



Didactique de la physique et conception d'un simulateur pour l'enseignement de l'astronomie au cycle 3

► **Géraldine BOIVIN-DELPIEU** (ELIADD, Université de Bourgogne Franche-Comté), **Pierre JOUBERT** (Institut UTINAM, UMR CNRS 6213, Université de Bourgogne de Franche-Comté)

■ **RÉSUMÉ** • Cet article rend compte de la méthodologie de conception d'une interface numérique pour l'enseignement de l'astronomie. Nous justifions les contraintes didactiques ayant guidé notre travail au travers de plusieurs dimensions : les compétences des praticiens ; les hypothèses théoriques sur l'apprentissage à travers notamment des tâches épistémiques et des activités de modélisation et les contraintes institutionnelles liées aux concepts à enseigner. Nous présentons aussi la transposition de ces contraintes au sein de l'interface.

■ **MOTS-CLÉS** • Didactique, apprentissage, enseignement, modélisation, tâches épistémiques, interface numérique.

■ **ABSTRACT** • *This paper reports the methodology used for the design of a digital interface unit devoted to astronomical education. Didactic constraints used to support this work are presented following different food for thought: teachers' skills; theoretical assumptions of learning based on epistemic tasks and modelization activities and institutional constraints related to learning concepts. And, we introduce the implementation of these constraints for the digital interface unit.*

■ **KEYWORDS** • *Didactic, learning, education, modelization, epistemic tasks, digital interface unit.*

1. Introduction

Aujourd'hui, l'école ne peut éluder la question de l'introduction du numérique qui n'est pas seulement une révolution technologique mais aussi un phénomène culturel et social qui imprègne nos vies quotidiennes. Étant donné sa mission de permettre aux élèves de développer les habiletés qui leur permettront de s'insérer dans la société de demain, l'école doit se saisir des opportunités fournies par le numérique pour apprendre à poser et résoudre des problèmes, à collaborer, à développer l'autonomie, la créativité, l'esprit critique... (IGEN, 2017). Aussi, les préconisations officielles liées à l'enseignement des sciences s'intègrent dans cette perspective en affirmant, depuis de nombreuses années, la nécessité de recourir à des pratiques pédagogiques basées sur des méthodes d'investigation (Rocard *et al.*, 2007) mais aussi en encourageant le développement de la science informatique, des techniques et des outils numériques (séminaire national : le numérique pour l'enseignement des sciences et de la technologie au collège et au lycée-avril 2018). Ces préconisations générales se traduisent dans les programmes de sciences expérimentales au cycle 3 de l'école primaire (CM1-CM2 soit 9-10 ans) par une démarche de construction des concepts scientifiques qui « *exige des observations, des expériences, des mesures, etc.* » mais aussi « *la construction progressive de modèles simples, permettant d'interpréter celles-ci et d'expliquer une diversité de phénomènes, et de les prévoir* » (MEN, 2015). Cette notion de modèle apparaît dans la partie liée à l'astronomie où elle est alors associée à d'autres approches comme la simulation. Toutefois, plusieurs recherches soulignent les difficultés des enseignants à la fois à concevoir et à implémenter des séquences de sciences fondées sur l'investigation (Marlot et Morge, 2016) mais aussi à réellement intégrer les technologies numériques dans leur enseignement (Gerard et Roegiers, 2011).

C'est dans ce contexte et dans le cadre d'une recherche collaborative, que nous avons souhaité développer un environnement informatique pour faciliter l'enseignement et l'apprentissage de l'astronomie au cycle 3. Nous nous sommes intéressés à l'étude de la variation de la durée de la journée en différents lieux sur Terre et à différents moments de l'année. Nous proposons dans cet article de montrer comment nous avons pris appui à la fois sur des hypothèses théoriques mais aussi sur une analyse des difficultés des élèves et des enseignants pour concevoir cet environnement informatique en collaboration avec des enseignants de cycle 3, des partenaires de la DANE et une entreprise experte en

innovation numérique et en ingénierie digitale 3D. Dans une première partie, nous présenterons les cadres théoriques de référence sur lesquels la conception s'appuie. La seconde partie sera consacrée à la présentation de l'artéfact et à l'impact de ces cadres sur sa structuration.

2. Cadres théoriques soutenant la conception

2.1. Hypothèses générales sur l'enseignement et l'apprentissage

Nous ne cherchons pas ici à développer les hypothèses psychologiques fondatrices de la théorie socioconstructiviste mais seulement à indiquer que nous y inscrivons nos travaux. Ainsi, nous considérons l'apprentissage comme le produit d'activités sociocognitives liées aux échanges didactiques enseignants-apprenants et apprenants-apprenants ce qui impacte les situations d'apprentissage que nous développons : nous privilégions systématiquement la mise en activités des élèves autour de situations problématiques, la prise en compte des représentations des apprenants, les interactions entre pairs et avec le milieu, le travail de verbalisation, etc. (Boivin-Delpieu, 2020)

Pour préciser notre point de vue, et conformément à la théorie de l'action conjointe en didactique (Sensevy, 2011), nous considérons l'apprendre et le faire apprendre comme solidaires. Ainsi, toute action didactique est vue comme une transaction entre un enseignant et des apprenants et dont les objets transactionnels sont constitués des objets de savoir. Construire une situation d'apprentissage implique donc nécessairement de penser réciproquement les actions du professeur en lien avec celles des élèves mais aussi de penser l'organisation du milieu, c'est-à-dire « *le potentiel d'action virtuel* » que l'élève doit construire pour résoudre un nouveau problème (DPE, 2019).

Outre ces hypothèses théoriques liées aux modalités d'apprentissage, nous souhaitons intégrer à nos réflexions une composante épistémologique. En effet, à l'instar d'autres auteurs (Tiberghien *et al.*, 2007), (Boivin-Delpieu, 2015), nous considérons que la signification du savoir en classe (et donc la construction des connaissances) est liée au fonctionnement du savoir de la discipline enseignée. Aussi, nous développerons, dans une première partie, le rôle des activités de modélisation dans l'élaboration des connaissances scientifiques et en particulier dans les apprentissages scolaires. De plus, nous avons souhaité associer à cette composante, une composante cognitive liée aux tâches

épistémiques (Tiberghien *et al.*, 2007). Ainsi, la seconde partie permettra de mettre en évidence le lien entre les tâches épistémiques soumises aux élèves et les apprentissages scientifiques.

2.2. Les activités de modélisation dans l'apprentissage en physique

2.2.1. La modélisation en sciences physiques

Les physiciens qui visent à décrire, interpréter et prévoir les phénomènes du monde sensible, construisent des théories, susceptibles d'évoluer voire même de disparaître, mais dont le but ultime est de tendre vers l'universalité. Dans ce cadre, une théorie permet de définir un ensemble de principes qui décrivent les lois générales de la Nature et qui permettent de relier des concepts à des situations expérimentales. On peut, par exemple, citer la loi d'attraction universelle énoncée par Newton pour décrire l'observation de la chute des corps (Newton, 1687). L'interprétation des expériences illustrant une situation physique ou une classe de problèmes ou d'objets physiques est alors décrite à partir d'un modèle qui ne tend pas à l'universalité, comme une loi ou un principe, mais à une généralité sur une classe de systèmes appartenant à des contextes différents.

« Le modèle, qui prend place dans la construction de cette intelligibilité est devenu un outil majeur de la démarche scientifique » (Morge et Doly, 2013). Toutefois, cette notion « bien que fort répandue dans la pratique scientifique comme dans la recherche épistémologique, ne ressort pas d'une définition unique. [...] La définition du terme n'est donc pas établie, et il n'est pas sûr qu'un consensus même approché existe à ce propos parmi les utilisateurs » (Johsua et Dupin, 1989). Cependant, il nous semble important de souligner sa fonction de mise en relation entre « réalité scientifique » et constructions théoriques. Selon Morge et Doly (2013), on peut parler de « réalité scientifique pour désigner la réalité sur laquelle les chercheurs travaillent, mais non pas celle que l'on voit, immédiate et intuitive, mais celle, contre-intuitive, qui est définie et désignée par la connaissance scientifique ». Ainsi, il s'agit d'adhérer à « un réalisme minimum qui ne postule aucune réalité transcendante qui excèderait la connaissance scientifique, tout en acceptant l'idée que les théories portent bien sur un monde objectif extérieur à elles mais circonscrit aux objets dont elles construisent la connaissance ». Dans cet esprit, Walliser conçoit le modèle comme « un médiateur entre un champ théorique dont il est une interprétation et un champ empirique dont il est une synthèse » (Walliser, 1977). Le modèle n'est ni théorique, ni

expérimental mais il « *représente non pas les propriétés du réel, mais seulement certaines propriétés. Il a une fonction sélective des données de l'expérience ; il sépare le pertinent du non-pertinent par rapport à la problématique considérée. Il est un instrument d'intelligibilité d'un réel dont la complexité des propriétés ne permet pas l'entière compréhension par la science : disons de façon plus explicite qu'en physique par exemple, la modélisation, par la sélection des données, par la considération exclusive de certains paramètres, par la précision d'hypothèses simplificatrices, permet la mise en œuvre de la mathématisation* » (Bachelard, 1979).

