



**HAL**  
open science

# Objects that Persist: The Case of Radioactivity Transfer Models

Gauthier Fontaine

► **To cite this version:**

Gauthier Fontaine. Objects that Persist: The Case of Radioactivity Transfer Models. *Philosophia Scientiae*, Editions Kime, 2022, pp.93-110. 10.4000/philosophiascientiae.3380 . irsn-03640277

**HAL Id: irsn-03640277**

**<https://hal-irsnn.archives-ouvertes.fr/irsnn-03640277>**

Submitted on 13 Apr 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright



## Philosophia Scientiæ

Travaux d'histoire et de philosophie des sciences

26-1 | 2022

La désuétude conceptuelle : abandon ou transformation ?

---

# Ces objets qui ne tombent pas en désuétude. Le cas des modèles de transfert de la radioactivité dans l'environnement

*Objects that Persist: The Case of Radioactivity Transfer Models*

Gauthier Fontaine

---



### Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/philosophiascientiae/3380>

DOI : [10.4000/philosophiascientiae.3380](https://doi.org/10.4000/philosophiascientiae.3380)

ISSN : 1775-4283

### Éditeur

Éditions Kimé

### Édition imprimée

Date de publication : 25 février 2022

Pagination : 93-110

ISBN : 978-2-38072-055-6

ISSN : 1281-2463

Ce document vous est offert par Institut de Radioprotection et de Sûreté nucléaire



### Référence électronique

Gauthier Fontaine, « Ces objets qui ne tombent pas en désuétude. Le cas des modèles de transfert de la radioactivité dans l'environnement », *Philosophia Scientiæ* [En ligne], 26-1 | 2022, mis en ligne le 25 février 2022, consulté le 22 mars 2022. URL : <http://journals.openedition.org/philosophiascientiae/3380> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/philosophiascientiae.3380>

---

Tous droits réservés

# Ces objets qui ne tombent pas en désuétude. Le cas des modèles de transfert de la radioactivité dans l'environnement

*Gauthier Fontaine*

IHPST, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne,  
Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire,  
Fontenay-aux-Roses (France)

**Résumé :** Comment expliquer la persistance d'objets techniques ou scientifiques qui semblent en tout point dépassés ? Cet article étudie ce problème, à travers un cas portant sur les modèles d'évaluation du passage de la radioactivité dans l'environnement. Ces modèles apparaissent dans les années 1950 et se fondent alors sur un coefficient unique. De nombreux problèmes conceptuels et pratiques concernant ce paramètre apparaissent et sont alors menés de nombreux travaux de développement d'alternatives à ces modèles qui semblent dépassés. Malgré cela, ceux-ci sont encore aujourd'hui largement majoritaires. Nous expliquons cette situation *a priori* paradoxale par des raisons « pratiques » (coûts techniques, structure sociale de l'expertise) et avec des arguments fondés sur les fonctions des modèles et sur leurs usages.

**Abstract:** How to explain the persistence of technical or scientific objects that seem outdated in every way? This paper tackles this issue through a case study on models assessing the transfer of radioactivity in the environment. These models appeared in the 1950s and were based on a single coefficient. Many conceptual and practical issues concerning this parameter appeared and many studies were then carried out to develop alternatives to these models that seemed outdated. Despite this amount of work, these single coefficient-based models are still the most used. This paper explains this situation that seems paradoxical with "practical" reasons (technical costs, social structure of expertise) and with arguments based on the functions of the models and their uses.

# 1 Introduction

Comment expliquer la persistance d'objets techniques ou scientifiques qui semblent en tout point dépassés? Le but de cet article est d'examiner ce problème à travers le prisme d'une étude de cas portant sur les modèles utilisés pour évaluer le passage d'une pollution radiologique dans l'environnement.

Le transfert de la radioactivité dans l'environnement est une étape fondamentale de la modélisation de la contamination radiologique qui s'intéresse aux processus de passage de la radioactivité dans les différents compartiments du biotope, notamment les sols, et dans les écosystèmes. Un des aspects particulièrement saillants des modèles de transfert porte sur l'estimation de la mobilité des radionucléides dans les sols, car la contamination de la chaîne alimentaire passe principalement par le captage de la radioactivité par les plantes *via* la présence de polluants dans les couches du sol où elles puisent leurs nutriments.

Ces modèles apparaissent dans les années 1950 et se fondent alors sur l'utilisation d'un coefficient, appelé coefficient de distribution ou  $K_d$ , qui quantifie globalement le potentiel de mobilité des polluants dans un milieu. De nombreux problèmes conceptuels et pratiques concernant ce paramètre sont rapidement mis en lumière et de nouvelles approches se développent alors pour améliorer ces modèles qui semblent dépassés. Toutefois, malgré la grande quantité de travaux et de projets de recherche engagés depuis plusieurs décennies sur les alternatives aux modèles fondés sur le coefficient de distribution, l'utilisation de ceux-ci est encore aujourd'hui largement majoritaire, tandis que les autres options proposées ne sont que très peu implémentées.

Comment expliquer cette situation *a priori* paradoxale, dans laquelle on persiste à utiliser un objet dont la désuétude est déjà connue? Nous commencerons par présenter en profondeur notre cas d'étude, en proposant ensuite d'analyser quelques mécanismes qui semblent être à l'œuvre dans ce phénomène de persistance, pour enfin ouvrir sur les questions du statut et du rôle de la désuétude dans la pratique scientifique et sur celle de la possibilité d'un pluralisme épistémologique.

À travers cette étude, c'est aussi la question des liens entre les concepts et les pratiques scientifiques, et entre les fonctions et les usages des objets que nous voulons aborder, par le prisme de la désuétude. Nous cherchons alors à comprendre dans quelle mesure les usages d'un objet peuvent faire muter les fonctions de celui-ci, en mobilisant notamment les travaux de Chang et de Varenne.

## 2 Les modèles de transfert de la radioactivité dans l'environnement

L'évaluation de la contamination radiologique, après un accident nucléaire par exemple, repose aujourd'hui sur l'utilisation d'un ensemble de modèles qui cherchent à suivre la radioactivité, depuis son émission (le terme-source) jusqu'aux conséquences qu'elle cause sur la santé des humains et des écosystèmes. Les modèles que nous étudions ici constituent une étape de cette chaîne : il s'agit d'étudier le transfert de la radioactivité dans les différents milieux que celle-ci va contaminer, notamment les sols, les eaux et les sédiments, et sa migration au sein de ceux-ci.

