'une philosophie du style*, Paris, éditions Odile Jacob, 1988.
- GRAUNT J., *Natural and political observations mentioned in a following index, and made upon the bills of mortality*, Londres, 1662.
- GREENLAND S., "Probability logic and probabilistic induction", *Epidemiology*, 1998a, p. 322-332.
- GREENLAND S., "Induction versus Popper: substance versus semantics", *International Journal of Epidemiology* 27, 1998b, p. 543-548.
- GREENLAND S., "Principles of multilevel modelling", *International Journal of Epidemiology* 29, 2000, p. 158-167.
- GUSTAFSON P., AESCHLIMAN D., LEVY A. R., "A simple approach for fitting Bayesian survival models", *Lifetime data analysis*, 9, 2003, p. 5-19.
- HACKING I., *The emergence of probability*, Cambridge, Cambridge University Press, 1975.
- HACKING I., *The taming of science*, Cambridge, Cambridge University Press, 1990.
- HACKING I., *An introduction to probability and inductive logic*, Cambridge, Cambridge University Press, 2001.
- HALLEY E., "An estimate of the degrees of the Mortality of Mankind, drawn from curious Tables of the Births and Funeral's at the City of Breslau; with an Attempt to ascertain the price of the Annuities upon Lives", *Philosophical Transactions for the Month of January* 196, 1693, p. 596-610.
- HENRY L., « D'un problème fondamental de l'analyse démographique », *Population*, 13, 1959, p. 9-32.
- HOLLAND P., "Statistics and Causal inference" (with Comments), *Journal of the American Statistical Association* 81, 1986, p. 945-970.
- HULTING F. L., HARVILLE D. A., "Some bayesian and non bayesian procedures for the analysis of comparative experiments and for small area estimation: Computational aspects, frequentist properties, and relationships", *Journal of the American Statistical Association* 86, n° 415, 1991, p. 557-568.
- HUME D., *Philosophical essays concerning human understanding*, 1748.
- HUTCHINSON D., MORRISON J., FELGATE R., "Bootstrapping the effects of measurement errors", *Multilevel Modelling Newsletter* 15, 2, 2003, p. 2-10.
- IBRAHIM J. G., CHEN M.-H., SINHA D., *Bayesian survival analysis*, New York/Berlin/Heidelberg, Sptinger Verlag, 2001.
- JAYNES E. T., *How should we use entropy in economics?*, 1991, [article non publié accessible via le site internet: <http://www.leibniz.imag.fr/LAPLACE/Jaynes/prob.html>].

