

M odèles et simulations dans l'enquête scientifique : variétés traditionnelles et mutations contemporaines

Franck Varenne (Université de Rouen)

MODÉLISER ET SIMULER EN SCIENCES consiste en l'utilisation de modèles et de simulations dans le cadre d'une enquête de connaissance¹. Dans un tel contexte, le but visé n'est pas prioritairement esthétique – comme pour l'art du portrait ou de la sculpture – ni non plus d'agrément, comme c'est le cas aujourd'hui de la majorité des simulations utilisées dans les jeux vidéos. Les verbes « modéliser » et « simuler » nous renvoient donc dans un premier temps aux substantifs « modèle » et « simulation ». En quoi consiste un modèle ou une simulation ? Comment les définir ou, au moins, les caractériser ? Cela paraît difficile. Or, comment donner une cohérence à cet ouvrage s'il nous est impossible d'invoquer autre chose qu'une unité purement verbale derrière les mots-clés qui figurent dans son titre et qui sont constamment mobilisés dans ses chapitres ? Davantage : comment les définir indépendamment même de la pratique et de la visée de connaissance précises dans lesquelles ils s'inscrivent chaque fois : nous sommes donc dangereusement reconduits des substantifs aux verbes, des modèles à la pratique de modélisation.

En première analyse, toutefois, il nous paraît que l'on peut raisonnablement sortir du cercle en remarquant que, *dans l'acte d'utiliser un modèle ou une simulation scientifique, il s'agit toujours de manipuler, de modifier ou de construire un objet, vivant ou non, matériel ou formel, en vue de répondre à un certain nombre de questions relevant d'une enquête de connaissance*. Mais cette carac-

[1] Voir page 49 l'annexe « Quelques repères bibliographiques additionnels ».

térisation n'est-elle pas trop large ? Dans *Cyrano de Bergerac* de Jean Rostand, Cyrano se sert de Christian pour connaître les sentiments de Roxane : cela fait-il de Christian un modèle de Roxane au sens où nous l'entendons ici ? Christian y est un intermédiaire mais pas un modèle. On lit certes souvent que les modèles sont, à certains égards, des intermédiaires. Nous y reviendrons. Mais avec ce cas limite étrange, nous voyons que nous ne pouvons en rester à une caractérisation aussi générale, d'autant plus qu'on n'y trouverait nul moyen de distinguer clairement entre modèle et simulation, ce qui est aussi un des apports majeurs que l'on peut légitimement attendre de cet ouvrage.

Par conséquent, dans cette introduction, afin d'augmenter les chances que la lecture des contributions de ce panorama collectif soit réellement profitable à celui qui s'y consacre et, en particulier, afin que la diversité des approches soit reconnue, comprise et appréciée, nous ne reculerons pas devant la tâche de proposer quelques distinctions conceptuelles et quelques classifications susceptibles d'éclairer le lecteur, au moins donc une grille de lecture raisonnée et non, bien sûr, une épistémologie des modèles tout armée ou définitive. Cette grille de lecture se voudra la plus ouverte possible. Nous ne l'avons d'ailleurs nullement imposée aux contributeurs lors de la communication du projet éditorial. Mais, au vu des contributions que nous avons pu réunir, et qui constituent un ensemble conçu comme pertinemment articulé et cohérent et non comme une simple juxtaposition d'exemples disciplinaires, nous croyons qu'elle pourra se révéler un point de départ utile pour le lecteur.

Conformément à cet objectif donc, dans les sections suivantes de ce chapitre introductif, nous allons d'abord caractériser plus précisément les modèles scientifiques, puis leurs différents types, puis les simulations et leurs variétés. Les différents rapports entre modèle et simulation seront ensuite évoqués. Pour finir, nous proposerons non pas un résumé des contributions², mais un essai de caractérisation raisonnée de leurs différents types.

1 | Les modèles scientifiques³

Au lieu de commencer à caractériser les modèles en partant de leurs natures, de ce dont ils sont faits ou même de leurs principes (c'est-à-dire de ce qui leur

[2] On trouve les résumés rédigés par les auteurs en fin d'ouvrage. (Ndé.)

