
MODÉLISER POUR COMPRENDRE LE SYSTÈME SOLAIRE : UNE APPROCHE DIDACTIQUE DE LA MATERNELLE À LA TERMINALE

Emmanuel ROLLINDE¹

IREMS de Paris

Soria HAMDANI-BENNOUR²

Clément MAISCH³

Géraldine CAVALLO⁴

Jocelyn CLÉMENT⁵

Marie-Christine LEBLOND⁶

Valérie LOZACH-LEGENDRE⁷

Noël ROBICHON⁸

Résumé. Cet article examine la présence du cycle de modélisation dans deux contextes scolaires, de la maternelle à la terminale, à partir d'activités en astronomie. Après avoir précisé le cadre théorique du cycle de modélisation et son articulation avec la théorie de l'enquête, nous analysons deux études de cas : une séquence d'observation du ciel et des ombres en cycle 1 et une séance de travaux pratiques sur les lois de Kepler en terminale s'appuyant sur le planétaire humain — une représentation des orbites des planètes à échelle réelle (Lapaire et al., 2025). Les résultats montrent que des éléments de modélisation apparaissent à tous les niveaux, mais avec des formes différentes. En maternelle, la dynamique d'enquête favorise l'émergence de régularités dans les éléments observés et la possibilité de réfutation d'hypothèses déduites de ces régularités. En terminale, le contexte des lois de Kepler appliqué à un artefact dédié, le planétaire humain, révèle des tensions entre une visée de confirmation des prédictions associées aux lois et une réelle mise à l'épreuve de ces lois par comparaison avec des mesures.

Mots-clés. Modélisation, astronomie, Système solaire, maternelle, lycée.

¹ emmanuel.rollinde@cyu.fr

² soria.hamdani-bennour@cyu.fr

³ clement.maisch@cyu.fr

⁴ geraldine.cavallo@ac-paris.fr

⁵ jocelyn.clement@labolycee.org

⁶ marie-christine.leblond@ac-paris.fr

⁷ valerie.lozac-h-legendre@ac-paris.fr

⁸ noel.robichon@obspm.fr

Introduction

L'enseignement des sciences cherche aujourd'hui à dépasser une simple transmission de savoirs pour proposer aux élèves une véritable immersion dans les démarches scientifiques. Nous considérons ici le cycle de modélisation proposé par Sensevy et al. (2008) (cf. figure 1) comme un cadre permettant de décrire les différents actes présents dans une démarche scientifique. Ceci comprend le fait d'observer, de tester des hypothèses et de construire des représentations du monde. En tant que processus dynamique, le cycle de modélisation articule données empiriques, formes mathématiques et raisonnements explicatifs. Il constitue un levier puissant pour développer chez les élèves une posture d'enquête (Dewey, 1938 ; Thievenaz, 2019) et une compréhension critique du savoir scientifique.

Après avoir précisé les définitions que nous donnons des différents termes du cycle de modélisation, nous verrons comment il peut être utilisé pour décrire l'évolution historique des modèles scientifiques, dans le cas particulier du Système solaire. Nous reviendrons alors sur deux séquences spécifiques d'enseignements en astronomie. La première, en maternelle, a pour but de faire émerger l'existence de l'objet « soleil » et de son mouvement à travers l'observation du ciel et des ombres. La seconde, au lycée, porte sur les relations de Kepler à partir d'un schéma à grande échelle du Système solaire (un planétaire humain). Dans les deux cas, les enseignants ont conçu leur séance sans notre intervention, mais ils ont été initiés aux principes de la démarche de modélisation par des discussions informelles avec les chercheurs (au lycée) ou dans le cadre d'un groupe de recherche collaborative LéA-Ifé VIVAP⁹ (en maternelle). À travers l'analyse *a priori* de ces deux séances, nous interro-

geons la possibilité de faire vivre et comprendre la démarche de modélisation à différents niveaux scolaires. L'analyse *a posteriori* permet de confronter ces possibles à la réalité d'une classe, et d'interroger les conditions nécessaires pour que les élèves puissent réellement entrer dans une telle démarche scientifique, confronter des données expérimentales à des prédictions, ajuster ou transformer un modèle, et discuter collectivement de sa validité. Nous souhaitons montrer que, loin d'être réservées aux élèves les plus avancés, les étapes d'une modélisation peuvent s'expérimenter dès la maternelle, à condition que les dispositifs soient pensés pour en favoriser l'émergence progressive.