La formalisation de ces modèles de transfert de la radioactivité dans les milieux est issue des travaux en agronomie qui cherchaient à étudier le devenir des polluants dans les sols. Leur développement, dans les années 1950, se fonde sur l'utilisation d'un coefficient, appelé coefficient de distribution ou  $K_d$ , qui apparaît dans l'équation principale qui décrit les échanges entre les deux compartiments considérés.

Ce coefficient constant quantifie le potentiel de mobilité (ou de fixation) des radionucléides dans un environnement, notamment les sols, en séparant le stock de radioactivité présent en deux : une partie, immobile, fixée à la phase solide (le sol) ; l'autre, mobile, en phase liquide (sous forme de solution) [Robeau & Daburon 2000, 70].

C'est un coefficient macroscopique qui ne cherche pas à énumérer et prendre en compte la multitude de processus élémentaires de sorption et désorption qui gouvernent les réactions sol-radionucléides, mais plutôt à proposer une résultante globale de ceux-ci. Son utilisation est soumise à plusieurs hypothèses : il faut que l'élément polluant soit « en traces » dans le milieu et que la réaction globale entre le sol et l'eau soit à l'équilibre, instantanée, réversible et linéaire.

Ce paramètre est déterminant dans l'évaluation de la migration de la pollution radiologique dans les sols. Les études de sensibilité montrent une très grande dépendance de la quantité de radioactivité exportée à la valeur de  $K_d$  : la radioactivité absorbée par une plante ou exportée vers une nappe phréatique – et donc le potentiel impact sanitaire et écologique – dépend fortement de la valeur de ce coefficient. Plus le  $K_d$  est élevé, plus la radioactivité prélevée par la plante est élevée et moins la nappe sous-jacente sera contaminée. Certaines études post-Fukushima ont notamment montré que « les paramètres liés au transfert de matières radioactives par l'absorption des racines, tels que le coefficient de distribution  $K_d$  dans le sol [...] sont les paramètres les plus influents sur le niveau de  $^{137}\text{Cs}$  dans les légumes-feuilles quelques mois après l'accident » [Sy, Gonze *et al.* 2016]. Il s'agit donc de choisir de « bonnes » valeurs des coefficients  $K_d$  à implémenter pour faire fonctionner les modèles de simulation, pour représenter le mieux possible et de manière opérationnelle

l'ensemble des processus ainsi que la variabilité spatiale et temporelle du comportement de chaque élément dans le sol » [Martin-Garin 2005, 28].

Pour cela, les utilisateurs de ces modèles (radioécologues, biochimistes, chercheurs et experts en risque radiologique, etc.) disposent de grandes bases de données qui regroupent de nombreuses valeurs de  $K_d$ . La plus utilisée est celle de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA<sup>1</sup>), publiée en 1994 [AIEA 1994]. Cette base de données propose une tabulation des valeurs de  $K_d$  à choisir pour la simulation en fonction du radionucléide et du type de sol impliqués dans l'étude réalisée. Les sols sont classés selon des critères texturaux (argiles, sables, etc.). Cette table est issue d'une compilation de nombreux travaux et constitue le catalogue de référence de très nombreux modèles.

Toutefois, un problème semble apparaître : pour un radioélément et un sol donné, le  $K_d$ , censé être constant, voit ses valeurs varier sur une plage pouvant couvrir jusqu'à six ordres de grandeur. Cet immense étalement des valeurs disponibles entraîne de grandes incertitudes dans les résultats des simulations, notamment quand on « s'intéress[e] simultanément à un nombre important de radionucléides et à différents types de sols » [Martin-Garin 2005, 28], et remet en question le sens même de ce coefficient, supposé être une constante caractéristique d'un milieu et d'un radionucléide.

Ce problème de taille est connu depuis plusieurs décennies. En effet, dans un rapport technique de l'AIEA datant de 1985 sur les  $K_d$  dans les sédiments marins, on peut lire que « les intervalles considérables de valeurs expérimentales de  $K_d$  rapportés pour certains éléments sont souvent conséquence directe de variations dans le matériel et/ou les procédures adoptées » [AIEA 1985, 20, ma traduction]. Face à ce problème, scientifiques, développeurs et utilisateurs des modèles de transfert ont donc cherché à améliorer les tables de données existantes en raffinant les valeurs et les méthodes expérimentales de mesure du  $K_d$ . Toutefois, ces nouvelles études ont mis en lumière de nouveaux problèmes : grande variabilité des résultats obtenus selon la méthode expérimentale utilisée, incohérence méthodologique du classement des données en fonction de critères non-pertinents (les types de sols utilisés dans les tables ne sont pas représentatifs des sols réels par exemple), manque de standardisation des protocoles... La possibilité de conserver l'approche de partition solide-liquide décrite par le coefficient de distribution en cherchant à acquérir de nouvelles données plus fiables est alors compromise : le concept de  $K_d$  lui-même semble bancal [Martin-Garin 2005, 37]. D'autres approches émergent donc pour améliorer la précision et l'opérationnalité de l'évaluation de la mobilité des polluants, certaines basées sur une volonté de vouloir « compléter » le  $K_d$  pour « sauver les phénomènes » en ajoutant des coefficients supplémentaires, d'autres voulant abandonner les

---

1. L'AIEA est une organisation sous l'égide de l'ONU, dont la France est État membre, qui cherche à promouvoir les usages pacifiques du nucléaire et qui publie notamment des standards pour la sûreté des installations.

modèles fondés sur le coefficient de distribution pour proposer des descriptions mécanistes de partition solide-liquide<sup>2</sup>.

Toutefois, malgré la grande quantité de travaux et de projets de recherche sur les alternatives aux modèles fondés sur le coefficient de distribution<sup>3</sup>, ceux-ci sont encore très majoritaires, tandis que les autres options proposées ne sont que très peu implémentées. En effet, même si l'utilisation pour évaluer la contamination radiologique post-accidentelle du coefficient de distribution est jugée dépassée par de nombreux scientifiques, celle-ci reste la référence : cette approche de description de la partition solide-liquide est très « répandue » [AIEA 1985, 67, ma traduction] dans les modèles de transfert de radionucléides dans l'environnement, notamment dans ceux développés à l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN<sup>4</sup>). Son utilisation est de plus préconisée par l'AIEA, qui publie de nombreux guides ou documents techniques à ce sujet [AIEA 1982, 1985, 1994, 2004, 2010], afin d'harmoniser les modèles développés par tous les pays membres.