[3] Ce passage s'inspire de la caractérisation des modèles et de leur classification en vingt types tels que nous les avons présentés au colloque de décembre 2008 intitulé « Modèles : jusqu'où va le réel ? » et organisé par la Société française

permet d'assurer la fonction que nous en attendons), nous allons ici partir délibérément de leur seule fonction. Nous verrons qu'elle est déjà assez difficile à cerner. Ensuite seulement, nous évoquerons leurs natures et leurs principes eu égard à cette fonction.

1.1 | Fonction générale

En associant la caractérisation de la fonction des modèles scientifiques telle qu'elle est donnée par Marvin Minsky en 1965⁴ à celle plus récemment proposée par Mary S. Morgan et Margaret Morrison dans la préface de leur ouvrage collectif⁵, on peut parvenir à caractériser la fonction d'un modèle scientifique dans une enquête de connaissance de manière suffisamment large et consensuelle. Un modèle aurait ainsi essentiellement une fonction de médiation disent Morgan et Morrison. Issue au départ d'une fonction de médiation entre l'expérience et la théorie, cette fonction de médiation se serait ensuite généralisée à d'autres rapports de médiation. Nous ajouterions ici qu'un modèle n'est pas n'importe quel objet médiateur. Il existe en effet des objets médiateurs qui font écran à ce qu'il médiatise. En réalité, un modèle scientifique propose une médiation qui doit en même temps avoir la fonction d'une *facilitation* dans le cadre d'une enquête cognitive, enquête qui prend la forme d'une question assez spécifique comme nous l'apprend par ailleurs la caractérisation de Minsky. Un modèle, c'est donc *un objet médiateur qui a pour fonction de faciliter une opé-*

de physique. Une première présentation publiée de cette classification a été faite dans Franck Varenne, *Modéliser le social*, Paris, Dunod, 2011, p. 166-174. Ici, nous l'avons modifiée et mise à jour. D'autres caractérisations ou classifications instructives – ainsi que des réflexions sur les rapports entre lois, théories et modèles ainsi qu'entre modèles – sont bien entendu également proposées dans toutes les contributions de ce collectif. On en trouve plus particulièrement dans les chapitres d'Alain Franc, Giuseppe Longo, Evelyn Fox-Keller, Bernard Walliser, Sébastien Dutreuil, Pierre-Alain Braillard, Frédéric Masset, Hervé Douville et Édith Perrier.

[4] « Pour un observateur B, un objet A* est un modèle d'un objet A, dans la mesure où B peut utiliser A* pour répondre à des questions qui l'intéressent au sujet de A » ("Matter, Mind and Models", *Proc. of IFIP Congress*, 1965, p. 46 @). Pour montrer son caractère influent en méthodologie et épistémologie appliquée, on peut faire remarquer que cette caractérisation large est reprise telle quelle aussi bien par la contribution de Hugues Berry et Guillaume Beslon que par celle de Raphaël Duboz et Jean-Pierre Müller.

[5] Mary S. Morgan & Margaret Morrison (eds), *Models As Mediators*, Cambridge, Cambridge University Press, 1999.

ration cognitive dans le cadre d'un questionnement orienté, opération cognitive qui peut être de cognition pratique (manipulation, savoir-faire, apprentissage de geste, de techniques de conduites, etc.) ou théorique (réculte de données, formulation d'hypothèse, hypothèse de mécanismes théoriques, etc.).

1.2 | Fonctions spécifiques

À partir d'une telle caractérisation de leur fonction générale, les fonctions spécifiques des modèles peuvent être déclinées au regard des différents *types de médiation facilitante* qu'ils peuvent chaque fois autoriser dans le cadre d'une enquête de connaissance.

1.2.1 | Faciliter une expérience

Dans ce contexte de modélisation pour l'expérience, un modèle facilite l'expérience au sens où il facilite l'accès à ce qui peut nous être présenté ou représenté de manière sensible, imaginable, mesurable ou détectable. Il sert alors de terrain substitutif d'observation ou d'expérimentation, terrain lui-même réel ou seulement imaginatif. Quand un modèle de ce type opère seulement en pensée (avec des hypothèses de continuité sur le comportement physique des propriétés), il peut directement être conçu comme une expérience de pensée⁶.