1. – Définitions et points de vue

Nous envisageons dans cet article la démarche scientifique dans un contexte éducatif comme une co-construction du savoir, enracinée dans une culture partagée. Le savoir ne se donne pas immédiatement : il est souvent invisible, difficile à formuler, dissimulé dans les pratiques scientifiques. Pour le faire émerger, il est nécessaire de créer un espace où se croisent perception et conception. Ce processus implique une interaction constante entre l'extérieur (le monde observable) et l'intérieur (les représentations mentales). On peut considérer la connaissance, selon les termes de Radford (2013), comme « *un processus de prise de conscience active, imaginative et collective des connaissances culturelles et historiques* » (p. 11, notre traduction). Ce processus, dans un contexte éducatif, peut être décrit par une activité de modélisation (Hestenes, 1987 ; Gilbert, 1991). Le cycle de modélisation proposé par Sensevy et al. (2008) fournit ainsi une grille de lecture efficace pour penser la manière dont les savoirs scientifiques se construisent, entre observations empiriques et conceptualisations théoriques.

⁹ <https://ife.ens-lyon.fr/lea/le-reseau/les-differents-lea/vivre-lastronomie-en-primaire-vivap>

1.1. - Le cycle de modélisation

Le schéma (cf. figure 1) présenté par Sensevy et al. (2008) articule deux mondes : celui des modèles et celui des phénomènes perceptibles. Nous qualifierons ce second monde de perceptible, d'empirique ou d'expérimental selon le contexte. Ces deux mondes coexistent et interagissent de manière dynamique. Nous donnons dans la suite de cette section notre propre interprétation de ce schéma.

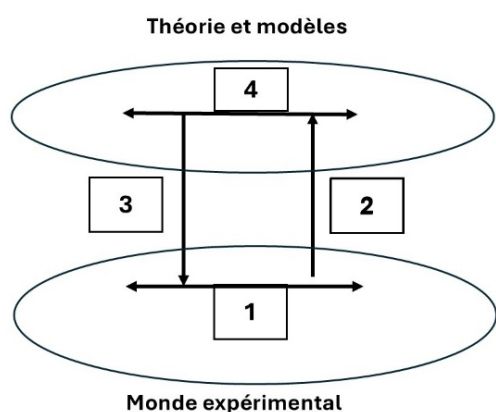


Figure 1 : Le cycle de modélisation selon Sensevy et al. (2008), traduit en français par les auteurs.

Les flèches désignent des actions scientifiques potentielles, à l'intérieur de chaque monde ou d'un monde à l'autre.

- **flèche 1** (expérimenter dans le monde des objets) : observer, mesurer, expérimenter dans le monde perceptible ;
- **flèche 2** (décrire) : décrire les expériences à l'aide du vocabulaire issu des modèles existants ;
- **flèche 3** (prédire) : proposer des prédictions basées sur les modèles construits ;
- **flèche 4** (raisonner dans le monde des modèles) : construire et faire évoluer les modèles.

Les observations (flèche 1) suscitent des hypothèses et imposent parfois de nouvelles contraintes aux modèles (flèche 2). Ces derniers peuvent alors être évalués (flèche 3) et, si

nécessaire, ajustés (flèche 4). L'usage des modèles (flèche 4) permet à son tour de décrire autrement les phénomènes (flèche 2) et de produire de nouvelles prédictions (flèche 3), à confronter à d'autres observations (flèche 1).

Nous allons maintenant illustrer ces différents éléments en prenant comme exemple l'apprentissage de la vitesse du primaire au collège.