Le modèle apparaît ainsi « *comme un système homomorphe à un système donné mettant en évidence certaines de ses caractéristiques* » (Walliser, 1977). Plusieurs types de modèles peuvent être distingués :

- Les modèles descriptifs tels que des maquettes, des copies simplifiées des objets tels que nous les percevons (système solaire).

- Les modèles images qui décrivent des objets non perceptibles par des copies supposées très agrandies (exemple du modèle planétaire de l'atome). Autrement dit, les modèles images englobent tout ce qui n'est pas accessible par nos sens.

- Les modèles analogiques qui s'appuient sur l'idée d'exploiter une ressemblance partielle entre deux réalités, l'une d'elles devant aider à mieux comprendre l'autre (analogie avec l'eau en électricité).

- Les modèles symboliques qui traduisent une situation physique dans un langage plus ou moins abstrait. Ce langage peut être de divers ordres : le langage iconique tels que des symboles, des graphiques, des schémas, des courbes, des diagrammes (représentation linéaire de la loi d'Ohm, courbe de croissance) ; le langage logico-mathématiques tel que des formules ($U = RI$). De plus, et toujours en accord avec les propos de Walliser (Walliser, 1997), les modèles peuvent assurer des fonctions diverses de représentation, d'explication et de prévision.

Ainsi, le modèle est le sujet sur lequel on réalise des calculs à partir des principes et des lois du cadre théorique auquel il appartient. Le modèle n'étant pas la réalité mais une description (souvent imparfaite et partielle) de cette réalité, il est donc important d'avoir conscience de ses limites. Ces limites peuvent être de trois types :

- les approximations : il s'agit de quantités, d'effets ou d'éléments dont l'influence sur le comportement du système que l'on désire décrire est supposée très faible ;

- les idéalizations : il s'agit de propriétés ou de comportements du système qui sont simplifiés ou adaptés pour faciliter les calculs ;

- les transpositions: il s'agit d'utiliser un modèle hors du cadre théorique réel du système étudié.

Ces limites, et plus particulièrement leurs méconnaissances, peuvent constituer des situations de blocage dans les situations d'apprentissage et la mise en œuvre des tâches épistémiques associées.

2.2.2. Modélisation et apprentissage de la physique

Même si l'activité de modélisation des scientifiques est fondamentalement différente de celle des élèves, certains auteurs (Bécu-Robinault, 2002), (Bécu-Robinault, 2004), (Bécu-Robinault, 2018), (Boivin-Delpieu, 2015), (Buty *et al.*, 2004), (Tiberghien, 1994) considèrent que, pour donner du sens à un concept scientifique, il est nécessaire que la démarche implique la mise en place de situations au sein desquelles les élèves devront mettre en relation des éléments des « *modèles et théories enseignés et la description d'une situation matérielle en termes d'objets et d'évènements* » (Bécu-Robinault, 2004). Autrement dit, « *donner une explication, une interprétation ou une prédiction au sujet d'un événement du monde sensible, nécessite une activité de modélisation* » (Séjourné et Tiberghien, 2001) c'est-à-dire « *l'articulation de deux niveaux de description d'une situation : celui des modèles et celui des objets et évènements* » (Bécu-Robinault, 2018). Cette approche des deux mondes et proposée par Tiberghien (Tiberghien, 1994), implique de définir les limites relatives à chacun de ces mondes.

Le niveau de la théorie inclut le niveau explicatif de la modélisation. Il est principalement constitué de concepts, de règles, de théories construites à partir d'une abstraction des données empiriques. Le niveau des objets et des évènements, quant à lui, ne contient pas de système explicatif ; « *il est constitué de ce qui est étudié et non encore interprété* » (Bécu-Robinault, 2018). Notons que les mesures sont associées à ce niveau notamment car « *il semble difficile au novice de séparer la mesure de l'instrument qui l'a générée en explicitant le modèle sous-jacent à la conception de l'instrument* » (Ibid., 2018). Le modèle joue le rôle d'intermédiaire entre ces deux niveaux.

2.3. Tâches épistémiques et apprentissage de la physique

Pour construire des connaissances en sciences physiques et ainsi mieux comprendre le monde matériel, il est nécessaire que les apprenants puissent établir des liens entre des éléments de connaissances en jeu dans

la construction des concepts visés (Tiberghien *et al.*, 2007). Ohlsson (Ohlsson, 1996) construit une catégorisation de tâches épistémiques rendant compte des raisonnements susceptibles d'établir ces liens : décrire, expliquer, argumenter, prédire, critiquer, définir.

De manière à mieux correspondre aux spécificités de l'enseignement et de l'apprentissage de la physique, Tiberghien *et al.* (Tiberghien *et al.*, 2005) proposent une nouvelle catégorie de tâches épistémiques « Questionner » et précisent les objets associés à la tâche (Tableau 1).

Tableau 1 • Categories of epistemic tasks (Tiberghien, Buty et Le Maréchal, 2005, p. 42)

Epistémic tasks	Theme (object of the task)	How
Describing	<ul style="list-style-type: none"> - Observable facts (events, objects, indications) - Graph, schema, image 	
Interpreting	<ul style="list-style-type: none"> - Observed facts - Concepts - Principle, laws, theoretical definition - Strategy of using principle, laws, theoretical definition, concept 	<ul style="list-style-type: none"> - Constructing relation between objects-events - Constructing relation between objects-events and physical quantities - Constructing relation between physical quantities
Predicting	<ul style="list-style-type: none"> - Experimental facts - Theoretical element - Relation between facts and theoretical element 	<ul style="list-style-type: none"> - Intuitively - From observation of objects or events - From theoretical elements
Defining	<ul style="list-style-type: none"> - Observed facts - Concepts - Principle, laws, theoretical definition 	
Explaining	<ul style="list-style-type: none"> - Observed facts - Concepts - Principle, laws, theoretical definition - Strategy of using principle, laws, theoretical definition, concept 	<ul style="list-style-type: none"> - Constructing relation between objects-events - Constructing relation between objects-events and physical quantities - Constructing relation between physical quantities
Questioning	<ul style="list-style-type: none"> - Observed facts - Concepts - Principle, laws, theoretical definition - Strategy of using principle, laws, theoretical definition, concept 	
Arguing	<ul style="list-style-type: none"> - Observed facts - Concepts - Principle, laws, theoretical definition - Strategy of using principle, laws, theoretical definition, concept 	
Critiquing (evaluating)	<ul style="list-style-type: none"> - Observed facts - Concepts - Principle, laws, theoretical definition - Strategy of using principle, laws, theoretical definition, concept 	<ul style="list-style-type: none"> Knowledge produced - by him/herself - by other

Une précédente recherche a non seulement montré la pertinence de cette classification pour analyser les savoirs en jeu à l'école primaire mais

a également montré que la variété des tâches épistémiques intégrées aux activités proposées aux élèves et non leurs répétitions constitue un facteur favorable à la construction des savoirs visés (Boivin-Delpieu, 2015).

3. Question de recherche

Nous situons cette recherche par rapport à cet état de connaissances scientifiques. Nous avons souhaité restreindre notre étude au domaine de l'astronomie, domaine pour lequel enseignants et élèves rencontrent des difficultés. D'une part, ces difficultés sont dues à une compréhension limitée des modèles et de la modélisation chez les élèves mais aussi chez les enseignants. Par exemple, les modèles sont assimilés à une représentation de la réalité ou leurs fonctions heuristique et prédictive ne sont que rarement évoquées (Roy et Hasni, 2014). D'autre part, ces difficultés sont liées aux concepts enseignés. En effet, des incohérences entre ce qui est expérimenté et ce qui est enseigné (Kikas, 2006) peuvent apparaître, notamment parce que les élèves ont tendance à classer la Terre comme un objet physique et non astronomique et ainsi à lui attribuer des présupposés appropriés pour des objets physiques en général (organisation haut-bas, stabilité, solidité...) (Merle, 2002). Toutefois, d'autres recherches ont montré la pertinence de recourir à des simulations, notamment avec des techniques de réalité augmentée pour faciliter les apprentissages. En effet, cet intérêt potentiel est notamment expliqué par la possibilité pour les élèves d'apprendre par l'action et en situation en leur permettant de construire des connaissances d'une manière active et autonome (Fjeld et Voegtli, 2002), mais aussi par la possibilité de montrer simultanément des artefacts physiques et les notions abstraites qui y sont associées pour assurer une compréhension plus facile des concepts (Stedmon *et al.*, 1999) ou encore de faciliter l'élaboration de représentations de relations spatiales dynamiques et leur évolution dans le temps et l'espace (Shelton et Hedley, 2002). Ce dernier argument a d'ailleurs été établi lors d'une recherche menée dans le supérieur à propos des mouvements de la Terre. Sur ce thème, à notre connaissance, aucune recherche mettant en œuvre des outils de réalité augmentée n'a été menée au niveau primaire. En effet, Fleck et Simon (Fleck et Simon, 2013) ont montré l'intérêt du recours à cette technologie pour enseigner/étudier les phases de la Lune.