- 1) Rendre accessibles à la *sensibilité* les *propriétés* du système cible qui ne sont pas, ou plus, ou pas encore accessibles par les sens : prototypes, maquettes d'espèces disparues, écorchés, maquettes de nanorobots.
- 2) Faciliter l'*expérimentation* en la déplaçant sur un *objet substitutif*: modèles expérimentaux en biologie (drosophile, porc, souris,

[6] Ainsi, Galilée procède-t-il à un passage à la limite lorsque, par une expérience de pensée reposant sur une hypothèse de continuité, il cherche à prouver que la différence de vitesse de chute libre de deux objets de masses différentes s'annulerait dans le vide parfait: il observe empiriquement que moins le milieu est dense, moins cette différence de vitesse est importante. Et il postule cette continuité pour dire, qu'à la limite, c'est-à-dire dans le vide (qu'il ne peut expérimentalement réaliser), on *observe en pensée* non pas seulement l'amoinissement *mais* l'annulation même de cette différence. Voir Galileo Galilei, *Discours concernant deux sciences nouvelles* [1638], traduction Maurice Clavelin, Paris, PUF, 1995, p. 58 (p. 113 dans l'édition italienne officielle). Pour une enquête fouillée sur les expériences de pensées, voir Roy A. Sorensen, *Thought Experiments*, Oxford, Oxford University Press, 1992.

- Arabidopsis*, etc.), modèles physiques analogiques⁷ (maquettes, prototypes, etc.).
- 3) Faciliter la *mémorisation* de ce qui l'est difficilement : par des tableaux, graphes, systèmes visuels symétriques, mélodies ou autres techniques des arts de la mémoire.
 - 4) Faciliter l'*accès aux données* en servant d'instrument de *présentation condensée de l'information* contenue dans le système cible (outil de résumé, grille de lecture abrégative) : moments statistiques (moyenne, variance, etc.), identification de paramètres de lois statistiques connues. Les méthodologies de l'analyse de données d'inspiration empirico-inductiviste (comme celle de Jean-Paul Benzécri⁸ en France) considèrent que la présentation statistique des données n'est pas encore la surimposition d'une forme, donc d'un modèle au sens fort de « moule » formateur, sur les données mais seulement une focalisation active et particulière sur elles. Elle est une façon de présenter sélectivement les données sans les déformer, ni les informer, ni donc les modeler au sens fort.

1.2.2 | Faciliter une formulation intelligible

- 5) Faciliter la *compression de données* pour l'élaboration d'un *modèle de données*. Les méthodologies de l'analyse des données et de l'analyse multivariée d'inspiration hypothético-déductiviste (d'origine surtout anglo-saxonne depuis Ronald A. Fisher : Patrick Suppes) considèrent que toute loi statistique hypothétique permettant de condenser une ou des séries de données est déjà une manière de *modeler activement* les données. C'est toujours selon ce point de vue un *modèle de données* au sens fort. On voit que la différence entre la fonction 4 et la fonction 5 est une question de nature philosophique. Elle peut toutefois avoir des conséquences méthodologiques⁹.

[7] Sur les modèles d'ingénieurs destinés à la « monstration des effets », voir Hélène Vérin, *La Gloire des ingénieurs. L'intelligence technique du XVI^e au XVIII^e siècle*, Paris, Albin Michel, 1993.

[8] Statisticien français, inventeur d'une importante méthode d'analyse des données, l'analyse factorielle des correspondances. (Ndé.)

[9] Notamment en matière de justification par les praticiens eux-mêmes de l'emploi des modèles en sciences sociales. En sociologie quantitative, par exemple (voir Varenne, *op. cit.*, 2011, p. 143-146), ce débat se poursuit aujourd'hui sur le terrain

- 6) Faciliter la *sélection des types d'entités*, des *types de propriétés*, des *types d'états* ou des *types de processus* du système cible jugés pertinents pour l'enquête scientifique sur le système cible : *modèles conceptuels*, *modèles de connaissance*, *ontologies* du domaine d'intérêt.
- 7) Faciliter la *reproduction par des moyens intelligibles, déductifs ou de calcul* des structures de données observables, mesurables ou détectables de certains phénomènes affectant le système cible : *modèles phénoménologiques*, modèles pour la prédiction. Un modèle intelligible n'a en effet pas besoin d'être explicatif pour être prédictif. La détection de corrélations statistiques entre certaines séries de données passées permet de faire des prédictions (à base donc inductive) qui se révèlent le plus souvent correctes. L'instrumentalisme (celui de Milton Friedman par exemple en économie) considère qu'un modèle doit en rester à cet objectif de n'être qu'un instrument commode de prédiction.
- 8) Faciliter une explication en facilitant l'*explicitation intelligible d'un mécanisme* supposé à l'œuvre dans le système cible en explicitant les interactions causales supposées au moyen de représentations symboliques (ou imagées) des *éléments entrant en interaction causale* ainsi que des *processus d'interaction* eux-mêmes¹⁰. Expliquer un phéno-

