

# Incertitudes, erreurs et éthique

V. Bontems\*

*Centre de Saclay, Laboratoire des Recherches sur les Sciences de la Matière, F-91191 Gif-sur-Yvette, France*

T. Duguet†

*Centre de Saclay, IRFU/Service de Physique Nucléaire, F-91191 Gif-sur-Yvette, France and  
National Superconducting Cyclotron Laboratory and Department of Physics and Astronomy,  
Michigan State University, East Lansing, MI 48824, USA*

F. Mangeant‡

*EADS Innovation Works, 92150 Suresnes, France and  
IRT SystemX, Centre Nano-INNOV, Avenue de la Vauve, 91120 Palaiseau, France*

S. Panebianco§

*Centre de Saclay, IRFU/Service de Physique Nucléaire, F-91191 Gif-sur-Yvette, France*

## Atelier de l'Espace de Structure et réactions Nucléaire Théorique

10-14 février 2014

CEA/SPhN, Orme des Merisiers, bat. 703, pièce 135, F-91191 Gif-sur-Yvette Cedex

### I. CONTEXTE

La pratique du physicien s'est construite, à partir des enseignements de Galilée, autour de la mise à l'épreuve expérimentale de la théorie physique, qui permis de rompre avec les certitudes dogmatiques de l'aristotélisme et du sens commun. Cette refondation de la physique a été suivie de près par une clarification de la méthode par Descartes, qui se livrait à un doute hyperbolique afin d'assurer dans un second temps la mise en oeuvre d'un raisonnement fondé et certain. D'emblée la "nouvelle physique" s'est ainsi installée dans une double tension entre certitude et incertitude : le physicien était conscient du caractère conjectural de ses hypothèses et de l'approximation imparfaite de ses mesures et pourtant il agissait en supposant un raisonnement parfaitement sûr et un monde absolument déterminé, le fait expérimental étant vu comme axiologiquement neutre. De nos jours, les physiciens ont appris (où doivent encore apprendre) à relativiser leurs ambitions et à prendre la mesure de phénomènes qui résistent au fantasme du déterminisme absolu. Y voyons-nous pour autant plus clair en ce qui regarde l'incertitude ?

Au regard de cette question, la révolution conceptuelle enclenchée par l'avènement de la mécanique quantique prend une grande importance, elle qui a projeté l'interprétation probabiliste au coeur de la description théorique des phénomènes et qui a largement modifié l'idée même de mesure. L'utilisation d'un schéma interprétatif probabiliste n'apparaît plus seulement dans le calcul des incertitudes expérimentales mais aussi dans l'interprétation de la nature même des objets physiques. Cette translation conceptuelle induit, encore aujourd'hui et même chez les physiciens, un certain nombre de malentendus. On constate notamment une confusion fréquente entre les concepts d'incertitude et d'indétermination qui induit une mécompréhension du fait quantique et souligne la difficulté qu'il y a à trouver une langue adaptée pour traduire la physique mathématique dans le langage courant.

Aussi, avec la révolution industrielle, l'évaluation et, si possible, la réduction des incertitudes expérimentales a été mise en corrélation avec les développements technologiques dans le but d'être traduite en une marge économique. Cet impératif a eu un impact très fort dans le domaine des données nucléaires (sections efficaces, rapports d'embranchements, rendements...) utilisées dans le développement de l'énergie nucléaire ainsi que dans le domaine de l'aéronautique. Se fondant sur la théorie des probabilités qui, le pense-t-on intuitivement, garantit un cadre mathématique solide, les praticiens (mathématiciens, physiciens, ingénieurs) ont développé des méthodes d'évaluation des

---

\*Electronic address: [vincent.bontems@cea.fr](mailto:vincent.bontems@cea.fr)

†Electronic address: [thomas.duguet@cea.fr](mailto:thomas.duguet@cea.fr)

‡Electronic address: [fabien.mangeant@eads.net](mailto:fabien.mangeant@eads.net)

§Electronic address: [stefano.panebianco@cea.fr](mailto:stefano.panebianco@cea.fr)

incertitudes permettant d'estimer l'impact de celles-ci sur les quantités macroscopiques caractérisant le produit industriel. Ces méthodes autorisent le traitement des mesures et des modèles théoriques au moyen de techniques de calcul issues de la théorie des probabilités et, e.g., marches aléatoires, processus stochastiques.

