

BULLETIN N° 198
ACADÉMIE EUROPEENNE
INTERDISCIPLINAIRE
DES SCIENCES



Lundi 5 octobre 2015 :
à 17 h à la Maison de l'AX, 5 rue Descartes 75005 PARIS

- **Présentation par notre collègue Gilles COHEN-TANNOUDJI de son projet de futur colloque (2018):**
"L'anthropocène et la tension naturel/artificiel"
- **Présentation par notre collègue Michel GONDRAN de son projet de futur colloque (2018):**
"Les modèles de représentation du réel"

Notre Prochaine séance aura lieu le lundi 9 novembre 2015 à 17h
5 rue Descartes 75005 PARIS

Elle aura pour thème

- **Assemblée générale annuelle de l'AEIS**
- **Point sur l'état de préparation du colloque AEIS-2016**
 - **"Ondes, Matières et Univers"**

ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES

FONDATION DE LA MAISON DES SCIENCES DE L'HOMME

PRESIDENT : Pr Victor MASTRANGELO
VICE PRESIDENT : Pr Jean-Pierre FRANÇOISE
SECRETARE GENERAL : Irène HERPE-LITWIN
TRESORIER GENERAL : Claude ELBAZ

MEMBRE S CONSULTATIFS DU CA :
 Gilbert BELAUBRE
 François BEGON
 Bruno BLONDEL
 Michel GONDRAN

COMMISSION FINANCES: Claude ELBAZ,
COMMISSION MULTIMÉDIA: Pr. Alain CORDIER
COMMISSION EDITION: Robert FRANCK et Pr Pierre
 NABET

COMMISSION CANDIDATURES: Pr. Jean-Pierre
 FRANÇOISE

PRESIDENT FONDATEUR : Dr. Lucien LEVY (†)
PRESIDENT D'HONNEUR : Gilbert BELAUBRE
SECRETARE GENERAL D'HONNEUR : Pr. P. LIACOPOULOS
 (†)

CONSEILLERS SCIENTIFIQUES :
SCIENCES DE LA MATIERE : Pr. Gilles COHEN-TANNOUDI
SCIENCES DE LA VIE ET BIOTECHNIQUES :

CONSEILLERS SPECIAUX:
EDITION: Pr Robert FRANCK
AFFAIRES EUROPEENNES :Pr Jean SCHMETS
RELATIONS VILLE DE PARIS et IDF: Michel GONDRAN ex-
 Président
RELATIONS UNIVERSITES et MOYENS MULTIMEDIA: Pr
 Alain CORDIER
RELATIONS AX et MÉCENAT : Gilbert BELAUBRE

SECTION DE NANCY :
PRESIDENT : Pr Pierre NABET

septembre 2015

N°198

TABLE DES MATIERES

p. 03 Séance du 5 octobre 2015 à la Maison de l AX
 p. 07 Documents

Prochaine séance : lundi 9 novembre 2015

– Assemblée générale annuelle de l'AEIS
 – Point sur l'état de préparation du colloque AEIS-2016
 "Ondes, Matières et Univers"

**ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES
SCIENCES**

Fondation de la Maison des Sciences de l'Homme, Paris.

Séance du Lundi 5 octobre 2015 /Maison de l'AX 17h

La séance est ouverte à 17h **sous la Présidence de Victor MASTRANGELO** et en la présence de nos Collègues Gilbert BELAUBRE, Jean-Louis BOBIN, Alain CARDON, Gilles COHEN-TANNOUDJI, Claude ELBAZ, Jean -Pierre FRANCOISE, Michel GONDRAN, Irène HERPE-LITWIN, Antoine LONG, Pierre MARCHAIS, Claude MAURY, Alain STAHL Jean-Pierre TREUIL .

Etaient excusés François BEGON, Jean-Pierre BESSIS, Bruno BLONDEL, Michel CABANAC, Juan-Carlos CHACHQUES, Alain CORDIER Daniel COURGEAU, Ernesto DI MAURO, Françoise DUTHEIL, Vincent FLEURY, Robert FRANCK, Gérard LEVY, Jacques LEVY, Valérie LEFEVRE-SEGUIN, Edith PERRIER, Pierre PESQUIES, Jean SCHMETS ,Jean VERDETTI.

Notre conférencier le Pr Rienk VAN GRONDELLE nous prie de l'excuser de son absence due à un grave problème de santé d'un de ses proches collaborateurs. Son intervention de biophysique est reportée au 11 janvier 2016.

Par ailleurs, le Pr Dominique LAMBERT a fait acte de candidature pour intégrer l'AEIS. Son CV et sa lettre de motivation ayant été lues, il a été procédé au vote sur son admission. Son admission a été acceptée à l'unanimité des votants.

L'Ordre du jour appelle ensuite:

I. La présentation de projet de Colloque au-delà de 2016 de notre Collègue Gilles COHEN-TANNOUDJI

Voici son résumé de projet:

"L'anthropocène et la tension naturel/artificiel"

Dans de très nombreux domaines, la tension naturel/artificiel soulève des débats de société à forte coloration éthique, qui souvent aboutissent à mettre en doute les bienfaits du progrès scientifique : citons comme exemples :

–Dans les biotechnologies ; les OGM vs le bio, les nanotechnologies, les prothèses supérieures aux organes naturels : après le cœur artificiel, pourquoi pas le cerveau artificiel, l'utérus artificiel...

–Dans le domaine de l'énergie : le nucléaire (radioactivité naturelle vs radioactivité artificielle), la dimension anthropique du réchauffement climatique

–Dans le domaine des sciences de l'information : l'intelligence artificielle, la robotique tueuse d'emplois

Au plan philosophique, ce thème pourrait déboucher sur une réflexion à propos de l'articulation **révolutions scientifiques-ruptures technologiques-mutations anthropologiques**. Alors que les colloques 2014 et 2016 sont plutôt tournés vers la physique et les relations physique/biologie, le thème proposé serait plutôt tourné vers les relations technosciences-sciences humaines. L'un de nos premiers colloques de l'AEIS, celui sur le principe de précaution était plutôt de ce type. Notons aussi que nous avons, au sein de notre académie, des spécialistes de ces questions comme l'intelligence artificielle et le cœur artificiel.

II. La présentation projet de Colloque au-delà de 2016 de notre Collègue Michel GONDRAN

"Les modèles de représentation du réel"

(autres titres possibles: les modèles de la réalité; les modèles mathématiques de la réalité; Les modèles formels de représentation du réel; les modèles et les théories de la réalité)

Michel GONDRAN pose les problèmes suivants:

- **Qu'est-ce qu'un modèle ?** Comment représenter le réel? Il se réfère notamment aux travaux de Karl Popper et John Eccles qui étudient 3 mondes, celui des choses et des états matériels, celui de nos représentations purement subjectives et celui de notre connaissance prise objectivement.
 - **la réalité existe à toutes les échelles d'espace et de temps alors que nos modèles ne sont définis qu'à une échelle donnée.** De plus, ces modèles et ces représentations dépendent de nos perceptions, de nos capacités cognitives, de nos théories à un moment donné. Nos concepts de réalité dépendent donc de l'échelle d'observation, du grain d'observation. Décrire la réalité revient alors à décrire le réel par des modèles à différentes échelles.
 - **Ceci implique la création d'un méta-modèle qui décrit les limites du modèle et ses conditions de validité** (échelles pour lequel il est pertinent, mais aussi les principales approximations qui ont été effectuées).
1. Un premier objectif du congrès pourrait être de montrer sur des exemples ces méta-modèles qui sont *complètement occultés dans la littérature*. De plus, l'unicité du réel physique demande de construire des **modèles** qui puissent être **cohérents entre ces différentes échelles**.
 2. Un autre objectif du congrès pourrait être de montrer sur des exemples comment ces différents modèles (effectifs) s'articulent entre eux dans les sciences physiques et dans les sciences humaines. Dans ce cadre, la question suivante se pose naturellement: Le déterminisme ne va-t-il pas dépendre des échelles de temps et d'espace du modèle auxquelles on se place?
 3. Les modèles réalisent de très **nombreuses fonctions de facilitations**. Peut-être, faudrait-il centrer le congrès sur **la facilitation à la modélisation mathématique et à la théorisation du réel?**
 4. Dans ce cas, il faudra montrer comment s'utilisent lors de la construction du modèle **les trois critères** qu'il doit vérifier dans la méthodologie scientifique: le modèle doit être **cohérent** (il n'est pas possible d'arriver à une contradiction, c'est-à-dire démontrer quelques choses et son contraire), il doit être **complet** (il donne une solution à un problème posé quelles que soient les données initiales), enfin il doit être **pertinent** (c'est-à-dire conforme à la réalité physique). Les deux premiers critères (cohérence et complétude) ne dépendent que du modèle, le troisième (pertinence) de la liaison du modèle avec la réalité. Pour traiter les deux premiers critères, il est nécessaire d'avoir une modélisation formelle des connaissances.
 5. **Michel GONDRAN analyse les divers types de modèles :**
 - **Les modèles théoriques** basés sur des équations anciennes qui ont constitué la base de la **compréhension des phénomènes** et qui ont permis de calculer **en première approximation** des structures industrielles.
 - **Les modèles numériques** qui ont fait surface avec l'arrivée de l'ordinateur. Ils permettent d'ajouter la complexité du réel aux modèles théoriques et d'en faire des **simulations**. Ils

présenteraient cependant de nombreuses limites. **La validation des résultats** de la simulation du modèle numérique n'est pas facile car il existe des approximations à toutes les étapes de construction du modèle numérique. Il faut de plus tenir compte du rôle des phénomènes non linéaires

- **les modèles symboliques de l'intelligence artificielle** cherchent aujourd'hui à surpasser les limitations des **modèles formels** en sciences humaines qui ne prennent pas en compte une modélisation réaliste du comportement humain et ne sont souvent que des lois empiriques basées sur des estimations statistiques. Ils disposent de trois langages de représentation et de modélisation des connaissances: *deux langages formels*, **la mathématique** et la **graphique** et un langage informel, **le langage dit naturel**. grâce à **l'intelligence artificielle** (systèmes experts, systèmes agents ou acteurs...). Pour être utilisables (pour leur construction et leur validation), les **modèles symboliques** doivent **rester lisibles** (propriété fondamentale qui est rarement vérifiée), donc rester aussi proches que possible du langage naturel. Enfin, **la liaison entre le symbolique et le numérique** est une des façons de réaliser la liaison entre les modèles à différentes échelles.

Enfin, il faut remarquer que le développement de la modélisation formelle et lisible des différents domaines scientifiques n'est pas uniforme et reste encore lointain. Il faut aussi tenir compte de la spécificité des modèles suivant les domaines d'applications.

Pour conclure il nous propose un essai de programme de congrès.

Les deux sujets ont fait l'objet d'une présentation détaillée suivie d'une discussion avec les participants qui permettra lors d'une prochaine séance de soumettre l'ensemble des propositions au vote en vue du choix du thème du colloque après 2016.

Notre Président Victor MASTRANGELO procède ensuite à la clôture de cette très riche séance.

Irène HERPE-LITWIN

Documents

Pour illustrer la présentation de notre collègue Gilles COHEN-TANNOUDJI sur "**L'anthropocène et la tension naturel/artificiel**" nous vous proposons;

p.08: un article du Pr Jacques TESTARD, intitulé " Vers l'Homme augmenté" paru sur son site <http://jacques.testart.free.fr/index.php?post/texte881>

p.11: un article de Clive HAMILTON et Jacques GRINEVALD sur "**L'anthropocène a-t-il été anticipé?**" tiré du site <http://www.institutmomentum.org/lanthropocene-a-t-il-ete-anticipe/>

En amont du sujet proposé par notre collègue Michel GONDRAN, "**Quelques problèmes épistémologiques autour de la modélisation du réel**", nous vous proposons:

p. 25: un article de Gérard SENSEVY et de Jérôme SANTINI du CREAD /Université de Rennes intitulé ; "**Modélisation; une approche épistémologique**" tiré du site : http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/16806/ASTER_2006_43_163.pdf?sequence=1

Vers l'homme augmenté ?

Pr Jacques TESTART

- [Lien permanent](#)

<http://jacques.testart.free.fr/index.php?post/texte881>

Le Sarkophage, 15 mai 2011

Augmenter la performance humaine n'est pas seulement un rêve, vieux comme Icare, c'est aussi un champ infini pour créer des besoins et leur apporter des solutions, mais ce champ est beaucoup plus séducteur et rentable que ceux des commerces et industries classiques : en 20 ans le téléphone portable a atteint 8 sur 10 des homo sapiens qui peuplent actuellement l'anthropocène ! Ainsi « 500 millions d'Africains- sur 987 millions- possèdent un téléphone portable alors qu'ils sont 700 millions à ne pas avoir d'électricité. Un réseau téléphonique coûte moins cher qu'un réseau électrique. Et le retour sur investissement est rapide » (1). Il faudrait ajouter que l'aliénation provoquée par cet artifice (chacun convient que c'est bien pratique !) se mue en quasi obligation quand tous les autres en ont un et qu'ainsi le refus de se conformer devient un handicap . Créer une situation de handicap, et pas seulement de frustration, pour tous ceux qui ne consomment pas, c'est le nouveau métier des entrepreneurs du rêve de consommation. Mais au delà de ces considérations mercantiles , il existe sans conteste et depuis toujours un fantasme de dépassement de la condition humaine.

On peut distinguer trois familles de propositions pour augmenter les capacités naturelles de l'homme. Les plus « classiques » consistent en dispositifs externes pour obtenir un accès inédit à l'information, la communication, à tout moment et partout. Ainsi du téléphone ou de l'ordinateur portables qui se différencient des anciens dispositifs, par exemple pour augmenter la vitesse (voiture, avion,...), en ce que ces nouveaux outils sont de plus en plus intégrés à chaque individu, un peu comme des prothèses qu'on ne retire que pour dormir (et encore...). Avant l'ère informatique on connaissait déjà de tels dispositifs portables, comme la canne ou les lunettes, mais leur fonction se limitait à compenser un handicap individuel, non à créer de nouvelles propriétés pour tous les membres de l'espèce. La deuxième famille de dispositifs est constituée par les prothèses vraies, celles qui sont intégrées au corps comme ce cadran téléphonique qui serait imprimé dans la paume de la main : on tape le numéro puis on serre le poing pour appeler.. Déjà, certaines prothèses sont capables de permettre à un handicapé de devenir plus performant qu'une personne « normale »! Ainsi ces lames de métal élastique qui font d'un amputé des jambes un champion de course à pied ou cet usinage du cristallin qui confère une vue d'aigle à un quasi aveugle. On est ici à l'articulation des concepts de handicap, de normalisation et de performance, on est dans un chantier médical pour la fabrication compassionnelle de l'homme supérieur. Et se profilent, d'abord pour de grands handicapés, des dispositifs intégrés au cerveau pour en augmenter l'efficacité ou pour lui permettre d'entrer en relation avec l'extérieur ou avec la machine, sans la médiation usuelle de la parole ou de l'écriture. Le « génie tissulaire » promet aussi de remplacer chaque organe défaillant par du

neuf, régénéré in situ comme la queue des lézards ou reconstruit avec des cellules souches greffées. De tels projets vont bien au delà des gadgets, telle la puce électronique introduite sous la peau pour commander l'ouverture d'une porte, qui ne sont que des dispositifs facilitateurs transformant l'homme en robot plutôt qu'en surhomme. Plus inquiétante, la dernière famille des propositions pour forcer les capacités humaines concerne des propriétés hérissables, quand la faculté nouvelle est tellement intégrée à l'organisme qu'elle en devient indissociable et sera transmise à la descendance. Ce caractère d'hérissabilité correspond à un changement d'espèce et c'est ce qui fait la gravité de tels projets. Les transhumanistes, puissants aux USA parmi les chercheurs les plus brillants (et bien présents mais discrètement en Europe), sont persuadés qu'à l'échéance de quelques décennies, le cerveau sera bien plus performant et aussi que l'immortalité sera possible. Les mêmes sont souvent en faveur de l'élimination de populations entières car il faudra bien faire de la place pour les surhommes inusables. Au-delà de la transgène et grâce à la « biologie synthétique » qui emprunte autant à l'informatique qu'à la biologie (avec un zeste de physique grâce aux nanotechnologies), des perspectives glorieuses surgissent. En 2010, les médias annoncèrent que le généticien Craig Venter aurait « créé la vie » parce qu'il avait substitué un ADN de synthèse à celui contenu dans une bactérie. Sans négliger cette performance technologique on est bien loin de créer du vivant quand on se sert d'un être déjà vivant (la bactérie privée de son ADN) comme réceptacle d'une molécule inerte (l'ADN) pour reconstituer un nouvel être vivant.. Mais le délire des transhumanistes ne s'arrête pas à cette stratégie du haut vers le bas promue par C Venter, ils promettent plus fort : du bas vers le haut en assemblant des molécules inertes pour construire des organismes vivants complètement inédits, pourquoi pas des humanoïdes puisque toute frontière entre l'homme, l'animal et la machine ne pourrait que relever d'une idéologie passéiste?... La place de l'homme devient relative : on nous promet la création de machines intelligentes, combinaisons de l'humain et du machinique, libérées de la violence et du sexe, et capables de s'autoreproduire. La démesure mais aussi la déculturation à l'œuvre dans les projets transhumanistes, est évidente avec le MOP (macro organisme planétaire) dans lequel les individus, dépourvus d'identité, seraient reliés entre eux pour former un monstre unique dont le cerveau serait le réseau internet... Où on voit que l'homme « augmenté » est la créature d'une société nécessairement policée dont l'ordre est déjà annoncé par des dispositifs d'identification et de surveillance (empreintes génétiques, caméras, puces RFID,...).

Il reste que les solutions techniquement mûres, ou dont la faisabilité est acquise, sont les plus probables et qu'il faudrait craindre la sélection des humains au stade embryonnaire (diagnostic préimplantatoire) plus que des manipulations élitistes et hasardeuses dont celles qui passent par la perpétuation des « meilleurs » d'entre nous (clonage) ou par l'amélioration dans l'œuf (humains génétiquement modifiés).

Deux considérations pour terminer. L'une sur la contradiction entre des prévisions d'un avenir de

grande sophistication technique (donc exigeant des moyens importants et centralisés) et la certitude qu'une société de décroissance est inéluctable. Comment réfléchir au même moment sur ces deux hypothèses incompatibles ? L'avenir verra-t-il l'avènement de l'homme augmenté ou de l'homme convivial ? Cette contradiction pourrait se trouver résolue par une course de vitesse : si les techniques pour construire l'homme augmenté tardent plus que les promesses de leurs promoteurs, la réalité d'un monde obligatoirement plus simple et plus sobre, où la performance serait démodée, s'imposera en annulant ces projets. Autre solution, celle d'un monde à deux vitesses où une élite auto proclamée prendrait le pouvoir...

L'autre considération concerne la véritable nature de l'homme « augmenté ». Ne serait-il pas plutôt celui qui se libère des aliénations que lui ont imposé au long des siècles la religion, le prométhéisme et la compétitivité ? Un humain vacciné contre l'ambition, l'égoïsme, la virilité agressive, quelque chose comme le comble de l'humanisation ... Face au gaspillage d'humanité, presque partout depuis toujours mais singulièrement depuis l'avènement du capitalisme, l'homme nouveau du romantisme révolutionnaire se révélerait, sans altérations superflues de son génome ou de ses organes. Peut-être est-ce encore le vieil homme qui porte nos espoirs plutôt que les artefacts de laboratoire ?

(1) Tristan Coloma. Quand le fleuve Congo illuminera l'Afrique. Le Monde diplomatique, février 2011

L'Anthropocène a-t-il été anticipé''

Article publié dans *The Anthropocene Review*, 2015, 2(1), p. 59-72.

