

*La Noción de Modelo en las Ciencias Sociales*¹

MICHEL ARMATTE

Universidad Paris-Dauphine y Centre Alexandre Koyré

michel.armatte@dauphine.fr

El objetivo de este texto es trazar un cuadro histórico de las formas que ha adoptado la modelización matemática en las ciencias sociales durante el siglo XX, y más particularmente, en la econometría. Además presentamos el resultado de los trabajos que se han manejado durante los últimos decenios,² lo cual no es óbice para que en ocasiones tomemos una posición más personal, basada en investigaciones que hemos ido realizando durante más de una década sobre econometría, investigación operativa, modelización del cambio climático, etc.,³ y tengamos en cuenta sus dimensiones sociales.

El término modelo pudo ser ya utilizado en la antigüedad por los artesanos, los tallistas de piedra y los arquitectos, como testimonia la etimología de la

¹ Traducción de José María Arribas Macho. Con la autorización de Mathématiques et Sciences Humaines/Mathematics and Social Sciences. Ref.: Armatte, M. «La notion de modèle dans les sciences sociales: anciennes et nouvelles significations». Mathématiques et Sciences Humaines/Mathematics and Social Sciences n.º 172, 2005, pp 91-123.

² Estos trabajos sobre los modelos han sido en principio, cosa de epistemólogos y de especialista en lógica: puede hacerse una idea retomando los textos de los enciclopedistas (Andler, Mouloud..) o incluso los principales coloquios consagrados a Francia a la noción de modelo desde los años 1960 (Freudenthal, 1961, Delattre y Tellier 1979, Brissaud, Foré y Zighed 1990). La irrupción del estructuralismo en los años 1960 ha alimentado el debate entre matemáticos y lingüistas o antropólogos sobre la cuestión de los modelos (Levi. Strauss. TOM) Los historiadores de la ciencia han ofrecido una visión renovada de la noción de modelo inscribiéndose en un movimiento más amplio de matematización que ha permitido precisar la especificidad y la irrupción simultánea en los años 1920 (Israel, 1996) Las disciplinas han producido una historiografía de us formas de modelos, como la economía matemática y la econometría (Tinbergen, Haavelmo, Simon, Von Neumann, Forrester y más recientemente Bodkin (1995), Walliser 1994, Morgan 1990, Armatte 1995, Morgan y Morrison 1999. Diferentes escuelas de sociología de las ciencias inspiradas en los *Sciences studies* han pereferido sustituir la categoría *modelo*, muy marcada por una problemática cognitiva, por la categoría *modelización* que permite aproximarla a una práctica social en un campo científico (Bourdieu), a la antropología de laboratorio (Latour) a *inversiones de forma* (Thévenot) o a construcciones de convenciones. Ellos han enriquecido esta historiografía de los modelos con numerosos estudios de casos. M. Armatte y A.Dahan han publicado recientemente (2004) y largo artículo y un dossier en la Revue d'Historire des Sciences como resultado de un seminario de varios años sobre la cuestión de la modelización en las ciencias físicas y las ciencias sociales. Pueden verse también los trabajos recientes de Dupuy 1992,1994, Nouvel 2002, Bouleau 1999).

³ Para la econometría y la I.O. véase Armatte 1995,1996,1998, 2003, Armarte y Desrosières 2000. Sobre la cuestión de modelo, ver de un lado, los capítulos 2 y 3 de mi tesis de 1995, por otro lado, Armatte 2000 y 2003, y sobre todo, el dossier completo sobre modelización publicado por Armatte y Dahan en la Revue d'Histoire des Sciences 2005. El presente artículo es más una síntesis de estos trabajos, que una prolongación.

palabra. El término latino, *modulus*, designaba en el origen la medida arbitraria que servía para establecer las relaciones de proporción entre las partes de una obra de arquitectura. En la Edad Media este *modulus* se convierte en el *moule* francés, *mould* en inglés, *model* en alemán, *módulo* en español. En el renacimiento, el italiano *modello* da lugar al francés *modèle*, al inglés *model*, al alemán *model*, y al español *modelo*. En las definiciones de los diccionarios contemporáneos se pueden encontrar cinco clases de significaciones y de uso: el modelo como *referente* o prototipo a reproducir (el modelo del pintor), el modelo como *maqueta* de un dispositivo real (en el fundidor, en el arquitecto) el modelo como *tipo ideal* extraído de una población homogénea (un modelo de santidad, de candor, de belleza), el modelo como *icono* o *dispositivo mecánico* representando una idea abstracta (el modelo hidráulico de la circulación monetaria en Irving Fisher por ejemplo), o el *formalismo* lógico-matemático que representa un sistema, caso en el que estamos fundamentalmente interesados⁴. A pesar de lo imperceptibles que son los deslizamientos que hacen posible pasar de una significación a otra, vemos en las dos primeras, como en la etimología latina, el modelo como prototipo, mientras que en las tres últimas, el modelo es un tipo, una abstracción extraída de la realidad. Pero esta reversibilidad está ya apuntada por muchos autores: “modelo” *puede ser entendido como original y como copia, como arquetipo y como simple realización (...) y por cada tipo de significación, este equívoco permanece más o menos subrepticamente* nos dice Suzanne Bachelard. Vamos a ilustrar esto con la célebre figura del hombre medio de Quételet concebida, a mediados del siglo XIX, a la vez como modelo-molde (*modèle-moule*), sobre el cual los hombres han sido concebidos a priori, y como resultado de una operación de abstracción hecha a posteriori sobre una población para hacer emerger un tipo mediante el cálculo de las medias.

Centrándonos principalmente en el uso científico de la noción de modelo, y más precisamente en su forma matemática, nos situaremos en la última de estas acepciones para pasar inmediatamente a la cuestión esencial: La noción de modelo debe ser distinguida de todas las formas antiguas de “*matematización de lo real*”, por tomar una formulación de Giorgio Israël, que acompañó al desarrollo de las ciencias físicas y de las ciencias “morales”, desde el siglo XVII. Y si estamos de acuerdo en hacer esta diferenciación, ¿cuales han de ser los criterios que nos permitan caracterizar esta categoría de modelo como nueva y específica? La “geometría del azar” de Pascal, la geometría algebraica de Descartes, la matematización galileana de la caída de los cuerpos, la teoría newtoniana de la atracción universal, la “matemática social” de Condorcet, la aplicación laplasiana de la teoría analítica de las probabilidades a la mecánica celeste y a las cuestiones de población, el tratamiento matemático del equilibrio

⁴ Este panorama de significaciones del término “modelo” está sacado de trabajos de diferentes coloquios de la pre-guerra (Fredenthal 1961, Delattre y Tellier 1979, Brissaud 1990). Se ha convertido en un clásico como consecuencia de los textos de Bachelard 1979 y Hourya Sinaceur 1991, 1999)

económico de Cournot, luego Walras. Todos ellos han podido parecer *a posteriori* como formas de modelización, en el sentido de que a pesar de su diversidad epistemológica, se les puede aplicar a todos ellos una definición estándar de modelo: una *representación* de un dispositivo real mediante un sistema formal —por ejemplo un sistema de ecuaciones— que permite a la vez pensar este dispositivo, estudiar su funcionamiento y actuar sobre él para controlarlo o hacerlo evolucionar.

Existen poderosas razones, no obstante, para abstenernos de hacer tal retroproyección de la noción de modelo sobre esas formas históricas de matematización. La primera razón es de tipo nominalista: hablar de modelo en las ciencias físicas antes de 1860, en las matemáticas antes de 1900, o en las ciencias sociales antes de 1920, constituiría un anacronismo. Ni Pascal, ni Descartes, ni Newton, ni Laplace hablan de modelización para describir lo que hacen. La segunda razón de esta reticencia, que compartimos con los historiadores de la ciencia, es que la noción de modelo puesta en circulación tanto en física como en lógica matemática, descansa sobre las nociones de analogía estructural y de isomorfismo, que toman todo su sentido en el cuadro de un positivismo característico de la segunda mitad del siglo XIX, en el cual, la especificidad intrínseca de diferentes objetos científicos pierden terreno en beneficio de homologías de forma y de relaciones. Un tercer ingrediente que caracteriza muy particularmente la noción de modelo en las ciencias sociales del siglo XX, es la posibilidad de cuantificación de los fenómenos sociales, ya sea en los dispositivos de observación a gran escala que implican sistemas de información estadística, ya sea en los dispositivos experimentales en los que la invención puede remitirnos a la época de Boyle, pero que en las ciencias sociales, no alcanzan una dimensión importante hasta después de 1945. El cuarto ingrediente constitutivo de la noción de modelo es ciertamente el de la simulación y manipulación que toma importancia capital durante el siglo XX, en tanto que la sintaxis y la semántica de los modelos se acompaña de una pragmática, haciendo de estos instrumentos cognitivos, instrumentos sociales de la gestión y del gobierno de los hombres en la sociedad. Vamos a retomar todos estos diferentes aspectos, aunque sólo el primer criterio, el de la terminología, ya serviría para justificar que nuestra investigación no comience hasta finales del siglo XIX, y en el dominio específico de la física.

1. LA NOCIÓN DE MODELO EN FÍSICA

Ludwig Boltzmann, redactor del artículo “Model” en la décima edición de la Enciclopedia Británica define el modelo como una *representación tangible... de un objeto que tiene una existencia real o que es una construcción factual o mental*, y extiende el sentido de esta noción de los usos técnicos y artísticos —el modelo del fundidor o del escultor— a los usos científicos. Así afirma que los modelos en las ciencias matemáticas, físicas y mecánicas tienen mucha importancia:

Hace mucho tiempo que los filósofos han percibido la esencia de nuestro pensamiento en el hecho de que unimos a los objetos reales que nos rodean, atributos físicos particulares —nuestros conceptos— y que gracias a ellos intentamos señalar esos objetos en nuestro espíritu. Estas consideraciones eran tenidas en cuenta por los matemáticos y físicos, como estériles especulaciones, aunque han sido recientemente asociadas por Maxwell, Helmholtz, Mach, Hertz y muchos otros, al corpus completo de la teoría matemática y física. Según estos puntos de vista, nuestros pensamientos están respecto a las cosas, en la misma relación que los modelos respecto a los objetos que representan. La esencia de este proceso es la unión de un concepto, con un contenido definido, a cada cosa, pero sin que implique una completa similitud entre cosa y pensamiento; porque naturalmente no sabemos casi nada de la semejanza entre nuestra ideas y las cosas a las que las unimos. La naturaleza de esta semejanza reposa fundamentalmente en la naturaleza de la conexión, la correlación, siendo análoga a la que obtenemos entre pensamiento y lenguaje, entre lenguaje y escritura, entre sonidos musicales y notas, etc...

Boltzmann asocia este nuevo papel de los modelos en las ciencias “con los cambios que han tenido lugar en nuestras concepciones de la naturaleza”, es decir, el abandono de la tradición newtoniana, del mecanicismo y del realismo. Atribuye a Clark Maxwell un papel determinante en la puesta en cuestión del mecanicismo dominante y la explotación sistemática de las analogías físicas. Lamé había ya señalado en 1895 *la coincidencia remarcable que une las dos teorías (la del magnetismo y la del calor) hasta tal punto que una cuestión resuelta analíticamente por una de ellas, tiene inmediatamente la solución de otra cuestión correspondiente a la otra*⁵. Maxwell explicitó esta correspondencia y le dio un papel fundamental en física:

Por analogía física, entiendo este parecido parcial entre las leyes de una ciencia y las leyes de otra ciencia que hace que una de las dos pueda servir para ilustrar la otra.

La justeza de una ilustración científica viene de que los dos sistemas de ideas que se comparan son realmente análogos en la forma; o en otras palabras, dicha justeza procede de que las cantidades físicas correspondientes pertenecen verdaderamente a la misma clase matemática. Cuando esta condición se cumple, la ilustración no es simplemente cómoda para enseñar la ciencia de una manera agradable y fácil, sino que el reconocimiento de la analogía formal entre los dos sistemas de ideas conduce a un conocimiento de ambos más profundo que el que podría ser obtenido cuando se les estudia separadamente⁶.

Vemos así que el fundamento dado a la noción de modelo es a la vez el transporte analógico y el soporte matemático que permite identificar la analogía

⁵ G. LAMÉ, *Leçons sur les coordonnées curvilignes et leurs diverses applications* Paris, Mallet-Bachelier, 1859, p. IX, cité par S. BACHELARD, 1979.

⁶ JC Maxwe, *Scientific Papers*, Cambridge University Press, 1890, t. I, p. 156, t. II, p. 219.

estructural y automatizar este transporte. Aquí aparece la condición fuerte de la noción de modelo que la distingue de una simple matematización que va a ser escogida por Giorgio Israel para identificar en los trabajos de Van der Pol de los años 1920, los primeros modelos en el sentido moderno —en la circunstancia de un modelo de los latidos del corazón— de una forma matemática que circula entre numerosos dominios científicos.

Las “analogías mecánicas” de las que habla Boltzmann, son en primer lugar las de las maquetas de madera, metal o cartón, más tarde las de los sistemas de ecuaciones, que el padre Deum, en su física de 1906, atribuye a W.Thomson (1884)⁷. Duhem reconoce, no obstante que *el abandono de la preocupación lógica que pesaba en las antiguas teorías, la sustitución de modelos independientes de las deducciones rigurosamente encadenadas, asegura a las investigaciones del físico una flexibilidad y una libertad que son eminentemente fecundas en los descubrimientos*⁸. Pero indicando que sería mejor elegir directamente la teoría de una abstracción, testimonia a la vez el uso consagrado del término modelo, al tiempo que un cierto retraso de su epistemología respecto a la práctica y la teoría de los físicos de su tiempo. Boltzmann ve, por el contrario, una continuidad entre los modelos materiales y los modelos matemáticos: *una continuación y una integración de nuestro proceso de pensamiento, porque según estas concepciones, la teoría física es esencialmente una construcción mental de modelos mecánicos*.

