Formation et pratiques d'enseignement en questions
Revue des HEP et institutions assimilées de Suisse romande et du Tessin

https://fpeq.ch · ISSN: 2813-8317

Orange, C. & Orange Ravachol, D. (2017). Problématisations scientifiques fonctionnalistes et historiques en éducation relative à l'environnement et au développement durable : le cas de l'évolution climatique. *Formation et pratiques d'enseignement en questions, 22*, 21-38. https://doi.org/10.26034/vd.fpeq.2017.236

This article is publish under a *Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International* (CC BY): https://creativecommons.org/licenses/by/4.0

© Christian Orange, Denise Orange Ravachol, 2017

Formation et pratiques d'enseignement en questions

Revue des **HEP** et institutions assimilées de Suisse romande et du Tessin

La problématisation et les démarches d'investigation scientifique

dans le contexte d'une éducation en vue d'un développement durable

Patrick Roy, Alain Pache
et Bertrand Gremaud

N°22 2017

Comité de rédaction
Isabelle Caprani, IFFP
Pierre-François Coen, HEP Fribourg
Michele Egloff, SUPSI
Fabio Di Giacomo, HEP Valais
Deniz Gyger Gaspoz, HEP BEJUNE
Christophe Ronveau, UNIGE/ FPSE
Edmée Runtz-Christan, CERF, Uni Fribourg
Jean-Luc Gilles, HEP Vaud
Bernard Wentzel, IRDP

Comité scientifique
Bernard Baumberger, HEP Lausanne
Jonathan Bolduc, Université d'Ottawa
Gérard Sensevy, IUFM de Bretagne
Cecilia Borgès, Université de Montréal
Pierre-Philippe Bugnard, Université de Fribourg
Evelyne Charlier, Facultés universitaires Notre Dame de la Paix de Namur
Serge Dégagné, Université Laval
Marc Demeuse, Université de Mons-Hainaut
Ferran Ferrer, Université autonome de Barcelone
Jacques Ducommun, HEP BEJUNE
Jean-François Desbiens, Université de Sherbrooke
Hô-A-Sim Jeannine, IUFM de Guyane
Thierry Karsenti, Université de Montréal
Jean-François Marcel, Université de Toulouse II
Matthis Behrens, IRDP
Lucie Mottier Lopez, Université de Genève
Danièle Périsset Bagnoud, HEP du Valais
Philippe Le Borgne, IUFM de Franche-Comté
Sabine Vanhulle, Université de Genève

Coordinateurs du N°22
Patrick Roy, Alain Pache et Bertrand Gremaud
RoyP@edufr.ch
alain.pache@hepl.ch
gremaudber@edufr.ch

Rédacteur responsable
Pierre-François Coen / coenp@edufr.ch

Secrétariat scientfique
Sarah Boschung / boschungsa@edufr.ch

Secrétariat de la revue
Revue « Formation et pratiques d'enseignement en questions »
Haute école pédagogique de Fribourg
Rue de Morat 36
CH - 1700 Fribourg

Edition
Conseil académique des Hautes écoles romandes en charge de la formation
des enseignant.e.s (CAHR)

http://www.revuedeshep.ch

FORMATION ET PRATIQUES D'ENSEIGNEMENT EN QUESTIONS

Thème : La problématisation et les démarches d'investigation scientifique dans le contexte d'une éducation en vue d'un développement durable

Numéro coordonné par
Patrick Roy, Alain Pache et Bertrand Gremaud

N° 22, 2017

Comité scientifique

Pierre-François Coen, HEP Fribourg, Suisse
Bertrand Gremaud, HEP Fribourg, Suisse
Patrick Roy, HEP Fribourg, Suisse
Nicole Durisch Gauthier, HEP Vaud, Suisse
Corinne Marlot, HEP Vaud, Suisse
Alain Pache, HEP Vaud, Suisse
Franziska Bertschy, HEP Berne, Suisse
Jean-Marc Lange, Université Montpellier, France
Alain Legardez, Aix Marseille université, France
Olivier Morin, Ecole Supérieure du Professorat et de l'Education de Lyon, France
Benoit Urgelli, Ecole normale supérieure de Lyon et Université de Lyon, France
Johanne Lebrun, Université de Sherbrooke, Canada

Le contenu et la rédaction des articles n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs.

© Conseil académique des hautes écoles romandes en charge de la formation des enseignant.e.s (CAHR)

ISSN 1660-9603

Secrétariat scientifique : Sarah Boschung
Rédacteur responsable : Pierre-François Coen
Conception graphique : Jean-Bernard Barras
Mise en page : Marc-Olivier Schatz

Thème : La problématisation et les démarches d'investigation scientifique dans le contexte d'une éducation en vue d'un développement durable

Numéro coordonné par
Patrick Roy, Alain Pache et Bertrand Gremaud

Table des matieres

La problématisation, les démarches d'investigation scientifique et l'EDD : quelles conjugaisons possibles en vue de construire un monde meilleur ?
Editorial. Patrick Roy, Bertrand Gremaud et Alain Pache 7

Problématisations scientifiques fonctionnalistes et historiques en éducation relative à l'environnement et au développement durable : le cas de l'évolution climatique
Christian Orange et Denise Orange Ravachol 21

Le problème c'est de le poser. Définitions, modèles, perspectives pour la géographie scolaire
Anne Sgard, Philippe Jenni, Marco Solari et Pierre Varcher 39

Problématiser en classe de géographie sur le thème des migrations
Hyade Janzi 59

Investigation scientifique et éducation au développement durable : relations, clarifications sémantiques et épistémologiques
Virginie Albe 81

Une démarche d'investigation interdisciplinaire pour traiter des problématiques d'EDD dans une perspective d'instruction et de socialisation émancipatrice
Patrick Roy et Bertrand Gremaud 99

La matrice interdisciplinaire d'une question scientifique socialement vive comme outil d'analyse a priori dans le processus de problématisation
Bertrand Gremaud et Patrick Roy 125

Menons l'enquête sur des questions d'Education au Développement Durable dans la perspective des Questions Socialement Vives
Jean Simonneaux, Laurence Simonneaux, Nicolas Hervé, Lucas Nédélec, Grégoire Molinatti, Nadia Cancian et Amélie Lipp 143

La situation de problématisation traitée dans le cadre de focus groups. Un dispositif permettant de développer des compétences en EDD
Alain Pache et Philippe Hertig 161

Coupler les dispositifs PEERS (Projet d'étudiants et d'enseignants-chercheurs en réseaux sociaux) et Lesson Study pour enrichir les dispositifs de formation en EDD
Alain Pache et Vincent Robin 177

Prendre en compte les compétences pour problématiser en EDD : quels changements ?
Didier Mulnet 195

LA PROBLÉMATISATION ET LES DÉMARCHES D'INVESTIGATION SCIENTIFIQUE DANS LE CONTEXTE D'UNE ÉDUCATION EN VUE D'UN DÉVELOPPEMENT DURABLE

Problématisations scientifiques fonctionnalistes et historiques en éducation relative à l'environnement et au développement durable : le cas de l'évolution climatique

Christian ORANGE[1] (Université Libre de Bruxelles, Belgique et Université de Nantes, France) et **Denise ORANGE RAVACHOL**[2] (Université de Lille 3, France)

Cette contribution porte sur les conditions de possibilité d'une éducation relative à l'environnement et au développement durable qui soit aussi une formation scientifique par le travail de problème et l'investigation. Le domaine retenu ici est celui de l'évolution climatique. Notre approche, essentiellement épistémologique, tente de caractériser les différents types de problématisations à l'œuvre dans les études scientifiques des questions climatiques. Cela nous conduit à préciser en quoi l'étude de l'évolution climatique pourrait permettre aux élèves d'accéder à des savoirs scientifiques et à quelles conditions (nécessaires, mais non suffisantes) une telle étude pourrait contribuer à une éducation raisonnée aux changements climatiques. Nous terminons par la mise en avant de deux difficultés didactiques à dépasser pour atteindre ces objectifs.

Mots-clés : Evolution climatique, problématisation fonctionnaliste, problématisation historique, formation scientifique

Introduction

Dans bon nombre de pays, l'enseignement des sciences se transforme depuis deux décennies selon deux tendances :

– la mise en avant d'une démarche d'investigation ; si ce n'est pas une réelle nouveauté (Coquidé & *al.*, 2009), la généralisation à l'ensemble de l'enseignement obligatoire et pour tous les enseignements scientifiques est un fait marquant ;

– l'essor des « éducations à » qui, s'il ne concerne pas que les sciences de la nature, les implique largement ; et notamment, en France, les sciences de la vie et de la Terre (SVT).