<http://anr.sagepub.com/content/early/2015/01/28/2053019614567155.full.pdf+html>

Par Clive Hamilton et Jacques Grinevald

Traduction française par Jacques Grinevald

<http://www.institutmomentum.org/lanthropocene-a-t-il-ete-anticipe/>

Les savants du passé qui parlèrent de “l’âge de l’homme” le firent en termes d’influences humaines sur “la face de la Terre” et non *le Système Terre*. Bien plus, les précédentes conceptions sont associées à une intelligibilité évolutionniste linéaire de l’expansion de l’influence géographique et écologique de l’humanité, tandis que l’Anthropocène représente une rupture radicale avec toutes les idées évolutionnistes de l’histoire de l’Homme et de la Terre, soulignent Clive Hamilton et Jacques Grinevald dans cette contribution présentée à Momentum par ce dernier à Paris le 13 février 2015.

Résumé

Divers auteurs ont identifié des “précurseurs” du concept de l’Anthropocène, faisant référence, le plus souvent, à Antonio Stoppani, Vladimir Vernadsky et Pierre Teilhard de Chardin. Trouver des précurseurs a pour effet, intentionnel ou non, de dégonfler la signification de la nouvelle époque géologique proposée. Nous soutenons ici qu’il n’y avait pas de précurseurs à la notion d’Anthropocène, et qu’il ne pouvait pas y en avoir, parce que le concept d’Anthropocène (avancé en l’an 2000) est un produit de la récente intelligibilité interdisciplinaire de la Terre en tant que planète en évolution introduite dans les années 1980 par le Programme International Géosphère-Biosphère (*International Geosphere-Biosphere Programme*) et les sciences du Système Terre (*Earth System Science*). Les savants du passé qui parlèrent de “l’âge de l’homme” le firent en termes d’influences humaines sur “la face de la Terre” et non *le Système Terre*. Bien plus, les précédentes conceptions sont associées à une intelligibilité évolutionniste linéaire de l’expansion de l’influence géographique et écologique de l’humanité, tandis que l’Anthropocène représente une rupture radicale avec toutes les idées évolutionnistes de l’histoire de l’Homme et de la Terre; incluant l’effondrement de toute idée de progrès vers une étape supérieure (comme la ‘Noosphère’ de Teilhard).

Le mouvement déflationniste

Peut-on trouver dans la littérature, scientifique ou annexe, des précédents historiques pour le concept scientifique actuel de l’Anthropocène, ou l’avènement de la nouvelle époque est-il si récent que les scientifiques du passé n’ont pas pu le prévoir ? Dans leur bref article séminal, le chimiste de l’atmosphère Paul Crutzen et le géobiologiste Eugène Stoermer (2000) font référence à d’illustres prédécesseurs, notamment Antonio Stoppani, G. P. Marsh, Vladimir Vernadsky, Pierre Teilhard de Chardin et Edouard Le Roy, comme faisant partie des premiers à reconnaître le rôle croissant de l’humanité en tant que “force géomorphologique, géologique, significative”. Dans son article d’une page bien plus influent, “La géologie de l’humanité”, publié dans *Nature*, Crutzen (2002) avance qu’en 1873 déjà le géologue italien Antonio Stoppani se référait à “l’ère anthropozoïque”. Il ajoutait qu’en 1926 Vernadsky reconnaissait “l’impact croissant de l’humanité”, et, comme Teilhard de Chardin, employait le terme “noosphère”. Ces deux concepts, disait-il, sont des précurseurs de la prise de conscience de l’influence croissante de l’humanité sur l’histoire de la Terre.

Dans leur article de synthèse de 2011, “L’Anthropocène : perspectives historiques et conceptuelles”, Steffen et al. (2011) font référence à ces auteurs et certains autres (Bergson, 1907; Osborn, 1948; Schuchert, 1918; Sherlock, 1922), comme des antécédents de l’idée actuelle de l’humanité moderne en tant que nouvel agent géologique à l’échelle du globe, bien qu’ils mettent en garde contre l’établissement d’une équivalence avec d’anciens concepts. Dans l’ouvrage collectif de 2012, *A Geological Time Scale*, Zalasiewicz et al. (2012) présentent l’idée que les êtres humains sont “à l’origine d’une nouvelle époque géologique” comme une idée centenaire.

L’existence des précurseurs – de précédents concepts qui contiennent l’idée essentielle de l’Anthropocène ou forment une étape importante de son émergence – est maintenant bien établie. Dans le

numéro de mars 2012 de *Global Change, IGBP*, un article intitulé “L’Anthropocène : Une époque de notre fabrication” contient un encadré sous le titre : “L’émergence d’un paradigme”. Il s’ouvre avec l’assertion suivante : “Le concept de l’Anthropocène s’est présenté lui-même dans la littérature scientifique depuis plus d’un siècle sous diverses formes” (Syvitski, 2012). Sur le site web de la Commission de stratigraphie et de géochronologie de l’Union internationale pour la recherche sur le Quaternaire on peut lire :

“Bien que le terme ‘Anthropocène’ soit une invention récente, il a des précurseurs. Le premier fut proposé par le géologue italien Antonio Stoppani qui reconnaissait les effets croissants que les humains avaient sur les systèmes de la Terre. Il proposa le terme d’*ère Anthropozoïque* pour la période récente. Cependant, cela fut ignoré. D’autres tentatives terminologiques éventuelles incluent le *Psychozoïque*, proposé par l’Américain Joseph LeConte en 1879, et la *Noösphère* forgée pour cette période en 1926 par Vladimir Vernadsky et Pierre Teilhard de Chardin” (INQUA, 2014).

L’opinion répandue selon laquelle l’Anthropocène a été prévu par des scientifiques du 19^e et du début du 20^e siècles peut se lire en bien d’autres endroits (par ex. Balter, 2013; Baskin, 2014; Bonneuil et Fressoz, 2015). Bien que les auteurs du présent article acceptèrent initialement cette opinion, à présent, après une réflexion critique et une relecture des sources historiques, nous ne sommes plus d’accord avec cette phylogénie intellectuelle.

La recherche de précédents historiques est souvent valable et intéressante, mais pour la compréhension de la construction de la connaissance scientifique, rechercher des précurseurs peu se révéler périlleux et trompeur, spécialement si on néglige la sémantique historique, “la logique de rétrospection” de Bergson et les “révolutions scientifiques” de Kuhn. Notre argument est que ni les idées de Vernadsky ni les idées de Teilhard, qui elles-mêmes étaient nettement différentes (Levit, 2000), ni celles de tout autre penseur du passé, étaient un “précurseur de la notion de l’Anthropocène” (Guillaume, 2014; voir aussi Davis, 2011), à cause de la nouveauté de l’intelligibilité de la Terre sur laquelle elle est basée. A fortiori, les prédécesseurs de Vernadsky et de Teilhard ne peuvent être des précurseurs de l’Anthropocène. Avant d’examiner les idées de ces prétendus précurseurs, voici le coeur de notre argumentation : les savants du 19^e et de la première moitié du 20^e siècles ne possédaient pas le concept scientifique moderne du *Système Terre* dont l’Anthropocène est un produit (Ehlers et Kraft, 2006; Graedel et Crutzen, 1993; Steffen et Tyson, 2001; Steffen et al., 2004). Nous suggérons qu’en se référant aux précurseurs, peut-être pour renforcer la crédibilité du nouveau concept en le situant à l’intérieur d’une respectable tradition (“Sur les épaules des géants”), les premiers promoteurs de l’Anthropocène sapèrent involontairement la nouveauté radicale du concept et l’actualité de la nouvelle époque géologique proposée.

L’essor des sciences du Système Terre

Bien entendu, le thème de l’homme comme maître de la nature a une très longue histoire. Il est, selon certains, inhérent au Christianisme (Noble, 1998; White, 1967), et constitue une part essentielle de “*l’essor de la puissance de l’Occident*” (Daly, 2014) à la suite de ce qu’on appelle les révolutions scientifique et industrielle. En Russie, spécialement sous le régime soviétique (Josephson, 2002), le thème d’une nouvelle “ère de l’homme” dans l’histoire de la Terre (“l’Anthropogène”) était bien connu. Mais toutes ces idées appartiennent à la période géologique du Quaternaire, non à la proposition d’une discontinuité Holocène-Anthropocène (Wolfe et al., 2013).

Contrairement à Crutzen et aux premiers promoteurs de l’Anthropocène, les savants du passé n’étaient pas préoccupés par des phénomènes planétaires comme des hivers nucléaires catastrophiques ou une altération de la couche d’ozone stratosphérique par des produits chimiques de synthèse. Les géants de l’Histoire naturelle, lorsqu’ils pensaient à l’homme civilisé en tant que force géologique, vivaient dans un monde qui ignorait la perturbation du cycle global de l’azote, un événement d’extinction massive, et des changements climatiques planétaires dûs à des modifications de la composition chimique de l’atmosphère. La découverte du trou d’ozone de l’Antarctique fut une surprise complète; avant le milieu des années 1980, ce n’était rien de plus qu’une hypothèse théorique controversée (Crutzen, 1995, p. 105-111; Graedel and Crutzen, 1993, p. 1-3). Pour Crutzen et ses collègues chimistes de l’atmosphère qui

travaillaient dans le domaine des conséquences environnementales de la guerre nucléaire et l'émergence des sciences du Système Terre, la crise de l'ozone fut un "énorme choc" (Crutzen and Müller, 1989, p. 28), un état d'urgence planétaire soudain bien plus surprenant que "l'effet de serre" anthropogénique et le réchauffement planétaire (Schneider, 1989).

Les fondements du développement des sciences du Système Terre furent posés dans les années 1950, durant la Guerre froide (Edwards, 2010; Hamblin, 2013). L'océanographie et les sciences de l'atmosphère furent transformées et globalisées. L'écologie des écosystèmes a été développée dans les années 1960, notamment dans le cadre de la Radiation Ecology Section du Oak Ridge National Laboratory (ORNL), un produit du Projet Manhattan (Bocking, 1997; Coleman, 2010). L'ORNL devint un important centre pour l'étude du problème CO₂-énergie-climat. Le Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC) a été fondé en 1982, dans le cadre de la division des sciences de l'environnement de l'ORNL. La modélisation biophysique de la Biosphère (héritage de Vernadsky) fut développée dans les années 1980 par des chercheurs russes en collaboration avec des collègues occidentaux à l'International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) et plus tard au Potsdam Institute pour le climat (Jørgensen, ed., 2010).

La méthodologie de simulation sur ordinateur de la Dynamique des Systèmes a été développée par Jay W. Forrester au MIT dans les années 1950, et appliquée aux systèmes sociaux, avec son extension au fonctionnement de la Terre en tant qu' "écosystème mondial" complexe à la suite d'une invitation du Club de Rome en 1970, conduisant à la publication en 1971 de *World Dynamics* (Forrester, 1971). Sa suite furieusement controversée, *The Limits to Growth*, fut publiée par le Club de Rome l'année suivante (Meadows et al., 1972; voir aussi Georgescu-Roegen, 1975). Les bases ont été établies avec l'Année Géophysique Internationale en 1957-1958 (Grinevald, 1990), incluant le lancement des premiers satellites artificiels pour l'observation des changements à l'échelle du globe, le début des mesures de Charles David Keeling à l'Observatoire du Mauna Loa à Hawaï des variations du dioxyde de carbone dans l'atmosphère (Keeling, 1970), et les révélations, dès le début des années 1980, des forages de carottes de glace dans l'Antarctique (Jouzel et al., 2013).

Les études biogéochimiques n'étaient pas complètement nouvelles (Hutchinson et al., 1970), mais les programmes d'envergure mondiale sur les cycles biogéochimiques ne furent lancés que dans les années 1970, après la création du Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE) en 1969 par le Conseil International des Unions Scientifiques (ICSU), avant la Conférence de Stockholm de 1972 (la première méga-conférence des Nations Unies sur "l'environnement humain"). Les rapports du SCOPE sur le cycle global du carbone et les autres cycles biogéochimiques, l'effet de serre et le changement climatique (Bolin et al., 1986) jouèrent un rôle décisif avant les premiers rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC/IPCC en anglais) publiés depuis 1990. Le GIEC (IPCC) fut créé en 1988 par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE).

La première Conférence mondiale sur le climat, conférence d'experts "sur le climat et l'humanité", s'est tenue en février 1979 à l'OMM à Genève. Conjointement avec l'ICSU et le PNUE, l'OMM lança le Programme climatologique mondial pour succéder au Programme de recherches sur l'atmosphère global (GARP). Initié par la communauté des géophysiciens et des sciences de l'espace des Etats-Unis, le nouveau paradigme des sciences du Système Terre (*Earth System Science*) émergea dans les années 1980 et prit forme institutionnellement avec l'International Geosphere-Biosphere Programme. A Study of Global Change (ICSU, 1986; NRC, 1983). Ce ne fut pas avant 1986 – deux ans avant la création du GIEC (IPCC) – que l'Assemblée générale de l'ICSU lança officiellement le Programme International Géosphère-Biosphère (IGBP), le coeur institutionnel de l'écologie globale et de l'approche systémique de la planète Terre (Grinevald, 1990; ICSU, 1986; Steffen et Tyson, 2001), après les premières initiatives de la NASA (Conway, 2008).

Cette manière de penser était si nouvelle que lorsque dans les années 1970 James Lovelock et Lynn Margulis (1974) introduisirent "l'hypothèse Gaïa" de la coévolution de la Terre, du climat et de la vie, l'establishment scientifique (à de rares exceptions) la rejeta. Plus tard, Lovelock découvrit Vernadsky et

le salua, lui et Hutton, comme ses plus illustres prédécesseurs, précurseurs de l'idée de la "géophysologie" de la Terre (Grinevald, 1988; Lovelock, 1988, p. 9-11).⁽¹⁾

Dans l'histoire des sciences et l'histoire des idées, la recherche des précurseurs, dans sa forme extrême le fameux *precursitis* ["the *precursitis virus*", Joseph T. Clark, S.J., 1959 (J.G.)], est bien connu et souvent dénoncé, notamment par A. Koyré (1961, p. 79) et G. Canguilhem (1968, p. 20). C'est fréquemment une erreur sémantique et historiographique ; c'est aussi, comme nous le soutenons en l'occurrence, une confusion involontaire de deux manières incompatibles de comprendre le monde (et donc une faute épistémologique). Mis à part ces erreurs, l'effet de trouver des précédents historiques est, qu'on le veuille ou non, d'*affaiblir* le concept d'Anthropocène, de lire l'avenir de la Terre dans son passé et de minorer sa signification et sa nouveauté en le présentant juste comme une autre manifestation d'une longue tradition intellectuelle, alors qu'en fait l'Anthropocène représente, selon ceux qui l'avancèrent initialement, une dangereuse dérive, et une rupture radicale dans l'histoire de la Terre. Cette rupture signifie que l'Holocène ne peut être, géologiquement et intellectuellement, un guide pour l'Anthropocène. L'hypothèse du "précoce Anthropocène" (Ruddiman, 2003) et le vernis du "bon Anthropocène" (Ellis, 2011) peuvent aussi être comptés comme des mouvements déflationnistes, l'un parce qu'il considère la nouvelle ère largement coextensive avec l'Holocène et l'autre (construit sur le premier) parce qu'il présente la nouvelle ère comme une extension de l'activité humaine remontant à des milliers d'années. Tous les deux privent la nouvelle époque géologique de son pouvoir. L'élosion des modifications du temps (qui commencent au 19e siècle) et des propositions modernes de géo-ingénierie tel que la dispersion d'aérosols soufrés (par ex. Fleming, 2010) est une autre manifestation de la thèse continuiste.

L'ère Anthropozoïque

Bien que maintenant largement oublié, l'abbé Antonio Stoppani (1824-1891) n'était pas ignoré en son temps (Zanoni, 2014). Patriote italien et cofondateur de la Société italienne de géologie, son *Corso di Geologia*, publié en trois volumes en 1871-1873, fut très populaire (bien que rapidement démodé à cause de ses idées anti-darwiniennes). Dans le volume sur la stratigraphie, Stoppani introduisit l'idée originale de l'*era antropozoica*, écrivant qu'avec "la création de l'Homme" comme d'un élément divin et absolument nouveau dans l'histoire de la Terre, "l'Homme civilisé" (par opposition aux païens de l'Antiquité) est devenu "une nouvelle force tellurique qui, par sa puissance et son universalité, se compare aux plus grandes forces du globe" (Stoppani, 1873, p. 732).⁽²⁾ La nouvelle géologie humanisée de Stoppani fut suffisamment frappante pour attirer l'attention de George Perkins Marsh (le ministre plénipotentiaire de Lincoln dans le nouveau royaume d'Italie) dont le livre de 1874, *The Earth as Modified by Human Action* (une nouvelle édition de son livre de 1864, *Man and Nature*) a eu une influence durable.

"Dans un précédent chapitre, j'ai parlé de l'influence de l'action humaine sur la surface du globe comme immensément supérieure en degré à celle exercée par les bêtes, si elle n'est pas essentiellement différente dans son genre. L'éminent géologue italien Stoppani va plus loin que je me suis aventuré à le faire, et traite l'action de l'Homme comme un nouvel élément physique entièrement sui generis. Selon lui, l'existence de l'Homme constitue une période géologique qu'il nomme l'ERE ANTHROPOZOÏQUE. "La création de l'Homme", dit-il, "fut l'introduction d'un nouvel élément dans la nature, d'une force totalement inconnue des périodes précédentes." (Marsh 1874, p. 609)

L'idée de "l'Homme civilisé" de Stoppani est en fait une notion ethnocentrique et de tradition religieuse, cohérente avec son temps et sa foi. Il publia plus tard un livre "scientifique" créationniste intitulé *Cosmogonia Mosaica* (Stoppani, 1887). Ses perspectives stratigraphiques et religieuses n'en faisaient qu'une ; comme le géologue et paléontologue jésuite Teilhard plus tard, Stoppani était un ardent défenseur du concordisme entre la Science et la vision chrétienne de l'Homme et de la Nature. Suivant l'interprétation médiévale occidentale de la Bible, cette "nouvelle force tellurique" créa, selon la volonté de Dieu, une nouvelle période dans l'histoire de la Terre. Un siècle auparavant, dans son grand livre *Les Epoque de la nature*, le Comte de Buffon (1788) interpréta et sécularisa les six jours de la Création en six longs épisodes de l'histoire naturelle de la Terre, la "septième et dernière époque" étant l'âge de l'Homme "lorsque la puissance de l'Homme a secondé celle de la Nature". Mais Buffon (comme James Hutton et James Watt) appartenait aux "Lumières industrielles" (Mokyr, 2002, chap. 2 : [*The Industrial*

Enlightenment]), pas à la révolution thermo-industrielle, plus tardive, de l'Occident impérialiste (Grinevald, 1990).

En 1873, l'année même où Stoppani parle de l'ère anthropozoïque, un géologue suisse, Eugène Renevier (1873), introduisit dans son travail de nomenclature la 'Période Anthropique'.⁽³⁾ A l'époque, les notions modernes de "biosphère", "écosphère", "crise écologique", "révolution de l'environnement", "réchauffement planétaire", "Global Change", et, par-dessus tout, la Terre en tant que système complexe en évolution, n'existaient pas (Kump et al., 1999). Cela en dépit des critiques précoces des dégâts environnementaux des machines et de l'industrialisme, des villes industrielles très polluées, de la déforestation et de la dégradation locale des paysages (Bonneuil et Fressoz, 2015; Locher et Fressoz, 2012). Les changements climatiques étaient une affaire de pollution acide ou de déforestation locale, et non une préoccupation scientifique pour "l'habitabilité de la planète" (Goody, 1982). Personne ne pensait à une dérive dangereuse de la Terre en tant que système (Falkowski et al., 2000). La Biosphère de la Terre entendue comme un concept holistique attendait encore Vernadsky (Grinevald, 1998; Polunin et Grinevald, 1988; Vernadsky, 1998) et, finalement, Lovelock (Bruce, 1990). A l'époque de Stoppani, et même à celle de Vernadsky et Teilhard, aucun groupe de travail scientifique n'étudiait la perturbation anthropogénique des cycles biogéochimiques (ou grands cycles biosphériques) ou leurs interactions avec la dynamique globale de l'atmosphère et du changement climatique.