Comment expliquer alors cette persistance d'un objet qui semble à première vue dépassé, tant conceptuellement que pratiquement ?

### 3 Le $K_d$ , un objet ancré dans la pratique

Malgré les raisons qui semblent invalider l'usage des modèles fondés sur le coefficient de distribution, de nombreuses raisons d'ordre *pratique*, notamment liées d'une part à des questions de faisabilité et d'autre part à l'environnement dans lequel ces modèles sont utilisés, semblent pouvoir expliquer leur hégémonie.

En effet, le développement et l'utilisation d'alternatives aux modèles «  $K_d$  simple » nécessitent le recueil de données nouvelles nombreuses et variées, alors que les données utilisées pour le coefficient de distribution existent et sont utilisées depuis longtemps. Même si ces dernières sont en décalage avec la « réalité » des processus sous-jacents et les résultats de mesure *in situ*, ces problèmes sont *connus* et parfois *maîtrisés* :

Le concept de  $K_d$  a fait ses preuves pour la prédiction de la migration des radionucléides, tant que les hypothèses nécessaires

---

2. Ces approches correctives semblent pouvoir aussi relever de ce que Varenne appelle la « tendance générale à la désagrégation » [Varenne 2007] : quand les moyennes et les lois phénoménologiques globales n'ont plus de sens tant la variabilité du système que l'on étudie est grande, on préfère désagréger, à savoir quitter l'échelle globale pour tenter des modélisations centrées sur les individus, ce qui est notamment rendu possible par l'augmentation de la puissance de calcul et des capacités computationnelles.

3. Comme la thèse de doctorat de Hamza Chaif, en cours au LR2T (IRSN).

4. L'IRSN est l'expert public français en matière de recherche et d'expertise sur les risques nucléaires et radiologiques. Il développe notamment des modèles et codes de calcul pour évaluer les conséquences d'un accident nucléaire.

sont remplies et que le système étudié est raisonnablement bien connu. [AIEA 1994, 46, ma traduction]

Les développeurs et usagers de ces modèles semblent faire le pari épistémique de privilégier des ressources dont on connaît un minimum le domaine de validité à d'autres qui n'ont pas encore été éprouvées et qui sont de surcroît coûteuses à obtenir. De plus, face aux autres approches naissantes, le  $K_d$  dispose du net avantage de nécessiter peu de données environnementales nouvelles, car « il n'y a pas besoin d'augmenter la complexité des modèles quand les données environnementales pertinentes n'existent pas » [AIEA 1982, 3, ma traduction]. Ici, l'assujettissement du modèle aux données existantes explique que le coefficient de distribution persiste pour une raison de faisabilité qui repose sur le problème de la limitation de la quantité de répétitions d'un acte coûteux.

De plus, une des grandes forces de cette approche de modélisation des échanges radionucléides-sol est qu'elle est facilement manipulable conceptuellement et numériquement d'une part (puisqu'il ne s'agit pas de décrire finement les processus géochimiques en jeu, mais de calculer un rapport global de concentration), et d'autre part qu'elle est facilement couplable avec les équations d'écoulement de l'eau dans les sols, vecteur de migration des radionucléides. Leur faible coût computationnel est donc un avantage pour ces objets, surtout quand les calculs doivent être obtenus rapidement (comme dans les situations de crise et d'urgence par exemple). Les approches plus complexes seraient bien plus coûteuses en temps, en données et en ressources (notamment computationnelles).

Ces raisons de coût pourraient s'expliquer par les prismes de l'individualisme méthodologique et de la théorie du choix rationnel [Boudon 2012]. Le postulat du calcul coûts-avantages [Boudon 2012, 37] (bien que les coûts et les avantages soient fortement hétérogènes et donc homogénéisés de force par l'acteur face à ceux-ci) peut s'appliquer à la personne ici concernée : le coût psychique (et humain) de développement d'approches alternatives est très grand, tandis que les avantages futurs possibles liés à celles-ci peuvent sembler dérisoires ou incertains. En effet, la connaissance des limites des données liées aux modèles «  $K_d$  simple » pousse certains acteurs à considérer que se fonder sur l'existant, faute de mieux, peut être une heuristique plus riche et plus rationnelle en ce sens que d'essayer de repartir de zéro<sup>5</sup>.

Cette démarche – *a priori* individuelle – semble toutefois plutôt s'inscrire dans un faisceau de raisons opérationnelles de la persistance du  $K_d$  fortement

---

5. Lors d'un entretien, un chercheur du Laboratoire de recherche sur les transferts des radionucléides dans les écosystèmes aquatiques de l'IRSN, chargé de développer et d'utiliser des modèles de transfert de radionucléides en milieu aquatique, me déclarait qu'il n'était pas contre les alternatives au  $K_d$ , bien au contraire, mais qu'il préférerait largement utiliser une approche déjà éprouvée, grandement documentée et facile d'emploi, même si celle-ci était réputée moins représentative et vectrice de plus d'incertitudes.



liées à des mécanismes institutionnels comme la « dépendance au sentier » [Palier 2010] ou les « investissements de forme » [Thevenot 1986] : les grandes bases de données AIEA, les nombreux codes utilisant le  $K_d$ , les programmes de recherche internationaux sur ce sujet et la communauté d'utilisateurs fournissent une infrastructure solide permettant une *facilitation instrumentale*, puisque tous les outils matériels et conceptuels sont disponibles et opérationnels (le *substrat technique* [Hatchuel & Weill 1992] existe déjà), tandis que l'emploi d'autres approches nécessite l'acquisition de nouvelles données et l'énergie à fournir pour cela est immense. Pour proposer alors des alternatives au  $K_d$ , des avancées conceptuelles ne suffisent pas : il faut aussi fournir l'infrastructure matérielle qui vient en support à ces alternatives, notamment des données et une méthodologie, afin que l'argument de la « supériorité » théorique d'une approche par rapport à une autre puisse être réellement considéré. De telles infrastructures ne changent que par « incréments modulaires », et « les changements demandent du temps et des négociations, ainsi que des ajustements avec d'autres aspects des systèmes concernés » [Bowker & Star 1999].