Se refiere aquí explícitamente a una frase chocante de Heinrich Hertz: *nuestros pensamientos son a las cosas lo que los modelos a los objetos que representan*, y se puede señalar como hace Marcel Boumans que estas representaciones, denotadas por *Darstellung* en lugar de *Vorstellung*, se refieren a “esquemas conscientemente contruidos”, más que a las imágenes de los sentidos. El uso de modelos matemáticos, mejor adaptados a la descripción de relaciones entre cantidades y conforme a una fenomenología que privilegia la descripción en detrimento de la explicación, ha sido sistematizado por Kirshhoff Hertz y por supuesto, por Mach. *La Mécanique* de Mach se inscribe plenamente en esta óptica de la descripción, pero anticipa el movimiento como noción fundamental, mientras que la escuela energética abandona también la noción de materia por la de energía, como fundamento de la física. Boltzmann, que supo colocarse entre el dogma de la fenomenología y las numerosas abstracciones vehiculadas por el mecanismo, se declaraba incapaz de separar los hechos de sus representaciones y consideraba los modelos como *representaciones tangibles... de la más alta importancia para las ciencias matemáticas, físicas y mecánicas*.

⁷ Y más particularmente *al genio inglés donde el poder imaginativo puede ejercerse sobre una multitud de hechos concretos, aunque no puede tomar la teoría más que a través de un modelo (...) en el que el espíritu amplio y débil le da una extrema facultad para imaginar conjuntos muy complicados de hechos concretos y una extrema dificultad para concebir nociones abstractas y formular principios generales (...) y para los cuales, comprender un fenómeno es componer un modelo que imita ese fenómeno*. Pierre Duhem *La théorie de la Physique*, 1.^a edición, 1906, Chap. IV.

⁸ *Ibidem*.

Paul Ehrenfest, alumno de Boltzmann, es coautor con Tatiana Ehrenfest de un largo artículo sobre la Mecánica estadística en la Enciclopedia de Ciencias Matemáticas (1912)⁹, que pone de manifiesto el uso recurrente e importante de la noción de modelo¹⁰, asimilado a un “esquema conceptual”: *La interpretación cinética de un proceso aerodinámico, como cualquier otra explicación de un fenómeno físico, consiste en la representación de una secuencia observada de estados mediante un esquema puramente conceptual.*

La traducción por la Enciclopedia francesa dirigida por J.Molk toma la forma de un suplemento encargado a Borel (1915) que actualiza este artículo y pone de manifiesto el mismo uso: *La evolución hacia los estados más probables aparece, en efecto, no como una propiedad de un modelo particular, sino tal cual es realmente, como una propiedad estadística de la infinidad de modelos que corresponden al extremo de una fracción de segundo en un gas real.* La noción de modelo ha adquirido ya una posición central e irreversible en la física de comienzos de siglo.

2. LA NOCIÓN DE MODELO EN LÓGICA MATEMÁTICA

Alrededor de 1920, esta noción de modelo va a dominar la lógica matemática y la transición desde la física no es meramente formal. Hay muchas circunstancias históricas que van a facilitar este tránsito, en primer lugar, la crisis de los fundamentos de las matemáticas.

Las primeras axiomáticas de Pasch (1882) en geometría, de Peano (1889) en aritmética, y de Hilbert (1899) en geometría habían revelado problemas de inconsistencia y de interrogantes sobre la existencia simultánea de varias geometrías, la aparición de objetos “monstruosos” como las curvas discontinuas derivables, y las antinomias de la teoría de conjuntos de Cantor. Russell y Whitehead, pensaron facilitar en los *Principia* (1910-1913) una primera respuesta a esta crisis de fundamentación matemática mediante la lógica siguiente: los cinco axiomas de Peano son remplazados en Russell por una veintena de “proposiciones iniciales” completamente lógicas y de pura forma. La noción lógica de “tipo” que prohíbe la definición circular de un objeto por una clase de objetos que comprenden el llamado objeto, juega, por ejemplo ese papel. De esta forma, las matemáticas no tenían necesidad de contar con axiomas propios dirigidos a los objetos matemáticos, viéndose reducidos a una extensión natural de

⁹ Ehrenfest P. y Ehrenfest-Afanassjewa T., 1912, *Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften*, Teubner B. G. (ed) IV, 2: II, n.º 6, Leipzig, traducción de Borel : *Enciclopédie des sciences mathématiques pures et appliquées*, J. Molk (ed), 1915.

¹⁰ “El modelo de un gas consiste en n moléculas poliatómicas iguales entre ellas, teniendo cada una r grados de libertad. Una fase (cinética) del modelo en el periodo t es el conjunto de $2rn$ números por los cuales, la configuración y el movimiento de n moléculas es exactamente conocido (...). Los cambios de fase del modelo son definidos por las ecuaciones canónicas de Hamilton...” p.204.

las leyes y del dominio de la lógica. Un segundo proyecto para salir de esta disputa es el formalismo de Hilbert desarrollado durante los años 1920. Hilbert propone tratar la cuestión de la consistencia de una teoría matemática en el interior de una nueva disciplina, la metamatemática que establecerá las reglas de construcción y la derivación de fórmulas independientes de su contenido o significación matemática. La noción principal de esta matemática es la de *sistema formal*. Un sistema de este tipo descansa en 1) un alfabeto de símbolos, 2) una lista de reglas morfológicas y sintácticas de formación de fórmulas admisibles, 3) un conjunto de axiomas aceptados sin demostración, y 4) un conjunto de reglas de inferencia y de deducción.

La teoría (formalizada) es la continuación de fórmulas que resultan de axiomas y de demostraciones (teoremas). El sistema formal permite describir completamente un *cálculo* como el de las proposiciones o los predicados en lógica, pero puede igualmente

dar cuentas de la aritmética, de la geometría, o del juego de ajedrez, o de no importa que juego de signos. Hilbert creía que un sistema formal puede facilitar las pruebas de la consistencia (no-contradicción) y de la independencia de una teoría axiomática. Desde entonces, el formalismo prolonga la axiomática “haciendo presente mediante las reglas de la lógica *según las cuales* se razona lo que se había hecho anteriormente para los postulados *sobre los cuales* se razona: enunciarlos expresamente y en su totalidad”¹¹.

Bajo la presión de numerosas críticas, en particular de los realistas unidos a las significaciones de los objetos formales pero también de los institucionalistas, el enfoque formalista ha debido reforzar su programa limitándose a un fundamento “finitista” de las matemáticas, en el que la aritmética constituye el núcleo duro. El programa formalista ha buscado integrar la demostración matemática de la consistencia de una teoría en la teoría misma. Desgraciadamente el procedimiento inventado por Gödel de aritmetización de la sintaxis por proyección—consistente en representar proposiciones matemáticas relativa a un cálculo aritmético mediante fórmulas aritméticas de ese cálculo— que llega a sus dos famosos teoremas de incompletud, de 1931:

- a) una teoría aritmética formalmente construida como la de los *Principia* implica necesariamente enunciados imposibles de ser pronunciados;
- b) la coherencia de esta teoría no puede ser demostrada en el cuadro de esta teoría.

El programa de Hilbert choca, por tanto, con la imposibilidad de una formalización completa de diversos brazos de las matemáticas, y como dice Blanché: “hay que concluir que en el interior de una matemática axiomatizada hay verdad no probable”.

¹¹ Maurice Blanché, 1955, p. 59.

Es en este contexto cuando intervienen después de 1935 los lógicos del Círculo de Viena. Su programa de unificación de la ciencia sobre una base anti-metafísica era una prolongación lógica del positivismo empirista de Ernst Mach quien ocupaba la cátedra de filosofía de las ciencias inductivas de Viena que va a tener desde su creación en 1895 otros ilustres ocupantes como Ludwig Boltzmann (1902-1906), Adolf Stöhr (1906-1922) y Moritz Schlick (1922-1936). Dicho programa ha constituido el pivote institucional, sustituido, a veces por la Asociación E. Mach. El programa inicial del Círculo donde encontramos un manifiesto publicado en 1929 por Hahn, Neurath y Carnap¹² afirma:

Nosotros hemos caracterizado la concepción científica del mundo por dos determinaciones. Primeramente empirista y positiva. Solo existe el conocimiento que nos llega a través de la experiencia, que descansa sobre lo que nos es dado inmediatamente. De esta forma se encuentra trazada la frontera que delimita el contenido de toda ciencia legítima. En segundo lugar, la concepción científica del mundo se caracteriza por la aplicación de un cierto método, a saber, el del análisis lógico. El blanco del esfuerzo científico, la ciencia unitaria, debe esperarse de la aplicación de este análisis lógico a los materiales empíricos (Manifeste, p. 118).

Este trabajo, es en principio, un trabajo de depuración de la ciencia de sus “amalgamas metafísicas” Hay que “purificar los conceptos” como espacio, tiempo, sustancia, causalidad, probabilidad en física, para no hablar de entelequias biológicas y de otros falsos conceptos de las ciencias sociales. El método lógico asimila el edificio científico a una construcción lingüística en el que la base se hace de “enunciados protocolarios” en “correspondencia” con los hechos registrados, base sobre la que son construidos mediante reglas sintácticas coherentes enunciados no protocolarios. Desde 1930, Carnap construye una teoría sintáctica del lenguaje de la Ciencia (Carnap, 1934) independientemente de toda significación, que prolonga la gramática lógica del *Tractatus* de Wittgenstein y la matemática de Hilbert. Pero en 1935, bajo el efecto de los descubrimientos de Gödel y de los primeros trabajos de Tarski¹³, Carnap reconoce el frenazo de esta primera aproximación:

Todas las matemáticas pueden ser formalizadas, pero las matemáticas no pueden ser agotadas por un sistema; requieren una serie infinita de lenguajes siempre más ricos¹⁴.

Se convierte así a una teoría lógica nueva en la que la semántica formal va a relevar la prueba sintáctica y la noción formalizada, lógica, de modelo, se convierte en un concepto clave de la lógica matemática. La idea consiste en volver

¹² Cf. Neurath, (1929)

¹³ Tarski (1935)

¹⁴ Carnap, *The logical syntax of language*, 1964, p.222. Citado por Michel Combès en *Fondament des mathématiques*, PUF, 1971.

a la prueba exterior de consistencia de geometrías no euclidianas ya esbozada por Beltrami: otra geometría como la de Riemann se puede construir por homomorfismo entre el conjunto de sus axiomas y el de la geometría euclidiana; estas representaciones constituirían un modelo euclidiano de la geometría Riemanniana. La confianza puesta en la geometría euclidiana ofrece una especie de prueba relativa de la consistencia de otra geometría. Esta idea articulada mediante la lógica de los modelos formales conduce a lo que llegará a ser en los años cincuenta, fundamentalmente a través de los trabajos de Tarski, *la teoría de los modelos*. En esta teoría, un lenguaje L (o sistema formal constituido por un alfabeto A de símbolos y de fórmulas admisibles F) describe una colección de estructuras matemáticas S gracias a una correspondencia, término a término entre símbolos y fórmulas de L , de un lado, elementos y relaciones de S de otro, llamadas interpretación de L en S . S se llama modelo de un formalismo o subconjunto de fórmulas $F' \subset L$ si toda fórmula de F' es satisfecha en S . Si F' contiene todas sus consecuencias, se dice que es consistente, y si admite un modelo S , se dice que es una teoría. Una teoría es por tanto, un subconjunto consistente de fórmulas F' de L , parcialmente o totalmente interpretada por un modelo S .

Este enfoque semántico no ha jugado solamente un papel de refundación de la lógica, sino que ha permitido aperturas importantes en las matemáticas mismas, funcionando como un método. Partiendo de un primer modelo estándar (según el cual la inducción jugará un papel importante) se puede inducir una teoría formal en la que el modelo no es más que un representante, y buscar los otros modelos no-estándar posibles, ya sea por el mismo juego de axiomas, ya sea por la modificación de uno de los axiomas. Es por ello, o casi por ello, que la escuela creada por el colectivo Bourbaki ha funcionado como puede verse con el ejemplo de la teoría algebraica de grupos descrito en *L'architecture des mathématiques*: la adición de números reales, la multiplicación de números enteros y la composición de desplazamientos en el espacio ordinario han constituido tres modelos de una teoría más general que se obtiene reemplazando sus operaciones por una fórmula general (xTy) a la que no se atribuye ni significación ni otras propiedades que los tres axiomas independientes de asociatividad, de existencia de un elemento neutro, y de un inverso por todo elemento. Esto le permite a Bourbaki afirmar en el mismo texto que la axiomática asociada al formalismo lógico constituye “el sistema Taylor de las matemáticas”.

3. IRRUPCIÓN DE LA NOCIÓN DE MODELO EN CIENCIAS SOCIALES DURANTE LOS AÑOS 1930

El crash financiero de 1929 además de la crisis económica que siguió durante la primera mitad de los años 1930, han tenido consecuencias considerables sobre la economía real (paro, lock-out, inflación), y de rebote, sobre las políticas de inspiración keynesiana que han tratado de dar una respuesta en Estados

Unidos (New Deal) y en Europa. Pero su influencia ha supuesto también, considerables consecuencias sobre la metodología de la economía política, aún no transformada en ciencia económica. A lo largo de los años treinta aparecen nuevos centros de debate científico como *L'International Econometric Society* y su avanzada *Cowles Comisión*, que van a lanzar un programa de reducción del dualismo existente entre enfoques matemáticos hipotético-deductivo —bien reflejados por la revolución marginalista y la teoría del equilibrio general de Walras— y el enfoque inductivo de la estadística económica, planteado durante los años veinte como la descripción y la previsión de ciclos económicos con la ayuda de los barómetros económicos. El desenganche de los análisis empíricos relacionados con la teoría formalizada había conducido a un parón en el que la imposible previsión y gestión de la gran crisis había sido la prueba más concluyente, así pues los nuevos econométricos se dispusieron a trabajar por la integración de estos dos enfoques, y la herramienta por excelencia de esta integración iba a ser el modelo.

