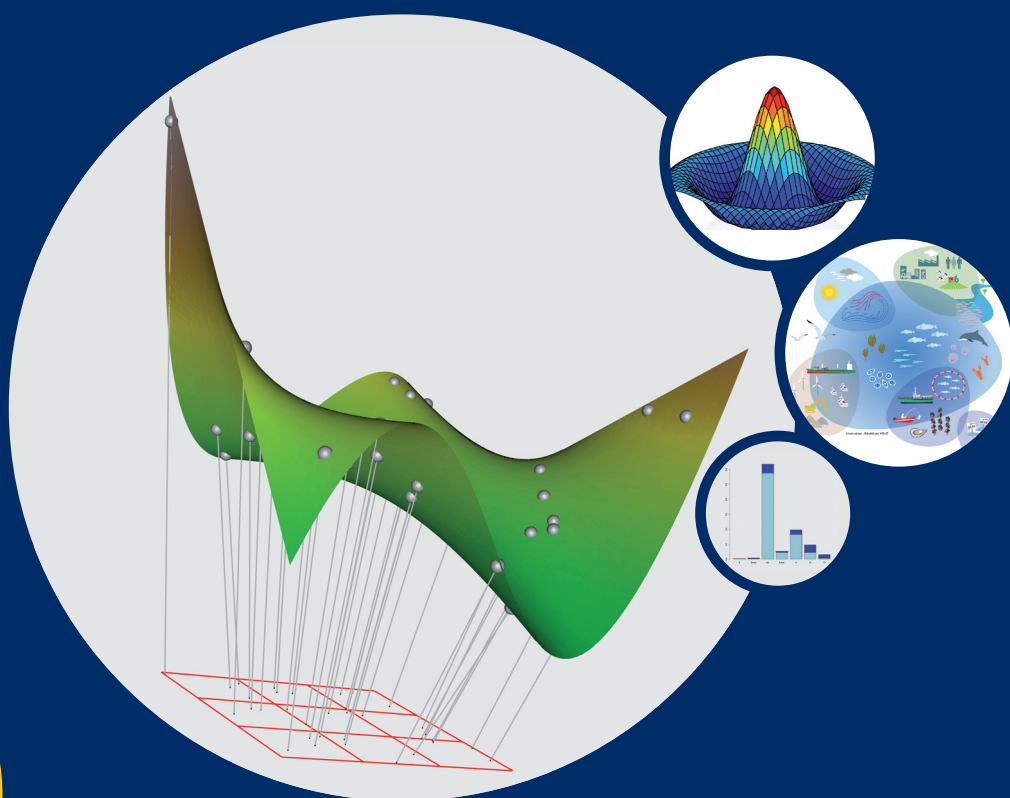


Analyse de sensibilité et exploration de modèles

Application aux sciences de la nature
et de l'environnement

R. Faivre, B. Iooss, S. Mahévas, D. Makowski,
H. Monod, éd.



ANALYSE DE SENSIBILITÉ ET EXPLORATION DE MODÈLES

APPLICATION AUX SCIENCES DE LA NATURE ET DE
L'ENVIRONNEMENT

Robert Faivre, Bertrand Iooss, Stéphanie Mahévas,
David Makowski, Hervé Monod, éd.

Collection Savoir-faire

Les déversoirs sur digues fluviales

Gérard Degoutte, coord.

2012, 184 p.

Production de canards

Heinz Pingel, Gérard Guy, Elisabeth Baéza

2012, 252 p.

Nutrition et alimentation des chevaux

William Martin-Rosset, coord.

2012, 624 p.

Le Paraha peue ou *Platax orbicularis*

Biologie, pêche, aquaculture et marché

Éric Gasset, Georges Remoissenet

2011, 64 p.

Méthodes de création de variétés en amélioration des plantes

André Gallais

2011, 286 p.

Bio-informatique. Principes d'utilisation des outils

Denis Tagu, Jean-Loup Risler, coord.

2010, 280 p.