En plus de ces raisons pratiques de faisabilité, il semble aussi y avoir des motifs qui tiennent à la structure sociale et à l'épistémologie de la « science réglementaire » [*regulatory science*] dans laquelle le développement et l'utilisation de ces modèles s'inscrivent [Borraz & Demortain 2015]. En effet, ces modèles sont développés dans des institutions chargées de produire et de synthétiser des connaissances scientifiques nécessaires à l'encadrement de l'industrie nucléaire et à l'étude des risques qu'elle induit<sup>6</sup>. Si les experts de ces institutions sont conscients des limites de l'approche  $K_d$  simple, ils sont tenus par le consensus réglementaire en vigueur sur ce sujet. Dans la mesure où les résultats scientifiques fondent des décisions ou des politiques publiques, il semble y avoir une préséance de la cohérence des approches dans le temps, au détriment de l'intégration des avancées scientifiques : remettre en cause le principe qui fonde la décision, c'est aussi remettre en cause la décision. Le référentiel doit évoluer en même temps que les bases scientifiques sur lesquelles il se fonde. Pour changer d'approche, il faut donc mobiliser des problématiques à la fois techniques et réglementaires qui semblent ici inextricables.

Ainsi, outre la « dépendance au sentier » qui décrit la légitimité pratique que les modèles «  $K_d$  simple » acquièrent grâce aux choix historiques et aux infrastructures qui en découlent, le « poids » de l'existant peut aussi être lié à la communauté des utilisateurs. L'approche  $K_d$  étant préconisée par l'AIEA pour l'évaluation de l'impact de relâchements radioactifs (accidentels ou routiniers), nombreux sont les organismes d'expertise et les autorités décisionnelles des États membres de cette organisation qui s'appuient sur ces outils pour établir des diagnostics ou des prospections. Cette vaste distribution à l'échelle internationale, qui crée une impression d'état de l'art,

---

6. Notre bibliographie est par exemple ici basée sur des documents essentiellement issus de l'IRSN et de l'AIEA.

est basée sur un consensus pour partie lié à l'interdépendance (technique, instrumentale ou politique) des différents organismes qui travaillent sur les questions radiologiques, via l'AIEA. La multiplication – et la dispersion – des méthodes de modélisation de transfert des radionucléides pourrait en effet effriter la cohérence de l'approche et diminuer sa valeur probante issue d'une forme de légitimité que certains experts qualifient de *sociale*<sup>7</sup>. En effet, la gestion de la contamination post-accidentelle est un sujet à la fois très politique et très incertain, et beaucoup d'experts au sein des organismes concernés savent que l'approche  $K_d$  simple n'est pas l'unique possibilité et qu'elle n'est pas optimale, sans réellement savoir dans quelle mesure. Cette apparente approche collégiale des modèles cache des débats qui restent alors commodément à l'intérieur des sphères techniques.

## 4 Fonctions des modèles et usages de ces fonctions

Si la première gamme d'explication de la persistance de ces modèles face à la nouveauté que nous proposons est d'ordre pratique, avec des raisons relevant de la faisabilité technique et des structures sociales de l'expertise en contexte de science réglementaire, la seconde est d'ordre plus conceptuel, et a à voir avec les fonctions épistémiques des modèles et les usages de ces fonctions<sup>8</sup>.

Les fonctions épistémiques des modèles « dénote[nt] la manière dont le modèle opère essentiellement par lui-même » [Varenne 2017, 116]. Elles correspondent aux propriétés épistémiques intrinsèques et autonomes du modèle, identiques d'un utilisateur à un autre et peu dépendantes du contexte dans lequel il a été conçu et est employé.

L'utilisation du coefficient de distribution pour évaluer les conséquences d'une pollution radiologique commence dans les années 1950. Ce coefficient, issu de l'étude des sols pour l'agronomie (et probablement passé dans la sphère nucléaire à la faveur de projets interinstitutionnels comme celui entre le Commissariat à l'énergie atomique et l'Institut national de la recherche

---

7. Entretien avec Arnaud Martin-Garin et Rodolphe Gilbin, chercheurs à l'IRSN (2019).

8. Face au désordre ontologique des modèles, dont la caractérisation commune minimale semble être « un objet de substitution qui facilite un questionnement scientifique en facilitant une médiation entre capacités cognitives théoriques ou pratiques, individuelles ou collectives » [Varenne 2017, 94], Franck Varenne choisit de classer les modèles d'abord selon leur *fonction épistémique*, à savoir le rôle qu'ils *doivent* jouer en termes de contribution à la connaissance et à l'action, puis selon leur nature, en distinguant clairement les deux notions souvent mélangées de façon incohérente. Varenne opère une classification de ces fonctions en 5 grandes fonctions et 21 fonctions spécifiques [Varenne 2017, 140]. Elles ne doivent pas être confondues avec les *usages* de ces modèles, qui correspondent à la manière dont la fonction de ce modèle est ensuite employée dans le cadre d'une enquête spécifique.

agronomique [Barbier 1959]), est particulièrement adapté aux enjeux de l'époque : il décrit relativement fidèlement le comportement du Strontium 60, le radionucléide que l'on considérait alors comme étant le plus dangereux et le plus représentatif d'une pollution radiologique<sup>9</sup>. Les premiers modèles se fondent donc sur ce coefficient. Ceux-ci sont conçus comme des appuis à la décision et comme aide pour explorer *virtuellement* les différentes possibilités de gestion post-accidentelle<sup>10</sup> [Métivier 2000]. Toutefois, la constitution de l'impact de la radioactivité sur l'homme, les écosystèmes et l'environnement en général comme un problème de recherche en soi fait émerger de nombreux questionnements qui permettent d'enrichir ces modèles, qui semblent alors acquérir un statut hybride et flou, entre recherche, d'une part, et expertise pour la décision d'autre part. Les objectifs de ces différents volets semblent alors se mêler, et leurs fonctions épistémiques et leurs usages se modifier. En effet, la modélisation de la contamination post-accidentelle est développée à l'origine pour l'expertise, pour évaluer l'impact à court terme d'un accident sur les populations humaines. Le modèle ECOSYS-87, par exemple, affiche d'emblée cet objectif : il s'agit d'estimer rapidement les effets d'un accident pour pouvoir réaliser des contre-mesures de façon à en limiter les conséquences sur la population [Muller & Pröhl 1993]. Ces modèles servent donc à l'exploration virtuelle de scénarios et de support à la décision, et leur fonction épistémique principale semble s'apparenter à la fonction épistémique 20 de Varenne, à savoir « faciliter l'intervention sur un système mixte et hétérogène » [Varenne 2017, 142]. De même, ASTRAL, modèle-logiciel développé par l'IRSN, vise à remplir les mêmes fonctions<sup>11</sup>. On retrouve bien les idées d'heuristique et d'aide à la décision, comme dans le modèle ECOSYS-87 (les deux modèles feront même l'objet d'un projet d'intercomparaison entre 1994 et 1998 [Gonze, Madoz-Escande *et al.* 2000]).

