
UN ENSEIGNEMENT CO-DISCIPLINAIRE DE LA MODELISATION DU CYCLE DU CARBONE

Michèle PRIEUR, Gilles ALDON
INRP

Remerciements à
Catherine VAUTIER
lycée du Val de Saône,
Trévoux (01)

Résumé : Le travail présenté dans cet article a été conduit dans le cadre d'un enseignement scientifique expérimental en classe de seconde. Des enseignants de sciences de la vie et de la Terre, de sciences physiques et de mathématiques ont collaboré avec l'équipe EducTice de l'INRP pour concevoir des situations d'apprentissage permettant d'engager les élèves dans un travail d'investigation scientifique fondé sur la modélisation numérique du cycle du carbone. Les situations présentées montrent l'importance de la complémentarité des disciplines tant sur le plan des concepts que des démarches et des outils.

Cet article présente une expérience menée dans un enseignement scientifique en classe de seconde sur la modélisation numérique du cycle du carbone. Il s'attache à mettre en relief la nécessaire co-disciplinarité et la place de la modélisation dans le cadre d'un travail d'investigation scientifique pour étudier le problème du rôle des émissions anthropiques de CO₂ dans le réchauffement climatique de la planète.

1. Le contexte d'étude

Le contexte de recherche

Le travail présenté dans cet article est conduit par l'équipe EducTice dans le cadre du projet de recherche P2S-CORISE¹ (COncEption de Ressources pour l'Investigation Scien-

¹ <http://eductice.inrp.fr/EducTice/projets/corise/p2s>

tifique dans l'Enseignement). Ce projet vise à identifier les situations à mettre en place dans ou hors la classe et à produire des ressources pour l'enseignement afin que des élèves puissent s'engager dans un travail d'investigation scientifique de manière autonome. Cette étude prolonge des travaux antérieurs réalisés au sein des équipes EducTice et ACCES, en mathématiques sur la recherche de problèmes (Aldon, 2009, Aldon & al., 2010) et en sciences de la vie et de la Terre sur la conduite d'investigation (Sanchez, Prieur 2006), mais aussi sur les liens existant entre investigation scientifique et modélisation (Sanchez 2008) et sur la modélisation numérique du cycle du carbone en classe de seconde (Barrère, Prieur et al. 2007). Cette étude a été conduite en collaboration avec des professeurs de mathématiques et de sciences expérimentales associés à l'INRP.

Le contexte d'enseignement

Dans le cadre des expérimentations de l'article 34 de la loi d'orientation et de programme pour l'avenir de l'école (BO, 2005), l'académie de Lyon propose un enseignement expérimental de Pratiques Scientifiques en classe de Seconde (P2S). Il s'agit d'un enseignement pluridisciplinaire qui vise à redynamiser l'enseignement des sciences au lycée en engageant les élèves dans « une démarche de projet, basée sur une pédagogie de résolution de problèmes scientifiques »². Au lycée du Val de Saône de Trévoux (01), cet enseignement P2S prend la place d'un enseignement de détermination à raison de trois heures hebdomadaires.

Afin de diminuer les contraintes de gestion du temps, l'équipe enseignante a fait le choix de travailler toute l'année sur un seul

sujet, celui du réchauffement climatique de la planète. Un effectif de 18 élèves a favorisé les activités expérimentales et l'utilisation des TIC. Ce contexte d'enseignement est favorable à la conduite de résolution de problème scientifique attribuant aux élèves une part d'autonomie et d'initiative.

2. Un travail d'investigation co-disciplinaire s'appuyant sur la modélisation

Une investigation fondée sur la modélisation

La problématique étudiée par les élèves est celle du réchauffement climatique et de la responsabilité de l'homme dans le réchauffement observé au niveau de la planète. La compréhension des démarches et des arguments scientifiques qui fondent les prévisions climatiques nécessite la conduite d'un travail d'investigation fondé sur la modélisation du cycle du carbone et la simulation de différents scénarios socio-économiques caractérisés par leurs émissions anthropiques de CO₂. Ce thème d'étude permet de mettre la modélisation et l'utilisation des modèles au cœur de l'activité d'investigation des élèves. Cet enseignement est conduit avec l'objectif que les modèles deviennent des outils scientifiques pour penser, expliquer, prévoir et non des boîtes noires dont le fonctionnement reste inaccessible. Les séances de classe décrites dans la 3ème partie s'attachent à montrer des conditions et des modalités de cet enseignement.

Le sujet d'étude choisi est un sujet de société qui mobilise la communauté scientifique et qui est très largement relayé

2 Lettre de cadrage de l'Inspection Pédagogique Régionale 2008

par les médias. Il permet d'utiliser des outils issus de la recherche (banque de données, logiciel de modélisation). En s'appuyant sur les travaux de François Lombard (2009) nous faisons l'hypothèse que l'authenticité du problème scientifique et de ses méthodes d'étude sont source de motivation pour les élèves.