Éditions Quæ

RD 10, 78026 Versailles Cedex, France

ISBN : 978-2-7592-1907-0

ISSN : 1952-1251

© Éditions Quæ, 2013

Le code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction même partielle du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.

Table des matières

Contributeurs	v
Avant-Propos	vii
Préface de <i>Bruno Goffinet</i>	ix
<i>Andrea Saltelli's Foreword</i>	xi
Préface d' <i>Andrea Saltelli</i>	xvii
Introduction à l'ouvrage	xxiii
I Principes de base	1
1 Objectifs et principales étapes de l'analyse d'incertitude et de sensibilité	3
<i>David Makowski</i>	
1.1 Définitions et objectifs	3
1.2 Etapes de l'analyse d'incertitude	6
1.3 Principes de base de l'analyse de sensibilité	15
1.4 Illustration de l'analyse de sensibilité globale avec un modèle de pathologie végétale	18
1.5 Méthodes spécifiques pour analyser l'incertitude des équations des modèles	25
1.6 Conclusion	29

2 Revue et objectifs des méthodes d'analyse de sensibilité globale 31

Bertrand Iooss et Stéphanie Mahévas

2.1	Introduction	31
2.2	Méthodes de criblage	38
2.3	Définitions de mesures d'importance	43
2.4	Exploration du modèle	50
2.5	Conclusions	56

II Méthodes 59

3 Echantillonnage en grande dimension 61

Bertrand Iooss, Hervé Monod, Thierry Faure et Lauriane Rouan

3.1	Introduction	61
3.2	Principes de base	62
3.3	Plans à projections factorielles uniformes	66
3.4	Plans à bon remplissage de l'espace	71
3.5	L'analyse d'incertitude	79

4 Criblage par discrétisation de l'espace 85

Claude Bruchou et Hervé Monod

4.1	Introduction	85
4.2	Méthode de Morris	88
4.3	Analyse de la variance	96
4.4	Plans factoriels fractionnaires	105
4.5	Exemple d'analyse de sensibilité d'une FC	111
4.6	Annexe : code utilisé pour le pavage	123

5 Méthodes d'analyse de sensibilité globale basées sur l'analyse de la variance 125

Hervé Monod

5.1	Introduction	125
5.2	Indices de sensibilité basés sur la variance	128

5.3	Usages pratiques des indices de sensibilité	134
5.4	Méthodes d'estimation des indices de sensibilité	141
5.5	Discussion	157
6	Exploration par construction de métamodèles	159
	<i>Robert Faivre</i>	
6.1	Introduction	159
6.2	Méthodes de régression paramétrique	163
6.3	Méthodes de régression non paramétrique	179
6.4	Méthodes de prédiction par processus gaussien	187
6.5	Synthèse	193
7	Grille de sélection d'une méthode d'analyse de sensibilité globale	195
	<i>Stéphanie Mahévas et Bertrand Iooss</i>	
7.1	Notations et définitions	197
7.2	Contraintes et caractéristiques d'une analyse de sensibilité	198
7.3	Critères de choix d'une analyse de sensibilité	200
7.4	Grilles de choix de la méthode	201
7.5	Conclusion	207
III	Applications	211
8	Illustration de la mise en œuvre d'une analyse de sensibilité d'un modèle de gestion des pêches	213
	<i>Stéphanie Mahévas et Sigrid Lehuta</i>	
8.1	Le rôle de l'analyse de sensibilité en halieutique	213
8.2	Le modèle complexe ISIS-Fish	217
8.3	Analyse de sensibilité d'ISIS-Fish	221
8.4	Conclusion	230

