



Quelles relations entre modélisation et investigation scientifique dans l'enseignement des sciences de la terre ?

Eric Sanchez

► To cite this version:

Eric Sanchez. Quelles relations entre modélisation et investigation scientifique dans l'enseignement des sciences de la terre ?. *Éducation & Didactique*, 2008, 2 (2), pp.97-122. hal-00528933

HAL Id: hal-00528933

<https://hal.science/hal-00528933>

Submitted on 22 Oct 2010

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

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

QUELLES RELATIONS ENTRE MODÉLISATION ET INVESTIGATION SCIENTIFIQUE DANS L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ?

Éric Sanchez, EducTice-INRP, LEPS, Université de Lyon

Résumé : Cet article vise à discuter les liens entre investigation et modélisation dans l'enseignement des sciences de la Terre. Il s'appuie sur un travail de recherche qui porte sur la mise en œuvre d'une classe de terrain dans l'enseignement secondaire. Il s'agit d'identifier les éléments à prendre en compte pour que les élèves soient en mesure de s'engager dans un travail d'investigation scientifique de manière autonome. Cela nous conduit à décrire une démarche d'investigation comme un ensemble de tâches qui consistent dans la mise en tension des résultats d'investigations empiriques avec les éléments théoriques constitutifs des modèles scientifiques de référence. Les modèles sont ainsi considérés comme des instruments de connaissance permettant aux élèves, dans le cadre de la résolution d'un problème scientifique, de conduire leurs investigations et de donner du sens aux tâches dans lesquelles ils s'engagent.

Mots-clés : Démarche d'investigation, apprentissage par investigation, modélisation, sciences de la Terre, école de terrain

Éric Sanchez

Introduction

L'enseignement des sciences est l'un des principaux facteurs incriminés dans la crise des vocations pour les carrières scientifiques (OCDE, 2006) c'est pourquoi, d'un point de vue institutionnel, de nombreuses voix se sont élevées ces dernières années pour appeler à un renouvellement de cet enseignement. Dès 1996, aux États Unis, le National Research Council (National Committee on Science Education Standards and Assessment, 1996) préconisait de fonder l'enseignement des sciences sur l'élaboration de situations de classe dans lesquelles les élèves soient amenés à conduire leurs propres investigations (*Inquiry*). En France, le terme *investigation* semble avoir été introduit dans l'enseignement par le texte officiel (Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale, 2000) qui définit le Plan de Rénovation de l'Enseignement des Sciences et de la Technologie à l'École (PRESTE). Ce texte définit la démarche à employer à l'école comme « fondée sur le questionnement et sur l'investigation, constitutifs des disciplines scientifiques ». En Europe, le rapport Rocard (2007) est venu compléter cette liste de préconisations institutionnelles en appelant à un renouvellement de l'enseignement des sciences et la mise en œuvre d'un enseignement scientifique basé sur la conduite, par les élèves, de leurs propres investigations.

Les travaux que nous conduisons visent à préciser le sens de *démarche d'investigation* et à identifier les éléments à prendre en compte pour que les élèves soient en mesure de s'engager dans un travail d'investigation scientifique de manière autonome. Nous discutons ici les relations qui existent entre modélisation et investigation scientifique. Nous le ferons en nous appuyant sur des travaux d'épistémologues et de didacticiens qui fondent notre cadre théorique. Nous le ferons également en présentant les résultats de nos propres travaux qui portent sur la conduite d'une classe de terrain¹ dans l'enseignement des sciences de la Terre au lycée. Ces travaux permettent de discuter la place des modèles et de la modélisation au cours des différentes phases de ce travail : préparation des observations à effectuer, recueil des données de terrain et interprétation de ces données.

La modélisation, une démarche partagée par l'ensemble de la communauté scientifique

Pour la douzième édition d'un ouvrage de géologie qui rencontre un grand succès éditorial (Dercourt & Paquet, 2002 ; Dercourt, Paquet, Thomas, & Langlois, 2006), les auteurs ont introduit le terme modèle dans son titre – « Géologie : objets et méthodes » est ainsi devenu « Géologie : objets,

méthodes et modèles ». Ceci témoigne de l'actualité de la question des modèles et de la modélisation pour la discipline. Halloun (2004) avait déjà noté que les démarches suivies par les scientifiques comprennent le plus souvent un travail de modélisation. Ce type de démarche est donc partagé par l'ensemble de la communauté scientifique. De très nombreux travaux d'épistémologie portent sur la question de la modélisation en science, néanmoins, le paragraphe qui suit ne vise pas à passer en revue l'ensemble de ces travaux. Il vise plutôt à identifier quelques lignes de force susceptibles d'éclairer la question de l'utilisation de la modélisation en sciences de la Terre.

Relations modèle-théorie-expérience

Les modèles peuvent être considérés comme des intermédiaires entre les aspects théoriques et expérimentaux de la connaissance. Les travaux de Bunge nous paraissent particulièrement éclairants sur ce point. Selon cet auteur : « on peut dire que la théorie et l'expérience ne se rencontrent jamais en un combat singulier ; leur rencontre se situe à un niveau intermédiaire, en présence d'éléments théoriques et empiriques rajoutés, en présence, en particulier, des modèles théoriques et empiriques décrivant à la fois l'objet de la théorie, le dispositif expérimental employé. » (Bunge, 1975)

Bunge distingue ainsi les *théories générales* qui sont des abstractions produites par la raison et l'intuition potentiellement en mesure de s'appliquer à n'importe quel domaine du réel, les *modèles d'objets* qui représentent les propriétés communes d'un ensemble d'objets et les *modèles théoriques* qui sont produits lorsqu'une *théorie générique* est appliquée sur un *modèle d'objet*. Selon Bunge, un *modèle théorique* occupe une position intermédiaire entre une idéalisation et généralisation produite par la simplification d'objets réels (le *modèle d'objet*), et une théorie. Cette théorie est évaluée sur les succès qu'elle rencontre dans la production de *modèles théoriques* permettant d'établir des prévisions confirmées par les faits d'observation ou d'expérience.

L'un des principaux apports de Bunge pour notre travail est qu'il montre que le *theoretical model* est un outil qui permet de mettre en relation deux registres. Un *registre théorique* composé d'abstractions qui

peuvent s'appliquer à n'importe quel réel et un registre composé d'un modèle d'objet *model object* qui est une idéalisation du réel. Nous retiendrons pour ce dernier le terme de *registre empirique* en insistant sur le fait que ce registre n'est pas donné mais construit à partir d'un prélèvement électif du réel lié à l'expérience du sujet. Le terme registre est ici à prendre dans l'acception proposée par Martinand (1992). Le registre du *réfèrent empirique* ou *registre empirique* comprend des objets, des phénomènes et leur connaissance phénoménographique, c'est-à-dire leur description empirique mais déjà conceptualisée. Martinand emprunte lui-même à Walliser (1977) qui avait utilisé les termes de champ empirique, modèle et champ théorique pour décrire ce qu'il nomme la *dynamique de la modélisation* c'est-à-dire un cycle d'opérations qui mettent en relation ces trois niveaux.

Les modèles sont alors, pour le chercheur, des outils qui lui permettent de résoudre des problèmes et d'élaborer les théories. Le point de vue de Kuhn (1962) comprend ainsi deux facettes. D'une part les modèles consistent, entre autres choses, en des généralisations symboliques et verbales et contiennent des exemples de leurs usages. Ce sont des guides pour la conduite de la *science normale* en tant que solutions exemplaires à des problèmes. D'autre part, Kuhn distingue un second sens au terme modèle qui comprend un éventail qui va des modèles ontologiques, qui constituent un point de vue sur l'univers, aux modèles heuristiques qui consistent en des analogies qui peuvent être utilisées de manière pragmatique pour aborder un sujet d'étude. Les modèles sont, pour Kuhn, des *outils* constitutifs de la *matrice disciplinaire*. L'activité scientifique consiste ainsi dans l'élaboration et l'évolution de *modèles-outils* à l'origine de nouvelles théories.

L'importance des modèles comme point de départ de l'élaboration de nouvelles idées et théories est également soulignée par Nersessian (1999) qui a un point de vue complémentaire de celui de Kuhn. La résolution de problèmes scientifiques passe par une démarche de modélisation qui comprend l'élaboration de nouvelles représentations conceptuelles à partir de représentations préexistantes. Cette élaboration repose sur l'abstraction, le raisonnement analogique, l'expérience de pensée et l'analyse d'un nombre limité de cas (Nersessian, 1992, citée par Gilbert & Boutler, 2000).

Il existe donc des liens étroits entre les problèmes scientifiques que le chercheur tente de résoudre et les modèles qui sont convoqués. Néanmoins, Bouleau (1999) souligne qu'une même question peut être modélisée de différentes manières. Cette modélisation dépend d'une part des intentions du modélisateur et d'autre part des références théoriques qui sont employées. Bouleau prend, à l'appui de sa thèse, l'exemple de la modélisation des crues. Selon les connaissances que le modélisateur engage ce sont différents modèles visant à appréhender une même réalité qui seront produits. Le modèle est construit pour représenter un phénomène et reste explicitement lié aux choix d'un auteur (Stengers, 1993). Il peut donc y avoir une compétition entre différents modèles et c'est souvent, dans le cas des sciences dites expérimentales, l'application des modèles, leur mise à l'épreuve, qui permettra de trancher entre différentes modélisations.

Ainsi, nous retenons, pour nos propres travaux, que les modèles sont des élaborations conceptuelles liées à la résolution d'un problème scientifique et la modélisation un processus de mise en relation d'éléments empiriques et théoriques.

La mise à l'épreuve des modèles

La mise à l'épreuve des modèles est une question centrale en science. C'est en effet par confrontation des modèles qui ont été élaborés au *registre empirique* que l'on évalue leur degré de pertinence.

Les modèles permettent d'établir des prévisions en termes d'observables expérimentaux ou de terrain. Ces prévisions peuvent être confrontées à des mesures ou des observations empiriques et ainsi d'une part, d'éprouver la pertinence – ou du moins de tester la réfutabilité – de ces modèles et, d'autre part, d'en préciser le domaine de validité. Les modèles permettent également d'effectuer des rétrodictions (ou postdictions), c'est-à-dire d'appliquer un modèle explicatif à un événement du passé et ainsi reconstituer un événement du passé.

L'étude de l'évolution d'un phénomène dans le futur s'appuie également sur des modèles qui rendent ainsi possibles l'extrapolation et l'anticipation. Les modèles « prophétisent » (Canguilhem, 1968

p. 316). La simulation apparaît comme une méthode privilégiée pour cette mise à l'épreuve. Elle occupe une place importante dans les sciences de la Terre. Confronté à des difficultés pour appréhender des phénomènes complexes qui se déroulent selon des échelles de temps et d'espace qui sont sans commune mesure avec l'expérience humaine, le géologue est conduit à élaborer des modèles formels qui peuvent être utilisés pour produire des maquettes ou des modèles informatiques. Le fonctionnement de ces systèmes modélisés peut être étudié à l'aide de la simulation.

Propriétés et fonctions des modèles dans les sciences de la Terre

Les principaux travaux que nous avons retenus pour examiner la place de la modélisation en sciences sont des travaux conduits pour les sciences physiques. Ils nous paraissent utiles pour comprendre la place de la modélisation en sciences de la Terre. Néanmoins, pour cette discipline, la question des théories reste en débat. Si on retient qu'une théorie est un système d'énoncés à valeur universelle qui peuvent être employés pour décrire n'importe quel domaine du réel, on peut relever qu'en géologie les théories sont rares au regard des modèles qui eux sont innombrables (Stengers, 1993). La théorie de la tectonique des plaques apparaît ainsi plus comme un ensemble de modèles que comme des énoncés décontextualisés de valeur et portée générales. Des éléments de théories sont bien présents en sciences de la Terre. Ils sont à rechercher parfois du côté de la thermodynamique pour comprendre des phénomènes métamorphiques ou de la mécanique pour interpréter les déformations des terrains par exemple. Ce sont donc des théories de la physique que le géologue est amené à invoquer mais, le plus souvent, ces théories ne sont présentes qu'en filigrane et ce sont avant tout les modèles qui sont discutés.