Dans ce contexte, il est étonnant de constater que ce n'est que très récemment que la communauté des théoriciens nucléaires de basse énergie a commencé à faire sienne l'idée d'utiliser les outils probabilistes pour estimer les incertitudes associées aux modèles qu'elle développe pour réaliser des prédictions. L'objectif est de construire des modèles simplifiés par rapport aux traitements quantiques les plus élaborés qui se trouvent limités, du fait de leur coût computationnel, à un petit nombre de systèmes et de prioriser la collecte future des données expérimentales permettant de contraindre ces modèles. Si tant est qu'il est nécessaire, ce rattrapage court le danger de se faire au moyen de méthodes dépassées et/ou sans le recul nécessaire quant au lien que ces méthodes entretiennent avec le problème d'intérêt. Sous couvert d'une plus grande scientificité associée au poids symbolique de la "barre d'erreur", le recours aux méthodes probabilistes peut courir le risque d'être porteur d'ambiguïtés et de falsifications si celui-ci n'est pas concrétisé à bon escient. Il est donc important que les outils formels utilisés fassent l'objet d'un travail de réflexion et d'objectivation.

Par ailleurs, l'incertitude se loge au coeur même de la démarche de recherche, le chemin à suivre n'étant pas tracé a priori. L'ignorance est moteur de la recherche car il faut apprécier (ce) que l'on ignore et même savoir se tromper pour faire de la science. Cela confère à l'erreur scientifique une ambivalence qui doit alerter le praticien sur le danger consistant à porter sur elle un jugement définitif. Ceci oblige à s'interroger sur la notion d'erreur et sur son extension pathologique, la fraude, en jetant un regard synchronique et diachronique sur les valeurs et les normes éthiques qui cadrent la pratique. C'est la mise en lumière de ces différents éléments qui peut permettre de saisir le chemin erratique de la démarche scientifique.

Dans ces conditions, et suivant la démarche de réflexion sur la pratique de la recherche en physique initiée en 2013 lors de l'atelier *Enjeux et outils philosophiques pour le physicien*, l'Espace de Structure et réactions Nucléaires Théorique (ESNT) organise un atelier sur le thème *Incertitudes, erreurs et éthique*. Le premier objectif est de fournir aux physiciens, théoriciens et expérimentateurs, des outils conceptuels pouvant nourrir leur réflexion sur les concepts d'erreur, d'incertitude et de faute. Le second objectif est de les exposer à l'état de l'art des méthodes probabilistes utilisées, notamment dans les domaines de l'ingénierie, pour quantifier et propager les incertitudes ainsi qu'analyser la sensibilité d'un modèle dans le but final de le valider. Par ailleurs, cette activité s'inscrit dans une démarche de consolidation des liens entre l'ESNT et le LARSIM initiés lors de l'atelier précédent, ainsi que dans une démarche d'ouverture en direction d'autres pôles du CEA et de l'industrie.

L'atelier, d'une durée de cinq jours, s'articule autour de onze modules pédagogiques et de cinq séminaires. Suite à une première partie consacrée à l'épistémologie de l'erreur et à l'analyse des différentes typologies de l'incertitude, la question des valeurs et des normes éthiques qui cadrent la pratique du physicien dans son rapport aux incertitudes et aux erreurs inhérentes à la production de résultats scientifiques sera abordée. La discussion permettra de dégager des critères d'objectivation des pratiques qui transgressent ces normes et ces valeurs. Dans le but d'élargir cette perspective, nous nous interrogerons sur les valeurs et les normes esthétiques au regard de l'éthique dans l'art. Par la suite, une analyse diachronique de l'interprétation des probabilités sera proposée dans le but de poser les bases épistémologiques qui fondent les interventions suivantes. Celles ci seront tout d'abord consacrées aux méthodes probabilistes utilisées aujourd'hui pour évaluer et propager les incertitudes à travers un modèle permettant de décrire un processus d'intérêt, ainsi que pour analyser la sensibilité de celui-ci vis à vis des variables mises en jeu. Dans un second temps, on s'intéressera aux approches permettant de construire une description simplifiée d'un modèle trop coûteux en temps de calcul pour être utilisé de manière systématique. Pour finir, on s'intéressera au chemin erratique de la démarche scientifique au travers du cas concret de la conception du télescope spatial Herschel avant d'évoquer une initiative visant à rendre cette démarche plus explicite en la faisant rentrer de plein droit dans le processus de communication aux pairs.