Expérimenter dans le monde des objets

Dans le monde expérimental, nous interagissons avec des objets concrets, spécifiques et singuliers. Ce sont des objets matériels uniques, porteurs d'une histoire, sur lesquels on peut agir, que l'on peut observer et manipuler.

Prenons l'exemple d'un élève qui possède une balle en mousse depuis deux ans. Elle fait partie de son quotidien, de ses habitudes : c'est une balle bien particulière. Lorsqu'il expérimente avec sa balle — en la portant, en la lâchant, en la « poussant » —, tout se passe dans un contexte global : l'espace, le temps, le corps de l'élève, l'air, le sol... Tout agit en même temps. Le réel ici est en constante transformation, et chaque interaction modifie l'objet. L'objet singulier, c'est cette balle précise, dans un environnement qui comprend tous les autres éléments matériels : instruments de mesure (règle, chronomètre), support (table), conditions ambiantes (présence d'air, lumière, etc.). La règle graduée fournit une valeur numérique, une distance entre deux positions. De même, l'usage d'un chronomètre fournit une valeur numérique, une durée entre deux instants. Si ces mesures sont faites par différents groupes ou avec différents instruments, les valeurs numériques obtenues ne seront pas toujours les mêmes. Chaque expérience, et chaque mesure, est différente.

Raisonnement dans le monde des modèles

Le monde des modèles est un espace de représentation abstraite. On y trouve des objets définis de manière précise et stable : grandeurs, schémas, relations mathématiques. Ces éléments permettent de penser, de communiquer, de généraliser.

Le modèle sert à représenter de façon générique un objet ou un phénomène singulier du monde expérimental. Ce monde permet de repérer des régularités, de formuler des relations entre grandeurs, de construire du sens. Comprendre, au sens fort de « prendre avec », c'est justement transformer le monde des objets en objets de pensée manipulables mathématiquement : par des dessins, des tableaux, des équations. Dans le modèle, l'instant et la position peuvent être utilisés (dans des équations, des schémas) avec une valeur numérique unique. L'instant exact où la balle est lâchée, la distance entre le sol et la position du lâcher sont définis de manière unique dans le modèle.

Décrire le monde expérimental... implique des choix

Tout objet matériel contient une multitude de caractéristiques. Le modèle, lui, en sélectionne certaines pour en faire des objets génériques. Décrire le monde expérimental revient donc à faire des choix : quels éléments observer ? Comment les nommer ? Comment les relier ?

Pour cela, on utilise le vocabulaire et les structures syntaxiques disponibles dans le modèle lors de cette activité de description. Ces choix sont guidés à la fois par les instruments de mesure utilisés (règle, chronomètre, radar...) et par les concepts présents dans le modèle. Prenons un élève de maternelle. Il n'a pas encore les outils conceptuels pour décrire la durée ou la distance. Il ne peut pas mesurer la

vitesse moyenne le long d'un trajet, mais il a une perception de vitesse instantanée : il peut dire si une balle va « vite » ou « lentement ». Cette perception peut déjà être utilisée comme point de départ pour une situation expérimentale.

À mesure que le modèle évolue, les descriptions changent. Un élève de primaire (cycle 3) pourra mesurer une distance et une durée et en calculer le rapport. La vitesse moyenne est construite dans le modèle et reste encore absente du monde perceptible. Ainsi, la mesure de durée et de distance fait entrer la vitesse moyenne dans le monde des modèles — idéalement en lien avec la vitesse instantanée perçue. Au collège, la vitesse moyenne pourra intégrer le monde empirique, via les instruments de mesure. Le même objet, ou la même notion, peut ainsi être décrite comme élément du monde empirique ou du monde des modèles selon l'avancée de la connaissance de la personne qui l'utilise.