Uno de los primeros en demostrarlo fue el holandés Tinbergen, alumno de Ehrenfest que había realizado una tesis bajo su dirección con el objeto de aplicar a la economía el método de los modelos matemáticos que tanto éxito había tenido en la física estadística. Como muestra Boumans (1992), la transferencia desde la física se hace con la ayuda de las ecuaciones de Lagrange o de Hamilton, es decir, sobre la base de variables funcionales que se determinan por un principio de mínimos (conservación de la cantidad de acción) en el que el equivalente económico debe ser encontrado para cada problema, y el procedimiento se parece como dos gotas de agua a la construcción de un modelo no-estándar. En una segunda aproximación, Tinbergen construye lo que llama “esquemas”, inspirados a la vez, en esquemas conceptuales de la mecánica estadística de Ehrenfest, modelos de osciladores de ingenieros, o del principio impulsión-propagación de Ragner Frish ilustrado por su “modelo” del caballo en la báscula. No es sino en un tercer momento, cuando ya son célebres en los Estados Unidos, cuando Tinbergen produce los modelos macroeconómicos de las economías nacionales en los países. Formados por una veintena de ecuaciones contables y de comportamiento en las que la dinámica viene dada por la presencia de variables retardadas, el modelo se construye ecuación por ecuación con una base teórica muy vaga, y sobre todo, con un desarrollo estadístico de ajuste, mediante regresiones múltiples y correlaciones parciales. Finalmente se resuelve en una ecuación de las diferencias, donde las soluciones, bajo ciertas condiciones numéricas, son cíclicas. Tinbergen utiliza por tanto la palabra “modelo” por primera vez, y desempeñando enseguida un nuevo uso: la simulación de conflictos y de políticas económicas que interesaba a diferentes actores de la regulación económica como sindicatos, partidos, agencias gubernamentales, etc.. Con esta historia¹⁵, tenemos un continuo que va de la física a la econometría y en el que la noción de modelo se transforma y se precisa, para adoptar la forma que va a im-

¹⁵ Cf. Morgan (1990), Boumans (1992), Armatte (1995) para un relato más detallado.

ponerse en la ciencia económica. Todavía está lejos de la noción formal y lógica de modelo para adoptar una idea más empírica del objeto de simulación.

Incluso si la audacia de Tinbergen se ha juzgado, a veces, sospechosa, éste habría mostrado el camino al resto de economistas. Para no evocar más que la situación francesa, conviene hacer notar que Tinbergen dio con frecuencia conferencias en el marco del Centre Polytechnicien d'Études Économiques¹⁶, órgano del movimiento X-Crise que debatía arduamente las cuestiones de reforma de la metodología económica en los años 1930¹⁷. Divisia, jefe de fila de los ingenieros economistas y cofundador de la Sociedad Econométrica, le cita en la conferencia de 1933. Huber se refiere largamente a sus trabajos de 1935¹⁸, Gibrat le cita en su crónica sobre la econometría y publica el estudio sobre el modelo holandés de 1937 en su colección "impasses économiques". Los hermanos Guillaume utilizan una tecnología de modelos que podríamos considerar prestada de Tinbergen si no fuera anterior: desde su primera obra *Sur les fondements de l'Économie rationnelle* (1932) y en el n.º 1 del Boletín (1932-1933), este enfoque se pone ya de manifiesto. En la primera parte de *L'Économie rationnelle* publicada en 1937 en Hermann, expone largamente las ventajas de una investigación de las propiedades del sistema económico con la ayuda de "pequeños modelos" que se inspiran explícitamente en Volterra (1931), en Bohr, en la hidráulica y en la cartografía de Jean Rostand, así como en Bridgman, inventor del operacionalismo. La ventaja es la simplificación de mecanismos, pero sobre todo, la definición precisa y operacional de conceptos de base, una preocupación que comparte François Divisia¹⁹.

No obstante, los parámetros de estos modelos reducidos permanecen desconocidos, o conocidos por el orden de tamaño, y los modelos de los hermanos Guillaume nunca han sido verificados empíricamente. El "principio de conservación del valor" que colocan en la base de la noción de equilibrio, y que explotan matemáticamente, es el análogo del principio de conservación de la energía en física. Su desarrollo, como el de Jean Ullmo en las *Recherches sus l'équilibre économique*²⁰, se inspira en principio, en la física matemática, antes de volver hacia una "modelización" más empírica, según una evolución similar a la de Tinbergen:

Entre las hipótesis plausibles, la economía clásica admitió muy pronto la que parece imponerse muy pronto, a saber, la maximización (sic) de ciertas

¹⁶ Conferencia del 9 de junio de 1938 sobre "El método de la correlación múltiple" aplicado al curso de acciones. No habla todavía de "modelo", sino de un "sistema de relaciones que da una imagen muy general de la economía americana"

¹⁷ Cf. Armatte (1998)

¹⁸ Actas de la sesión del 13 de diciembre de 1935. Boletín del CPEE.

¹⁹ Divisia decía lo siguiente: *comprender un fenómeno según ha dicho Sir W. Thomson es poder establecer su modelo mecánico. Y esta fórmula muy general parece poder aplicarse también a los problemas económicos si queremos dale a la expresión de mecanismo un sentido completamente general* (REP, 1932)

²⁰ Ullmo J. (1938)

cantidades económicas: el beneficio para el empresario, el salario para el asalariado, etc.. Entonces el problema del equilibrio se convertirá en un problema de máximos simultáneos, es decir, de máximos asociados. Es a la Mecánica a la que debemos, igualmente, los métodos que resuelven estos problemas, o mejor, a donde ha sido conducida para maximizar ciertas funciones importantes como los potenciales y las funciones de fuerzas. Al trasplantar estos modos de pensar a la teoría de intercambios, los economistas buscan con absoluta naturalidad formar una función análoga a la energía potencial mutua de un sistema de partículas, es decir, de un conjunto de individuos(..). La confrontación con la experiencia no ha dado más que resultados decepcionantes, esta teoría matemática se ha convertido en el punto de partida de la doctrina del liberalismo económico: de fenomenológica, la teoría ha pasado a ser normativa. M. Ullmo estima que la economía política tiene derecho a ser normativa, pero debe serlo sin ambigüedad. Por el contrario, ella no sabría determinar el estado deseable partiendo de hipótesis no verificables (..) Así el autor no trata de construir una función —una acción siguiendo el lenguaje de los mecánicos— en el que los extremos proporcionarían las ecuaciones del equilibrio económico al modo como la acción hamiltoniana facilitaría las ecuaciones de la Mecánica. Siguiendo el método de los modelos que hemos propuesto, explorará los mundos de la economía, en principio muy simples, luego, cada vez más complicados, para tender hacia la realidad y buscar una cantidad que deberá ser maximizada para alcanzar un cierto estado que se acordará deseable²¹.

No se puede encontrar una mejor expresión de este entusiasmo por los modelos utilizados como alternativa al fracaso de la transposición que hace la mecánica racional.

No era todavía el momento de reproducir los métodos, como se indica en *‘L’économique rationelle’*, libro muy querido por los reformadores egresados de las escuelas politécnicas, y que Divisia había ya utilizado antes que Guillaume como título de su obra principal²². En 1937, Jean Ullmo, afirmaba en una conferencia titulada *“Los problemas teóricos de la economía dirigida”*, que *los dos defectos esenciales de la economía contemporánea son el empleo de definiciones vagas y de razonamientos por analogía puramente verbales* y que su remedio es el empleo de “modelos.” A continuación precisaba *en qué pueden diferenciarse los modelos de la economía de los de las ciencias ordinarias, y donde deben limitar su ambición*: el enfoque inductivo propio “de la ciencia positiva” que parte de la observación y de la referencia de relaciones cuantitativas generalizadas en leyes, luego en teorías que dan a estas una interpretación causal, presenta en el caso de la Economía algunas dificultades —ausencia de experimentación, por ejemplo— para el uso de modelos concebidos como esquemas contables.” Ullmo rechaza con Darrois, las investigaciones estadísticas sistemáticas, “del tipo de las que consagró en vida Simiand,” es decir, que no se

²¹ E G Guillaume, nota bibliográfica sobre las *Recherches sur l’équilibre économique* de Jean Ullmo, Boletín CPEE, nº 45, pp31-33.

²² Divisia F (1927)

apoyaban sobre la construcción previa de modelos: *el modelo (en las ciencias sociales) corresponde a la hipótesis de trabajo de las ciencias ordinarias*. Jean Ullmo va a precisar más tarde este papel fundamental de los modelos en el pensamiento científico general, en una pequeña obra epistemológica²³ que está entre el positivismo —*un objeto científico no es más que la intersección de relaciones que se repiten*— y el realismo operatorio —*no hay más realidad previa que la que se mide; hay una realidad que nace en el momento en que es medida*— y abierta ya a la nueva idea de estructura, en la que se verá con mayor claridad el papel que se le ha reservado al modelo. En el prefacio de una de sus últimas obras²⁴, Ullmo resumía toda la aportación de los modelos a la ciencia económica:

Los modelos son indispensables y hay que hacerlos crecer. Cada uno en su formalismo matemático riguroso, permite delimitar hipótesis y precisar conceptos, explicitar consecuencias, reconocer convergencias o incompatibilidades. Suprimen, por tanto, los entornos indecisos, los deslizamientos del pensamiento, las acciones contrarias a los fines proclamados, las incoherencias del proyecto o del acto. Su multiplicidad se opone a la tentación de la mecánica única, de la solución perfecta: Muestra que la extraordinaria complejidad de las acciones y reacciones económicas no puede estar contenida en un modelo exhaustivo (...) Los modelos son, entonces, instrumentos de pensamiento. No podemos sobrepasarlos, no debemos someternos a ellos.

4. EPISTEMOLOGÍA DE LOS MODELOS: LAS PASARELAS ENTRE EL MODELO LÓGICO Y EL MODELO EMPÍRICO

Antes de 1930, los economistas no habían utilizado nunca el término modelo. Después de 1935, este término está, sin duda, en boca y pluma de todos. En un solo decenio, la palabra y el uso se imponen a través de numerosas iniciativas en todas las disciplinas y ámbitos, que sobrepasan con creces el ejemplo de la econometría francesa y que comportan un cierto tipo de filosofía común. ¿Tiene todo esto que ver con la ambiciosa empresa del Círculo de Viena de reconstruir una ciencia unitaria sobre los principios de una lógica de modelos?

Sobre este punto, ha habido gran controversia como testimonio, por ejemplo, el polémico trabajo del filósofo Alain Bayou²⁵ publicado a finales de los años sesenta. Alain Bayou, en nombre de la ruptura Bachelardiana entre noción y concepto, rechaza dentro de un marco estructural-marxista, y con total buena fe, toda conexión entre la noción “ideológica” de modelo en ciencias sociales y el puro concepto matemático. Sostiene así que un sistema formal es “una máquina matemática”, una máquina para la producción matemática” y que por tanto, *toda exportación fuera del dominio propio de la experimentación matemática es*

²³ Ullmo J. (1969)

²⁴ Ullmo J. *Le profit*, 1969, París, Dunod, colección Finance et Economie appliquée.

²⁵ Badiou A (1969)

ilegítimo, si se pretende mantener, al menos, el rigor de las propiedades del concepto y no degradarlo en variantes de una noción ideológica. La noción de modelo empírico en ciencias sociales no es otra cosa para él que polvo en los ojos, un objeto ideológico de manipulación. Planteamiento que no constituye un caso aislado pues numerosos intelectuales han denunciado en el contexto post-sesenta y ocho, el uso desconsiderado de modelos en las ciencias sociales.

Al otro lado del espectro nos encontramos autores como Leo Apostel quien en el marco de un coloquio de historia y filosofía de las ciencias sobre “el concepto y el papel del modelo en matemáticas y en las ciencias naturales y sociales”²⁶ propuso debilitar la teoría de Tarski para hacer salir el concepto de modelo del terreno intramatemático y aplicarlo a las ciencias empíricas, en principio, haciendo del modelo y de su prototipo dos sistemas que pueden ser al mismo tiempo, estructuras algebraicas (modelos llamados algebraicos), e incluso la puesta en relación de un lenguaje y una estructura, algebraica o no (modelos llamados semánticos), después, generalizando los conceptos de isomorfismo entre dos estructuras, de satisfacción de un lenguaje en un determinado campo, y de “transportabilidad” de un lenguaje en otro, que son respectivamente el centro de estas tres formas de modelos. Una noción de modelo empírico —*model of data*— podría, por ejemplo ser concebida como una interpretación descriptiva “factualmente verdadera” de una teoría. Llegamos así a la generalización de la noción de modelo: “todo sujeto que utiliza un sistema A que no esta ni directa ni indirectamente en interacción con un sistema B para obtener de la información sobre B, utiliza A como modelo de B”²⁷ Esta posición epistemológica sería mucho más tarde la de Kemeny, la de Walliser o incluso la de Thom.

La posición intermedia está bien representada en el escrito de Patrick Suppes en ese mismo coloquio. En él acepta que *el concepto de modelo, en el sentido de Tarso, sea utilizado sin distorsión como concepto fundamental en todas las disciplinas siempre que sea respetada la distinción fundamental que necesitamos, a saber, que una teoría es una entidad lingüística hecha de enunciados, mientras que los modelos son entidades no-lingüísticas en los cuales se satisface la teoría.*

El concepto lógico se aplica, por tanto, a *toda teoría axiomatizada del interior de un cuadro estándar de conjuntos.* La condición de una formulación axiomática es fuerte, y muy raramente se completa como las modelizaciones desarrolladas en las ciencias empíricas. El autor denuncia la confusión o inversión existente entre modelo y teoría, como sucede en la estadística matemática donde el modelo designa un conjunto de hipótesis teóricas (entidades lingüísticas) tomadas como axiomas, o como en la ingeniería, donde el “modelo físico” análogo al modelo reducido, es sustituido por la noción de conjunto. Los lógicos y epistemólogos que han seguido esta posición rigorista son mayoritarios, no prohíben trasladar la noción lógica al dominio empírico, pero se defienden de hacerlo en no importa qué condición. A menudo, articulan la idea de modelo con la

²⁶ Freudenthal H (ed) 1961. Aquí encontramos las intervenciones de P. Suppes y L. Apostel.