## II. OBJECTIFS DE L'ATELIER

En résumé, les objectifs de l'atelier sont:

1. fournir aux physiciens, théoriciens et expérimentateurs, des outils conceptuels pouvant nourrir leur réflexion sur les concepts d'erreur, d'incertitude et de faute,
2. exposer les physiciens nucléaires à l'état de l'art des méthodes probabilistes utilisées, notamment dans les domaines de l'ingénierie, pour quantifier et propager les incertitudes ainsi qu'analyser la sensibilité d'un modèle vis-à-vis des variables mises en jeu,
3. consolider les liens entre l'ESNT et le LARSIM initiés lors de l'atelier précédent et procéder à une ouverture en direction d'autres pôles du CEA et de l'industrie.

### III. PROGRAMME

Lundi 10 fév.	Mardi 11 fév.	Mercredi 12 fév.	Jeudi 13 fév.	Vendredi 14 fév.
<i>Erreurs et incertitudes</i>	<i>Erreur et éthique</i>	<i>Incertitudes</i>	<i>Incertitudes</i>	<i>Modus operandi</i>
09h15 Accueil				
09h30 Module 1	09h30 Module 3	09h30 Module 6	09h30 Module 8	09h30 Module 10
10h45 <b>Pause Café</b>	10h45 <b>Pause Café</b>	10h45 <b>Pause Café</b>	10h45 <b>Pause Café</b>	10h45 <b>Pause Café</b>
11h15 Séminaire 1	11h15 Module 4	11h15 Séminaire 4	11h15 Module 8	11h15 Module 10
12h30 <b>Déjeuner</b>	12h30 <b>Déjeuner</b>	12h30 <b>Déjeuner</b>	12h30 <b>Déjeuner</b>	12h30 <b>Déjeuner</b>
14h15 Module 2	14h15 Module 5	14h15 Module 7	14h15 Module 9	14h15 Module 11
15h30 <b>Pause Café</b>	15h30 <b>Pause Café</b>	15h30 <b>Pause Café</b>	15h30 <b>Pause Café</b>	16h00 <b>Pause Café</b>
16h00 Séminaire 2	16h00 Séminaire 3	16h00 Module 7	16h00 Module 9	16h30 Séminaire 5
17h15 <b>Fin</b>	17h15 <b>Fin</b>	17h15 <b>Fin</b>	17h15 <b>Fin</b>	

### IV. MODULES ET SÉMINAIRES

- **Module 1: Epistémologie de l'erreur**

*V. Bontems (LARSIM-CEA)*

Concevoir la nature de l'erreur a toujours représenté un défi pour la philosophie au moins aussi redoutable que celui de définir en quoi consiste la vérité. A tel point qu'on commencera par exposer les conceptions paradoxales de Nietzsche et de Popper pour souligner la difficulté d'accorder une valeur distincte à l'erreur et à la vérité dans une conception dynamique de la science. On verra ensuite que cette intrication de la vérité et de l'erreur *scientifiques* se comprend à partir de leur commune opposition au domaine du « même pas faux ». On rappellera ensuite les différents sens que l'erreur peut recevoir au sein de l'épistémologie bachelardienne : obstacle épistémologique, anomalie susceptible de remettre en cause la science à différents niveaux et donc de provoquer une « ouverture », ou même simplement degré d'approximation intrinsèque à l'objectivation.

- **Séminaire 1: L'ambivalence de l'erreur en science**

*E. Klein (LARSIM-CEA)*

Ignorer qu'on ignore, ce n'est pas savoir. C'est même ne pas savoir du tout. Savoir qu'on ignore, c'est vraiment savoir, car cela suppose de savoir tout ce qui est su, et donc d'être capable de détecter les trous dans la connaissance, de déceler ses manques, ses incertitudes et ses lacunes. Croire savoir sans savoir, telle est en somme la vraie pathologie du savoir. C'est pourquoi l'ignorance est la grande affaire des savants, plutôt que celle des ignares : savoir ignorer, ce n'est pas ignorer le savoir, mais savoir ce qu'il ne contient pas, et constamment l'inquiéter. En somme, c'est faire de la science. De nouveaux savoirs peuvent ainsi accroître l'ignorance : grâce à une découverte, on comprend qu'on ne savait pas qu'on ne savait pas et, d'un coup, les perspectives changent, l'horizon de la connaissance se reconfigure, et des révolutions deviennent envisageables, voire nécessaires. Elles s'accompagnent d'hésitations, de fulgurances, d'emballements, d'erreurs qui, parfois, ouvrent des perspectives si fécondes que le bilan rétrospectif qu'on peut en faire est ambivalent. Nous donnerons quelques exemples de telles erreurs, tirés de la genèse de la théorie de la relativité générale et de celle de la physique quantique.