Une problématique nécessitant un travail co-disciplinaire

Le cycle du carbone mis en jeu dans la problématique du réchauffement climatique est un cycle du carbone court impliquant des transferts de carbone entre les compartiments atmosphère, biosphère et hydrosphère. Les flux entre ces compartiments mettent en jeu des processus physiques, chimiques et biologiques. Le paramétrage d'un modèle numérique permettant d'évaluer la quantité de carbone dans les différents compartiments en fonction du temps nécessite un travail mathématique. Les tâches à réaliser par les élèves mobilisent donc des concepts et des méthodes des sciences physiques et chimiques (SPC), des sciences de la vie et de la Terre (SVT) et des mathématiques pour comprendre les phénomènes en jeu, construire des modèles et effectuer des simulation sur ordinateur.

Les mathématiques, au même titre que les autres disciplines sont sollicitées à plusieurs reprises pour résoudre le problème général. Cette complémentarité entre les mathématiques et les autres disciplines peut-être illustré par l'exemple suivant. L'étude de la température terrestre et des émissions de CO₂ liées aux activités humaines au cours du temps, montre une relation entre ces deux facteurs. Un travail mathématique permet d'affirmer qu'il s'agit d'une corrélation et permet de la

quantifier, mais en aucun cas les mathématiques ne peuvent apporter des arguments permettant de transformer cette corrélation en causalité. Les SVT et SPC pourront questionner le problème de la causalité du rôle des émissions de CO₂ sur le réchauffement climatique mesuré depuis la révolution industrielle. Les mathématiques ne constituent pas un simple outil permettant de fournir des données aux autres disciplines mais plus profondément, un outil pour aider à la compréhension.

Cet enseignement à plusieurs disciplines est conçu comme un enseignement co-disciplinaire (Blanchard-Laville 2000). Un tel enseignement vise à favoriser les complémentarités de chaque discipline en portant des regards croisés sur les objets étudiés et les méthodologies mises en œuvre sans chercher à gommer leurs spécificités. Il nécessite un travail collaboratif des enseignants pour organiser le travail des élèves tant sur un plan pédagogique que scientifique.

L'élaboration d'une progression commune

Le diagramme de la figure 1 constitue une carte heuristique qui articule les objets scientifiques à étudier par les différentes disciplines pour résoudre la problématique générale. Il a été élaboré par les enseignants à l'issue d'une année de tâtonnement qui a permis aux enseignants d'identifier les concepts scientifiques et la place des différentes disciplines. Il constitue aujourd'hui un outil pour construire une progression annuelle.

Les élèves s'approprient les trois grands axes de travail, "réchauffement climatique de la planète", "relation entre la température terrestre et la teneur de l'atmosphère en CO₂",