- JAYNES E. T., *Probability theory: the logic of science*, Cambridge, Cambridge University Press, 2003.
- JEFFREYS H., *Theory of probability*, New York, Clarendon Press, 1939.
- JENNINSON C., TURNBULL B. W., "Statistical approaches to interim monitoring of medical trials: a review and commentary", *Statistical Science* 5, 3, 1990, p. 299-317.
- JONES K., *Everywhere is nowhere: Multilevel perspectives on the importance of place*, The University of Portsmouth Inaugural Lectures, 1993.
- KEYNES J. M., *A treatise on probability*, London, Macmillan, 1921.
- KIM Y., LEE J., "Bayesian bootstrap for proportionnal hazards models", *The Annals of Statistics* 31, 6, 2003, p. 1905-1922.
- KOLMOGOROV A., "Grundbegriffe der wahrscheinlichkeitsrechnung", *Ergebnisse der mathematik*, vol.2, Berlin, 1933.
- KRÜGER L., MORGAN M., GIGERENZER, *The probabilistic revolution*, Cambridge, Cambridge University Press, 1986.
- KERSSEBOOM W., «Troisième traité sur la grandeur probable de la population de Hollande et de Frise occidentale», *Essais d'Arithmétique politique contenant trois traités sur la population de la province de Hollande et de Frise occidentale*, Paris, éditions de l'Ined, 1970, (1e édition, 1942).
- LANCASTER T., *The econometric analysis of transition data*, Cambridge, Cambridge University Press, 1990.
- LAPLACE P. S., *Théorie analytique des Probabilités*, 2 vols., Paris, Coursier imprimeur, 1812.
- LEE P. M., *Bayesian statistics*, first ed. London, Arnold, 1989.
- LINDLEY D. V., NOVICK M. R., "The role of exchangeability in inference", *The Annals of Statistics* 9, 1981, p. 45-58.
- LINDLEY D. V., SMITH A. F. M., "Bayes estimates for the linear model", *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)* 34, 1972, p.1-41.
- PROBABILITÉS, DÉMOGRAPHIE ET SCIENCES SOCIALES 49
- MATALON B., «!Epistémologie des probabilités!», Piaget J. (éd.), *Logique et connaissance scientifique*, Paris, Gallimard, 1967, p. 526-553.
- MISES von R., *Wahrscheinlichkeit, statistik und wahrheit*, Wien, Springer, 1928.
- MISES von R., *Probability, Statistics and truth*, London, Allen and Unwin, 1957.
- MOLINA E. C., "Bayes' theorem: an expository presentation", *The Annals of Mathematical Statistics* 2, 1, 1931, p. 23-37.
- NADEAU R., *Vocabulaire technique et analytique de l'épistémologie*, Paris, Presses Universitaires de France, 1999.
- PASCAL, B., *Traité du triangle arithmétique*, Paris, 1651.
- PASCAL B., *Pensées*, Paris, 1670.
- POLYA G., *Mathematics and plausible reasoning*, 2 vols, Princeton, University Press, 1954.
- POPPER K., "The propensity interpretation of probability", *Philosophy of Science* 10, 1959, p. 25-42.
- POPPER K., *Le réalisme de la science*, Paris, Herman, 1990.
- PORTER T. M., *The rise of statistical thinking 1820-1900*, Princeton, University Press, 1986.
- RAMSEY F. P., *Mr Keynes and Probability*, Cambridge Magazine, 1922.
- RAMSEY F. P., "Truth and probability", in Ramsey, F.P. (1931), *The foundations of mathematics and other logical essays*, R.B. Braithwaite ed., Ch. VII., Londres, Kegan, Trubner & Co., New York, Harcourt, Brace and Company, 1926, p. 156-198.
- ROBINS J. M., SCHEINES R., SPIRITES R., WASSERMAN L., "Uniform consistency in causal inference", *Biometrika* 90, 2003, p. 491-515.
- ROSENBAUM P. R., "The consequence of adjustment for a concomitant variable that has been affected by the treatment", *Journal of the Royal Statistical Society A* 147, 1984a, p. 656-666.
- ROSENBAUM P. R., "From association to causation in observational studies: the role of tests of strongly ignorable treatment assignment", *Journal of the American Statistical Association* 79, 1984b, p. 41-48.
- ROSENBAUM P. R., RUBIN D. B., "Reducing bias in observational studies using subclassification on the propensity score", *Journal of the American Statistical Association* 79, 1984, 516-524.
- ROUANET H., BERNARD J.-M., BERT M.-C., LECOUTRE B., LECOUTRE M.-P.,
- LE ROUX B., *New ways in statistical methodology. From significance tests to Bayesian inference*, Bern, Peter Lang, 1998.
- RUBIN D. B., "Bayesian inference for causal effects: the role of randomization", *The Annals of Statistics* 6, 1978, 34-58.
- SAVAGE L. J., *The foundations of statistics*, New York, Wiley, 1954.
- SAVAGE L. J., "Implications of personal probability for induction", *The Journal of Philosophy* 64, 19, 1967, p. 593-607.
- SAVAGE L. J., "On reading R.A. Fisher", *The Annals of Statistics* 4, 3, 1976, p. 441-500.
- SHAFER G., "The unity and diversity of probability" (with comments), *Statistical Science* 5, 4, 1990, p. 435-462.
- SOBEL J. H., "On the evidence of testimony for miracles: A Bayesian interpretation of David Hume analysis", *The Philosophical Quarterly* 37, 147, 1987, p. 166-186.
- STIGLER S. M., "Thomas Bayes Bayesian inference", *Journal of the Royal Statistical Society, Series A* 145, 1982, p. 250-258.
- SUPPES P., "Representation of probability", Suppes P., *Representation and invariance of scientific structures*, Stanford, CSLI Publication, 2002, p. 129-264.
- TRUSSELL J., "Introduction", Trussell J., Hankinson R., Tilton J. (eds.), *Demographic applications of event history analysis*, Oxford, Clarendon Press, 1992, p. 1-7.
- TUMA N. B., HANNAN M., *Social dynamics*, London, Academic Press, 1984.
- VAN IMHOFF E., POST W., «!Méthodes de micro-simulation pour des projections de population!», D. Courgeau éd., *Population* 52 ,4, 1997, p. 889-932. "Microsimulation methods for population projections", D. Courgeau éd., *Population. An English Selection*, 10, 1, 1998, p. 97-138.
- VENN J., *The logic of chance*, London, Macmillan, 1866.
- WUNSCH G., (1994), «!L'analyse causale en démographie!», Franck R. (éd.), *Faut-il chercher aux causes une raison!?* *L'explication causale dans les sciences humaines*, Paris, Librairie Philosophique J. Vrin, 1994, p. 24-40.