Confrontation modèle et réel

L'un des points essentiels dans une démarche scientifique est de ne pas confondre le modèle — qui est une construction — avec le réel — qui est singulier, mouvant, toujours partiellement accessible. Un modèle permet de faire des prédictions. Ces prédictions peuvent guider une action dans le monde perceptible : anticiper un résultat, prévoir un comportement, organiser une expérience. Tant que cela fonctionne, c'est-à-dire tant que la prédiction est efficace, le modèle tient. Mais si l'action attendue ne produit pas les effets escomptés, il faut interroger le modèle. Dans ce cas, deux types de réponses sont possibles :

- (i) Vérifier que les conditions expérimentales correspondent bien au modèle. L'objet manipulé peut ne pas être conforme à l'objet générique décrit dans le modèle (par exemple, une bille qui

n'est pas vraiment sphérique ou qui présente des irrégularités, une vitesse initiale non nulle). Il est important de comprendre que la prédiction issue du modèle n'est valable que dans un cadre donné. Elle s'accompagne ainsi de conditions d'application, qui définissent quand et comment elle est valide.

- (ii) Modifier le modèle. On peut introduire de nouveaux objets, ajuster les relations, ou même construire un tout autre modèle pour mieux rendre compte de la réalité observée.

Dans un contexte d'apprentissage, ces ajustements peuvent être pensés de manière didactique. Un élève peut utiliser un modèle (ou une conception initiale) pour faire une prédiction. L'enseignant peut alors proposer une situation où cette prédiction s'avère inefficace. Cela crée une tension féconde entre le modèle et l'observation, qui incite à faire évoluer les représentations. Prenons un exemple de prédiction possible pour un élève de collège : « Si je me déplace à vitesse constante, je parcours une distance deux fois plus grande si je double la durée de mon déplacement ». Cette prédiction est simple, claire, mathématiquement modélisable. Mais si l'élève oublie de préciser « à vitesse constante », l'enseignant peut proposer une situation avec deux vitesses différentes, qui va donc contredire cette prédiction. L'élève devra ajouter la constance de la vitesse dans son modèle de relation entre distance et durée.

Enfin, dans le monde perceptible, chaque mesure peut amener à obtenir une valeur différente. Ainsi si deux opérateurs reproduisent la même mesure, par exemple en utilisant le même chronomètre ou la même règle, ils n'obtiendront pas exactement le même résultat (conditions de reproductibilité). De même un unique opérateur, qui répète une mesure, obtiendra également des valeurs légèrement différentes (conditions de répétabilité). C'est

pourquoi les valeurs observées ne seront jamais « égales » aux valeurs attendues (valeurs dites « théoriques »), ni ne correspondront à une réalité unique (valeur dite « vraie »). Les expérimentateurs cherchent donc plutôt à évaluer la compatibilité entre observations et prédictions. Ainsi, ce ne sont pas seulement les valeurs prédites ou obtenues qui sont importantes, mais aussi le niveau de confiance que l'on accorde aux valeurs obtenues par un acte de mesurage dans une situation donnée (*cf.* Munier et Passelaigue, 2012 pour une discussion plus détaillée sur la question de la mesure et ses aspects philosophiques). Afin de définir ce niveau de confiance, les expérimentateurs peuvent affiner leur méthodologie et réduire les erreurs de manipulation, mais aussi et surtout, déterminer les incertitudes intrinsèques à la méthodologie, l'instrumentation et à la probabilité de répartition des valeurs obtenues (méthode GUM, 2008, (JCGM)).

1.2. - La modélisation comme démarche d'enquête

Le cycle de modélisation décrit la structure logique d'une démarche scientifique : il articule l'observation, la description, la formulation d'hypothèses, la production de prédictions et l'ajustement du modèle face aux données. Cependant, pour qu'un tel processus prenne sens dans un contexte d'apprentissage, il faut considérer sa dimension vécue : qu'est-ce qui pousse un sujet à modifier ses représentations, à remettre en cause un modèle ou à chercher de nouvelles régularités ? Autrement dit, comment l'activité de modélisation devient-elle une véritable démarche d'enquête ? C'est ici que la théorie de l'enquête proposée par Dewey (1938) apporte un éclairage complémentaire. Là où le cycle de modélisation décrit les opérations intellectuelles du chercheur, Dewey s'intéresse à leur mise en mouvement : à la manière dont une situation de déséquilibre — une contradiction entre ce qui

est perçu et ce qui est attendu — déclenche un processus de recherche active. L'enquête ne naît donc pas d'un objectif fixé à l'avance, mais d'une perturbation ressentie dans l'expérience. Elle conduit le sujet à reconstruire du sens, en transformant à la fois sa compréhension du monde et les modèles qu'il mobilise pour l'interpréter (Thievenaz, 2019).