²⁷ Apostel L. en Freudenthal, 1961, p. 36.

de teoría axiomatizada, posición que ha constituido la base de la modelización estructural de la posguerra y que ha alimentado la epistemología de los modelos entre 1950 y 1980, y que todavía hoy podemos reconocer en los escritos de Philippe Mongin (2003).

Pero dejemos el campo de la filosofía normativa para pasar al de la historia positiva, y responder a la cuestión de las relaciones entre lógica matemática de los modelos y práctica empírica. Veremos así numerosas trazas del debate de Viena en las sociedades científicas, o en los *think tank* americanos de los años 1930 y 1940. Un primer hilo conductor, propio de la tradición estadística, parte de la *Gramática de la Ciencia* (1892) de Kart Pearson inspirada explícitamente en la filosofía de Mach, y que puede seguirse hasta el modelo de población en Fisher y el modelo estadístico de Neyman y Egon Pearson. El *Statistical Research Group* (SRG), fundado a comienzos de los años cuarenta en el marco del *Applied Mathematical Panel* (AMP)²⁸, ha tenido tres antenas en Columbia, Berkeley y Princeton dirigidas respectivamente por Harold Hotelling, Jerzy Neyman y Wilks, y ha constituido un auténtico semillero para los economistas de la nueva generación, más particularmente de la futura escuela de Chicago. De Wald a Savage, pasando por Friedman, todos han estado marcados por esta experiencia que prolongaron después de la guerra en universidades y centros como la Rand Corporation y la Cowles Comisión. Esta última institución, principalmente tomó su fuerza de un gran número de seminarios y escuelas de verano en las que eran invitados lo mejores científicos americanos y europeos. Un cierto número de ellos fueron enseguida reclutados por la Cowles como investigadores y consultores. Basta citar a Wald, H.T. Davis, R.Frisch en Oslo) Tjalling Koopmans (físico, alumno de Tinbergen y FRISCO) L. Hurwicz.... Para un buen número de ellos, fue más que una oportunidad en su carrera, la oportunidad de escapar a las persecuciones de los nazis, o de saltarse la prohibición de enseñar que recayó sobre los judíos. Muchos de estos europeos aportaron en su bagaje intelectual conocimientos prácticos y epistemologías que venían de los mejores centros europeos: Londres, Goettingen, Viena.... Un segundo hilo conductor lo tenemos en el caso de Abraham Wald (1902-1950). Nacido en Rumania en el seno de una familia de judíos ortodoxos, Wald llega en 1930 a la universidad de Viena donde lee su tesis de Matemáticas en 1931. Asiste al famoso seminario de Karl Menger (hijo de Carl Menger) en el que participan los matemáticos más brillantes de este período, aquellos que van a jugar un papel decisivo en la matemática aplicada: Beouwer, Hahn, Von Neuman, Reidemeister, Tarski, Ulam. Los debates del seminario se reflejan en la revista *Ergebnisse eines Mathematischen Kolloquiums* del que Wald es coeditor (con Gödel y Menger) de los dos primeros volúmenes. Gracias a Menger, Wald da cursos de matemáticas al banquero Schesinger, trabaja con él sobre las ecuaciones de economía matemática de Walras y Cassel, y es contratado por Morgenstern en el Instituto de Coyuntura que él dirige. Menger le presenta al matemático Hahn y le introduce

²⁸ Puesto en marcha por Warren Weaver,

en la axiomática de las probabilidades haciéndole trabajar sobre los “colectivos” de Von Mises y Popper. A continuación del asesinato de Schlick, es Menger quien ayudará a Wald a emigrar en el verano de 1938 a los Estados Unidos. Allí es acogido por la Cowles Comisión y Hotelling le introducirá enseguida en la Columbia University, donde trabajó primero como lector y ayudante (1939-40), luego como profesor de Estadística Matemática.

5. LA NOCIÓN DE MODELO EN ECONOMETRÍA ESTRUCTURAL

Bajo la dirección de John Marschak, la Cowles Comisión va a orientar su programa de investigación hacia el método econométrico. En una conferencia de 1948, Tintner, uno de los responsables del programa, cita a Carnap como inspirador de investigaciones sobre la inducción y la probabilidad. También el noruego Trygve Haavelmo reconoce explícitamente la influencia de las ideas del Círculo sobre su obra, y en particular lo que va a ser el manifiesto de la econometría: *The probability approach in econometrics*, un texto de unas cien páginas publicado en el suplemento de *Econometría* en 1944. Ciertamente, el título y la introducción ponen el acento sobre la probabilidad, lo que constituye toda una revolución del pensamiento económico. El núcleo central de ese texto es la noción de modelo:

Los modelos teóricos son las herramientas necesarias, en nuestro esfuerzo por comprender y explicar los acontecimientos de la vida real. De hecho, una simple descripción y clasificación de los fenómenos reales sería probablemente imposible sin una visión de la realidad que se construye a través de la estructura de un sistema concebido a priori.

Para resolver la punzante cuestión de la articulación entre enfoque teórico, enfoque formal y enfoque cuantificado, es absolutamente necesaria la mediación de un modelo (como escribieron mucho más tarde Morgan y Morrison) que permita poner en correspondencia los objetos formales y teóricos que constituyen las variables y las relaciones, con sus equivalentes empíricos. Este modelo es un juego de ecuaciones simultáneas de las cuales algunas traducen equilibrios e igualdades contables, mientras que otras traducen los comportamientos comunes de los actores, o las relaciones fundamentales, autónomas.

Pero surgen aquí muchas dificultades. La primera es identificar en que consiste una relación autónoma, o aún estructural, en el sentido de que describiría el funcionamiento fundamental del sistema económico independientemente de las circunstancias locales. Veamos la analogía de Frisch: la relación entre la posición del acelerador de un coche y la velocidad no es una relación autónoma, depende de la carga del coche, de la pendiente de la carretera, del viento... La relación entre el carburador y la potencia del motor es, por el contrario, autónoma y puede caracterizar a un vehículo en diferentes circunstancias. Aislar las circunstan-

cias autónomas que caracterizan la estructura propia de un sistema no es un asunto menor en la economía. Se ha creído durante mucho tiempo que esto puede hacerse con ecuaciones que describen el comportamiento de consumidores y productores, pero estas ecuaciones ignoraban que los comportamientos respondían o anticipaban los de las autoridades del Estado y los organismos supranacionales.

Una segunda dificultad consiste en saber pasar de las variables teóricas a las variables observables, puesto que el modelo tiene dos facetas: desde el punto de vista teórico, no es más que un simple *juego de restricciones sobre las variaciones conjuntas de un sistema de variables* que excluyen —absolutamente si el modelo es algebraico y probablemente si es estocástico— un cierto conjunto de valores posibles. Pero este modelo teórico no tiene significación económica más que asociado a un plan de experiencia, o incluso a un modelo de datos que hace corresponder un sistema de variables de observación a las variables teóricas. Estas variables de observación se distinguen de las variables teóricas por los errores de medida y por el hecho de que, en lugar de tener un plan experimental que correspondería a una suerte de experimentación ideal donde “los fenómenos pueden ser aislados artificialmente de otras influencias”, distintas a las de las causas principales que interesan al economista —la famosa hipótesis del *ceteris paribus*, se basan en la medición de objetos concretos, por ejemplo, una ley de demanda es una función que relaciona precio y cantidad de un bien, en un mundo donde los demás precios y cantidades, los gustos, las técnicas, etc., no cambian. El economista no dispone más que de observaciones “de la multitud de experiencias que la Naturaleza produce sin parar” con un gran número de interacciones no controladas. En resumen, para Haavelmo, el modelo teórico es un juego de restricciones que simula la selección natural y del que da cuenta el modelo de datos.

Prácticamente, las ecuaciones contienen un término aleatorio que da cuenta a la vez de errores de medida, de errores de muestreo del observador y de variables de comportamientos individualizados alrededor de la relación media. El modelo es el conjunto de hipótesis que son formuladas sobre estas relaciones y sobre estos términos de error en la fase de concreción. Comprobar una teoría es confrontarla a las observaciones estadísticas por intermediación del modelo. Es precisamente “testar” en sentido estadístico, las hipótesis probabilistas del modelo que aportan a la ley conjunta términos de error. Toda la complejidad de la adecuación de una teoría a un hecho empírico es así reducida a la operación más delimitada de una prueba de hipótesis probabilística.

Este enfoque permite a Haavelmo evitar ciertas dificultades aparecidas en las primeras tentativas econométricas. En la estimación de una ley de demanda, por ejemplo, la distancia entre el *path* de los datos de observación (precios y cantidades) que resultan de un plan de experiencia, y las leyes teóricas de oferta y demanda definidas por el *ceteris paribus*, abría una crisis de identificación de los parámetros. El recurso al modelo probabilista evita esta dificultad haciendo intervenir la decisión de los agentes que se interponen entre condiciones de hechos

y resultados colectivos tangibles. Se trata, pues, de una reinterpretación de la causalidad mediante el paradigma de la *decisión*, conjunto de conceptos, de métodos y de actores (en el sentido de Kuhn) que se introduce en la misma época en la estadística matemática debido a los trabajos de Wald, de Newman y Pearson sobre teoría de la elección racional y a los trabajos de teoría de juegos desarrollados por Von Neumann y Morgenstern, —*The Theory of Games and Economic Behavior* aparece en 1944— que producen una mediación en econometría entre variables independientes y dependientes. La causa —un cierto estado del mundo— ya no produce un efecto necesario sino un efecto racional, querido y decidido por los actores en función de su sistema de preferencias. Estamos ante el mismo paradigma que según Haavelmo proporciona el principio fundamental del azar en la ley económica.

El texto de Haavelmo se convierte en el texto-programa de la Cowles Comisión, antes de su publicación pues fue ampliamente discutido en sus seminarios. El programa de investigación impulsado por su director Jacob Marschak fue la prolongación directa del manifiesto de Haavelmo y puso el acento sobre los métodos estadísticos de la econometría. La monografía de Koopmans (1950) presentó los principales resultados de este programa, por lo esencial, relativos a la puesta a punto de criterios de identificación y de métodos de estimación por los modelos de ecuaciones simultáneas²⁹, aunque no debió reportarle un gran éxito inmediato. El aislamiento y el elitismo de los investigadores de la Cowles Comisión se ocultaron a los economistas entre los cuales, todavía era muy débil la cultura matemática y les había particularmente reacios a la utilización del cálculo de probabilidades. El matemático Edwin Wilson,³⁰ miembro de la Econometric Society, juzgaba así este enfoque:

Extremadamente abstracto y metafísico y pedagógicamente suicida(...) Hay un grupo de económetras que están bien entrenados en la matemática y que aparentemente han elegido escribir los unos para los otros más que para los economistas.

Aislamiento, que ha sido mejor interpretado entre los economistas académicos que entre los que estaban involucrados en empresas y agencia del Estado,

²⁹ Los refinamientos desarrollados en este marco fueron muy numerosos entre 1950 y 1970: vemos simplemente las torñas de identificación (Koopmans y Hood 1953), las técnicas de estimación de modelos de ecuaciones simultáneas (LIML de Girshick, Dobles mínimos cuadrados de Klein y Theil) los mínimos cuadrados generalizados de Aitken (en el caso en el que la matriz de varianza-covarianza de errores toma cualquier valor), los test y correcciones de heterocedasticidad (Glejser, White..) el tratamiento de la autocorrelación (test de Durban y Watson, método iterativo de Cochran y Orcutt), los trabajos de Koyck y Fiedmann sobre las anticipaciones adaptativas y los modelos de retraso escalonado, el tratamiento del error sobre las vatriables de FRISCO (1934), Wald (1940), Reiersöl (1945), Bartlett (1949) y Durban (1945), los modelos probit, logia y tobit de variables cualitativas o censuradas... sin olvidar los trabajos sobre la resolución de modelos y el estudio de sus propiedades dinámicas.

³⁰ E. Wilson, Book Review, *Review of Economics and Statistics*, 1948, pp173-174.

por ejemplo, la controversia que se produce con el NBER³¹ bajo la forma de un ácido intercambio entre Koopmans y Vining. El nuevo director de la Cowles Comisión, Tjalling Koopmans publicó una crítica feroz de los métodos empiristas del NBER ilustrada por el estudio de Burns y Mirchell sobre los Ciclos Económicos (1946) y sostenida desde el mismo título como “medidas sin teoría”³². Acusado de permanecer en el estadio Kepleriano de la disciplina (por Koopmans-Newton), el NBER respondió por la pluma del joven Vining denunciando la amalgama existente en la econometría entre nueva teoría y teoría neoclásica, el individualismo metodológico que domina todos los trabajos (al que opone un punto de vista institucionalista y holista), la ilusión de haber tomado “relaciones autónomas” invariantes, el énfasis excesivo puesto en la teoría estadística de los sondeos y de la inferencia, y la ineficacia pública de esas investigaciones.

De hecho, el dominio del paradigma Cowles Comisión sobre la metodología económica³³ va a durar treinta años, no tanto a causa de los trabajos pioneros, sino gracias a las nuevas condiciones de regulación de las economías después de la guerra. La *pax* americana³⁴ reorganiza la economía mundial bajo la dominación del dólar y de una investigación marcada por la continuidad del complejo militar-industrial desarrollado durante la segunda guerra mundial y el período de la guerra fría. La econometría recupera la salud en la demanda de instrumentos expertos y de regulaciones que permiten a los Estados prolongar la experiencia del New Deal mediante políticas que se apoyan en los sistemas keynesianos de construcción de la contabilidad nacional, y en los servicios de previsión y planificación. FRISCO y Haavelmo se consagran en la Europa del Norte, mientras los ingenieros economistas y estadísticos franceses lo hacen a finales de los años 1950 en el Servicio de Estudios Económicos y Financieros, después en la *Direction de la Prévision*.