METHODOS SERIES
Methodological Prospects
in the Social Sciences

SPRINGER

Series Editors:

Daniel Courgeau, Institut National d'Etudes Démographiques (INED), Paris
 Robert Franck, Centre de Philosophie des Sciences, UCL, Louvain-la-Neuve
 E-mails : daniel.courgeau@wanadoo.fr, robertfranck6616@neuf.fr

Editorial Board :

Peter Abel, Interdisciplinary Institute of Management, London School of Economics
 Patrick Doreian, Department of Sociology, University of Pittsburgh
 Sander Greenland, Dept. of Epidemiology, UCLA School of Public Health, Los Angeles
 Ray Pawson, School of Sociology and Social Policy, Leeds University
 Cees van der Eijk, Department of Political Science, University of Amsterdam
 Bernard Walliser, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris
 Björn Wittrock, Swedish Collegium for Advanced Study in the Social Sciences, Uppsala University
 Guillaume Wunsch, Institut de Démographie, UCL, Louvain-la-Neuve

OBJECT

This Book Series is devoted to examining and solving the major methodological problems social sciences are facing. Take for example the gap between empirical and theoretical research, the explanatory power of models, the relevance of multilevel analysis, the weakness of cumulative knowledge, the role of ordinary knowledge in the research process, or again the place which should be reserved to “time, change and history” when explaining social facts. These problems are well known and yet they are seldom treated in depth in scientific literature because of their general nature.

So that these problems may be examined and solutions found, the series prompts and fosters the setting-up of international multidisciplinary research teams, and it is work by these teams that appear in the Book Series. The Series can also host books produced by a single author which follows the same objectives. Proposals of manuscripts and plans for collective books will be carefully examined.

The epistemological scope of these methodological problems is obvious and resorting to Philosophy of Science becomes a necessity. The main objective of the Series remains however the methodological solutions that can be applied to the problems in hand. Therefore the books of the Series are closely connected to the research practices.

AUDIENCE TARGETED BY THE SERIES

Postgraduates and academics. Advanced courses in research methods and in the philosophy of science. Courses and/or seminars preparing students for their Master's and doctoral dissertations. People interested in any research area concerned with human and social issues such as economics, sociology, ethnology, demography, political sciences, geography, history, criminology and psychology.

RATIONALE

From 1950 onwards and for some thirty years, the expansion of the social sciences worldwide was spectacular. Research departments and study programmes mushroomed in universities and schools and the number of students in these disciplines increased at a breathtaking rate, while all sorts of professional networks were growing in both the private and public sectors, thus creating a large graduate job market. Research in the social sciences has achieved remarkable breakthroughs in various fields, at theoretical as well as methodological and technical levels. More specifically, investigative techniques have become more and more refined and sophisticated, and the results generated from qualitative as well as quantitative

methods pile up year after year. But even more pressing becomes the question as to how these results contribute to a better understanding of social life. Do they provide us with better criteria for decision and action? Do they improve our explanations of social reality, and our grasp of the forces regulating social change? The malaise is genuine and it continues to grow, where the researchers and the sleeping partners, both private and public, are concerned.

A number of difficulties at the very root of these disciplines and their methods have not yet been solved. They contribute to the post-modernist drift which has begun to affect the research community in these fields. Worse still, since the resolution of these difficulties is being overlooked, the social disciplines are deprived of the means of reinforcing their pertinence and usefulness.

These difficulties can be attributed partly to the persistence of a number of received ideas as to the nature of the scientific enterprise, the singularity of the sciences of Man and Society, the ways in which the knowledge obtained can be put to use and its reliability. It is important to shield research from these received ideas because they hinder innovation in terms of theory and encourage routine where methods are concerned. It is necessary to turn to the philosophy of science or to epistemology in order to combat the ideas in question, provided of course that philosophy of science is not used in a dogmatic manner.