UN ENSEIGNEMENT CO-DISCIPLINAIRE DE
LA MODELISATION DU CYCLE DU CARBONE

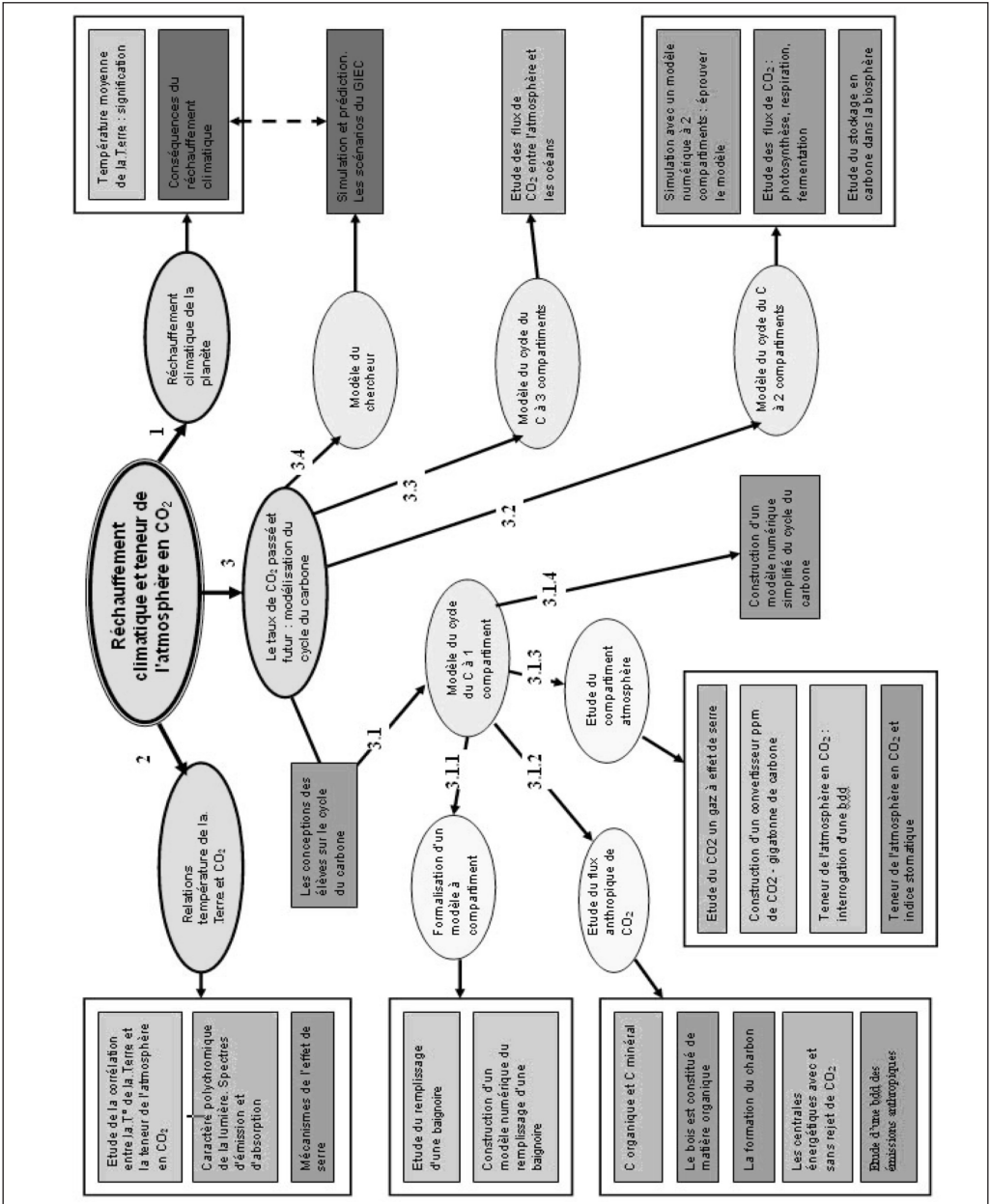
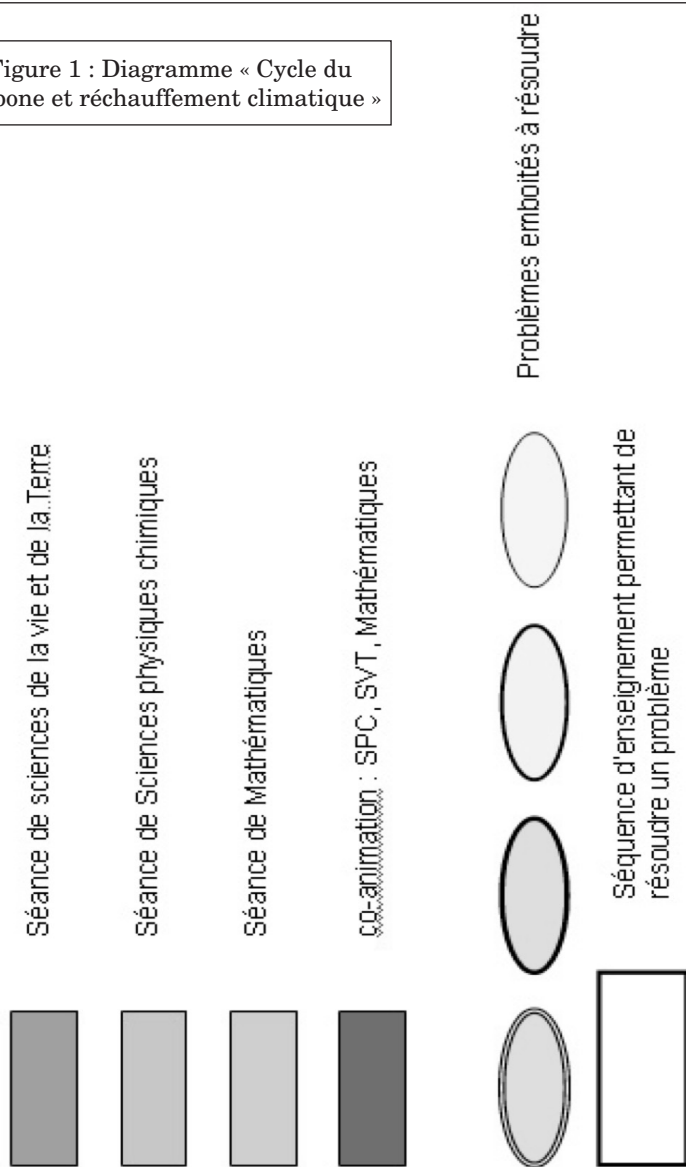


Figure 1 : Diagramme « Cycle du carbone et réchauffement climatique »



L'étude de certaines questions ont été abordées en co-animation par plusieurs disciplines, seule la discipline dominante a été codée par une couleur.