Le but de cette contribution est de questionner ces évolutions du point de vue des apprentissages scientifiques et de leur rôle dans le développement des élèves, c'est-à-dire dans leur accès conjointement à des savoirs et à de nouvelles formes de pensées (Astolfi, 2008). Cela nous semble d'autant plus nécessaire que les promoteurs

1. Professeur des Universités, Université Libre de Bruxelles (ULB) et Centre de recherche en éducation de Nantes (CREN). Contact : christian.orange@ulb.ac.be

2. Professeure des Universités en Sciences de l'éducation, Université de Lille 3, CIREL – Théodile. Contact : denise.orange@univ-lille3.fr

de l'éducation relative à l'environnement et au développement durable (EREDD) revendiquent une éducation au choix et non une imposition du choix (France), une formation à l'esprit critique (PER, Suisse) et une entrée dans la pensée systémique ; et que la démarche d'investigation, en plus de l'intention d'intéresser davantage les élèves, est présentée comme contribuant au développement de leur pensée critique par la confrontation à des problèmes scientifiques.

Comme on le voit, une certaine convergence existe entre ces deux évolutions : volonté d'impliquer plus les élèves et de développer leur esprit critique, d'une part ; référence à un enseignement par confrontation des élèves à des problèmes ou des questions, d'autre part.

Peut-on prendre pour argent comptant ces revendications ? Ne doit-on pas poser la question didactique de ce que peuvent apporter ces évolutions à la formation scientifique ? Permettent-elles vraiment, pour ce qui est des « éducations à », une éducation au choix ?

Notre approche, de nature essentiellement épistémologique, sera donc délibérément orientée selon le point de vue de l'enseignement et de l'apprentissage des sciences, particulièrement les sciences de la vie et de la Terre, donc clairement partielle (voire partiale) ; la question étant de savoir si, avec les investigations concernant les « éducations à », on ne lâche pas la proie pour l'ombre et, plus particulièrement, s'il est possible de penser une éducation au développement durable, notion correspondant à des choix politiques, qui garderait un lien fort avec une formation scientifique fondée sur l'investigation critique et le travail des problèmes. Ce point de vue, que nous présenterons en nous limitant aux questions du changement climatique, nous semble nécessaire pour compléter les études plus globales comme celles qui s'intéressent aux questions socialement vives (QSV) (voir, par exemple, Legardez & Simonneaux, 2006). Le but est à la fois de questionner l'intérêt, pour une formation par les sciences, des études sur les changements climatiques et d'étudier les conditions, du point de vue de la didactique des sciences, pour qu'une éducation à l'environnement et au développement durable soit une véritable éducation au choix. Nous nous situons dans une didactique donnant toute sa place à l'analyse des savoirs en jeu, ce qui explique l'étude que nous proposons et qui est de l'ordre d'une analyse didactique préalable.

Nous allons développer cette étude dans le cadre de l'apprentissage par problématisation (Fabre & Orange, 1997) qui relie, aussi bien épistémologiquement que didactiquement, les savoirs scientifiques à la construction de problèmes. Ce cadre fournit une caractérisation des savoirs scientifiques et donne des repères pour penser les relations entre les apprentissages et le travail des problèmes.

Après avoir rappelé quelques aspects de ce cadre théorique, nous caractériserons les types de problématisation rencontrés en sciences de la vie et de la Terre. Nous pourrons alors discuter des problématisations mises en œuvre, en sciences de la nature, pour les questions liées à l'évolution climatique. Cela nous conduira à interroger dans quelle mesure le travail de tels problèmes peut permettre le développement de la pensée des élèves au sens où nous l'avons entendu plus haut : l'accès conjointement à des savoirs et à de nouvelles formes de pensées.

Le cadre de l'apprentissage par problématisation en sciences de la nature

Nous allons présenter ce cadre théorique en quelques points (voir Orange 2012). Notons d'emblée que ce que nous appelons problématisation n'a que peu à voir avec ce qui en est dit dans les documents officiels ou semi-officiels de l'enseignement en France. Ainsi, sur le site Main à la Pâte, Dominique Rojat (Inspecteur général) réduit la problématisation à l'énoncé d'une question ou d'un problème : « *qu'est-ce qu'on cherche ?* » ; quand pour nous un problème n'est pas donné ni simplement énoncé, mais construit (Bachelard, 1938) et cette construction, qui se prolonge tout au long de l'investigation, correspond à la problématisation. Nous allons préciser.

A la suite d'un certain nombre d'épistémologues, nous posons que l'activité scientifique vise avant tout la recherche d'explications (Popper, 1991) ; ou, pour le dire autrement, qu'elle cherche à rendre raison de phénomènes précis (Bachelard, 1949). Elle est ainsi fortement liée au travail de problèmes explicatifs et à la modélisation (Orange, 1997) qui tentent d'articuler des explications construites dans le cadre théorique retenu avec les résultats des investigations empiriques. Faire des sciences met donc en jeu au moins deux registres : celui des références empiriques et celui des modèles qui tentent de les expliquer (Martinand, 1992).

Cela dit, les savoirs scientifiques ne sont pas de simples solutions à des problèmes explicatifs qui auraient résisté aux mises à l'épreuve : ce sont des conclusions (Bachelard, 1949). C'est la relation problème-solution qui leur donne tout leur sens (Fabre, 1999) en les impliquant dans un réseau de raisons. Ils échappent ainsi à la contingence des connaissances factuelles, assertoriques, et prennent un caractère de nécessité. Dit autrement, en sciences, savoir n'est pas simplement savoir que, mais savoir que cela ne peut pas être autrement (Reboul, 1992). Cette valeur apodictique des savoirs scientifiques, c'est-à-dire leur caractère de nécessité, peut être rapprochée de la définition du troisième monde de Popper (1991, pp. 181-183), celui des contenus objectifs de pensée, dont les « habitants » les plus importants sont les arguments critiques et ce qu'on peut appeler « *l'*état d*'une discussion* ou *l'*état *d'un échange d'arguments critiques ».*

Ainsi, l'accès à des savoirs présentant un caractère de nécessité est intimement lié à la problématisation, si on considère que celle-ci consiste à travailler un problème, à en explorer les solutions possibles et à identifier des raisons qui contraignent les solutions, ces contraintes étant à la fois d'origine empirique et théorique. Cette problématisation se développe donc par un travail critique de mise en relation de ce qui est identifié comme des faits avec des idées explicatives. Il s'agit de poser systématiquement des questions du type : « comment est-ce possible ? » ; mais surtout : « pourrait-il en être autrement ? ».

Cette caractérisation des savoirs scientifiques donne des repères pour penser les enjeux des apprentissages scientifiques en classe : ceux-ci ne peuvent alors pas être compris comme la simple transmission de résultats. Non pas que l'enseignant n'ait rien à transmettre, mais parce que la valeur apodictique des savoirs ne peut se construire que par une activité de problématisation des élèves et donc par leur exploration du champ des possibles et sa délimitation.

Se poser alors la question des relations entre apprentissages scientifiques et éducation au développement durable (EDD) revient à questionner l'étude des liens entre les problèmes concernant le développement durable et la problématisation en sciences de la vie et de la Terre. C'est en effet une des conditions[3] pour que l'EDD ne soit pas dogmatique, mais relève bien d'une éducation au choix et au développement de l'esprit critique dans ce domaine. Il nous faut pour cela caractériser plus précisément cette problématisation et notamment y poser quelques distinctions qui nous semblent importantes aussi bien en SVT que pour l'étude de l'évolution du climat.

Les SVT sont des champs scientifiques qui conjuguent l'étude de deux grands types de problèmes explicatifs :

– des problèmes fonctionnalistes qui concernent le fonctionnement des systèmes vivants (physiologie, biologie cellulaire, etc.) et celui de la Terre (géodynamique interne, géodynamique externe, etc.) ;

– des problèmes historiques qui s'intéressent à la reconstitution de l'histoire des êtres vivants ou à celle du passé de la Terre.

Or ces deux types de problèmes relèvent de problématisations différentes.