Aussi, dans ce contexte, nous avons souhaité concevoir un nouvel artefact pour faciliter l'enseignement et l'apprentissage de concepts scientifiques en astronomie au cycle 3 et tenant compte des hypothèses théoriques sur l'apprentissage notamment celles liées aux activités de

modélisation, à l'influence des tâches épistémiques sollicitées, mais aussi aux difficultés couramment identifiées dans le domaine.

Nous exposons dans la suite la méthodologie développée puis nous montrons les résultats sur le dispositif non pas sous l'angle informatique mais bien sous l'angle des apprentissages visés. L'interface numérique est conçue comme un outil facilitant l'appropriation des connaissances visées.

4. Méthodologie

La conception du dispositif pédagogique numérique s'intègre dans une recherche en cours. Comme le rappellent Burkhardt et Schoenfeld (Burkhardt et Schoenfeld, 2003), concevoir et implémenter une innovation techno-pédagogique dans un contexte éducatif se déroule sur de longues échelles de temps. En effet, afin d'élaborer ce nouvel artéfact tenant compte à la fois de nos hypothèses théoriques mais également des difficultés des enseignants et des élèves, nous avons opté pour les principes théorico-méthodologiques de la Design-Based-Research (Design-Based-Research Collective, 2003) et organisé la recherche selon 3 phases de travail :

- l'analyse du problème concret par le groupe chercheurs et praticiens en collaboration ;
- le développement d'une solution ;
- un cycle itératif d'essais de la solution en situation réelle.

À ce jour les deux premières phases ont été réalisées. La première phase s'est déroulée sur un an environ et a permis d'analyser le problème à traiter, relatif à la modélisation et à l'usage de simulation pour l'enseignement et l'étude de l'astronomie à l'école primaire. Pour cela, les chercheurs ont travaillé avec trois enseignants volontaires qui ont accepté d'élaborer et d'implémenter une séquence dont les objectifs sont de faire le lien entre la variation de la durée de la journée sur Terre et les mouvements de la Terre. Étant donné les objectifs de la recherche, le recours à du matériel tangible et numérique (comme le recommandent les instructions officielles) a été imposé mais l'organisation du milieu didactique et la planification des contenus ont été pleinement laissées à la charge des enseignants. Ainsi, nous considérons cette perturbation imposée à nos systèmes d'étude comme étant contrôlée (Chevallard, 1998) et relativement proche des pratiques ordinairement mises en œuvre. En effet, la plupart des ressources pédagogiques telles que les documents d'accompagnement ou les manuels scolaires, préconisent le recours à du

matériel tangible de substitution (balles, lampes, etc.) pour modéliser les mouvements de la Terre. De plus, les instructions officielles ajoutent que cette partie du programme pourra être traitée par des approches variées telles que les simulations. Le corpus principal recueilli, afin d'interroger les pratiques de ces enseignants et les conditions d'étude de leurs élèves, est constitué des séquences implémentées filmées et de leurs transcriptions, des travaux des élèves, des fiches de préparation et des entretiens menés avec les enseignants. L'analyse menée conjointement entre chercheurs et praticiens et la revue de littérature préalable ont permis à la fois d'identifier les éléments spécifiques issus de la stratégie didactique permettant aux élèves de construire un modèle explicatif cohérent, intermédiaire entre leurs connaissances naïves et l'explication scientifique mais aussi de repérer en quoi le déroulé de la séquence prévue par les enseignants contraint les tâches épistémiques imposées aux élèves c'est-à-dire la structure logique d'enseignement en relation avec les pratiques sociales de référence (Martinand, 1985).

La seconde phase de travail avait pour objectif l'élaboration de l'artéfact. Aussi, chercheurs et praticiens ont traduit les hypothèses théoriques, les difficultés des élèves et des enseignants identifiées lors de la phase 1 en un ensemble de contraintes et besoins explicités dans un cahier des charges fonctionnel destiné à une entreprise experte en innovation numérique (<https://www.allucyne.com/en>). Ainsi, les contraintes techniques ont été laissées à la charge de l'entreprise associée. Cet objet a permis d'acter la collaboration chercheurs-praticiens-entreprise en recueillant à la fois des savoirs issus de la recherche et des savoirs pratiques (Lyet, 2011). L'entreprise associée a alors proposé à l'équipe, selon différentes étapes, des solutions techniques qui ont été discutées, testées puis retravaillées. Nous présenterons dans la suite la manière dont les hypothèses théoriques, traduites en contraintes et besoins, ont pris forme dans le prototype proposé.

La phase 3 permettra ensuite de tester ce prototype en conditions réelles et d'interroger le nouveau pouvoir d'action des enseignants ainsi que les nouvelles activités de modélisation des élèves.

5. Analyses a priori

5.1. Analyse a priori des savoirs visés

Notre question de recherche est en lien avec la partie « La planète Terre. Les êtres vivants » du programme de sciences expérimentales du

cycle 3, et en particulier avec les connaissances associées : « Décrire les mouvements de la Terre (rotation sur elle-même, autour du Soleil et cycle des saisons) ». Rappelons qu'à l'école primaire, les approches d'enseignement sont avant tout phénoménologiques et que les objectifs d'apprentissage sont tournés vers des modèles explicatifs permettant de comprendre et de décrire le monde. Autrement dit, l'objectif n'est pas de faire découvrir aux élèves des lois générales sur la Nature mais d'interpréter des observations expérimentales en mettant en jeu des éléments d'un modèle au sein d'une démarche scientifique rigoureuse mais adaptée aux concepts maîtrisés en cycle 3.

Les instructions officielles préconisent d'étudier les mouvements de la Terre en lien avec le cycle des saisons c'est-à-dire en lien avec des phénomènes observables au cours des saisons et dont ces mouvements sont responsables.

Historiquement, les observations expérimentales interprétées par la rotation et la révolution de la Terre sont essentiellement les rétrogradations des planètes, l'apparition de nouvelles étoiles dans le ciel selon les moments de l'année (par exemple une étoile nouvelle dans la constellation de Cassiopée en novembre), la variation du mouvement apparent du Soleil (directions de lever et de coucher et hauteurs de culmination) pour un lieu donné (excepté à l'équateur) selon le moment de l'année. En accord avec les préconisations d'EDUSCOL (EDUSCOL, 2016), nous avons choisi de focaliser notre étude sur la découverte et l'explication du mouvement apparent du Soleil au cours des saisons en différents lieux sur Terre. Avec des élèves de cycle 3, ce choix implique d'étudier en particulier la variation de la durée de la journée en un lieu donné au cours des saisons et/ou la variation de la durée de la journée pour des lieux situés à des latitudes différentes mais à une longitude similaire et ce à une date donnée.

Les champs théoriques en jeu, pour rendre compréhensible ces situations matérielles, ont trait à deux domaines de la physique : la mécanique, avec notamment les lois de Kepler et les principes de Newton, pour les mouvements de la Terre ; l'optique géométrique, avec notamment les lois de Snell-Descartes, pour la formation de l'ombre propre à la surface de la Terre. Bien entendu, ces lois ne sont pas accessibles à des élèves de l'école primaire mais les savoirs à enseigner relèvent d'éléments de modèles permettant de faire le lien entre ces réalités scientifiques et les constructions théoriques citées. En effet, pour

Géraldine BOIVIN-DELPIEU, Pierre JOUBERT

comprendre la variation de la durée de la journée au cours des saisons, les élèves devront mettre en lien des éléments relevant du modèle héliocentrique, notamment la révolution de la Terre autour du Soleil respectant une inclinaison constante de l'axe des pôles par rapport au plan de l'écliptique avec des éléments du modèle de propagation rectiligne de la lumière, notamment la formation d'une ombre propre sur une sphère placée dans un faisceau de rayons lumineux parallèles. Ainsi, les élèves pourront interpréter les observations expérimentales liées à la variation de la durée de la journée en termes de variation de la surface éclairée de la Terre. En somme, les objectifs visés par cette approche phénoménologique sont de découvrir le phénomène en jeu puis d'acquérir certains éléments du modèle explicatif en mettant en lien observations expérimentales et modélisation s'appuyant sur des théories bien identifiées : mécanique et optique (Figure 1).