entre, d'une part, les partisans d'une approche inductive forte qui considèrent que l'analyse géométrique des données sociales n'est pas encore une façon de modéliser les données et d'y insérer indûment une hypothèse et, d'autre part, les partisans d'une conception de l'analyse statistique qui la voit comme appartenant dès le départ à la boîte à outils des modèles structurants, donc jamais véritablement dénués d'hypothèse théorique. Dans l'ouvrage cité, nous avons essayé de montrer que les textes séminaux de Fisher peuvent donner raison aux uns comme aux autres, suivant ce que l'on voudra bien entendre par analyse de données. Ce débat méthodologique irrésolu n'est bien sûr pas sans lien avec la question philosophique des interprétations tantôt réalistes tantôt épistémiques des probabilités [voir Thierry Martin, «De la diversité des probabilités», in Jean-Jacques Kupiec et al. (dir.), *Le Hasard au cœur de la cellule*, Paris Éditions Matériologiques, 2011, chapitre 2 @ (Ndé.)]. Mais il ne s'y réduit pas.

[10] Nous nous permettons d'ajouter ici le commentaire que nous faisons à ce sujet dans Varenne, *op. cit.*, 2011, p. 168 : « Si ce modèle d'interaction est explicité au moyen d'images, il faut que celles-ci soient suffisamment standardisées : sinon notre attention est attirée sur la singularité des images et non sur leurs interactions. Et l'on retombe alors dans l'art de la mémoire, comme c'est le cas

mène par l'explicitation des mécanismes qui en sont la cause signifie ici « déplier » (comme l'étymologie du verbe « expliquer » l'indique), c'est-à-dire désintriquer et rendre explicite à la fois les éléments et les interactions entre eux.

- 9) Faciliter la *compréhension d'un phénomène affectant le système cible en facilitant l'intellection* – c'est-à-dire une capacité de représentation conceptuelle permettant un usage inférentiel, déductif ou calculatoire – d'un principe général supposé contraindre les états ou les variables de ce système, ainsi que sa dynamique, en indiquant une loi formelle abrégée ou synthétique portant sur des variables agrégées du système ou des états globaux (ou macroscopiques) plutôt que sur des éléments supposer le composer. Les *modèles mathématiques équationnels de compréhension*, historiquement souvent de nature intégro-différentiels, se voient traditionnellement conférer ce statut. Beaucoup de modèles mathématiques théoriques sont de ce type en

de tous les modèles explicatifs de type mécaniste en physique, biologie et sciences sociales. C'est aussi le cas du modèle en double hélice pour l'ADN selon Watson et Crick : il est suffisamment stylisé et on y voit donc bien comment la réplication de l'ADN peut mécaniquement (*i.e.* par *mouvements simples et répétitifs*) opérer. C'est aussi le cas des modèles simples de l'individualisme méthodologique en sociologie, ou de l'acteur rationnel en économie, qui tous s'inspirent au départ de modèles mécanistes de la physique. Il est à noter que la standardisation des images ou des symboles n'est plus une contrainte restrictive lorsque ce modèle d'interaction est supporté et géré par un ordinateur : il devient alors un *modèle computationnel*. Car les symboles, les images (ou représentations iconiques) des éléments en interaction sont pris en charge, dans leur diversité même, par la mémoire de l'ordinateur. Et l'utilisateur peut alors se concentrer sur le résultat de leurs interactions. Dès lors, en quoi est-ce encore une "intelligibilité" que l'ordinateur nous donne par là, si on lui délègue cette *activité d'interaction* sur ces symboles ou images, c'est-à-dire si on ne l'effectue plus nous-même, même par symboles interposés, dans notre propre esprit ? Un certain nombre de chercheurs accordent ainsi peu de poids à cette procédure nouvelle de traitement délégué de symboles ; d'autres, au contraire, considèrent que c'est une nouvelle manière d'*expliquer*, en sciences sociales, qui nous est offerte, comme Joshua Epstein dans son ouvrage *Generative Social Science* (Princeton, Princeton University Press, 2006). » On voit que l'on touche ici à la question des frontières entre la visualisation, la conceptualisation ou l'explication supposées traditionnelles d'une part, c'est-à-dire centrées sur le fonctionnement d'un cerveau biologique « naturel » ou, en tous les cas, faiblement instrumenté, et la visualisation, conceptualisation ou explication que l'on pourrait dire « augmentées » par machine, d'autre part.