Les problèmes fonctionnalistes en biologie et géologie portent sur la compréhension du fonctionnement de systèmes vivants ou planétaires. C'est par exemple le cas du problème de localisation des volcans qui, compte tenu de ce que l'on sait de la structure de la Terre, conduit à rechercher des conditions de possibilité de fusion partielle en termes de pression, température, pression d'eau, en lien avec les mouvements lithosphériques. Ou encore celui des particularités de la planète Terre aujourd'hui, comparativement aux autres planètes proches : la comparaison des caractéristiques des planètes internes conduit à l'impossibilité que la distance au Soleil soit l'unique cause des différences et à la nécessité d'avoir recours, dans les explications climatiques, à l'existence et au rôle d'une atmosphère, etc.

Les problèmes historiques relèvent d'autres formes de problématisation (Orange Ravachol, 2005). Si les outils théoriques et empiriques des problèmes fonctionnalistes y sont utilisés, ils ne suffisent pas à construire une histoire de la Terre en la mettant en cohérence avec les traces actuelles (roches, structures tectoniques, fossiles, etc.). Plus exactement, celles-ci ne sont pas suffisantes pour contraindre à elles seules les explications possibles. Comment, par exemple, expliquer la formation des chaînes de montagnes ? Pourquoi pas par un cataclysme, brutal et bref donc, qui aurait fait surgir les Alpes en quelques instants ? L'histoire des sciences nous livre ainsi, avant le 19e siècle, des explications variées relevant de telles catastrophes. Ces recours à des événements extraordinaires rendent d'une certaine façon toute explication possible et ne permettent donc pas la construction de problèmes historiques. La géologie n'a pu se constituer comme science, au tournant du 19e siècle, que par l'établissement d'un principe fort qui limite les possibles : l'actualisme. Comme le présente G. Gohau (1997, p. 140) : le principe de l'actualisme énonce que *« le présent est la clé du passé, ou que les causes qui ont agi au long de l'histoire de la terre ne diffèrent point essentiellement des causes géologiques actuelles »*.

3. Comme nous l'avons écrit plus haut, il ne s'agit pas de réduire l'EDD à une formation scientifique mais d'affirmer qu'elle doit comporter un volet scientifique qui contribue à une éducation au choix. C'est ce point qui est mis à l'étude ici pour ce qui est de l'évolution climatique.

La mobilisation de ce principe est essentielle, car elle empêche d'avoir systématiquement recours à des événements *ad hoc* (« catastrophes ») pour expliquer l'histoire de la Terre et de la vie. Ce faisant, elle ramène les événements passés à des phénomènes identifiés aujourd'hui. Par exemple, on trouve à certains endroits des Alpes (Chenaillet) un ensemble de roches nommé ophiolites ; dans une perspective historique, on cherche à en expliquer la formation (événement) et, pour cela, on compare cet ensemble de roches à ce qui se forme aujourd'hui au niveau des dorsales océaniques. Il faut alors expliquer la présence de ces roches en altitude en évitant de faire appel à un événement catastrophique (surrection violente et dans un temps court des Alpes) ne correspondant à rien de repérable de nos jours. Cela oblige les scientifiques à construire un temps long pour rendre compte d'une histoire de la Terre à partir de traces dont on ne voit pas directement de réalisations semblables aujourd'hui : si on veut ramener la surrection des chaînes de montagnes ou, plus localement, la formation de plis de grande ampleur à des phénomènes actuels (séismes et mouvement des plaques par exemple), il faut les imaginer se produire pendant une durée bien supérieure à ce que peut observer l'Homme. Cet actualisme du temps long permet de ramener un événement (la formation d'un pli, d'un charriage) à des phénomènes que l'on peut étudier actuellement.

Ainsi, le travail des problèmes historiques en sciences de la Terre et de la vie a-t-il essentiellement comme méthode de ramener les événements passés à des phénomènes présents. Mais, et ce point est important pour ce qui est de la question du changement climatique, cette réduction d'événements à des phénomènes a ses limites. C'est en particulier le cas lorsque le problème travaillé met en jeu plus ou moins directement l'histoire de l'Homme (Orange Ravachol, 2012) : l'événement de la quasi-disparition des Dinosaures, par exemple, à la fin de l'ère secondaire, ne peut pas se réduire simplement aux phénomènes d'extinction de masse repérés à d'autres époques s'il est considéré, dans un cadre évolutionniste, comme une condition de possibilité du développement des mammifères et donc de l'espèce humaine. Cela reste donc un événement dont la contingence et ses conséquences doivent être interrogées : dans quelle mesure l'histoire aurait-elle pu se dérouler autrement et se faire sans développement des mammifères et de la lignée humaine ? Et comment penser cette contingence qui fait événement ? Impossible de dire que l'extinction de masse de la fin du secondaire devait entraîner obligatoirement le développement des mammifères et de la lignée humaine. Mais, inversement, la lignée humaine s'étant développée, peut-on rétrodictivement[4] faire de l'extinction de masse de la fin secondaire une condition de possibilité de ce développement, donc une nécessité établie dans un sens antichronologique ? On retrouve l'expérience de pensée proposée par Gould (1991) qui parle de rembobiner l'histoire et de la redébobiner pour se demander si on obtiendrait la même histoire.

Nous avons particulièrement détaillé les spécificités des problématisations historiques en sciences de la nature car elles sont généralement moins mises en avant

4. La rétrodiction (s'oppose à la prédiction qui va des causes aux conséquences postérieures) correspond à un raisonnement qui cherche dans les événements passés une condition nécessaire à la réalisation d'un évènement postérieur. Condition nécessaire et non suffisante, ce qui laisse place *a priori* à la contingence (l'événement postérieur n'était pas certain au moment de l'événement antérieur) sanctionnée *a posteriori* par l'histoire (qui ne peut être qu'unique). Ce raisonnement rétrodictif est largement utilisé dans les sciences historiques (humaines ou de la nature).

que celles des problématisations fonctionnalistes, ces sciences étant à tort souvent considérées uniquement comme des sciences expérimentales. Comme nous allons le voir, le problème du climat et de son évolution relève de l'un et l'autre de ces types de problématisation. Les sections suivantes s'intéressent donc à la problématisation fonctionnaliste et à la problématisation historique des questions climatiques. Pour cela, nous étudierons comment ces problématisations se sont instituées, comment elles vivent aujourd'hui et comment elles se croisent avant de discuter les éclairages didactiques que cela apporte.

Problématisations fonctionnalistes des questions climatiques

Il n'est pas question d'être ici exhaustif, d'autant moins que c'est un aspect déjà bien étudié tant d'un point de vue scientifique que didactique. Il s'agit de préciser ce que nous entendons par problématisations fonctionnalistes des questions climatiques de façon à les comparer dans un second temps aux problématisations historiques.

Fourier et le problème des températures du globe

Un des premiers scientifiques à s'intéresser scientifiquement à la question des températures terrestres est Fourier (1768-1830), dans son mémoire «*Les températures du globe terrestre et des espaces planétaires*» présenté à l'Académie des sciences de Paris en 1824. Il commence par considérer que «*la chaleur du globe terrestre dérive de trois sources*» (1824, p.569) : les rayons solaires ; la participation de notre planète à la température commune des espaces planétaires ; et ce qui reste de la chaleur primitive lors de sa formation[5]. La «*température froide du ciel planétaire*» n'étant que peu différente, selon lui, des températures polaires, la Terre aurait partout cette température si les deux autres causes ne la réchauffaient pas. Il montre, à partir de l'étude des gradients de température (p.589), que la «*chaleur primitive du globe ne cause plus d'effet sensible à la surface*» (p.570).

Reste donc la chaleur provenant des rayons du soleil. Il note d'abord que «*la présence de l'atmosphère et des eaux a pour effet général de rendre la distribution de la chaleur plus uniforme*» (p.572) ; mais aussi que «l*'interposition de l'air modifie beaucoup les effets de la chaleur à la surface du globe*». Et il rend compte de ce qui est appelé aujourd'hui «effet de serre», par une distinction entre «chaleur lumineuse» et «chaleur obscure» : la première, celle qui vient du soleil, a comme propriété de pénétrer les «*substances solides et liquides diaphanes*» ; la seconde (on parlerait aujourd'hui d'infrarouge), provenant de la communication de la première aux corps terrestres, perd cette propriété (p.573). «*La masse des eaux qui couvrent une grande partie du globe et les glaces polaires oppose moins d'obstacles à la chaleur lumineuse affluente qu'à la chaleur obscure, qui retourne en sens contraire dans l'espace extérieur. La présence de l'atmosphère produit un effet du même genre, mais qui, dans l'état actuel de la théorie et à raison du manque d'observations comparées, ne peut encore être exactement défini.*» (p.573). Il fait alors référence à une expérience due «*au célèbre voyageur M. de Saussure*» qui a mesuré la température dans un vase ouvert couvert d'une ou plusieurs lames de verre et exposé aux rayons du soleil (p.584).