Le point de vue que nous retiendrons ici est que les références empiriques de terrain permettent, dans le cadre d'une théorie explicative générale, de construire des modèles aux caractères provisoires et perfectibles qui deviennent alors des outils pour interroger le réel. On parle ainsi de « modèle de manteau terrestre » ou de « modèle d'effet de serre ». Autrement dit, et en utilisant les termes que Martinand (1992) emprunte

à G. Bachelard, les modèles sont élaborés à partir des phénoméno-graphie et phénoméno-technique. L'application de ces modèles conduit à l'apparition d'une phénoménologie nouvelle caractérisée par le fait quelle dépend des limites de validité du modèle construit.

Les modèles permettent ainsi de produire des « représentations partisans » permettant d'inventer des « idées simplifiantes » (Bouleau, 1999). Les modèles interviendraient comme des intermédiaires entre les aspects théoriques et empiriques d'une réalité (Bachelard, 1979 ; Bunge, 1975 ; Walliser, 1977). La modélisation serait donc « l'essence même d'une pensée et d'un travail scientifique » (Harrison, 2001) et les modèles des outils pour penser et pour comprendre le monde produits dans le cadre d'un projet donné. Ainsi, « Construire un modèle c'est donc utiliser, pour la maîtrise de problèmes, des outils intellectuels liés à une représentation et associés à l'idée qu'on se fait d'une explication » (Orange, 1997).

Ces différents travaux permettent de souligner que la fécondité des modèles réside dans leur statut d'outil « pour penser ». Pour un modèle donné, elle est liée à sa capacité à évoluer en fonction des investigations conduites. « Les bonnes théories sont comme les bonnes voitures, ce ne sont pas celles qui permettent d'éviter les accidents mais celles qui se réparent facilement » (Bunge, 1967 cité par Halloun, 2004 p. 74).

Les modèles et la modélisation sont donc au cœur de l'activité scientifique. Dans le paragraphe suivant nous examinons les travaux qui ont conduit à poser la question de leurs rôles dans l'enseignement des sciences.

Modélisation et enseignement des sciences

La littérature consacrée à l'analyse de situations de classe au cours desquelles des élèves s'engagent dans des tâches de modélisation est également abondante. Si l'immense majorité de ces travaux porte sur l'enseignement des sciences physico-chimiques ils nous semblent néanmoins apporter un éclairage utile pour l'enseignement des sciences de la Terre.

La modélisation et les modèles apparaissent de manière explicite dans les programmes français de physique-chimie et mathématiques de l'enseignement secondaire, néanmoins, l'introduction de ces termes est récente dans les programmes de sciences de la vie et de la Terre (Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale, 2000) et encore timide. De fait, si des auteurs se sont intéressés à ces questions pour l'enseignement des sciences physiques voire de la biologie, rares sont ceux à l'avoir fait pour l'enseignement des sciences de la Terre. En particulier cette discipline était absente des préoccupations des équipes de la recherche coopérative sur programme « Enseignement et apprentissage de la modélisation » INRP-Lirest (Martinand, 1992).

Ce paragraphe consacré à la question de la place des modèles et de la modélisation dans l'enseignement ne prétend pas à l'exhaustivité. Il a néanmoins pour ambition de fournir des repères afin de dégager quelques courants majeurs sur les fonctions attribuées aux modèles dans un contexte d'enseignement. Une entrée possible dans les travaux relatifs à l'usage de la modélisation dans la classe consiste à distinguer les différentes fonctions attribuées aux modèles. C'est celle que nous adoptons ici.

Une fonction de perception et de représentation

Pour Martinand (1992 p. 17) la fonction de représentation des modèles est leur fonction la plus importante dans un contexte scolaire. C'est « celle qui correspond dans l'apprentissage à la tâche décisive, celle qui doit polariser au maximum l'attention des enseignants ». Un modèle est en effet un système de symbolisation qui permet de se représenter un phénomène et l'étape qui consiste à aider l'élève à construire ce système de représentation apparaît comme une étape clef. L'importance de cette fonction de représentation est liée à celle de perception qui a été soulignée par les travaux de psychologie cognitive. Ainsi, pour Buckley et Boulter (2000) les modèles mentaux, dans un contexte scolaire, permettent de percevoir et de visualiser des phénomènes. Notre perception des phénomènes est en effet très largement guidée par nos attentes et les présupposés sur lesquelles elles sont fondées. Ainsi, un phénomène peut-il passer complètement inaperçu si l'observateur n'a pas en tête un modèle adapté à l'ob-

servation qui est visée. Ainsi, pour Halloun (2004) les modèles constituent des lentilles-conceptuelles (*conceptual lenses*) au travers desquelles nous appréhendons le réel. Les modèles constituent ainsi des filtres qui guident l'observateur dans l'extraction des données du réel.

Les modèles dont les élèves disposent peuvent donc également jouer un rôle de masquage du réel. Ce qui peut paraître une évidence à un observateur chevronné peut être complètement occulté pour le novice. Ainsi, Orange et al. (1999) relatent une situation au cours de laquelle les feldspaths de l'arène granitique ne sont pas observés par l'élève qui se représente l'altération du granite comme un départ, une ablation, en raison du transport par l'eau, de ce minéral. Cet exemple illustre la prédominance du modèle sur le *registre empirique*.

La question de la représentation des phénomènes est donc une question centrale pour l'enseignement et ce rôle, joué par les modèles, a déjà été largement discuté (voir par exemple Larcher, 1994, 1996). Pour Guichard (1994), « Dans le cadre scolaire, le problème principal est de se représenter le système [qui est étudié] ». C'est particulièrement vrai lorsque ce système n'est pas accessible à l'observation directe pour des raisons de temps (par exemple vitesse très faible de certains phénomènes géologiques) ou d'espace (dimensions gigantesques ou microscopiques de certains objets géologiques). L'enseignant peut ainsi être conduit à proposer des modèles analogiques, sous la forme de maquettes plus ou moins élaborées. Les exemples de tels modèles sont très nombreux dans l'enseignement des sciences de la Terre : maquette de système solaire, modèle de subduction ou d'effet de serre par exemple. Parfois, ces modèles ont été informatisés et permettent de générer des animations ou des simulations. Ils donnent ainsi « à voir » en miniature ou en accéléré, des phénomènes difficiles à percevoir et aident à s'en forger une première représentation.

Une fonction de communication pour l'argumentation

Une seconde fonction assurée dans la classe par les modèles utilisés est la communication. Ainsi, pour Buckley et Boulter (2000) les modèles construits par

les élèves leurs permettent d'exprimer leurs conceptions. En conséquence, les modèles peuvent constituer des supports au débat scientifique dans la classe, débat dont les interactions favorisent l'apprentissage. Des expérimentations conduites pour l'enseignement des sciences physiques (Johsua & Dupin, 1989) ont amené ces auteurs à organiser des activités de débat scientifique dans la classe. Les conceptions des élèves sont alors considérées comme de véritables débuts de modélisation et les débats qui sont organisés visent à permettre une confrontation de ces modèles.

Cette fonction des modèles appelle trois remarques. En premier lieu, ce rôle ne peut être joué que si une représentation du modèle de référence est produite. Cette représentation, qu'elle soit orale, textuelle ou imagée, emploie un ensemble de codes dont la signification ne va pas de soi. Il existe donc un risque que le modèle soit mal interprété par celui qui le « lit ». En second lieu, il y a risque que le modèle soit confondu avec la représentation qui en est faite. C'est l'explicitation du codage symbolique par les élèves eux-mêmes qui leur permet de différencier le modèle de sa représentation iconique (Larcher, 1994). Enfin, les modèles produits par les élèves ne recouvrent pas nécessairement leurs modèles mentaux. Ces derniers ne sont pas communicables en totalité et une part d'implicite subsiste nécessairement.

Une fonction heuristique

Des travaux de psychologie cognitive ont décrit la connaissance comme la capacité de se construire un modèle mental de la réalité que l'on cherche à connaître. Ainsi pour Johnson-Laird et al. (1983) : « all our knowledge of the world depends on our ability to construct model of it ». Sans adopter une position aussi radicale nous considérons que, parce qu'ils peuvent être représentés sous forme d'objets manipulables qui permettent de percevoir les phénomènes et de les représenter, les modèles constituent des aides à penser. Pour Pacault (1987) « Modéliser c'est tester la pertinence des variables et réduire leur indépendance » c'est-à-dire vérifier que les variables choisies décrivent bien le phénomène et établir des relations entre ces variables. Identification des variables et exploration de leurs relations sont des activités de nature à améliorer la compréhension d'un phénomène. Les modèles peuvent donc, dans

la classe, constituer des outils pour comprendre et des aides à la conceptualisation (Larcher, 1994). Les modèles permettent en effet de s'abstraire de certaines propriétés et caractéristiques singulières des différentes situations étudiées et de se forger une vision unificatrice des phénomènes. Il existe donc une relation étroite entre modélisation et conceptualisation.

La modélisation est orientée par un questionnement (Larcher, 1996) et un changement de question peut entraîner un changement de modèle. Ce point pose la question du champ d'application d'un modèle et donc de son domaine de validité. Enseigner à un élève l'utilisation d'un modèle pour interpréter des observations ou des résultats obtenus lors des travaux pratiques c'est prendre le risque que ce modèle soit par la suite utilisé pour explorer un domaine pour lequel il n'est pas adapté. Enseigner la modélisation et l'utilisation des modèles doit donc conduire à proposer à l'élève une boîte à outil (le modèle) avec sa notice d'utilisation ainsi que les mises en garde relatives à cette utilisation (son domaine de validité).

Cette fonction heuristique du modèle pose également le problème de son statut dans la classe. Est-il fourni par l'enseignant et présenté comme une donnée non révisable ? Dans ce cas, le travail de compréhension risque de porter sur le modèle plutôt que sur le phénomène qu'il représente. La validité du modèle sera plutôt appréciée par sa cohérence interne. Est-il élaboré par l'élève au cours d'un travail de modélisation et perçu comme un substitut de la réalité ? Dans ce cas son statut d'outil permettant de comprendre le réel peut être plus explicite. C'est alors sa capacité à rendre compte de ce réel, à le comprendre et à en prévoir le comportement qui permettra d'en apprécier la pertinence.

Les modèles comme outils de médiation entre réel et théorie

Les travaux de l'équipe COAST (voir par exemple Becu-Robinault, 2002 ; Buty, Tiberghien, & Le Maréchal, 2004 ; Tiberghien, 1994) ont conduit ces auteurs à décrire les activités de modélisation dans la classe comme la mise en relation de deux mondes : un monde des modèles et théories et un monde d'objets et d'événements. C'est dans l'établissement de liens entre ces deux mondes que se fondent l'appren-

tissage et la construction de sens d'un concept donné. Dans sa thèse, Buty (2000) précise que par *monde des objets* et des événements il entend « ce qui relève de la réalité expérimentale » et par *monde des théories et des modèles* « ce qui relève des outils qui permettent d'agir sur la réalité ». La tentation est donc grande de rapprocher ces concepts de ceux de *registre empirique* et de registre des modèles. En effet pour Lhoste (2006, p. 83) « le *registre empirique* contient des objets, des phénomènes et des expériences quotidiennes. Il contient les éléments que l'on peut vérifier par une observation, une mesure. Les éléments du *registre empirique* correspondent à « ce qu'il y a à expliquer » et nous pouvons dire qu'ils ne sont pas constitués une fois pour toutes. [...] Le registre du modèle est lui aussi construit par l'élève. Il contient les éléments liés à une organisation et/ou à un fonctionnement plus ou moins imaginé. Ces éléments constituent les tentatives de solutions proposées pour expliquer les éléments du *registre empirique* ».

Fondé sur les travaux de Walliser, le schéma de la modélisation (fig. 1) en sciences proposé par Martinand (1992, 1994b) permet de décrire la tâche de l'élève durant l'apprentissage. Quels types de registres mobilise-t-il ? Quels types de problèmes est-il capable d'envisager ? Ce schéma permet également de distinguer :

- un *registre empirique* constitué d'objets, de phénomènes et d'actions sur ces objets et phénomènes ;
- un registre des modèles qui comprend des composantes *sémantiques* (une sémiographie commode pour représenter les éléments du modèle), *syntaxiques* (les relations qu'entretiennent les éléments du modèle entre-eux liées à son mode de construction) et *pragmatiques* (qui permettent de questionner, se représenter, prévoir, inventer et expliquer le référent empirique) ;
- à ces deux registres, Martinand en ajoute un troisième qui est la *matrice cognitive* et qui comprend des paradigmes épistémiques, ainsi que des ressources théoriques et sémiotiques.