9 La boîte à outils Mexico, un environnement générique pour piloter l'exploration numérique de modèles	233
<i>Hervé Richard, Hervé Monod, Juhui Wang, Jean Couteau, Nicolas Dumoulin, Benjamin Poussin, Jean-Christophe Soulié, Éric Ramat</i>	
9.1 Introduction	233
9.2 Description du projet de boîte à outils du réseau Mexico (BaO Mexico)	235
9.3 Architecture et principaux choix techniques	236
9.4 Spécification du protocole expérimental	241
9.5 BaO Mexico : outils et mise en œuvre	245
9.6 BaO Mexico : perspectives	252
10 Le package mtk, une bibliothèque R pour l'exploration numérique des modèles	255
<i>Juhui Wang, Hervé Richard, Robert Faivre et Hervé Monod</i>	
10.1 Introduction	255
10.2 Prise en main rapide du package mtk	257
10.3 Conception et architecture	260
10.4 Fonctions et caractéristiques	266
10.5 Conclusion	275
11 Exploration numérique d'un modèle agronomique avec le package mtk	277
<i>Robert Faivre, David Makowski, Juhui Wang, Hervé Richard et Hervé Monod</i>	
11.1 Objectif	277
11.2 Le modèle	278
11.3 Analyse d'incertitude	284
11.4 Analyse de sensibilité	288
11.5 Exploration du modèle	292
Bibliographie	307

Contributeurs

Claude Bruchou

INRA, UR546

Biostatistique et Processus Spatiaux

Domaine Saint Paul, site Agroparc

84914 Avignon cedex 9

Claude.Bruchou@paca.inra.fr

Jean Couteau

CODE LUTIN

Les Espaces Jules Verne

12 avenue Jules Verne

44230 Saint-Sébastien-sur-Loire

couteau@codelutin.com

Nicolas Dumoulin

IRSTEA Clermont-Ferrand, LISC

Ingénierie des Systèmes Complexes

Campus universitaire des Cézeaux

24 avenue des Landais, BP50085

63172 Aubière cedex

nicolas.dumoulin@irstea.fr

Robert Faivre

INRA, UR 875

Mathématiques et Informatique

Appliquées de Toulouse

Auzeville, CS 52627

31326 Castanet-Tolosan cedex

Robert.Faivre@toulouse.inra.fr

Thierry Faure

IRSTEA Clermont-Ferrand, LISC

Ingénierie des Systèmes Complexes

Campus universitaire des Cézeaux

24 avenue des Landais, BP50085

63172 Aubière cedex

thierry.faure@irstea.fr

Bertrand Iooss

EDF R&D

Management des Risques Industriels

6 quai Watier

78401 Chatou

bertrand.iooss@edf.fr

Sigrïd Lehuta

IFREMER

Halieutique Manche Mer du Nord

150 Quai Gambetta

62200 Boulogne-sur-Mer

sigridlehuta@gmail.com

Stéphanie Mahévas

IFREMER

Ecologie et Modèles pour l'Halieutique

rue de l'Île d'Yeu, BP 21105

44311 Nantes cedex 03

Stephanie.Mahevas@ifremer.fr

David Makowski

*INRA, UMR 211
Agronomie
INRA AgroParisTech
78850 Thiverval-Grignon
david.makowski@grignon.inra.fr*

Hervé Monod

*INRA, UR 341
Mathématiques et Informatique
Appliquées de Jouy-en-Josas
Domaine de Vilvert
78350 Jouy-en-Josas cedex
herve.monod@jouy.inra.fr*

Benjamin Poussin

*CODE LUTIN
Les Espaces Jules Verne
12 avenue Jules Verne
44230 Saint-Sébastien-sur-Loire
poussin@codelutin.com*

Éric Ramat

*Université du Littoral - Côte d'Opale
Informatique Signal et Image
Maison de la Recherche Blaise Pascal
50, rue Ferdinand Buisson, BP 719
62228 Calais cedex
ramat@lisic.univ-littoral.fr*

Hervé Richard

*INRA, UR546
Biostatistique et Processus Spatiaux
Domaine Saint Paul, site Agroparc
CS40509
84914 Avignon cedex 9
Herve.Richard@paca.inra.fr*

Lauriane Rouan

*CIRAD - BIOS (UMR AGAP)
Avenue Agropolis
TA-A 108/01
34398 Montpellier cedex 5
lauriane.rouan@cirad.fr*