physique, mais aussi en dynamique des populations par exemple ou dans certaines théories générales de la morphogenèse : théorie reposant sur des principes d'optimalité ou variationnels, thermodynamique des systèmes ouverts dissipatifs, synergétique, théorie des catastrophes, etc.

1.2.3 | *Faciliter une théorisation*

Par contraste avec un modèle, nous définirons une *théorie* comme un système symbolique à visée de connaissance qui permet 1° de formuler, d'interpréter, de coordonner et de combiner dans un langage formel ou non des représentations d'entités, de propriétés et de processus, entités, propriétés et processus jugés élémentaires ou fondamentaux et supposés caractéristiques de tout un domaine donné, 2° qui permet ensuite de comprendre ou expliquer par raisonnement, par déduction ou par calcul l'ensemble – ou tout un secteur – des phénomènes se manifestant dans ce domaine. Un tel système ne naît pas d'un seul coup. Il nécessite des étapes d'élaboration mais aussi des instruments qui permettent l'exercice des propriétés qu'on en attend. Les modèles interviennent à ce stade de diverses manières.

- 10) Faciliter *la première formulation d'une théorie*. Un tel modèle permet par exemple de proposer des schémas explicatifs simplifiés, à portée d'abord locale et prenant la forme de règles ou de systèmes déductifs ou calculatoires simples. Il se cantonne souvent à la mise en ordre d'un ensemble de « contraintes particulières sur des interactions¹¹ ». Le modèle de la rationalité ordinaire de Raymond Boudon permet ainsi d'expliquer dans un premier temps quelques phénomènes sociaux ciblés. Mais il tend ensuite, selon son auteur, à mener à une authentique théorie de la rationalité ordinaire¹² en nous mettant sur la piste de l'explicitation d'axiomes fondamentaux jusque-là inaperçus.
- 11) Faciliter *l'interprétation d'une théorie*. Les modèles de Boltzmann en théorie des gaz et certains modèles de Maxwell en électromagnétisme avaient pour fonction de rendre plus visualisables (en termes d'« images

[11] Selon l'expression de Pierre Livet dans « Essais d'épistémologie de la simulation multi-agents en sciences sociales », in Frédéric Amblard & Denis Phan, *Modélisation et simulation multi-agents. Applications pour les sciences de l'homme et de la société*, Paris, Hermès, 2007, p. 193-218.

[12] Raymond Boudon, *La Rationalité*, Paris, PUF, 2009. Selon Boudon, cette théorie visera elle-même à étendre et assouplir la théorie classique de l'acteur rationnel.

mentales» comme l'écrivait Boltzmann, qui suivait en cela Hertz) le fonctionnement même des équations mathématiques. Les conceptions sémantiques des théories, que l'on ne peut qu'évoquer ici¹³, ont mis à l'honneur et ont essayé de systématiser et surtout de rendre plus rigoureux ce recours aux modèles pour l'interprétation d'une théorie. De façon générale, un modèle y est conçu comme un système réglé de représentations d'entités, entités dont la nature peut être dite plus concrète ou plus proche de celles des observables que les entités théoriques (d'où sa filiation avec la conception des modèles de théorie conçus d'abord comme images mentales).