However, it is not enough to contest received ideas and remove the obstacles they represent. It is important in the first place to effectively enhance the fruitfulness of research in the social sciences if we want to take up the challenges these sciences encounter today. This explains why the Methodos Series concentrates its efforts on improving the methods used in the social sciences. Resorting to epistemology in order to reach this objective becomes a necessity once again. But epistemology is only a means to an end. Methodological innovation calls for strictly methodological examination, closely adapted to research practices, and it is this innovation the Book Series wants to embrace.

RESEARCH TEAM AND CONTENT OF VOLUME 1

The Explanatory Power of Models

Bridging the gap between Empirical and Theoretical Research

Research team directed by Robert Franck, Centre for the Philosophy of Science, UCL (Belgium).

The team is composed as follows:

Anne-M. Aish-Van Vaerenbergh, Department of Political and Social sciences (PIOP), UCL (Belgium) and the Karolinska Institute (Sweden)

Thomas K. Burch, Population Studies Centre, Western Ontario University (Canada)

Armand de Callatay, XL Knowledge Laboratory (Belgium)

Robert Franck, Centre for the Philosophy of Science, UCL (Belgium)

Jean-Claude Gardin, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales (EHSS), Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) (France)

Guy Lories, Cognitive Psychology Unit, UCL (Belgium)

Godelieve Masuy-Stroobant, Department for Population and Development, UCL (Belgium)

Christine Mironesco, Department of Political Science, University of Geneva (Switzerland)

Michel Mouchart, Statistics Institute, UCL (Belgium)

Pierre Parlebas, Department of Sociology, University of Paris V Sorbonne (France)

Dominique Peeters, Geography Unit, Centre for Operations Research and Econometrics (CORE), UCL (Belgium)

Peer Scheepers, Department of Sociology, University of Nymegen (Nederland)

Marc Termote, Institut National de la Recherche Scientifique (INRS)-Urbanisation, Université du Québec à Montréal (UQAM) (Canada)

Michel Verleysen, Microelectronics Laboratory, UCL (Belgium)

CONTENT

Empirical research often lacks theory. This book progressively works out a method of constructing models which can bridge the gap between empirical and theoretical research in the social sciences. This might improve the explanatory power of models. The issue is quite novel, and it benefited from a thorough examination of statistical and mathematical models, conceptual models, diagrams and maps, machines, computer simulations, and artificial neural networks. These modelling practices have been approached through different disciplines.

The proposed method is partly inspired by reverse engineering. The standard covering law approach is abandoned, and classical induction restored to its rightful place. It helps to solve several difficulties

which weigh upon the social sciences today, for example how to extend an explanatory model to new phenomena, how to establish laws, and how to guide the choice of a conceptual structure.

RESEARCH TEAM AND CONTENT OF VOLUME 2

Methodology and epistemology of multilevel analysis Approaches from different social sciences

Research team directed by Daniel Courgeau, INED (National Institute for Demographic Studies), Paris.

The team is composed as follows:

Daniel Courgeau, INED, Paris (France)

Ana Diez-Roux, Columbia University, New York (USA)

Robert Franck, Centre for the Philosophy of Science, UCL (Belgium)

Harvey Goldstein, Institute of Education, London (UK)

Mark Tranmer and Ed Fieldhouse, Centre for Census and Survey Research, University of Manchester (UK); David Steel, School of Mathematics and Applied Statistics, University of Wollongong (Australia)

Bernard Walliser, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (National School of Civil Engineering), Paris (France).

CONTENT

The purpose of the multilevel approach is to understand individual behaviours taking account of the social context in which they occur. This book deals with concepts and methods underlying this approach. Its scope is therefore larger than solely statistical multilevel modelling, even though the latter enjoys a prominent place in the volume. As the subtitle says, the text considers, through examples drawn from different social sciences such as education, demography, epidemiology, human geography, economics, and so on, the challenges multilevel analysis permits us to answer and it also points out some limitations of these models. Simultaneously with spatial, organisational or institutional levels, it considers different time scales used in social sciences, and particularly the treatment of time in the history of economic thought. It also considers the more general philosophical and epistemological issues raised by their use: it shows that it no longer makes sense to choose between methodological holism and individualism, as multilevel analysis paves the way for a new approach in social sciences, studying how these different levels interconnect. This book is therefore of interest to a very wide audience of social scientists, statisticians and philosophers concerned with new issues raised by the multilevel approach, and more generally with explanation in the social sciences. Finally, it allows us to resume the theme of the first volume of this series on the explanatory power of models, offering a means of combining causal explanation and systemic explanation.