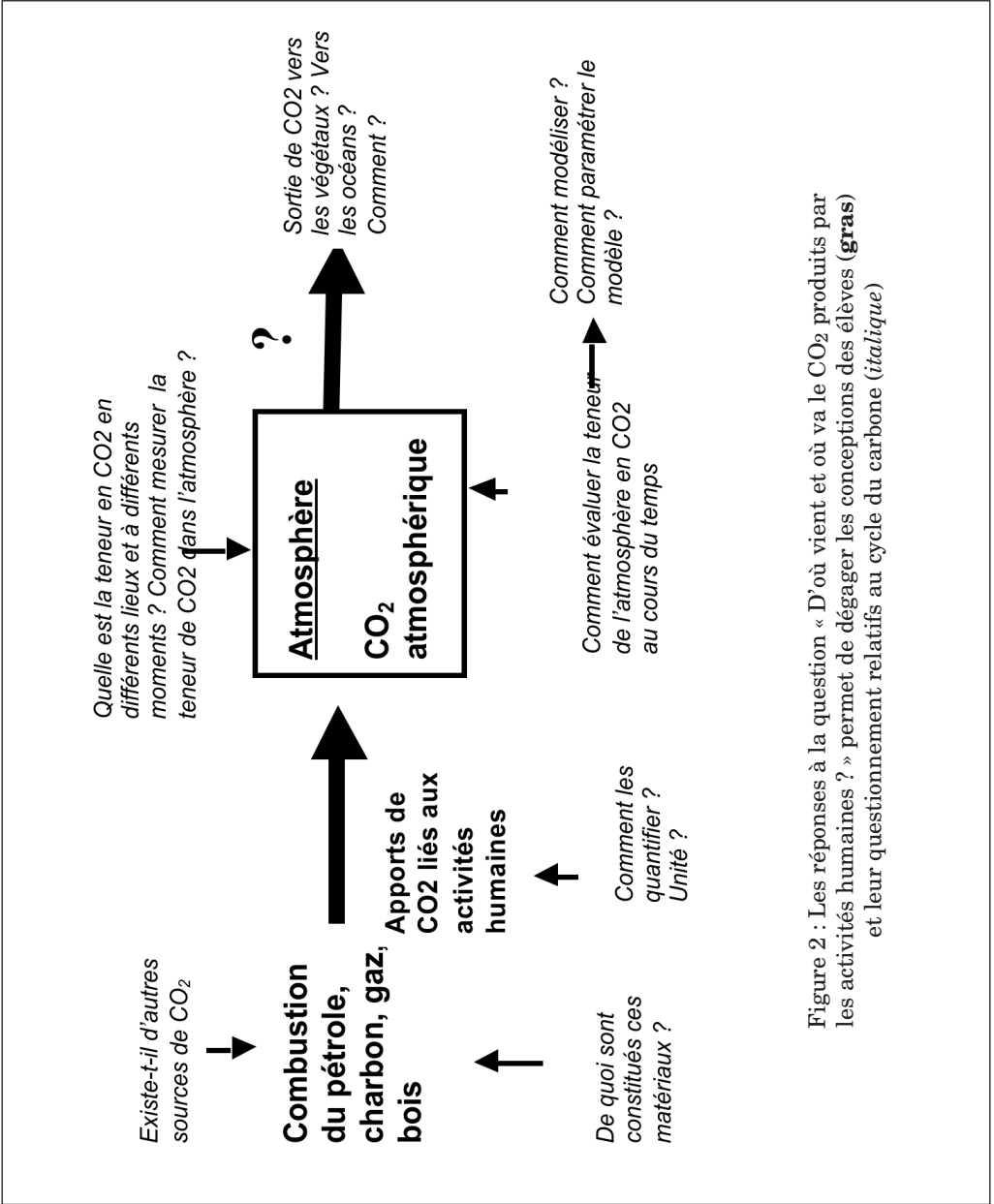


Figure 2 : Les réponses à la question « D'où vient et où va le CO₂ produits par les activités humaines ? » permet de dégager les conceptions des élèves (**gras**) et leur questionnement relatifs au cycle du carbone (*italique*)

“modélisation du cycle du carbone” (points 1 à 3 de la figure 1) à partir d’une séance de *brainstorming* sur les idées évoquées par l’expression “Réchauffement climatique et teneur de l’atmosphère en CO₂”. Dans un deuxième temps, l’élaboration de la progression relative à la question centrale de la modélisation du cycle du carbone s’appuie sur les conceptions initiales des élèves. La mise en commun de leurs réponses à la question « D’où vient et où va le CO₂ produits par les activités humaines ? » soulève des problèmes qui guident l’investigation des élèves (figure 2).

Le choix et l’ordre des différents problèmes est une négociation entre les enseignants et les élèves, elle s’appuie sur les questionnements des élèves, leur motivation, le caractère indispensable ou accessoire des savoirs en jeu pour la résolution de la problématique et enfin des contraintes de temps ou de matériel.