Ces étapes correspondent étroitement à celles du cycle de modélisation de la figure 1 : le déséquilibre peut provenir d'une contradiction entre prédiction et observation (flèche 3, prédire) ou d'un conflit ressenti directement dans le monde expérimental (flèche 1, expérimenter dans le monde des objets) ; la recherche active peut être comprise comme un lien (flèche 2, décrire) à reconstruire entre le monde expérimental (flèche 1) et celui des modèles (flèche 4) ; enfin, la compréhension retrouvée du monde se traduit par des prédictions redevenues conformes aux observations. Mais Dewey introduit une dimension essentielle : l'expérience du sujet. L'enquête n'est pas seulement une suite d'opérations rationnelles, c'est un mouvement de pensée suscité par une rupture dans l'expérience ordinaire. Le modèle n'est pas seulement un outil de description, il devient un moyen de rétablir la continuité du sens. Ainsi, la théorie de l'enquête de Dewey complète le cadre du cycle de modélisation de Sensevy : elle en propose une lecture plus expérientielle et plus humaine. Ensemble, ces deux approches décrivent la science comme une activité à la fois rationnelle et vivante, où la connaissance se construit dans l'interaction entre observation, réflexion et transformation du regard.

Dans l'enseignement des sciences, cette perspective met en valeur l'importance de la surprise, du doute et de la recherche collective. Les situations qui provoquent un questionnement — un ciel sans soleil, la Lune visible pendant le jour, un résultat inattendu, une me-

sure discordante — sont autant d'occasions pour les élèves de s'engager dans une véritable démarche d'enquête. Le rôle de l'enseignant est alors d'accompagner ce mouvement : faire émerger la question, soutenir les essais, favoriser les échanges et aider à reformuler les modèles en construction. Cette conception rejoint les cadres de l'Inquiry-Based Science Education (IBSE) et de l'Investigative Science Learning Environment (ISLE, Etkina, 2023), qui proposent d'organiser l'enseignement autour de situations ouvertes, d'hypothèses formulées par les élèves et de raisonnements mis à l'épreuve par l'expérience. Dans ce cadre, l'objectif n'est pas seulement de transmettre des savoirs, mais de former à une manière d'apprendre, en rendant explicites les pratiques d'enquête.

1.3. - L'évolution des modèles du Système solaire : une illustration historique de la modélisation et de l'enquête

L'histoire de l'astronomie illustre de manière exemplaire la modélisation scientifique comme démarche d'enquête. À plusieurs reprises, les progrès de l'observation ont mis en tension les modèles existants, provoquant des révisions profondes dans la manière de représenter le monde céleste. Ces transformations peuvent être lues à travers le cycle de modélisation de la figure 1 : description du monde perceptible, élaboration d'un modèle interprétatif, formulation de prédictions et confrontation avec de nouvelles données.

Un premier exemple marquant est celui du passage du cercle à l'ellipse dans la modélisation des orbites planétaires. Les mesures précises de Tycho Brahé (flèche 1, expérimenter dans le monde des objets) avaient mis en évidence de légers écarts entre les positions observées de Mars et celles décrites (flèche 2) par les modèles circulaires alors dominants. Kepler, en reprenant ces données, engage une

véritable démarche d'enquête : il tente d'ajuster le modèle géométrique (flèche 4, raisonner dans le monde des modèles) sans parvenir à éliminer les écarts résiduels. Ce déséquilibre, vécu comme une tension entre le monde empirique et le monde des modèles, le conduit à reformuler sa représentation (flèche 4) : les trajectoires planétaires ne sont pas circulaires, mais elliptiques. Kepler

conclut que l'orbite de Mars est une ellipse parfaite, ou tout du moins ne diffère pas sensiblement d'une telle ellipse, après avoir essayé d'autres formes telles que les cercles ou les ovales [...]. L'ellipse rend compte élégamment de la description empirique et de l'explication physique en les combinant dans une sorte d'harmonie (Earle, 2014, p. 40).