Jean-Christophe Soulié

*CIRAD - BIOS (UMR AGAP)
Avenue Agropolis
TA-A 108/01
34398 Montpellier cedex 5
jean-christophe.soulie@cirad.fr*

Juhui Wang

*INRA, UR 341
Mathématiques et Informatique
Appliquées de Jouy-en-Josas
Domaine de Vilvert
78350 Jouy-en-Josas cedex
juhui.wang@jouy.inra.fr*

Avant-Propos

Le développement de modèles de système intégrant de plus en plus de dynamiques et de processus suscite le besoin de méthodes adaptées d'analyse et d'exploration de ces modèles. Ce contexte a conduit les auteurs à se structurer en réseau et groupement de recherche (GdR) afin d'apporter des réponses et des règles d'analyse dont certaines peuvent dès à présent être transférées auprès des modélisateurs. Le réseau Mexico, pour Méthodes pour l'EXploration Informatique de modèles COMplexes, dont sont issus la plupart des auteurs, est une émanation de cette structuration.

Mexico est un réseau méthodologique du département de Mathématiques et Informatique Appliquées (MIA) de l'Inra regroupant des chercheurs de différents organismes, Inra, Ifremer, Irstea, Cirad, Université du Littoral. Ce réseau est par ailleurs labellisé et soutenu régulièrement par le RNSC (Réseau National des Systèmes Complexes) ou l'ISF-PIF (Institut des Systèmes Complexes, Paris-Île de France) et en contact très étroit avec le GdR MASCOT-Num regroupant plus particulièrement les mondes universitaires et industriels sur ce thème. Cet ouvrage bénéficie de l'expérience de sessions de formation que le réseau Mexico a conduites en 2009, 2010 et 2012 en partenariat avec le service FormaSciences de formation permanente de l'Inra.

Nous remercions tout particulièrement Andrea Saltelli d'avoir bien voulu préfacier cet ouvrage avec sa faconde et son enthousiasme habituels, qu'il nous a fait partager lors de congrès SAMO et lors de nos écoles-chercheurs. Nos remerciements se tournent également vers Bruno Goffinet, ancien chef du département MIA de l'Inra qui a soutenu les activités du réseau Mexico dès sa création.

Nous espérons que cet ouvrage sera un complément utile aux modélisateurs de nos organismes d'origine et pensons qu'il va bien au-delà du cadre de nos champs d'applications respectifs.

Préface

Bruno Goffinet

*Chef du département Mathématiques et Informatique Appliquées
de l'Inra de 2003 à 2011.*

Les modèles développés par les chercheurs des sciences de la vie et de l'environnement (Goffinet *et al.*, 2005) sont de plus en plus souvent complexes au sens où ils comprennent des multiples éléments en interaction les uns avec les autres, et dont le comportement global ne peut pas être simplement inféré à partir du comportement de ses composantes. Le modélisateur introduit dans ces modèles sa connaissance fine des processus en jeu, en couplant des sous modèles correspondant à des processus relativement bien étudiés, et dont certains paramètres sont appréhendables expérimentalement. Ce couplage peut associer des niveaux d'organisation du vivant différents, des échelles spatiales ou temporelles variées, et des informations hétérogènes. Le modèle obtenu finit par ressembler à une boîte noire pouvant associer des entrées et des sorties sans que l'on puisse s'en donner une représentation globale.

Qu'ils soient conçus pour la connaissance ou pour l'action, il est indispensable d'analyser les propriétés de tels assemblages si l'on veut les valider qualitativement, inférer de nouvelles connaissances ou évaluer l'impact précis d'une action sur le système. Ceci est d'autant plus nécessaire que ces modèles ne sont qu'une approximation de la réalité. L'enjeu de l'analyse de sensibilité et de l'exploration des modèles est de répondre à cette question en offrant des méthodologies permettant d'appréhender ces modèles complexes dans leur globalité. On peut ainsi comprendre leur comportement, les confronter aux connaissances que l'on peut avoir sur le système et ainsi le valider et le faire évoluer. Il s'agit d'une étape cruciale dans le processus de construction d'un modèle. Et il est essentiel que les modélisateurs, qu'ils soient agronomes, biologistes ou spécialistes de l'environne-

ment, etc., maîtrisent ces méthodologies car cette phase du processus de modélisation est très difficile à déléguer entièrement à un spécialiste des méthodes.