RESEARCH TEAM AND CONTENT OF VOLUME 3

Hierarchy in natural and social sciences

Research team directed by Denise Pumain, Institut de Géographie, University Paris I, France.

The team is composed as follows:

Michael Batty, Centre for Advanced Spatial Analysis, University College London, UK

Bruno Gaume, Laboratoire IRIT-CNRS, Université de Toulouse, France

David Lane, Dipartimento di Economia Politica, Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Italia, Santa Fe Institute, U.S.A.

Alain Pavé, CNRS-Guyane, Programme Amazonie, France

Denise Pumain, Institut Universitaire de France, University Paris I, France

Fabienne Venant, Laboratoire Lattice-CNRS, ENS, France

Nicolas Verdier, CNRS, UMR Géographie-cités, France

Bernard Victorri, CNRS, Lattice, ENS, France

Geoffrey B. West, Santa Fe Institute, Los Alamos National Laboratory, U.S.A

CONTENT

The concept of hierarchy has two meanings: applied to an institution, it relates to a pyramidal organisation, aiming at a top down or bottom up circulation of control and information. When applied to a system, whose elements are grouping into subsystems, it simply means that there is a regular differentiation among the subsystems according to their size, following usually a Pareto like statistical distribution.

The concept of hierarchy in both cases seems purely descriptive. However, it may become part of an explanation if constructive or evolutionary processes are related to this type of organisation or structure. Exploring the theories having imagined processes which could be responsible for this type of organisation, we find some of them relating to optimisation principles, other to constrained random growth processes. The underlying hypothesis and consequences for possible intervention within the systems are then very different. Another important question is that, in social sciences, the two meanings of a hierarchy may often be connected in the explanation, but to which extent? In other words, which part of the organisation is intentional, which is not?

We suggest a careful survey of the explanations which have been given, for example in the case of the size distribution of firms, or the hierarchical differentiation of urban systems, or the size or number of living species. Many of them rely on analogies with other systems, which were not always made entirely explicit. Entropy maximisation principle, fractal structures, allometric scaling...provide models of structures and processes whose agreement with social theories and observations have to be questioned. This can be done by comparing precisely the characteristic of hierarchical structures and of explanatory models existing both for natural and social phenomena. Discussions and comparisons of their models between social and natural scientists can help in identifying possible common processes and specific feature of each system offering hierarchical properties.

RESEARCH TEAM AND CONTENT OF VOLUME 4

The Descent of Sex Ratio at Birth

A Matter of Mathematics, Biology and Sociology (1700-2000)

Research team:

Eric Brian, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, Paris

Marie Jaisson, Université François Rabelais, Tours

CONTENT

Since the 18th century, one phenomenon, the proportion of the sexes at birth among human beings, has contributed to various developments such as the calculus of probabilities, administrative statistics, the moral and social sciences, the statistics of variability, post-Darwinian biology and Durkheimian sociology. This fact is brought to the critical attention of readers who rarely work together – mathematicians, biologists, historians, social scientists and historians of the sciences – along a three centuries European journey, meeting Süßmilch, Condorcet, Laplace, Fourier, Girou de Buzareingues, Poisson, Quetelet, Darwin, Düsing, Gini, Halbwachs or Fisher.

After a deconstruction of the past and present conditions of scientific understanding of human sex-ratio at birth, the authors are proposing a reconstruction of the dynamics of the phenomenon based on stochastics. This is an attempt in renewing our links with the oldest traditions of scholarly thinking, but too a kind of ‘well-tempered’ reflexivity in today’s work of objectivization.

Appendixes get to the reader the first expression of a trend of the sex ration at birth to adjust towards balance between the sexes by Condorcet in 1793-1794; a comparison of passages that Darwin devoted in 1871 and 1874 to similar issues; and a sociological attempt of Halbwachs published in 1933.