---

9. Ce rôle de « marqueur » de la pollution est aujourd'hui davantage tenu par le Césium 137.

10. « Différentes simulations de la gestion des zones contaminées peuvent être conduites par application de contre-mesures qui sont des dispositions destinées à réduire l'impact de l'accident sur l'environnement et les populations. [...] Le logiciel ASTRAL peut être considéré comme un outil de calculs et d'aide à la décision » [Métivier 2000, 1].

11. « ASTRAL est acronyme d'Assistance technique en radioprotection post-accidentelle. Si un rejet important de radionucléides dans l'environnement se produisait, il faudrait rapidement évaluer la concentration des radionucléides dans les milieux et les produits alimentaires, en déduire l'exposition potentielle aux rayonnements des populations concernées, prévoir l'évolution de la situation et proposer différents scénarios de gestion des zones contaminées. À ces fins, il a été décidé il y trois ans environ de créer un logiciel utilisable par un ensemble relativement large d'agents gérant les centres de crise, réalisant des études prévisionnelles, ou s'occupant habituellement du contrôle de l'impact des rejets de routine. [...] Différentes simulations de la gestion des zones contaminées peuvent être conduites par application de contre-mesures. Ainsi, le logiciel ASTRAL peut être utilisé comme un élément d'aide à la décision » [Maubert & Renaud 1997].

Toutefois, la première version du modèle ASTRAL intégrera finalement des modules de recherche<sup>12</sup> [Métivier 2000], construits à partir du modèle de crise, par complexification essentiellement quantitative des paramètres ou de la résolution, et sans véritable rupture « qualitative ». Les deux modes proposés (crise ou recherche) reposent sur un même jeu d'équations, parmi lesquelles se trouvent celles qui régissent les échanges milieu-radionucléides, qui impliquent une approche  $K_d$  simple. Cette émergence de la recherche à partir d'un modèle de crise rend non seulement les chercheurs acteurs du développement, de l'utilisation et de l'amélioration de ces modèles, mais modifie aussi l'usage lié à leur fonction première. Les modèles reposant sur le principe de partition solide-liquide par  $K_d$  peuvent alors être tantôt des modèles de crise, tantôt des modèles de recherche. Le statut du  $K_d$  dans les modèles comme ASTRAL ou plus tard dans la plate-forme de simulation SYMBIOSE semble alors passer d'un outil sciemment approximatif, mais jugé suffisamment pertinent (« on sait que la réalité est plus complexe, toutefois la notion de  $K_d$  reste utilisable » [Maubert 1994]), à un paramètre entrant dans une description plus « fine » de la réalité, employé à la fois par les équipes de crise et par les chercheurs. Le modèle passe d'un outil d'aide à la décision à une fin en soi pour la recherche. De nouvelles fonctions et de nouveaux usages des modèles fondés sur une approche  $K_d$  apparaissent alors, tandis que les modèles eux-mêmes n'ont pas fondamentalement changé : il s'agit plutôt d'une « colonisation » par le modèle d'une autre fonction, par l'usage qui en est fait. Si ce « glissement » semble avoir permis l'émergence d'une remise en question interne quant à l'utilisation du coefficient de distribution et d'une volonté de certains de reléguer le  $K_d$  au musée des idées, il semble surtout avoir apporté une nouvelle légitimité apparente aux modèles utilisant ce coefficient incertain autant en pratique qu'en principe, favorisant ainsi sa persistance.

Les modèles de recherche semblent s'être construits sur des modèles d'aide à la décision, et toute leur structure repose sur eux. Il y a une sorte de *generative entrenchment* [Wimsatt 2007] : d'une caractéristique particulière du modèle dépendent de nombreux autres éléments, car elle a joué un rôle majeur dans leur élaboration. La structure du modèle, des équations sous-jacentes, des données et paramètres nécessaires, imposée par l'utilisation du coefficient de distribution, contraint le développement des modules. Cette demande pour de nouveaux usages du modèle se fait dans un cadre contraint par son histoire, en faisant le pari, vérifié ou non, que d'autres fonctions que celles initialement prévues lors de la conception du modèle pourraient être également assurées par lui et correspondre à ces usages voulus. La validité

---

12. « Bien que l'ensemble ASTRAL soit destiné à répondre à des objectifs opérationnels liés aux situations de crise, le module de calcul est conçu pour satisfaire également à des objectifs d'études et de recherches en radioécologie. La réalisation de ce double objectif repose en partie sur la définition de deux modes d'utilisation : « Crise » et « Études ». Ces modes se distinguent par les possibilités d'interventions offertes à l'utilisateur dans les calculs (choix de transferts, valeurs des paramètres...) et par la nature et le détail des résultats » [Métivier 2000, 3].

épistémologique de nouveaux usages venant « coloniser » un modèle, sans lien immédiat avec sa fonction épistémique principale prévue à la conception, doit être examinée : il faut alors prendre en compte cette dépendance, cet « enchâssement » des modèles dans leur histoire, qui peut tantôt apporter robustesse grâce à une approche déjà éprouvée, tantôt créer un décalage lié à une incompatibilité épistémique.

En résumé, malgré leur remise en question quasi-unanime, la tendance générale à la désagrégation et l'augmentation de la puissance de calcul des machines, les modèles fondés sur le coefficient de distribution semblent persister. Nous avons ici proposé des explications de deux types. Les premières sont liées à la structure de l'expertise, à la communauté des modélisateurs et aux infrastructures déjà en place : l'hétérogénéité des utilisateurs, la simplicité d'implémentation et l'immense documentation sur ces modèles contribuent à leur maintien. Les secondes sont liées aux fonctions épistémiques spécifiques de ces modèles : ceux-ci questionnent l'usage que l'on fait des concepts. Si le  $K_d$  ne tombe pas en désuétude, alors que de nombreux travaux sont engagés pour lui trouver des alternatives (notamment au sein du projet ANR AMORAD), c'est autant parce que celui-ci est pertinent pour un certain usage que parce qu'il a su « coloniser » des espaces qui n'étaient pas initialement les siens. Là où on s'attendrait à ce qu'un objet aussi critiqué tombe en désuétude, l'usage spécifique qui en est fait légitime sa persistance. De plus, son utilisation à des fins pour lesquelles il n'était *a priori* (et *a posteriori* non plus par ailleurs) pas adapté renforce paradoxalement son hégémonie.