La résistance à l'hypothèse Gaia dans les années 1970 et 1980 provenait de la même intelligibilité classique de la surface de la Terre que celle qui avait conduit au rejet de la théorie de la dérive des continents d'Alfred Wegener au cours des années 1920-1950. A l'époque de Stoppani, on imaginait que les transformations de la Terre s'opéraient d'une manière cyclique stable (comme dans la Théorie de la Terre de Hutton et la géologie uniformitarienne de Lyell). Vernadsky aussi était huttonien dans sa manière de penser la géologie. Teilhard, comme ses collègues (notamment Pierre Termier), considérait Wegener comme un rêveur. La stabilité de la Terre était le paradigme commun des scientifiques avant la tardive "révolution wégenérienne". Depuis Charles Lyell (1830-1833) et Louis Agassiz (1840), le changement climatique, excepté au niveau local, était une caractéristique du passé (notamment le Pléistocène), pas pour l'avenir proche. Avant le forage des carottes de glace du Groenland et de l'Antarctique dans les années 1980 et l'extraordinaire découverte de la corrélation entre les concentrations de dioxyde de carbone et les oscillations de la température (Barnola et al., 1987), couplée avec "la courbe de Keeling" qui n'attira une large attention dans la communauté scientifique que dans les années 1970⁽⁴⁾, on n'avait aucune preuve d'un quelconque métabolisme à l'échelle mondiale (Volk, 2003). L'idée d'une géophysologie de la Terre était encore une absurdité scientifique. En fait, l'insistance des sciences du Système Terre sur l'importance de la structure, du fonctionnement et de l'évolution de la Biosphère de la Terre considérée comme un tout resta une nouveauté dans la communauté scientifique internationale jusqu'à la fin des années 1980 (Huggett, 1999; Jørgensen, ed., 2010; Polunin and Grinevald, 1988). En bref, depuis les dernières décennies du 19^{ème} siècle l'intelligibilité de l'environnement global par les sciences de la nature a connu une profonde transformation, une révolution scientifique qui n'est pas encore complètement reconnue.

Bien que l'impact humain sur la Terre était un thème bien connu de la pensée naturaliste et géologique depuis l'époque de la révolution industrielle de l'Occident (Glacken, 1956), il n'y avait aucune anticipation de l'Anthropocène dans son sens actuel. "L'ère anthropozoïque" de Stoppani et nombre de variantes – la "Période Anthropique" de Renevier (1873), "l'ère psychozoïque" de Joseph LeConte (1877) et Charles Schuchert (1918), "l'Ère de l'Esprit – l'Age de l'Homme" de James Dwight Dana (cité par Vernadsky, 1945), la Noosphère de Teilhard – désignaient l'impact de l'action humaine sur "la face de la Terre" plutôt que sur la planète Terre en tant que système complexe en évolution. Le concept du Système Terre – avec la perturbation anthropogénique des grands cycles biosphériques ou biogéochimiques – est l'élaboration d'un autre siècle (Grinevald, 1987, 1990, 1998; Jacobson et al. 2000; Mackenzie et Mackenzie, 1998).

A la place, pour Stoppani et ceux qui le suivirent, la nouvelle ère de l'histoire naturelle de la Terre était définie par la manière dont les êtres humains avaient transformé le paysage et, dans certains cas, les climats locaux (Locher and Fressoz, 2012), laissant un impact que les géologues de l'avenir pourraient

redécouvrir mais qui en lui-même n'était pas la preuve d'une nouvelle époque géologique. Pour Stoppani, la première trace de l'Homme moderne marque le commencement de l'ère anthropozoïque (ouvrant sur un avenir prométhéen), mais la ressemblance des noms ne doit pas nous conduire à la confondre avec l'Anthropocène. Un mot n'est pas un concept, et les concepts changent. Cela est spécialement vrai si on considère que le début de l'Anthropocène se situe plus tard que celui qui a été initialement proposé ; c'est-à-dire, non avec le début de la révolution industrielle européenne (symbolisée par la machine à vapeur de Watt) à la fin du 18^{ème} et au début du 19^{ème} siècle mais après la Seconde Guerre mondiale. Jan Zalasiewicz et une vingtaine de coauteurs (dont J.G.) ont récemment soutenu qu'on peut dire plus raisonnablement que la nouvelle époque a commencé avec l'explosion de la première bombe atomique du monde, le 16 juillet 1945 à Alamogordo, dans le Nouveau Mexique, aux USA (Zalasiewicz et al., 2014; voir aussi Waters et al., à paraître). C'était le commencement de "l'âge nucléaire", qui coïncide effectivement avec la "Grande Accélération" et toutes ses conséquences, mais il était encore trop tôt pour qu'on le comprenne comme une nouvelle époque géologique. La preuve n'était pas disponible.

La noosphère

Le grand naturaliste russe Vladimir Vernadsky (1863-1945), pédologue et minéralogiste, était le créateur de la nouvelle science de la biogéochimie en tant que sous-discipline de la géochimie. Ecrivant dans les années 1920, il a eu une remarquable prescience dans sa compréhension de la biosphère de la Terre en tant que produit de l'activité biogéochimique de la "matière vivante". Il décrit une zone s'étendant du plus haut point qui soutient la vie dans l'atmosphère à cette partie supérieure de la lithosphère (principalement les sols), incluant l'hydrosphère (principalement les océans), qui supporte toute la vie. Ses idées (en partie censurées ou inédites) évoluent dans les années 1930. Devançant la science moderne de l'écologie des écosystèmes et inspiré par *L'Evolution créatrice* de Bergson (Bergson, 1907) et ses propres premières études biogéochimiques, Vernadsky concevait l'impact humain sur la planète Terre comme "l'activité géochimique de l'humanité", modifiant la circulation des éléments dans toute la biosphère (Vernadsky, 1924). Cependant, bien que sa "Biosphère dans le cosmos" (Vernadsky, 1929, 1998) fût physiquement et conceptuellement plus épaisse et plus dynamique que la plupart des autres (Grinevald, 1987, 1988; Polunin and Grinevald, 1988), c'était finalement une enveloppe biogéologique, la force géologique la plus active sur "la face de la Terre", plutôt qu'une composante coévolutive du Système Terre lui-même. On doit noter que la science biogéochimique de la Biosphère en évolution de la Terre de Vernadsky est encore mal connue et n'a été l'objet de discussions savantes que récemment, souvent dans la perspective de la controverse sur Gaïa et l'émergence de la crise écologique (Grinevald, 1987, 1988; Huggett, 1999; Samson et Pitt, 1999; Vernadsky, 1998).

Vernadsky développa l'idée de "l'activité géochimique de l'humanité" dans son livre de 1924, *La Géochimie*, publié à Paris à la suite de ses conférences, comme professeur invité, à la Sorbonne en 1922-1923 (*La Biosphère* fut écrite en 1925, et publié en russe en 1926). Impressionné par ce qu'il voyait comme "l'influence de la conscience et de la raison humaine collective" sur la biosphère, Vernadsky fit un pas au-delà de la biogéochimie pour penser à "notre époque géologique – [une] ère psychozoïque, ère de la Raison" (Vernadsky, 1924, p. 342). Néanmoins, il garda toujours son idée de la conscience collective attachée aux processus biogéochimiques qui étaient le travail de sa vie, de sorte que "l'influence de la conscience et de la raison humaine collective" (incluant principalement le progrès technique et la recherche scientifique) s'exerçait toujours par une créature appartenant à la biosphère en évolution. Pour lui, la formation de la noosphère était la "dernière des nombreuses étapes dans l'évolution de la biosphère" et se manifestait par la transformation humaine de sa géochimie, incluant la transmutation de ses éléments, une tâche imprégnée de promesse utopique (Vernadsky, 1945, 2005).

Le mot "noosphère" fut utilisé pour la première fois dans une publication par le professeur de philosophie Edouard Le Roy (1870-1954), mais il fut probablement forgé par son jeune ami, le prêtre jésuite, géologue et paléontologue, Pierre Teilhard de Chardin, à la suite de sa lecture enthousiaste de *La Face de la Terre* d'Eduard Suess (dont le volume final, rappelant sa notion de "biosphère", fut publié en français en 1918). Le Roy, mathématicien devenu philosophe et disciple de Bergson, s'inspirait explicitement de discussions personnelles avec Teilhard et Vernadsky (Le Roy, 1927, 1928).⁽⁶⁾ Il citait ou paraphrasait un essai inédit sur "L'Hominisation" daté du 6 mai 1925 (Teilhard de Chardin, 1957). La notion a émergé après les conférences à la Sorbonne de Vernadsky, publiées dans *La*

Géochimie (Vernadsky, 1924).⁽⁷⁾ Mais ce n'est qu'après la publication du livre de 1927 de Le Roy sur les notions teilhardiennes de biosphère et de noosphère que Vernadsky adopta le terme de noosphère (Vernadsky, 1997, 2005), cependant, comme nous le montrons plus bas, avec un sens très différent. Vernadsky publia sa *Biosfera* à Leningrad en 1926 (Vernadsky, 1998), après sa rencontre avec Teilhard et Le Roy. Teilhard (plus tard exilé en Chine) et Le Roy ignoraient le livre français intitulé *La Biosphère* (Vernadsky, 1929; voir Grinevald, 1987, 1988), et, bien entendu, l'édition russe de 1926. Cette chronologie fut la source des malentendus qui suivirent.

Teilhard de Chardin mélangeait une foi dans la puissance de l'Esprit de l'âge des Lumières avec un nouveau grand récit chrétien de la Cosmogénèse–Biogénèse, et finalement, de l'Anthropogénèse. Pour lui l'Evolution représentait la montée de la Complexité-Conscience. La Noosphère (de *nous*, l'esprit en grec, et se prononce no-osphère) est le troisième et dernier grand stade de la Big History – après les stades du minéral (Géosphère) et de l'organique (Biosphère) – et qui a atteint il y a un ou deux siècles un état si avancé de développement qu'elle s'est séparée des humains incarnés pour flotter dans un niveau supérieur. Pour le Jésuite Teilhard, la Noosphère, l'enveloppe pensante de la Terre, “à partir et au-dessus de la Biosphère” (Teilhard de Chardin, 1959, p. 203) a, comme sa biosphère zoocentrique, une tendance irréversible au progrès, une dérive évolutive qui pointe vers une destination, le point Oméga, “la maturation ultime et l'extase de l'Humanité” (Teilhard de Chardin, 1959, p. 156)

Vernadsky et Teilhard utilisaient les termes “biosphère” et “noosphère” de manières radicalement différentes. Après tout, l'un était le fondateur soviétique russe de la biogéochimie et de la science interdisciplinaire de la biosphère (dans son sens planétologique et écologique global), et l'autre était un prêtre jésuite, un géologue de la croûte continentale, un paléanthropologue, un visionnaire évolutionniste et un mystique cosmique. Leurs sens de la noosphère dérivait de leurs conceptualisations de ce qu'est la Terre en tant que planète et comment elle se meut. Même leurs concepts de biosphère ne sont pas du tout similaires. La confusion entre Vernadsky et Teilhard est surtout une reconstruction récente, et après leur disparition, respectivement en 1945 et 1955, et également à cause de la publication tardive de leurs oeuvres en traduction. L'éclatement est spécialement manifeste dans les travaux d'ardents supporters de Teilhard comme Ludovico Galleni (1995) et le regretté Père Thomas Berry (1988) (et dans la lecture orientaliste de Ken Wilber (2000)) qui font la promotion d'un nouveau concordisme entre écologie et théologie, c'est-à-dire une association de l'évolutionnisme et de la venue du Christ cosmique.

Que ce soit la variété supra-terrestre ou mondaine, la noosphère émergea de la pensée évolutionniste après la Grande Guerre de 1914-1918. C'est lamarckien (plutôt que darwinien) dans le sens que la noosphère se développe progressivement comme un stade supérieur de l'évolution dirigée de la biosphère ; mais c'est aussi dans les mains de Teilhard une tendance hégélienne vers une force collective nommée la Pensée ou l'Esprit au-delà de tout processus de sélection naturelle et qui possède sa propre dynamique.

Vernadsky aussi bien que Teilhard comprenaient l'Evolution comme un processus dirigé vers des niveaux de plus en plus élevés de céphalisation (le développement du système nerveux central culminant dans la croissance continue du cerveau humain) et de conscience. Ils voyaient le développement de la vie intelligente, y compris la technique et la recherche scientifique, comme une loi inscrite dans une cosmogénèse (Teilhard) ou dans l'évolution de la biosphère de la planète Terre (Vernadsky). Tandis que tous deux extrapolaient à partir de l'évolution biologique et du progrès technique de l'espèce humaine, Teilhard fit un saut métaphysique des processus terrestres de sélection biologique et de complexité à une conception de l'évolution collective de la Conscience, qui possède des aspects à la fois immanents et transcendants, une dimension humaine interne et une dimension cosmique externe. Une telle idée était étrangère à Vernadsky pour qui la noosphère reste toujours dans les limites de la Terre, comme un élément de son évolution biogéochimique. Si la noosphère reste à l'intérieur de la biosphère, c'était “la biosphère remodelée par la pensée scientifique” (Levit, 2000). C'est une étape évolutive plus élevée sans point final terrestre ou transcendant, seulement l'influence humaine davantage répartie sur la planète, une influence qu'il considère comme une force positive, comme notre destinée prométhéenne (Guillaume 2014).

Mais que ce soit dans la conception mystique de Teilhard ou la conception plus matérialiste de Vernadsky, les deux versions de la noosphère étaient des produits de la pensée évolutionniste occidentale dans laquelle l'Homme civilisé émerge comme une force géologique de manière *incrémentale* dans le temps profond [*deep time*]. Ce fait différencie nettement toutes les notions de noosphère de l'arrivée soudaine de l'Anthropocène.

Le caractère exceptionnel de l'Anthropocène

Nous ne sommes pas en train de dire que la découverte de “précurseurs” est déflationniste à cause du crédit qui est accordé aux précédents penseurs, mais que la référence à des auteurs du 19^e et du début du 20^e siècle situe l'origine et la nature de l'Anthropocène dans un monde qui n'est pas encore le Système Terre, définissant ainsi la compréhension de l'Anthropocène dans les processus d'altération humaine du paysage et des transformations dans le fonctionnement des écosystèmes. De cette façon on “gradualise” la nouvelle époque de sorte qu'elle n'est plus une rupture due principalement à la combustion des combustibles fossiles mais à un phénomène rampant dû à l'expansion incrémentale de l'influence humaine sur le paysage. Cela interprète mal la soudaineté, la sévérité, la durée et l'irréversibilité de l'Anthropocène, conduisant à une sérieuse sous-estimation et une fausse caractérisation du genre de réponse humaine nécessaire pour ralentir son mouvement et améliorer ses impacts.

La Terre en tant qu' “écosystème” complexe total, qui inclut le système climatique planétaire, est un concept interdisciplinaire et paradigmatique très récent développé dans les années 1980 et 1990, et adopté officiellement par l'IGBP et d'autres programmes d'envergure mondiale de la coopération scientifique internationale seulement avec la “Global Change Open Conference” à Amsterdam en juillet 2001 (Grinevald, 2007, p. 247-248; Steffen et al., 2004). La perturbation humaine du Système Terre dans sa totalité n'était pas observable au 19^{ème} siècle. Bien qu'Arrhenius conçut dans les années 1890 l'altération anthropogénique de l'effet de serre, c'était une théorie sur “l'acide carbonique et les périodes glaciaires” plutôt qu'une forme précoce de science du Système Terre (Crawford, 1997). Arrhenius lui-même (1896) faisait remonter l'histoire de l'effet de serre à Tyndall, Pouillet et Fourier. Leur travail soulignant la possibilité d'un globe réchauffé n'est pas la même chose que l'argument selon lequel l'élévation du CO₂ peut perturber le Système Terre en tant que totalité.

En histoire des sciences, on peut souvent redécouvrir la “préhistoire” d'un problème résolu plus tard avec une autre approche. Les grandes nouvelles idées ou nouvelles questions sont rares mais surviennent et les notions de Système Terre et d'Anthropocène en sont des exemples. Même à l'époque de la “révolution de l'environnement” dans les années 1970, ce n'était pas évident. Le concept intégré et holistique de la Terre comme écosystème total ou écosphère (Huggett, 1999), l'idée de notre planète “vivante” en évolution, n'était pas disponible pour la conscience humaine avant les missions Apollo de la NASA et l'hypothèse Gaïa de Lovelock-Margulis (Grinevald, 1987, 1988; Lovelock, 1979, 1988). Ce tournant historique de notre prise de conscience de notre Terre toute entière (*our whole Earth*) est à présent bien documenté, notamment par Denis Cosgrove (2001) et Robert Poole (2008).

Quand on compare les premières visions d'une Terre humanisée avec l'avènement de l'Anthropocène, plusieurs différences sautent aux yeux. Comparé à la noosphère (au sens de Teilhard), l'Anthropocène est à la fois *plus*, parce qu'il est le fait d'une perturbation du Système Terre plutôt que de la biosphère ou du paysage, et *moins*, parce qu'il est construit sur la perturbation du Système Terre et n'est pas situé comme une “sphère” dessus ou au-delà de lui.

De manière cruciale, tandis que l'anthropozoïque de Stoppani et la noosphère de Vernadsky et de Teilhard représentent des *extrapolations* évolutionnistes – c'est-à-dire fondées sur le postulat de l'inévitable avancement du progrès – l'Anthropocène est une rupture très mal accueillie, pas tant une régression mais un effondrement radical de toute idée de progrès vers un stade supérieur. Il représente donc une critique implicite à tous ceux qui se permettent des extrapolations, qu'elles soient enracinées dans l'évolution, des étapes de la conscience ou de la croissance économique illimitée. L'Anthropocène est une nouvelle dérive anthropogénique dans l'histoire naturelle de la planète Terre plutôt que le nouveau développement d'une biosphère anthropocentrique. Pour tous les perfectionnements de sa notion biogéochimique et cosmologique de la biosphère, Vernadsky n'a pas pu anticiper l'émergence du mode d'intelligibilité des sciences du Système Terre. Il ne pouvait pas prévoir le fossé qui la sépare des sciences

du Système Terre de l'écologie classique, ce qui requiert un saut de "la pensée écologique – la science des relations entre les organismes et leurs milieux – à la pensée de la Terre en tant que système, la science de la totalité de la Terre comme système complexe au-delà de la somme des parties" (Hamilton 2014), un "déplacement conceptuel" qu'évitent beaucoup d'écologistes aujourd'hui.

Pour les scientifiques qui ont annoncé l'arrivée de l'Anthropocène, la plus grande force qui l'a apporté n'est pas la Pensée, la Raison, la Conscience ou l'Esprit, ou quelque force qui monte au-dessus d'un collectif qui demande une lettre capitale ; à la place le coupable est l'humanité comprise comme *homo faber*, l'homme technologique de la civilisation occidentale moderne devenu une nouvelle force géologique par des moyens dont la puissance perturbe les grands cycles qui gouvernent la trajectoire de la planète. Cela ressemble superficiellement à la "nouvelle force tellurique" de Stoppani sauf que ce n'est pas tant avec la terre (tellurique) que les êtres humains sont intervenus de manière si décisive qu'avec l'atmosphère et les océans (géosphères fluides inséparables) en tant que compartiments du cycle global du carbone et du système climatique.