5. Il n'envisage pas vraiment l'existence d'une source actuelle interne de chaleur, le concept de radioactivité ne s'étant construit qu'au tournant du 20e siècle, même s'il considère, au détour d'une phrase (p.571) la possibilité *«d'autres causes jusqu'ici ignorées»*.

La construction du problème des températures du globe par Fourier, qui relève selon lui de la physique et des mathématiques, est typique d'une problématisation fonctionnaliste : il explore les possibles en s'appuyant sur des principes physico-mathématiques généraux – comme le fait de pouvoir, de par la nature des équations différentielles mobilisées, calculer séparément les effets de chacune de ces causes, « *comme si chacune de ces causes existait seule* » (p.575) et de les superposer –, sur la théorie mathématique de la chaleur qu'il a élaborée (p.600), sur l'idée qu'on se fait de l'histoire et du fonctionnement de la Terre (refroidissement progressif) et sur les données empiriques dont il dispose : expériences sur les relations entre lumière et chaleur (expérience de Saussure) ; températures au sol en différents lieux. Ce faisant il construit la nécessité du rôle du rayonnement solaire et de celui de l'atmosphère sur la température de surface, puisque la chaleur interne de la Terre apparaît comme négligeable en comparaison de la chaleur solaire et de l'effet de l'eau et de l'atmosphère sur la part « obscure » de cette chaleur.

Arrhenius et le problème du rôle de l'atmosphère

Dans le courant du 19e siècle, les progrès de la physique font avancer la question et Tyndall (1820-1893) montre que la vapeur d'eau et le gaz carbonique sont responsables de cette absorption des infrarouges, la chaleur obscure de Fourier (Dufresne, 2009).

Une autre figure des sciences physicochimiques intervient alors sur ce problème de « l'effet de serre » : Arrhenius (1857-1929). Son article « *De l'influence de l'acide carbonique de l'air sur la température terrestre* », publié en 1896, commence ainsi : « *Beaucoup de choses ont été écrites au sujet de l'influence de l'absorption de l'atmosphère sur le climat. Tyndall en particulier a signalé la grande importance de ce phénomène. Selon lui, les variations journalières et annuelles de la température étaient essentiellement atténuées par ce mécanisme. Un autre aspect de la question, qui éveille depuis longtemps l'attention des physiciens, est le suivant : la température moyenne à la surface du globe est-elle d'une quelconque manière affectée par la présence de gaz absorbant la chaleur dans l'atmosphère ?* » (traduction de l'anglais tirée de l'analyse de Cros, 2011).

Il étudie alors, en estimant un certain nombre de paramètres, les effets de la vapeur d'eau et du CO2 sur la température. En fait, pour la vapeur d'eau, il considère, sans réelle justification (Cros, 2011), que sa concentration atmosphérique varie peu, ce qui le conduit à une relation entre la variation de la température et celle de la concentration en CO2. Il conclut : « *Donc, si la quantité d'acide carbonique augmente en progression géométrique, l'augmentation de la température se fera selon une progression arithmétique* », ce qui le conduit à dire qu'un doublement de la concentration atmosphérique de CO2 dans l'atmosphère provoquerait une augmentation de 5°C de la température terrestre. Malgré la proximité de ce résultat avec les calculs actuels, on sait aujourd'hui que ses calculs sont entachés d'approximations et que le modèle « à une couche » qu'il utilise n'est pas adapté au cas du CO2 (Dufresne 2009 ; Cros, 2011). Arrhenius tente ainsi d'expliquer les périodes glaciaires, établies par Agassiz (1837 : voir la section suivante) par des variations de cette concentration en CO2.

Nous avons ici, comme dans le cas de Fourier, une problématisation fonctionnaliste : elle consiste à développer les modèles possibles de l'effet de l'atmosphère sur la température de la Terre, à partir de principes physiques et de résultats d'investigations empiriques. Ce faisant Arrhenius explore, en s'appuyant sur les travaux de De Marchi (publiés en 1895), toutes les causes possibles de la modification de cette température – causes astronomiques, répartition des océans, couvert végétal, etc. (Arrhenius, 1896, p.273) – pour suivre ce dernier quand il ne retient que les causes atmosphériques. Cette exploration des possibles le conduit, par exemple, à la fois à montrer l'importance de la vapeur d'eau pour la température terrestre de surface et à minimiser son rôle dans d'éventuelles évolutions climatiques. Même si Arrhenius explore l'histoire géologique récente de la température terrestre (glaciations), il le fait en jouant sur les modèles actuels qu'il a construits, sans mettre en jeu un temps profond (constructeur de phénomènes) ou des événements comme c'est le cas, nous le verrons, dans les problématisations historiques.

Nous ne pouvons détailler ici la suite des travaux scientifiques qui aboutissent aujourd'hui à des modèles complexes du bilan radiatif et qui sont bien documentés par ailleurs (voir par exemple Dufresne, 2009). Notons cependant que si le rôle du CO2 et de la vapeur d'eau a été depuis confirmé et précisé (ils sont donnés respectivement responsables de 26% et 60% de l'effet de serre), d'autres gaz, mal repérés à l'époque d'Arrhenius, sont venus s'ajouter : l'ozone (responsable à 8%) et l'ensemble méthane et protoxyde d'azote (N2O), à 6% (Dufresne, 2009).

Parallèlement et complémentairement, s'est développée, à partir des travaux de Milutin Milankovitch (1879-1958), une théorie astronomique du climat qui met en jeu les variations orbitales. Si les travaux de Milankovitch cherchent à rendre compte, à travers les paramètres du mouvement de la Terre autour du Soleil, des glaciations quaternaires, son travail relève également d'une problématisation fonctionnaliste, le temps y jouant le rôle d'une variable banale et réversible.

Conclusion didactique

Quels sont les enjeux de faire travailler en classe les problèmes fonctionnalistes liés au climat ? A quelles conditions un tel travail peut-il contribuer à une éducation à l'environnement et au développement durable qui ne soit pas dogmatique et qui développe une pensée critique ?

Concernant l'effet de serre, on sait la difficulté de le comprendre comme un régime permanent dont l'équilibre est différent de celui d'un globe sans atmosphère (Colin & Tran Tat, 2011). Si les manuels évitent maintenant les explications du type « *il rentre plus d'énergie qu'il n'en sort* », pour reprendre les analyses critiques de Viennot (1996, 2007), cela n'empêche pas les élèves de lycée de fonctionner encore en raisonnement séquentiel (Viennot, 1993, Orange & Orange Ravachol, 1995). Ce qui se joue ici, c'est leur accès à des formes de pensées nouvelles, à une autre façon de « voir » les choses (Astolfi, 2008), différente de la pensée commune qui raisonne en petites histoires ; c'est une condition de la compréhension scientifique de la question, composante partielle, mais importante du problème de l'évolution climatique.

Mais ce n'est pas tout. Comment, par exemple, comprendre que la vapeur d'eau est repérée comme la contributrice la plus importante à l'effet de serre, information pertinente que l'on rencontre dans beaucoup de manuels scolaires, alors qu'elle n'est pas considérée dans la discussion sur les influences anthropiques sur cet effet ? Pourtant la combustion des combustibles fossiles libère le même ordre de grandeur d'eau et de CO2. Poser cette question, qu'on ne voit guère traitée dans ces mêmes manuels, conduit à prendre en compte les cycles du carbone et de l'eau, à penser donc en termes de modèles à compartiments, donc de flux, de stockage, et de régulation (Orange, 1997). C'est aussi se donner les moyens de comprendre les rétroactions négatives et positives, les conditions de stabilité d'un système, la possibilité d'oscillations de relaxation, etc. Tout ceci pouvant permettre de faire le lien entre problèmes fonctionnalistes et problèmes historiques ; nous y reviendrons. Ne pas poser la question de la vapeur d'eau peut conduire les élèves à l'idée que l'on choisit les explications qui arrangent.