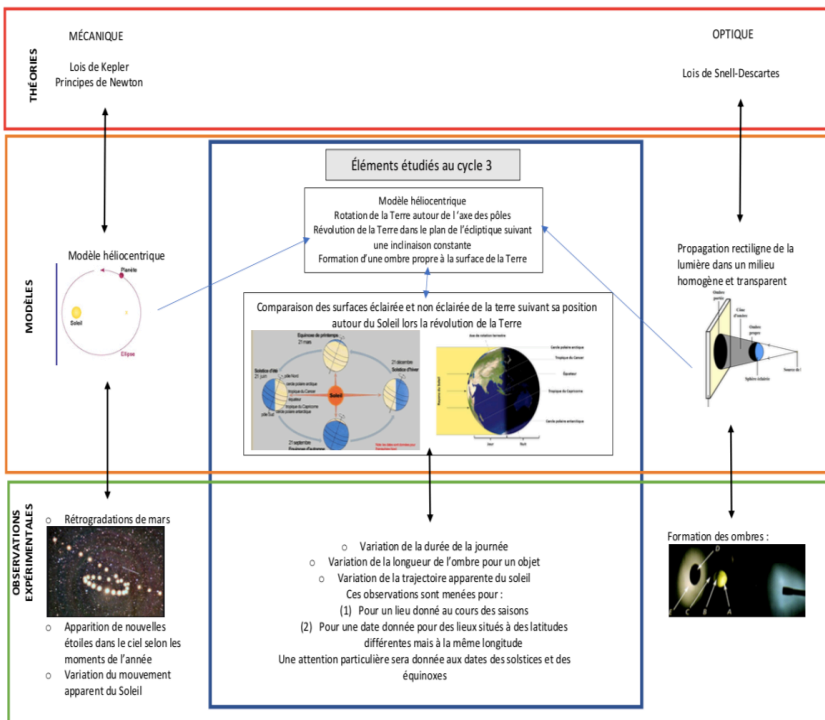


Figure 1 • Analyse a priori des savoirs visés

5.2. Analyse *a priori* du problème concret à traiter (phase1, DBR)

De manière à expliciter les difficultés des enseignants et des élèves lors de l'enseignement et de l'étude de la variation de la durée de la journée au cours des saisons, nous avons, certes, pris appui sur la littérature existante mais aussi sur l'analyse des données récoltées lors de la phase 1 de notre recherche. Nous avons analysé les processus cognitifs des apprenants du point de vue des activités de modélisation lors des activités scientifiques visant à expliquer les phénomènes observables ainsi que les tâches épistémiques mises en œuvre (Boivin-Delpieu, 2020).

L'organisation thématique des séquences élaborées et implémentées par les enseignants partenaires lors de la première phase de cette recherche (analyse du problème) rend compte d'une structuration selon un enchaînement logique et répété d'éléments.

D'abord des phénomènes issus du monde des objets et des événements sont donnés à voir aux élèves et font émerger un questionnement scientifique. Par exemple, une étude documentaire met en évidence, pour une date donnée, la variation de la durée de la journée pour des lieux situés à une même longitude mais à des latitudes différentes. La question scientifique posée à la classe sera alors de trouver une explication à ce phénomène. Dans cette classe, le logiciel Stellarium (<https://stellarium.org/fr/>) sera ensuite utilisé pour retrouver la durée des journées dans les lieux considérés lors de la première phase de travail. Dans deux classes, à partir des observations courantes des élèves, les enseignants poseront la question de la variation de la durée de la journée au cours des saisons dans la ville de l'école mais aussi dans d'autres villes. L'un des enseignants utilisera alors une simulation pour confirmer les observations discutées en classe (https://www.fondation-lamap.org/sites/default/files/upload/media/minisites/projet_calendriers/elevs/Saison3D/index.html).

Ensuite, une activité ayant pour objectif l'interprétation du phénomène étudié est prévue. Dans chacune des classes observées, les enseignants ont choisi de proposer aux élèves de modéliser, par groupe, la Terre avec une balle en polystyrène et le Soleil avec une source lumineuse. Certains groupes parviennent à une interprétation cohérente des phénomènes étudiés.

Et enfin les connaissances sont structurées à travers une mise en commun des résultats obtenus lors des activités de modélisation avec du matériel tangible et menées par groupe. Dans l'une des classes, l'enseignant proposera le recours à une simulation pour décrire à nouveau les phénomènes observables étudiés et les éléments du modèle explicatif construit lors de la modélisation (simulation disponible à l'adresse : <https://education.francetv.fr/matiere/decouverte-des-sciences/ce2/video/la-duree-de-la-journee-au-cours-de-l-annee>).

Les résultats des analyses menées au sein du collectif enseignants-chercheurs révèlent des difficultés de nature différente liées à l'usage des outils numériques. En effet, d'une part, le choix des simulations est contraint par des difficultés d'ordre matériel (problème de connectivité, problème d'équipement des écoles, etc.) et d'autre part, par des difficultés liées à l'analyse préalable de ces simulations. Nous exposons succinctement les principaux résultats.

L'analyse révèle qu'en classe, les avancées vers les savoirs visés sont systématiquement et uniquement liées à des situations impliquant des objets tangibles et non numériques. En effet, dans chacune des études de cas, les simulations ne sont pas exploitées pour leur capacité interprétative d'un phénomène mais très majoritairement pour vérifier des phénomènes, par ailleurs déjà mis en évidence. Autrement dit, l'usage prévu des simulations limite les tâches épistémiques associées : tâche épistémique de description des faits observables uniquement et jamais de tâche épistémique d'explication ou d'interprétation de ces faits. Ainsi, les activités des élèves sont contraintes dans le monde des objets et des événements. De plus, l'analyse montre également que les avancées vers les savoirs visés sont systématiquement liées à des situations impliquant des objets tangibles. Dans ces cas, on constate une réorganisation des éléments matériels du milieu selon le système de connaissances des élèves leur permettant de mettre à l'épreuve des observations caractéristiques du phénomène étudié. Les rétroactions fournies par les éléments matériels leur permettent alors de développer une stratégie conduisant à la construction de nouvelles connaissances. Toutefois, des difficultés ont été constatées lors de l'utilisation d'objets tangibles. En effet, les rétroactions du milieu via les objets tangibles se sont parfois révélées comme des obstacles à l'avancée des connaissances visées. Par exemple, un faisceau lumineux trop étroit de la lampe représentant le Soleil peut impliquer une mauvaise interprétation de la part des élèves de la surface éclairée de la balle représentant la Terre.

De plus, cette mise en œuvre dans trois classes différentes nous a permis une analyse des représentations courantes des élèves vis-à-vis de l'interprétation de la variation de la durée de la journée au cours des saisons. Sans rendre compte ici de l'analyse fine effectuée, nous pouvons classer ces représentations en plusieurs catégories : variation de la vitesse de rotation et/ou de révolution de la Terre, variation de la distance entre le Soleil et la Terre (variation de la hauteur du Soleil dans le ciel), variation de l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre ou encore des représentations plus rares comme variation de la densité de nuages.

6. Élaboration de la solution techno-didactique

6.1. Présentation globale du dispositif

Conformément aux hypothèses théoriques sur lesquelles nous fondons nos travaux, l'interface n'a ni l'objectif de se substituer à l'enseignant, ni celui de remplacer les interactions entre pairs, pas plus que celui de négliger le travail de verbalisation. En revanche, elle vise à mettre les élèves en activités autour de situations problématiques, à permettre l'émergence et la prise en compte des représentations des apprenants, tout en privilégiant les activités de modélisation et la variété des tâches épistémiques implémentées. Autrement dit, comme tout Environnement informatique pour l'apprentissage humain (EIAH), elle a pour objectif « *d'enseigner un domaine de connaissances à un apprenant en intégrant l'ordinateur dans une relation pédagogique enseignant/élève* » (Laforcade, 2001).

Ainsi, selon la démarche scientifique d'apprentissage envisagée, l'interface numérique doit présenter deux qualités techniques différentes :

- elle doit permettre une reconstitution informatique d'un environnement réel afin d'étudier des phénomènes par ailleurs observables ;

- elle doit permettre de reproduire les activités de modélisation fondamentales pour la construction des connaissances visées tout en palliant aux difficultés matérielles et cognitives identifiées dans l'analyse a priori. Exemples :

- les difficultés rencontrées pour observer la surface éclairée lorsque le faisceau lumineux n'est pas assez large par rapport au diamètre de la balle,
- l'impossibilité d'effectuer des changements de référentiels temporels (dates) et spatiaux (lieux sur la Terre) qui facilitent l'interprétation des phénomènes observés.

En plus de ces contraintes, le cahier des charges proposé à la société chargée du développement de l'artéfact, intègre plusieurs éléments de contexte, spécifiques aux situations d'enseignement, afin de répondre au mieux aux attentes des enseignants pour l'usage de ce type d'outils numériques. Les problèmes de connectivité dans les salles de classes impliquent de produire une application autonome ne nécessitant pas de faire appel à des serveurs externes (ordinateurs de la classe) ou des sites distants.

La nécessité de reproduire des environnements réels suggère le recours à la réalité virtuelle. Toutefois, nous avons écarté d'emblée la possibilité de recourir à des casques autonomes de réalité virtuelle. En effet, cet équipement, relativement onéreux, n'a pas été retenu car la plupart des recommandations actuelles proposent une utilisation de ce type de casques après l'âge de 13 ans c'est à dire pour des élèves plus âgés que ceux de cycle 3.