Si, pour Teilhard, la noosphère représente la puissance de la conscience de la totalité de l'humanité qui s'élève au-dessus et se purifie de ses attaches terrestres, l'Anthropocène dans l'approche des scientifiques du Système Terre – pour qui l'explosion de la population humaine (avec son métabolisme industriel) est devenue une force d'accélération de la nature – a ramené la conscience sur Terre. La condition pour la possibilité de la noosphère, une histoire humaine libérée de l'histoire naturelle de la Terre, a été effacée, parce que, comme Chakrabarty (2011) nous l'a dit, les deux histoires ont maintenant convergé, nous donnant une sorte de Terre hybride, de nature infiltrée de volonté humaine, que cette volonté ait été exercée de manière responsable ou irresponsable.

Remerciements

La première ébauche de cet article a été révisée et améliorée grâce aux utiles commentaires et critiques de trois réviseurs. Nous exprimons aussi notre gratitude aux autres critiques, spécialement à celles de Christophe Bonneuil et Jan Zalasiewicz. J. Grinevald est personnellement très reconnaissant au travail et aux vives discussions de l'Anthropocène Working Group (AWG) présidé par Jan Zalasiewicz, et dont il est l'un des membres. Cela va sans dire, l'AWG n'a rien à voir avec le présent article, initié par C. Hamilton. Toutes les expressions d'une opinion (ou d'erreurs de fait) contenus dans cet essai sont de la seule responsabilité des auteurs.

Notes

(1) Une traduction anglaise complète de *Biosfera* [La Biosphère] de Vernadsky (l'édition originale a été publiée en 1926) a finalement été publiée au début 1998. Elle était citée par Crutzen et Stoermer (2000) et Crutzen (2002).

(2) Les pages en italien sur "l'ère antropozoica" sont à présent traduites en anglais par Valéria Federichi, et sont disponibles en ligne.

(3) Renevier (1873) et Stoppani (1873) furent tous les deux actifs dans le 2e Congrès Géologique International de 1881 à Bologne, en Italie, où la nomenclature stratigraphique fut discutée pour la première fois au niveau comparatif international (Freymond, 2012). La terminologie de l'Holocène (terme introduit dans les années 1860 par Paul Gervais), pour l'époque moderne post-Pléistocène fut adoptée par le Congrès Géologique International de Berlin en 1885.

(4) Voir <https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/2013/04/03/the-history-of-the-keeling-curve/>.

(5) Malheureusement, la nouvelle science de la Biosphère considérée comme un tout (plus tard appelée écologie globale) de Vernadsky resta des lustres ignorée ou mal comprise, en partie censurée ou inédictée (voir la préface par Lynn Margulis et des collègues dans Vernadsky, 1998). Les livres français de Vernadsky, *La Géochimie* (1924) et *La Biosphère* (1929) furent épuisés après la Deuxième Guerre mondiale. Son livre original en russe intitulé *Biosfera*, publié à Leningrad en 1926, juste après son plus long séjour en France (1922-1925), ne fut publié intégralement en anglais qu'en 1998 (Grinevald, 1998).

(6) Les deux livres de Le Roy furent mis à l'*Index Librorum Prohibitorum* de l'Eglise catholique en 1931.

(7) Rappelée plus tard et par Teilhard (1956) et par Vernadsky (1945).

Références

- Agassiz, L. (1840), *Etudes sur les glaciers*, Neuchâtel, Jent et Gassman.
- Arrhenius, S. (1896), “On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground”, *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 41(251), p. 237-276. [Trad. fr.: “De l’influence de l’acide carbonique dans l’air sur la température de la Terre”, in Svante Arrhenius et al., *Sur les origines de l’effet de serre et du changement climatique*, Préfaces d’Edouard Bard et Jérôme Chappellaz, Paris, La ville brûle, 2010, p.197-243.]
- Balter, M. (2013), “Archaeologists say the ‘Anthropocene’ is here – But it began long ago”, *Science*, 340, p. 261-262.
- Barnola, J.M., D. Raynaud, Y.S. Korotkevich et C. Lorius (1987), “Vostok ice core provides 160000 year record of atmospheric CO₂”, *Nature*, 329, p. 408-414.
- Baskin, J. (2014), *The Ideology of the Anthropocene?*, MSSSI Research Paper No. 3, Melbourne Sustainable Society Institute, The University of Melbourne.
- Bergson, H. (1907), *L’Evolution créatrice*, Paris, Librairie Félix Alcan. (rééd. PUF)
- Berry, T. (1988), *The Dream of the Earth*, San Francisco, Sierra Club Books.
- Bocking, S. (1997), *Ecologists and Environmental Politics: A History of Contemporary Ecology*, New Haven, Yale University Press.
- Bolin, B. et al., eds. (1986), *The Greenhouse Effect, Climatic Change and Ecosystems*, SCOPE 29, Chichester, John Wiley & Sons.
- Bonneuil, C. et J.-B. Fressoz (2013), *L’Événement Anthropocène: La Terre, l’histoire et nous*, Paris, Seuil, coll. “Anthropocène”. (Edition anglaise révisée : *The Shock of the Anthropocene: The Earth, History and Us*, London, Verso, à paraître.)
- Buffon, Comte de (1788) *Les Epoques de la nature*, in *Histoire naturelle générale et particulière*, Supplément, t. V, Paris, Imprimerie royale. (Edition critique de Jacques Roger, Paris, Muséum national d’histoire naturelle, 1962, reprint 1988)
- Canguilhem, G. (1968), *Etudes d’histoire et de philosophie des sciences*, Paris, Vrin.
- Chakrabarty, Dipesh (2009), “The Climate of History : Four Theses”, *Critical Inquiry*, 35, p. 197-222. [Trad. fr.: “La climat de l’histoire : quatre thèses”, *La Revue internationale des livres et des idées*, janvier 2010.]
<http://www.revuedeslivres.fr/le-climat-de-l-histoire-quatre-theses-par-dipesh-chakrabarti/>
- Coleman, D.C. (2010), *Big Biology: The Emergence of Ecosystem Science*, Berkeley, University of California Press.
- Conway, E.M. (2008), *Atmospheric Science at NASA : A History*, Baltimore, Johns Hopkins University Press.
- Cosgrove, D. (2001), *Apollo’s Eye : A Cartographic Genealogy of the Earth in the Western Imagination*, Baltimore, Johns Hopkins University Press.
- Crawford, E. (1997), “Arrhenius’ 1896 model of the greenhouse effect in context”, *Ambio*, 21(1), p. 6-11.
- Crutzen, P.J. (1995), “My life with O₃, NO_x and other YZO_xs, Nobel Lecture, 8 December”. <http://www.nobelprize.org/nobel/chemistry/laureates/1995/crutzen-lecture.html>
- Crutzen, P.J. et M. Müller, eds. (1989), *Das Ende des blauen Planeten? Der Klimakollaps: Gefahren und Auswege*, München, Verlag C.H. Beck.
- Crutzen, P.J. et Stoermer, Eugene (2000), “The ‘Anthropocene’”, *Global Change. IGBP NewsLetter*, 41, p. 17-18, mai.
<http://www.igbp.net/download/18.316f18321323470177580001401/NL41.pdf>
- Crutzen, P.J. (2002), “Geology of mankind”, *Nature*, 413, p. 23, 3 janvier. [Trad. fr.: “La géologie de l’humanité: l’Anthropocène”, *Ecologie et politique*, 2007, 34, p. 141-148.]
<http://www.readcube.com/articles/10.1038/415023a>
http://www.cairn.info/zen.php?ID_ARTICLE=ECOPO_034_0141
- Daly, J. (2014), *The Rise of Western Power: A Comparative History of Western Civilization*, London, Bloomsbury.
- Davis, R. (2011), “Inventing the Present : Historical Roots of the Anthropocene”, *Earth Sciences History*, 30(1), p. 63-84.

- Ehlers, E. et Krafft, T., eds (2006), *Earth System Science in the Anthropocene: Emerging Issues and Problems*, Berlin, Springer.
- Ellis, E. (2011), “The planet of no return: human resilience on an artificial Earth”, *Breakthrough Journal*, 2, p. 39-44.
<http://thebreakthrough.org/index.php/journal/past-issues/issue-2/the-planet-of-no-return>
- Falkowski, P. et al. (2000), “The global carbon cycle: A test of our knowledge of Earth as a system”, *Science*, 290, p. 291-296.
- Fleming, J. (2010), *Fixing the Sky: The Checkered History of Weather and Climate Control*, New York, Columbia University Press.
- Forrester, J. (1971), *World Dynamics*, Cambridge, Mass., Weight-Allen Press. [Trad. fr.: *Dynamique mondiale*, Lyon, Presses universitaires de Lyon, 1975.]
- Freymond, R. (2012), “Anthropocène, Echelle géologique: Eugène Renevier, l'école lausannoise de géologie et de stratigraphie”, *Géoglob*. Le blog de la Faculté des geosciences de l'environnement, Université de Lausanne, 31 juillet.
- Galleni, L. (1995), “How does Teilhardian vision of evolution compare with contemporary theories?”, *Zygon: Journal of Religion and Science*, 30(1), p. 25-45.
- Georgescu-Roegen, N. (1975), “Energy and economic myths”, *Southern Economic Journal*, 41(3), p. 347-381 (January). [Trad. fr.: “L'énergie et les mythes économiques”, in *La Décroissance: entropie.écologie-économie*, présentation et traduction de J. Grinevald et I. Rens, Paris, Editions Sang de la terre, 1996, chap. 2, p. 73-148.] disponible en ligne:
http://classiques.uqac.ca/contemporains/georgescu_roegen_nicolas/dcroissance/dcroissance.html
- Glacken, C.J. (1956), “Changing Ideas of the Habitable World”, in W.L. Thomas, Jr., ed., *Man's Role in Changing the Face of the Earth*, Chicago, University of Chicago Press, vol. 1, p. 70-92.
<https://fr.scribd.com/doc/241789479/GLACKEN-Changing-ideas-about-the-world-pdf>
- Goody, R., ed. (1982), *Global Change: Impacts on Habitability. A Scientific Basis for Assessment*. A Report by the Executive Committee of a Workshop held at Woods Hole, Massachusetts, 21-26 June 1982, Jet Propulsion Laboratory, JPL D-95, Pasadena, California Institute of Technology.
- Graedel, T. and P.J. Crutzen (1993), *Atmospheric Change : An Earth System Perspective*, New York: W.H. Freeman and Company.
- Grinevald, J. (1987), “On a holistic concept for deep and global ecology : The Biosphere”, *Fundamenta Scientiae*, 8(2), p. 197-22.
<http://graduateinstitute.ch/files/live/sites/iheid/files/sites/developpement/shared/developpement/cours/E716/Séance%202%20On%20a%20holistic%20concept.pdf>
- Grinevald, J. (1988), “Sketch for a history of the idea of the Biosphere”, in P. Bunyard and E. Goldsmith, eds., *GAIA, the Thesis, the Mechanisms and the Implications*, Camelford, U.K., Wadebridge Ecological Center, p. 1-34.
http://graduateinstitute.ch/files/live/sites/iheid/files/sites/developpement/shared/developpement/cours/E716/JG_sketch%20idea%20concept%20Biosphere_angl.pdf
- Grinevald, J. (1998), “Introduction : The Invisibility of the Vernadskian Revolution”, in V.I. Vernadsky, *The Biosphere*, New York, Copernicus/Springer-Verlag, p. 20-32.
<http://leavenproject.files.wordpress.com/2011/12/obcl-5.pdf>
- Grinevald, J. (2005), “Ideas y preocupaciones acerca del papel de la especie humana en la Biosfera”, in J.M. Naredo et L. Gutiérrez, eds., *La incidencia de la especie humana sobre la faz de la Tierra (1955-2005)*, Lanzarote, Fundacion César Manrique, Granada, Universidad de Granada, p. 15-90.
[http://www.fcmanrique.org/recursos/publicacion/4d399d90la%20incidencia%20de%20la%20especie%20humana%20\(parte%201\).pdf](http://www.fcmanrique.org/recursos/publicacion/4d399d90la%20incidencia%20de%20la%20especie%20humana%20(parte%201).pdf)
- Grinevald, J. (2007), *La Biosphère de l'Anthropocène: climat et pétrole, la double menace. Repères transdisciplinaires (1824-2007)*, Chêne-Bourg/Genève, Georg Editeur/Editions Médecine & Hygiène, coll. “Stratégies énergétiques, Biosphère et Société”.
- Guillaume, B. (2014), “Vernadsky's philosophical legacy : A perspective from the Anthropocene”, *The Anthropocene Review*, 1(2), p. 137-146.
<http://anr.sagepub.com/content/1/2/137>
- Hamblin, J.D. (2013), *Arming Mother Nature. The Birth of Catastrophic Environmentalism*, Oxford/New York, Oxford University Press.
- Hamilton, Clive (2014), “The New Environmentalism Will Lead Us to Disaster”, *Scientific American*, June 19.

<http://www.scientificamerican.com/article/the-new-environmentalism-will-lead-us-to-disaster/>

Huggett, R.J. (1999), "Ecosphere, biosphere, or Gaia? What to call the global ecosystem?", *Global Ecology and Biogeography*, 8, p. 425-431.

<http://www.jstor.org/discover/10.2307/2997863?uid=3737760&uid=2129&uid=2&uid=70&uid=4&sid=21104353406531>

Hutchinson, G.E. et al. (1970), *The Biosphere*. A Scientific American Book, San Francisco, Freeman (numéro spécial de septembre 1970 du *Scientific American*).

INQUA (2014)

<http://www.inqua-saccom.org/majordivisions/anthropocene/>

International Council of Scientific Unions (ICSU) (1986), *The International Geosphere-Biosphere Programme: A Study of Global Change*. Final Report of the Ad Hoc Planning Group, Prepared for the 21st General Assembly, Berne, 14-19 September. International Council of Scientific Unions, 4 August, 21p.

Jacobson, M.C., R.J. Charlson, H. Rodhe et al., eds., (2000), *Earth System Science: From Biogeochemical Cycles to Global Change*, San Diego, Academic Press.

Jørgensen, S.E., ed. (2010), *Global Ecology: A Derivative of Encyclopedia of Ecology*, Amsterdam, Elsevier.

Josephson, P.R. (2002), *Industrialized Nature: Brute Force Technology and the Transformation of the Natural World*, Washington, Island Press/Shearwater Books.

Jouzel, J., C. Lorius et D. Raynaud (2008), *Planète blanche. Les glaces, le climat et l'environnement*, Paris, Odile Jacob.

Keeling, C.D. (1970), "Is carbon dioxide from fossil fuel changing man's environment?", *Proceedings of the American Philosophical Society*, 114(1), p. 10-17.

Koyré, A. (1961), *La révolution astronomique. Copernic, Kepler, Borelli*, Paris, Hermann.

Kump, L.R., J.F. Kasting et R.G. Crane (1999), *The Earth System*, Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall.

LeConte, J. (1877), 'Psychozoic era', in "On Critical Periods in the History of the Earth, and their Relation to Evolution; on the Quaternary As Such a Period", *American Naturalist*, 11(9), p. 540-557.

Le Roy, E. (1927), *L'Exigence Idéaliste et le Fait de l'Evolution*, Paris, Boivin. (cours au Collège de France, 1925-26)

Le Roy, E. (1928), *Les Origines Humaines et l'Evolution de l'Intelligence*, Paris, Boivin. (cours au Collège de France, 1927-28)

Levit, G.S. (2000), "The Biosphere and the Noosphere Theories of V. I. Vernadsky and P. Teilhard de Chardin : A Methodological Essay", *Archives Internationales d'Histoire des Sciences*, 50(144), p. 160-177.

https://www.academia.edu/3989329/The_Biosphere_and_the_Noosphere_Theories_of_V._I._Vernadsky_and_P._Teilhard_de_Chardin_A_Methodological_Essay

Locher, F. et J.-B. Fressoz (2012), "Modernity's Frail Climate : A Climate History of Environmental Reflexivity", *Critical Inquiry* 38(3), p. 579-598. [Trad. fr.: "La climat fragile de la modernité: petite histoire climatique de la réflexivité environnementale", *La Vie des idées.fr*, 20 avril 2010.]

<http://www.laviedesidees.fr/Le-climat-fragile-de-la-modernite.html>

Lovelock, J. (1979), *GAIA : A New Look at Life on Earth*, Oxford, Oxford University Press. Trad. fr.: *La terre est un être vivant : l'hypothèse gaïa*, Monaco, Le Rocher, 1986 (rééd.: Champs/Flammarion, 1990)

Lovelock, J. (1988), *The Ages of Gaia: A Biography of Our Living Earth*, Oxford, Oxford University Press. Trad. fr.: *Les Ages de Gaïa*, Paris, Robert Laffont, 1990 (rééd. Odile Jacob, coll. "Opus", 1997).

Lovelock, J. et L. Margulis (1974), "Atmospheric homeostasis by and for the biosphere : the Gaia hypothesis", *Tellus*, 26(1-2), p. 2-10. (avec résumé en russe)

<http://web.gps.caltech.edu/classes/ge148c/pdf%20files/lovelock.pdf>

Lyell, C. (1830-1833), *Principles of Geology, being An Attempt to Explain the Former Changes of the Earth's Surface, by Reference to Causes Now in Operation*, London, John Murray, 3 vol. (reprint, avec une introduction par M.J.S. Rudwick, Chicago, University of Chicago Press, 1990, 3 vol.)

- Mackenzie, F.T. et J.A. Mackenzie (1998), *Our Changing Planet: An Introduction to Earth System Science and Global Environmental Change*, Second Edition, Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall.
- Marsh, G.P. (1874), *The Earth as Modified by Human Action : A New Edition of 'Man and Nature'*, New York, Charles Scribner, Armstrong & Co.
<http://www.gutenberg.org/ebooks/6019>
- Meadows, D. et al. (1972), *The Limits to Growth*. A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind, New York, Universe Press.
- Mokyr, J. (2002), *The Gifts of Athena: Historical Origins of the Knowledge Economy*, Princeton, Princeton University Press.
- National Research Council (NRC) (1983), *Toward an International Geosphere-Biosphere Programme : A Study of Global Change*. Report of a National Research Council Workshop, Woods Hole, Massachusetts, 25-29 July 1983, Washington, National Academy Press.
- Noble, D.F. (1998), *The Religion of Technology : The Domination of Man and the Spirit of Invention*, New York, Alfred J. Knopf.
- Polunin, N. et J. Grinevald (1988), "Vernadsky and Biospherical Ecology", *Environmental Conservation*, 15(2), p. 117-123.
<http://graduateinstitute.ch/files/live/sites/iheid/files/sites/developpement/shared/developpement/cours/E716/Vernadsky%20and%20biospherical%20ecology.pdf>
- Poole, R. (2008), *Earthrise : How Man First Saw the Earth*, New Haven, Yale University Press.
- Renevier, E. (1873), *Tableau des Terrains sédimentaires formés pendant les époques de la Phase organique du Globe terrestre*, Lausanne, Roge & Dubois.
<http://www3.unil.ch/wpmu/geoblog/2012/07/eugene-renevier-lecole-lausannoise-de-geologie-et-la-stratigraphie/>
- Ruddiman, W. (2003), "The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago", *Climatic Change*, 61(3), p. 261–293.
http://stephenschneider.stanford.edu/Publications/PDF_Papers/Ruddiman2003.pdf
- Samson, P.R. et D. Pitt, eds. (1999), *The Biosphere and the Noosphere Reader : Global Environment, Society and Change*, New York, Routledge.
- Schneider, S.H. (1989), *Global Warming : Are We Entering the Greenhouse Century?*, San Francisco, Sierra Club Books.
- Schuchert, C. (1918), "The Earth's changing surface and climate during geological time", in J. Barrell et al., eds., *The Evolution of the Earth and its Inhabitants*, New Haven, Yale University Press, p. 45-81.
- Sherlock, R.L. (1922), *Man as a Geological Agent : An Account of his Action on Inanimate Nature*, London, H.F. & G. Witherby.
- Steffen, W., A. Sanderson, P.D. Tyson et al. (2004) *Global Change and the Earth System : A Planet Under Pressure*, Global Change: The IGBP, Series, Berlin, Springer-Verlag.
- Steffen, W., A. et P.D. Tyson, eds. (2001) *Global Change and the Earth System : A Planet Under Pressure*, The Global Environmental Change Programme, IGBP Science 4, Stockholm, IGBP Secretariat, 33p.
- Steffen W., J. Grinevald, P. Crutzen et J. McNeill (2011), "The Anthropocene : Conceptual and historical perspectives", *Philosophical Transactions of the Royal Society*, A, 369, p. 842–67.
<http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/369/1938/842.full.pdf+html>
- Stoppani, A. (1873), *Corso di Geologia*, vol. II, *Geologia stratigrafica*, Milano, G. Bernardoni E. G. Brigola, editori.
http://www.geologicnow.com/2_Turpin+Federighi.php
- Syvitski, J. (2012), "Anthropocene: An Epoch in our making", *Global Change. IGBP*, 78, p. 12-15.
- Teilhard de Chardin, P. (1925), *L'Hominisation*. Introduction à une étude scientifique du Phénomène humain, Paris, 6 mai, inédit. (in *Oeuvres*, t. 3, *La Vision du Passé*, Paris, Seuil, 1957, p. 75-111.
- Teilhard de Chardin, P. (1956a), *The Antiquity and World Expansion of Human Culture*, in W. L. Thomas, Jr., ed., *Man's Role in Changing the Face of the Earth*, Chicago, University of Chicago Press, p. 103-112.
- Teilhard de Chardin, P. (1957), *La Vision du passé*, *Oeuvres*, t. 3, Paris, Seuil.
- Teilhard de Chardin, P. (1959), *L'Avenir de l'Homme*, *Oeuvres*, t. 5, Paris, Seuil.
- Vernadsky, V.I. (1923), "La composition chimique de la matière vivante et la chimie de l'écorce terrestre", *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 34, p. 42-51.