Ce changement ne résulte donc pas d'une invention purement mathématique, mais d'une révision motivée par la résistance du réel — une réponse au conflit entre observation (flèche 1) et description (flèche 2) par les modèles (flèche 4).

Un deuxième exemple correspond au passage d'une description géométrique à une compréhension dynamique des mouvements célestes. Avant Newton, les orbites planétaires sont observées et ces observations sont décrites avec des cercles puis des ellipses. Avec Newton, la modélisation acquiert une portée prédictive nouvelle. La loi de la gravitation universelle (flèche 4, raisonner dans le monde des modèles) permet de relier trois observations jusque-là distinctes : les trajectoires des planètes, le mouvement de la Lune autour de la Terre et la chute des corps sur la Terre. De plus, cette loi permet de reconstruire la trajectoire de tout objet du Système solaire en connaissant seulement sa position et sa vitesse à un instant donné. Le modèle cesse

d'être seulement un outil de représentation (flèche 2) ; il devient un instrument de prévision (flèche 3) et de généralisation. L'activité de modélisation atteint ici une forme de stabilisation : l'enquête trouve une cohérence nouvelle dans l'unification des phénomènes terrestres et célestes.

Un troisième épisode illustre à nouveau la relance de l'enquête scientifique : la découverte de Neptune. Au début du XIX^e siècle, les astronomes constatent des anomalies dans la trajectoire d'Uranus (flèche 1, observation expérimentale), qui ne correspond pas exactement aux prédictions du modèle newtonien (flèche 3). Plutôt que remettre en cause la loi (flèche 4), deux chercheurs — Le Verrier (1846) en France et Adams en Angleterre — formulent l'hypothèse de l'existence d'une planète encore inconnue, modifiant ainsi le champ expérimental (flèche 1). Les calculs de Le Verrier permirent d'indiquer la position probable de cette planète, observée peu après dans le ciel. Cet épisode illustre la puissance du modèle prédictif (flèche 3) et, en même temps, la dynamique d'enquête qui lui est propre : une contradiction observée — perturbation — relance la recherche, jusqu'à une nouvelle stabilisation du modèle par modification du champ expérimental (flèche 1, ajout d'une planète).

Enfin, le cas de Mercure montre une autre forme de stabilisation à la suite d'un conflit entre observation et prédiction d'un modèle. L'avancée observée du périhélie de sa trajectoire — position la plus éloignée du Soleil — ne pouvait pas être expliquée par la gravitation newtonienne, même en supposant l'existence d'une planète supplémentaire — parfois nommée *Vulcain*. Cette fois, aucune modification du monde expérimental ne permettait d'ajuster les calculs aux observations. Il fallut attendre la théorie de la relativité générale (flèche 4), proposée par Einstein en 1915, pour que le dé-

calage soit compris comme une conséquence (flèche 3, prédiction) de la courbure de l'espace-temps. Ici, le déséquilibre conduit à changer de cadre conceptuel (flèche 4) pour rétablir la cohérence entre prédiction (flèche 3) et expérience (flèche 1).

Ainsi, l'histoire du Système solaire témoigne du caractère cyclique de la modélisation scientifique : chaque progrès naît d'une perturbation, souvent provoquée par un écart entre observation et prédiction, et se poursuit par un effort pour reconstruire du sens. Ce processus historique illustre, à grande échelle, la même dynamique de pensée que celle observée dans les apprentissages scolaires : une alternance entre rupture, recherche active et reconstruction progressive de la compréhension du monde. Ce « parcours historique » illustre la dynamique même que la didactique cherche à rendre accessible aux élèves : celle d'un savoir qui se transforme face aux résistances du réel. Dans la suite, nous proposons d'examiner comment cette logique de modélisation et d'enquête peut être mise en œuvre dès l'école maternelle (*cf.* également Ledrapière, 2010), à travers des situations d'observation du ciel et des phénomènes lumineux, puis au lycée, par la recherche des « relations de Kepler ».