AUTHOR AND CONTENT OF VOLUME 5

Measuring variations

Causality and causal modelling in the social sciences

Author: Federica Russo, Centre for the Philosophy of Science, UCL (Belgium)

CONTENT

Philosophers have wondered long time in search for the ultimate concept of causation. Practising scientists are still in search of the statistical model that will deliver causal claims. In this book the social

science methodology is analysed with the philosopher's eye, and the philosophical literature is analysed with the scientist's worry of finding an operational notion of causality. The main result is the development of a rationale of causality as the measure of variation. This rationale breaks down the received view that sees in regularity and invariance the key notions for causality, and it conveys the idea that to test – i.e. to confirm or disconfirm – causal hypotheses, social scientists test specific variations among variables of interest. The notion of variation is shown to be embedded in the scheme of reasoning of probabilistic theories of causality, in the logic of structural equation models, covariance structure models, Granger-causality, Rubin's model, contingency tables, and multilevel analysis, and is also shown to be latent in the main philosophical accounts. Further, the rationale of causality as measure of variation provides significant insights about a number of epistemological and methodological issues, for instance, about the warranty of the causal interpretation of causal models, the levels of causation, and the interpretation of probability.

RESEARCH TEAM AND CONTENT OF VOLUME 7

NB by mistake, this sixth volume is numbered seventh

Complexity Perspectives on Innovation and Social Change

Research team directed by David Lane (University of Modena and Reggio Emilia and Santa Fe Institute), Denise Pumain (University of Paris I), Sander van der Leeuw (Arizona State University and Santa Fe Institute), and Geoffrey West (Santa Fe Institute).

Research team:

Hendrik Ammoser, Dresden University of Technology
 Paolo Bertossi, Università di Modena e Reggio Emilia
 Luis Bettencourt, Los Alamos National Laboratory, Santa Fe Institute, and Arizona State University
 Stefano Bonacini, Università di Modena e Reggio Emilia
 Anne Bretagnolle, University of Paris I
 Tim Evans, Imperial College London
 Davide Ferrari, University of Minnesota
 Björn Gehlsen, Dresden University of Technology
 Andrea Ginzburg, University of Modena and Reggio Emilia
 Benoît Glisse, Université Paris VI
 Paolo Gurisatti, Università di Trento
 Dirk Helbing, Dresden University of Technology, Collegium Budapest – Institute of Advanced Study
 Anders Johansson, Dresden University of Technology
 Carl Knappett, University of Toronto
 Christian Kühnert, Dresden University of Technology
 Stefan Lämmer, Dresden University of Technology
 David Lane, University of Modena and Reggio Emilia and the Santa Fe Institute
 Jose Lobo, Arizona State University
 Hélène Mathian, CNRS, Paris
 Robert Maxfield, Stanford University and Santa Fe Institute
 Fabien Paulus, University of Strasbourg
 Denise Pumain, University of Paris I
 Dwight Read, University of California
 Ray Rivers, Imperial College London
 Federica Rossi, University of Torino
 Margherita Russo, University of Modena and Reggio Emilia
 Lena Sanders, CNRS, Paris
 Roberto Serra, University of Modena and Reggio Emilia
 Luisa Sovieni, University of Modena and Reggio Emilia
 Céline Vacchiani-Marcuzzo, Université de Reims
 Sander Ernst van der Leeuw, Arizona State University, and the Santa Fe Institute
 Marco Villani, University of Modena and Reggio Emilia
 Geoffrey West, Los Alamos National Laboratory, Santa Fe Institute and Arizona State University
 Douglas White, University of California, Irvine, and the Santa Fe Institute

CONTENT

Our species is still very young by biological time scales, and it is too early to know if we represent the cutting edge of a biological success story, like cockroaches or dinosaurs, or a brilliant but ultimately failed and short-lived experiment in niche construction and destruction. In the mere 200,000 years of Homo Sapiens' story, and in particular in the 50,000 or so years since we began to accrue the accoutrements of culture like language, art and multi-component artefacts, members of our species have populated a vast extent of the earth's surface, exploited for their own purposes an ever-increasing share of the planet's biologically utilizable solar energy, in the last few centuries ravaged the stock of bioprocessed solar energy accumulated over millions of years, transformed minerals extracted from below the earth's surface into a huge variety of forms and new materials that satisfy what we regard as our needs, and increasingly concentrated the human population in urban spaces to which nearly all the raw materials necessary for human survival have to be imported from elsewhere.