Ce schéma permet de distinguer une connaissance empirique initiale qui permet la construction du modèle (phénoménographie) d'une description

seconde rendue possible par l'utilisation du modèle qui se projette sur le référent empirique (phénoménologie). Il permet également de situer des activités de simulation qui correspondent, quant à elles, à une exploration du modèle. La *matrice cognitive* permet de décrire ce qui est disponible et mobilisable, ce qui doit être amené en conformité avec les exigences de la tâche et réciproquement ce qui restreint ou ouvre les problèmes envisageables.

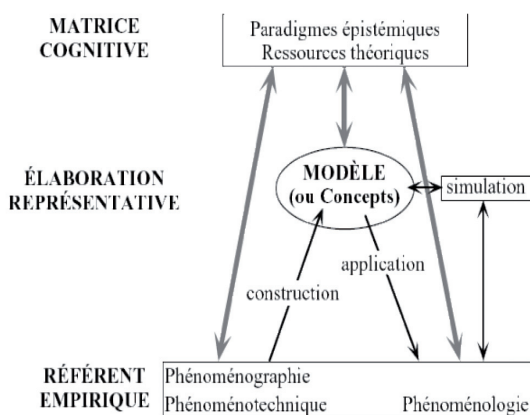


Figure 1 : Schéma de la modélisation
(d'après Martinand, 1994a)

Nous retiendrons, pour notre part, le terme de registre pour distinguer les différents niveaux qui décrivent d'une part, le réel que l'élève construit et tente de comprendre (*registre empirique*), d'autre part le modèle mobilisé qui permet d'interpréter et de représenter ce réel (*registre du modèle*) et enfin les éléments théoriques qui appartiennent au système explicatif de l'élève (*registre théorique*). Le registre théorique de l'élève comprend les types d'explications qu'il est capable de mobiliser dans une situation donnée. Il s'agit de règles générales qui permettent à l'élève de se construire une « théorie de la discipline ». Nous emploierons l'expression *registre théorique de l'élève* pour désigner les propositions que l'élève tient pour vraies.

Pour Orange (1997), apprendre la modélisation c'est acquérir une compétence : la maîtrise du problème de mise en concordance faits - c'est-à-dire un réel construit au cours d'activités de laboratoire ou de terrain - et théorie - à partir de laquelle l'élève mobilise des références explicatives. Néanmoins

pour ce même auteur (Orange 2000), mettre l'accent, dans la modélisation, sur le « modèle solution », c'est risquer de rechercher des « trajets » qui ne seraient que factuels. La modélisation n'est pas donc une simple mise en relation des différents registres pour trouver une solution ; elle nécessite une mise en tension de ces différents registres qui conduit à la *problématisation*. Il s'agit d'identifier à partir des contraintes empiriques significatives pour le problème, les conditions de possibilité du modèle (ses « nécessités »). Le modèle est alors une solution réalisant les nécessités.

De cette présentation brève des travaux de différents auteurs, se dégage un certain consensus sur une fonction jouée par le modèle dans la classe : un intermédiaire entre un réel à investiguer et une théorie explicative. Cette dialectique nous semble fondamentale pour l'apprentissage des sciences et plus particulièrement des sciences de la Terre. Au-delà de la mémorisation d'énoncés théoriques relatifs à des lois et des phénomènes généraux, au-delà de la connaissance de faits de terrain spécifiques, il s'agit de la construction de propositions argumentées qui articulent énoncés explicatifs et arguments empiriques.

Les modèles, outils d'investigation scientifique pour la classe

Dès 1992 Martinand (1992 p. 8) soulignait le dogmatisme qui, selon lui prévalait alors, dans l'enseignement des sciences expérimentales. Martinand relie cette dogmatisation à « l'imposition d'un point de vue, d'un mode de description, d'une interprétation » et regrettait la disparition du « caractère hypothétique des constructions élaborées pour prédire et expliquer ». Le même constat semble pouvoir être fait aujourd'hui. Lors de deux études (Sanchez, Prieur, & Devallois, 2005 ; Sanchez, Prieur, & Fontanieu, 2007) nous avons souligné que les modèles perdent, dans l'enseignement des sciences de la Terre, leur statut d'outils pour penser. Ils deviennent des objectifs d'enseignement dont le domaine de validité n'est pas discuté. Les travaux de Van Driel et Verloop (1999) avaient précédemment montré que les enseignants de sciences considèrent les modèles comme des représentations simplifiées de la réalité et que, si ces enseignants soulignent leur potentiel descriptif

et explicatif, ils mentionnent rarement leur caractère prédictif.

Des travaux tendent à formuler des propositions pour rendre aux modèles leur statut d'outil scientifique. Ainsi, Halloun (2004 p. 29) reprend, pour la classe, l'idée qui consiste à considérer les modèles comme des intermédiaires entre deux registres (Halloun utilise le terme de *monde*). Pour cet auteur, la connaissance scientifique résulte de transactions entre un *registre empirique* constitué de réalités physiques et le registre rationnel du scientifique. Cette dialectique continue se traduit par la construction de modèles provisoires dont la validité est mise à l'épreuve de données empiriques recueillies à cette fin. Ces tests permettent de choisir entre l'acceptation, la modification ou le rejet du modèle élaboré. Selon ce point de vue, une hypothèse de recherche apparaît comme une assertion sur une relation entre un modèle et le registre empirique (Halloun utilise le terme de *champ*) qu'il est censé expliquer (Giere, 1988 cité par Halloun, 2004 p. 30).

Après d'autres, cet auteur propose de placer la modélisation au cœur des activités de résolution de problèmes et de faire des modèles dans la classe des « outils pédagogiques » permettant deux types d'activités. Des activités d'exploration qui consistent à utiliser des modèles conceptuels pour décrire, expliquer, prédire le comportement des systèmes physiques et des activités de création (*inventive activities*) qui consistent à imaginer de nouvelles manières de concevoir ces systèmes et prévoir l'existence de nouveaux aspects du réel (Halloun, 2004 p. 155). Il s'agit d'une part d'enseigner les modèles fondamentaux des théories de la physique et d'autre part de placer les élèves dans un contexte rationnel, leur permettant de se construire un *registre empirique*, qui favorise la compréhension des lois de la théorie en jeu ainsi que l'appropriation d'éléments nécessaires à la construction de modèles plus complexes (Halloun, 2004 p. 140).

Dans le paragraphe précédent, nous avons souligné que de nombreux travaux d'épistémologie s'attachent à souligner le fait que les modèles sont des outils pour le chercheur. Les travaux des didacticiens que nous venons d'évoquer nous paraissent converger avec ce point de vue et nous retiendrons

les propositions qui visent à rendre aux modèles leur statut d'outil pour l'investigation scientifique. Dans un contexte d'enseignement, les modèles sont ainsi, des *outils de perception et de visualisation* permettant de percevoir et d'identifier des phénomènes lors d'investigations empiriques, des *outils de communication* sur lesquels ancrer le débat scientifique, des *outils d'intelligibilité* permettant de souligner les éléments et les relations d'un système étudié, des *intermédiaires* entre un *registre empirique* et un *registre théorique*. Les modèles sont ainsi des outils sur lesquels l'élève peut s'appuyer pour conduire un travail d'investigation scientifique.

Démarche d'investigation et modélisation dans l'enseignement des sciences de la Terre : questions et hypothèses de recherche

Ces éléments de cadrage théorique nous conduisent à préciser notre question initiale. Parmi les éléments à prendre en compte pour l'élaboration de situations permettant aux élèves de s'engager dans un travail d'investigation, la question des rôles qu'il est possible de faire jouer aux modèles et à la modélisation dans ces situations semble centrale. En particulier, il s'agit d'identifier les tâches qui peuvent conduire les élèves à mettre en tension les modèles scientifiques de référence pour la discipline avec le registre empirique qu'ils se construisent lors des activités expérimentales ou d'observation. Ceci nous conduit à décrire un travail d'investigation scientifique comme la mise en tension d'éléments empiriques recueillis lors d'activités de laboratoire ou de terrain avec un modèle dans le cadre de la résolution d'un problème scientifique.

Ce point de vue ne recouvre pas complètement celui formulé dans les instructions officielles. On trouve en effet dans les programmes de l'enseignement primaire l'emploi des termes démarche d'investigation pour qualifier la démarche à suivre avec les élèves dans l'enseignement des sciences expérimentales (Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale, 2002). Cette démarche recouvre de « l'expérimentation directe », des « réalisations matérielles », des « observations directes ou assistées par un instrument », la « recherche sur document » et les « enquêtes et visites ». Cette démarche s'articule avec « un questionnement sur le monde ». Au collège,

l'introduction générale des programmes de sciences de la vie et de la Terre (Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale, 2004) propose une définition de la démarche d'investigation : « [la démarche d'investigation] constitue l'unité de l'enseignement des SVT. Il s'agit d'expliquer le réel :

- à partir de l'observation de phénomènes perceptibles à différents niveaux d'organisation ;

- à partir de manipulations, d'expérimentations ou de modélisations permettant d'éprouver des hypothèses explicatives. »

Pour notre part, nous formulons l'hypothèse qu'une démarche d'investigation comprend différentes tâches dont permettant cette mise en tension. Nous distinguons ainsi trois catégories de tâches :

- Les tâches centrées sur l'appropriation du modèle² qui conduisent à l'identification des ses caractéristiques et propriétés. Elles seront notées M ;

- Les tâches conduisant à la maîtrise du registre empirique sont notées RE ;

- Les tâches permettant la mise en relation du modèle de référence avec les éléments empiriques comprennent la phase de conception du protocole d'expérimentation ou d'observation qui conduit à formuler des prévisions en termes de résultats expérimentaux ou d'observations de terrain. Elle comprend également la phase de confrontation des données au(x) modèle(s) qui permettent de donner du sens aux données recueillies et, en retour de juger de la pertinence des modèles employés. Ces tâches sont notées EM.

Le tableau 1 récapitule ces différentes catégories et donne des exemples pour chacune d'entre elles.

Tâches centrées sur l'appropriation du modèle (M)

M1 Identifier les caractéristiques du modèle

M2 Identifier les propriétés du modèle

Tâches en relation avec la maîtrise du registre empirique (RE)

RE1 Sélectionner des données empiriques pertinentes au regard de leur lisibilité

RE2 Déterminer les caractéristiques des données empiriques les situer dans l'espace et/ou dans le temps

RE3 Mettre en forme des données empiriques pour faciliter leur lecture

Tâches conduisant à la mise en relation du modèle et du registre empirique (EM)

Elaboration du protocole d'observation ou d'expérimentation

EM1 Déterminer des implications du modèle en termes d'observables de laboratoire ou de terrain

EM2 Déterminer les procédures du protocole

Confrontation des données empiriques et du modèle scientifique

EM3 Argumenter l'adéquation des données empiriques aux caractéristiques et propriétés du modèle

EM4 Instancier le modèle : le paramétrer, le contextualiser avec des données empiriques

EM5 Définir le domaine de validité du modèle

EM6 Identifier des contraintes (ou nécessités) du modèle

Tableau 1 : Typologie des tâches d'une démarche d'investigation

Les tâches centrées sur le modèle lui-même (notées M) conduisent l'élève à travailler sur les caractéristiques et propriétés de ce modèle. Cela peut se traduire par l'identification des différents éléments constitutifs du modèle (ses caractéristiques), des relations hiérarchiques ou causales qui lient ces éléments et éventuellement les conséquences du fonctionnement de ce modèle (ses propriétés). Dans ce cadre, des activités de simulation peuvent conduire les élèves à identifier les conséquences de modifications de paramètres du modèle et donc les amener à explorer le modèle afin de s'approprier ses caractéristiques et propriétés et d'en évaluer la cohérence interne.