Donc faire travailler les élèves sur des problèmes fonctionnalistes concernant les évolutions climatiques (les mettre en investigation), c'est, d'une part, être au cœur de ce que devraient être les enjeux de l'enseignement de la biologie et de la géologie : le dépassement de la pensée commune pour comprendre le fonctionnement de systèmes matériels complexes (Orange & Orange, 1995) ; et, d'autre part, se donner les moyens d'une EDD raisonnée et critique.

Problématisations historiques des questions climatiques

Comme pour la section précédente, nous allons nous appuyer sur le cas d'un scientifique (Agassiz, 1807-1873) ayant participé aux débuts des problématisations historiques des questions climatiques. Le but n'est pas de faire une histoire des sciences, mais de comprendre la signification de ces problématisations.

Un problème de géologie historique déjà ancien

Le changement climatique n'est pas un problème neuf en géologie historique et il y apparaît lié à plusieurs autres questions. Ellenberger (1994, p.33) donne ainsi un aperçu de sa prégnance depuis que la géologie s'est constituée comme une science : *« L'énigme paléoclimatique s'est posée avec acuité dès l'aurore de la géologie. Elle fut l'une des incitations à se résoudre au mobilisme continental au début de ce siècle* [Il s'agit du 20e siècle]. *Entre temps, le choc de la découverte de l'« âge glaciaire » puis des glaciations antérieures avait irrémédiablement ruiné le modèle « linéaire » du refroidissement climatique continu ».*

Ellenberger fait ici référence aux débuts de la paléoclimatologie, qui remontent aux 18e et 19e siècles, avec la recherche d'une explication aux blocs erratiques, rochers isolés, atteignant pour certains de très grandes tailles, disséminés sur le sol de régions montagneuses comme le Jura et les Alpes. Il nous reporte aussi au début du 20e siècle avec les travaux de Wegener (à partir de 1912). En effet, des arguments paléoclimatiques étayent la théorie des translations continentales de cet astronome et météorologue (1880-1930). Ce faisant Ellenberger évoque les turbulences qu'engendre l'exposé par Agassiz d'une théorie glaciaire à la Société Helvétique des sciences naturelles en 1837. Pour expliquer les blocs erratiques, ce naturaliste met en jeu une grande extension des glaciers dans une période plus

ancienne. L'émergence de cette théorie glaciaire initie plusieurs dizaines d'années de débats. Comme l'écrit Hallam (1989, p.88), cette théorie *«gave a rude shock to the geological community in the late 1830s and early 1840s by invoking the action of formerly far more extensive land ice to account for the varied phenomena that had so intrigued and impressed the diluvianists and adherent for drift theory».* Imaginer un *«âge de glace»* vient en opposition, d'une part, avec le diluvianisme et la théorie des courants, d'autre part, avec l'idée d'un refroidissement graduel du globe (Gohau, 1987, p.173) qu'on liait à la déperdition progressive de la chaleur initiale. Est-il concevable que la Terre soit passée d'une période plus chaude à une période plus froide et qu'elle en soit sortie pour une période plus chaude ?

Le rôle structurant du principe d'actualisme dans les problématisations historiques

Lorsqu'Agassiz introduit sa théorie glaciaire pour expliquer l'existence des blocs erratiques dans les Alpes, il écarte de fait la théorie des courants et le diluvianisme alors acceptés et qui relèvent du catastrophisme. Il se met ainsi en contradiction avec l'idée d'un refroidissement graduel de la Terre, mais s'appuie sur un principe fortement structurant de la géologie naissante : le principe d'actualisme.

Il s'agit donc d'établir scientifiquement des tronçons d'une histoire révolue donc unique, sans verser dans un catastrophisme du sens commun (Orange Ravachol, 2007). L'épistémologue Hooykaas (1970, p.11) écrit que ce principe est «*le pont qui permet à notre imagination de se transporter du présent jusqu'au passé et d'évoquer, avec une certaine confiance dans son exactitude, la vision des faits qu'aucun œil humain n'a contemplés»*. Ce principe empêche donc d'avoir systématiquement recours à des «causes» ou à des événements *ad hoc* (des «catastrophes») pour expliquer l'histoire de la Terre et de la vie.

Lorsque Agassiz développe sa théorie glaciaire à la Société Helvétique des sciences naturelles (1837), il articule des contraintes empiriques – la répartition géographique des blocs erratiques, les grandes moraines dont on retrouve des traces sur les rives septentrionales du lac de Genève, etc. – et des contraintes théoriques parmi lesquelles ce principe d'actualisme (en comparant les moraines anciennes aux moraines actuelles) dont il sait qu'il est largement admis. Petit à petit, il montre l'impossibilité de rapporter la localisation des blocs erratiques à des courants d'eau érosifs, ou bien à leur charriage par des courants aqueux immenses et violents (des courants diluviens). En même temps, il construit la nécessité d'une glaciation spatialement et durablement importante accompagnant une surrection montagneuse.

Agassiz aboutit ainsi au fait qu'il n'y a qu'une seule explication possible : un changement climatique et, plus précisément, une période de refroidissement suivie d'une période de réchauffement (Agassiz, 1837).

Bien sûr, des objections vont venir. La théorie glaciaire figure parmi les grandes controverses géologiques (Hallam, 1989). Elle provoque d'énormes remous chez les géologues anglais (Buckland (1784-1856), Murchison (1792-1871), Lyell (1797-1875)). Car ce qu'explique Agassiz dans les Alpes fait écho à ce qu'ils connaissent en Grande-Bretagne et qu'ils rapportent alors à des actions diluviennes.

Le propre de la problématisation d'Agassiz est qu'elle met en relation explicative de traces actuelles (la présence de blocs erratiques) avec des événements passés supposés qu'il faudra à leur tour expliquer. Les problématisations fonctionnalistes vues à la section précédente partent d'une étude d'un fonctionnement actuel pour éventuellement, en faisant jouer certains paramètres, s'intéresser au fonctionnement passé. C'est bien le recours à des événements passés comme conditions de possibilité des traces actuelles qui caractérise la problématisation historique, recours qui amène avec lui son lot de contingence, mais qui est encadré par l'actualisme. Ce cadrage est le moyen de la problématisation historique de relier le présent au passé, mais en restant dans des phénomènes que l'on connaît aujourd'hui. C'est seulement le temps long qui peut expliquer une ampleur ou une répartition que l'on ne perçoit pas actuellement.

Le problème des changements climatiques au rythme d'une science normale

Dès lors que la théorie glaciaire est acceptée par la communauté scientifique, les préoccupations des paléoclimatologues se portent sur la caractérisation des épisodes glaciaires et la recherche de causes à ces oscillations climatiques. Ils contribuent ainsi à augmenter le champ d'application du nouveau paradigme (Kuhn, 1983) dans lequel se construisent à la fois des problèmes fonctionnalistes (voir section précédente) et historiques, largement connectés. C'est ce qui fait qu'au 20e siècle, la paléoclimatologie représente un champ important des sciences de la Terre, avec des méthodologies de plus en plus raffinées (Le Treut et Jancovici, 2004, pp. 54-55), la conjugaison de calculs astronomiques et de données géologiques par exemple. Parmi les données astronomiques, les paramètres de Milankovitch (forme de l'orbite terrestre, inclinaison de l'axe des pôles sur le plan orbital, changement dans le temps de l'orientation de l'axe des pôles) ; parmi les données géologiques, les analyses des rapports isotopiques du carbone, de l'oxygène et de l'hydrogène dans les glaces continentales, les sédiments marins et lacustres ; mais aussi les traces des milieux de sédimentation anciens et leur comparaison avec les milieux actuels (Dercourt *& al.,* 2006 : Kandel, 2010).