How have we managed to accomplish so much so fast? To answer this question, we need a theory of innovation – how human beings generate new kinds of artefacts, new forms of social organizations, new patterns of interaction to provide new functionality. This book represents the results of four years of interdisciplinary research carried out by an international team of researchers designed to construct such a theory, based on ideas and techniques from the emerging sciences of complexity.

The research, carried out in the ISCOM (Information Society as a Complex System) project, was sponsored by the European Commission under the Future and Emerging Technology program of the Information Society Technology Directorate. In addition, the project received financial and organizational help from the Santa Fe Institute, the world leader in complexity sciences. Project researchers bring to bear expertise from a wide range of disciplines, including physics, computer science, statistics, geography, anthropology, archaeology, and economics. The research integrated modelling, case studies, empirical data analysis, and theory-building. The integration of network analysis, agent-based modelling, and scaling analysis with historical data breaks new methodological ground in complexity research.

FORTHCOMING VOLUMES

AUTHOR AND CONTENT OF VOLUME 8

History's Pathways

New Approaches to the Philosophy of History

Author : Daniel Little, University of Michigan-Dearborn

CONTENT

History's Pathways is an effort to provide an original contribution to fresh thinking about the philosophy of history. The title evokes some of the central insights of the book: the contingency and path-dependence of historical change. A system of paths develops as a result of human action in pursuing a variety of human purposes; thus paths reflect agency. But ultimately, human activities are constrained and guided by the network of paths that confront them; so "pathways" reflect structures as well. The book draws on Professor Little's prior work within the philosophy of social science, emphasizing the non-systematic nature of the social world. The social world is not a law-governed system of phenomena (along the lines of a Laplacean natural world). And the discovery of laws and regularities is not the central task of social and historical science. Instead, social explanations depend on finding middle-level causal mechanisms that produce social and historical outcomes – generally in conjunctural settings. The method and perspective of History's Pathways derives from Professor Little's view that philosophical questions – at least those having to do with the human sciences – are best explored through engagement with innovative and talented practitioners of the various social and historical sciences. The author makes sustained efforts to identify problems of theory and methodology as they arise in the actual historiographical reasoning of excellent historians and social scientists. Topics considered in the book include reflections on the task of the philosophy of history; the nature of historical causation; the role of causal mechanisms in historical change; debates over historical comparisons between Europe, Asia, and other parts of the world; the nature of social identities and social constructions; and the nature of the social ontologies we use in conceptualizing history. Historians as diverse as E. P. Thompson, Thomas Hughes, Charles Sabel, Chuck Tilly, Philip Huang, Simon Schama, and James Lee are discussed along the way; and causal mechanisms as diverse as transportation systems, social practices, and social networks are discussed in detail. The book is aimed at stimulating and advancing a reinvigorated study of the philosophical problems raised by historical change and historical knowledge – a new philosophy of history.

RESEARCH TEAM AND CONTENT OF VOLUME 9

Linking scholarship, policy and practice

Methodological choices and research designs for educational and social change

Research team directed by Lina Markauskaite (University of Sydney), Peter Freebody (University of Sydney), and Jude Irwin (University of Sydney)

Research team:

Tim Allender, University of Sydney
 Michael Anderson, University of Sydney
 Nigel Bagnall, University of Sydney
 Ardra L. Cole, University of Toronto
 Robin Ewing, University of Sydney
 Barbara Fawcett, University of Sydney
 Peter Freebody, University of Sydney
 Paul Ginns, University of Sydney
 Susan Goodwin, University of Sydney
 Susan Groundwater-Smith, University of Sydney
 Peter Goodyear, University of Sydney
 Debra Hayes, University of Sydney
 Jude Irwin, University of Sydney
 Ken Johnston, sociologist and educator
 Phillip Jones, University of Sydney
 Gary Knowles, University of Toronto
 Lina Markauskaite, University of Sydney
 Andrew Martin, University of Sydney
 Ruth Phillips, University of Sydney
 Peter Reimann, University of Sydney
 Richard Walker, University of Sydney
 Anthony Welch, University of Sydney

CONTENT

This book aims to provide readers with in-depth knowledge about research designs for “real world” problems. It particularly addresses the tensions between the academic rigour, policy and practice in social inquiry. The volume aims to become a compulsory reading for researchers, practitioners and graduate students on the choice of research methods in education and social change. It covers nine research methodologies and discusses in depth challenges, trends and methodological innovations relating to each. This book is co-written by 22 experts with extensive expertise in related methodological domains.