Les différentes raisons de la persistance des modèles «  $K_d$  simple » que nous avons cherché à expliciter – raisons pratiques de faisabilité opérationnelle ou liées au cadre dans lequel s'inscrit cette modélisation, raisons liées aux usages de fonctions spécifiques ou à leurs dérivées – traitent de l'*usage* qui est fait d'un objet conceptuel et non pas du concept lui-même. Ainsi, les contradictions intuitives entre avancées scientifiques et persistance d'un objet qui semble pourtant devoir devenir désuet peuvent être clarifiées. L'histoire en apparence linéaire du  $K_d$  qui refuse de tomber en désuétude est en fait un enchevêtrement plus complexe : ce coefficient répond à des demandes d'usage qui ont pu continûment se communiquer, en changeant ou évoluant de façon progressive, sans rupture franche. Les données, qui fragilisent le  $K_d$  par leur manque de représentativité, le renforcent aussi par leur simplicité, leur grand nombre et l'expertise dont font preuve les modélisateurs vis-à-vis d'elles ; la simplicité d'implémentation et d'utilisation de ces modèles crée un espace dans lequel ceux-ci sont légitimes, tout en les disqualifiant d'un certain nombre d'usages qui en sont pourtant faits ; la diversité des approches alternatives met en défaut le  $K_d$  simple mais celles-ci peinent à percer dans un cadre où le consensus et la stabilité sont de mise.

À travers notre étude de cas, on peut repérer une idée centrale : la notion de désuétude est avant tout une notion pratique liée à l'usage, et semble ne pouvoir se comprendre que dans un cadre où l'usage d'un objet ou d'un concept – ou d'une fonction épistémique – mobilise et modifie le concept lui-

même et par là l'usage qu'en auront d'autres. Ainsi, l'usage que l'on fait d'un concept pourrait être considéré comme indissociable du concept lui-même.

## 5 La désuétude, une notion pratique

« Pourquoi certains objets épistémiques meurent quand d'autres survivent ? » [Chang 2011, 414, ma traduction]. Cet exemple d'un objet qui ne disparaît pas alors qu'il semble dépassé, tant dans sa manière d'aborder un problème que dans son rapport aux données et à leurs capacités de traitement, nous rappelle que l'abandon ou la persistance d'objets épistémiques peut aussi être lié à des raisons *pratiques*, à l'usage qui est fait des objets en question plus qu'à leurs liens conceptuels avec les théories et les expériences auxquelles ils se rattachent. En effet, avec le  $K_d$ , il ne semble plus être question de « vérité » ou de « fausseté » à un niveau conceptuel, mais plutôt de pertinence, de représentativité et d'opérationnalité liées à certaines utilisations des modèles. Ces raisons pratiques, ou raisons d'usage, semblent relever à la fois d'une dimension *opérationnelle*, c'est-à-dire liée à une utilisation quasi-matérielle de formalismes, et d'une dimension *praxique*, dans laquelle l'usage qui est fait d'un tel objet est susceptible de transformer la façon d'appréhender l'objet lui-même.

Comme nous avons essayé de le montrer plus haut, la question de la persistance des modèles  $K_d$  simple est intimement liée à ces questions d'usage : leur mobilisation opérationnelle s'est imposée au fil du chemin emprunté par leur histoire, par la modification par les usages qui en ont été faits de leur appréhension même par les modélisateurs. Si l'usage du  $K_d$  était resté marginal, ou du moins cantonné aux situations dans lesquelles il semble avoir sa place conceptuelle légitime, n'aurait-il pas disparu au profit d'approches mécanistes ? Cette question pousse à penser la désuétude des concepts et des objets comme contingente, quasi-matérielle, et surtout liée à la pratique de la science telle qu'elle est et non telle qu'elle devrait être. Cette désuétude, qui s'inscrit dans un compromis entre les qualités des fonctions et des usages de fonctions du modèle, semble aussi relever de la pratique que l'on a d'une notion ou d'un concept, pratique à la fois opérationnelle et praxique.

La question de la pertinence d'un objet épistémique ou technique liée à un usage pourrait même se poser plus largement : dans quelle mesure les usages d'un modèle font muter ou élargissent (plus ou moins rationnellement) ses fonctions ? Ici, il semblerait que la « culture de la crise » des communautés d'experts en risque radiologique ait été un contexte propice au développement et à l'utilisation de modèles phénoménologiques peu coûteux en données et en temps de calcul (au détriment de modèles alternatifs), qui, peut-être par le biais d'une volonté d'unité et de robustesse des outils, a contraint l'extension de leur usage pour d'autres fonctions épistémiques qui différaient de celles des modèles initiaux.

L'article de Chang sur le phlogistique et l'oxygène pourrait constituer une réponse emblématique à la question précédente : ce qu'il semble y avoir en filigrane, ce n'est pas que l'oxygène était plus adapté conceptuellement aux problèmes de l'époque que le phlogistique [Chang 2011, 420, ma traduction], mais plutôt qu'il y a eu une mutation relativement contingente des usages de ces deux objets chimiques, qui a agi en faveur de l'oxygène. Les raisons de la « mort » (ou plutôt de la « mise à mort ») du phlogistique ne semblent pas être d'ordre purement épistémique [Chang 2011, 423, ma traduction]. De même, celles du « succès » de l'oxygène pourraient être liées à de l'inertie d'usage, puisqu'on préfère modifier substantiellement ce concept plutôt que de s'en séparer pour en définir un autre. En effet, l'oxygène est encore utilisé aujourd'hui, même si, dès « la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, presque toutes les grandes affirmations théoriques de Lavoisier sur la nature et la fonction de l'oxygène se sont révélées inexactes » [Chang 2011, 415, ma traduction]. En seulement quelques décennies, l'oxygène révolutionnaire de Lavoisier avait complètement changé de signification, ses caractéristiques principales ne correspondant pas du tout à celles de l'oxygène moderne [Chang 2011, 415, ma traduction]. Néanmoins, son usage s'est tout de même pérennisé. Ici, on peut tenter un parallèle avec notre étude : nous avons un objet qui semble *a priori* obsolète, désuet, mais qui, en étant utilisé en dehors de son cadre premier de définition, persiste et reste d'actualité. Même s'il est ambitieux de comparer le modeste  $K_d$  à l'oxygène, des points communs à propos de l'importance de la *pratique* d'un objet épistémique plutôt que du concept lui-même, surtout vis-à-vis de sa persistance ou de sa désuétude, semblent apparaître. Cette importance de la « pratique », peut-être trop souvent dévaluée face aux enjeux purement épistémiques des objets mobilisés en science, permettrait de comprendre en partie pourquoi les chimistes n'ont pas relégué l'oxygène à la « poubelle de l'histoire » [Chang 2011, 420, ma traduction].