Mientras la economía matemática se concentra principalmente en el programa de la Teoría del equilibrio general —en el que la aportación de Debreu facilita una forma puramente axiomática—, la noción de modelo se identifica en economía con la forma particular de los modelos macroeconómicos que se imponen durante los años 1950 en los Estados Unidos con el modelo de Klein³⁵. Otros siete modelos verán la luz entre 1950 y 1965; de ellos, el más célebre es el modelo de Brookings que tiene cientos de ecuaciones que han ocupado a muchos equipos de economistas y estadísticos durante diez años (Dusenberry, Klein...)³⁶. En Europa también se establecen modelos macroeconómicos que son utilizados para la construcción de presupuestos y la planificación (Bernard y Cossé 1974, Artus 1994, Desrosières 1997). Desde 1930 en los Países Bajos

³¹ National Bureau of Economic Research.

³² Koopmans T.C., 1947.

³³ Para la historia de la Cowles Comisión (después Fundación) ver los informes, así como Christ 1952.

³⁴ Armatte, 2004, b.

³⁵ Analizado en Klein y Goldberger (1955)

³⁶ Cf. Bodkin y otros, 1991.

(Tinbergen), y mucho más tarde en Francia (Herzog y Olive, 1966)³⁷, tal vez a causa de un cierto retraso en la investigación econométrica aislada en algunas grandes escuelas a la espera de que los estudios económicos se emanciparan de la tutela de las Facultades de Derecho, o a causa, sobre todo, de una tradición anterior de proyección de las cuentas por el método de las tablas de doble entrada, variante contable de las tablas *input-output* de Leontief que dominó en las instituciones de previsión y planificación. La econometría, objeto de contencioso entre la CC y los economistas de la Escuela de Chicago (Friedman), es por lo demás un instrumento importante de regulación de intercambios internacionales para organismo del tipo FMI, BM encargados del nuevo orden monetario internacional después de 1944, más tarde, con la puesta en escena del “consenso de Washington” y de la política de ajuste estructural en los países en vías de desarrollo en los años 1970 (Delazay y Garth, 1998).

Al objeto relativizar esta irrupción en las altas esferas del Estado del paradigma de la econometría estructural durante los años 1950, es interesante evocar la encuesta lanzada por Maurice Fréchet en 1946 *sobre las posibilidades y límites de la aplicación de las ciencias matemáticas, y en particular del cálculo de probabilidades, al estudio de los fenómenos económicos y sociales*, un tema, dice él, “muy controvertido en el que se enfrentan los puntos de vista más diversos, y en el que aquellos que participan en la discusión nunca se entienden bien”. Maurice Fréchet, a pesar de esta ingenuidad aparente, no era la primera vez que trataba de imponer un poco de orden en el uso de la estadística matemática, como había hecho ya para la correlación durante los años treinta y para la estimación a doble vuelta, en 1940 y 1948. Sobre la cuestión de las aplicaciones económicas, había propiciado dos investigaciones, una dirigida a los economistas “con formación matemática avanzada” y otra a los economistas clásicos. Sólo se pudo hacer la primera³⁸ y los resultados se publicaron en la Revista y el Boletín del Instituto Internacional de Estadística (Fréchet 1946 y 1947). Los resultados muestran que, incluso entre los economistas de cultura matemática, existían grandes apuros y dificultades para definir una metodología precisa de tratamiento formal de los datos económicos. El nivel de generalidad del discurso del método resulta decepcionante y a veces revela lo que algunos han llamado la filosofía espontánea de los científicos de fin de semana. La síntesis que

³⁷ Que recrean ZOGOL, al que sucederá DECA (Billaudot, 1971), STAR (Boyer, 1974) CO-PAIN (Dehove, 1981) GAMA (Courbis, 1971) FIFI (V y VII Plan, Aglietta, 1973) DMS (VIII Plan, Fourquet, 1978) METRIC (Artus, 1977) DEFY (Villa, 1982) y más recientemente ICARE (IPEE-CODE) INTERLINK (OCDE) SACHEM (CEPII, COMET y ATLAS (DP) HERMES-France (CEE-Centrale-Paris I)

³⁸ Fréchet obtuvo las respuestas de Hariold Hotelling (Iniv. Of North Carolina), Oscar Anderson (Kiel), Irving Fisher (New Haven, Connecticut) JBD Derksen (La Haya y ONU) Henri Eyraud (ISFA Lyon) Bruno de Finetti (Trieste) Jacques Rueff (Paris) Jan Tinbergen (La Haya), LV Furlan (Bâle) Luigi Amoroso (Roma), V Bouquet la Garrigue (Burdeos), Jacob Marschak (Chicago), René Roy (Paris), Maurice Allais (Paris), George Darmois (Paris) Lucien Féraud (Ginebra) KG Hagsroem (Estocolmo), Bernard Chait, Georges y WEdouard Guillaume, lo que representa un buen retablo de economistas matemáticos y estadísticos del momento.

hace Frechet se resume en un par de cosas: el uso de las matemáticas permite una precisión que despoja de toda ambigüedad a las definiciones y enunciados, que además permite “una economía de tinta, papel y pensamiento”, así como “tener en cuenta relaciones complicadas entre un número infinito (¿..?) de cantidades.” Cuando Frechet distingue tres modos de hacer matemáticas en economía —la economía matemática que establece relaciones generales entre cantidades, la econometría que las hace susceptibles de verificación numérica, y “la economía estocástica” que trata la variación de la noción de variable aleatoria— vemos que Frechet no ha comprendido que la econometría moderna es estocástica.

La única respuesta coherente a la cuestión de Frechet es la que ofrece Marschak: si se quiere *conocer* a la vez la estructura de una economía (combinando conocimiento a priori y posterior a las observaciones) y *prever* de manera estocástica los efectos de un cambio estructural de política económica, hay que construir un “modelo estructural”.

¿Como presenta esta noción? Con un sistema de ecuaciones de la forma:

$$\begin{cases} \phi_h [y'(t), y'(t-1)\dots; z', \alpha] = u_h \\ y'(t) - y(t) = v \\ z' - z = w \end{cases}$$

(1)

En la que y es el vector de variables endógenas a explicar, z el vector de variables exógenas, e y' y z' designan verdaderos valores manchados de errores v y w mientras que u_h es el error aleatorio sobre la ecuación número h que traduce el carácter estocástico del comportamiento humano. Los 3 procesos estocásticos están unidos por una densidad de probabilidad conjunta $f(u, v, w, \varepsilon)$ de parámetro ε . Una estructura de modelo es una solución (a, ε) que genera o explica la distribución condicional de variables endógenas en los momentos $t, t-1, \dots$ para valores de z fijados.

Resolver este modelo en el caso estocástico, coloca al modelo bajo la forma reducida de una distribución condicional:

(2)

$g[y(t), y(t-1), y(t-2)\dots/z; \lambda]$ donde λ es el vector de los parámetros.

La forma (1) es la verdaderamente interesante para juzgar los efectos de una política económica porque define la ley de variables observables para ciertas variables de encargo, mientras que los parámetros de la forma estructural son a menudo inobservables. No obstante, Marschak insiste sobre el hecho de que la estimación directa de los parámetros λ de la forma (2) —que asimila a “la metodología estadística de hoy” en alusión clara a los barómetros económicos (*business cycles*)— no es suficiente, porque si la estructura cambia (control de

los preciso, por ejemplo) los valores de λ ya no son válidos. Se recomienda, entonces, recurrir a una “estimación estructural” derivada de la estructura (a, ϵ) de λ . Pero esto no es posible más que bajo ciertas condiciones *de identificación*. Un cambio de estructura puede, por tanto, repercutir sobre el parámetro λ , y así el modelo permite “predecir de modo estocástico los efectos de ese cambio de estructura”.

La puesta en relación de esta econometría estructural con el estructuralismo de los años 1950 y 1960 puede parecer abusiva, pero el estructuralismo, tanto en su versión matemática como en las ciencias sociales debido a los trabajos de la lingüística y la antropología, ha jugado un papel indiscutible en el desarrollo de los modelos, en la medida en que la noción de estructura ha estado sistemáticamente asociada a la de sistema y a la de modelo. La similitud entre estructuras sociales o mentales y estructuras matemáticas fue constatada por Dieudonné y Piaget a partir de 1952. Levi-Strauss retoma la idea en 1954 haciendo un llamamiento a las “matemáticas humanas que quieren escapar de la desesperación de los grandes números”³⁹. La semiología tal como Roland Barthes la construye en sus *Eléments* y que desarrollará Foucault en *Las palabras y las cosas*, o Umberto Eco, plantea una reflexión de conjunto sobre todos los sistemas de signos que prolonga la reflexión del Círculo de Viena sobre la ciencia como lenguaje. Lingüística estructural y semiología han separado la lengua como sistema, del habla como práctica, una separación retomada por todas las versiones del estructuralismo, incluyendo aquellas que se aplican a los modelos y que han privilegiado la sintaxis y la semántica así como han excluido los actores y los usos⁴⁰.

6. CRISIS DE LA MODELIZACIÓN ESTRUCTURAL

El desmoronamiento y el abandono del sistema de cambio convertible a partir de Bretón-Woods, la decisión de Nixon de suspender la convertibilidad del dólar (1971), las dos crisis petroleras, así como la ruptura que se produce a partir de 1973 por el continuo incremento de la inflación y la aparición de la estafación, marcan el final de la modelización estructural en economía, los grandes modelos macroeconómicos se adaptan mal al nuevo contexto. La precisión de las previsiones es a menudo inferior a la que facilitan las simples autoprotecciones de series por los métodos de regresión, los modelos VAR propuestos por Sims. Aparecen críticas respecto al coste de dichos modelos: *para compensar la pobreza evidente de los datos disponibles... ningún campo de la investigación empírica ha movilizad una maquinaria tan masiva y sofisticada con tan pocos resultados* (Leontief AER 1971) y el escaso partido que se les ha sacado: *Los económetras no son más que ventrílocos que han encontrado en los modelos un*

³⁹ Armatte y otros (1989).

⁴⁰ Sobre los lazos entre modelos y estructuras: Foucault 1966, Boudon 1968, Badiou 1969, Bourdieu 1976, Armatte, 1995, cap. 2.

medio costoso de hacer imprimir sus prejuicios mediante un ordenador (Charpin, Futurable, 1983).

El golpe de gracia llegó con las críticas teóricas que se suscitaron sobre los fundamentos de los modelos. La primera, llega de los monetaristas, y ataca el núcleo central de los modelos, el bucle precios-salarios, y su forma más simple que es la relación de Phillips, relación inversa entre tasas de inflación y tasas de paro, que había permitido a los keynesianos arbitrar entre estos dos males. Friedman y Phelps habían supuesto que los valores observados de las tasas de paro y de precios no podían desviarse de los valores de equilibrio más que a corto término, bajo el efecto de crisis monetarias y de un error de anticipación de los agentes equivocados por las autoridades. La segunda crítica es la de Lucas que se ampara en la teoría de las anticipaciones racionales para reforzar las conclusiones de los monetaristas: si las autoridades aumentan por sorpresa la masa monetaria, los agentes, creyendo que el precio de los bienes ha aumentado, aumentarán la producción de esos bienes, y por tanto, el empleo: Habrá un alza de los precios y una bajada del paro como en la curva de Phillips, pero en cuanto los citados agentes se den cuenta de que han sido engañados volverán rápidamente al nivel de equilibrio de la producción y de empleo con precios más elevados. La verdadera curva de Phillips, a largo plazo, es, de hecho, vertical, y las variaciones del paro alrededor de la tasa de paro natural no provienen sino de los defectos de información de los agentes acerca de la masa monetaria. Los “nuevos clásicos,” cuyos jefes de fila son Robert Lucas y Thomas Sargent, generalizan este razonamiento haciendo la hipótesis de que la economía esta en un equilibrio de concurrencia perfecta y que hace real el óptimo de Pareto. Suponen que los agentes racionales (de hecho un “agente representativo”) disponen de toda la información posible, incluyendo de poderes públicos, que ellos anticipan y a los que se adaptan, permaneciendo en el cuadro de ese equilibrio, y cambiando, por tanto, la estructura del modelo. Esto no es invariante en relación a las políticas, y se puede apoyar sobre un modelo, digamos estructural, para dictar las reglas de una política eficaz, porque las previsiones efectuadas con estos modelos serán sistemáticamente erróneas desde el lado de la anticipación de los efectos en toda política económica. La política del Estado debe ser endógena puesto que ella misma también depende de esas anticipaciones.

Al contrario de esta explicación necesariamente más compleja que incluye la anticipación, la crítica de Sims rechaza toda especificación *a priori* de un modelo que se basa en vagas consideraciones teóricas para decidir que variable son exógenas, es decir, que variables juegan un papel causal, y cuales no juegan ninguno. Para él resulta fundamental que todas variables sean consideradas *a priori* y que las pruebas de exogenidad y las pruebas de causalidad, en el sentido de Granger⁴¹, se practiquen sobre series empíricas antes de optar por la escritura del

⁴¹ La definición de Granger, *Econometrica*, 1969, está fundada sobre la predictibilidad de series y combina asimetría temporal y desigualdad de la información: *si una serie X contiene a través de sus valores pasados una información que mejora la predicción de Yp y si esta información no está*

modelo. En esta misma tradición inglesa, otras modelizaciones de series temporales como procesos de tipo autorregresivo (AR) o medias móviles (MA), han sido objeto de atención particular durante los años 1980 y trasladados a la no-estacionariedad y a la cointegración de series, que está en el origen de correlaciones abusivas. La solución que se ha propuesto es un modelo llamado “correlación de error” en los cuales se estima simultáneamente una relación estable a largo plazo y una dinámica a corto, apoyada sobre la precedente. La dudas más serias se han producido con el resultado del largo plazo, con el uso sistemático de los test de hipótesis. Como los psicólogos⁴², los econométricos han denunciado las prácticas de investigación del tipo *data mining*, en los cuales se iban ajustando toda una serie de modelos con los mismos datos, hasta que la cosa funcionaba⁴³; o que por razones editoriales y pseudo-científicas, no se publicasen más que los modelos en los cuales las relaciones son significativas, lo que produce un sesgo peor que la noción de umbral de significación en los test. Por supuesto hay algunos alarides como el *general to specific modelling* de Hendry, o de manera más radical, el abandono completo de la estadística inferencial clásica de los modelos de equilibrio general calculable, muy utilizados por la Banca Mundial y el FMI, que no se estiman sobre datos históricos sino que se ajustan sobre una base de datos recientes.