Enfin, les aspects de disponibilité et de mobilité sont essentiels pour espérer une appropriation facile de l'outil par les enseignants et les élèves notamment pour les phases de description, de questionnement, d'explication et d'interprétation. Il est important de prendre en compte d'autres contraintes notamment budgétaires pour les écoles (nécessité de s'équiper en matériels informatiques appropriés).

À partir de ce cahier des charges, le choix d'une application sur tablette, basée sur certains principes de la réalité virtuelle couplés aux avantages de la réalité augmentée a été validé par l'ensemble des partenaires du projet. Les tablettes ont en effet l'avantage d'être un outil mobile et facilement utilisable en classe notamment par petits groupes. Elles peuvent être regroupées dans le cadre d'une mallette pédagogique que chaque école pourra emprunter ce qui limite fortement l'investissement pour chaque école.

Par réalité virtuelle, on suppose que l'application propose de placer l'utilisateur dans un environnement simulé par l'outil numérique. La base du développement de l'application est de pouvoir placer l'élève dans des situations où les objets tangibles ne sont pas accessibles (changements de repère, de temps et d'espace), tout en prévoyant des interactions avec la simulation à travers des tâches réelles dans cet environnement virtuel. De plus, l'application s'appuie sur des principes de la réalité augmentée puisqu'elle doit permettre d'ajouter des éléments virtuels (informations, choix des paramètres, observables, etc.) aux éléments du modèle élaboré

(lieu à la surface de la Terre). Enfin, l'application permettra aux élèves de se déplacer autour du modèle construit : les élèves peuvent observer la sphère représentant la Terre en faisant le tour de cette dernière. L'interface utilise ainsi des éléments techniques empruntés à la réalité augmentée. C'est pourquoi on parle plutôt dans ce cadre de réalité mixte ou superposée.

Ainsi, le prototype, nommé TERRA-3D, est conçu selon trois modes d'utilisation, conformes aux principales étapes d'une démarche d'enseignement scientifique basée sur l'investigation. Le premier mode permet la découverte et l'analyse de phénomènes observables depuis la Terre suivies par la formulation de questionnements scientifiques. Le second mode englobe toutes les phases de résolution du problème scientifique ainsi posé. Il permet aux élèves de tester leurs hypothèses explicatives relatives aux phénomènes étudiés en construisant pas à pas un modèle conforme aux savoirs de référence. Les élèves ont alors l'occasion de faire varier plusieurs éléments du modèle et d'en tester les conséquences sur les phénomènes observables. Ils ont ainsi la possibilité d'interpréter les éléments décrits dans le mode 1. Enfin, le dernier mode permet la structuration des connaissances élaborées. Les élèves peuvent alors faire fonctionner le modèle, décrire les phénomènes observables, les interpréter et même les prévoir pour des dates et/ou des lieux non testés dans le mode 2. Les élèves peuvent également découvrir la place de la Terre dans le système solaire ainsi que les autres planètes et leurs caractéristiques.

6.2. Présentation et justifications du mode 1

Conformément à nos hypothèses théoriques, construire des connaissances scientifiques nécessite de faire des liens entre le monde des objets et des événements et celui des théories, notamment à travers des tâches d'interprétation. Il est donc indispensable que les élèves découvrent d'abord une série d'évènements pour lesquels ils repéreront les régularités et les différences. Cette démarche observationnelle aidée par l'outil numérique permet de construire la question scientifique qui justifiera le travail d'interprétation. En effet, en lien avec les connaissances traitées dans notre projet, les élèves doivent être amenés à se questionner sur l'origine de la variation de la durée de la journée en un lieu donné et/ou l'origine de la variation de la durée de la journée à une date donnée pour des lieux situés à des latitudes différentes mais à des longitudes similaires. La formulation de ces interrogations nécessite soit l'étude

directe de la trajectoire apparente du Soleil en différents lieux et/ou à différentes dates, soit l'étude de la variation de l'ombre d'un même objet au cours d'une journée, à des dates différentes et/ou en des lieux différents. Ces études peuvent être menées facilement dans une classe pour un lieu donné mais nécessitent une durée d'observation longue par rapport au temps scolaire (sur plusieurs mois). En revanche, il n'est pas possible de mener des observations directes, réelles en des lieux différents avec une classe.

Aussi, la solution technique proposée grâce à un outil numérique de simulation doit pouvoir rendre possible cette étude d'évènements en s'affranchissant des contraintes de temps et de lieux.

Ainsi, le mode 1, propose un environnement virtuel permettant de découvrir la trajectoire apparente du Soleil et celle de l'ombre d'un objet (un mur) pour six lieux et ce pour n'importe quelle date entre 1975 et 2050 en Norvège, France, Algérie, Namibie, Antarctique et au Gabon.

Ces lieux ont été choisis selon deux critères :

- situés à des longitudes similaires, ils permettront l'étude de la variation de la durée de la journée à une même date ;
- situés à des latitudes différentes, ils permettront de mettre en évidence des caractéristiques différentes :
 - France, de manière à comparer avec des observations réalisées en classe,
 - Norvège, au-delà du cercle polaire, de manière à découvrir le jour et la nuit polaires,
 - Algérie, de manière à visualiser la verticalité des rayons solaires au solstice d'été,
 - Namibie, sur le tropique du capricorne, de manière à visualiser la verticalité des rayons solaires au solstice d'hiver,
 - Antarctique, au-delà du cercle polaire, de manière à découvrir le jour et la nuit polaires inversés par rapport au Svalbard,
 - Gabon, sur l'équateur, de manière à constater l'égalité de la durée de la journée et de la nuit¹.

¹ Nous ne tenons pas compte de la réfraction atmosphérique et de la taille apparente du Soleil qui peuvent faire varier ces durées de quelques minutes.

Les élèves peuvent à la fois choisir le lieu mais aussi la date d'observation. De multiples possibilités sont donc offertes et les enseignants peuvent ainsi choisir la manière de faire étudier le phénomène. Suivant le niveau des élèves (CM1, CM2 ou 6ème), il est possible d'étudier le phénomène selon différents degrés de précisions, par exemple :

- étude pour un seul lieu à différentes dates ;
- étude pour une date et différents lieux ;
- étude pour des lieux et dates différents ;
- possibilité de tracer la trajectoire du Soleil pour une date donnée ;
- possibilité d'afficher les trajectoires du Soleil aux équinoxes et/ou solstices de manière à comparer la trajectoire actuelle avec ces dernières (Figures 2a et 2b).

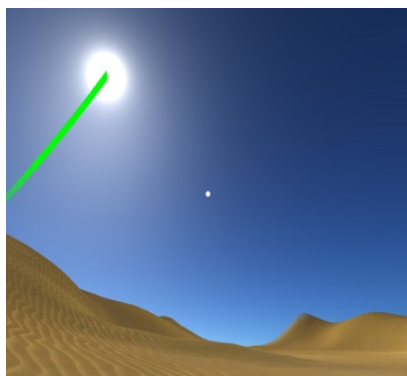


Figure 2a · Tracé de la trajectoire apparente du Soleil en Algérie le 24/04/20

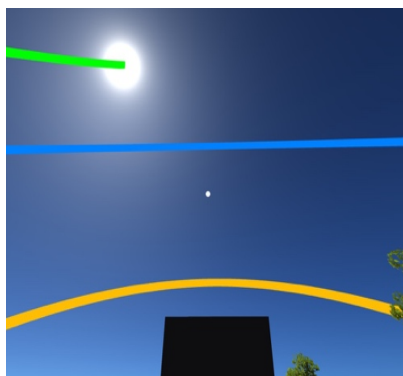


Figure 2b · Comparaison de la trajectoire apparente du Soleil en Algérie le 24/04/20 avec celle obtenue le jour des équinoxes et le jour du solstice d'hiver

Quels que soient les choix de l'enseignant, ce mode implique, dans un premier temps pour les élèves, des tâches de description de faits observables décrits virtuellement grâce à l'outil numérique. Puis l'étude

de ces faits permet de définir le phénomène physique étudié qui sera ensuite questionné. Le premier mode, quelles que soient les modalités d'utilisation retenues, permet de varier les tâches épistémiques au sein du monde des objets et des événements simulé et réel (Figure 3).