- **Module 2: Typologie des incertitudes**

A. Grinbaum (LARSIM-CEA)

"Uncertainty rather than frailty becomes the decisive character of human affairs", affirmait Hannah Arendt. Devenant ainsi l'élément fondamental de la relation entre la société et le monde scientifique et technique, l'incertitude exige une analyse conceptuelle allant au-delà de sa réduction au "risque" que l'on serait censé "gérer" à l'aide du principe de précaution. Nous proposerons une typologie de l'incertitude et discuterons de sa pertinence dans le cas des relations science-société.

- **Séminaire 2: Incertitude et indétermination en mécanique quantique**

E. Klein (LARSIM-CEA)

Tout le monde s'accorde désormais pour dire qu'il faudrait davantage « partager la science ». Mais pour traduire la physique en phrases, il faut effectuer un véritable saut. Un saut qui n'a rien à voir avec le saut à la perche où le sauteur, sauf accident, est le même à l'arrivée qu'avant. Non, le saut dont il est ici question ne peut être un simple déplacement : ce doit être une véritable transformation. Il ne s'agit pas de transporter la physique telle qu'elle est dans le langage tel qu'il est, mais de la « métaphoriser », de la traduire en un certain sens, en veillant à ne jamais faire perdre à ses concepts l'étrangeté qu'ils ont par rapport aux notions communes. *Metaphora* signifie d'ailleurs en grec « déménagement ». C'est le bon mot : il ne s'agit plus de vulgariser la physique, mais de la « déménager », depuis son formalisme d'origine - les mathématiques - jusqu'au langage ordinaire. Cette opération de déménagement est à la fois délicate et essentielle. Délicate parce que les concepts de la physique sont encore plus fragiles que la porcelaine, de sorte que si on ne prend pas de précautions, on les casse. Essentielle parce que cette opération est un enjeu éthique : dès lors que notre façon de dire les choses détermine notre façon de les penser, si on les dit mal, on les pensera mal : on fera dire à la physique ce qu'elle ne dit pas et on ne lui fera pas dire ce qu'elle dit. Il faut donc travailler à bien la dire. Nous poserons la question suivante : avons-nous su bien « déménager » le principe dit « d'incertitude » de Heisenberg ?

- **Module 3: La fraude!**

V. Bontems (LARSIM-CEA)

On rappellera comment les différentes variétés de sociologie des sciences conçoivent les pratiques frauduleuses dans le champ scientifique : infraction aux normes de la communauté chez Merton, pari sur le rapport de force entre réseaux concurrents chez Latour, tentative de subversion des règles de l'habitus et affaiblissement de l'autonomie du champ chez Bourdieu. Puis on examinera les travaux de sociométrie qui analyse l'augmentation du nombre de fraudes détectées au sein des publications et on s'interrogera sur leur signification quant à l'évolution historique de la science et de ses pratiques.

- **Module 4: La fraude?**

A. Grinbaum (LARSIM-CEA)

Le mot "onaa" désigne un dommage produit par une fraude et subi par un individu ou une collectivité. Il s'agit d'un domaine intermédiaire entre vérité absolue et dissolution totale dans le mensonge généralisé. "Entre les deux extrêmes, peut-être après coup et avec le recul," écrit le philosophe Henri Atlan, "l'aventure scientifique paraît correspondre, du point de vue de son rapport à la vérité, à cet entre-deux de l'onaa où l'approximation et la ruse de la pudeur apparaîtraient comme les moins mauvaises garanties d'une vérité qui se construit". Nous expliciterons et commenterons cette thèse.