Nous avons également distingué les tâches plus particulièrement centrées sur la maîtrise du registre empirique (notées RE). Ce sont des tâches qui participent à la constitution d'un registre empirique par un travail de collecte et de traitement de données. Les tâches qui relèvent d'un travail sur le registre empirique et qui ont pour objectif une maîtrise de ce registre sont de différentes natures. La réalisation de mesures ou d'observations et la sélection des données constituent un prélèvement sélectif de données sur le réel. Les différents traitements qui peuvent leur être appliqués – schéma, légende, calculs, réalisation de graphes – permettent leur appropriation, leur déco-

dage et leur interprétation. Ces tâches concourent à la constitution d'un *registre empirique*. Ce n'est plus un réel flou et insaisissable qui est soumis à investigation mais un réel caractérisé et sélectionné dans le cadre d'un questionnement scientifique. Le modèle joue évidemment un grand rôle dans ce travail empirique. C'est lui qui permet de déterminer la pertinence d'une observation, la nature des traitements à effectuer pour faire émerger le sens. Néanmoins, le travail est largement déterminé par le protocole qui aura été élaboré et, si le modèle reste un élément fondamental dans la conduite des tâches empiriques, il est fort probable que ces tâches s'effectuent selon des procédures qui ont été déterminées en amont, qui demandent une grande attention aux techniques mises en œuvre et qui font passer ce modèle au second plan.

Les tâches qui conduisent spécifiquement à confronter registres empirique et du modèle (EM) apparaissent à deux moments que nous considérons donc comme des moments clefs du travail d'investigation scientifique. Cette confrontation a lieu tout d'abord au moment de la conception du protocole d'observation ou d'expérience. Il s'agit ici, pour les élèves, de s'appuyer, pour reprendre les termes de Canguilhem (1968), sur le caractère « prophétique » du modèle c'est-à-dire les prévisions qu'il permet d'établir. Ce travail relève de l'identification des implications du modèle, des hypothèses opérationnelles (ou conséquences vérifiables) qui sont constitutives du modèle et qui permettent de faire des prévisions en termes d'observables de terrain ou de laboratoire. En soi, ce travail est déjà une manière de se constituer un *registre empirique*, non pas complètement déterminé mais hypothétique et qui devra être confronté au réel. C'est dans cette tâche d'identification des implications du modèle que se constitue la fonction de cadre d'analyse des données que joue le modèle. Déterminer les implications d'un modèle c'est donc chausser les « lunettes conceptuelles » qui rendront possibles des tâches qui relèvent de la constitution du *registre empirique*. Ces hypothèses opérationnelles doivent en effet être évaluées au regard des faits de laboratoire ou de terrain. Il s'agit donc d'élaborer un protocole d'observation ou d'expérimentation, autrement dit de déterminer les procédures plus ou moins complexes dont les effets, les résultats obtenus,

permettront d'évaluer la pertinence des hypothèses extraites du modèle. Il y a donc bien, dans cette étape, un moment important qui conduit à une première confrontation du modèle à une réalité à investiguer. Cette confrontation est pour l'essentiel de l'ordre de la prévision – l'élève est conduit à prévoir le résultat qu'il obtiendra si l'hypothèse retenue est vraie – et il s'agit de mettre en place un raisonnement conditionnel de type « si... alors... ».

Un second moment que nous considérons comme important est celui qui consiste à confronter les résultats des expérimentations ou des observations au modèle scientifique en jeu. Il se joue alors une dialectique entre le modèle et les résultats empiriques obtenus. Les caractéristiques et propriétés du modèle (*registre du modèle*) sont confrontées aux données de laboratoire et de terrain (*registre empirique*) et ce sont les relations de correspondance entre ces deux registres qui sont argumentées. Le modèle peut alors être instancié avec les paramètres du réel. De modèle-générique il peut devenir modèle-exemple grâce à cette instanciation. Cette instanciation ne se fait pas sans altération. Les résultats souvent résistent et il faut bien se résoudre à procéder à des modifications pour que la rencontre se fasse. L'identification des nécessités que le modèle doit respecter pour s'adapter aux caractéristiques du *registre empirique* (Orange, 1995) peut conduire à modifier le modèle initial ou à l'enrichir. C'est par ailleurs l'usage qui a été fait du modèle qui a pu permettre d'identifier les conditions à remplir pour que son application soit pertinente. C'est donc son domaine de validité qui est alors défini et précisé.

Cette typologie des tâches se rapproche, sans toutefois la recouvrir de la distinction que fait Walliser (1977) entre les aspects « sémantiques », « syntaxiques » et « pragmatiques » de l'élaboration et de l'utilisation des modèles. Comme le souligne Martinand (1994a p14), cette distinction permet en effet de mettre en évidence « les enjeux, les systèmes symboliques, les ressources qu'apportent ces aspects du modèle pour questionner le référent empirique, se représenter, expliquer, prévoir, inventer ». Notre travail se distingue de ce point de vue par le fait que la typologie que nous proposons porte sur les tâches effectuées par les élèves plutôt que sur les fonctions jouées par le modèle.

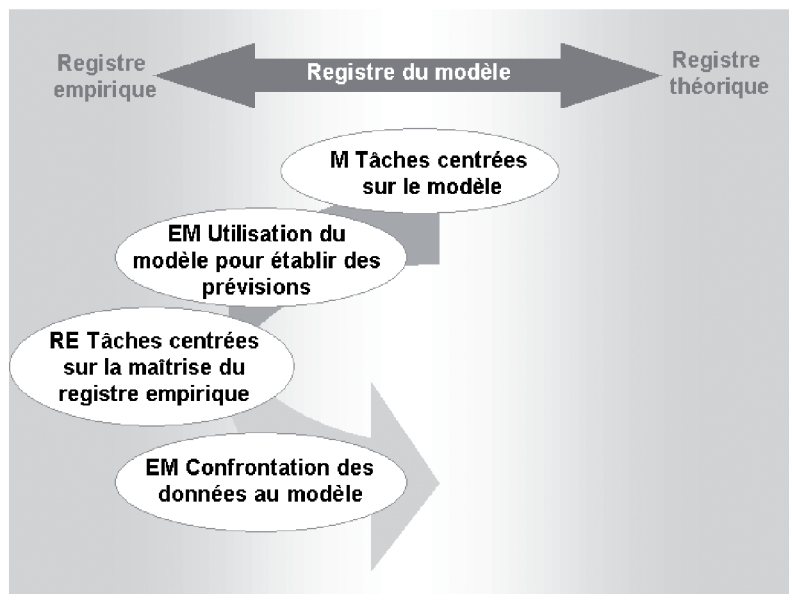


Figure 2 : Démarche d'investigation en sciences de la Terre

Représenté en situation intermédiaire sur la figure 2, le registre du modèle constitue un pont permettant de relier un *registre empirique* construit lors d'activités de terrain et un *registre théorique* (de l'élève), également en construction, qui comprend les références théoriques explicatives que l'élève est capable de mobiliser. La figure résume notre point de vue sur les tâches réalisées par les élèves dans la conduite d'une investigation scientifique et la place que tient le modèle scientifique dans cette démarche. Ces tâches sont représentées à gauche sur le schéma car elles portent principalement sur le *registre empirique* ou sa mise en relation avec le modèle. La flèche qui parcourt les tâches décrites introduit une idée de chronologie mais notre hypothèse n'est pas que les différentes tâches que nous identifions ici s'effectuent à des moments clairement distincts lors de la conduite d'une démarche d'investigation. Il nous paraît, par exemple, tout à fait concevable qu'un élève engagé dans un travail empirique soit conduit à identifier ou clarifier les implications du modèle en jeu ou qu'un élève qui sélectionne des données soit amené à réviser la manière dont il conçoit le protocole qu'il réalise. Cette démarche n'est donc pas linéaire.

Un modèle scientifique prend son sens dans le cadre d'un problème donné. Il constitue en effet une réponse globale qui comprend différentes hypothèses

de portée plus locale. Un changement de problème implique un changement de modèle et donc de données. Nous proposons que le modèle scientifique soit considéré comme un point d'appui, un pivot sur lequel vont s'articuler différentes tâches de l'investigation scientifique. Néanmoins, ce point d'appui n'est pas fixe. Le travail d'investigation mené peut conduire à le réviser voire à l'abandonner pour un autre modèle permettant une meilleure prise en compte de la situation. Le point de vue que nous retenons nous conduit à considérer qu'un travail d'investigation scientifique consiste moins dans l'identification de solutions à des problèmes qui seraient dès lors éliminés que dans la mise en tension d'éléments théoriques et empiriques permettant la formulation de problèmes nouveaux (Orange, 2007). Cette mise en tension est représentée par la flèche horizontale sur la figure 2.

Les conditions pour que les élèves s'engagent dans un travail d'investigation scientifique de manière autonome nous paraissent relever de différents aspects. Il s'agit en premier lieu de modifier le statut du modèle scientifique dans la classe. Classiquement, dans l'enseignement des sciences de la Terre, le modèle scientifique en jeu est implicite et re-construit au travers des activités mises en œuvre par les élèves. Le modèle apparaît donc, dans l'en-

seignement secondaire, plutôt comme un niveau de connaissance à atteindre que comme un outil d'investigation scientifique (Sanchez & Prieur, 2007). Nous proposons d'étudier une situation d'apprentissage dans laquelle ce modèle est d'emblée présenté aux élèves comme un outil pour penser, comme une construction intellectuelle qui constitue une réponse provisoire et partielle à un problème scientifique, réponse qu'il faudra confronter aux réalités du terrain ou aux résultats expérimentaux. Nous proposons donc que la situation élaborée consiste à demander aux élèves d'exécuter un certain nombre de tâches permettant cette confrontation. Cette approche rejoint partiellement celle du groupe de recherche SESAMES de l'équipe COAST (Coince et al. 2007)

Dispositif de l'étude et données recueillies

Une ingénierie didactique comme méthodologie de recherche

La méthodologie de notre recherche repose sur une *ingénierie didactique* c'est-à-dire, selon Artigue (1988), un dispositif permettant d'articuler une analyse *a priori* conduisant à la conception de situations de classe et une analyse *a posteriori* de ces situations vécues avec des élèves. Notre méthodologie de recherche s'appuie donc :

- sur une élaboration théorique portant sur le statut du modèle scientifique et la place de la modélisation dans la conduite d'un travail d'investigation scientifique permettant de guider la conception de situations de classe ;
- sur une « mise à l'épreuve des constructions théoriques » élaborées par l'expérimentation de ces situations. Il s'agit d'éprouver la pertinence de notre analyse *a priori* en analysant d'une part les écarts entre les tâches prescrites par l'enseignant et l'activité des élèves et, d'autre part, les difficultés que rencontrent les élèves et les apprentissages réalisés.

La méthodologie que nous avons adoptée relève également de la méthodologie du *design experiment* définie par Brown (1992) selon laquelle le dispositif expérimental évolue en fonction des résultats de recherche obtenus. Ainsi, les écarts observés entre

les tâches prescrites par l'enseignant et l'activité des élèves nous ont permis de faire évoluer les séances. Néanmoins, nous ne décrivons ici que les séances correspondant à la dernière des deux séries d'expérimentations que nous avons conduites.

Description des expérimentations et des données recueillies

Les expérimentations ont été conduites en 2005 et 2006 dans cinq classes de terminale S et ce sont au total 170 élèves qui ont été impliqués. Les séances ont été conçues en concertation avec les enseignants qui avaient en charge les classes. En faisant participer les enseignants chargés de leur mise en œuvre au processus de conception, nous souhaitons limiter autant que possible les écarts entre les scénarios conçus *a priori* et ceux effectivement développés. De fait, les écarts entre les déroulements prévus et ceux qui ont été mis en œuvre sont minimes. Le tableau 2 décrit les différentes séances pour la dernière expérimentation qui a été conduite.

Une première séance de travaux pratiques était consacrée à la préparation d'une classe de terrain. Les élèves ont ainsi déterminé les observations à effectuer sur le terrain pour vérifier que le modèle de formation d'une chaîne de collision s'applique à la formation des Alpes. Ils disposaient pour cela d'un modèle décrivant la formation d'une chaîne de collision. Ils ont également, au cours de ce travail préparatoire, déterminé l'itinéraire permettant de recueillir les traces de la formation d'une chaîne de collision en utilisant Géonote, un logiciel que nous avons conçu.

La classe de terrain proprement dite s'est déroulée sur deux jours dans le Briançonnais. Les élèves avaient en particulier pour consigne de photographier les traces de la formation d'une chaîne de collision. Ils devaient également relever les coordonnées géographiques des traces photographiées.

Une séance de travaux pratiques a été consacrée à l'exploitation de ce travail. Les élèves ont utilisé Géonote pour commenter les photographies réalisées et les géolocaliser sur la carte. Il leur avait été demandé d'argumenter pour discuter de la pertinence du modèle utilisé.