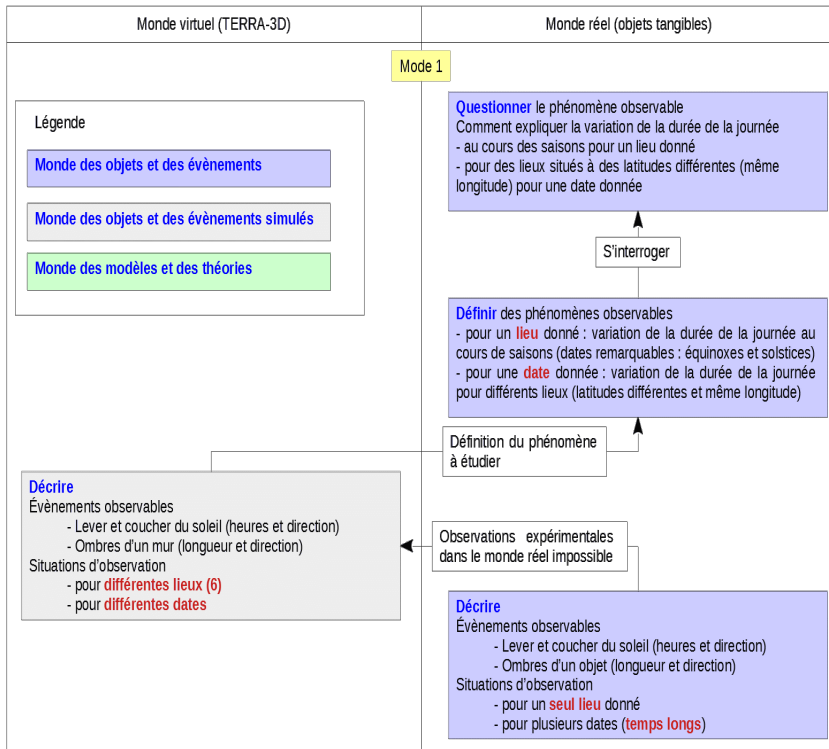


Figure 3 · Tâches épistémiques et mondes sollicités lors de l'utilisation du mode1

6.3. Présentation et justification du mode 2

À l'issue du mode 1, la classe aura construit au moins l'une des questions suivantes : Comment expliquer la variation de la durée de la journée au cours des saisons pour un lieu donné ? Comment expliquer la différence de la durée de la journée pour des lieux situés à des latitudes différentes mais à la même longitude pour une date donnée ?

Ce deuxième mode doit à la fois être conforme à nos hypothèses théoriques (nécessité d'engager les élèves dans des activités de modélisation, nécessité de construire des liens entre les deux mondes et

nécessité de proposer des tâches épistémiques variées) mais il doit également tenir compte des difficultés repérées dans la phase 1 de notre recherche.

Aussi, nous avons d'abord souhaité que les élèves puissent sélectionner les éléments pertinents pour modéliser la situation et la problématique. Ainsi, l'entrée dans le mode 2 permet de sélectionner une source lumineuse pour le Soleil, une sphère pour la Terre et un axe pour l'axe de rotation de la Terre. Toutefois, de manière à éviter toutes confusions entre le monde réel et le modèle construit, la Terre est initialement représentée par une boule blanche sur laquelle il est ensuite possible d'implémenter les continents et le Soleil est représenté de deux manières différentes (boule lumineuse ou rayons parallèles). L'axe de rotation est, par défaut, placé perpendiculairement au plan de l'écliptique ; les élèves ont ensuite la possibilité de choisir de faire varier à l'aide d'un curseur l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre. Ces choix, ainsi que le mode de vue sélectionné, peuvent être modifiés à tout moment dans le mode 2. En effet, les élèves ont la possibilité de visualiser la Terre sur son orbite autour du Soleil (Figure 4a), ou de zoomer sur le Système Terre-Soleil (Figure 4b)

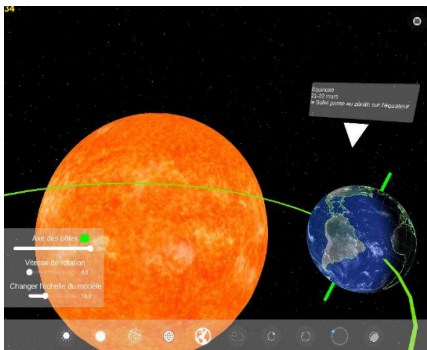


Figure 4a • La Terre sur son

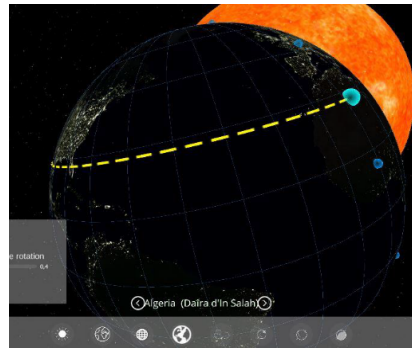
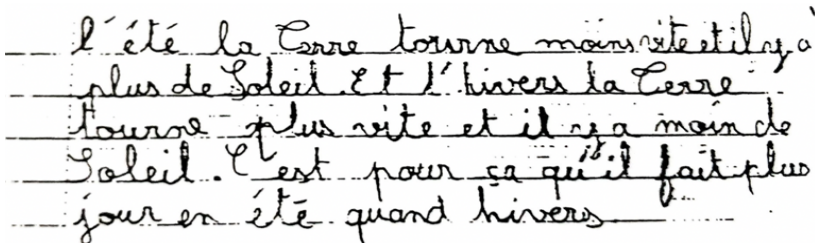


Figure 4b • Système Terre-Soleil dans le monde 2

Une fois les éléments du modèle sélectionnés, nous avons choisi de focaliser la réflexion des élèves sur les deux variables révélées comme les plus importantes lors de notre étude préalable : la vitesse de rotation de la Terre et l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre.

En effet, l'analyse réalisée lors de la phase 1 montre qu'une hypothèse couramment avancée par les élèves pour expliquer la variation de la durée de la journée est la variation de la vitesse de rotation de la Terre (Figure 5).



l'été la Terre tourne moins vite et il y a plus de Soleil et l'hivers la Terre tourne plus vite et il y a moins de Soleil. C'est pour ça qu'il fait plus jour en été quand hivers.

Figure 5 • Exemple d'hypothèse, d'un élève, liée à la variation de la vitesse de rotation de la Terre

Aussi de manière à la prendre en compte, nous avons souhaité laisser à la charge des élèves le réglage de la vitesse de rotation de la Terre dans le modèle élaboré. L'objectif est de pouvoir amener les élèves à se questionner sur le rapport entre durée de la journée et de la nuit en fonction de la vitesse de rotation de la Terre. Cette phase de déconstruction des conceptions initiales des élèves doit permettre de montrer que la variation de la vitesse de rotation de la Terre au cours de l'année ne peut expliquer les observations réalisées au mode 1. Le recours à l'interface numérique présente alors une plus-value pour déstabiliser ce type de conception. En effet, la manipulation de matériel tangible ne permet pas de mettre en lien vitesse de rotation et durée du jour solaire, contrairement à l'interface.

Même si l'hypothèse de l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre est plus rarement spontanément élaborée par les élèves, l'analyse *a priori* des connaissances visées révèle que cet élément est central. De plus, l'analyse des données de la phase 1 montre que les connaissances visées sont systématiquement construites lors de manipulations de matériels tangibles (balles et lampe). En effet, ce qui est déterminant dans l'interprétation des phénomènes étudiés est la mise en lien de la surface éclairée avec la durée de la journée. Il est donc indispensable que les élèves parviennent d'une part à identifier la surface éclairée sur la balle comme étant la journée et d'autre part à comparer la longueur du trajet parcouru par un point sur cette surface avec la durée de la journée. Autrement dit, il

s'agit de comprendre que plus la longueur de l'arc de cercle parcourue dans la surface éclairée est grande plus la durée de la journée est importante.

Habituellement, avec le matériel tangible, les élèves tracent sur la balle les arcs de cercle (les tracés sont peu précis). Certains élèves ont alors des difficultés à estimer la longueur de l'arc dans la partie éclairée et celle de l'arc dans la partie non éclairée. Aussi, il leur est couramment proposé d'utiliser des ficelles (à superposer sur les arcs tracés) pour comparer les longueurs. De grandes difficultés ont été constatées, et les erreurs de manipulation génèrent souvent des erreurs d'interprétation.

C'est pourquoi, nous avons souhaité que les élèves puissent comparer les longueurs des trajets pour des points situés sur l'un des 6 lieux étudiés dans le mode 1 avec la durée de la journée et de la nuit en fonction de l'inclinaison de l'axe de rotation de la terre et ce pour les dates significatives liées au changement de saisons (Figure 6).

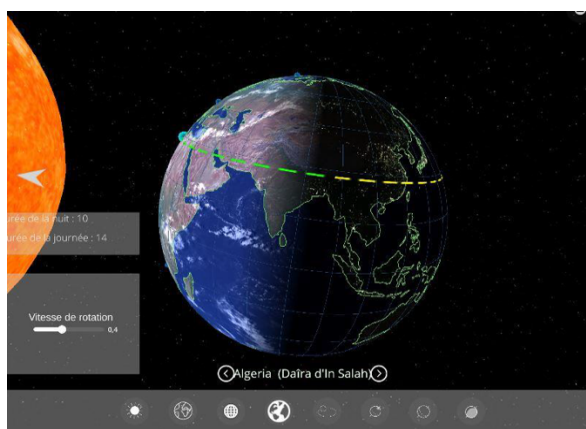


Figure 6 • Comparaison des longueurs d'arc pour trouver des durées

Dans ce mode, les élèves seront donc amenés à mettre en œuvre différentes tâches épistémiques (différentes de celles du mode 1) et à faire des liens entre les deux mondes, comme en rend compte la Figure 7.