- 12) Faciliter l'*illustration d'une théorie*. Une théorie peut en illustrer une autre en en devenant un modèle qui en instancie les relations théoriques principales, mais pas toutes. Maxwell a considéré que c'était aussi un des rôles des modèles par rapport à la théorie. Une théorie peut ainsi être le modèle d'une autre en ce qu'elle en est très exactement une *illustration*. Une illustration n'est pas un exemple¹⁴ : la théorie modélisante n'a pas à dénoter des entités de même nature que la théorie modélisée¹⁵. Une illustration se fonde seulement sur des *analogies formelles*, c'est-à-dire des identités ou similitudes formelles entre des rapports internes à chacune des deux théories formelles. Une illustration a pour fonction épistémique de marquer l'esprit et de l'outiller pour le rendre ensuite à même d'utiliser une théorie générale *déjà donnée*, alors que l'exemple est une structure d'où l'esprit part pour arriver ensuite à concevoir la théorie qu'il exemplifiera (par induction) et qui, comme telle, n'est *pas*

[13] Voir à ce sujet les synthèses des ouvrages suivants : Carlos Ulises Moulines, *La Philosophie des sciences. L'invention d'une discipline*, Paris, éditions Rue d'Ulm, 2006 ; Marion Vorms, *Qu'est-ce qu'une théorie scientifique ?*, Paris, Vuibert, 2011 ; Varenne, *op. cit.*, 2012.

[14] Un des textes de base à ce sujet se trouve dans Chaïm Perelman & Lucie Olbrechts-Tyteca, *Traité de l'argumentation* [1958], 6^e édition, Bruxelles, Éditions de l'Université de Bruxelles, 2008, p. 471-488.

[15] Dans ce contexte, la différence souvent inaperçue entre exemple et illustration pourrait permettre de mieux comprendre les enjeux des débats autour de la question de savoir si la sociophysique apporte véritablement ou non un savoir sociologique. Voir Dominique Raynaud, « L'épistémologie sociologique confrontée aux avancées de la physique statistique », in Thierry Martin (dir.), *Les Sciences humaines sont-elles des sciences ?*, Paris, Vuibert, 2011, p. 53-70.

*encore donnée*¹⁶. Avec l'illustration, on cherche souvent à déceler des correspondances réglées entre des phénomènes de natures différentes comme ceux appartenant à l'électricité, d'une part, et ceux appartenant à la mécanique des fluides, d'autre part. Cela permet par exemple d'utiliser des méthodes de simplification ou de résolution déjà connues (par changement d'échelle, réduction du nombre de variables, etc.)¹⁷. C'est cette fonction d'illustration qui est utilisée lorsque certains modèles mécaniques analogiques servent à la résolution de théories d'objets étudiés par ailleurs en astrophysique¹⁸.

- 13) Faciliter le *test de la cohérence interne d'une théorie*. Une théorie ne doit pas mener à des affirmations contradictoires. Le fait d'instancier dans un modèle d'entités – même fictif – les conséquences jugées plus concrètes de ces affirmations théoriques permet de vérifier si elles peuvent être simultanément portées par une même entité : cela permet de vérifier en retour la cohérence de la théorie et de ses déductions. Cette fonction des modèles est essentielle pour les théories mathématiques et logiques.
- 14) Faciliter l'*applicabilité de la théorie*, c'est-à-dire ses liens de correspondance avec le terrain et les données. Même si pour certains empiristes logiques (dont Ernest Nagel), une théorie que l'on veut appliquer n'a à proprement parler besoin que de « règles de correspondances » entre entités théoriques et entités observationnelles, certains amendements plus récents de l'empirisme logique ont montré que les modèles, en tant que véritables construits intermédiaires et pas seulement comme collection de règles de traduction, avaient un rôle indispensable à jouer. À tel point que, pour Nancy Cartwright¹⁹ par exemple, seuls les modèles ont un contenu véritablement empirique et les théories – qu'elle identifie à des lois générales – ne sont pour elles que des guides conventionnels historiquement datés et facilitant l'expression de modèles.

[16] Perelman & Olbrechts-Tyteca, *op. cit.*, 2008, p. 481.

[17] Voir à ce sujet les analyses d'Étienne Guyon, « Modélisation et expérimentation », in Gilles Cohen-Tannoudji (dir.), *Virtualité et réalité dans les sciences*, Paris, Diderot Multimédia, 1997, p. 101-126. Voir en particulier la page 109.

[18] Voir par exemple Thierry Foglizzo *et al.*, "A Shallow Water Analogue of the Standing Accretion Shock Instability: Experimental Demonstration and Two-Dimensional Model", *Phys. Rev. Lett.* 108, 051103, 2012 @, et le chapitre de Thierry Foglizzo dans le tome 2 de *Modéliser & simuler*.

[19] *How the laws of physics lie*, Oxford, Oxford University Press, 1983.