Finalement, peut-être qu'un réexamen de certaines études par le prisme historique de la persistance ou de la tombée en désuétude d'objets épistémiques ou techniques permettrait un apport nouveau, où la balance entre les concepts et les pratiques serait plus équilibrée.

## 6 Conclusion : la désuétude et le pluralisme

Dans cet article, nous avons présenté une étude de cas à propos d'un objet qui, contre toute attente, ne tombe pas en désuétude. Nous avons proposé d'expliquer ce phénomène de persistance en présentant des raisons de deux types. Les premières sont liées à des notions de coûts techniques et à la structure sociale de l'expertise : le coûteux développement d'approches alternatives pousse à se fonder sur l'existant ; les problèmes liés au  $K_d$  (comme les données) sont connus et parfois mieux maîtrisés que ceux liés aux approches concurrentes ; le faible coût computationnel de ces modèles

le rend facile à utiliser ; la grande communauté d'utilisateurs privilégie une approche collégiale, plus solide que des approches dispersées ; l'expertise dans le cadre d'une « science réglementaire » cherche une stabilité et une cohérence de sa démarche dans le temps. Les secondes s'appuient sur des arguments qui concernent les fonctions épistémiques des modèles et leurs usages : les modèles fondés sur le coefficient de distribution sont légitimes pour certaines fonctions, notamment celles liées à la décision dans l'urgence ; ces modèles ont colonisé d'autres espaces en contraignant le développement d'alternatives [*generative entrenchement*], brouillant les distinctions entre les fonctions initiales de ces modèles et les usages *a posteriori* qui en sont faits. Cette étude nous a ensuite poussé à considérer que la « pratique » d'un concept était tout aussi importante que le concept lui-même, voire indissociable de celui-ci, dans la mesure où cet usage mobilise et modifie le concept lui-même et par là l'usage qu'en auront d'autres : les raisons que nous avons qualifiées d'opérationnelles et de pratiques qui semblent avoir permis la persistance de cet objet décrivent ici comment les mutations d'usages de modèles peuvent entraîner des mutations dans leurs fonctions épistémiques.

La tombée en désuétude de certains objets pour des raisons qui ne sont pas purement épistémiques conduit à une question : que se serait-il passé si tel objet disparu avait survécu ? Cette question a été abordée de nombreuses fois, notamment par Chang qui défend par exemple le fait qu'en ayant conservé le phlogistique (qui visiblement ne semblait pas contradictoire dans la pratique avec le nouvel oxygène [Chang 2011, 421, ma traduction]), les scientifiques seraient arrivés plus vite à certaines grandes découvertes [Chang 2011, 423]. Chang en appelle ainsi à un « pluralisme conservateur » [Chang 2011, 428]. Selon lui, la tendance générale au monisme chez les scientifiques amène à vouloir « tuer » le plus rapidement possible les adversaires des théories *mainstream*, même si cela n'est pas forcément justifié. C'est cette tendance qui est probablement à l'œuvre dans la tombée en désuétude de certains objets.

Chang démontre bien les vertus épistémiques qu'aurait pu avoir la conservation du phlogistique non pas *à la place* mais *en plus* de l'utilisation du concept d'oxygène. De même, la conclusion de notre étude de cas sur le coefficient de distribution serait plutôt de dire qu'il ne faut ni supprimer le  $K_d$ , ni le faire régner en seul maître, mais faire cohabiter différentes approches. En effet, si on remet en question ce  $K_d$ , c'est aussi et surtout parce qu'il est utilisé à tort hors de son domaine de validité : il est donc inadapté pour tout un ensemble de missions pour lequel on fait appel à lui. Cela ne veut toutefois pas dire qu'il faudrait le supprimer, car il reste pertinent pour certaines fonctions. Il y a intérêt à implémenter d'autres approches tout en conservant le coefficient de distribution. Cet intérêt est en plus « facilité » par le fait qu'il s'agit ici de développement et d'utilisation de *modèles*.

En effet, la modélisation peut être vue comme un moyen efficace de conserver *activement* certains objets ou certaines approches, cette conservation pouvant même être vertueuse pour la connaissance du système que l'on étudie : la multiplication des « points de vue », la diversité de formalismes



et d'approches de différents modèles représentant un même système peut permettre de mieux le saisir. Les différentes représentations d'un même phénomène ne font pas forcément appel aux mêmes lois théoriques et aux mêmes idéalizations, peuvent servir différents objectifs ou avoir différentes fonctions épistémiques et peuvent donc être *a priori* incommensurables, non contradictoires ou incompatibles, et peuvent à la fois vivre dans des environnements différents et servir à instruire un même phénomène<sup>13</sup>. Ainsi, les sciences du climat semblent pouvoir tirer parti de la diversité de modèles qui existent en procédant par exemple à des intercomparaisons sur des points précis (grâce aux Programmes internationaux d'intercomparaison de modèles ou CMIP notamment) qui permettent *in fine* de quantifier les incertitudes, identifier les contraintes émergentes, tirer des prédictions robustes et calculer des moyennes statistiques [Jebeile & Crucifix 2020].

Cette incommensurabilité n'oblige pas forcément à une simple « coexistence pérenne de différentes représentations incompatibles entre elles<sup>14</sup> » ; aujourd'hui, de nombreux modèles représentant des systèmes complexes mettent en œuvre ce que Franck Varenne appelle une *pluriformalisation* [Varenne 2009], une pratique qui permet d'intégrer au sein même du modèle une variété de points de vue différents. Cette intégration « rend informatiquement compatible ce qui est axiomatiquement incompatible » [Varenne 2009] (en procédant par exemple numériquement « à une discrétisation des prises en main successives des formalismes les uns par les autres » [Varenne 2009]), et offre un exemple concret de pluralisme opérationnel. Celui-ci permet non seulement de conserver différentes approches d'un même objet mais en plus de les utiliser simultanément pour arriver à de meilleurs résultats pour certaines fonctions épistémiques.