Parmi les auteurs de ce livre, on trouve à la fois des spécialistes des méthodes qui ont développé des recherches dans ces domaines et des modélisateurs qui les ont mises en œuvre. Ils présentent donc à la fois un panorama de qualité des méthodes existantes en montrant les propriétés et les limites, et des exemples de mise en œuvre qui précisent la démarche et ce que l'on peut en attendre. Ils travaillent ensemble depuis plusieurs années dans le cadre du réseau Mexico, qui est un « modèle » de fonctionnement intégré et efficace, et ont montré leur capacité à enseigner dans ce domaine avec la mise en place de plusieurs formations approfondies destinées aux modélisateurs.

Ce livre apparaît donc comme une composante nécessaire de la panoplie d'un modélisateur dans les domaines des sciences de la vie et de l'environnement. Il ne faudra pas y rechercher des méthodes concernant la phase de construction de modèles, domaine pour lequel il existe déjà de nombreux ouvrages. Par contre, il apporte une information large et approfondie sur la phase essentielle d'analyse, exploration et exploitation des modèles par le biais de la simulation.

Références

B. Goffinet, J.-P. Amigues, Y. Brunet, F. Clément, F. Courtois, G. Della Valle, L. Di Pietro, M. Duru, R. Faivre, P. Favardin, C. Fourichon, A. Franc, V. Ginot, J.-J. Godon, F. Hospital, S. Lardon, R. Martin-Clouaire, H. Monod, H. Seegers, H. Sinoquet, J. Traas, G. Trystram, J.-P. Vila, and D. Wallach. La modélisation à l'INRA. Technical report, INRA, 2005.

Foreword

The cautious modeller : craftsmanship without wizardry

Andrea Saltelli

*European Commission, Joint Research Centre,
Unit of Econometrics and Applied Statistics,
Ispra (I)*

According to Naomi Oreskes (2000) “[...] models are complex amalgam of theoretical and phenomenological laws (and the governing equations and algorithms that represent them), empirical input parameters, and a model conceptualization. When a model generates a prediction, of what precisely is the prediction a test? The laws? The input data? The conceptualization? Any part (or several parts) of the model might be in error, and there is no simple way to determine which one it is”.

Oreskes’s point is linked to the parallel often made between a logical proposition – a theory-based statement - and a model prediction. Although models share the scientific flavour of postulated laws or theories they are not laws in that the making of a model is substantially more fraught with assumptions than crisp theories or agile laws ordinarily are.

She notes “[...] to be of value in theory testing, the predictions involved must be capable of refuting the theory that generated them.” What when the “theory” is not a law but a mathematical model? “This is where predictions [...] become particularly sticky.”

The crux of the matter is that model based inferences are very delicate artefacts. These artefacts can be immensely useful as well as dramatically deceiving. Foremost this is due to the fact that models lend themselves to a universe of possible uses. Philosopher Jean Baudrillard was among the

many to note how different model use is between controlled laboratory conditions and – to make just an example – model use in mass communication (Baudrillard, 1999, p.92).

In his critique of man's addiction to a "simulated" version of reality he states :

One "fabricates" a model by combining characteristics or elements of the real ; and, by making them "act out" a future event, structure or situation, tactical conclusions can be drawn and applied to reality. It can be used as an analytic tool under controlled scientific conditions. In mass communication, this procedure assumes the force of reality, abolishing and volatilizing the latter in favour of that neo-reality of a model materialized by the medium itself.

For Funtowicz and Ravetz different quality control standards apply to different contexts, depending mostly on the stakes associated to a model prediction (e.g. relevant to many versus relevant to a few), as well on the associated uncertainties (Funtowicz and Ravetz, 1990, 1993). High stakes, high uncertainty settings call – also in the case of mathematical modelling – for forms of quality assurance beyond those in use within the discipline. In this respect the use of models' pedigree has been advocated by van der Sluijs (2002).