La modelización econométrica de los años 1990 y 2000 no ha tenido mucho que ver con la modelización estructural de los años 1960. Las relaciones del modelo ya no están fundadas sobre una teoría macroeconómica, sino sobre principios de racionalidad de los agentes, y sobre reglas de optimización de los comportamientos y de anticipaciones. Ya sea porque han tratado de salvar los grandes principios de la modelización estructural haciendo muy complejos los modelos para integrar la anticipación, los problemas de equilibrio, las dinámicas de crecimiento, lo cierto es que se ha tratado de abandonar la idea de un modelo del gran Todo para contentarse con modelizar algunos mecanismos. Por ejemplo se han hecho pequeños modelos de equilibrio del tipo maqueta, más orientados hacia la simulación que hacia la previsión.

7. NUEVAS CARACTERÍSTICAS DE LA MODELIZACIÓN EN LAS CIENCIAS

La evolución de la macro-econometría corre en paralelo con la introducción de la modelización en las ciencias físicas y después de la II guerra mundial en las

contenida en alguna otra serie utilizada para calcular el predictor, entonces se dice que X_t provoca Y_t . En la práctica, para series estacionarias, se comprueba que los coeficientes de X_{t-1} , X_{t-2} son significativas en la ecuación lineal expresando Y_t en función de valores anteriores de X y de Y puesto que los de Y_{t-1} , Y_{t-2} no lo son en la ecuación lineal, expresando X_t en función de valores anteriores de X y de Y .

⁴² Ver el dossier sobre los test de hipótesis en el *Journal de la SFDS*, 2005, Vol 145, n.º 4.

⁴³ Por ejemplo Charemza y Deadman 1997, o Spanos 2004.

ciencias sociales. Los trabajos de historia de las ciencias realizados en el siglo XX han puesto en evidencia su importante papel, a menudo minimizado, en las investigaciones puramente epistemológicas, en la explosión de las matemáticas aplicadas durante la II Guerra mundial, en la reorganización de la investigación alrededor de nuevos centros académicos y en los *think tank* como la Cowles Comisión y la Rand Corporation, así como los importantes medios y las condiciones favorables de los años 1930: acercamiento de investigaciones universitarias, industriales y militares, fuerte interdisciplinariedad, programas de investigación operacional orientados por problemas de optimización, nuevo interés por los sistemas hombre-máquina, apremio por ayudar en la toma de decisiones⁴⁴... En este contexto aparecen las nuevas matemáticas, muy diferentes de las ecuaciones diferenciales de la mecánica clásica que habían servido de base a la modelización en ciencias sociales. El álgebra de grupos, la teoría de juegos, la teoría de preferencias, la programación lineal, la programación dinámica, la teoría de grafos, los test secuenciales forman los nuevos dominios de la matemática aplicada⁴⁵. Pero quizá lo más relevante sea el ordenador, que pasa primero de máquina de calcular, a máquina destinada al tratamiento de la información, luego, a instrumento de simulación de sistemas complejos, por lo que jugará un papel central en la articulación del modelo con la teoría y con los datos. Gracias al ordenador, en efecto, los datos a tratar pueden ser muy numerosos por lo que pasan a ser más importantes que el fundamento teórico. De este modo, el modelo no es solamente una estructura matemática que representa una teoría, sino que se convierte en una doble representación parcial y orientada —por el objetivo que se le da y por el estado del sistema de observación y de medida— de un sistema físico o social, por un sistema formal hipotético-deductivo y un sistema de información y de medida que son homomorfos. La correspondencia entre variables y relaciones teóricas de un lado, y valores empíricos y formulaciones matemáticas de las relaciones, de otro, están sometidas a numerosas condiciones y aproximaciones. El modelo, en este doble aspecto de modelo teórico y *modelo de datos* (*model of data*), ocupa, por tanto un papel de mediador entre la teoría y la información como ya hemos visto en la econometría estructural, y como lo ha analizado Morgan y Morrison (1999).

En ciertos casos, el tratamiento de los datos puede jugar un papel heurístico e inductivo importante que es suficiente, pudiendo reemplazar la determinación matemática de solución de un sistema de ecuaciones⁴⁶. Por ejemplo, en el caso de la puesta a punto de la bomba H, Gallison mostró que los conocimientos en física eran insuficientes para comprender y prever el conjunto de fenómenos de la propagación de la radiación, de la hidrodinámica de materiales en explosiones, etc., y que la simulación sobre ordenador era la única solución para

⁴⁴ Dahan y Pestre, 2004; Armatte, 2004 (b).

⁴⁵ Armatte y otros, 1989, Dahan, 1996.

⁴⁶ Como en el método de Monte Carlo que consiste en reemplazar una aproximación teórica que falta o es incompleta,

combinar los diferentes conocimientos y datos que estaban en juego. El modelo no es así, más que un sistema formal que representa un sistema físico bien definido y delimitado, mediante el cual hay leyes válidas con la condición del *ceteris paribus*; el modelo se convierte en un mecanismo de integración de datos producidos por subsistemas de información. El modelo, conjunto de ecuaciones, de interfaces, de datos, que se transforman en un programa de ordenador, constituye un sistema de sustitución del sistema real, en el que no hay teoría completa, y que permite hacer experiencias ficticias para comprender el juego complejo de las interacciones. Estos experimentos ficticios constituyen de hecho una metodología de recambio del método hipotético-deductivo, incluso del método experimental cuando se trata de sistemas complejos⁴⁷.

En campos como el clima, la economía mundial, o el medio ambiente, la complejidad proviene del número de elementos interdependientes del sistema, de la naturaleza misma de las interacciones no lineales a base de bucles de *feedback*, de la naturaleza heterogénea de esos objetos, a la vez humanos y no humanos, de la floración de teorías no unificadas que entran en juego, pero también de las grandes disparidades que surgen entre las escalas temporales o de espacio. Los modelos compuestos por un par de sub-modelos heteróclitos no se parecen nada en su construcción, ni en sus propiedades y sus usos, a los modelos teóricos de la ciencia unificada que habían soñado científicos y epistemólogos. Para continuar con la economía, diremos que ha habido durante los años setenta una tentativa de descripción y simulación de nuestro sistema mundo a través de modelos derivados de un enfoque de dinámica de sistemas, inaugurados por Jay Forrester en el MIT, al servicio del programa de investigación del Club de Roma. Su modelo *world 3* produjo simulaciones que servirán de basamento al célebre informe del matrimonio Meadows sobre los límites del crecimiento⁴⁸. El objeto "mundo" así simulado, más que modelizado, era un objeto complejo en el sentido precedente de esa forma de modelización integrada a base de varios subsistemas (poblacional, industrial, agrícola, medioambiental, energético) constituidos cada uno de ellos por cadenas causales con bucles de retroacción. Fueron, no obstante, criticados por su simplismo y su importante desviación de las teorías económicas del crecimiento equilibrado, generalizándose la idea del prototipo y dando lugar a toda una tradición de modelización integrada de cambio climático durante los años 1980 y 1990. En esta tradición encontramos varias familias de modelos. Los expertos en climatología han construido, sobre la base de modelos *meteo*, modelos de circulación general de la atmósfera (GCM), que asocian ecuaciones de dinámica, de física y cambios químicos entre diferentes mallas de un corte vertical y horizontal de la atmósfera. Para mayor fineza de los modelos se tienen en cuenta fenómenos de escala muy variada en el espacio (de las nubes al cosmos) y en el tiempo (del segundo a varios años) que, a su vez, dan más importancia a las leyes teóricas

⁴⁷ Gallison, 1996; Armatte y Dahan, 2005.

⁴⁸ Forrester, 1971; Meadows, 1974.

de la física y de la dinámica. Solo los grandes ordenadores han sido capaces de integrar conocimientos tan diversos de estos fenómenos: tener en cuenta las interacciones entre atmósfera y océanos, ha hecho muy complejo el modelo global; el apareamiento de subsistemas, ya sea por medio de ecuaciones teóricas, ya sea mediante los juegos de parametrización informática, ha sido una etapa difícil pero fundamental.

Pero además, las simulaciones realizadas con la ayuda de modelos se hacen a menudo para situaciones poco realistas y bastante simplificadas, cuando no completamente ficticias como por ejemplo “*forçage radiactif de la nébulosité*” que supone nubes transparentes a la radiación. Los datos numéricos de partida no son en principio realistas porque provienen de salidas de otros modelos, o de diversas bases de datos que han sido armonizados y calibrados. La validación de modelos es en sí misma poco conforme al dogma habitual de la confrontación con los datos observados, porque las proyecciones se hacen con el horizonte de un siglo. La confrontación se hace entre los diferentes modelos que son producidos por los diferentes equipos de investigación.

Pero mientras que los trabajos del IPCC⁴⁹ confirman la naturaleza entrópica de la deriva climática, la integración de submodelos energéticos y económicos supuso un nuevo desafío. Se han visto florecer modelizaciones propias para el subsistema económico en el que los dos grandes tipos son, de un lado, los modelos de economistas del crecimiento óptimo inspirados en los primeros modelos macroeconómicos no keynesianos de Ramsey (1928), de otro, los modelos de ingenieros de análisis de actividad fundados sobre matrices *input-output* en los que la teoría se remonta a los trabajos de Leontief (1941) y Koopmans (1950). En el primer caso se trata de una economía de un solo bien producido y consumido por una población estable y homogénea representada por un agente. Se busca el reparto del ahorro consumo en cada momento que maximiza la utilidad inter-temporal de este agente. Un autor como Nordhaus desarrolló en la Cowles Comisión, al menos desde 1974, modelos similares para oponerse a las conclusiones del informe Meadows, completándolo más tarde con un módulo simplificado para evaluar las políticas de reducción de gas en el efecto invernadero⁵⁰. En el segundo caso, se proporciona un cierto número de actividades o modos de producción concurrentes, mediante los cuales un cuadro de coeficientes técnicos define los outputs productivos con ciertas cantidades de *inputs*. Este análisis *input-output* debido a Leontief ha sido adaptado por Koopmans a cuestiones de transporte o asignación de recursos óptimos añadiendo una función que se ha beneficiado de métodos de resolución de programa lineales (en particular el método unidireccional) puesto a punto en el Pentágono por Dantzing y Von Neumann. Los modelos de proyección energética, como el modelo MARKAL,

⁴⁹ El IPCC (*Panel intergubernamental para el Cambio climático*, GIEC en francés) creado en 1988, reagrupa los investigadores de cientos de laboratorios repartidos por todo el planeta, y sus reuniones dan como resultado protocolos de acción concertada entre los Estados, como el de Kyoto en 1997.

⁵⁰ Ver la presentación del modelo DICE publicado en *Science* en 1992 por Nordhaus.

desarrollado por una comunidad que trabaja en red bajo los auspicios de la Agencia Internacional de la Energía, son a menudo de este tipo. Presentan el inconveniente de necesitar numerosos datos técnicos, pero son en principio capaces de simular políticas energéticas alternativas.

Estos modelos económicos sirven de encuadre a los cálculos de coste-beneficio o coste-eficacia de los impactos del cambio climático y de las políticas de lucha y adaptación en la tradición del cálculo económico. El emparejamiento de modelos atmosféricos y de modelos económicos y sociales se ha producido bajo la forma de modelos de evaluación integrada del tipo MARKAL, DICE, en los cuales se parte de uno de estos modelos económicos a los que se incorpora un modelo reducido climático. El modelo IMAGE es otro modelo de evaluación integrada desarrollado por el laboratorio holandés RIVM, en continuidad con el modelo Word3 del club de Roma. Está constituido por la unión de diferentes módulos —población, economía mundial, oferta y demanda de energía, cubierta vegetal— que definen las emisiones de gas y el efecto invernadero sobre la base de escenarios de desarrollo para los cincuenta próximos años que están sacados de los trabajos del IPCC (SRS Report). Los módulos de circulación atmosférica terrestre y oceánicos permiten pasar de las emisiones a las concentraciones y al cambio climático resultante. Un último grupo de módulos trata, por tanto, de los impactos de ese cambio climático sobre diferentes subsistemas naturales y socio-económicos. Estos *Interlaken Assessment Models* que completan los *Herat System Models* construidos a la inversa alrededor de un GCM, son los productos de una nueva filosofía de la modelización inventada en lugares como el IIASA de Viena. Son conjuntos bastante heteróclitos de módulos heterogéneos, de conocimiento teórico y cifrado de los fenómenos en juego en escalas y dominios de validez, producidos por grupos de culturas diferentes. El emparejamiento de estos dos modelos plantea pues, temibles cuestiones teóricas, a menudo rodeadas de estrategias muy complejas de parametrización.

Pero sobre todo, estos modelos son objetos en perpetua evolución, dependientes ellos mismos de estrategias de investigación particular, o inscritos en programas políticos de gestión de riesgos. Como ya hemos escrito con anterioridad⁵¹ “no se modeliza solamente un sistema en el que está en juego la complejidad de las interacciones Naturaleza-Sociedad, se modelizan los elementos de decisión o de experto que están en juego”. De esta manera, la principal característica de estos modelos es que se consideran co-construidos por los investigadores y los usuarios” ya que son, a menudo, desarrollados en red y que deben ser fácilmente manipulables bajo la forma de programas informáticos en interfaz gráficos. El modelo no existe sin un programa informático y se cofunde con él. Como estos modelos están en evolución permanente, las simulaciones que exhiben son difícilmente atribuibles a un sistema de ecuaciones bien identificadas y difícilmente reproducibles. Su carácter científico es a menudo contestado de esta forma, pero su eficacia mediática es incontestable. Apenas es posible considerar como

⁵¹ Armatte 2005.

en la epistemología clásica, que hay en principio un sustrato de conocimientos científicos, además de su traducción en un modelo, así como usos políticos y sociales de ese modelo que contribuirían a aclarar decisiones públicas o privadas. En efecto, la modelización está asentada, en principio, sobre un cuestionamiento político que formatea el modelo (por ejemplo la elección de la única variable temperatura media, el objetivo surgido de una negociación, o incluso la elección de intervenir en un determinado lapso de tiempo) y sobre hipótesis generales de evolución socio-económica como los famosos escenarios (una categoría importante de la nueva epistemología) construidos por el IPCC, que fijan *a priori* el conjunto de desarrollos posibles de futuros decenios, bajo la forma de algunas configuraciones típicas y caricaturescas, y que integran a la vez, datos, políticas y comportamientos de las poblaciones.