Les données recueillies au cours de ces expérimentations sont des enregistrements audio et vidéo, y compris lors des activités sur le terrain pour un petit nombre de binômes. Ces données compren-

nent également les productions des élèves ainsi que les traces informatiques de l'utilisation de Géonote. Nous ne discuterons pas ici de l'exploitation qui a été faite de ces traces informatiques.

Séance A : préparation de la classe de terrain (2h00 de travaux pratiques) : L'objectif de cette séance est de préparer la classe de terrain en déterminant les sites sur lesquels se rendre, les observations à réaliser, les informations à recueillir et les mesures à effectuer. Lors de cette phase, réalisée en classe et à la maison, le travail des élèves est guidé grâce à des consignes accessibles en ligne.	
<i>Ce que doivent faire les élèves...</i> - identifier les phénomènes géologiques impliqués dans la formation d'une chaîne de collision et les traduire en indices observables sur le terrain. - localiser les sites géologiques à étudier, les indices à rechercher et déterminer les itinéraires à parcourir - déterminer les mesures à effectuer et les observations à réaliser.	<i>Ce dont disposent les élèves...</i> - un schéma représentant un modèle scientifique décrivant la formation d'une chaîne de collision - Géonote (qui permet de consulter des informations – dont les cartes géologiques – des secteurs géographiques du Chenaillet et du Briançonnais) - site de calcul d'itinéraire routier
Séance B : classe de terrain (excursion de 2 jours) sur 3 sites : Chenaillet, berges du Guil et pli de Saint Clément (05) L'objectif de cette classe de terrain est la collecte des données géologiques sur le terrain	
- échantillonner, rechercher, identifier, localiser, photographier, orienter, cartographier, mesurer, modéliser les indices montrant que les Alpes sont une chaîne de collision	- GPS, appareil photo numérique, carte topographique, panorama, loupe, photographie aérienne, boussole, pâte à modeler...
Séance C : exploitation de la classe de terrain (2h00 de travaux pratiques) L'objectif de cette séance est la constitution d'un jeu de données géoréférencées sur les indices de la formation d'une chaîne de collision sur l'un des secteurs étudiés et la rédaction d'une histoire géologique argumentée des Alpes.	
- sélectionner, mettre en forme, commenter leurs photographies et géoréférencer ces images sur un secteur géographique. - rédiger une histoire argumentée des Alpes	- Géonote - photographies et autres informations recueillies sur le terrain,

Tableau 2 : Déroulement des expérimentations de septembre/octobre 2006

Démarche d'investigation et conception du protocole

Nous avons évoqué plus haut le caractère « prophétique » du modèle, caractère qui a été souligné par Canguilhem (1968). Cette fonction permet au chercheur d'établir des prévisions. Ceci est particulièrement vrai lorsque le modèle est un modèle formel voire numérique. Ceci est également vrai dans le cadre d'un modèle conceptuel. L'analyse des différentes caractéristiques et propriétés d'un modèle permet en effet d'établir un certain nombre de prévisions en termes d'observables de terrain : présence de tel ou tel type de faille, d'une certaine catégorie de roches ou d'espèces minérales. Nous avons examiné comment les élèves mettaient en œuvre cette fonction du modèle lors de la préparation de la classe de terrain et de la conception du proto-

cole d'observation. Nous entendons par protocole d'observation l'ensemble des procédures à mettre en œuvre - observations à réaliser, mesures à effectuer – pour obtenir les données nécessaires dans le cadre d'un travail d'investigation.

Analyse du modèle

La préparation de la classe de terrain a débuté par un travail d'analyse du modèle de chaîne de collision fourni aux élèves qui consistait à traduire le modèle en observables de terrain. Le modèle était fourni sous la forme de schémas et textes décrivant la formation d'une chaîne de collision en trois étapes. Les élèves disposaient également d'un tableau permettant de lister les observables de terrain correspondants à chacune de ces étapes.

Cette tâche les a conduit à identifier les caractéristiques du modèle scientifique qui leur était fourni. À titre d'exemple, dans la transcription ci-dessous, les élèves du binôme consultent le schéma mis à leur disposition et en extraient un élément qu'ils jugent caractéristique.

E1- Donc subduction... donc là à mon avis on a des marges actives... et là on peut dire que c'était une marge passive

E2- Ouais

A1- Donc pour l'accrétion c'était une marge passive et ici [subduction] c'est une marge active... Donc *on peut mettre qu'il y a des failles*.

E1- *Failles de compression cette fois*.

Ces éléments sont indiqués sur le schéma qui représente le modèle scientifique de référence. Ils représentent des objets géologiques parfois difficiles à observer sur le terrain. Ils représentent également des connaissances sur les caractéristiques des structures géologiques constitutives du modèle.

Au cours de ce travail, l'analyse du modèle qui est faite conduit dans certains cas à identifier des caractéristiques qui ne sont pas directement représentées sur le modèle mais qui sont inférées à partir des informations relevées, c'est le cas pour la transcription ci-dessous :

[consultent le schéma « étapes de la formation d'une chaîne de collision »]

E1- Là y'a une remontée de magma... *donc forcément il y a du basalte*

La roche (basalte) n'est indiquée ni dans le schéma, ni dans le texte. C'est la mention faite à une remontée de magma au niveau d'un rift qui permet d'en déduire la présence. Ainsi, le modèle, au-delà des éléments représentés sur le schéma ou mentionnés dans le texte, s'enrichit en fonction des connaissances dont les élèves disposent. La représentation du modèle proposé ne recouvre donc pas l'ensemble des connaissances qui peuvent être en être extraites car certaines d'entre elles peuvent être déduites en confrontant le modèle analysé à d'autres modèles géologiques connus et maîtrisés des élèves.

Le tableau 3 indique des exemples de termes employés par les élèves dans leurs échanges pour décrire le modèle à leur disposition. Le dynamisme du modèle est évoqué pour les trois étapes de la formation d'une chaîne de collision (accrétion, subduction, collision). Il est envisagé au niveau des grandes structures géologiques. Les références aux transformations relatives aux roches sont beaucoup plus rares. Elles sont absentes en ce qui concerne les minéraux

Accrétion	« ça les sépare » « amincissement de la lithosphère » « ça ouvre un océan » « ça s'étire »
Subduction	« ça se resserre » « elle s'enfonce » « ça repousse dans l'autre sens » « elle plonge »
Collision	« plissement des sédiments » « elle se compacte en fait. » « ça chevauche » « elle est remontée » « la croûte continentale passe en dessous » « ça s'aplatit » « ça fait l'accordéon »

Tableau 3 : Quelques exemples de termes employés par les élèves et portant sur le modèle au cours de l'étape de préparation de l'école de terrain.

Ce travail amène donc les élèves à « faire fonctionner » le modèle. Ses caractéristiques sont mises en histoire ce qui permet d'en envisager le dynamisme et d'en identifier les propriétés. Nous avons trouvé des échanges de ce type pour tous les binômes. L'échange transcrit ci-dessous permet de suivre la démarche d'un binôme et de comprendre comment il en vient à « faire fonctionner » le modèle.

[consultent le schéma « étapes de la formation d'une chaîne de collision »]

E1- Et ça ça correspond à quoi ? Pourquoi ça monte ça descend ?

E2- Comme tu comprimes tout ça s'aplatit, ça fait l'accordéon

Cette transcription montre que l'élève E2 a repéré des plis représentés sur le schéma. Il envisage alors

une explication et propose un phénomène géologique à l'origine de ces plis c'est-à-dire une compression qui conduit à un raccourcissement accompagné de plissements. Il accède donc à une *phénoménologie* grâce au modèle.

À partir des verbalisations des élèves, nous pouvons ainsi distinguer, dans le cadre du travail effectué dans le registre du modèle, trois niveaux de construction de cette représentation. Le premier niveau correspond à l'identification de caractéristiques mentionnées sur le document qui décrit le modèle. Ce premier niveau porte donc sur un travail de décodage des informations – schéma ou texte – disponibles. Il correspond, du point de vue de l'élève à l'accès à la compréhension de la phénoménographie qui fonde le modèle. Le second niveau correspond quant à lui à l'identification des caractéristiques qui ne sont pas mentionnées explicitement dans les documents fournis mais qui peuvent être déduites grâce aux connaissances disponibles. Enfin un troisième niveau décrit l'identification de ses propriétés qui découlent des caractéristiques du modèle. Ce troisième niveau d'analyse, correspond à la compréhension du dynamisme et du fonctionnement du modèle, à la phénoménologie à laquelle il permet d'accéder.

Ce travail sur le modèle amène les élèves à se confronter à des difficultés qui relèvent de la compréhension du vocabulaire utilisé et des codes employés dans les schémas. Ceci est illustré par l'exemple ci dessous. Les élèves de ce binôme s'interrogent sur le code de couleur utilisé pour distinguer les sédiments des deux marges sans être en mesure d'en comprendre la signification :

[consultent le schéma « étapes de la formation d'une chaîne de collision »]

E1- Sédiments...

E2- Ca c'est des sédiments ?

E1- Attends...

E2- Pourquoi ils sont verts là et orange ici ?

Certaines occurrences montrent un second type de difficultés que les élèves ont à affronter. Les termes

utilisés pour nommer les objets géologiques représentés sur le modèle sont souvent confondus avec les termes nommant les phénomènes géologiques qui leur ont donné naissance. Ainsi, dans la transcription ci dessous, les deux élèves mentionnent la présence de « plissement » plutôt que de plis.

[consultent le schéma « étapes de la formation d'une chaîne de collision »]

E1 : Bon ben, qu'est ce qu'on voit, chevauchement, faille, plissement... mais alors de...

E2 : *Faut dire qu'on voit plissement.*

Ce type de difficulté est très fréquemment rencontré au travers des échanges entre élèves. Il conduit dans certains cas à ce que les phénomènes géologiques soient confondus avec les objets qu'ils produisent et peuvent aboutir à rendre difficile la distinction de ce qui relève du modèle et de ce qui relève du *registre empirique*. S'il n'est pas exclu que cette confusion soit parfois faite par les géologues eux-mêmes, il nous paraît nécessaire, dans un contexte d'apprentissage, que les élèves puissent bien distinguer ces deux registres de manière à être en mesure de bien distinguer la donnée de terrain de l'interprétation qui peut en être faite. Cette condition nous paraît en effet nécessaire pour que les interprétations puissent évoluer et se complexifier au fur et à mesure de l'avancée dans les apprentissages.

Par ailleurs, ces transcriptions nous conduisent à une remarque qui rejoint des observations effectuées dans un contexte d'enseignement des sciences physiques effectuées par Larcher (1994). Cet auteur a pu mettre en évidence l'importance de l'explicitation du codage symbolique utilisé pour permettre à l'élève de distinguer le modèle de sa représentation. Ainsi, le code de couleur utilisé pour distinguer les sédiments des deux marges est une source de difficulté dans l'analyse du modèle par les élèves.

Traduction des caractéristiques et propriétés du modèle en observables de terrain : une double projection

Cette tâche correspond à la seconde partie de la consigne, lors de la phase de préparation de la classe

de terrain, qui porte sur l'identification des indices à rechercher pour valider le modèle scientifique dans le cadre alpin. Il s'agit donc de traduire les caractéristiques du modèle en observables de terrain comme cela est compris par les élèves dont les propos sont retranscrits ci dessous :

E1 : Qu'est-ce qui peut nous prouver qu'il y a une subduction ?

ou :

E2 : C'est quelle pierre qui se forme à ce métamorphisme là ?

Cette traduction, pour le contexte géologique étudié, consiste le plus souvent à identifier les minéraux, roches et structures géologiques témoins des différentes phases de la formation d'une chaîne de collision. Il s'agit ainsi de faire des prévisions en termes d'observables de terrain et donc de commencer à concevoir le protocole d'observation qui sera mis en œuvre :

E1 : S'il y a accréation, il y a des sédiments marins...

Dans la transcription ci dessus, l'élève E1 déduit d'un phénomène identifié comme impliqué dans la formation d'une chaîne de collision, l'accréation océanique, que des indices de ce phénomène devraient se retrouver sur le terrain sous la forme de « sédiments océaniques ». Son raisonnement l'amène à mettre en relation le registre du modèle (l'accréation) et le registre empirique (les sédiments océaniques).