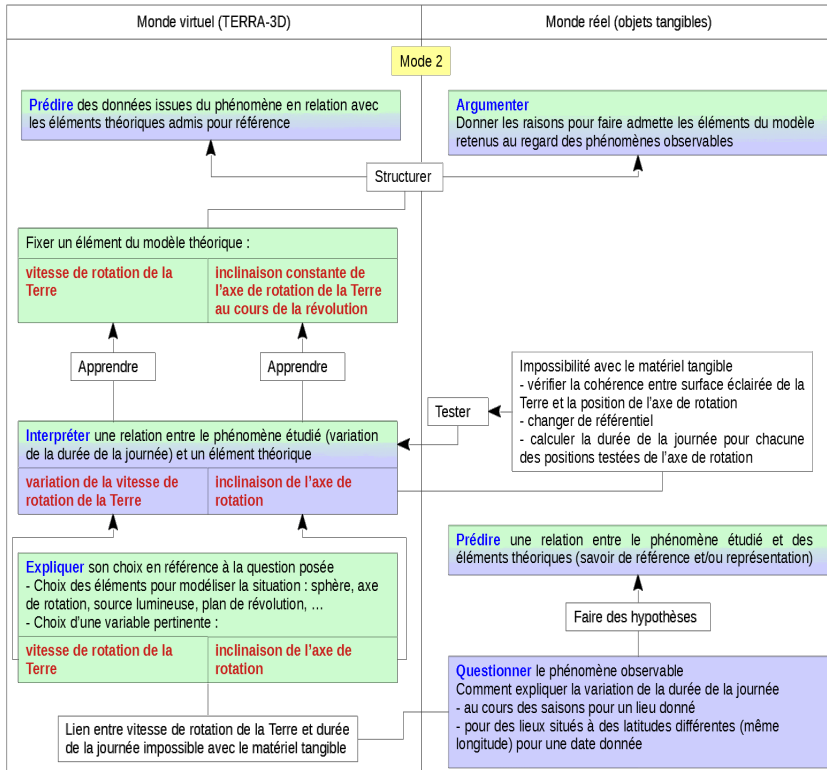


Figure 7 · Tâches épistémiques et mondes sollicités lors de l'utilisation du mode 2

6.4. Présentation et justification du mode 3

À l'issue du mode 2, certains éléments de connaissances auront été construits par les élèves lors de la mise à l'épreuve du modèle élaboré : nécessités d'une vitesse de rotation de la Terre constante et d'une inclinaison constante de l'axe de rotation de la Terre pour observer une variation de la durée de la journée dans les contextes d'observation proposés dans le mode 1. Nous utilisons le terme de nécessité au sens de Orange (Orange, 2012) : le mode 2 permet aux élèves « d'explorer et de délimiter le champ des possibles et de repérer ainsi les conditions de possibilité des solutions, ce que nous appelons nécessité ». Le mode 3 doit permettre à l'enseignant de discuter avec les élèves de la part d'apodicticité des savoirs ainsi construits. Pour cela, le mode 3 permet de manipuler le modèle, de revenir sur l'argumentation élaborée dans le mode 2 mais aussi d'utiliser le modèle ainsi construit pour prévoir et/ou

vérifier de nouvelles observations possiblement réalisables dans le mode 1. Le mode 3 servira de point d'appui pour élaborer un texte permettant la structuration des savoirs (Figure 8).

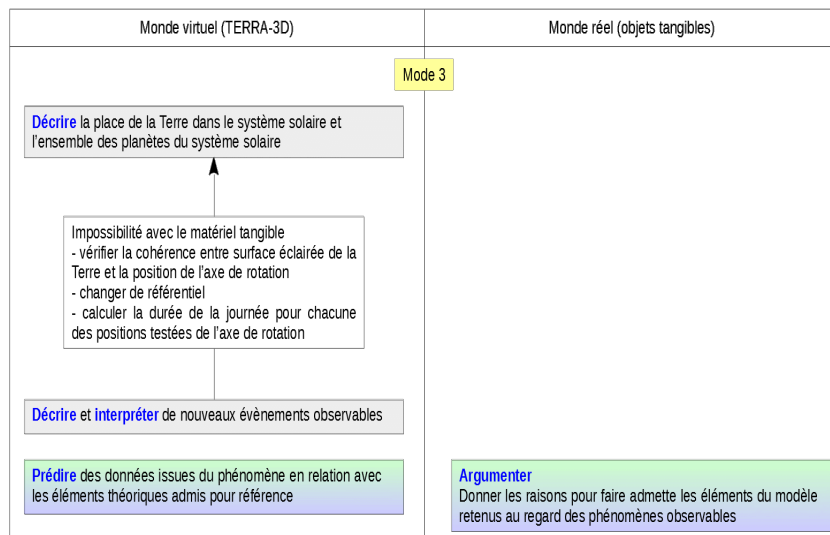


Figure 8 • Tâches épistémiques et mondes sollicités lors de l'utilisation du mode 3

7. Discussion et perspectives de recherche

Le prototype obtenu, TERRA-3D, est conforme aux hypothèses théoriques retenues comme contraintes lors de l'élaboration du cahier des charges. En effet, toutes les tâches épistémiques identifiées comme spécifiques à l'enseignement et l'apprentissage de la physique par Buty (Buty *et al.*, 2004) sont présentes dans les étapes proposées pour l'utilisation de TERRA-3D. De plus, les activités proposées impliquent à plusieurs reprises la mise en lien d'éléments issus du monde des objets et des événements avec des éléments issus du monde des modèles et théories (Figure 9). Enfin, en appui avec le travail mené avec les enseignants partenaires, les difficultés connues des élèves ont pu être prises en charge.

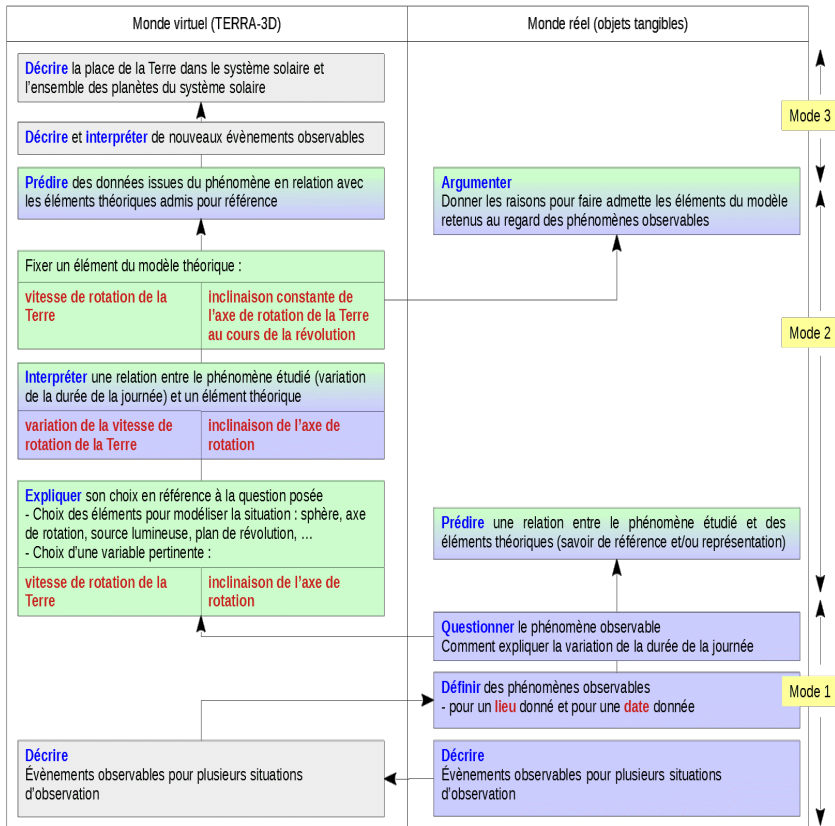


Figure 9 • Synthèse des tâches épistémiques et des mondes sollicités lors de l'utilisation de TERRA-3D

Toutefois, même si TERRA-3D semble conforme à nos attentes, il nous faut désormais tester son utilisabilité puis son efficacité au regard des apprentissages en contexte scolaire. Pour cela, nous avons d'abord prévu des tests d'utilisabilité sur un échantillon représentatif des utilisateurs visés de manière à vérifier que l'artéfact possède les affordances permettant aux élèves de manipuler selon les modalités prévues. Puis, dans un second temps, nous avons prévu d'organiser des observations *in situ*, d'analyser les activités cognitives des élèves d'un point de vue des activités de modélisation lors de l'utilisation du prototype. Nous procéderons également à des tests post-séquence relatifs à la fois aux connaissances visées mais aussi à la connaissance de la démarche scientifique. Ces tests seront réalisés avec des groupes ayant utilisés TERRA-3D et avec des groupes ayant seulement eu recours à du matériel

tangible classique. Enfin, des entretiens avec les enseignants et des focus group nous permettront de recueillir le sentiment des utilisateurs. Ces premiers résultats nous permettront d'envisager des modifications dans l'application et ainsi d'engager le cycle itératif de tests conformément aux principes méthodologiques de la DBR sur lesquels nous avons fondé notre étude. De plus, une fois ces premiers tests réalisés, nous élaborerons un livret pédagogique destiné à accompagner les enseignants lors de l'utilisation de TERRA-3D. Enfin, ce projet pourra se prolonger à travers des améliorations du dispositif et des extensions permettant d'aborder d'autres notions scientifiques des programmes de cycle 3.