- Vernadsky, VI (1924) *La Géochimie*, Paris, Librairie Félix Alcan.
- Vernadsky, VI (1929) *La Biosphère*, Paris, Librairie Félix Alcan.
- Vernadsky, V.I. (1945), “The Biosphere and the Noösphere”, *American Scientist*, 33(1), p. 1-12.
- Vernadsky, V.I. (1997), *Scientific Thought as a Planetary Phenomenon*, (trans. from Russian by Starostin BA, foreword and commentary by Yanshin A.L, and F.T. Yanshina), Moscou, Nongovernmental Ecological V.I. Vernadsky Foundation.
- Vernadsky, V.I. ([1926]1998), *The Biosphere*, Foreword by Lynn Margulis et al., Introduction by Jacques Grinevald, Translated by David B. Langmuir, Revised and Annotated by Mark A. S. McMenamin, A Peter N. Nevraumont Book, New York, Copernicus/Springer-Verlag.
- Vernadsky, V.I. (2005), “Some Words about the Noösphere”, *21st Century*, Spring. [original en russe, 1943] (voir Vernadsky, 1945)
http://www.21stcenturysciencetech.com/translations/The_Noosphere.pdf
- Volk, T. (2003), *Gaia's Body: Toward a Physiology of Earth*, Cambridge, Mass., MIT Press (1^{ère} ed.: New York, Copernicus/Springer-Verlag, 1998).
- Waters, C.N. et al. (2015), “Can nuclear weapons fallout mark the beginning of the Anthropocene Epoch?”, *Bulletin of the Atomic Scientists*, à paraître [1er mai].
- White, L. Jr. (1967), “The historical roots of our ecologic crisis”, *Science*, 155, p. 1203-1207.
- Wilber, K. (2000), *Sex, Ecology, Spirituality : The Spirit of Evolution*, Boston, Shambhala.
- Wolfe, A.P. et al. (2013), “Stratigraphic expressions of the Holocene-Anthropocene transition revealed in sediments from remote lakes”, *Earth-Science Reviews*, 116, p. 17-34.
- Zalasiewicz, J, P. Crutzen et W. Steffen (2012), “The Anthropocene”, in F.M. Gradstein et al., eds., *A Geological Time Scale*, Amsterdam, Elsevier, p. 1033-1040.
- Zalasiewicz J. et al. (2014), “When did the Anthropocene begin? A mid-twentieth century boundary level is stratigraphically optimal”, *Quaternary International*, à paraître. [available online 12 January 2015]
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1040618214009136>
- Zanoni, E. (2014), *Scienza, Patria, Religione: Antonio Stoppani e la cultura italiana dell' Ottocento*, Milan, Franco Angeli.

Auteur: [Jacques Grinevald](#)

Tous les articles de Jacques Grinevald :

[Le concept d'Anthropocène et son contexte historique et scientifique](#)
[L'Anthropocène a-t-il été anticipé ?](#)



Le Manifeste

C'est à la veille du tremblement de terre qui a frappé le Japon et déclenché la catastrophe nucléaire de Fukushima que l'Institut Momentum s'est réuni pour la première fois, le 10 mars 2011. [Lire la suite →](#)



Modélisation : une approche épistémologique

Gérard Sensevy, CREAD, université Rennes 2 ; IUFM de Bretagne ; gerard.sensevy@bretagne.iufm.fr

Jérôme Santini, CREAD, université Rennes 2 ; IUFM de Bretagne ; jerome.santini1@ac-nice.fr

Nous développons dans cet article une approche épistémologique de la modélisation à partir des travaux de deux auteurs de l'école de Stanford, Cartwright et Hacking, et de leur référence commune à Fleck. Dans cette approche, il s'agit de se défaire de l'idée classique du modèle comme simple application ou représentation de lois scientifiques. Avec les auteurs cités, nous entendons montrer pourquoi les modèles sont intrinsèquement contextuels et sont affaire de capacités plus que de lois, comment ces modèles réalisent l'articulation du concret de l'expérience avec l'abstrait de la théorie et sont, enfin, l'expression d'un collectif de pensée. De cette épistémologie novatrice, nous dégagons de premières implications didactiques pour l'enseignement et l'apprentissage des sciences.

Dans cet article, nous procédons tout d'abord (section 1) à une réflexion épistémologique relative à la notion de modèle. Nous appuyant principalement sur les travaux de Cartwright (1983, 1999), Fleck (1934/2005), et Hacking (1983/1989), nous proposons une manière particulière de décrire l'activité scientifique qui nous paraît, à la fois, plus rigoureuse et plus respectueuse de la réalité de cette activité que la plupart des descriptions classiques, et d'un certain pouvoir heuristique pour la recherche en didactique.

Dans la seconde partie de l'article (section 2), nous envisageons certaines implications didactiques possibles issues de la réflexion conduite dans la première partie.

1. Modèle, style de pensée, expérimentation

1.1. Qu'est-ce qu'un modèle ?

La conception de ce qu'est un modèle dépend sans doute étroitement d'un système d'idées relatif à ce que sont la science et l'activité scientifique même. Selon l'épistémologie – au sens de la théorie de la connaissance – dans laquelle on se situe, le modèle, au sein de la théorie qui l'intègre, pourra être pensé différemment. Dans ce qui suit, nous voulons présenter une conception que nous pourrions qualifier d'empirique, et cela à un double titre : empirique parce qu'elle tente de réévaluer l'importance de l'expérience, de la situation, et des instruments, dans la production continue des modèles ; mais empirique aussi parce qu'elle s'efforce continûment de produire une épistémologie de la science telle qu'elle se fait¹, et non à partir de la description plus ou moins scolastique que certains épistémologues classiques ont pu en produire².

• Modèle, localité et multiplicité

Concevoir un modèle, c'est, sous une certaine description, produire une loi. Quelle peut être alors la nature d'une telle loi ? Cartwright écrivit en 1983 un livre au titre provocateur : *How The Laws of Nature Lie*³. Contrairement à ce que pourrait laisser penser ce titre, il ne s'agit pas d'un ouvrage d'épistémologie relativiste, qui contesterait la prétention de la science à dire le vrai, mais plutôt d'une invitation à s'éloigner d'une conception universaliste de la science, au sein de laquelle les lois de la nature, valables toujours et partout, gouvernent nos expériences. Cartwright a développé depuis ce point de vue, et voici comment elle envisage un modèle emblématique, $F = ma$, qui lui paraît paradigmatique d'une science réelle, dans laquelle on utilise des concepts précis reliés par d'exactes relations déductives : « *En mécanique, nous avons ce genre de relation exacte, mais au coût d'introduire des concepts abstraits*

¹ En cela, cette épistémologie se rapproche de la moderne sociologie des sciences (Bloor, 1982 ; Latour, 1995), sans en partager toutefois nombre de caractéristiques

² Nous reviendrons infra (paragraphe 4 dans cette partie 1) sur la caractérisation de cet empirisme.

³ Comment les lois de la nature mentent

comme force, concepts dont la relation au monde doit être médiée par des concepts plus concrets. Ces concepts plus concrets se révèlent très spécifiques dans leur forme : les formes sont données par les modèles interprétatifs de la théorie, par exemple, deux masses compactes séparées par une distance r , l'oscillateur harmonique linéaire, ou le modèle pour une charge se déplaçant dans un champ magnétique uniforme. Ceci assure à force un contenu très précis. Mais cela signifie aussi que ce contenu est sévèrement limité dans sa gamme d'applications. Il ne peut être attaché seulement qu'à ces situations qui peuvent être représentées par ces modèles hautement spécialisés »⁴ (Cartwright, 1999, p. 3). On comprend donc l'argument : les sciences produisent des modèles explicatifs du monde, mais pas du monde tel qu'il est, bien plutôt du monde tel qu'il est reconstruit dans l'enceinte expérimentale : cela ne diminue en rien la vérité des assertions scientifiques, et la conception empirique n'est nullement relativiste. Au contraire, pourrait-on dire, puisqu'elle décrit la science comme production complexe et organisée de la vérité (au sein de ces situations représentées par des modèles hautement spécialisés), le « localisme » seul pouvant précisément garantir cette vérité : il s'agit donc de réévaluer l'importance des situations dans lesquelles le vrai s'élabore.

Cartwright peut ainsi énoncer l'une des thèses fondamentales de son propos : « L'impressionnant succès empirique de nos meilleures théories physiques peut faire arguer en faveur de la vérité de ces théories mais pas pour leur universalité. Plutôt, c'est le contraire qui est le cas. La manière propre dont la physique a l'habitude de générer des prédictions précises montre quelles sont ses limites. Les concepts abstraits théoriques de la haute physique décrivent le monde via les modèles qui interprètent ces concepts plus concrètement. Ainsi, les lois de la physique s'appliquent seulement où ses modèles s'ajustent (fit), et cela, apparemment, inclut seulement un domaine très limité de circonstances » (ibid., p. 4).

Cartwright propose ainsi un arrière-fond tout à fait particulier au travail épistémologique, en empruntant une grande partie de son argumentation à Neurath (1882-1945), savant et politique, membre fondateur du cercle de Vienne. L'une des fonctions de cet arrière-fond consiste à lutter contre la tendance, forte selon elle, à se représenter l'édifice des sciences comme celui d'une pyramide, au sommet de laquelle on trouve la physique, la psychologie occupant la base de cette pyramide (figure 1).

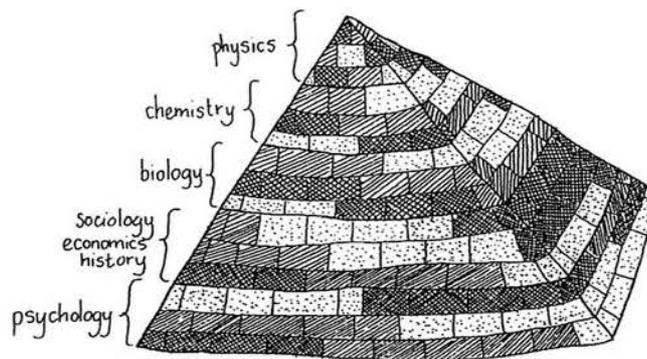


Figure 0.1 Pyramid. Source: Rachel Hacking.

Figure 1. La pyramide des sciences (Cartwright, 1999, p. 7) |

Le cœur de cette représentation réside en ceci : « les lois et concepts de chaque domaine scientifique sont réductibles à ceux d'un domaine plus fondamental, tous disposés selon une hiérarchie » (Cartwright, 1999, p. 6). Il faut saisir, ici, les liens logiques existant entre l'universalisme des lois de la physique, et le type de réductionnisme que la conception pyramidale suppose. Considérer les lois de la physique comme universelles justifie ce réductionnisme particulier qu'est le physicalisme : puisque les lois de la physique sont universelles (et indépendantes des contextes), elles sont valables partout, et on peut donc ramener tous les processus (en particulier les processus vitaux) à des processus physiques, sans

⁴ Nous avons produit nous même la traduction, volontairement quasi-littérale, de toutes les citations de Cartwright reproduites dans cet article. Certaines fois, nous avons fait suivre un terme particulier par le mot anglais utilisé par l'auteur.

les dénaturer. Cartwright, en s'appuyant sur Neurath (1983), propose alors une vue alternative, qu'on peut figurer comme sur la figure 2.

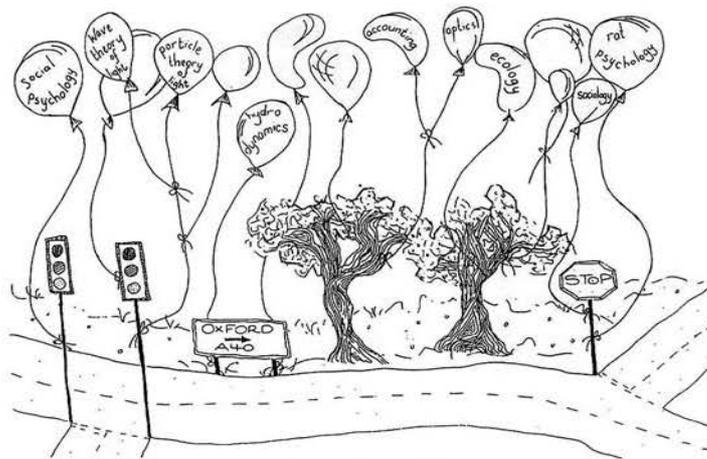


Figure 0.2 Source: Rachel Hacking.

Figure 2. Le monde pommelé (Cartwright, 1999, p. 8)

Elle commente ainsi ce dessin : « *Les sciences sont pour chacune d'entre elles reliées, à la fois pour ce qui concerne les applications et les confirmations, au même monde matériel ; leur langage est le langage partagé des événements spatio-temporels. Mais au-delà, il n'y a pas de système, pas de relations fixes entre elles. Les ballons peuvent être attachés ensemble pour coopérer de différentes manières dans différents agrégats quand nous avons besoin d'eux pour résoudre des problèmes différents. Leurs frontières sont flexibles ; elles peuvent être expansées ou contractées ; elles peuvent même en arriver à couvrir une partie du même territoire. Mais il y a indubitablement des frontières. Il n'y a pas de couverture universelle des lois* » (ibid., p. 6).

On voit donc se dessiner, en lieu et place d'un monde de lois universelles architecturant un ensemble de sciences hiérarchiquement emboîtées les unes dans les autres, rendues parfaitement commensurables par la réduction physicaliste, un Modélisation : une approche épistémologique « monde pommelé⁵ », fait de domaines scientifiques en partie incommensurables les uns aux autres, et dans lequel ont disparu les relations de hiérarchie conceptuelle.

Non seulement l'idée qu'il existe des concepts fondamentaux de la physique auxquels peuvent se réduire les concepts des autres sciences est battue en brèche, mais encore il découle de cette vision des choses qu'aucune hiérarchie entre sciences de la nature et sciences de l'homme et de la société n'est posée *a priori*.

• De l'abstrait au concret : l'analogie fable/modèle

Une telle conception n'est pas sans effet sur la manière dont on peut concevoir la réalité d'un modèle scientifique. De fait, dans la description pommelée de l'épistémologie empirique, un enjeu essentiel réside dans la compréhension du passage du concept abstrait (par exemple celui de force, en physique), aux concepts plus concrets – les modèles interprétatifs de la réalité, hautement spécialisés. Comprendre la science et ses modélisations, c'est donc comprendre ce passage de l'abstrait au concret : « ce dont nous avons besoin pour comprendre la manière dont les lois scientifiques s'appliquent au monde (fit the world), c'est la relation entre l'abstrait et le concret ; et pour comprendre cela, cela aidera de penser aux fables et à leurs morales. Les fables transforment l'abstrait en concret, en faisant cela, je prétends qu'elles fonctionnent comme des modèles en physique. La thèse que je veux défendre est que la

⁵ C'est le titre du livre de Cartwright (1999) : *The dappled world. A Study of the Boundaries of Sciences.*

relation entre la morale et la fable est la même que celle existant entre une loi scientifique et un modèle » (ibid., p. 37).

Considérons la fable suivante, empruntée à un auteur des Lumières allemandes, Lessing (1729-1781) : « Une martre mange la grouse ; un renard étrangle la martre ; la dent du loup, le renard » et sa morale : « *Les plus faibles sont toujours proies des plus forts* ».

Cartwright reprend l'argumentation de Lessing pour caractériser la fable, notamment selon ses fonctions épistémologiques et cognitives. Au plan épistémologique, l'idée fondamentale de Lessing est que « *la connaissance intuitive⁶* » est claire en elle-même, et que la connaissance symbolique « emprunte sa clarté à [la connaissance] intuitive » (Lessing, cité par Cartwright, ibid., p. 38). Lessing en arrive ainsi à l'argument suivant : « *pour donner à une conclusion symbolique générale toute la qualité dont elle est capable... nous devons la réduire au particulier afin de la connaître intuitivement* » (ibid.).

Cette réduction au particulier joue un rôle tout à fait essentiel dans le mécanisme à la fois épistémologique et cognitif de la fable, comme le montre cette autre citation de Lessing travaillée par Cartwright : « le général existe seulement dans le particulier et peut seulement devenir visualisable (anschauend) dans le particulier » (ibid.). Il s'agit bien de comprendre, ici, que la fable ne constitue pas une allégorie : dans la fable étudiée, la martre ne ressemble pas au plus faible, elle est la faible du renard, comme elle est la forte de la grouse.

Cartwright résume alors comme suit l'apport de Lessing et de sa manière de comprendre les fables :

« *Le compte-rendu (account) de l'abstraction que j'emprunte à Lessing pour décrire comment fonctionnent les théories physiques contemporaines nous procure deux conditions nécessaires. Tout d'abord, un concept qui est abstrait par rapport à un autre ensemble de descriptions plus concrètes ne s'applique jamais sans que l'une des plus concrètes descriptions ne s'applique en même temps. Ce sont ces descriptions qui peuvent être utilisées pour « aménager » (fit out) la description abstraite dans chaque occasion donnée. Deuxièmement, satisfaire la description concrète associée qui s'applique à une occasion particulière correspond à la satisfaction de la description abstraite pour cette occasion* » (ibid., p. 39). Il faut comprendre, dans une telle perspective, qu'on a bien affaire à deux niveaux de description, l'un plus abstrait, l'autre plus concret, qui ne sont pas emboîtés l'un dans l'autre comme peuvent l'être le genre et l'espèce. Cartwright illustre ceci par l'exemple suivant : si l'on me demande ce que j'ai fait ce matin, je peux dire « *j'ai travaillé* » ou bien « *j'ai lavé la vaisselle* ». Aucun de ces énoncés n'est réductible à l'autre, en particulier parce que chacun est relié à des jeux de langage et à des formes de vie spécifiques (ceux relatifs au mot *travail* et ceux relatifs à l'expression *laver la vaisselle*).