Conclusion didactique

Les problématisations historiques concernant les changements climatiques sont didactiquement tout aussi importantes que les problématisations fonctionnalistes. Si le travail des problèmes fonctionnalistes donne la possibilité d'entrer dans la modélisation de systèmes complexes et de dépasser les simples raisonnements séquentiels, les problèmes historiques, dont la spécificité est très généralement ignorée des curriculums, devraient permettre d'aller au-delà des explications par de petites histoires simples, non discutées (Orange Ravachol, 2012), et de comprendre le rôle majeur des principes structurants (Orange Ravachol & Beorchia, 2011), comme celui de l'actualisme, dans les problématisations scientifiques. En fait, dans les investigations des élèves des questions scientifiques sur le climat, il est important de combiner, comme dans le travail des chercheurs, problèmes fonctionnalistes et problèmes historiques. Du côté des éducations à l'environnement et au développement durable, la compréhension des principes des problématisations historiques et des raisonnements associés apparaît, en complément de

ce que nous avons pointé pour les problématisations fonctionnalistes, comme une condition – non suffisante, mais nécessaire – d'une formation critique et émancipatrice des élèves.

Problématisation mixte de l'évolution climatique : le cas de Vincent Courtillot

Le choix de nous intéresser aux travaux de Vincent Courtillot

Courtillot est un géophysicien spécialiste du paléomagnétisme (Courtillot, 1995, p.254). Membre de l'Académie des sciences française, ce géologue est connu pour ses travaux sur l'explication de la crise biologique de la fin de l'ère secondaire (il y a 65 millions d'années). Depuis plusieurs dizaines d'années, avec son équipe, il développe, promeut et défend le rôle joué par le volcanisme gigantesque survenu dans le Deccan en un temps géologiquement court, moins d'un million d'années, à la limite Crétacé-Tertiaire (crise K-T) : « *Des éruptions de cette ampleur semblent pouvoir affecter la biosphère par l'injection de cendres, d'aérosols et de gaz, et produire obscurcissement, variations de température et pluies acides* »[6] (Courtillot, 1995, pp.233-234). Ce faisant, il couple le fonctionnement mantellique de la Terre à son fonctionnement atmosphérique et hydrosphérique ; il passe d'un problème de géodynamique interne à un problème de géodynamique externe ; il développe un problème historique (l'extinction de masse à la fin du secondaire), tout en mobilisant des problématisations fonctionnalistes (couplages manteau / hydrosphère / atmosphère).

A partir des années 2000, il prend une part active à la question de l'évolution climatique de la période actuelle. Avec d'autres géologues (Allègre, Le Moël,...), il replace ce problème fonctionnaliste dans le cadre plus vaste de l'histoire géologique de la Terre, ce qui le conduit à valoriser le rôle de l'activité solaire et à relativiser l'importance accordée à la responsabilité humaine. Dans le débat parfois virulent qui anime la communauté scientifique, il est rangé dans les « climatosceptiques ». Au-delà de cette étiquette, nous repérons chez ce chercheur une démarche comparable à celle qu'il a adoptée pour l'explication de la crise K-T. Il relie ainsi géodynamique interne et géodynamique externe, et inscrit un problème fonctionnaliste portant sur l'actuel et le futur dans une profondeur historique.

Le fait qu'il adopte une position dite climatosceptique n'est pas directement pris en compte ici ; en tout cas il ne s'agit aucunement pour nous d'adhérer à ses positions, mais de comprendre comment il construit scientifiquement le problème. Nous partons donc du présupposé de son honnêteté scientifique. Voyons d'abord comment il s'empare du problème climatique « froid » de la crise K-T. Que transfère-t-il dans le problème « chaud » qu'est celui du réchauffement climatique actuel ? Epistémologiquement parlant, ces deux problèmes pourraient paraître semblables. Or il n'en est rien : le premier relève de la tradition classique de la géologie (la reconstitution du passé de la Terre) ; le second cherche à comprendre son avenir.

6. Dans la quête de causes pour expliquer les extinctions massives de la fin du secondaire, l'hypothèse « volcaniste » vient contrer l'hypothèse « impactiste » proposée par l'équipe étasunienne de Luis Alvarez, d'où l'engagement d'une controverse que l'épilogue actuel tendrait à conjuguer.

La problématisation historique de la crise K-T de Vincent Courtillot

Le contexte initial dans lequel Courtillot aborde la crise K-T et le volcanisme du Deccan est celui de la tectonique des plaques. Il est alors préoccupé de reconstituer le mouvement de l'Inde sur des millions d'années (1995, p.105) : «*Le travail du géologue et du géophysicien,* écrit Vincent Courtillot en 2002 (p.19), *c'est d'essayer de comprendre ce qui est à l'origine de ces énormes objets que sont les grands trapps*» (2002, p.19), épais dépôts de roches basaltiques formant des plateaux. Comment s'y prend-il ? Comme tout géologue en prise avec la reconstitution raisonnée du passé de la Terre, il recourt au principe d'actualisme[7], garde-fou prémunissant d'explications incontrôlées, qu'il porte à ses limites. Pour ce qui concerne les trapps du Deccan, la difficulté vient du fait que la nature actuelle ne donne pas à voir un tel volcanisme. Grâce à des travaux empiriques (la recherche d'autres trapps anciens, les caractéristiques du volcanisme actuel) situés dans le cadre théorique de la tectonique des plaques, Vincent Courtillot en vient à rapprocher le volcanisme indien d'un volcanisme de point chaud tel qu'il en existe actuellement à Hawaï ou à la Réunion (Courtillot, 1995, p.115) à la condition de le penser beaucoup plus intense dans un temps limité. Autrement dit, jusqu'à être contraint d'en faire une «catastrophe» géologique (de «*colossales éruptions de basaltes continentaux*» ; Courtillot, 1995, p.245), c'est-à-dire une cause qui agit encore actuellement, mais dont l'intensité ancienne est beaucoup plus forte ; donc en forçant l'utilisation stricte de l'actualisme.

C'est aussi en référence au principe de l'actualisme que Vincent Courtillot explique les modifications atmosphériques à la limite Crétacé Tertiaire et leurs effets sur la faune et la flore. Ce sont les millions de tonnes de gaz sulfureux, de dioxyde de carbone et de gaz halogènes comme l'acide chlorhydrique (Courtillot, 1995, p.238) qui sont rejetés dans l'atmosphère, induisant un refroidissement climatique et altérant la couche d'ozone (Courtillot, 2009, p.253).

De la connaissance du passé à la prévision de l'avenir

C'est donc en partant d'un problème de volcanisme ancien (celui des trapps du Deccan), de plus en plus documenté (plusieurs missions sur le terrain, paléomagnétisme, datations relatives et absolues, paléontologie ; Courtillot, 2009) que Courtillot passe à un problème de changement climatique et d'extinction de masse, en convertissant «*ces flux de lave en flux de gaz émis vers l'atmosphère*» (ibidem, p.269), et qu'il en vient à s'intéresser non seulement à d'autres extinctions passées, mais aussi à questionner l'extinction dans laquelle nous serions actuellement impliqués : «*je pense que les catastrophes anciennes, dont le géologue exhume les traces, méritent notre attention, non seulement pour notre culture ou notre compréhension du chemin zigzagant qui a conduit à l'émergence de notre espèce, mais, très pratiquement, pour comprendre comment éviter qu'elle ne disparaisse*» (1995, p.240). Il ajoute que «*Le géologue peut donc fournir actuellement au climatologue les conditions aux limites et le regard sur le long terme qui lui manque*». Courtillot élargit son champ de problèmes et articule la géodynamique interne à la géodynamique externe, en se réclamant fortement des méthodes des géologues.

7. Notons que le principe d'actualisme sera en toile de fond des débats entre «volcanistes» et «impactistes».

Ce faisant, il transforme ses propres outils méthodologiques : d'une part, il déborde de l'actualisme en faisant référence à des phénomènes dont l'ampleur serait inconnue aujourd'hui ; d'autre part, alors que le présent sert de clé du passé pour les géologues, il serait possible de penser que le passé est la clé de l'avenir. Une sorte d'actualisme « à l'envers ».