Si tomamos como otro ejemplo la modelización de los mercados financieros, la cuestión de la articulación de la modelización con la negociación y la decisión, aparece más pronto que con los modelos macroeconómicos o climáticos. Es directamente al nivel de la decisión de los actores del mercado como el modelo juega su papel en la negociación, puesto que los agentes económicos utilizan directamente estas herramientas en la bolsa. La regulación electrónica de los mercados financieros produce toda clase de efectos (virtuosos o perversos) que no se pueden observar directamente más que en las finanzas porque el bucle de fases de concepción y de uso social de los modelos es muy rápido. Las simulaciones del fin de semana, conducen a modificaciones de los modelos de gestión de activos directamente operacionales el lunes. Las escalas de tiempo del mercado financiero⁵² permiten seguir en directo los comportamientos de los procesos aleatorios, identificados como asintóticos por la teoría, verificar las propiedades fractales de independencia de los fenómenos en relación a las escalas de tiempo, contemplar los acontecimientos extremadamente raros que se producen a menudo —tan a menudo que los acepta la teoría— poniendo en su lugar prudentes aproximaciones que se tendrán finalmente en cuenta.

Tanto en finanzas como en los laboratorios que trabajan sobre los cambios climáticos, o en los departamentos de estudios que analizan el tráfico urbano y la organización del territorio, las nuevas formas y funciones de la modelización han reorganizado completamente las profesiones: los matemáticos informáticos tienen los conocimientos complementarios más o menos valorizados en las bolsas. La automatización de la bolsa ha revelado todo un conjunto de conocimientos y reglas que hay que incorporar a los programas informáticos⁵³. En los laboratorios de climatología, los investigadores físicos y matemáticos se hacen informáticos. Los modelos, bajo la forma informática, reconfiguran el espacio de las profesiones, construyen mercados comerciales o comunitarios específicos, al tiempo que se convierten en la única lengua común de las profesiones.

⁵² El fax de Meriwether en la historia del LTCM tuvo efecto a los cinco minutos (Cf. D. MacKenzie en Armatte y Dahan, 2004).

⁵³ Ver los trabajos de C Walter en la tesis de Francisco Muniesa leída en la Escuela de Minas.

Así, puesto que el modelo no se estabiliza jamás y depende de los comandos de simulación, se convierte en un objeto menos interesante de estudiar que las prácticas sociales de modelización, o de movilización de estos modelos en operaciones de gestión y regulación de sistemas complejos. Porque los modelos mismos son instrumentalizados por comunidades de modelizadores, por los que deciden y movilizan estos instrumentos en los cuadros de negociación, de decisión y de gestión compartida, y lo que esta en juego sobrepasa al mero conocimiento. La separación entre “learning about theories” y “learning about the world” ya no es posible. Este último aspecto está a punto de comerse al primero. En este nuevo contexto de una ciencia desunificada enfrentada a objetos muy complejos, y sobre todo de desafíos colectivos importantes, nos parece que la vieja epistemología de los modelos como instrumentos de mediación entre teoría y realidad observable no se adapta a la realidad y se equivoca de objeto: el objeto “modelo” es objeto de todas las atenciones, mientras que lo que le da sentido es la actividad de la modelización. Al focalizarse únicamente sobre los objetos cognitivos, no se da cuenta de los actores que movilizan estos objetos cognitivos en los cuadros políticos y estratégicos que están bien definidos. Los filósofos de la ciencia que se fijan en el primer aspecto sería como el cámara de televisión que en un reportaje sobre un partido de fútbol únicamente se contentase con filmar el balón en un primer plano, sin mostrar ni a los jugadores ni a los espectadores ni al estadio. Por supuesto, lo que sería la inversa, y únicamente la inversa, nos arrastraría hacia un modelo totalmente surrealista en el cual no se comprendería porqué los jugadores corren en todos los sentidos.

Una epistemología equilibrada de la modelización que historizara y socio-logizara “la noción de modelo” sin abandonar el punto de vista cognitivo está por construir, pero conocemos ya algunas características. La atención que se ha dedicado durante tanto tiempo a su naturaleza y propiedades sintácticas (rigor, coherencia) que se ha desplazado históricamente sobre sus propiedades semánticas (pertinencia, completud) debe desplazarse todavía hacia las propiedades pragmáticas pragmáticas asociadas a los objetivos de la modelización (eficacia heurística o provisional o decisional). Estos tres registros del modelo como representación significativa, movilizada en los usos de regulación de actividades humanas identificadas desde los trabajos de la lingüística estructural y retomados por B. Walliser en su reflexión sobre “sistemas y modelos”, deben ser tratados igualmente, y por tanto, reequilibrados. Si se quiere comprender los aspectos científicos pasados y presentes de la modelización en la interacción ciencia— sociedad, hay que informar las lógicas cognitivas con la lógicas sociales de la modelización. Esta nueva epistemología debería unirse más a la modelización que a la noción de modelo, a los juegos de actores alrededor de esta actividad, a las estrategias, a la profesionalización, a las mediaciones entre grupos, a la función que juega en la decisión y coordinación política.

Esta nueva epistemología debería unirse también a las variaciones históricas del papel del modelo: la noción de modelo tal como se presenta en las ciencias no es independiente de la historia misma de estas ciencias. La invarianza de la

noción de modelo a través de las edades de la ciencia es, tal vez, un deseo de la filosofía espontánea del experto, pero no una realidad de “la ciencia que se está construyendo” que como sabemos desde Kuhn se inscribe en una sucesión de paradigmas que son a la vez configuraciones de ideas, de métodos, de instrumentos, de objetivos y de grupos sociales. Que no se considere totalmente pertinente la noción de paradigma no debería impedirnos reconocer, al menos, que la noción de modelo posee una historicidad y que esta debe mucho en el último siglo a algunas innovaciones fundamentales que han transformado sus formas, sus significaciones y sus usos: pensemos simplemente en la irrupción de las matemáticas aplicadas, de la investigación operativa y del ordenador, en la inmediata posguerra.

En tercer lugar, esta nueva epistemología de modelos debería unirse a su geografía: la unicidad de la noción de modelo en el espacio a través de diferentes campos y especialidades de la ciencia no es tampoco una realidad, sino a menudo un deseo, o una ficción de la “ciencia unitaria” que disputa constantemente en disciplinas académicas o campos de explicación, para los cuales la noción de modelo tendría declinaciones específicas. De hecho, hay que reconocer a la vez la ilusión de una ciencia unitaria, y por tanto la especificidad de aproximaciones formales de tal o tal campo del conocimiento, pero también la circulación de estas formas entre los campos del conocimiento por el rodeo de los intercambios, de analogías, de préstamos y de exportaciones que muestran una economía controlada o una actividad de contrabando. La especificidad de las ciencias sociales cara a las ciencias físicas puede ser pertinente en un momento, para no serlo en otro, cara a una ruptura más pertinente entre ciencia experimental y ciencia de observación. Además hay más cosas en común entre economía y astronomía que entre psicología y sociología. Insistiremos, por tanto, en señalar que la separación entre ciencias físicas y ciencias sociales pierde, en parte, pero solo en parte, su sentido.

En Historia, Sociología, Geografía, vemos que la noción de modelo matemático no reconstruye más que parcialmente las matemáticas mismas. Reconocer la capacidad del modelo de viajar entre varios dominios, ver su potencia de simulación y de coordinación de conocimientos y comunidades heterogéneas, obliga, desde que está asociada a la informática, a reconocer la dimensión *interdisciplinar* de la noción de modelo misma.

BIBLIOGRAFIA

- ANDLER D., «Logique mathématique» et «modèle mathématique», *Encyclopaedia Universalis*, 1981, p. 185-196.
- APOSTEL L., «Towards the formal Study of Models in non-formal Sciences», Freudenthal: *The Concept and the role of Models in Mathematics and Natural and Social Sciences*, D.Reidel, Dordrecht, Holland, 1961.
- ARMATTE M. *et al.* (Les Messages), « Mathématiques et sciences humaines : des années soixante aux années quatre-vingts », *La vie des sciences. Comptes-rendus de l'Académie des Sciences*, tome 6, 1989, n.º 1, p. 59-76; n.º 2, p.139-165.
- ARMATTE M., «Histoire du modèle linéaire. Formes et usages en Statistique et Econométrie», These EHESS sous la direction de J. Mairesse, 1995.
- ARMATTE M., «Les mathématiques sauraient-elles nous sortir de la crise économique? X-Crise au fondement de la technocratie», Thierry Martin (ed.), *Mathématiques et action politique*, Paris, INED, 2000.
- ARMATTE M., DESROSIERES A., «Méthodes mathématiques et statistiques en économie : nouvelles questions sur d'anciennes querelles», J. P. Beaud et J. G. Prévost (eds.), *L'ère du chiffre, systèmes statistiques et traditions nationales*, Presses Universitaires du Québec, Montréal, 2000, p. 431-481.
- ARMATTE M., DAHAN-DALMEDICO A., «Modèles et modélisations (1950-2000): nouvelles pratiques, nouveaux enjeux», *Revue d'Histoire des Sciences*, 57(2), 2004, p. 245-305.
- ARMATTE M., «Modèles et systèmes complexes : le changement climatique global, compte-rendu d'un workshop», *La Gazette des Mathématiciens*, Paris, janvier 2004(a), p. 35-40.
- ARMATTE M., «Les sciences économiques reconfigurées par la pax americana», Pestre et Dahan (eds), *les sciences dans et pour la guerre, 1940-1960*, Paris, Presses de l'EHESS, 2004(b), p. 129-174.
- ARMATTE M., «Economic Models of Climate Change: The Costs and Advantages of Integration», Actes du colloque d'Arcidosso (2-5 sept. 2003), *The science of complexity*, 2005 [à paraître].
- ARTUS P., DELEAU M, MALGRANGE P., *Modélisation macroéconomique*, Paris, Economica, 1986.
- BACHELARD S., «Quelques aspects historiques des notions de modele et de justification des modèles», Actes du colloque *Elaboration et justification des modèles*, ed. Delatre, Paris, Maloine, 1979.
- BADIOU A., *Le concept de modèle*, Paris, Maspero, 1969, 92 p.
- BARBEROUSSE A., LUDWIG P., «Les modèles comme fictions», *Philosophie* 68, 2000, p. 16-43.
- BLANCHÉ R., *l'axiomatique*, Paris, PUF, 1955. 2e édition Quadrige, 1999.
- BODK.IN RG., KLEIN L.R., MARW AH K., *A History of Macroeconometric Model Building*, Edwar Elgar, 1991.
- BOLTZMANN L., «Models», *Encyclopaedia Britannica*, 1902.
- BOREL E., «Mécanique Statistique. Exposé d'après l'article allemand de P. Ehrenfest, T. Ehrenfest», *Encyclopédie des Sciences Mathématiques pures et appliqués*, IV-2, Jules Molk (ed.), Gauthier-Villars, 1915, Traduit de *l'Encykloäidie der mathematischen Wissenschaften*, B.G. Teubner (ed.), IV:2:II, n.º 6, Leipzig, 1912.
- BOUDON R., *A quoi sert la notion de structure*, Paris, Gallimard, 1968.

- BOULEAU N., *Philosophie des mathématiques et de la modélisation*, Paris, l'Harmattan, 1999.
- BOUMANS M., *A Case of limited Physics Transfer: Jan Tinbergen's resources for reshaping Economics*, Academish Proefschrift, Univ. Amsterdam, Tinsbergen Institute Research Series, 1992, 155 p.
- BOURDIEU P., «Le Champ Scientifique», *Actes de la Recherche en Sciences Sociales*, n° 11, 1976, P 88-104.
- BOX G.E.P., JENKINS G.M., *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, San Francisco, Holden Day, 1976.
- BRISSAUD M., FORÉ M., ZIGHED A. (eds), *Modélisation, confluent des sciences*, Paris, éditions du CNRS, 1990.
- CARNAP R., *Der logische Aufbau der Welt*, 1928. Traduction anglaise 1967.
- CARNAP R., 1934, *Logische Syntax der Sprache*, 1934. Traduction anglaise, *Logical Syntax of Language*, N. Y., 1937.
- CHAREMZA W., DEADMAN D. F., *New Directions in Econometric Practice*, Edward Elgar, 1997.
- CHRIST C.F., «History of the Cowles Commission 1932-52», *Econometrics, Macroeconomics and Economic Policy. Selected Papers of Carl. F. Christ*, Edward Elgar, 1996 (1ère ed. 1952).
- COWLES COMMISSION FOR RESEARCH IN ECONOMICS, Reports for 1939-1954, University of Chicago.
- COWLES COMMISSION FOR RESEARCH IN ECONOMICS, Reports for 1948-1949, University of Chicago.
- DAHAN A., «L'essor des mathématiques appliquées aux États-Unis: l'impact de la seconde guerre mondiale», *Revue d'histoire des mathématiques* 2, 1996, p. 149-213.
- DAHAN A., «History and Epistemology of Models: Meteorology as a case-study (1946-1963)», *Archiv for History of Exact Sciences* 55, 2001, p. 395-422.
- DAHAN A., «Axiomatiser, modéliser, calculer : les mathématiques, instrument universel et polymorphe d'action», *Les Sciences dans et pour la Guerre*, A. Dahan et D. Pestre (eds), Presses de l'EHESS, 2004.
- DAHAN A., PESTRE D. (eds), *Les Sciences dans et pour la guerre, 1940-1960*, Paris, Presses de l'EHESS, 2004.
- DAIGNEAUX T. A., *Théorie des modèles en logique mathématique*, Presses de l'Université de Montréal, 1967.
- DE MARCHI N., GILBERT C. (eds), *History and methodology of Econometrics*, Oxford Economic Papers, 41, Janvier 1989.
- DELATTRE P., THELLIER M. (eds), Actes du colloque *Elaboration et justifications des modèles*, Paris, Maloine-Douin, 1979.
- DESROSIÈRES A., *La politique des grands nombres*, Paris, La Découverte, 2000.
- DEZALAY Y., GARTH B., «Le Washington Consensus», *Actes de la Recherche en Sciences Sociales*, 121-122, 1998, p. 3-22.
- DIVISIA F., *Economie rationnelle*, Paris, Doin, in-18, 1927, 443p.
- DORFMAN R., SAMUELSON P., SOLOW R., *Linear Programming and Economic Analysis*, New York, McGraw-Hill, 1959. Traduction française Dunod, Paris 1962.
- DUHEM P., *La théorie physique*, Paris, Chevalier et Riviere, 1906. 2e édition 1914.
- DUPUY J. P., *Aux origines des sciences cognitives*, Paris, La Découverte, 1994.