2. – Méthodologie et positionnement de l'étude

Les développements précédents ont posé le cycle de modélisation de Sensevy comme cadre théorique permettant d'articuler monde expérimental et monde des modèles. Nous mobilisons maintenant ce cadre pour analyser deux situations d'enseignement en astronomie : une séquence en maternelle (cycle 1) et une séance en terminale. Dans les deux contextes, les enseignants avaient été sensibilisés aux principes de la modélisation scientifique : en maternelle, dans le cadre du LéA-Ifé

VIVAP associant chercheurs et praticiens ; en terminale, à travers des échanges réguliers avec les chercheurs autour du planétaire humain et des relations de Kepler. Les séances analysées ont cependant été conçues et mises en œuvre de manière autonome par les enseignants.

Les données mobilisées diffèrent selon les contextes : en maternelle, il s'agit de notes prises par les enseignantes et de discussions au sein du collectif du LéA-Ifé regroupant enseignants, astronomes et didacticiens ; en terminale, il s'agit des observations de la séance réalisées par le premier auteur et d'un entretien semi-directif réalisé également par le premier auteur centré sur les intentions didactiques de l'enseignant. L'analyse repose sur une lecture *a priori* des scénarios envisagés, puis *a posteriori* des situations effectivement observées, en mobilisant le cycle de modélisation (flèches 1 à 4) comme grille d'interprétation.

Cette contribution s'inscrit dans une démarche exploratoire qualitative fondée sur deux études de cas. Il s'agit d'examiner comment le cycle de modélisation peut servir d'outil de lecture de séances d'enseignement et de discuter de la pertinence d'une modélisation de la maternelle au lycée. L'objectif n'est pas d'évaluer l'efficacité des séances du point de vue de l'apprentissage ou de la compétence de modélisation, mais d'identifier dans quelle mesure les différentes dimensions du processus de modélisation sont présentes, émergentes ou contraintes selon le niveau scolaire et le contexte.

3. – De l'observation aux premiers modèles scientifiques en maternelle

La séquence présentée ici a été conçue par trois enseignantes en école maternelle, toutes membres du groupe de recherche du LéA-Ifé

VIVAP. Les *Lieux d'éducation Associés* (LéA) sont des dispositifs de recherche collaborative associant enseignants, formateurs et chercheurs (cf. le numéro spécial de la revue *Éducation & Didactique*, vol. 16, 2022). L'un des objectifs du LéA-Ifé VIVAP est d'explorer comment les élèves de maternelle peuvent construire leurs premières représentations scientifiques à partir de leur expérience vécue du ciel. Les séquences sont co-construites par les enseignants et les chercheurs afin de favoriser la mise en œuvre de démarches de modélisation et d'enquête adaptées au cycle 1. Nous présentons ici une séquence consacrée à l'exploration du mouvement apparent du soleil¹⁰ par les trois enseignantes dans deux classes de Petite et Moyenne Sections (PS-MS) et une classe de Moyenne et Grande Sections (MS-GS). La classe de MS-GS a prolongé la séquence par une seconde séquence sur l'étude des ombres. Ces deux séquences visent à susciter chez les élèves une première forme d'enquête scientifique, où la curiosité et le langage (modèle initial) se conjuguent à l'expérimentation pour faire émerger des modèles explicatifs simples des phénomènes observés (flèche 2, description). Une séance de formation au système solaire avait été conduite par les chercheurs en astronomie du groupe de recherche. Puis une réflexion sur le cycle de modélisation — selon les termes de la section 2 de cet article — avait été présentée au collectif par les chercheurs en didactique des sciences physiques. Les trois enseignantes de maternelle du groupe avaient conclu qu'il était nécessaire que les élèves prennent conscience de l'existence du soleil et de son mouvement dans le ciel, avant de les faire réfléchir aux planètes et à leur mouvement relatif au soleil. La séance a ensuite été construite par les enseignantes seules, mise en place dans leurs classes respec-