Le caractère prédictif du modèle lors des activités réalisées par les élèves s'exprime également lorsque ces derniers identifient des indicateurs qui, sur le terrain, leur permettront de se localiser par rapport aux différentes structures géologiques. Ainsi, dans la transcription suivante, l'élève E1 exprime que la présence de volcanisme indique que l'on se trouve sur la plaque chevauchante plutôt que sur la plaque plongeante.

E1- Volcanisme sur croûte continentale

E2- Qui passe par-dessus

E1- Le fait de dire qu'il y a du volcanisme sur la croûte qui passe par-dessus... *Ca veut dire que si on trouve des volcans on saura que c'est celle qui passe par-dessus.*

Cet exemple est proche du précédent. Le modèle permet de mettre en relation des éléments qui appartiennent au registre empirique (« si on trouve des volcans »), des éléments qui appartiennent au registre du modèle (la croûte continentale). À ces deux registres s'ajoute un troisième qui correspond au registre théorique (« celle qui passe par-dessus »). Le registre théorique de l'élève comprend des éléments non discutés sur lesquels il s'appuie pour expliquer. Il s'agit du registre qui donne du sens au modèle et permet de le manipuler (Orange, 2000). Il comprend des éléments qui ne sont pas discutés et qui relèvent de la théorie de l'élève. Dans le cas présent, l'élève E1 exprime une vision mécaniste des phénomènes. La collision se traduit par des chevauchements de structures géologiques. Ce registre peut donc englober des éléments du modèle qui sont considérés comme acquis et non hypothétiques.

On voit dans cet échange que les rapports sont inversés par rapport au précédent. Dans le premier exemple, un élément identifié dans le registre du modèle (l'accréation) permettait de prévoir une caractéristique du registre empirique (les sédiments). Ici, c'est la présence d'un élément identifié dans le registre empirique (les « volcans »), qui permettra de se localiser sur le modèle (au niveau de la croûte continentale). Autrement dit, le premier exemple montre une projection du registre du modèle sur le registre empirique. Dans ce dernier exemple c'est le registre empirique qui se projette sur le registre du modèle. Ceci est résumé par la figure 3.

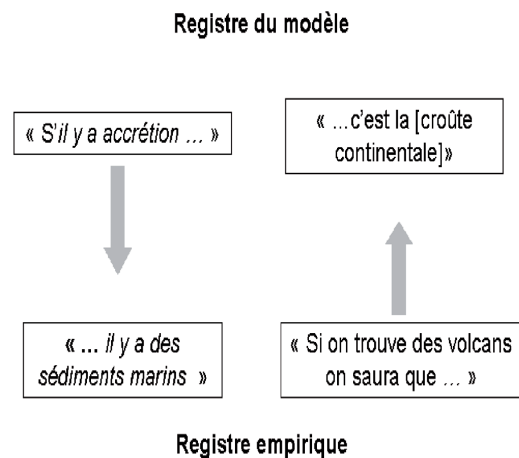


Figure 3 : Liens entre registre empirique et registre du modèle dans les échanges des élèves

Cette première séance (séance A), consacrée à la préparation de l'excursion, se termine par un travail qui consiste pour les élèves, à déterminer un itinéraire permettant de recueillir l'ensemble des observables de terrain qui résultent de l'analyse du modèle. Pour cela, les élèves disposaient, en particulier, des informations géologiques et géographiques fournies, sous forme de cartes, par le logiciel. Tous les binômes ont proposé un trajet pertinent au regard des informations à collecter mais permettant une collecte plus ou moins exhaustive. Les différences observées portent plutôt sur la prise en compte des contraintes topographiques qui ont été correctement appréciées par 69 % des binômes. Cet aspect, qui concerne la place des technologies pour la conduite d'un travail d'investigation a été abordé une publication récente (Sanchez, 2008). Il ne sera pas développé ici.

Démarche d'investigation et recueil des données

Le corpus que nous avons recueilli pendant le travail des élèves sur le terrain est limité. Seuls quelques binômes ont été enregistrés. Il apparaît, pour ces différents binômes, que les échanges portent essentiellement sur le *registre empirique* lors des phases de travail sur le terrain. Le modèle est rarement évoqué. Nous avons mis ceci en relation avec le fait que, une fois les procédures du protocole déterminées (les sites géologiques à étudier, les roches et minéraux à rechercher) ces procédures déterminent les tâches à effectuer, tâches qui correspondent à la mise en œuvre de techniques particulières. Ces procédures ne sont plus discutées mais simplement mises en œuvre car légitimées par le travail préparatoire de la classe de terrain.

Pour l'essentiel, les élèves s'en tiennent donc aux procédures qu'ils ont déterminées lors de la séance consacrée à la préparation de ce travail. Nous avons pu néanmoins retrouver à plusieurs reprises des références au modèle dans les échanges des élèves. Le plus souvent, cela répondait à une sollicitation de l'enseignant qui tentait d'aider les élèves à replacer leurs observations dans le cadre global décrit par le modèle : subduction pour expliquer la présence de minéraux indicateurs d'un métamorphisme de type haute pression - basse température (HP-BT), collision pour interpréter la présence de plis par exemple.

Les transcriptions que nous indiquons, à titre d'exemple, concernent un même binôme des expérimentations conduites en 2006. Les élèves ont pour consigne de cartographier une zone délimitée. Ils doivent donc s'assurer que les roches présentes sont en place, les identifier, rechercher les limites entre les différentes formations et reporter ces limites sur une carte topographique.

La première fois que les élèves évoquent le modèle se situe à un moment où ils s'interrogent sur la fiabilité de la détermination des roches qu'ils ont effectuée. En premier lieu le modèle leur permet de préciser la consigne qu'ils ont reçue. Il s'agit de repérer les limites entre péridotite, gabbro et basalte. D'autre part le modèle leur permet de faire des prévisions sur la localisation de ces limites.

[Recherchent la limite des différentes formations]

E2 : Là ça change non ?

E1 : Non tu retrouves la même chose.

E2 : Ouais c'est vrai mais...

E1 : Parce que ça doit virer vers le gabbro

E2 : T'es sûre ?

E1 : Moi je dis gabbro, métagabbro, vers les complexes... et après basalte

E2 : Ouais mais justement, basalte ça devrait être les plus au-dessus car tu sais, quand la truc elle s'est Crac. Donc on va trouver le basalte là bas et en bas si ça se trouve c'est les métagabbros

E1 : Ou de l'autre côté...

E2 : Ouais peut être de l'autre côté ouais. Ben on verra quand on mettra en commun

Les tours de parole des élèves E1 et E2 portent sur les caractéristiques du modèle, sur l'alternance des différentes roches qui composent la croûte océanique (gabbro et basalte), les transformations métamorphiques subies par ces roches (métagabbro) et certaines structures géologiques qui les caractérisent (complexes [filoniens]). Il est difficile d'apprécier,

au travers de ce bref échange, le niveau de maîtrise des concepts qui sont évoqués. Néanmoins, le fait que ces concepts soient mobilisés de manière spontanée pour « lire » le terrain, qu'ils le seront pendant tout le temps de travail de cartographie sur le secteur, plaide pour dire que les élèves mobilisent bien le modèle géologique travaillé pendant la séance de préparation de l'excursion. Les tours de parole portent également sur le *registre empirique* et, en particulier, sur les zones sur lesquelles les différentes roches devraient être présentes. On voit que le modèle leur permet de formuler des hypothèses sur la localisation des roches et qu'il guide leurs observations.

Nous avons choisi cette zone parce que les travaux de Chalot-Prat (2005) ont permis de porter un regard neuf sur le massif considéré comme une ophiolite épargnée par les mouvements tectoniques. La carte géologique que cet auteur a réalisée montre également que le modèle de lithosphère océanique en trois couches (péridotite-gabbro-basalte), habituellement retenu par les enseignants du secondaire, est ici, en partie, remis en cause du fait de la présence de contacts entre péridotite et basalte sur certaines zones. Nous souhaitons conduire les élèves à s'interroger sur l'adéquation entre le modèle qui leur avait été donné et le *registre empirique* exploré. L'échange suivant se situe à un moment où les élèves repèrent un contact entre péridotite et basalte.

[Recherchent la limite des différentes formations]

E2 : De la péridotite tu as trouvée toi ?

E3 : De partout là.

E2 : A ouais, là y'a de la péridotite. Et pourtant en bas on avait du basalte

E1 : Ouais parce que y'avais la limite non ?

E3 : On en prend ?

E2 : Y'a plusieurs limites en fait. Ouais, celle-là faut la prendre. Ca c'est de la péridotite serpentinisée

E1 : C'est quelle couleur ? La légende ?

E2 : Je sais pas. Faut voir... Là on a de la péridotite... Et pourquoi tout à l'heure en bas on avait du basalte ? Ben parce que c'était un autre endroit, c'est tout !

On voit ici que le modèle est en arrière-plan de l'échange. La présence d'un contact entre péridotite et basalte pose problème à l'élève E2. Néanmoins, il ne remet pas en cause le modèle. Il propose une hypothèse *ad hoc* pour éviter l'écueil conceptuel : « Ben parce que c'était un autre endroit, c'est tout ! ». Le ton sur lequel est ceci est formulé laisse à penser que E2 ne croit guère que cette hypothèse permet d'expliquer cette anomalie. On remarque également que le recueil des données n'est pas remis en cause alors même que les verbalisations des élèves au cours de ce travail de cartographie indiquent qu'ils s'interrogent beaucoup sur le caractère autochtone ou allochtone des roches et sur la fiabilité de leur échantillonnage.

Plus loin, le même élève E2 utilise le modèle pour interpréter le paysage et donner des instructions à l'autre élève du binôme chargé de réaliser une photographie.

[Prennent une photo de paysage]

E2 : Et là ça fait un peu les trois étages. T'as péridotite, gabbro et... et basalte.

E1 : ...

E2 : Regarde, regarde ! Là t'as péridotite, gabbro, basalte ;

E1 : Comment tu sais ?

E2 : Haha... parce que y'en a un qui est noir, l'autre quoi est vert, et l'autre qui est gris.

Dans cet échange deux tours de parole de E2 jouent un rôle central. Le premier porte sur le modèle : « ça fait un peu les trois étages ». Le second porte sur le *registre empirique* : « y'en a un qui est noir, l'autre quoi est vert, et l'autre qui est gris ». Ils montrent que E2 fait le lien entre ces deux registres.

Alors que le travail de cartographie est sur le point de se terminer, E2 rencontre l'élève E3 (d'un autre binôme). E3 lui apporte une information qui

vient de nouveau bousculer ses certitudes. Il existe bien un contact entre péridotite et basalte.

E2 : Attends, ça veut dire que de ce côté c'est de la péridotite et au milieu c'est du basalte.

E3 : Regarde ça fait des [...]

E2 : C'était quoi qu'on avait ? Du gabbro en bas, de la péridotite tout là et là au-dessus du basalte ?

E3 : Du basalte on en avait déjà en bas.

Pour autant, l'échange ne se poursuit pas par une tentative d'approfondissement de cette question ou par une remise en cause du modèle ou des données recueillies

Cette activité se termine avec un point effectué par l'enseignante sur l'adéquation des données recueillies et du modèle de lithosphère. À la fin de cette mise en commun, une nouvelle activité est lancée. Il s'agit de rechercher des indices du caractère sous-marin des éruptions qui ont permis la formation des basaltes. Le modèle de lithosphère est alors de nouveau évoqué par les mêmes élèves E1 et E2 :

E2 : Tiens, on y regarde [les consignes] maintenant comme ça on saura ce qu'il faut faire...

E1 : [lis les consignes]

E2 : Houla !

E1 : [lis les consignes]

E2 : *Sous-marin ça fait en coussin. On va les trouver en coussin. Les trucs sous-marins ça fait des basaltes en coussins*

E1 : On va en coussin et des *sédiments* volc... Euh...

E3 : On va utiliser la loupe...

Deux caractéristiques du modèle sont évoquées et permettent à E1 et E2 de prévoir quelles observations seront réalisées et donc ce qu'il faut rechercher : des coussins de basalte et des sédiments. Seuls les premiers seront visibles sur le terrain.