Cette relation abstrait-concret, au cœur de la fable, est donc aussi au cœur des modèles de la physique et Cartwright va au bout de l'analogie : « *Considérons $F = ma$. Je prétends qu'il s'agit d'une vérité abstraite relative à des assertions à propos des positions, des mouvements, des masses, et des étendues, de la même façon que la morale de Lessing « Les plus faibles sont toujours proies des plus forts » est abstraite relativement aux plus concrètes descriptions qui l'aménagent (fit out). Être soumis à une force d'une certaine intensité, disons F , est une propriété abstraite, comme être plus faible que. La loi de Newton dit que si quelque chose a cette propriété, il en a d'autres, en particulier une masse et une accélération qui, multipliées l'une par l'autre, donnent la valeur numérique déjà mentionnée, F . C'est comme dire que quelqu'un de plus faible sera aussi une proie pour le plus fort* » (ibid., p. 43).

Cartwright en vient ainsi à l'une de ses thèses principales :

« *Force – de même que les divers autres termes de la physique – n'est pas un terme concret dans le sens où l'est un prédicat de couleur. Il est plutôt abstrait, sur le modèle de travail, ou être plus faible que ; et dire qu'il est abstrait signifie pointer qu'il est toujours adossé (piggyback) à des descriptions plus*

⁶ Au sens des Lumières allemandes, est intuitive la connaissance qui provient des idées que nous nous faisons des choses, est figurale (ou symbolique) celle qui provient des signes que nous leur avons substitués. Pour une analyse éclairante des relations entre idées et signes, on peut notamment se reporter à Hacking (1975).

concrètes. Dans le cas de la force, les descriptions plus concrètes sont celles qui utilisent les concepts traditionnels de la mécanique, comme position, étendue, mouvement et masse. La force est alors, *Modélisation : une approche épistémologique selon mon compte-rendu, abstraite relativement à ces concepts de la mécanique ; et étant abstraite, elle peut seulement exister dans des modèles mécaniques particuliers* » (ibid., p. 45).

• **Contexte et machine nomologique**⁷ Est-ce à dire qu'un modèle scientifique est en tout point assimilable à une fable ? Certes non. La fable permet de comprendre la structure logique du modèle qui sous-tend la narration, mais certainement pas d'en saisir la spécificité. Après avoir montré tout le profit, notamment dans la compréhension fine de la relation abstrait/concret, qu'on peut tirer de l'analogie fable = modèle, Cartwright s'emploie à déterminer en quoi un modèle scientifique peut se spécifier. Pour cela, elle forge la notion de « *machine nomologique* », qu'elle définit comme : « *un arrangement (suffisamment) fixe de composants, ou facteurs, avec des capacités (suffisamment) stables, qui, dans une sorte d'environnement adéquat (suffisamment) stable, donnera lieu, au moyen d'opérations répétées, au type de comportements réguliers que nous figurons dans nos lois scientifiques* » (ibid., p. 150).

La centration sur la notion de machine nomologique permet de préciser un aspect fondamental de la relation entre lois, modèles et contextes : il s'agit d'une relation de dépendance mutuelle qui, d'une certaine manière, interdit de penser une loi donnée sans le contexte au sein de laquelle elle est vraie. Décrire une machine nomologique, c'est précisément décrire ce type de relations entre modèle et contexte. Un aspect essentiel de ces relations réside dans les conditions de clôture⁸ (shielding conditions). Par exemple, lorsque Newton établit l'intensité de la force requise pour garder une planète dans une orbite elliptique ($F = -GmM/r^2$), une condition de clôture/protection est cruciale : une orbite elliptique n'est observée que si 2 corps interagissent en l'absence de tout autre corps massif, et de tout autre facteur qui puisse modifier le mouvement.

Nous pouvons d'ores et déjà porter attention au vocabulaire utilisé : celui de « capacités » et de « *comportements* ». C'est en grande partie dans le langage utilisé que Cartwright construit une épistémologie qui lui permet de se dégager du physicalisme, et de relier l'épistémologie de la science à celle de la vie quotidienne. Cartwright montre en effet qu'il existe une parenté étroite entre la notion de capacité qu'on peut attribuer, dans la vie quotidienne, à tel ou tel objet ou telle ou telle personne, et la notion de capacité scientifique qu'elle utilise pour donner corps à la notion de machine nomologique. Penser en terme de capacité, c'est en effet se rendre sensible au fait que tel objet (au sens large) possède un pouvoir, une potentialité⁹, et que la description du comportement de cet objet peut gagner à lui attribuer les potentialités qui sont les siennes. Par exemple, si l'on a affaire à quelqu'un d'irritable, pour reprendre l'exemple utilisé par Cartwright, lui attribuer cette capacité d'irritabilité nous permettra de comprendre – voire de prédire – certains aspects de son comportement qui nous resteront opaques si nous ne le faisons pas.

Cependant, élaborer une telle parenté entre les capacités quotidiennes et les capacités scientifiques ne signifie nullement les assimiler.

En effet, « les modèles nous fournissent un ensemble de composants et leur arrangement », et le rôle de la théorie consiste à nous dire « comment les capacités sont exercées ensemble ». Mais pour cela, il faut saisir que « *les capacités déployées dans les modèles que nous construisons dans les sciences exactes différeront des capacités auxquelles nous référons dans la vie de tous les jours* » (ibid., p. 53). Pour mettre cela en évidence, Cartwright compare deux types de capacités, celles qu'on obtient en disant de quelqu'un qu'il est irritable, d'une part, et celles, d'autre part, qu'on peut voir à l'œuvre dans une machine nomologique (l'exemple choisi étant la loi de Coulomb).

⁷ L'adjectif nomologique réfère au grec nomos, qui signifie loi. Une machine nomologique, c'est donc une machine à produire des lois, ou à illustrer des lois.

⁸ On pourrait également traduire shielding condition par « *condition d'enceinte* ».

⁹ La conception de l'action humaine en terme de capacité prend sa source dans Aristote et dans sa notion de dynamis (la potentia latine) qu'on a traduit par puissance, potentialité, tendance, ou capacité.

Elle distingue trois différences marquantes. La première est la suivante : au-delà du fait que ces deux types de capacités sont « *hautement génériques* » et « *donnent naissance à une grande variété de comportements* », c'est la relation entre la capacité et ses manifestations qui constitue un enjeu important de l'activité scientifique : « *une part du travail (job) de la science consiste à trouver les connexions systématiques qui existent et à construire une méthode enseignable¹⁰ pour les représenter* » (ibid., p. 54).

La seconde différence entre une capacité de la vie quotidienne et une capacité scientifique comme la loi de Coulomb réside dans le fait que cette dernière possède une « *forme fonctionnelle exacte et une force précise, qui sont contenues dans sa loi particulière elle-même* » (ibid.). La troisième différence tient au fait que « *nous connaissons certaines lois explicites relatives à la manière dont la capacité de Coulomb se combinera avec d'autres, décrites par différentes lois de force, pour affecter les mouvements des particules chargées* » (ibid.).

On le voit, considérer les modèles scientifiques sous la description des capacités ne consiste pas à les banaliser dans un relativisme oublieux de leur spécificité et de leur puissance.

Il s'agit bien plutôt d'utiliser certaines notions du quotidien (comme celle, précisément, de capacité) et les conceptualisations qu'elles permettent afin de se rendre mieux capable, précisément, d'identifier ce qui fait cette spécificité et cette puissance.

• **Machines nomologiques, capacités, langage**

Les machines nomologiques qui sont ainsi décrites nous font donc comprendre comment l'activité scientifique permet d'obtenir une vérité contextuelle. Dans la même perspective, le fait de penser les modèles et les lois en termes de capacités et de comportements fournit les moyens d'établir un certain type de continuité entre l'épistémologie du quotidien et l'épistémologie scientifique, tout en identifiant avec précision certains éléments de rupture entre les deux types d'épistémologie¹¹.

Il s'agit donc, nous dit Cartwright, de voir la science comme connaissance de capacités, et non comme connaissance de lois. Et, ajoute-t-elle, « *quand nous refusons de reconstruire notre connaissance comme connaissance de capacités, nous dénisons beaucoup de ce que nous savons et nous transformons la plupart de nos meilleures inventions en pures devinettes. Ce qui est important à propos des capacités est leur ouverture (open-endedness) : ce que nous savons à leur propos suggère des stratégies plutôt que des conclusions déjà écrites* » (ibid., p. 59). Cartwright montre en particulier qu'une capacité ne saurait être assimilée à une disposition, en ceci que les termes des dispositions, usuellement, sont liés un par un à des régularités type-loi (law-like regularities). Une manière de s'en persuader peut être de considérer (de nouveau) la loi de Coulomb ($F = -q_1 q_2 / 4\pi\epsilon_0 r^2$, pour 2 particules de charge q_1 et q_2 , séparées par une distance r). Que nous dit « *la loi de Coulomb à propos des mouvements de la paire de particules. Elle ne nous dit absolument rien. Avant qu'un mouvement quelconque ait pu être fixé, les particules doivent être placées dans un environnement adapté ; précisément le type d'environnement que j'ai décrit comme une machine nomologique. Sans cet environnement spécifique, aucun mouvement n'est déterminé* » (ibid., p. 59). Ainsi, poursuit Cartwright, ce que nous pourrions appeler le « *comportement naturel* » pour des charges opposées est de se déplacer l'une vers l'autre, et pour des charges similaires, de se repousser. Mais ceci ne constitue nullement un effet in abstracto. On peut même imaginer, nous montre l'auteur, des environnements au sein desquels « *la répulsion entre 2 particules négativement chargées les amène à se rapprocher* » (ibid.). Ce qui différencie une capacité, dans son ouverture, d'une disposition, c'est bien le fait « *qu'elle donne naissance à des comportements hautement variés* », alors que les dispositions sont « *usuellement liées à des manifestations uniques* » (ibid., p. 64). Corrélativement, le langage pour nommer

¹⁰ Où l'on perçoit comment l'activité scientifique comporte une dimension didactique organique dès ses premiers moments

¹¹ La question centrale du rapport épistémologique entre « le sens commun » et la « pensée scientifique » peut être alors repensée dans une dialectique entre rupture et continuité qui permet de réunir les apports de Bachelard et de Dewey - sur ce dernier point, cf. Fabre (2005).

les capacités reflète cette ouverture, avec un degré de spécificité de plus en plus grand lorsqu'on va de la capacité générale à la manifestation spécifique¹².

1.2 .Modèle et style de pensée

Les considérations qui précèdent veulent contribuer à la caractérisation des modèles et du processus de modélisation en ce qu'ils sont spécifiques aux sciences. Il nous paraît important de dégager également des dimensions génériques au processus de catégorisation lui-même. Pour faire cela, nous allons tout d'abord mettre l'accent sur des éléments toujours spécifiques à la modélisation scientifique, mais dont les conséquences nous paraissent importantes dans la perspective d'une compréhension plus large du processus de modélisation. Nous aborderons ensuite la question du style de pensée.

• Modèle et référence : le holisme du modèle

Un modèle scientifique, si on le considère comme l'épure d'une machine nomologique, ne peut se comprendre indépendamment d'un arrière-fond nécessaire à son appréhension. Cet arrière-fond peut se décrire à différents niveaux de spécificité : pour comprendre la loi de Newton, par exemple, il est nécessaire et, on l'a vu, non suffisant de partager un certain nombre de connaissances conceptuelles (par exemple la notion de force, de masse, d'accélération). Mais il faut également disposer de notions beaucoup plus communes, comme celle d'égalité, et celles de multiplication¹³. Au-delà, ce sont les notions d'action, de réaction et d'objet qui doivent être appropriés, d'une manière à la fois voisine du sens commun, mais aussi différente, le sens commun fournissant une sorte de base première redéfinie dans l'usage de la loi¹⁴. Si l'on considère les choses encore plus génériquement, on se persuadera qu'un nombre quasi-infini de connaissances, aucunement spécifiques du modèle, sont tout de même nécessaires aux opérations de catégorisation sur lesquelles le modèle repose. Nous désignons par holisme du modèle cette dépendance du spécifique du modèle au générique d'objets et d'opérations de pensée cristallisées dans le langage. Dès que l'on considère un modèle dans son usage effectif, on prend conscience d'un très grand nombre de nécessités dont beaucoup, même triviales, conditionnent son application.

• Style de pensée

L'usage d'un modèle doit donc se penser d'une manière holistique, en appui sur des catégories générales qui tiennent au sens commun tel qu'il est déposé dans le langage. Mais cette dépendance doit être précisée. Pour cela, il nous semble décisif de prendre conscience que ce sens commun est, pour une grande part, lui-même spécifique au domaine de pensée dans lequel le modèle est en usage.

Modélisation : une approche épistémologique

Pour expliciter cela, Fleck (1934/2005) a créé le concept de style de pensée. Dans Genèse et développement d'un fait scientifique, sur l'exemple de l'emploi de la réaction de Wassermann¹⁵ dans

¹² Cartwright reprend ici la distinction produite par le philosophe anglais G. Ryle (1949) entre les verbes référant à des « dispositions hautement génériques » (les capacités selon Cartwright), et les verbes référant à des « dispositions hautement spécifiques » (les dispositions selon Cartwright). On peut décrire le travail d'un pêcheur en disant qu'il pêche (disposition spécifique), mais pas le travail d'un épicier en disant qu'il fait de l'épicerie (on dira plutôt qu'il coupe du jambon, ou qu'il emballe telle nourriture, etc.), précisément parce que le travail d'épicerie renvoie à une disposition « hautement générique », c'est-à-dire une capacité selon Cartwright. Notons que cette distinction n'est nullement absolue, mais relative, ce qui nous semble le propre de la distinction générique/spécifique.

¹³ Notions certes plus communes mais qui doivent être, d'une certaine manière, revisitées dans leur emploi au sein de la loi de Newton.

¹⁴ Tiberghien et al. (2005) montrent ainsi comment les termes d'action ou d'objet, en mécanique, sont à la fois en lien étroit avec le sens commun (si l'on ne connaît pas le sens commun du mot « action » ou du mot « objet », on n'a aucune chance de pouvoir décrire correctement un système mécanique) et en rupture avec le sens commun (puisque l'on va pouvoir parler de l'objet « terre », ou de « l'action du stylo sur la table »), dans un jeu de langage spécifique dont l'appréhension va éventuellement constituer un obstacle pour les élèves.

¹⁵ La réaction de Wassermann est un test, pratiqué depuis le début du XXe siècle, pour diagnostiquer la syphilis. Elle utilise l'identification de l'antigène d'un microbe dans le sérum d'un malade.

l'étude de l'histoire de la syphilis, Fleck montre qu'on ne saurait appréhender le concept moderne de syphilis sans comprendre sa genèse et ce qu'elle doit aux conceptions anciennes et mythiques, de la maladie – par exemple le fait qu'être malade de la syphilis suppose un « *sang gâté* ». La dépendance du modèle scientifique aux conceptions plus larges et plus populaires est ainsi patente. Fleck montre également, avec des accents annonciateurs du paradigme khunien¹⁶, comment le style de pensée s'arc-boute nécessairement à un collectif de pensée : à partir des découvertes scientifiques, « *se constitue un système de faits universellement interconnectés, maintenant son équilibre grâce à des interactions continuelles. Cet entrelacs serré confère au « monde des faits » une constance massive et éveille le sentiment d'une réalité fixe, de l'existence indépendante d'un monde... Nous appelons le « porteur » communautaire du style de pensée : le collectif de pensée. Le concept de collectif de pensée, suivant l'usage que nous en avons fait pour analyser le conditionnement social de la pensée, n'équivaut pas à un groupe fixe ou à une classe sociale. C'est pour ainsi dire un concept plus fonctionnel que substantiel, comparable par exemple au concept de champ de force en physique*¹⁷... » (Fleck, 1934/2005, p. 179). Ces collectifs de pensée et styles de pensée peuvent concerner des collectifs très restreints (jusqu'à deux individus seulement), « entre lesquels il se crée un état d'esprit particulier qui, sinon, n'affecterait aucun des participants et qui très souvent revient à chaque fois que les personnes concernées se rencontrent » (ibid., p. 180). Mais leur force tient à ce qu'ils caractérisent avant tout les institutions¹⁸ : « *outre ces collectifs de pensée momentanés, produits par hasard, il existe des collectifs de pensée stables ou comparativement stables : ces derniers se constituent en particulier autour de groupes sociaux organisés. Si un groupe social important existe depuis suffisamment longtemps, alors un style de pensée se fixe et devient une structure formelle. L'exécution pratique prend alors le pas sur l'état d'esprit créatif qui s'abaisse à un niveau fixe, discipliné, uniforme et discret. La science actuelle, en tant que structure spécifique de collectifs de pensée se trouve dans cette situation* » (ibid.).

On le voit, un style de pensée constitue donc une structure formelle fonctionnelle qui, selon Fleck, affecte quasi-inexorablement tout collectif suffisamment stable. Cette structure est formelle en tant qu'elle constitue une théorie du monde ; elle est fonctionnelle en tant qu'elle est, à la fois, condition et résultat de l'activité collective. Une telle conception du style de pensée pourrait toutefois donner lieu à un intellectualisme très éloigné des préoccupations de Fleck.

• Style de pensée et perception

Pour s'éloigner de cet intellectualisme, dans lequel le style de pensée apparaît comme un système de conceptions en partie détaché du réel, nous pouvons en venir à la définition que donne Fleck : un style de pensée est caractérisé par « *la disposition pour une perception dirigée et pour une assimilation conforme de ce qui a été perçu* » (ibid., p. 247). C'est dire que parler de style de pensée, c'est d'abord envisager en quoi c'est la perception même, au sens premier du terme, qui est affectée par la cognition et

¹⁶ Il est intéressant de constater que Kuhn a rédigé la préface de l'édition anglaise du livre de Fleck. Latour, quant à lui, dans la postface à l'édition française, conteste ce type de filiation en affirmant que « rien dans la succession des paradigmes, des anomalies, puis des révolutions, ne correspond à la complexité du scénario imaginé par Fleck pour rendre compte de l'innovation en science... Kuhn a, si l'on peut dire, rationally et profondément désocialisé ce que Fleck avait inventé. Passer du style collectif au paradigme, c'est vider l'événement de pensée de toutes ces interactions, en faire une banale épistémé à la manière de Foucault » (Latour, in Fleck, 1934/2005, p. 260). Il est édifiant de lire dans la préface de Kuhn que celui-ci reproche précisément à Fleck d'osciller entre une vue psychologisante du collectif de pensée et une vue sociologique qui rend effectivement compte de la contrainte logique qu'exerce le collectif : « ce que le collectif de pensée fournit à ses membres est donc quelque chose de proche des catégories kantienne, prérequis à toute pensée. L'autorité d'un collectif de pensée est donc plus logique que sociale, même s'il elle n'existe pour l'individu que par la vertu de son introduction dans un groupe » (Kuhn, in Fleck, 1934/1979). La pensée de Kuhn n'est donc pas « désocialisante », comme le pense Latour, mais elle essaie au contraire de mettre au jour en quoi le social produit des contraintes logiques, dans une acception de ce dernier terme qui n'est pas celui de la logique mathématique, mais celui de la grammaire des pensées et des actions au sens de Wittgenstein (1953/2004). Il nous semble, pour notre part, que c'est exactement le projet de Fleck que de montrer en quoi le style de pensée, socialement produit, fonctionne comme une sorte d'a priori kantien. Cf. infra

¹⁷ On perçoit ici ce que Fleck semble devoir aux conceptions relationnelles de l'activité scientifique telle qu'elles ont été dégagées par Cassirer (1914/1977).