L’ensemble de ces choix didactiques et pédagogiques permettent d’élaborer une progression pluridisciplinaire, adaptée aux savoirs en jeu, tout en respectant les besoins et les motivations des élèves. Ces choix sont ainsi favorables à une dévolution par les élèves des différents problèmes à résoudre.

3. Une séquence co-disciplinaire en mathématiques et sciences de la vie et de la Terre

La construction d’un modèle numérique du cycle du carbone par les élèves est motivée par l’intérêt de pouvoir calculer la teneur de l’atmosphère en CO₂ pour des périodes futures et ainsi pouvoir effectuer des prévisions sur le réchauffement climatique. L’ana-

lyse des premières étapes de la construction de ce modèle permet d’exemplifier et de montrer plus finement la complémentarité qui se joue dans ce travail co-disciplinaire d’investigation scientifique.

Un appui sur les conceptions des élèves

Le travail préalable sur les conceptions initiales montre que tous les élèves sont en accord avec le fait que le CO₂ vient de la combustion du bois et des hydrocarbures et qu’il va dans l’atmosphère. Très peu d’élèves évoquent ou acceptent l’idée que le CO₂ puisse passer dans d’autres compartiments comme la biosphère ou l’océan. Le premier modèle du cycle du carbone qui fait alors consensus au sein de la classe est un modèle possédant un seul compartiment, celui de l’atmosphère et un flux entrant celui des émissions de CO₂ (en gras sur la figure 2).

Un détour par une analogie en mathématiques

La construction d’un modèle numérique du cycle du carbone met en jeu une modélisation des systèmes à compartiments (figure 3). Afin d’aider les élèves à mieux appréhender la complexité de ce type de modélisation, il leur est proposé de faire une analogie entre l’apport de CO₂ anthropique dans l’atmosphère et le système physique de remplissage en eau d’une baignoire. Cet exemple concret, facilement accessible à des élèves, permet de découvrir, d’explicitier et de manipuler les modèles de systèmes à compartiments.

Ce choix repose sur les résultats d’une recherche antérieure conduite au sein des

Principe de la modélisation des systèmes à compartiments

La notion de système à compartiments est utilisée pour désigner une vaste classe de systèmes dont la dynamique peut être décrite par des équations de bilan. Elle trouve des applications dans de nombreux domaines des sciences de l'ingénieur mais aussi en sciences économiques et sociales.

Un compartiment est un réservoir conceptuel dont le contenu (matière, énergie, monnaie, population ...) est quantifiable. Les flux d'alimentation et de soutirage du compartiment sont exprimés en quantité de contenu par unité de temps. Ces flux sont toujours positifs par convention.

Figure 3 : principe de la modélisation des systèmes à compartiments
(extrait du cours de l'Ecole Polytechnique de Louvain,
département d'ingénierie mathématique
<http://www.inma.ucl.ac.be/INMA2370/cours/chap4.pdf>)

équipes EducTice et ACCES (Barrère, Prieur et al. 2007) qui a montré qu'une telle modélisation pose différentes difficultés aux élèves. Elle nécessite en effet de maîtriser les concepts qui y sont attachés : compartiment, flux, système ouvert ou fermé ; de connaître leur représentation symbolique ; de comprendre les calculs nécessaires au paramétrage du modèle ; de se familiariser avec les fonctionnalités et l'ergonomie du logiciel de modélisation.

Un premier travail conduit avec les élèves a donc consisté à construire un modèle permettant de comprendre le fonctionnement de sa programmation en partant d'un exemple issu de la vie quotidienne, le remplissage d'une baignoire (figure 4). L'objectif était d'une part de montrer les hypothèses nécessaires pour la mise en oeuvre du modèle et d'autre part de permettre aux élèves de comprendre à partir d'un travail sur un tableur le fonctionnement du logiciel Vensim ple® qu'ils auraient à utiliser par la suite.

Les modèles ont été construits sur des modèles discrets pour plusieurs raisons, la plus importante étant qu'un modèle continu débouche sur l'écriture puis la résolution d'une équation différentielle qui ne pouvait, bien sûr, pas être abordées en classe de seconde.

Dans un premier temps, et pour fixer le vocabulaire utilisé, on suppose qu'il n'y a pas d'évacuation ; Q représentant la quantité d'eau dans la baignoire est une fonction du temps, croissante et dépend du débit : $Q(t + 1) = Q(t) + A$, où A représente l'apport d'eau pour une unité de temps.

Le tableur permet alors de déterminer, en fonction de la valeur de A et de la capacité de la baignoire, à quel moment cette dernière déborde.