Background. Researchers in education, social policy, and social work face unique challenges in designing and conducting research that can contribute substantially to knowledge and simultaneously inform policy and practice. First, the disciplines informing education, social work and social policy draw on research approaches from many, often apparently incommensurable, disciplines of inquiry: psychology, sociology, policy studies, anthropology, history, information systems, critical theory, health sciences, linguistics, and so on. Collaboration across disciplines of inquiry has come to be

seen not only as a ‘good thing,’ but also as virtually a key feature of contemporary knowledge production.

Second, the increasing complexity of applied research contexts and end-users’ heightened expectations concerning the role of academic research in practice and policy formation have led some commentators to advocate for problem-based, outcomes-oriented, cross-disciplinary research. Their argument is that mixed or blended approaches are better adapted to the study of practical ill-structured, real-world problems.

Finally, for change-oriented projects, collaborations between academics and practitioners in participatory inquiries that combine investigation with action have become increasingly common, presenting particular social, professional, and institutional challenges, some of which may be realised in contests over design and method.

Amid this growing diversity of specialist interests and epistemological orientations, research designs and analyses need to retain their scholarly integrity, robustness and trustworthiness. Researchers, be they seasoned practitioners or beginning graduate students, face significant challenges in understanding the complexities of blended designs, and in applying them in ways that maximise impact on knowledge, practice, and policy.

Aims and niche. This edited book aims to address these aspects of the educational and social change literature by providing a collection of contributions that chart and analyse the conceptual and practical complexities of a variety of research designs, aiming to contribute to scholarship, policy and practice. It aims to engage readers in scholarly methodological debate on re-interpretations of some established research methods

as well as some contemporary research approaches that yet to gain general recognition.

In short, this book aims to be a contemporary *vademecum* for researchers, practitioners and graduate students on research methods for education and social change in today's world. It aims to increase their knowledge, understanding and critical application of these methods in their own research. In particular, the book aims to have its audience to appreciate the significance of how choices in method and analysis are deeply related to the particular kind of policy and activity fields that the research is aiming to influence. These choices need to be considered not only in light of available research traditions that often operate independently of one another, or that make decisive claims to validity, reliability, or credibility; rather, these choices need to be concerned as well with how they can be viewed in light of the contributions that different choices might have made to their target policy and activity fields.

Structure. The book is structured around four major themes 1) setting out epistemic and historical foundations and introducing issues and debates; 2) describing and critiquing emerging research approaches for innovation and action-focussed inquiry; 3) reconsidering and adapting established qualitative and quantitative research approaches to new political and practical contexts; 4) integrating digital technologies and networks into educational, social work and social policy research.

RESEARCH TEAM AND CONTENT OF VOLUME 10

Modelling Written Communication A New Systems Approach to Modelling in the Social Sciences

Author : Deirdre Pratt, Durban University of Technology

CONTENT

This work offers an alternative approach to current postmodern approaches to composition by taking a critical realist stance in an attempt to arrive at the "essence" of written communication, the purpose being to inform a practical application, a computerised writing tutor. A knowledge of the commonalities and variables in composing was required so that the application could be customised to fit various learning contexts. Using Robert Franck's seminal work on modelling, and working from a schema of composing describing the behaviour of experienced writers, the author formulated a theoretical model of writing, consisting of an architecture of functions constituting the prerequisites for effective communication. The discovery of the system of communicative functions made it possible to formulate an applied model of writing in the form of a composing algorithm. Adding an input option to the algorithm showed composing as a systemic social process with intra- and extra-systemic variation, accounting for the idiosyncratic nature and infinite variation of real-life composing. The practical advice in the earlier schema combined with the algorithmic structure of the composing system was used to develop a working prototype of a writing tutor program which could be customised to suit not only different contexts but individual learner needs.

This work establishes composing as a type of communicative interaction, and shows the essential dynamism of writing in ways which the primarily text-based postmodern approaches do not. It also shows how composing, while systemic, is socially permeated at all stages. The writing tutor program models composing for the learner in its structure and content, and illustrates both the systemic and the socially-situated nature of writing. The modelling process used offers an exemplar of a systems approach to modelling in the social sciences. The system of communicative functions offers insights into the connection between writing, learning and research, and could be said to be a generalisable interactive principle with application in other areas of the social, and perhaps even the natural sciences.