- **Module 5: Progrès des valeurs et des normes éthiques**

V. Bontems (LARSIM-CEA)

L'existence d'un progrès dans le domaine moral a souvent été contestée, par exemple, par Rousseau. Mais si on en admet la possibilité, reste à savoir dans quelle mesure on serait capable de le décrire, voire de l'évaluer. On exposera alors le modèle de l'éthique ouverte de Ferdinand Gonseth en montrant qu'elle suppose la distinction entre les valeurs et les normes éthiques. Puis, on verra comment un tel modèle peut surmonter l'écueil d'un « relativisme » absolu, précisément en fonction du degré d'ouverture de son référentiel éthique. Cela reconduira au rôle de l'éthique scientifique.

- **Séminaire 3: Valeurs et normes esthétiques au regard de l'éthique dans l'art**

*O. Cena (Télérama)*

L'art est par nature le lieu de l'incertitude. Nul ne sait la postérité d'une oeuvre. Cela laisse pourtant l'amateur, le vrai, indifférent. On ne se trompe jamais en aimant. Le désamour, lorsqu'il advient, ne révèle jamais une erreur passée - il témoigne simplement d'une évolution. L'amateur, le vrai, peut toujours porter sur lui-même un regard bienfaisant. Mais le marché, lui, déteste l'incertitude. Il n'admet pas l'erreur. Aussi cherche-t-il à organiser le monde de l'art comme une place boursière sans règle, sans loi. L'éthique?

- **Module 6: Histoire et interprétations des probabilités**

*V. Bontems (LARSIM-CEA)*

Les probabilités sont un outil mathématique fondamentalement ambigu dont l'évidence tient à ce qu'on s'interroge rarement sur ses fondements épistémologiques : le théoricien s'imagine que le concept a une origine empirique précise et certaine tandis que l'économiste ou le statisticien croit que la notion est « bien fondée » en théorie. Contre ces facilités, on rappellera brièvement que l'élaboration de la théorie des probabilités est passée par plusieurs phases : l'analogie avec les jeux à l'époque de Pascal, puis l'interrogation sur les conditions d'application au siècle des Lumières (Turgot, Laplace et Condorcet), puis la refondation de la méthode par Quételet sur la présupposition d'une « normalité » des distributions, enfin la diversification ultérieure des modèles probabilitaires. On exposera ensuite le dilemme entre conception objective et conception subjective des probabilités et comment celles-ci interviennent dans l'histoire des sciences.

- **Séminaire 4: Majorana et les probabilités en science et en sociologie**

*V. Bontems (LARSIM-CEA)*

Le physicien Ettore Majorana a écrit, dans les années 1930, un article sur « La valeur des lois statistiques dans la physique et dans les sciences sociales ». On peut y observer comment ce pionnier de la mécanique quantique conçoit à l'époque le statut du calcul des probabilités dans l'histoire de la physique, en mécanique quantique et en sociologie, et comment il entend instaurer des analogies formelles entre les différents domaines. Cette étude de cas sera propice à révéler la complexité des enjeux épistémologiques des conditions d'application des probabilités et de leurs interprétations.

- **Module 7: Quantifier les incertitudes**

*F. Mangeant (EADS, IRT SystemX)*

La mise en oeuvre de modèles théoriques par le biais de simulations numériques nécessite de nombreuses étapes techniques et technologiques plus ou moins bien explicitées. En guise d'introduction aux modules portant sur les aspects mathématiques, nous présenterons les principales sources d'incertitude rencontrées usuellement dans les expériences numériques par ordinateur ("computer experiment"): erreurs numériques, erreurs d'estimation, erreurs d'arrondis, erreurs de modèles, erreurs paramétriques, ... Différentes communautés scientifiques s'intéressent à ces différents types d'incertitude avec pour ambition, sinon de contrôler, d'identifier et d'évaluer leur impact sur la qualité des chiffres qui fondent les prédictions. Quelques rappels de probabilités

et de statistiques seront effectués dans le but de fournir un cadre et des notations communes aux différents modules qui suivront.