La formule suivante, lorsque la bonde est ouverte, est facilement écrite par les élèves :

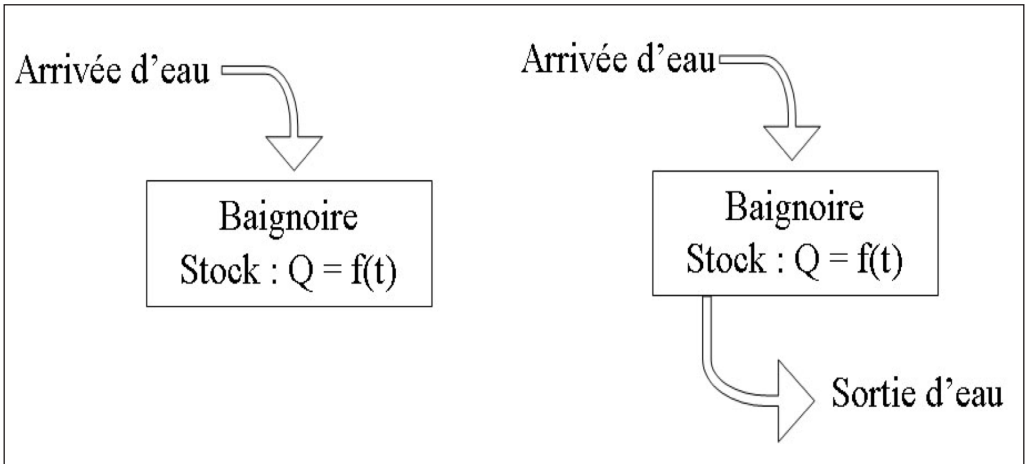


Figure 4 : représentation du modèle de remplissage de la baignoire avec et sans évacuation

$Q(t + 1) = Q(t) + A - E$ par unité de temps. Voici alors un extrait de la fiche élève :
où E représente la quantité d'eau évacuée

Le problème consiste maintenant à préciser A et E.

On va supposer que l'apport d'eau, A, est constant.

On suppose ensuite que l'évacuation, E, est une fonction linéaire : $E = k \cdot Q$

k est une constante et Q la quantité d'eau à l'instant t . Par exemple, on choisit $k = 0,5$ dans le cas où la moitié de la quantité d'eau s'évacue.

La relation (1) devient alors : $Q(t + 1) = Q(t) + A - k \cdot Q(t)$

Soit encore $Q(t + 1) = A + (1 - k) \cdot Q(t)$

Supposons que la quantité d'eau initiale soit de 50 L et que l'apport d'eau soit de 3L, comment choisir k pour que la quantité d'eau ne dépasse jamais 85 L dans la baignoire ?

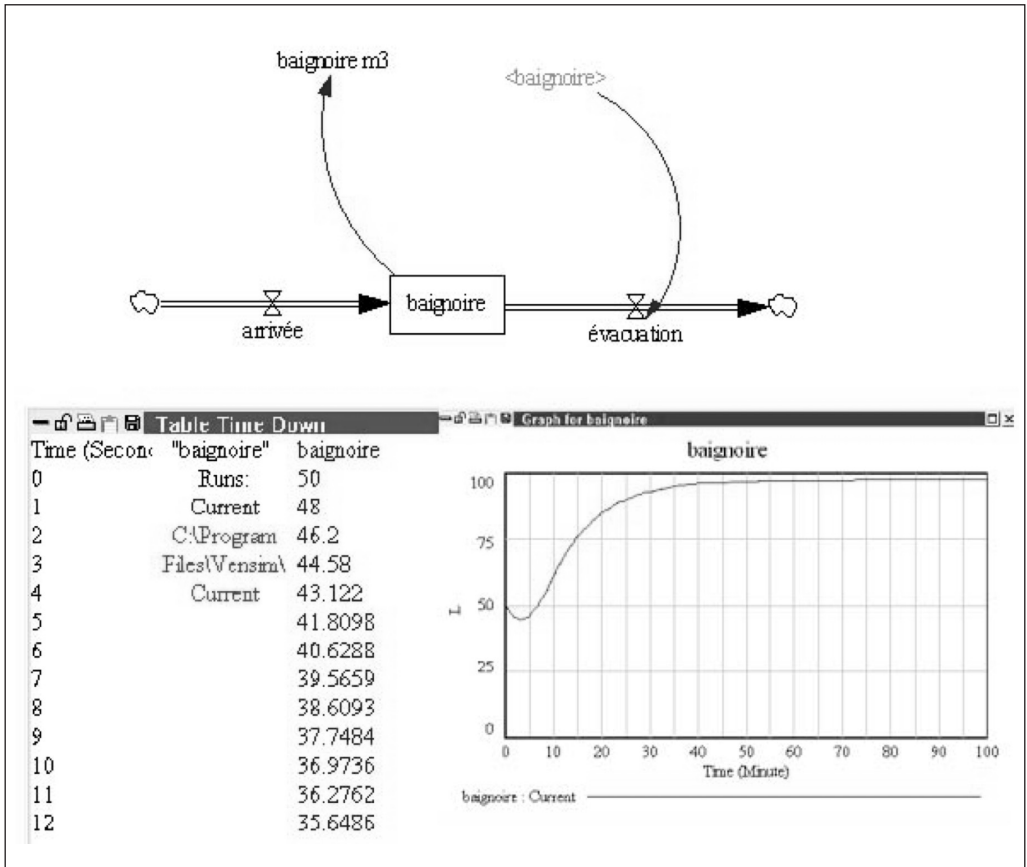


Figure 5 : Modèle de la baignoire construit
avec le logiciel Vensim ple®
et résultats de la simulation