Ainsi, que ce soit par l'existence séparée de différentes approches ou par leur croisement, la diversité épistémique peut être une vertu pour explorer de nouvelles possibilités de connaissance<sup>15</sup>. Les formes que pourraient prendre ce pluralisme – par exemple ici une variété de modèles faisant place à des alternatives cohabitant avec des modèles  $K_d$  ou des modèles intégrant différemment le  $K_d$  dans leur pluriformalisation – sont aussi à explorer.

La désuétude est un prisme d'étude très riche pour les objets qui ont une certaine plasticité épistémique, comme ici le  $K_d$ . Les rapports étroits entre désuétude des concepts et désuétude des usages permettent de faire appel à des notions issues de l'épistémologie et de la sociologie du travail scientifique, pour les faire dialoguer sans les renvoyer dos à dos. Si ici l'accent a été mis sur les distinctions, les interdépendances et les recouvrements entre les fonctions épistémiques d'un modèle et les usages de ces fonctions, le prisme de la

13. Ainsi, on peut se dire que le phlogistique aurait pu servir à étudier les aspects énergétiques des réactions et l'oxygène les bilans de masse.

14. Présentation de Julie Jebeile « Pluralisme représentationnel : ensembles multi-modèles dans les sciences du climat », le 21 mai 2019 à l'IHPST (Paris).

15. Voir aussi [Varenne 2012].

désuétude pourrait permettre d'interroger de manière plus générale la division entre les concepts et les pratiques scientifiques, sans les nier, par l'étude de leurs interactions.

## Bibliographie

### Documents AIEA

- AIEA [1982], Generic models and parameters for assessing the environmental transfer of radionuclides from routine releases, Rap. tech. 57, Safety Series.
- [1985], Sediment  $k_{ds}$  and concentration factors for radionuclides in the marine environment, Rap. tech. 247, Technical Reports Series, Vienne.
- [1994], Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in temperate environments, Rap. tech. 364, Technical Reports Series, Vienne.
- [2004], Sediment distribution coefficients and concentration factors for biota in the marine environment, Rap. tech. 422, Technical Reports Series, Vienne.
- [2010], Handbook of parameter value for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments, Rap. tech. 472, Technical Reports Series, Vienne.

### Documents IPSN/IRSN ou CEA

- BARBIER, G. [1959], Sur la prévision de l'accumulation dans le sol et dans les récoltes, d'éléments radio-actifs de longue période apportés indéfiniment à un rythme limité, Rap. tech. 1142, CEA.
- GONZE, Marc-André, MADUZ-ESCANDE, Chantal *et al.* [2000], Bilan des intercomparaisons entre expérimentations sur lysimètres, ECOSYS-87 et ASTRAL, DPRE/SERLAB 2000/01, IPSN.
- MARTIN-GARIN, Arnaud [2005], Caractérisation opérationnelle du comportement des radionucléides dans les sols. Étape 2. Définition des bases d'une méthodologie d'acquisition et d'utilisation des paramètres de rétention des radionucléides dans les sols, DEI/SECRE 05-61, IRSN.
- MAUBERT, Henri [1994], Transfert des radionucléides en milieu terrestre, SERE 94/029, IPSN.

- MAUBERT, Henri & RENAUD, Philippe [1997], ASTRAL : un logiciel pour l'évaluation des conséquences d'un rejet accidentel de radionucléides dans l'environnement, *Radioprotection*, 32(3), 357–368.
- MÉTIVIER, Jean-Michel [2000], Support de formation « logiciel ASTRAL » – Version 1.1, DPRE/SERLAB 99/001 (P), IPSN.
- ROBEAU, Daniel & DABURON, François [2000], *Le Césium : de l'environnement à l'Homme*, Les Ulis : EDP Sciences.

## Ressources générales

- BORRAZ, Olivier & DEMORTAIN, David [2015], Science réglementaire, dans *Dictionnaire critique de l'expertise*, édité par E. Henry, Cl. Gilbert, J.-N. Jouzel & P. Marichalar, Paris : Presses de Sciences Po, 279–285.
- BOUDON, Raymond [2012], *La Rationalité*, Paris : PUF.
- BOWKER, Geoffrey & STAR, Susan [1999], *Sorting Thing Out*, Cambridge, Mass. : The MIT Press.
- CHANG, Hasok [2011], The persistence of epistemic objects through scientific change, *Erkenntnis*, 75(3), 413–429, doi : 10.1007/s10670-011-9340-9.
- HATCHUEL, Armand & WEILL, Benoît [1992], *L'Expert et le Système*, Paris : Economica.
- JEBEILE, Julie & CRUCIFIX, Michel [2020], Multi-model ensembles in climate science : Mathematical structures and expert judgements, *Studies in History and Philosophy of Science – Part A*, 83, 44–52, doi : 10.1016/j.shpsa.2020.03.001.
- MULLER, Héloïse & PRÖHL, G. [1993], ECOSYS-87 : A dynamic model for assessing radiological consequences of nuclear accidents, *Health Physics*, 64(3), 232–252.
- PALIER, Bruno [2010], Path dependance (la dépendance au sentier), dans *Dictionnaire des politiques publiques*, édité par L. Boussaguet, Paris : Presses de Sciences Po, 411–419.
- SY, Mouhamadou Moustapha, GONZE, Marc-André *et al.* [2016], Uncertainty analysis in post-accidental risk assessment models : An application to the Fukushima accident, *Annals of Nuclear Energy*, 93, 94–106, doi : 10.1016/j.anucene.2015.12.033.
- THEVENOT, Laurent [1986], Les investissements de forme, dans *Conventions économiques*, édité par L. Thevenot, Paris : PUF, 21–71.

- VARENNE, Franck [2007], *Du modèle à la simulation informatique*, Paris : Vrin.
- [2009], Simulation informatique et pluriformalisation des objets composites, *Philosophia Scientiæ*, 13(1), 135–154, doi : 10.4000/philosophiascientiae.79.
- [2012], Les frontières entre modèles formels : juxtaposition, intégration, fusion, composition, dans *Épistémologie des frontières*, édité par A.-F. Schmid, Paris : Petra, 177–219.
- [2017], *Théories et modèles en sciences humaines. Le cas de la géographie*, Paris : Éditions Matériologiques.
- WIMSATT, William [2007], *Re-Engineering Philosophy for Limited Beings : Piecewise Approximations to Reality*, Cambridge, Mass. : Harvard University Press.