To complicate the matter further, prediction's stakes and prediction's uncertainties are not independent from one another, as – in a situation where stakes are high - competing parties may inflate or deflate the uncertainty associated to a model inference according to their convenience (Michaels, 2005 ; Oreskes and Conway, 2010).

A modeller quietly going about her business and toiling with algorithms to solve a technical tasks – be it a mechanism identification, an optimization, a *ceteris paribus* analysis, or an expert system may wonder in which way all this should be of concern. In a sense linked to Oreskes' initial remarks, the considerations above should be a concern to all modellers. How does the reader of the present manual test her model when it is built by combining a conceptualization, a set of laws and input data, with algorithms, boundary conditions and who knows how many other explicit or implicit assumptions ? Depending on what kind of analysis the modeller is engaged she may be more concerned about the model's sensitivity to one or another of the features above. This implies that she must have a sure grasp, a firm understanding of what drives the inference of her model, foremost for herself, but also because she might be called to defend her analysis.

One way to invalidate a model is to bring out in the open the many assumptions possibly hidden in its construction (Laes et al., 2011; Klopprogge et al., 2011).

Recommendations along these lines can be found in several disciplines. A need for a global sensitivity analysis has been advocated by econometricians (Leamer, 1990, 2010; Kennedy, 2007), as well and by international agencies (EPA, 2009; OMB, 2002, 2006) and practitioners (Saltelli, 2010). The team running the *Écoles Chercheurs MEXICO* has made a fortunate choice in naming the present Handbook “Analyse de sensibilité et exploration de modèles”, in that sensitivity analysis is foremost about exploring the space of the input assumptions in such a way as to be able to map the inference to the assumptions in a transparent fashion. Such a mapping is precious in several respects.

Having done such a mapping the modeler will naturally tend to present her inference in the form of a distribution, or at least to give confidence bounds, avoiding the ludicrous spurious accuracy often accompanied to model inferences (e.g. giving an economic prediction with four significant digits when two would already be difficult to defend).

Knowing what factors drive the variation in model prediction allows one to simplify models. When models are to be audited by an external entity a simplified model representation can be extremely useful, especially if guidelines applicable to the subject domain prescribe transparency, i.e. in the form of reproducibility by independent actors (OMB, 2007).

At the most basic level of the analysis, the mapping will most likely help identify inconsistencies or “surprises” in the way the model reacts.

Still, sensitivity analysis (or sensitivity auditing, which is sensitivity analysis deployed in a context of scientific support to policy (Saltelli et al., 2012)) is no panacea. A few caveats are de rigueur :

“It is important [...] to recognize that the sensitivity of the parameter in the equation is what is being determined, not the sensitivity of the parameter in nature. [...] If the model is wrong or if it is a poor representation of reality, determining the sensitivity of an individual parameter in the model is a meaningless pursuit.” (Pilkey and Pilkey-Jarvis, 2007).

Some sensitivity analyses can be poor or perfunctory, either because of lack of ingenuity in their construction or because of a cavalier attitude with regard to uncertainties. To make just an example, a sensitivity analysis performed by changing one factor at a time is definitely a poor practice (Saltelli and Annoni, 2010).

Simply because we do not know what we do not know, all sensitivity analysis will remain subject to an incompleteness principle. In controversial cases, the quality of a SA will be judged by its fitness for purpose, e.g. by its acceptance and defensibility.

We would like to conclude this short preface to the excellent work of our MEXICO team with a spoon of irony, borrowed from Douglas Adams, the popular author of the BBC's Hitchhiker Guide to the Galaxy. In one of his novels a character states (Adams, 1987, p. 69) :

“Well, [...] [the] great insight was to design a program which allowed you to specify in advance what decision you wished it to reach, and only then to give it all the facts. The program's task, [...], was to construct a plausible series of logical-sounding steps to connect the premises with the conclusion.”