Le problème a d'abord été traité avec un tableur, puis avec le logiciel Vensim ple®. Les résultats de la simulation obtenue avec le logiciel ont été comparés aux valeurs calculées par le tableur de façon à dégager les spécificités de chacun des logiciels (figure 5). L'objectif de cette activité n'était pas de

confronter le modèle mathématique à la réalité, mais plutôt de comprendre que dans l'élaboration d'un modèle il est nécessaire de faire des hypothèses et de les tester. Ainsi, le modèle construit demanderait à être confronté à la réalité, puis affiné, modifié en s'appuyant sur des résultats phy-

siques (ici, la loi de Toricelli). Le travail en mathématiques a donc permis aux élèves de comprendre la signification d'une programmation compartimentale, et ainsi d'ouvrir quelque peu les boîtes noires proposées par le logiciel Vensim. Ce travail permet ainsi une utilisation plus sereine de ce logiciel difficile d'accès et facilite par la suite l'utilisation de modèles à plusieurs compartiments.

La construction d'un modèle numérique simplifié du cycle du carbone en SVT

Le travail ainsi effectué en mathématique est réinvesti en SVT pour construire avec le même logiciel un premier modèle simplifié du cycle du carbone pour la période 1991-2000. Ce modèle qui s'appuie sur les conceptions initiales des élèves possède un compartiment, l'atmosphère et un flux entrant, les émissions de CO₂ liées aux activités humaines.

Dans des activités préalables, guidées par les questions soulevées lors de la séance sur les conceptions (figure 2), les élèves ont découvert et appris à utiliser des banques de données sur les émissions de CO₂ liés aux activités humaines (*University of North Dakota*) et sur la teneur de l'atmosphère en CO₂ (*World data centre for grennhouse gases*). Le manque de cohérence entre les unités utilisées dans ces deux bases de données (teneur en CO₂ de l'atmosphère exprimée en parties par million, quantité de carbone rejetée par les activités humaines exprimée en Giga tonnes de carbone) motive la construction d'un convertisseur ppm -Gt de C avec les enseignants de mathématiques et de SPC.

Les élèves s'appuient alors sur l'ensemble des connaissances et savoir faire dévelop-

pés dans les différentes disciplines pour s'engager en toute autonomie dans la construction d'un modèle numérique du cycle du carbone.

L'identification et la recherche des valeurs nécessaires au paramétrage (teneur initiale de l'atmosphère en CO₂, quantité de carbone émise par les activités humaines pour la période étudiée, choix des unités), la construction et le paramétrage du modèle avec le logiciel Vensim ple® sont sous la responsabilité des élèves.

Mise à l'épreuve du modèle construit

La simulation avec ce modèle numérique du cycle du carbone donne par la suite la possibilité de le faire fonctionner et d'éprouver sa validité en confrontant les valeurs calculées par le modèle aux valeurs mesurées sur le terrain (valeurs issues des banques de données). Cette confrontation montre un écart qui permet d'exercer un regard critique sur le modèle construit. Les élèves identifient la nécessité de modifier le modèle en ajoutant un flux de CO₂ sortant (figure 7).

Par la suite, un travail de simulation avec des modèles possédant d'autres compartiments (biosphère, litière, océan) permet de comprendre les rôles de stockage de carbone joué par ces compartiments. In fine, les élèves utilisent un modèle numérique issu de la recherche pour effectuer des simulations et discuter les différents scénarios du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). La diversité des simulations obtenues en fonction des scénarios socio-économiques implémentés permet d'exercer un regard critique sur les évolutions présumées du climat.

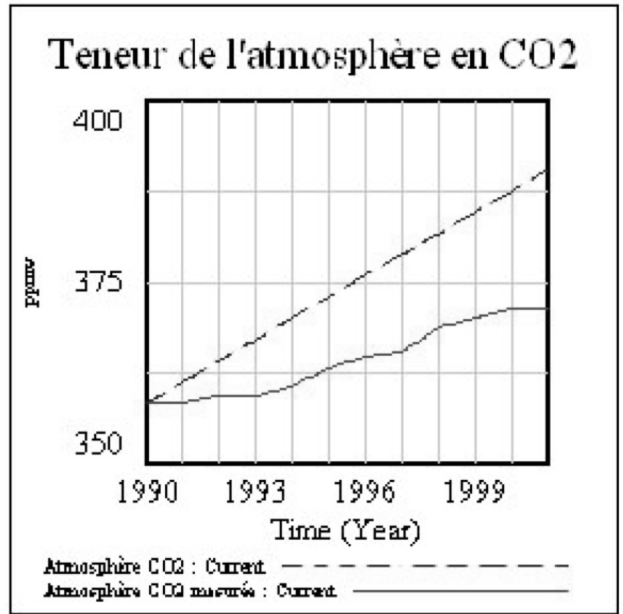
The diagram on the left shows a flow from a cloud labeled 'Emission CO2' to a box labeled 'Atmosphère C'. A double-headed arrow between them is labeled '6.4'. A curved arrow points from the 'Atmosphère C' box to a larger box labeled 'Atmosphère CO2'.