¹⁸ En donnant à ce dernier terme le sens de « groupe social légitimé », à la manière de l'anthropologue britannique Mary Douglas (1987/1999, 1996), pour laquelle le livre de Fleck a constitué une référence constante (son livre de 1996 étant expressément intitulé *Thought Styles*).

l'affecte en retour¹⁹. Fleck peut ainsi déclarer : « *La perception visuelle directe d'une forme (gestalt) demande d'être expérimentée dans un domaine de pensée particulier : ce n'est qu'après de nombreuses expériences²⁰, éventuellement après avoir reçu une formation, que l'on acquiert la capacité de remarquer directement des sens, des formes, et des unités fermées sur elles-mêmes. Il est vrai que dans le même temps on perd la capacité de voir ce qui est en contradiction avec ces formes. Une telle disposition pour une perception dirigée constitue cependant l'élément principal du style de pensée* » (ibid., p. 161). Le livre de Fleck est ainsi plein d'exemples saisissants dans lesquels il est patent que les systèmes sémiotiques de représentation (anatomiques, par exemple) ne peuvent être fidèles à la nature : même les bonnes images « sont travaillées de façon à être explicites, toutes sont schématiques, symboliques presque, toutes sont fidèles non pas à la nature mais à la théorie... Dans la science, tout comme dans l'art ou dans la vie, il n'y a pas d'autre fidélité à la nature que la fidélité à la culture » (ibid., p. 66). On perçoit donc que tout modèle, dès l'instant où il s'exprime sur l'arrière-fond d'un style de pensée, suppose ce que Fleck appelle une « *harmonie des illusions* » ou une « *harmonie intrinsèque du style de pensée... laquelle engendre une applicabilité des résultats scientifiques et la croyance ferme en une vérité qui existerait indépendamment de nous mêmes* » (ibid., p. 153).

Penser le modèle sur l'arrière-fond d'un style de pensée, c'est donc à la fois le considérer dans sa vertu productive de faits et de relations en tant qu'épure d'une machine nomologique reconnue dans un collectif de pensée, dans sa vertu productive d'une perception dirigée à travers cette machine nomologique par ce collectif de pensée, et dans sa vertu inhibitrice d'autres faits et d'autres relations au sein de l'harmonie intrinsèque à un style de pensée.

1.3. Modèle et expérimentation

Penser le modèle dans un style de pensée nous amène donc à concevoir la perception, et donc l'observation, en lien avec un collectif de pensée. C'est dans la perception même, pour réunir Cartwright et Fleck, que nous effectuons ce passage de l'abstrait au concret que Cartwright désigne comme le propre de la fable ou du modèle. Une lecture (trop) rapide de Fleck pourrait laisser penser, dans une sorte de kantisme primaire, que nous ne pouvons observer que ce que nous avons dans la tête. Mais il semble que l'étude effective de la science en train de se faire montre une relation matériellement beaucoup plus complexe, dans laquelle à la fois, d'une part, la théorie contraint la nature même des observables et des systèmes sémiotiques qui en réalisent l'inscription (force de l'abstrait) et, d'autre part, les phénomènes produits par les instruments atteignent à une certaine autonomie qui agit en retour sur la théorie (force du concret). Nous allons développer rapidement ce point en utilisant une étude de Hacking (1983/1989).

• Expérimentation, théories et instruments

Hacking commence la seconde partie de son livre *Concevoir et expérimenter* par une réévaluation de l'importance de l'expérimentation dans la science. Il y pose ainsi la question : « *Une expérience n'a-t-elle de sens que dans la mesure où elle contribue à vérifier une hypothèse ?* » (Hacking, 1989, p. 253). La réponse de Hacking est complexe, reposant sur la description d'un grand nombre d'exemples et sa discussion nous amènerait hors du cadre de cet article, mais on peut la résumer par les lignes suivantes : « Certains travaux expérimentaux de grande portée proviennent intégralement de la théorie. Certaines théories fondamentales doivent tout aux expériences qui les précèdent. Certaines théories stagnent par manque de prise sur le réel, alors que certains phénomènes expérimentaux restent sans emploi par manque de théorie. On rencontre aussi des "*familles heureuses*" où théories et expériences de divers

¹⁹ Ici, on voit comment, Fleck rompt avec ce que le logicien et philosophe américain Hilary Putnam décrit comme « une idée désastreuse qui hante la philosophie occidentale depuis le XVII^e siècle, l'idée que la perception implique une interface entre l'esprit et les objets "extérieurs" que nous percevons » (Putnam, 1999, p. 43). Cette rupture avec la perception comme (simple) interface est sans doute proche de la notion moderne d'affordance (Gibson, 1986 ; Norman, 1988 ; Beauvois & Dubois, 2000) à condition de dégager cette dernière de la connotation biologiste qui lui est souvent attachée, pour reconnaître ce que les affordances doivent aux catégories socialement constituées.

²⁰ Nathalie Jas, la traductrice du livre de Fleck, précise que le mot expérience doit s'entendre ici au sens « *d'événement vécu susceptible d'apporter un enseignement* ». Cette notion particulière d'expérience est probablement décisive dans le système conceptuel de Ludwick Fleck

*horizons s'harmonisent*²¹ » (ibid., p. 260). Cette réponse profondément nominaliste, où abonde l'adjectif « certain (some) », aboutit à l'assertion suivante : «... je ne prétends pas que le travail expérimental pourrait exister sans la théorie. Cela reviendrait à travailler à l'aveuglette comme les "purs empiristes" dont se moquait Bacon. Reste ce fait que, généralement, la plupart des recherches vraiment fondamentales précèdent toute théorie pertinente²² » (ibid., p.260). Il s'agit donc, en fait, non de contester l'importance de la théorie dans la science, mais de rétablir l'équilibre en faveur de l'expérience, en contestant une philosophie des sciences « dominée par la théorie », et en admettant que « l'expérimentation mène parfois sa vie propre » (ibid., p. 347).

Une manière radicale de limiter cette domination consiste à réévaluer l'importance des instruments dans les sciences²³. L'exemple du microscope apparaît tout à fait édifiant, pour lutter contre la conception idéaliste selon laquelle on n'observe que ce que la théorie permet de voir²⁴. Hacking montre ainsi que des microscopes reposant sur des théories et donc des phénoménotechniques différentes (par exemple la micrographie fluorescente et la micrographie électronique) peuvent être utilisés pour détecter des corps et prouver ainsi que les configurations visuelles identifiées ne constituent pas des artefacts. Cela ne constitue pas seulement un plaidoyer pour une forme mesurée de réalisme épistémologique (les phénomènes que nous observons ont une existence en soi). Il s'agit surtout de comprendre que les instruments produisent des mondes spécifiques sans la fréquentation desquels (fréquentation répétée et insistante) aucune théorie ne saurait durablement se dégager. On peut alors arguer avec Hacking, en prenant l'exemple de l'étude de la cellule : « En ce qui concerne la cellule, notre conviction ne provient pas d'une théorie à haute puissance déductive, une telle théorie n'existe pas, mais d'un grand nombre de généralisations solidaires et de faible portée nous permettant de contrôler et de créer des phénomènes avec le microscope. En bref, nous apprenons à nous déplacer dans le monde microscopique » (ibid., p. 338). Les instruments, par le fait qu'ils créent un « monde de phénomènes » dans lequel nous pouvons agir, produisent ainsi un milieu, partiellement indépendant des théorisations, et causalement contraignant.

• La fourmi, l'araignée et l'abeille

Pour penser les relations entre expérience et théorie, Hacking entreprend une réévaluation de Bacon, en commentant la métaphore fameuse de ce dernier : « L'expérimentateur est comparable à une fourmi, il se contente de ramasser et d'utiliser ; le raisonneur ressemble à l'araignée qui tisse sa toile à partir de sa propre substance. Mais l'abeille choisit une voie médiane : elle rassemble le matériau provenant des fleurs sauvages et cultivées, mais c'est pour le digérer et le transformer par un pouvoir qui lui est propre. Assez comparable à cela est le vrai travail de la philosophie, car elle ne dépend pas uniquement ou principalement des pouvoirs de l'esprit, pas plus qu'elle ne prend le matériau provenant de l'histoire naturelle et des expériences de mécanique pour le déposer tel quel dans la mémoire, mais plutôt elle le dépose dans la compréhension, digéré et transformé ». « Par conséquent », continue Bacon, « des liens plus intimes et plus purs entre ces deux facultés, l'expérimentale et la rationnelle, on peut attendre beaucoup (et à un point qui n'a jamais été atteint) » (Bacon, cité par Hacking, ibid., p. 397).

L'idée centrale, pour Bacon et pour Hacking, c'est que « réduite à elle-même », chaque catégorie (« l'expérimentale » et la « rationnelle ») produit peu de connaissance. Hacking poursuit : « Qu'est-ce qui caractérise la méthode scientifique ? C'est sans doute qu'elle met ces deux aptitudes en contact au moyen

²¹ Hacking donne alors en exemple la découverte expérimentale, en 1965, des radioastronomes Penzias et Wilson, qui mirent en évidence un « phénomène absurde » et pourtant « bien réel » : « une petite quantité d'énergie, présente partout, uniformément répartie dans tout l'espace ». Alors que « l'idée d'une radiation de fond complètement homogène leur semblait absurde... un groupe de théoriciens de Princeton fit circuler un texte suggérant, chiffres à l'appui que si l'univers est issu du Big Bang, alors il doit y avoir une température uniforme partout présente dans l'espace, la température résiduelle de la première explosion » (ibid., p. 261). Exemple typique de « famille heureuse » où expérimentation et théorisation, produites indépendamment l'une de l'autre, s'épaulent mutuellement.

²² Traduction française un peu modifiée par nous-mêmes, Hacking écrit : « It remains the case, however, that much truly fundamental research precedes any relevant theory whatsoever » (Hacking, 1983, p. 158).

²³ On est alors dans la perspective bachelardienne de phénoménotechnique (cf. infra, paragraphe 1.4).

²⁴ Ce qui est fort différent de l'idée de Fleck selon laquelle il n'est pas de systèmes sémiotiques indépendants d'une théorie.

d'une troisième, que j'ai appelé « articulation » et « calcul »²⁵ [...] Le fait remarquable à propos de la physique nouvelle est qu'elle crée une nouvelle entité humaine collective en donnant libre cours à trois intérêts humains fondamentaux, la spéculation, le calcul, et l'expérience. En engageant ces trois intérêts à collaborer, elle leur apporte une richesse dont ils auraient été autrement privés » (ibid., p. 398-399).

On arrive ainsi, par un autre chemin, à un carrefour atteint par Cartwright : une machine nomologique est précisément le lieu de convergence réel de ces trois aptitudes, puisqu'elle permet, dans la clôture/protection de l'enceinte expérimentale, de convertir la forme abstraite de la loi en capacités et comportements qui actualisent ce que Hacking nomme « articulation ».

• Qu'est-ce qu'une représentation ?

Avant d'en venir à tenter un positionnement épistémologique et didactique de l'ensemble de ce qui précède, nous voudrions terminer par quelques considérations relatives à la notion de représentation. L'ensemble des lignes qui précèdent, on l'aura compris, tente de faire admettre une vision de la science plus proche à la fois de l'expérimentation et de l'expérience effective, et une conception des modèles et de l'activité de modélisation plus dépendante de la matérialité réelle de l'activité scientifique. Dans une telle perspective, les systèmes sémiotiques par lesquels cette activité se déploie jouent un rôle fondamental et la notion de représentation elle-même se dégage du mentalisme qui lui est souvent inhérent²⁶ pour gagner un sens matériel et public. Nous suivrons là encore Hacking : « *Les êtres humains sont des représentateurs. Non pas homo faber, dis-je, mais homo depictor. Les humains produisent des représentations... Les humains créent des simulacres (likenesses). Ils peignent des tableaux, imitent le caquetage de la poule, modèlent l'argile, façonnent le cuivre. Telles sont quelques-unes des représentations qui, dès l'origine, caractérisent les êtres humains. Le mot "représentation" a un lourd passé philosophique. On s'en est servi pour traduire le Vorstellung kantien, une chose que l'on place devant l'esprit, un mot, qui désigne à la fois des images et des pensées abstraites. Kant avait besoin d'un terme pour remplacer la notion d'"idée" des empiristes anglais et français. Ce que j'entends par «représentation» est exactement l'inverse de l'acception kantienne. On ne peut pas toucher une idée lockienne, mais seul un gardien de musée peut nous empêcher de toucher quelques-unes des premières représentations produites par nos ancêtres. Selon Kant, un jugement est la représentation d'une représentation, la mise devant l'esprit d'une mise devant l'esprit, doublement privée. C'est donc doublement ce que je n'appelle pas une représentation. Mais pour moi sont aussi des représentations certains événements qui n'impliquent pourtant que le verbe²⁷. Je ne fais pas allusion aux simples phrases déclaratives, qui ne sont sûrement pas des représentations, mais plutôt aux spéculations compliquées qui tentent de fournir une représentation de notre monde » (ibid., p. 221).*

Gagner, comme le fait Hacking, un sens matériel et public aux représentations entre en consonance avec une conception de la science dans laquelle l'activité scientifique se déploie au sein de collectifs de pensée structurant (et structurés par) des styles de pensée. En effet, si la caractéristique première d'un style de pensée, c'est d'organiser la perception, alors la perception la plus décisive qui soit est la perception adéquate de systèmes sémiotiques spécifiques, de ces représentations au sens de Hacking, au moyen desquelles les modèles peuvent à la fois être exprimés, dans les descriptions concrètes qui les spécifient à des situations particulières, et articulés, dans les systèmes formels qui les caractérisent.

1.4. Modèles, styles de pensée, expérimentation : positionnement épistémologique, positionnement didactique

• Un nouvel empirisme

²⁵ Hacking produit, pour la notion d'articulation et de calcul, la définition suivante : « par « calcul », je n'entends pas un simple alignement de chiffres, mais l'altération mathématique d'une hypothèse donnée qui se trouve ainsi en résonance plus intime avec le monde » (ibid., p. 345).

²⁶ Sur cette question, cf. notamment Sensevy (2002).

²⁷ Hacking écrit ici « some public verbal events can be representations » (Hacking, 1983, p. 133).

Il nous semble pouvoir trouver dans les lignes qui précèdent une conception épistémologique cohérente, à laquelle on pourrait associer des épistémologues comme Cartwright, Fleck ou Hacking, mais aussi un historien d'art comme Baxandall (1991), dans la lignée de la philosophie anglaise ou du pragmatisme américain. Les liens que l'on peut établir entre ces auteurs ne sont d'ailleurs pas le fruit de cette seule étude, et de loin. En effet, Cartwright et Hacking, tous deux un temps enseignants à Stanford, reconnaissent une mutuelle filiation à l'école de Stanford, dans laquelle on peut notamment ranger le philosophe de la biologie John Dupré. Cartwright écrit ainsi dans *The dappled word* : « Ce livre est nettement dans la tradition de l'école de Stanford et est profondément influencé par les philosophes des sciences avec lesquels j'ai travaillé là-bas. Ceci commença avec le pragmatisme de Patrick Suppes et le genre de chose qu'il a articulées dans *Probabilistic Metaphysics*. Puis il y eut Ian Hacking, John Dupré, Peter Galison et, pour une année, Margaret Morrison » (Cartwright, 1999, p. ix). Hacking, quant à lui, souligne dans les remerciements de son ouvrage (*Concevoir et Expérimenter*, op. cit.) l'étroite parenté entre ses conceptions et celles de Cartwright : « Le présent ouvrage fut conçu alors que Nancy Cartwright, du département de philosophie de l'Université de Stanford, travaillait sur son propre livre, *How the Laws of Physics Lie*. Nos deux livres ont plus d'un point commun... Nous ne partons pas des mêmes postulats anti-théoriques car elle considère les modèles et les approximations alors que c'est surtout l'expérience qui m'intéresse, mais nos conceptions convergent » (Hacking, 1983/1989, p. 9)²⁸. Une telle tradition épistémologique trouve dans Ludwick Fleck un prédécesseur décisif : Hacking consacre ainsi une partie importante de son cours au Collège de France 2005-2006 à reprendre et travailler le concept de style de pensée (*Denkstil*) tel que Fleck nous l'a légué.

Cette conception cohérente pourrait, d'une certaine manière, être considérée comme un nouvel empirisme. Il s'agit d'un empirisme, nous l'avons dit, au double sens où l'accent est mis sur le rapport particulier que la science entretient avec l'expérimentation et sur l'étude effective de la science en action. Un empirisme renouvelé, notamment au plan philosophique, dans le sens où s'il s'agit toujours de réhabiliter l'expérience, mais dans un rapport nouveau entre celle-ci et la conceptualisation. La perception n'est plus conçue comme une interface entre le concept et la réalité (dans la conception cartésienne sous-jacente à l'identification des sensations telle qu'elle fut produite par Locke et Hume), mais comme indissolublement liée au concept. Cette conception, présente chez les trois auteurs abordés ici, suppose un lien particulier entre le concret et l'abstrait : l'abstrait (de la catégorie d'observation ou du modèle) permet le concret, mais il ne tire son sens que de son actualisation dans ce concret, d'où l'importance corrélatrice, pour l'activité scientifique, notamment dans l'instrumentation, de l'activité créative²⁹ de caractérisation/production des contextes. Cet empirisme renouvelé est donc un contextualisme.

• Une esquisse de positionnement épistémologique

Cette conception spécifique pourrait être caractérisée en référence à d'autres épistémologues importants, mais ce serait le sujet d'un autre article, et au-delà, d'un ouvrage. Toutefois, pour initier une telle perspective, on pourrait désigner deux types de relations.

²⁸ Cartwright écrit ainsi dans *The dappled word* : « Ce livre est nettement dans la tradition de l'école de Stanford et est profondément influencé par les philosophes des sciences avec lesquels j'ai travaillé là-bas. Ceci commença avec le pragmatisme de Patrick Suppes et le genre de chose qu'il a articulées dans *Probabilistic Metaphysics*. Puis il y eut Ian Hacking, John Dupré, Peter Galison et, pour une année, Margaret Morrison » (Cartwright, 1999, p. ix). Hacking, quant à lui, souligne dans les remerciements de son ouvrage (*Concevoir et Expérimenter*, op. cit.) l'étroite parenté entre ses conceptions et celles de Cartwright : « Le présent ouvrage fut conçu alors que Nancy Cartwright, du département de philosophie de l'Université de Stanford, travaillait sur son propre livre, *How the Laws of Physics Lie*. Nos deux livres ont plus d'un point commun... Nous ne partons pas des mêmes postulats anti-théoriques car elle considère les modèles et les approximations alors que c'est surtout l'expérience qui m'intéresse, mais nos conceptions convergent » (Hacking, 1983/1989, p. 9)

²⁹ Dans son troisième cours (*Méthodes de raisonnement*) au collège de France (2006), Hacking insiste sur cet aspect créatif en revenant sur son livre *Concevoir et expérimenter* : « Les chercheurs, au laboratoire, ne font pas qu'observer le monde : ils changent le monde, ils interviennent dans le cours de la nature... Dans un laboratoire on crée des phénomènes. Des phénomènes qui n'avaient pas d'existence avant leur création par les chercheurs. C'est pourquoi le titre de la deuxième partie de mon livre n'est pas *Expérimenter*, comme dans la traduction française, mais *Intervenir*, qui est plus fort ». On saisit la parenté forte avec la phénoménotechnique bachelardienne (cf infra).