Modelling has been defined as an art, or better a craftsmanship (Rosen, 1991). Like all creative activities, modelling gives joy to its maker. Might the users of this manual enjoy their craft with a vigilant eye against mal-practice !

References

- D. Adams, 1987. Dirk Gently's Holistic Detective Agency, Pocket Books.
- J. Baudrillard, 1999. Revenge of the Crystal : Selected Writings on the Modern Object and Its Destiny, 1968-83, Pluto Classics.
- EPA, 2009. Guidelines, p. 69-76, accessed June 12, 2012.
http://www.epa.gov/crem/library/cred_guidance_0309.pdf
- S.O. Funtowicz and J.R. Ravetz, 1990. Uncertainty and Quality in Science for Policy, Springer, Dordrecht, p. 54.
- S.O. Funtowicz and J.R. Ravetz, 1993. Science for the Post Normal age, Futures, 25, 739-755.
- M. Henrion, 2006. Open-Source Policy Modelling, accessed June 12, 2012.
http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/omb/assets/omb/inforeg/comments_rab/mh.pdf
- P. Kennedy, 2007. A guide to econometrics, Fifth edition, Blackwell Publishing, p. 396.
- D. Michaels, 2005. Doubt is their product, Scientific American, June, 292, Issue 6.

- E. Laes, G. Meskens and J.P. van der Sluijs, 2011. On the contribution of external cost calculations to energy system governance : The case of a potential large-scale nuclear accident, *Energy Policy*, 39(9), p. 5664–5673.
- E. Leamer, 1990. Let's take the con out of econometrics, and Sensitivity analysis would help. In C. Granger (ed.) *Modelling Economic Series*, Clarendon Press, Oxford, or : Leamer, E., 1990, Let's Take the Con Out of Econometrics, *American Economics Review*, 73 (March 1983), 31-43.
- E. Leamer, 2010. Tantalus on the Road to Asymptopia, *Journal of Economic Perspectives*, 24, (2), 31–46.
- OMB : Office of Management and Budget, 2002. Guidelines for Ensuring and Maximizing the Quality, Objectivity, Utility, and Integrity of Information Disseminated by Federal Agencies; *Federal Register* / Vol. 67, No. 36 / Friday, February 22, 2002 / Notices, p. 8456, accessed June 12, 2012.
<http://www.whitehouse.gov/omb/fedreg/reproducible2.pdf>
- OMB : Office of Management and Budget's, 2012. Office of Information and Regulatory Affairs (OIRA), January 9, 2006, Proposed Risk Assessment Bulletin, p. 16-17, accessed June 12, 2012.
http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/omb/assets/omb/inforeg/proposed_risk_assessment_bulletin_010906.pdf
- N. Oreskes, 2000. Why predict? Historical perspectives on prediction in Earth Science, in *Prediction, Science, Decision Making and the future of Nature*, Sarewitz et al., Eds., Island Press, Washington DC.
- N. Oreskes and E. M. Conway, 2010. *Merchants of Doubt*, Bloomsbury Press.
- O. H. Pilkey and L. Pilkey-Jarvis, 2007. *Useless Arithmetic. Why Environmental Scientists Can't Predict the Future*, Columbia University Press, New York.
- R. Rosen, 1991. *Life Itself - a Comprehensive Inquiry into Nature, Origin, and Fabrication of Life*, Columbia University Press, p. 49-55.
- A. Saltelli and P. Annoni, 2010. How to avoid a perfunctory sensitivity analysis, *Environmental Modeling and Software*, 25 : 1508-1517.
- A. Saltelli and B. D'Hombres, 2010. Sensitivity analysis didn't help. A practitioner's critique of the Stern review, *Journal of Global Environmental Change*, 20 : 298–302.

A. Saltelli, S. Funtowicz, A. Pereira and J. van der Sluijs, 2012. What do I make of your Latinorum? Sensitivity auditing of mathematical modeling, in preparation.

J.P. Van der Sluijs, 2002. A way out of the credibility crisis around model-use in Integrated Environmental Assessment, *Futures*, 34, 133-146.