Le problème de l'évolution climatique actuelle selon Courtillot

Courtillot entre aussi dans la question de l'évolution climatique actuelle, comme spécialiste du magnétisme, via l'étude des relations entre la Terre et le Soleil : « *on était en train de se demander dans quelle mesure ces variations magnétiques, de la Terre, étaient liées à l'activité du Soleil* » (Nantes, conférence, 7 juin 2009[8]). A partir d'observations et de mesures, il établit, avec son équipe, l'étroite dépendance des premières vis-à-vis de la seconde. Il montre aussi que si réchauffement climatique anormal il y a, « *il ne semble se dégager qu'à partir des années 1980 ; avant les variations accompagnent tellement bien les variations du Soleil que le Soleil en a été responsable comme il l'a été des cycles de Milankovitch et de tout ce qui s'est passé avant dans l'histoire de la Terre* » (ibidem). Pour travailler le problème « chaud » de l'évolution climatique actuelle, il se positionne à nouveau en géologue, en conjuguant les ressources de la géologie fonctionnaliste (à l'échelle du dernier millénaire) et de la géologie historique (sur des centaines de milliers d'années). Il est un de ceux qui pensent que les fluctuations de températures récentes relèveraient de *« fluctuations naturelles, la Terre aurait connu des réchauffements bien plus importants dans le passé »* (Balibar, 2015, p.99), sans exclure cependant une sortie de ce régime dans laquelle l'homme aurait une grosse part de responsabilité. Il pose ainsi la question cruciale d'un possible changement de régime du système.

Les changements de régime des systèmes à l'articulation des problématisations fonctionnelles et historiques

D'autres chercheurs non classés parmi les climatosceptiques, disent l'intérêt de mieux comprendre les mécanismes des glaciations et déglaciations passées pour penser ce qui se joue aujourd'hui et mettent en avant la nécessité d'articuler causes astronomiques et causes atmosphériques (Paillard, 2015) au sein d'un système ayant une histoire. Avec le couplage des différents sous-systèmes (atmosphère, glaces, courants d'eau profonds…), la complexité du système est grande. Mais derrière cette complexité non encore totalement appréhendée, c'est bien la possibilité de penser des systèmes non stabilisés, avec des changements de régime plus ou moins brusques, liés par exemple au passage d'une rétroaction négative, stabilisatrice, à une rétroaction positive, divergente. On a là, à nouveau, un enjeu de formation scientifique fort dans l'idée de faire accéder les élèves à de nouvelles façons de construire les problèmes ; de même que la compréhension des modélisations de systèmes avec changement de régime est centrale pour une éducation à l'environnement raisonnée.

8. Conférence disponible sur : https://www.youtube.com/watch?v=uXeRbbM2AjY

Discussion

En tentant de comprendre les différentes formes de problématisation scientifique en jeu dans les questions d'évolution climatique, notre but était double : voir à quelles conditions des investigations menées par des élèves sur ces questions pouvaient contribuer à leur formation scientifique, *c*'est-à-dire à leur accès à des modes de pensée qui dépassent la pensée commune et qui s'appuient sur un ensemble de concepts scientifiques critiques ; et étudier certaines conditions pour qu'une éducation à l'environnement et au développement durable sur ces questions n'en reste pas à des propos dogmatiques mais soit une véritable formation émancipatrice aux enjeux et aux choix.

Nous avons repéré trois entrées, complémentaires, pour aller dans ces directions : le dépassement d'une problématisation fonctionnaliste séquentielle, l'entrée dans une problématisation historique épistémologiquement contrôlée par le principe de l'actualisme, et l'approche d'un fonctionnement de systèmes complexes ayant une histoire et pouvant passer plus ou moins brusquement d'un régime à un autre.

Le projet, qui doit se penser sur l'ensemble du curriculum, est ambitieux, certes ; et l'adoption d'une démarche d'investigation en est à la fois une condition de possibilité et une difficulté supplémentaire. En tout cas cela demande de lever au moins deux verrous didactiques.

Le premier concerne le choix des objectifs d'un enseignement scientifique et d'une éducation à l'environnement qui portent sur les évolutions climatiques. S'agit-il de convaincre au plus court les élèves de la nécessité des choix du développement durable ? Ou veut-on de leur donner les moyens de comprendre – du point de vue des sciences de la nature qui doit être nécessairement complété par d'autres approches (anthropologiques, sociologiques, économiques…) – ce qui se joue dans les choix politiques du développement durable (ce que l'on sait, ce qui est prévisible ou non, la question de la contingence dans l'évolution des systèmes, etc.) ? Les préconisations officielles insistent bien sur le fait qu'il s'agit d'éduquer au choix et non pas de choisir à la place des futurs citoyens. Cependant, devant la difficulté didactique de cette orientation, due notamment à la complexité des modèles en jeu, le risque est grand, même avec les élèves les plus âgés, de rester dans un entre-deux. Ainsi, le programme de Terminale scientifique français (2011) inclut-il, dans la partie spécialité destinée aux seuls élèves choisissant la spécialité SVT, un thème sur les « Enjeux planétaires contemporains ». On voit, dans les pages des manuels correspondants, des « activités » proposées qui font jouer tous les éléments que nous avons rencontrés ci-dessus : changements climatiques et évolution atmosphérique au quaternaire, importance des paramètres astronomiques, effets de serre bien expliqués par des bilans radiatifs à l'*équilibre.* Mais les investigations proposées aux élèves sont de l'ordre du constat à partir de l'analyse des documents et ne relèvent pas de la construction d'un problème scientifique et d'un travail de modélisation. Ainsi, pour prendre un exemple simple, le manuel Belin (Dreyer, dir., 2012, p. 106-107) propose-t-il un tableau qui, pour chaque gaz à effet de serre (GES), indique le temps de résidence dans l'atmosphère, l'efficacité radiative, et le PGR (potentiel de réchauffement global) à 20 et 100 ans. Deux autres documents sont joints : un tableau qui représente la concentration de ces GES en 1750 et 2011, et un graphique qui donne les émissions anthropiques par année des GES. On a donc un ensemble de données assez compliqué et intéressant ; notons que, dans les deux tableaux, les données pour

l'eau sont notées « non calculées » et « difficilement évaluables ». La question posée sur ces documents est : « *montrez que les activités humaines sont à l'origine d'une modification du forçage radiatif dû au GES et précisez la contribution des différents GES* ». Si cette question peut présenter une certaine difficulté de par l'ensemble de données à prendre en compte (lecture de tableaux), elle ne demande pas de développer les problèmes qui organisent les questions d'évolution climatiques. Les élèves ont seulement besoin d'une certaine habileté à lire les tableaux. C'est donc une activité qui court-circuite toute véritable investigation. En fait les données ne permettent pas de répondre à la question (corrélation n'est pas causalité), sauf à se laisser guider par le contrat didactique – « la réponse est comprise dans les données que l'on nous donne » – et la question de la non prise en compte de la vapeur d'eau (qui renvoie à des questions de cycle et de régulation) ne peut pas être posée. On pourrait prendre bien d'autres exemples. Les élèves n'ont jamais à développer les problèmes qui constituent le cœur de la question.

Ce genre de documents et de questions est idéal pour aller vite à la synthèse voulue en « mettant les élèves en activité » mais ne permet pas de travailler des problèmes scientifiques ni de penser de manière raisonnée des questions environnementales.

Dit autrement, cette « activité » ne permet ni d'accéder à des savoirs scientifiques ni (mais c'est la même chose) de se doter de repères scientifiques pour faire des choix. Remarquons cependant que cet état de fait n'est pas propre aux enseignements sur les « éducations à » dans les manuels de SVT du secondaire.

Le second verrou didactique relève de questions curriculaires. Si concilier démarche d'investigation et étude des contributions scientifiques aux questions portant sur l'évolution climatique en fin de lycée n'est pas simple, comment les penser tout au long de la scolarité ? Dire que ces questions ne peuvent être abordées qu'en fin d'étude secondaire serait un non-sens didactique aussi bien en ce qui concerne la formation scientifique que la formation citoyenne. Mais le risque est grand de penser simplification, pour que ces questions puissent être abordées à tel niveau, et d'aller vers la présentation d'évidences non questionnées et tombant sous le sens commun. Nous retrouvons là un problème didactique que nous avions déjà pointé pour l'enseignement de l'évolution et la génétique (Orange, 2008, 2011) et qui vaut pour toute question scientifique ayant une résonnance sociétale. Le travail didactique en sciences de la nature de ce problème nous semble devoir partir de la question suivante : quelle rupture avec la pensée commune sur telle question est-il possible de provoquer à tel niveau scolaire ?