- EDWARDS P., «The World in a machine: Origins and impacts of a early computerized global systems models», in Hughes Agatha & Thomas (ed.), *Systems Experts and Computers*, University of Chicago Press, 2000.
- ENGEL R.F., GRANGER C.W.J., «Co-Integration and Error Correction: Representation, Estimation and Testing», *Econometrica*, 55-2, 1987, p. 251-276.
- EPAULARD A., *Les modèles appliqués de la macroéconomie*, Dunod, 1997.
- FORRESTER J., *World Dynamics*, Cambridge, MA, MIT Press, 1971.
- FOUCAUL T M., *Les mots et les choses*, Paris, Gallimard, 1966.
- FRECHET M., « Enquête... sur les possibilités et les limites de l'application des sciences mathématiques et en particulier du calcul des probabilités, à l'étude des phénomènes économiques ou sociaux », *Revue de l'IIS*, 1946, p. 16-51.
- FREUDENTHAL H. (ed.), *The Concept and the role of Models in Mathematics and Natural and Social Sciences*, Dordrecht, D.Reidel, 1961.
- FRISCH R., «Propagation Problems and Impulse Problems in Dynamic Economics», *Economic Assays in Honour of Gustav Cassel*, London, Allen & Unwin, 1933.
- GALLISON P., «Computer Simulations and the Trading Zone», *The Disunity of Science: Boundaries, Contexts, and Power*, P. Galison and D.J. Stump (eds), 1996, p. 118-57.
- GIORELLO G., «Théories et modèles dans la science», *Querelle de modèles*, Cahiers S.T.S. 5, Paris, CNRS, 1984, p. 27-36.
- GIRAUD J. N. (dir.), *Effet de serre : modélisation économique et décision politique*, Rapport Commissariat Général du Plan, Paris, La documentation française, 2001.
- GUESNERIE R. (dir.), *Kyoto et l'économie de l'effet de serre*, rapport au Conseil d'analyse économique, Paris, La documentation française, 2003.
- GUILLAUME E, GUILLAUME G., *Sur les fondements de l'économie rationnelle*, Paris, Gauthier- Villars, 1932.
- GUILLAUME E, GUILLAUME G., *Économie rationnelle*, Paris, Hermann, 1937.
- GUILLAUME Marc, *Modèles économiques*, Paris, Presses Universitaires de France, 1971.
- HAAVELMO T., *The probability Approach in Econometrics*, Supplément à *Econometrica* 12, 1944, 115 p.
- HENDRY D. F., *Econometrics. Alchemy or Science? Essays in Econometric Methodology*, Blackwell, 1993.
- HOOVER K.D (ed.), *Macroeconometrics. Developments, Tensions and Prospects*, Kluwer Academic Publ., 1995.
- ISRAEL G., *La mathématisation du réel*, Paris, Le Seuil, 1996.
- JACOB P., *L'empirisme logique*, Paris, éd. de Minuit, 1980.
- KEYNES J. M., «Professor Tinbergen's Method», *Economic Journal* 49, 1939, p. 558-568. (Réponse de Tinbergen dans le n.º 50, p.141-156)
- KEYNES J.M., «Lettre a Roy Harrod», *The Collected Writings of John Meynard Keynes*, vol. XIV, 296-7, D. Moggridge (ed.), London, Macmillan, 1938.
- KIEKEN H., DAHAN A. et ARMATTE M., «La modélisation, moment critique des recherches sur l'environnement», *Nature Sciences et Sociétés* 11(4),2003, p. 396-403.
- KLEIN L, *Economic fluctuations in the United States (1921-41)*, New York, John Wiley, Cowles Foundation Monograph nº 11, 1950.
- KOOPMANS T.C. (ed.), *Statistical inference in dynamic models*, University of Chicago, Cowles Foundation Monograph nº 10, 1950.
- KOOPMANS T.C. (ed.), *Activity Analysis of Production and Allocation*, Cowles Foundation Monograph n.º 13, 1951.

- KOOPMANS T.C., «Measurement without Theory», *Review of Economics and Statistics* 29, 1947, p.161-172.
- LE MOIGNE J.L., *Théorie du système général. Théorie de la modélisation*, Paris, Presses Universitaires de France, 1977.
- LUCAS R.E., «Econometric policy evaluation: a critique», *The Phillips curve and Labor Markets*, Brunner et Mertzger eds, Amsterdam, North Holland, 1976.
- MACH E., *La Mécanique, exposé historique et critique de son développement*, traduction E. Bertrand, Introduction E. Picard, Paris, Hermann, 1904, (le édition 1880).
- MALGRANGE P., «Force et faiblesse des modèles macroéconométriques», *Modélisation et Décisions économiques*, B. Comet et H. Tulkens eds., Louvain, Université De Boeck, 1990.
- MATARASSO P., «Quelques remarques sur l'intégration de modèles climatiques, biophysiques et économiques dans le cadre de recherches sur l'environnement», *Tendances nouvelles en Modélisation*, Paris, CNRS éditions, 2000, p. 197-205.
- MEADOWS D. L., MEADOWS D.H., *The limits of growth. A report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind*, N.Y., American Library, 1974.
- MENGER K., «The formative years of Abraham Wald and bis work in geometry», *Annals of math. stat.*, n° 23, 1952.
- MIROWSKI P., «The Measurement without theory controversy...», *Economies et Sociétés, Oeconomia*, n.° 11, 1989, p. 65-87.
- MIROWSKI P., «The probabilistic counter-revolution, or how stochastic concepts carne to neo-classical economic theory», *Oxford Economic Papers* 41, Janvier 1989, p. 217-235.
- MIROWSKI P., *More Heat than Light. Economics as Social Physics, Physics as Nature's Economics*, Cambridge University Press, 1989.
- MONGIN P., «La méthodologie économique au XXe siècle. Les controverses en théorie de l'entreprise et la théorie des préférences révélées», A. Béraud et G. Faccarello (eds), *Nouvelle histoire de la pensée économique*, Paris, La Découverte, 2000.
- MONGIN P., «L'axiomatisation et les théories économiques», *Revue Économique*, vol. 55, n.° 1, 2004.
- MORGAN M. S., *The History of Econometrics Ideas*, Cambridge Univ.Press, 1990.
- MORGAN M., MORRISON M., *Models as Mediators. Perspectives on natural and social science*, Cambridge, Cambridge University Press, 1999.
- MOULOU N., «Modèle », *Encyclopaedia Universalis*, 1981, p. 387-416.
- NEUMANN J. (von), MORGENSTERN O., *Theory of Games and Economic Behavior*, New York, Wiley, 1947, 2e édition révisée, 1947.
- NEURATH O., «La conception scientifique du monde», *Manifeste du Cercle de Vienne et autres écrits*, ed. A.Soulez, 1929, Paris, Presses Universitaires de France, 1985.
- NOUVEL P. (ed.), *Enquête sur le concept de modele*, Paris, Presses Universitaires de France, 2002.
- PAROCHIA D., «Quelques aspects épistémologiques et historiques sur les notions de système et de modèle», Actes du colloque: *La modélisation: . confluent des sciences*, Université de Lyon I et CNRS, 1989, p.142-159.
- SCHUBERT K., « Les modèles d'équilibre général calculable: une revue de la littérature », *Revue d'économie politique* 103(6), 1993, p. 775-825.
- SIMON H. A., *Models of Man*, New York, Wiley, 1957.
- SINACEUR H., «Modèle», Dominique Lecourt (ed.), *Dictionnaire d'histoire et de philosophie des sciences*, Paris, Presses Universitaires de France, 1999, p. 649-651.

- SIMS C.A., «Macroeconomics and Reality», *Econometrica*, n.º 48,1, 1980, p. 1-48.
- SISMONDO S. (ed.), «Modeling and Simulation», *Science in context* 12-2, Cambridge University Press, 1999.
- SPANOS A., *Statistical foundations of econometric modelling*, Cambridge University Press, 1986.
- SUPPES P., «A comparaison of the Meaning and Uses of Models in Mathematics and the Empirical Science», Freudenthal, *The Concept and the Role of the Models in Mathematics and Natural and Social Sciences*, Reidel eds, Dordrecht, Holland, 1961.
- TARSKI A., « Le concept de vérité dans les langages formalisés », in *Logique, Sémantique, metamathématique*, 1935. Traduction française G.Granger, A.Colin, 2 vol., 1972/1974.
- TARSKI A., «Contributions to the Theory of Models», *Proc.Kon.Neder.Akad.* vol 57, 1954, p. 572-588 et vol 58, 1955, p. 56-64.
- THOM R., « D'un modèle de la science à une science des modèles », *Synthèse*, vol 31, n.º 2, 1975, p. 359-374.
- THOM R., «Modélisation et scientificité», Actes du colloque *Elaboration et Justification des Modèles*, ed.Delattre, Paris, Maloine, 1979.
- TINBERGEN J., *Minimumproblemen in de natuurkunde en de ekonomie*, Amsterdam, Paris, 1929, XV + 65 p.
- TINBERGEN J., *An Economic Approach to Business Cycle Problems*, Gibrat ed., Paris, Hermann, 1937.
- TINBERGEN J., *Les fondements mathématiques de la stabilisation du mouvement des affaires*, exposés publiés sous la direction de G. Lutfalla, Paris, Hermann, 1938, 114 p.
- TINBERGEN J., *Vérification statistique des théories des cycles économiques* ., Vol. I : «Une méthode et son application au mouvement des investissements », 178 p.; Vol. II : «Les cycles économiques aux Etas-Unis d'Amérique de 1919 a 1932 », Genève, Société des Nations, 1939,267 p.
- ULLMO I., 1938, «Recherches sur l'équilibre économique», *Annales de l'Institut H. Poincaré*, t. VIII, fase. 1, Paris, Gauthier-Villars, 1938, p. 1-62, [revue par les frères Guillaume in X-erige, 1938]
- ULLMO J., *La pensée scientifique moderne*, Paris, Flammarion, 1969.
- WALLISER B., *Systèmes et Modèles. Introduction critique à l'analyse des systèmes*, Paris, Le Seuil, 1977.
- WALLISER B., «La science économique», *Épistémologie des sciences sociales*, J.M. Berthelot (ed.), Paris, Presses Universitaires de France, 2001, p. 117-147.
- WALLISER B., *L'intelligence de l'Economie*, Paris, éditions Odile Jacob, 1994.
- WALTER C., « Une histoire du concept d'efficience sur les marchés financiers », *Annales HSS*, 1996-4, p. 873-905.
- WEINTRAUB E. R., *How Economics became a Mathematical Science*, Durham and London, Duke University Press, 2002.
- WINSBERG E., «Sanctioning Models: The Epistemology of Simulation», *Science in Context*, vol. 12, n.º 2, 1999, p. 275-292.
- ZYLBERBERG A., *L'Economie Mathématique en France*, Paris, Economica, 1990.

RESUMEN

La noción de modelo ha jugado un papel fundamental tanto en las ciencias físicas como en las ciencias sociales. Apoyándose en los trabajos de diferentes coloquios y en trabajos más recientes de Centro Koyré, el autor nos presenta un cuadro de las diferentes acepciones de la noción de modelo que pasan por la física de Maxwell y Boltzmann a finales del siglo XIX, por los debates del Círculo de Viena y la teoría de modelos en lógica matemática de los años 1930-1950, después por la explosión de la noción más empírica de modelo en las ciencias sociales de los años treinta y de la inmediata posguerra, con el desarrollo de las matemáticas aplicadas, de la informática, de la investigación operativa y de la modelización estructural. Una ruptura importante aparece en los años 1970 que invita a considerar que la modelización de sistemas complejos ya no encuentra apoyo sobre una teoría científica sino sobre una multitud de conocimientos que el modelo y más aún el programa informático, son capaces de integrar en función de objetivos de investigación y de intervención. A partir de entonces, la modelización ha de ser considerada como actividad social y política que se inscribe en las lógicas de los actores y las decisiones colectivas, por encima de la consideración del modelo como objeto mediador, puramente cognitivo, entre la teoría y la observación.

PALABRAS CLAVE

Econometría, Epistemología, Historia de las Ciencias, Modelo, Ciencias Sociales

ABSTRACT

The model is today a crucial idea in the social and physical sciences. Revisiting several philosophical or historical works on models, the author gives some elements for a genealogy of this category ranging from the use by Maxwell and Boltzmann in Physics to the debates of the Vienna Circle on model theory in mathematical logic. Later, the irruption of the concept in Social Sciences around World War II connected with applied mathematics, computer science and simulations, structural modelling and operational research. The study of new objects as ecosystems, climate and the world economy, which can not be represented within the framework of a theory has needed different approaches to knowledge, either theoretical or empirical. The model and the software must seek to integrate these various elements of knowledge, taking into account the aims of the modelling activity: arbitrages, decisions about actions and the management of systems, rather than to consider the model as a cognitive mediator between theory and observation. Modelling is a social and political activity linked to the motivations of the actors and to collective decisions.

KEY WORDS

Econometrics, Epistemology, History of Sciences, Model, Sciences Studies, Social Sciences.