- **Module 8: Analyse de sensibilité**

*A. Janon (Université Paris-Sud)*

Dans le cadre des expériences numériques par ordinateur, l'analyse de sensibilité a plusieurs objectifs. Tout d'abord, elle permet de vérifier si un modèle est bien fidèle au processus qu'il modélise. En effet, si l'analyse met en évidence une trop grande (ou trop faible influence) d'une variable ou d'un groupe de variables en regard d'une connaissance a priori ou d'une mesure, il faudra réajuster la structure du modèle ou la valeur de ses paramètres. Par ailleurs, l'analyse de sensibilité permet d'identifier les variables qui contribuent le plus/le moins à la variabilité des réponses du modèle numérique. Cette information permettra de prioriser les efforts de collecte d'information. Dans le cas d'un code informatique, il sera possible de supprimer des parties de code qui n'ont aucune influence sur la valeur et la variabilité de la réponse. Dans le cas de mesures, cela permettra de prioriser la collecte des données. On s'intéressera dans ce module à présenter les différents aspects de l'analyse de sensibilité: analyse de sensibilité locale/globale, méthodes de screening, indices de Sobol, ...

- **Module 9: Propagation d'incertitudes**

*F. Gaudier (DEN-CEA)*

Dans le cadre des expériences numériques par ordinateurs, la phase dite de propagation des incertitudes consiste à transporter une loi de probabilités à travers une fonction qui correspond au code de calcul. Selon les indicateurs qui doivent être calculés (probabilités, moments, quantiles, ...), différentes méthodes numériques sont plus ou moins bien adaptées. Dans ce module, les éléments fondamentaux permettant de mettre en oeuvre quelques grandes familles de méthodes, e.g. méthodes de Monte-Carlo, méthodes d'approximation, seront discutés.

- **Module 10: Réduction de modèles**

*A. Nouy (Ecole Centrale Nantes)*

Pour évaluer des quantités d'intérêt lors d'une expérience numérique (intervalles de confiance, indices de sensibilité, ...), il faut le plus souvent faire appel de nombreuses fois au code de calcul. Le temps de calcul permettant d'estimer correctement ces quantités d'intérêt peut alors devenir prohibitif. Diverses techniques permettent de réduire ce temps de calcul tout en maîtrisant les erreurs. Il s'agit soit de méthodes d'approximation ou des méthodes d'interpolation. Plusieurs de ces techniques seront présentées et comparées dans ce module.

- **Module 11: Le chemin erratique de la démarche de recherche**

*V. Bontems (LARSIM-CEA), V. Minier (SAP-CEA) et A. Hatchuel (Mines Paris Tech)*

L'examen de l'exposition programmatique des projets de recherche (définition des objectifs, identification des moyens, mises en oeuvre, obtention des résultats) fait apparaître que celle-ci répond davantage à des contraintes rhétoriques (convaincre de la faisabilité du projet et de la fiabilité des moyens mis en oeuvre) plutôt qu'aux exigences d'une présentation réaliste du processus de la recherche. En nous inspirant de la méthodologie de la conception CK (« Concept-Knowledge »), nous montrerons que la démarche du chercheur est à la fois beaucoup plus aventureuse et plus productive que ce que suppose le modèle habituel. On illustrera cette méthode sur le cas concret de la conception du télescope spatial Herschel.

- **Séminaire 5: How it is really happening**

*T. Duguet (SPhN-CEA)*

Peter Medawar, biologiste Britannique et Prix Nobel de médecine 1960, donna en 1964 une conférence fort instructive dont le titre provocateur était *Is the scientific paper a fraud?* Peter Medawar y développait l'idée que la forme traditionnelle de l'article scientifique escamote la réalité de la démarche effectivement suivie par le chercheur, i.e. l'article scientifique procède d'une écriture qui, si tant est qu'elle permet de rendre compte efficacement de la production de connaissances strictement scientifiques, n'autorise que très partiellement la restitution de la méthode réellement employée. Partant de cette analyse, Martin Tobin institua en 1999, en tant qu'éditeur du *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, une série d'articles intitulée *How it really happened* dans le but de retracer plus fidèlement la démarche suivie par le scientifique en dépassant l'orthodoxie du processus de pensée hypothético-déductif pur et linéaire, lavé de tout soupçon, qui sous-tend le format des communications scientifiques. Nous évoquerons une initiative similaire qui verra prochainement le jour dans *European Physical Journal A* dans le contexte de la physique nucléaire fondamentale.

## V. BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- **Module 1: Epistémologie de l'erreur**

1. G. Bachelard, *Essai sur la connaissance approchée*, Paris, Vrin, 1986 (1928).
2. S. Callens, *Maîtrise de l'erreur* in Lecourt Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences, Paris, PUF, 2006.