On voit, au travers des verbalisations que nous avons pu enregistrer, que le modèle constitue un

véritable outil pour des élèves en situation d'investigation sur le terrain. Ce modèle leur permet d'établir des prévisions sur les observations qu'ils doivent pouvoir effectuer (e.g. prévoir la présence de telle ou telle roche), il leur permet de préciser le travail qu'ils doivent mener et de le traduire en tâches élémentaires exécutables (e.g. localiser la limite entre deux formations géologiques plutôt que cartographier la zone). Ce modèle permet également d'évaluer la fiabilité des observations effectuées (e.g. les contacts entre roches). Au final c'est, nous semble-t-il, la question du sens que les élèves attribuent aux activités de terrain qui est en jeu.

C'est ainsi la mise en relation des données recueillies avec le modèle scientifique qui permet de donner du sens à ces activités. L'explicitation du modèle, son utilisation comme outil permettant le travail d'investigation, l'engagement des élèves dans des tâches qu'ils ont pour partie eux-mêmes conçues, sont autant d'éléments qui participent à l'élaboration d'un *milieu didactique* avec lequel ils peuvent interagir. L'élaboration de ce *milieu didactique* permet la *dévolution du problème* : le recueil de données à confronter avec un modèle scientifique. Elle permet ainsi aux élèves de travailler de manière autonome sur le terrain. Ils n'ont pas besoin de décoder les intentions de l'enseignant afin de comprendre le jeu pédagogique qui se joue. Néanmoins, on voit également que la mise à l'épreuve empirique du modèle dont dispose les élèves est complexe en ce sens qu'il n'est pas possible pour les élèves, en sciences de la vie et de la Terre, de valider leurs modèles et leurs argumentations grâce à un milieu antagoniste comme cela pourrait être le cas en mathématiques (Orange, 2007). Nos propres observations viennent appuyer le point de vue de cet auteur pour qui ceci est lié au caractère apodictique des savoirs en sciences de la vie et de la Terre qui proviennent d'un « travail de construction critique de problèmes » qualifié de *problématisation* plutôt que d'un travail de recherche de preuves.

Démarche d'investigation et interprétation des données

C'est principalement la dernière séance consacrée à la rédaction des commentaires des photographies réalisées sur le terrain qui correspond à un travail

d'interprétation des données recueillies même si nous avons vu plus haut que cette interprétation avait été esquissée sur le terrain.

Le tableau 4 permet, pour l'ensemble des binômes des expérimentations de 2005 (54 binômes), de catégoriser les commentaires rédigés par les élèves. Il est ainsi possible de constater que la majorité des binômes (35 binômes) élabore, pour au moins une des images qu'ils géolocalisent, un texte qui fait

référence simultanément au *registre empirique* et au registre du modèle et développe une argumentation qui articule correctement ces deux registres. Aucun binôme ne s'en tient à des considérations empiriques dans les commentaires rédigés pour l'ensemble des images mais ils sont 23 à le faire pour au moins une image. En ce sens, on peut dire que tous les élèves ont dépassé le niveau de simple constatation des faits mais pour 13 binômes, l'articulation du *registre empirique* et du modèle n'est pas explicitée.

Texte rédigé par les élèves	Eléments du registre empirique	Eléments du modèle	Eléments d'argumentation permettant de faire le lien entre RM et RE	nb de binômes concernés
Le commentaire se limite à des éléments du <i>registre empirique</i>				23
Gabbro Voici du gabbro, roche principale présente à notre arrêt.	Gabbro			
Le commentaire se limite à des éléments du registre du modèle				10
Ouest du mont du Chenaillet preuve d'accrétion		Accrétion		
Le commentaire mentionne des éléments du <i>registre empirique</i> et du registre du modèle sans expliquer leurs relations				21
Paysage couches de basalte et gabbro On peut voir une couche de basalte au-dessus d'une couche de gabbro. Ceci prouve l'accrétion.	Basalte et gabbro	Accrétion		
Le commentaire mentionne des éléments du <i>registre empirique</i> et du registre du modèle et explique leurs relations				35
gabbro avec filon de basaltes roche grenue contenant des filons de basaltes. Ces gabbros sont de couleur verte (chlorite), preuve d'hydratation de la roche : hydrothermalisme. Ces roches sont caractéristiques de la couche océanique (refroidissement lent de basaltes). Les basaltes sont remontés rapidement, traversant les gabbros. Preuve d'accrétion.	Gabbro, filons de basalte, chlorite	Accrétion	La chlorite, indicateur d'hydrothermalisme	

Tableau 4 : Évocation du registre empirique et du registre du modèle dans les commentaires des photographies rédigés par les élèves

Nous discutons ici la question de la façon dont les élèves articulent le registre du modèle et le registre empirique au travers de leurs verbalisations durant ce travail de rédaction. Voilà par exemple la manière dont un élève s'exprime :

[consultent la photographie légendée du massif du Chenaillet]

E1- Des basaltes en coussins au-dessus des gabbros et après des... métamorphisme. *Et bien c'est ça, c'est une accrétion!* Tu vois parce que regarde. Ici ça s'est élargi...

L'accrétion océanique est dans un premier temps un élément qui relève du registre du modèle. À ce stade du travail de l'élève et de son apprentissage, cet

élément est incorporé à ses connaissances et devient une proposition non discutée qui d'une part permet de donner du sens aux données dont il dispose et, d'autre part, lui permet d'accéder au dynamisme des phénomènes qui ont produit ces données. Selon ce point de vue, à ce stade du travail de l'élève, l'accrétion océanique relève des propositions non-discutées qui constituent le *registre théorique* de l'élève. Par *registre théorique* nous entendons non pas théorie formalisée et explicite mais les idées qu'ont les élèves sur la géologie, c'est-à-dire un ensemble d'énoncés que l'élève tient pour vrais et qui constituent autant de *concepts et théorèmes en acte* qui « permettent de penser le réel et d'agir » (Verгдаud, 2001).

Nous représentons sur la figure 4 le rôle joué par le modèle au cours de cet épisode. En premier lieu, l'élève repère la présence de deux roches caractéristiques de la lithosphère océanique (« basaltes en coussins » et « gabbros »). Cela le conduit, dans le cadre du modèle scientifique qu'il utilise, à proposer une explication pour la formation de ces roches (« l'accrétion »), phénomène géologique qu'il a incorporé à son registre théorique. Il envisage alors, en désignant la photographie du massif dont il dispose, une phénoménologie nouvelle (l'élargissement).

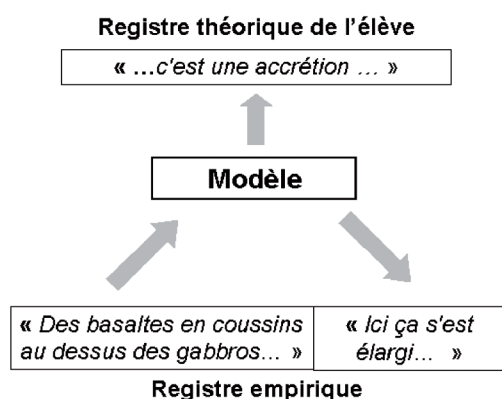


Figure 4 : Place du modèle de référence dans l'articulation des registres empirique et théorique

Cet exemple montre que le modèle de référence permet l'articulation de deux phénoménologies, celle du *registre théorique* et celle du *registre empirique*. C'est ce rôle de pivot qui lui confère son statut d'outil pour comprendre.

En retour, les données interprétées permettent de produire une instance du modèle c'est-à-dire de le paramétrer avec les informations du *registre empirique* dont il permet de rendre compte.

Le rôle joué ici par le modèle s'exprime donc à différents niveaux. Il permet d'abord d'identifier les objets géologiques et d'analyser leurs relations structurales. Ces relations structurales peuvent ensuite être utilisées pour déterminer la chronologie de leur formation. Par la suite, le modèle permet de donner du sens aux données recueillies dans la mesure où ces données sont mises en relation avec des phénomènes géologiques décrits par le modèle. C'est au cours de cette mise en relation entre registre du modèle et *registre empirique* que le modèle est instancié. Cette instanciation permet un retour vers le *registre empirique*. Le modèle permet de porter un regard renouvelé sur le *registre empirique* c'est-à-dire de produire une phénoménologie nouvelle. Ces points sont résumés par la figure 5.

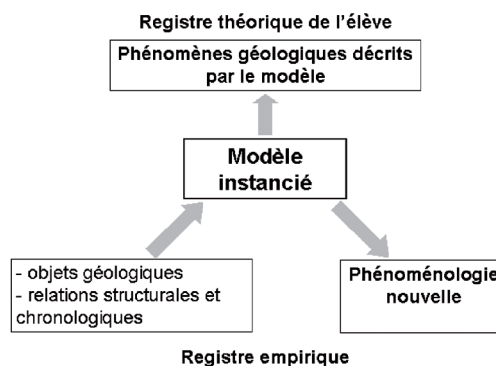


Figure 5 : Le modèle, outil d'intelligibilité

La fonction heuristique du modèle s'exprime donc, non pas au travers d'une simple mise en relation de deux registres, mais plutôt au travers de l'explicitation de ces liens. Si un modèle peut constituer un outil pour comprendre et une aide à la conceptualisation (Larcher, 1994), c'est en particulier parce qu'il permet, dans le cadre d'un travail d'investigation, d'orienter l'action et l'attention sur les éléments du *registre empirique* qui sont déterminants, qu'il permet d'en comprendre les relations spatiales qu'entretiennent ces éléments et qu'il permet de les considérer comme faisant partie d'un système global qui fait sens.

Conclusions

Le travail que nous avons conduit tend à montrer qu'un modèle scientifique de référence joue, dans un contexte d'enseignement, différents rôles qui lui confèrent un statut d'outil pour la conduite d'une démarche d'investigation. Ce modèle joue en particulier un rôle important à deux moments que nous pensons être des moments clés de l'investigation. Il s'agit, en premier lieu, du moment consacré à la conception du protocole. Le modèle permettra à l'élève de prévoir certains aspects du réel et de préparer ses observations. Il s'agit, en second lieu, du moment consacré à l'évaluation de l'adéquation du modèle et du réel c'est-à-dire les phases de recueil et d'interprétation de données. Les observations de terrain sont confrontées au modèle qui est censé les décrire. Nos travaux rejoignent donc ceux de Halloun (2004). Nous considérons qu'une démarche d'investigation consiste à placer les élèves dans un contexte rationnel qui les conduise à se construire un *registre empirique* et à tester la pertinence de ce modèle. Nous avons vu que l'explicitation du modèle lui permettait de jouer des rôles que nous jugeons centraux pour la conduite de l'investigation. L'explicitation du modèle scientifique de référence – telle qu'elle a été réalisée dans l'ingénierie didactique que nous avons construite – nous paraît donc être une condition nécessaire pour que des élèves puissent conduire de manière autonome un travail d'investigation. Cela nous conduit à retenir l'hypothèse qu'une démarche d'investigation dans un contexte scolaire procède d'une démarche de modélisation c'est-à-dire une démarche qui, dans le cadre de la résolution d'un problème, conduit à mettre en tension un modèle scientifique et un *registre empirique* constitué lors d'activités de laboratoire ou de terrain. Il s'agit donc, pour reprendre les termes d'Orange (2007) de permettre la co-construction de ces registres par un travail de problématisation. Une telle démarche nous semble pouvoir être décrite par trois phases :

- une phase d'analyse préalable d'une représentation du modèle permet à l'élève d'en identifier les caractéristiques et propriétés. Cette analyse peut le conduire à en apprécier le dynamisme. Les caractéristiques du modèle peuvent être traduites en observables de terrain. Il lui est alors possible d'élaborer un protocole d'observation c'est-à-dire de déterminer les procédures à mettre en œuvre pour confronter le modèle au *registre empirique*. Les prises de décision

lors de l'élaboration du protocole sont sous-tendues par la connaissance de certains éléments du modèle scientifique de référence. C'est principalement le caractère « prophétique » du modèle qui est employé au cours de cette phase ;

- une phase de mise en œuvre de ces procédures le modèle permet de préciser la manière dont elles sont exécutées et d'effectuer une sélection des informations à recueillir. Le modèle constitue alors les *lentilles conceptuelles* permettant de percevoir des objets géologiques et de distinguer l'essentiel de l'accessoire pour d'aborder l'étude de systèmes ou de situations complexes. C'est principalement la fonction de perception qui est mise en jeu lors de cette phase (Martinand, 1992) ;

- une phase au cours de laquelle les informations recueillies sont confrontées au modèle. Cette confrontation s'effectue par l'établissement de liens argumentés entre les caractéristiques du modèle et les éléments du *registre empirique*. Le modèle constitue alors un cadre conceptuel dont la confrontation au réel permet de donner du sens aux données recueillies.