RÉFÉRENCES

Bachelard, S. (1979). Quelques aspects historiques des notions de modèle et de justification des modèles. Dans P. Delattre et M. Thellier (dir.), *Élaboration et justification des modèles. Application en biologie* (vol. 1, p. 3-19). Maloine S.A.

Beaufils, D. et Richoux, D. (2013). Un schéma théorique pour situer les activités avec des logiciels de simulation dans l'enseignement de la physique. *Didaskalia*, 23, 9-38

Bécu-Robinault, K. (2002). Modelling activities of students during a traditional labwork. Dans D. Psillos et H. Niedderer (dir.), *Teaching and learning in the science laboratory* (vol.16, p. 51-64). Kluwer Academic.

Bécu-Robinault, K. (2004). Raisonnements des élèves et sciences physiques. Dans E. Gentaz et P. Dessus (dir.), *Comprendre les apprentissages : sciences cognitives et éducation* (p. 117-132). Dunod.

Bécu-Robinault, K. (2018). *Analyse des interactions en classe de physique. Le geste, la parole et l'écrit*. L'Harmattan.

Boivin-Delpieu, G. (2020). Comparaison de situations d'enseignement et d'étude des mouvements de la Terre avec des objets tangibles et des objets numériques au cycle 3. *Éducation et didactique*, 14(3), 9-38.

Boivin-Delpieu, G. (2015). *Conditions d'avancée des savoirs et déterminants de l'action professorale : étude de cas sur l'enseignement des phases de la Lune au cycle 3* [thèse de doctorat, Université Lyon1, France]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01334591>

Burkhardt, H. et Schoenfeld, A. H. (2003). Improving educational research: Toward a more useful, more influential, and better-funded enterprise. *Educational Researcher*, 32(9), 3-14.

Buty, C., Tiberghien, A. et 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.

Chevallard, Y. (1998). Qu'est-ce que prouver ? Opiner, asserter, professer en didactique. Dans C. Hadji et J. Baillé (dir.), *Recherche et éducation. Vers une « nouvelle alliance »*. *La démarche de preuve en 10 questions* (p. 29-43). De Boeck Université.

Design-Based Research Collective (2003). Design-based-research: An emerging paradigm for educational inquiry. *Éducationnel Researcher*, 32(1), 5-8.

Didactique pour enseigner (2019). Presses universitaires de Rennes. ISBN 978-2-7535-7752-7.

EDUSCOL. (2016). *Les mouvements de la Terre sur elle-même et autour du Soleil* (eduscol.education.fr/ressources-2016). Ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. https://cache.media.eduscol.education.fr/file/Planete_Terre_/55/9/RA16_C3_SCT_E_4_sequence_mvt_terre_V2_618559.pdf

Fjeld, M. et Voegtli, B. (2002). Augmented chemistry: An interactive educational workbench. Dans *Proceedings of the IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality* (p. 259-260). IEEE.

Fleck, S. et Simon, G. (2013). *An Augmented Reality Environment for Astronomy Learning in Elementary Grades: An Exploratory Study*. Dans *Actes de la 25ème conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine (IHM'13)* (p. 14-22). ACM.

Gerard, F.M. et Roegiers, X. (2011). Currículo e Avaliação: ligações que nunca serão suficientemente fortes. Dans M. Alves et S. De Ketele (dir.), *Do Currículo à avaliação, da avaliação ao currículo* (p. 143-158). Porto Editora.

IGEN (2017). *Repenser la forme scolaire à l'heure du numérique. Vers de nouvelles manières d'apprendre et enseigner* (Rapport IGEN 2017-056, mai 2017). Ministère de l'éducation nationale, de la Jeunesse et des sports. <https://www.education.gouv.fr/repenser-la-forme-scolaire-l-heure-du-numerique-vers-de-nouvelles-manieres-d-apprendre-et-d-2678>

Johsua, S. et Dupin, J.-J. (1989). *Représentations et modélisations : le débat scientifique dans la classe*. Peter Lang.

Kikas, E. (2006). The effect of verbal and visuo-spatial abilities on the development of knowledge of the Earth. *Research in Science - Education*, 36, 269-283.

Laforcade, P. (2001). *Étude et conception des mécanismes d'agents détecteurs, évaluateurs et qualificateurs des erreurs d'un apprenant dans un EIAH* [Mémoire de DEA inédit]. Université Paul Sabatier, Toulouse, France.

Lyet, P. (2011). Traduction, transaction sociale et tiers intermédiaire dans le processus de collaboration de chercheurs et de praticiens dans le cadre de recherches-actions. *Pensée plurielle*, 3(28), 49-67.

Marlot, C. et Morge, L. (2016). *L'investigation scientifique et technologique : Comprendre les difficultés de mise en œuvre pour mieux les réduire*. Presses Universitaires de Rennes.

Martinand, J.L. (1985). Sur la caractérisation des objectifs de l'initiation aux sciences physiques. *Aster*, 1, 141-154.

MEN (2015). Programmes d'enseignement du cycle des apprentissages fondamentaux (cycle 2), du cycle de consolidation (cycle 3) et du cycle des approfondissements (cycle 4). *Bulletin officiel spécial N°11 du 26 novembre 2015*. Ministère de l'éducation nationale, de la Jeunesse et des sports. https://www.education.gouv.fr/pid285/bulletin_officiel.html?pid_bo=33400

Merle, H. (2002). Histoire des sciences et sphéricité de la Terre: compte rendu d'innovation. *Didaskalia*, 20, 115-136

Morge, L. et Doly, A.-M. (2013). L'enseignement de la notion de modèle: quels modèles pour faire comprendre la distinction entre modèle et réalité? *Spirale. Revue de recherches en éducation*, 52, 149-175.

Newton, I. (1687). *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica (Mathematical Principles of Natural Philosophy)*. Regalis Societas Londini.

Ohlsson, S. (1996). Learning to do and learning to understand: A lesson and a challenge for cognitive modeling. Dans P. Reiman et H. Spada (dir.), *Learning in Humans and Machines: Towards an Interdisciplinary Learning Science* (p.37-62). Pergamon Elsevier Science.

Orange, C. (2012). *Enseigner les sciences. Problèmes, débats et savoirs scientifiques en classe*. De Boeck.

Rocard, M., Csermely, P., Jorde, D., Lenzen, D., Wallberg-Henriksson, H. et Hemmo, V. (2007). *L'enseignement scientifique aujourd'hui : une pédagogie renouvelée pour l'avenir de l'Europe*. Union européenne, Direction générale de la recherche Science, économie et société.

Roy, P. et Hasni, A. (2014). Les modèles et la modélisation vus par des enseignants de sciences et technologies du secondaire au Québec. *McGill Journal of Education*, 492, 349-371.

Séjourné, A. et Tiberghien, A. (2001). *Conception d'un hypermédia en physique et étude des activités des élèves du point de vue de l'apprentissage* [communication]. Cinquième colloque Hypermédiat et apprentissages, Grenoble, France.

Sensevy, G. (2011). *Le sens du savoir, éléments pour une théorie de l'action conjointe en didactique*. De Boeck.

Shelton, B. E. et Hedley, N. R. (2002). *Using augmented reality for teaching Earth-Sun relationships to undergraduate geography students* [communication]. The First IEEE International Workshop Augmented Reality Toolkit, Darmstadt, Germany.

Stedmon, A. W., Hill, K., Kalawsky, R. S. et Cook, C. A. (1999). Old theories, new technologies: Comprehension and retention issues in augmented reality systems [communication]. Dans *Proceedings of the 43rd Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society (HFES '99)* (p. 97-125). Human Factors & Ergonomics Society.

Tiberghien, A., Buty, C., Le Maréchal et J. F. (2005). Physics teaching sequences and students' learning. Dans D. Koliopoulos et A. Vavouraki (dir.), *Science and Technology Education at cross roads: meeting the challenges of the 21st century, Proceedings of the second Conference of EDIFE and the Second IOSTE Symposium in Southern Europe* (p. 25-55). Association for science education (EDIFE).

Tiberghien, A., Malkoun, L., Buty, C., Souassy, N. et Mortimer, E. (2007). Analyse des savoirs en jeu en classe de physique à différentes échelles de temps. Dans G. Sensevy et A. Mercier (dir.), *Agir ensemble* (p. 93-122). Presses Universitaires de Rennes.

Tiberghien, A. (1994). Modeling as a basis for analyzing teaching-learning situations. *Learning and instructions*, 4, 71-87.

Walliser, B. (1977). Systèmes et modèles - Introduction critique à l'analyse de systèmes. Seuil.