- **Module 2: Typologie des incertitudes**

1. Jean-Pierre Dupuy and Alexei Grinbaum, *Living with uncertainty: toward the ongoing normative assessment of nanotechnology*, in Nanotechnology Challenges: Implications for Philosophy, Ethics and Society, Joachim Schummer and Davis Baird Editors, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2006.

- **Module 3: La fraude!**

1. Y. Gingras, *Propos sur les sciences*, Paris, Raisons d'agir, 2010.

- **Module 4: La fraude?**

1. H. Atlan, *De la fraude : Le monde de l'onaa*, La librairie du XXIe siècle, Seuil, 2010.

- **Module 5: Progres des valeurs et des normes éthiques**

1. V. Bontems, *L'Éthique de l'ouverture* in Wunenburger Gaston Bachelard. Une éthique plurielle. Paris, Hermann, 2013.

- **Module 6: Histoire et interprétations des probabilités**

1. E. Brian, *Comment tremble la main invisible?*, Paris, Springer, 2009.

- **Module 7: Quantifier les incertitudes**

1. Standard NASA pour le calcul et la simulation: [bit.ly/1a2JSDL](http://bit.ly/1a2JSDL)
2. Guide of Uncertainty in Measurement : <http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html>
3. J-F. Delmas, *Introduction au calcul des probabilités et à la statistique*, Paris, Les presses de l'ENSTA, 2010.
4. Cours et articles sur les techniques de gestion des incertitudes
  - (a) <http://mpdc.mae.cornell.edu/Courses/UQ/UQ.html>
  - (b) <http://www.gdr-mascotnum.fr/documents.html>

- **Module 8: Analyse de sensibilité**

1. A. Saltelli, S. Tarantola, F. Campolongo, M. Ratto, *Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models*, Wiley-Blackwell, 2004.
2. I. M. Sobol, *Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates*, Mathematics and Computers in Simulation, 55(1-3), 271-280, 2001.

- **Module 9: Propagation d'incertitudes**

1. Cours: <http://mpdc.mae.cornell.edu/Courses/UQ/UQ.html>

- **Module 10: Réduction de modèles**

1. L. Grasedyck, D. Kressner, and C. Tobler, *A literature survey of low-rank tensor approximation techniques*, GAMM-Mitteilungen, 2013.
2. A. Nouy, *Proper Generalized Decompositions and separated representations for the numerical solution of high dimensional stochastic problems*, Archives of Computational Methods in Engineering, 17(4):403-434, 2010.
3. A. T. Patera and G. Rozza, *Reduced basis approximation and a posteriori error estimation for parametrized partial differential equations*, Version 1.0, Copyright MIT 2006.

- **Module 11: Le chemin erratique de la démarche de recherche**

1. A. Hatchuel and B. Weil, *C-K design theory: an advanced formulation*, Research in Engineering Design, n°19, 2009.

- **Séminaire 1: L'ambivalence de l'erreur en science**

1. S. Firestein, *Ignorance, how it drives science*, OUP, USA, 2012
2. E. Klein, *Faut-il croire la science?*, Revue Etudes, janvier 2013

- **Séminaire 2: Incertitude et indétermination en mécanique quantique**

1. J.-P. Pérez, R. Carles, O. Pujol, *Quantique, fondements et applications*, Editions de Boeck, 2013 (voir notamment leçon 4)

- **Séminaire 3: Valeurs et normes esthétiques au regard de l'éthique dans l'art**

1. P. Audi, *Créer*, Editions Verdier Poche, 2010.
2. P. Audi, *Discours sur la légitimation actuelle de l'artiste*, Editions Les Belles Lettres, Encre marine, 2012.

- **Séminaire 4: Majorana et les probabilités en science et en sociologie**

1. V. Bontems, *L'épistémologie transversale d'Ettore Majorana*, Revue de Synthèse, n°1, 2013

- **Séminaire 5: How it is really happening**

1. P. B. Medawar, *Is the scientific paper a fraud?*, 1991, in Medawar P. B., *The Threat and the Glory: Reflections on Science and Scientists*. Oxford University Press, Oxford, 228-233 (Based on a BBC interview published in *The Listener*, Sept. 12, 1963).
2. *Introducing the "How It Really Happened" Series*, American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, Vol. 160, No. 6 (1999), pp. 1801.