The software interface on the right is titled 'Editing equation for - emission CO2'. It features a text input field containing '6.4', a numeric keypad, and various control buttons. The 'Type' dropdown is set to 'Constant'. The 'Units' dropdown is set to 'Gt de C/an'. The interface includes buttons for 'OK', 'Cancel', 'Check Syntax', 'Check Model', 'Delete Variable', 'Minimum Value', 'Maximum Value', and 'Increment'. The 'Errors' section shows 'Equation OK'.

Figure 6 : Construction d'un modèle numérique du cycle du carbone avec le logiciel Vensim ple®. A gauche, construction du compartiment atmosphère et du flux des émissions de CO₂, construction d'un convertisseur permettant de transformer les teneurs de l'atmosphère (ppm) en quantité de carbone (Gt de C) ; à droite, fenêtre de paramétrage du flux des émissions de CO₂ : les élèves renseignent la valeur du flux (6,4), l'unité du flux (Gt de C), le type de flux (constant).

Figure 7 : Comparaison entre l'évolution de la teneur en CO₂ de l'atmosphère calculée par le modèle (pointillé) et celle mesurée sur le terrain (trait plein).

Ces travaux ont été conduits entre 2005 et 2008, période durant laquelle les résultats du GIEC étaient peu interrogés par la communauté scientifique. En 2010, les controverses soulevées par les climato-sceptiques pourraient permettre d'exercer un regard critique sur les modèles utilisés par les chercheurs du GIEC.



Conclusion

Les situations d'enseignement mises en place sur la modélisation numérique du cycle du carbone montrent la possibilité d'engager des élèves dans un travail d'investigation mobilisant modélisation, simulation et leur attribuant une part d'autonomie et d'initiative. L'explicitation du modèle en jeu (modélisation de systèmes à compartiments), la modélisation sur des exemples concrets et simplifiés (modèle de la baignoire, modèle simplifié du cycle du carbone), permet aux élèves par la suite de manipuler des modèles

complexes issus de la recherche pour mener une investigation scientifique. Ces situations montrent par ailleurs l'importance de la complémentarité des disciplines tant sur le plan des concepts que des démarches et des outils. La mise en œuvre d'un travail co-disciplinaire ne peut être envisagée sans une intense collaboration des enseignants fortement dépendante du contexte et des ressources qui sont à leur disposition pour assurer une continuité et une cohérence dans la conduite de leur enseignement.

Références bibliographiques

Aldon, G., Cahuet, P.-Y., Durand-Guerrier, V., Front, M., Krieger, D., Mizony, M., Tardy, C. (2010). *Expérimenter des problèmes de recherche innovants en mathématiques à l'école*. Cédérom, INRP.

Aldon, G. (2009). A resource to spread maths research problems in the classroom in Durand-Guerrier, V., Soury-Lavergne, S., Arzarello, F. (Eds), *Proceedings of the sixth Congress of the European Society for Research in Mathematics Education*, INRP:Lyon <http://www.inrp.fr/editions/editions-electroniques/cerme6/>

Barrère, J., M. Prieur, et al. (2007). Démarches et outils pour traiter une question d'actualité scientifique au lycée : le réchauffement climatique. XXVIIIème JIES, Chamonix.

Blanchard-Laville, C (2000) De la co-disciplinarité en sciences de l'éducation, *Revue française de pédagogie*, n°132, pages 55-66

Lombard, F. MC. Blatter (2009). Adapting teacher training to new evolution research approaches. BioED 09 CONFERENCE 12-15 Feb 2009 Christchurch, New Zealand
<http://tecfa.unige.ch/perso/lombardf/publications/bioEd09-NZ-II09/lombard-blatter-bioEd09Christchurch-final.pdf>

Sanchez, E. (2008). «Quelles relations entre modélisation et investigation scientifique dans l'enseignement des sciences de la Terre.» *Education & Didactique* 2(2): 97-122.

Sanchez, E. and M. Prieur (2006). Démarche d'investigation dans l'enseignement des sciences de la Terre : activités-élèves et scénarios. Scénariser l'enseignement et l'apprentissage : une nouvelle compétence pour le praticien ?, Lyon, INRP.