Travailler sur ces verrous est pour nous nécessaire, car si les élèves ne comprennent pas comment les sciences de la nature problématisent la question des changements climatiques, ils n'entendront les débats entre le GIEC et les climatosceptiques que comme un débat d'opinions. Soit alors ils se rallient à l'opinion majoritaire, car la plus en vue dans les médias, ce qui met à mal la fonction émancipatrice de l'Ecole ; soit, en réaction et dans le cadre d'une théorie du complot, ils adhèrent à la thèse climatosceptique. Bien sûr on ne peut pas demander aux élèves de trancher scientifiquement par eux-mêmes mais l'accès aux problématisations scientifiques en jeu doit leur permettre de comprendre la complexité du problème, le sérieux des arguments et de prendre conscience de l'intelligence d'un principe de précaution, non pas fondé sur une crainte généralisée, mais sur des études sérieuses et la raison.

Références

Agassiz, L. (1837). Discours prononcé à l'ouverture des séances Société Helvétique des Sciences Naturelles, à Neuchatel le 24 Juillet 1837. *Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles*. Repéré à http://books.google.com/books?id=e_taAAAAQAAJ&pg=PR5. (consulté le 1/9/2016)

Arrhenius, S. (1896). On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, *5*(41), 237-276. Repéré à http://archive.wikiwix.com/cache/?url=http%3A%2F%2Fwww.globalwarmingart.com%2Fimages%2F1%2F18%2FArrhenius.pdf

Astolfi, J.-P. (2008). *La saveur des savoirs*. Paris : ESF.

Bachelard, G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris : Vrin.

Bachelard, G. (1949). *Le rationalisme appliqué*. Paris : P.U.F.

Balibar, S. (2015, octobre-décembre). Climatosceptiques : quels arguments leur opposer. *Dossier pour la science*, 89, pp. 96-100.

Colin, P., & Tran Tat, N. (2011). Difficile compréhension de l'effet de serre : comment concevoir un parcours d'enseignement-apprentissage au lycée ? *RDST*, *4*, 109-138.

Coquidé, M., Fortin, C., & Rumelhard (2009). L'investigation : fondements et démarches, intérêts et limites. *ASTER*, *49,* 51-78.

Courtillot, V. (2009). *Le réchauffement climatique. Conférence donnée le 7 juin 2009 dans le cadre des 2e Journées scientifiques de l'Université de Nantes.* Repéré à https://www.youtube.com/watch?v=uXeRbbM2AjY.

Courtillot, V. (2009). *Nouveau voyage au centre de la Terre*. Paris : Odile Jacob.

Courtillot, V. (2002). La dynamique du globe contrôle-t-elle l'évolution des espèces ? In Y. Michaud (Ed.), *Université de tous les savoirs, 15, Le globe*, 9-26.

Courtillot, V. (1995). *La vie en catastrophes*. Paris : Fayard.

Cros, S. (2011). De l'influence de l'acide carbonique de l'air sur la température terrestre. Analyse du texte d'Arrhenius. *Bibnum*. Repéré à https://www.bibnum.education.fr/sciencesdelaterre/climatologie/de-l-influence-de-l-acide-carbonique-de-l-air-sur-la-temperature-terr.

Dercourt, J., Paquet, J., Thomas, P., & Langlois, C. (2006). *Géologie, Objets, méthodes et modèles*. Paris : Dunod.

Dreyer, M. (Ed.). (2012). *SVT Terminale S, Spécialité.* Paris : Belin.

Dufresne, J.-L. (2009). *L'effet de serre, sa découverte, son analyse par la méthode des puissances nettes échangées et les effets de ses variations récentes et futures sur le climat terrestre* (Mémoire présenté pour obtenir l'HDR, Université Pierre et Marie Curie, France).

Ellenberger, F. (1994). *Histoire de la géologie (tome 2)*. Paris : Technique et Documentation (Lavoisier).

Fabre, M., & Orange, C. (1997). Construction des problèmes et franchissements d'obstacles. *ASTER*, *24,* 28-38.

Fabre, M. (1999). *Situations-problèmes et savoir scolaire*. Paris : P.U.F.

Fourier, M. (1824). *Mémoire sur les températures du globe terrestre et les espaces planétaires*. Paris : Académie des sciences. Repéré à http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k32227.image.r=memoires+de+l%27academie+des+sciences.f808.langEN

France : MENESR – DGESCO. (2015). Instruction relative au déploiement de l'éducation au développement durable dans l'ensemble des écoles et établissements scolaires pour la période 2015-2018. Circulaire n° 2015-018 du 4-2-2015.

France : MEN – DGESCO. (2011). Enseignement spécifique et de spécialité des sciences de la vie et de la Terre de la série scientifique – classe terminale. Bulletin officiel spécial n°8 du 13 octobre 2011.

Gohau, G. (1987). *Une histoire de la géologie*. Paris : Seuil, collection Point Seuil.

Gohau, G. (1997). Naissance de la méthode « actualiste » en géologie. In G. Gohau (Ed.), *De la géologie à son histoire* (p. 139-149). Paris : CTHS.

Gould, St. J. (1991, éd. originale 1989). *La vie est belle.* Paris : Seuil.

Hallam, A. (1989). *Great geological controversies* (2nd edition). Oxford : Oxford University Press.

Hooykaas, R. (1970). *Continuité et discontinuité en géologie et biologie*. Paris : Seuil . (1963, *The principle of uniformity in geology, biology and theology*. Leiden : E.J. Brill., pour l'édition anglaise)

Kandel, R. (2010). *Le réchauffement climatique.* Paris : PUF.

Kuhn, T. (1983). *La structure des révolutions scientifiques*. Paris : Editions Champs Flammarion.

Le Treut, H., & Jancovici, J.-M. (2004). *L'effet de serre, Allons-nous changer le climat ?* Paris : Champ Flammarion.

Legardez, A., & Simonneaux, L. (2006). *L'école à l'épreuve de l'actualité, enseigner les questions vives*. Paris : ESF Editeur.

Martinand, J.-L. (1992). Présentation. In J.-L. Martinand (Ed.), *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP.

Orange, C. (1997). *Problèmes et modélisation en biologie : quels apprentissages pour le lycée ?* Paris : P.U.F.

Orange, C. (2008). Les fonctions épistémologiques de l'évolution dans les programmes français de sciences de la vie et de la Terre. Dans M. Coquidé, & S. Tirard (Eds.), *L'évolution du vivant* (p.35-43). Paris : Vuibert Adapt.

Orange, C. (2011). Postface. Dans M. Coquidé, M. Fuchs-Gallezot, & S. Tirard, *La génomique, entre science et éthique, de nouvelles perspectives à enseigner* (p.241-246). Paris : Vuibert-ADAPT.

Orange, C. (2012). *Enseigner les sciences : problèmes, débats et savoirs scientifiques en cla*sse. Bruxelles : De Boeck.

Orange Ravachol, D., & Beorchia, F. (2011). Principes structurants et construction de savoirs en sciences de la vie et de la Terre. *Education et didactique, 5*(1), 7-28.

Orange Ravachol, D. (2005). Problématisation fonctionnaliste et problématisation historique en Sciences de la Terre chez les chercheurs et chez les lycéens. *ASTER*, *40*, 177-204.

Orange Ravachol, D. (2007). Des mises en histoire aux savoirs scientifiques : le cas de lycéens confrontés à quelques problèmes de tectonique des plaques. *ASTER*, *44*, 41-68.

Orange Ravachol, D. (2012). *Didactique des SVT, entre phénomènes et événements*. Rennes : PUR.

Orange, C., & Orange, D. (1995). Géologie et biologie : analyse de quelques liens épistémologiques et didactiques. *ASTER*, *21,* 27-49.

Paillard, D. (2015). Quaternary glaciations : from observations to theories. *Quaternary Science Reviews, 107,* 11-24

Popper, K. (1991, éd. originale 1972). *La connaissance objective*. Paris : Aubier.

Reboul, O. (1992). *Les valeurs de l'*éducation. Paris : P.U.F.

Rojat, D. *La démarche d'investigation*. Site « Main à la Pâte ». Repéré à http://www.fondation-lamap.org/fr/page/17793/la-demarche-dinvestigation (consulté le 10/9/2016).

Viennot, L. (1993). Temps et causalité dans les raisonnements des étudiants en physique. *Didaskalia*, *1,* 13-27.

Viennot, L. (1996). *Raisonner en Physique*. Bruxelles : De Boeck.

Viennot, L. (2007). La physique dans la culture scientifique : entre raisonnement, récit et rituels. *ASTER*, *44*, 23-40.