Tout d'abord, en référence à Popper (notamment 1934/1973, 1963/1985), on pourrait dire que le nouvel empirisme, auquel nous faisons allusion ici, échappe aux apories de l'induction que Popper a mise en évidence. Contre les empiristes anglais (particulièrement Hume), Popper a montré que la connaissance ne peut être directement issue des sens et des seuls énoncés d'observation que les sens permettent de produire. On l'a vu, la conception de la perception et de l'expérience soustendue en particulier par les travaux de Fleck dépasse largement cette conception de l'empirisme classique, puisque dans le processus de perception s'enchevêtrent organiquement percepts et concepts. Comme le remarque Armengaud (2003), pour Popper « *l'essentiel... n'est certes pas de fonder les sciences... Il faut abandonner la métaphore de "l'édifice" de la connaissance tout comme la quête de la certitude et la recherche du point de départ adéquat. Nous sommes bien plutôt "embarqués", et la métaphore la plus apte à décrire notre situation cognitive serait celle qu'offre O. von Neurath : il faut réparer le bateau en pleine mer et au coup par coup* ». On perçoit ici comment peuvent se rejoindre l'épistémologie popperienne et les conceptions explicitées dans cet article, dans une sorte de pragmatisme scientifique, anti-fondationnaliste³⁰ : la métaphore sollicitée par Armengaud commentant Popper (le bateau de Otto von Neurath) est celle-là même qu'utilise Cartwright dans son ouvrage. Cela dit, la convergence que nous soulignons ici ne doit pas occulter de réelles divergences, dont deux qui nous semble importantes.

La première réfère à la centration forte de Popper, en particulier dans ses premiers livres, sur la théorie. Hacking (2006) cite ainsi les phrases suivantes de Popper : « *Le théoricien pose certaines questions déterminées à l'expérimentateur et ce dernier essaie, par ses expériences, d'obtenir une réponse décisive à ces questions-là et non à d'autres... [L'expérimentateur] lui-même n'a pas pour tâche principale de faire des observations précises ; son travail à lui aussi est pour une large part d'espèce théorique. La théorie commande le travail expérimental de sa conception aux derniers managements en laboratoire* » (Popper, 1934/1973, p. 107). La conception de Hacking et de Cartwright (ainsi, sans aucun doute, que celle de Fleck) n'est pas opposée en général à de telles assertions (Hacking dit même que « *appliqués [aux exemples de la théorie de la relativité et de la théorie quantique], les propos de Popper ne sont pas faux* »), mais elle fait de la description popperienne un cas particulier au sein d'un processus beaucoup plus vaste et bigarré, qui rend justice au fait que comme le dit Hacking (1983/1989), « *les expériences ont leur vie propre* », ou comme le dit Galison (1987/2002), « *les instruments scientifiques ont leur vie propre* ».

On pourrait relever une seconde différence : l'essentiel des thèses que nous avons analysées dans cet article est descriptif, non de la science telle qu'elle devrait être mais de ce qu'elle est effectivement. Contrairement à cela, la tendance de Popper est très souvent normative : « *mon problème est... de défendre ma position selon laquelle la science est la recherche de la vérité par la critique. Ma position est simple : très inventive et critique. Formule ta thèse le plus précisément possible ! C'est une règle normative, non pas une description de l'histoire des sciences, mais un conseil au savant pour améliorer la position de la science !* » (Lorenz & Popper, 1990, p. 71-72).

Cette centration normative, chez Popper, pour précieuse qu'elle soit, semble être relativement absente des travaux étudiés dans cet article.

Une autre référence pourrait être utile ici pour contribuer à initier certains rapprochements conceptuels. C'est la notion bachelardienne de phénoménotechnique qu'il semble utile de convoquer pour cela. On sait que cette notion constitue un élément central pour Bachelard (1934/1991, p. 16-17), et qu'il la définit notamment comme suit : « *Entre le phénomène scientifique et le noumène scientifique, il ne s'agit donc plus d'une dialectique lointaine et oisive, mais d'un mouvement alternatif qui, après quelques rectifications des projets, tend toujours à une réalisation effective du noumène. La véritable phénoménologie scientifique est donc bien essentiellement une phénoménotechnique. Elle renforce ce qui transparaît derrière ce qui apparaît. Elle s'instruit par ce qu'elle construit* ». On perçoit alors le lien étroit qu'on peut établir d'un côté entre la centration sur l'expérimentation et les instruments propre à Hacking ou à Cartwright, ou sur la théorie immanente aux systèmes sémiotiques que Fleck met en

³⁰ En désignant sous ce terme (« fondationnaliste ») une conception de la science où celle-ci permet d'atteindre au fondement même des choses

évidence, et d'un autre côté la phénoménoteknikue bachelardienne. Voir dans ce processus ce que Bachelard appelle « la réalisation effective du noumène » consonne avec ce passage de l'abstrait au concret qui constitue pour Cartwright la raison d'être des modèles, ou avec la notion de « *famille heureuse* » chez Hacking dans laquelle expérimentation, instruments, et théorie marchent de concert. Cette profonde similarité amène à donner un sens fort, dense, à la notion de phénomène et à sa production. Notons toutefois, au chapitre des différences, que là où Bachelard peut voir seulement « *quelques rectifications des projets* », les épistémologues présentés dans cet article identifient une intense activité qui semble constituer pour eux le cœur même de l'activité du savant dans la constitution des machines nomologiques.

• Une esquisse de positionnement épistémologique en didactique

Il peut être utile de prolonger la confrontation avec des travaux épistémologiques directement liés aux perspectives didactiques. Nous évoquerons rapidement, pour cela, plusieurs auteurs, Martinand (1998), Orange (2000), et Tiberghien et Vince (2005).

Si l'on considère dans un premier temps la notion de registre (Martinand, 1998), nous serons amenés à distinguer, avec cet auteur, le registre du « *réfèrent empirique, c'est-à-dire celui des objets, des phénomènes, et de leur connaissance phénoménographique...* » et « *le registre des modèles construits sur ces référents* » (Martinand, 1998, p. 6). On obtient donc une caractérisation à deux niveaux, l'activité didactique consistant en particulier dans la détermination de « *tâches ou problèmes* » impliquant « *des processus de modélisation que les élèves peuvent prendre en charge, en tout ou partie* ». Poursuivant la réflexion, Martinand (ibid.) montre la nécessité d'un troisième niveau, supposant la recherche d'une « *représentation à un niveau plus caché du réel* ». Il nomme ce troisième niveau « *matrice cognitive*³¹ », ce troisième niveau comprenant à la fois « *des paradigmes épistémiques (conceptions de ce que doit être la connaissance, les formes, des "bonnes pratiques" théoriques ou empiriques), et les ressources théoriques (langages, schémas, théories)* » (ibid., p.10).

Orange (2000), pour sa part, retrouve cette nécessité de trois niveaux de registre en caractérisant ce troisième registre comme « *registre explicatif* », ou « *registre des références explicatives* », « *qui donne sens aux explications en contrôlant les formes jugées acceptables* ». Dans ses études sur la notion de milieu intérieur chez Claude Bernard, Orange montre ainsi qu'alors même que l'espace des contraintes de la problématisation du milieu intérieur chez Claude Bernard évolue considérablement sur les deux premiers registres et sur leurs relations, le troisième niveau (les références explicatives) change relativement peu et pourrait continûment être représenté par les significations de « *vitalisme physique* », et de « *déterminisme* ».

Tiberghien et Vince problématisent la question de la modélisation d'une façon un peu différente, puisqu'ils construisent une double distinction : « *celle entre savoir quotidien et savoir de la physique, et pour chacun de ces savoirs celle entre théorie et description en termes d'objets et d'évènements d'une situation matérielle* » (Tiberghien & Vince, 2005, p. 5). Cette approche de la modélisation permet aux auteurs l'interprétation des difficultés des élèves, qui « *portent majoritairement sur l'établissement des liens entre le monde des objets et évènements et le monde de la théorie et des modèles* ».

Comme on le voit, l'ensemble de ces théorisations s'accorde à distinguer dans le processus de modélisation des domaines de la réalité plus ou moins abstraits, chacun de ces domaines devant être à la fois conceptuellement appréhendé et décrit pour lui-même au moyen de formes symboliques spécifiques, et mis en relation avec les autres domaines. L'intérêt des descriptions épistémologiques produites, en particulier à des fins didactiques comme celles que nous venons d'évoquer, nous semble résider spécifiquement dans le fait suivant : c'est à la fois au sein d'un même domaine (registre) et entre les différents domaines que le processus de modélisation s'établit. Ainsi, nous pouvons trouver une continuité réelle entre les conceptions développées par les épistémologues étudiés dans cet article et celles

³¹ « Dans une perspective un peu analogue », nous dit Martinand (ibid.), « à celle des schèmes d'intelligibilité étudiés par J.-M. Berthelot en sociologie (1990) ».

que les didacticiens des sciences ont élaborées. Si le travail essentiel du scientifique consiste à produire des relations entre formes abstraites (idéelles) relativement qualitatives et modèles à la fois plus concrets et mathématiquement articulés à la réalité expérimentale, alors les conceptualisations des didacticiens permettent de situer, à partir des espaces de contraintes (Orange, 2000) qu'ils peuvent déterminer, les directions de travail dans lesquelles doit nécessairement s'engager une didactique de la modélisation.

2. Implications didactiques : premières directions

Tout enseignement suppose une épistémologie, une théorie des connaissances qu'il transmet. Ainsi, on peut diffuser une conception dogmatique des sciences en les enseignant, ou une conception positiviste, relativiste ou sensualiste. La vision des sciences « non-pyramidale » et « non-physicaliste » que nous semblent défendre, chacun à sa manière, Cartwright, Fleck, et Hacking, implique-t-elle en retour une manière particulière de les enseigner ? Nous produirons, pour terminer cet article, certains linéaments de réponse à cette question.

2.1. Les relations entre abstrait et concret : instruments et situations

Les conceptions défendues par Cartwright relativement à la relation abstrait/ concret (et qu'on pourrait synthétiser sous l'analogie modèle/fable) peuvent amener les recherches en didactique à se rendre davantage sensibles au processus de concrétisation et de contextualisation de l'abstrait que peut représenter l'activité scientifique. Il semble admis que dans l'activité scientifique les élèves doivent abstraire, et qu'ils doivent également « mettre la main à la pâte » dans une espèce particulière de tâtonnement expérimental³². Mais peut-être n'a-t-on pas encore pris suffisamment conscience de la nécessité et de la difficulté de cet aménagement de l'abstrait dans un particulier, que Hacking confie à « l'articulation » et Cartwright au fonctionnement de la « machine nomologique ». Cela suppose certainement un rapport didactique particulier aux formalismes mathématiques, dans lesquels le rapport à la référence puisse constituer un objet d'étude en tant que tel. Au-delà des formalismes mathématiques, les relations entre abstrait et concret, c'est-à-dire entre abstrait et particulier, posent la question des conséquences didactiques de ce « nominalisme dynamique » (Hacking, 2005) qui incite à comprendre les catégories dans leur genèse et donc dans la manière dont elles aménagent le monde. C'est l'opération de réduction au particulier qui semble ainsi décisive, et donc la question de sa transposition ou reproblématisation dans la classe.

Si les lois scientifiques sont localement vraies, sans nous permettre directement une explication du comportement des objets du monde, alors l'enseignement des sciences se doit de mettre les élèves en contact avec les modèles interprétatifs et les situations au sein desquelles ces modèles déterminent l'aménagement des lois. Ceci incite à accorder un soin tout particulier à la production des situations didactiques et des dispositifs qui doivent pouvoir produire les rétroactions à partir desquelles les apprentissages des élèves vont se construire. Cette sensibilité très grande des modèles aux situations, aux contextes qui leur donnent sens, et donc aux conditions de clôture/production qui permettent de délimiter ces contextes, nous semble devoir constituer une dimension fondamentale en didactique des sciences. Une telle assomption incite à prendre toute la mesure de la difficulté à construire avec les élèves (et notamment ceux de l'école primaire) des situations dans lesquelles des connaissances, ou pour parler comme Cartwright, des comportements et des capacités soient réellement cristallisés.

2.2. Conceptions versus représentations publiques

Nous pensons que la focalisation sur les représentations, au sens quasi-kantien du terme, qui paraît contemporaine de la naissance même d'une grande partie de la didactique des sciences pourrait être

³² Il faut comprendre que ce « tâtonnement expérimental » présuppose en lui-même un certain style de pensée : « admettre la modélisation d'un volcan avec de la purée et de la confiture ne peut se faire que si on a déjà une connaissance théorique assez élaborée du fonctionnement de ce volcan. Idem pour le rift [en couches de sable coloré] » (Orange, 2002, p. 19). En somme, comprendre le fonctionnement d'un modèle de volcan en purée, c'est déjà faire partie d'un certain collectif de pensée scientifique. C'est une perception orientée par ce collectif de pensée qui permet à celui qui en est membre de reconnaître dans de tels modèles les traits pertinents d'un volcan ou d'un rift.

avantageusement mise au second plan. Ce qui nous semble beaucoup plus déterminant, à la fois pour comprendre les sciences, leur enseignement, et pour aider les professeurs, c'est la centration, comme nous le signifiions au plus haut, sur les instruments et les systèmes sémiotiques au moyen desquels on obtient des représentations publiques des phénomènes étudiés. Pour le dire autrement, c'est la relation entre phénoménographie et phénoménotechnique (Martinand, 1998) qui nous semble ici décisive, et c'est donc la question des systèmes sémiotiques par lesquels nous rendons compte des inscriptions produites par les instruments qui devient majeure. Faire des sciences, c'est nécessairement déchiffrer des systèmes de signes en ayant compris la relation instaurée entre les capacités et comportements agissant sur et dans les instruments et ces systèmes de signes. Penser un dispositif didactique, c'est donc nécessairement penser aussi un système de signes (de symbolisation) et le rapport à construire entre ce système de signes et l'instrument dont il rend compte.

2.3. Collectifs de pensée et styles de pensée

Faire des sciences dans la classe suppose assurément de construire un collectif de pensée spécifique sur l'arrière-fond duquel le travail des élèves et du professeur va prendre corps. Ce collectif de pensée, comme le montre Fleck, se caractérise à la fois par ce qu'il permet, en tant que producteur de la grammaire des actions possibles et nécessaires dans la classe, et par ce qu'il inhibe : le style de pensée issu du collectif est ainsi un « voir comme » (Wittgenstein, 1953/2004) qui suppose l'ignorance de choses non vues parce qu'elle ne participent pas des événements ou des objets pertinents pour ce style. Si le style de pensée est d'abord une disposition à percevoir d'une manière dirigée, alors une question didactique centrale réside dans les modalités concrètes d'inculcation, sur le long terme, d'une telle disposition, et dans la dialectique entre connaissance et ignorance que cette inculcation fait jouer. On perçoit une nouvelle fois le rôle fondamental des instruments et inscriptions associées au moyen desquels professeur et élèves parviendront à des manières communes de percevoir.

Dans une telle perspective, l'enjeu d'enseignement pourra se décrire comme suit : élaborer dans la classe, à partir des rétroactions que les dispositifs mis en œuvre ont produites et dont les systèmes sémiotiques fournissent la représentation, un collectif de pensée dans lequel à la fois le professeur, pour ce qui le concerne, et les élèves, à leur place, assument une réelle responsabilité. La notion de collectif de pensée permet, aussi, de penser la participation des élèves à l'institution didactique. ■

BIBLIOGRAPHIE

- ARMENGAUD J.F. (2003). Popper. Encyclopaedia Universalis. Paris : Encyclopaedia Universalis.
- BACHELARD G. (1934). Le nouvel esprit scientifique. Paris : PUF.
- BAXANDALL M. (1991). Les formes de l'intention. Nîmes : J. Chambon.
- BEAUVOIS J.L. & DUBOIS N. (2000). Affordances in social judgment: experimental proof of why it is a mistake to ignore how others behave towards a target and look solely at how the target behaves. *Swiss Journal of Psychology*, n° 59, p. 16-33.
- BLOOR D. (1982). Sociologie de la logique ou les limites de l'épistémologie. Paris : Éd. Pandore.
- CARTWRIGHT N. (1983). How the laws of physics lie. Oxford : Oxford University Press.
- CARTWRIGHT N. (1999). The dappled world: a study of the boundaries of sciences. Cambridge : Cambridge University Press.
- CASSIRER E. (1914/1977). Substance et fonction. Paris : Éd. de Minuit. DOUGLAS M. (1987/1999). Comment pensent les institutions. Paris : Éd La Découverte. DOUGLAS M. (1996). Thought styles. London : Sage Publications.
- FLECK L. (1934). Genesis and development of a scientific fact. Chicago : The University of Chicago Press.
- FLECK L. (1934). Genèse et développement d'un fait scientifique. Paris : Éd. Les Belles Lettres.
- FABRE M. (2005). Deux sources de l'épistémologie des problèmes : Dewey et Bachelard. *Les sciences de l'éducation pour l'ère nouvelle*, vol. 38, n° 3, p. 53-67.
- GALISON P. (1987/2002). Ainsi s'achèvent les expériences : la place des expériences dans la physique du XXe siècle. Paris : Éd. La Découverte. Gérard Sensevy et Jérôme Santini 186 | aster | 2006 | 43
- GIBSON J.J. (1986). The ecological approach to visual perception. Hillsdale NJ : Lawrence Erlbaum Associates.
- HACKING I. (1975). Why does language matter to philosophy? Cambridge : Cambridge University Press. HACKING I. (1989). Concevoir et expérimenter. Paris : Bourgois. HACKING I. (2005). Façonner les gens II. Paris : Collège de France, 112 p., disponible sur Internet : http://www.college-de-france.fr/site/phi_his/p998922592913.htm (consulté le 6 septembre 2006).
- HACKING I. (2006). Méthodes de raisonnement. Paris : Collège de France, 14 p., disponible sur Internet : http://www.college-de-france.fr/media/phi_his/UPL50860_methodesia3.pdf (consulté le 6 septembre 2006).
- LORENZ K. & POPPER K. (1990). L'avenir est ouvert. Paris : Flammarion.
- LATOUR B. (1995). La science en action. Paris : Gallimard.
- MARTINAND J.-L. (1998). Introduction à la modélisation. In G.-L. Baron & A. Durey. Les technologies de l'information et de la communication et l'actualisation des enseignements scientifiques et technologiques au lycée d'enseignement général et au collège – université d'été. Paris : INRP – ENS Cachan, 12 p., disponible sur Internet : <http://www.inrp.fr/Tecne/Rencontre/Univete/Tic/Pdf/Modelisa.pdf> (consulté le 6 septembre 2006).
- NEURATH, O. (1983). Philosophical papers 1913-46. Dordrecht : Reidel. NORMAN D.A. (1988). The psychology of everyday things. New York, NY : Basic Books.

ORANGE C. (2000). La construction du concept de milieu intérieur par C. Bernard. (Essai d'analyse du point de vue de la construction du problème et de la modélisation). In Orange C. (dir.). *Changer ses connaissances sur le milieu intérieur. Rapport de recherche INRP, IUFM des Pays de la Loire* (coordination nationale, G. Rumelhard).

ORANGE C. (2002). L'expérimentation n'est pas la science. *Cahiers Pédagogiques*, n° 409, p. 19-20.

POPPER K. (1973). *La logique de la découverte scientifique*. Paris : Payot.

POPPER K. (1985). *Conjectures et réfutations*. Paris : Payot.

PUTNAM H. (1999). *The threefold cord. Mind, body, and world*. New York : Columbia University Press.

RYLE G. (1949). *The concept of mind*. London : Barnes and Noble.

SENSEVY G. (2002). Représentations et action didactique. *L'année des sciences de l'éducation*, 2002, p. 67-90. *Modélisation : une approche épistémologique* 43 | 2006 | aster | 187

TIBERGHIE A., BUTY C. & LE MARÉCHAL J.-F. (2005). Physics teaching sequences and students' learning. In D. Koliopoulos & A. Vavouraki (Eds.). *Science and technology Education at cross roads: meeting the challenges of the 21st century. The second conference of edife and the second ioste symposium in southern europe*. Athènes: Association for Science Education (edife), p. 25-55.

TIBERGHIE A. & VINCE J. (2005). Étude de l'activité des élèves de lycée en situation d'enseignement de la physique. *Cahiers du français contemporain*, n° 10, p. 153-176.

WITTGENSTEIN L. (1953/2004). *Recherches philosophiques*. Paris : Gallimard.