Du point de vue de l'enseignant, il s'agit de concevoir des situations d'apprentissage prenant appui sur une question problématisée et mettant en avant une démarche réfléchie et construite fondée sur l'utilisation d'un modèle de référence. L'enjeu de l'élaboration de telles situation de classe au cours desquelles les élèves sont amenés à s'engager dans un travail d'investigation réside dans le sens que l'élève peut donner aux tâches qui lui sont prescrites. L'explicitation du modèle permet de justifier l'ensemble de ces tâches qui peuvent ainsi être perçues comme au service d'un projet global. De ce point de vue, notre démarche s'oppose à une démarche inductive pour laquelle le modèle est construit pas à pas au fur et à mesure de la découverte progressive de ses différents éléments à partir de l'interprétation de données de terrain ou de résultats expérimentaux. Elle se distingue également d'une démarche qui conduirait l'élève, à partir de l'exploration d'un modèle (par exemple simulé informatiquement) et à en inférer les caractéristiques et propriétés.

Il y a, du point de vue de leur formation scientifique, probablement une grande importance à ce que

le processus de construction des connaissances scientifiques soit vécu par les élèves comme une démarche fondée sur la confrontation argumentée d'idées que les scientifiques ont sur le monde avec les données qu'il est possible de recueillir. Imposer un « modèle solution » plutôt qu'un « modèle outil » conduirait à tomber dans le piège du dogmatisme. Néanmoins, le travail sur le terrain ne vise pas les mêmes objectifs selon qu'il est conduit par un géologue-chercheur ou un élève-apprenant. Les données recueillies ne sont pas de même nature et ne revêtent pas la même signification. Autrement dit, les registres empiriques du chercheur et de l'élève ne sont pas équivalents et notre projet n'est pas de reconstruire, dans l'enseignement, les conditions pour que les élèves puissent conduire des investigations comparables à celles des chercheurs mais plutôt d'examiner les conditions de transposition (c'est-à-dire de reconstruction), dans un contexte scolaire, des concepts, outils et démarches du géologue.

Enfin, la question de la modélisation et des modèles nous paraît être une question qui dépasse largement les aspects qui concernent l'enseignement des sciences *sensu stricto*. Le développement des technologies se traduit par la multiplication d'outils numériques qui font appel à des modèles. Ces modèles tendent parfois à être confondus avec le réel lui-même. Ce point nous paraît constituer un enjeu éducatif majeur. Il s'agit de développer la capacité des adolescents à distinguer les éléments qui relèvent de ces deux registres et à comprendre les relations qui les articulent. Il nous paraît légitime de formuler l'hypothèse que l'engagement d'élèves dans des activités de modélisation pour lesquelles ils sont amenés à problématiser cette articulation est de nature à les aider à accéder à cette compréhension.

Ce travail a été conduit dans le cadre d'une thèse dirigée par Luc Trouche et Christian Orange

NOTES

1. Le terme *classe de terrain* est le terme utilisé dans les programmes de sciences de la vie et de la Terre. Il permet de souligner le caractère pédagogique des sorties géologiques.

2. Nous utilisons le singulier par souci de simplification mais nous considérons néanmoins que les situations construites peuvent porter sur la confrontation de plusieurs modèles pour décrire une même situation empirique.

BIBLIOGRAPHIE

- Artigue, M. (1988). Ingénierie didactique. *Recherches en didactique des mathématiques*, 9 (3), 281-308.
- Bachelard, S. (1979). Quelques aspects historiques des notions de modèle et de justification des modèles. In P. Delattre & M. Thellier (Eds.), *Elaboration et justification des modèles*. Paris : Maloine.
- Becu-Robinault, K. (2002). Modelling activities of students during a traditional labwork. In D. Psillos & H. Niedderer (Eds.), *Teaching and learning in the science laboratory*. Dordrecht, Holland : Kluwer Academic Publishers.
- Bouleau, N. (1999). *Philosophies des mathématiques et de la modélisation. Du chercheur à l'ingénieur*. Paris : L'Harmattan.
- Brown, A. L. (1992). Design experiments : Theoretical and methodological challenges in creating complex interventions in classroom settings. *Journal of The Learning Sciences*, 2 (2), 141-178.
- Bukley, B. C., & Boulter, C. J. (2000). Investigating the role of representation and expressed models in building mental models. In J. K. Gilbert & C. J. Boulter (Eds.), *Developing models in science education*. Dordrecht, Holland : Kluwer Academic Publishers.
- Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale. (2000). n°23 du 15 juin 2000.
- Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale. (2002). hors-série du 12 février 2002.
- Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale. (2004). hors-série n°5 du 9 septembre 2004.
- Bunge, M. (1975). *Philosophie de la physique*. Paris : Editions du Seuil.
- Buty, C. (2000). *Etude d'un apprentissage dans une séquence d'enseignement en optique géométrique à l'aide d'une modélisation informatique*. Thèse de doctorat, Université Lyon 2, Lyon. consultable sur http://demeter.univ-lyon2.fr:8080/sdx/theses/lyon2/2000/buty_c
- Buty, C., Tiberghien, A., & Le Maréchal, J.-F. (2004). Learning hypotheses and an associated tool to design and to analyse teaching-learning sequences. *International Journal of Science Education* (26), 579-604.
- Canguilhem, G. (1968). Modèles et analogie dans la découverte en géologie. In G. Canguilhem (Ed.), *Etudes d'histoire et de philosophie des sciences* (1994 ed.). Paris : Vrin.
- Chalot-Prat, F. (2005). An undeformed ophiolite in the Alps: field and geochemical evidences for a link between volcanism and shallow plate tectonic processes. In G. R. Foulger & D. L. Anderson & J. H. Natland & D. C. Presnall (Eds.), *Plates, Plumes & Paradigms* (pp. 751-780.). Boulder, USA : Geological Society of America. consultable sur <http://francoise.cp.free.fr/geol/index-en.html>
- Coince, D., Miguet, A., Perrey, S., Rondepierre, T., Tiberghien, A., & Vince, J. (2007) Un outil de diagnostic et d'évaluation pour aider l'élève en physique-chimie. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 102 (900), 3-20. consultable sur : http://www.udppc.asso.fr/bupdoc/consultation/une_fiche.php?ID_fiche=19130
- Dercourt, J., & Paquet, J. (2002). *Géologie, objets et méthodes* (11 ed.). Paris : Dunod.
- Dercourt, J., Paquet, J., Thomas, J., & Langlois, C. (2006). *Géologie : objets, méthodes et modèles* (12 ed.). Paris : Dunod.
- Gilbert, K. J., & Boutler, J. C. (2000). *Developing Model in Science Education*. Dordrecht, Holland : Kluwer Academic Publisher.

- Guichard, J. (1994). Réactions à propos de la modélisation. In J.-L. Martinand (Ed.), *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences* (pp. 79-84). Paris : INRP.
- Halloun, I. A. (2004). *Modeling theory in science education*. Dordrecht, Holland : Kluwer Academic Publishers.
- Harrison, A. G. (2001). *Thinking and Working Scientifically: The role of Analogical and Mental Models*. Communication présentée à la conférence annual meeting of the Australian Association for Research in Education, Fremantle.
consultable sur : <http://www.aare.edu.au/01pap/har01126.htm>
- Johnson-Laird, P. (1983). *Mental models*. Cambridge, MA : Harvard University Press.
- Johsua, S., & Dupin, J.-J. (1989). *Représentations et modélisations : le débat scientifique dans la classe*. Berne : Peter Lang.
- Kuhn, T. S. (1962). *La structure des révolutions scientifiques* (1983 ed.) : Flammarion.
- Larcher, C. (1994). Etude comparative de démarches de modélisation. Quelles sont les caractéristiques des démarches de modélisation. In J.-L. Martinand (Ed.), *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences* (pp. 9-24). Paris : INRP.
- Larcher, C. (1996). La physique et la chimie, sciences de modèles. In J. Toussaint (Ed.), *Didactique appliquée de la physique-chimie* (pp. 160-178) : Nathan.
- Lhoste, Y. (2006). La construction du concept de circulation sanguine dans un débat scientifique en classe de 3ème : problématisation, argumentation et conceptualisation. *Aster* (42), 79-108.
- Martinand, J.-L. (1992). Présentation. In J.-L. Martinand (Ed.), *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences* (pp. 7-22). Paris : INRP.
- Martinand, J.-L. (1994a). *Introduction à la modélisation*. Communication présentée à la conférence Actes du séminaire de didactique des disciplines technologiques, Cachan, pp. 126-138.
- Martinand, J.-L. (1994b). Quels enseignements peut-on tirer des travaux dans la perspective du développement de curriculum ?, *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences* (pp. 127-133). Paris : INRP.
- National Committee on Science Education Standards and Assessment. (1996). *National Science Education Standards*. Washington, DC : National Research Council.
- Nersessian, N. J. (1999). Model-based reasoning in conceptual change. In L. Magnani & N. J. Nersessian & P. Thagard (Eds.), *Model-based reasoning in scientific discovery*. New York : Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- OCDE. (2006). *Evolution of student interest in science and technology studies* : OCDE.
- Orange, C. (1995). *Intérêt de la modélisation pour la définition de savoir opérants en biologie*. Communication présentée à la conférence Séminaire de didactique des disciplines technologiques, Cachan.
- Orange, C. (1997). *Problèmes et modélisation en biologie, quels apprentissages pour le lycée ?* Paris : PUF.
- Orange, C. (2000). *Idées et raisons : constructions de problèmes, débats et apprentissages scientifiques en SVT*. Mémoire de recherche pour l'HDR, Université de Nantes, Nantes.
- Orange, C. (2007). Quel milieu pour l'apprentissage par problématisation en sciences de la vie et de la Terre ? *Education & Didactique*, 1 (1), 37-55.
- Orange, C., Beorchia, F., Ducroq, P., & Orange, D. (1999). « Réel de terrain », « Réel de laboratoire » et construction de problèmes en sciences de la vie et de la Terre. *Aster* (28), 107-129.
- Pacault, A. (1987). *De la modélisation*. Communication présentée à la conférence Modèles et simulation, Neuvièmes journées sur l'éducation scientifique, Chamonix, pp. 124-128.
- Rocard, M., Csermely, P., Jorde, D., Lenzen, D., Walberg-Henriksson, H., & Hemmo, V. (2007). *Science Education Now : A Renewed Pedagogy for the Future of Europe*: European Commission.

- Sanchez, E. (2008). Integrating Geomatics into the Curriculum: Inquiry-Based-Learning during a Fieldwork Course. In T. Jekel & A. Koller & K. Donert (Eds.), *Learning with Geoinformation III* (pp. 78-87). Heidelberg : Wichmann.
- Sanchez, E., & Prieur, M. (2007, 21-25 août). *Models and Modelling during Geoscience Courses : Geoscience Teachers Practices in France*. ESERA. Communication présentée à la conférence ESERA Congress, Malmö, Sweden.
- Sanchez, E., Prieur, M., & Devallois, D. (2005). L'enseignement de la géologie en classe de seconde : quels obstacles, quelles pratiques. In A. Giordan & J.-L. Martinand & D. Raichvarg (Eds.), *Par les mots et par les choses*. Chamonix : JIES.
- Sanchez, E., Prieur, M., & Fontanieu, V. (2007). *Modèles et modélisation dans l'enseignement des sciences de la Terre au lycée : Points de vue et pratiques d'enseignants*. Communication présentée à la conférence Vèmes rencontres de l'ARDIST, La Grande Motte, pp. 345-351.
- Stengers, I. (1993). *L'invention des sciences modernes*. Paris : La Découverte.
- Tiberghien, A. (1994). Modeling as a basis for analyzing teaching-learning situations. *Learning and instructions*, 4, 71-87.
- Van Driel, J., & Verloop, N. (1999). Teacher's knowledge of models and modelling in science. *International Journal of Science Education* (11), 1141 - 1153.
- Vergnaud, G. (2001). *Forme opératoire et forme prédicative de la connaissance*. Communication présentée à la conférence colloque GDM La notion de compétence en enseignement des mathématiques, analyse didactique des effets de son introduction sur les pratiques et sur la formation., Montréal, pp. 6-27.
- Walliser, B. (1977). *Systèmes et modèles*. Paris : Seuil.