¹⁰ Dans la suite du texte, « le Soleil » écrit avec une majuscule fait référence à l'objet physique, tandis que « le soleil » écrit avec une minuscule fait référence à l'objet observé dans le ciel.

tives et présentée par la suite au groupe de recherche. L'analyse que nous présentons ici est le fruit des discussions au sein du groupe. Les extraits de parole des élèves viennent des notes prises par les enseignantes pendant l'implémentation de la séquence.

3.1. - Analyse *a priori* des deux séquences

Les enseignantes ont très tôt perçu l'intérêt du thème de l'astronomie et de l'observation du ciel pour traverser l'ensemble des domaines d'apprentissage. Regarder le ciel, chercher la lune ou le soleil, observer les ombres dans la cour : ces activités sont pensées pour déclencher chez les élèves de nombreuses interrogations, des récits personnels, des références culturelles, des émotions. Elles peuvent ouvrir un espace où se croisent savoirs scientifiques, croyances et imagination. Ces éléments seront recherchés lors de la production de dessins du ciel au début de la séquence. Le langage oral devrait également être un levier fondamental pour penser le monde, mais aussi pour structurer les apprentissages dans d'autres domaines : mathématiques, espace, temps, arts visuels, etc.

La première séquence, menée avec 15 élèves de PS-MS, se base sur un rituel d'observation mené à différents moments de la journée et répété régulièrement sur plusieurs mois. Nous désignons cette séquence par « Observation du ciel ». Les élèves vont dans la cour et sont invités à décrire ce qu'ils voient dans le ciel : le soleil, la lune, parfois des nuages ou s'ils pensent à la nuit, des étoiles. De retour en classe, ils construisent après chaque rituel une « carte du ciel ». Ce rituel est effectué plusieurs fois par semaine au début de la séquence, puis une fois par semaine. Il est parfois mené à différentes heures de la journée (en arrivant à l'école, à midi, et avant de partir). L'objectif est de faire observer les objets du ciel afin de les transformer en éléments

concrets, visibles (flèche 1, expérimenter dans le monde des objets). Ces observations peuvent ne pas correspondre à leur imaginaire (flèche 4, modèle initial). En effet, il est probable que, lors de ces observations faites à différents moments de la journée, certains objets vont apparaître, disparaître ou se déplacer dans le ciel. Ainsi, la lune peut être visible certains jours, le soleil peut être caché par les nuages... Il est possible que certains élèves n'aient jamais réellement pris conscience de l'existence du soleil. Il est très probable que les élèves n'aient pas observé la lune pendant le jour, ni fait le lien entre les ombres et la présence du soleil dans le ciel. L'activité des élèves se construit dans l'interaction avec cet environnement mouvant : par le regard, par les déplacements dans la cour ou encore par le récit collectif de ce qu'ils ont vu en arrivant à l'école. L'objectif est de faire passer d'une description expérientielle à des objets communs et indépendants de l'expérience (flèche 4) : le Soleil doit exister même s'il n'est pas visible...

La seconde séquence, menée avec des élèves de moyenne et grande sections, porte sur les ombres. Nous désignons cette séquence par « Ombre ». Elle est constituée d'un nombre de séances plus restreint que la première et il ne s'agit pas d'un rituel. Au cours de deux séances, les élèves sont invités à jouer avec leur propre ombre, dans la classe et dans la cour. Dans une troisième séance, ils doivent positionner la source de lumière et l'objet afin de placer l'extrémité de l'ombre en un point précis. Ces actions doivent conduire à des relations telles que « je bouge, mon ombre bouge », « je mets un objet, il y a une ombre », « je cache la lumière, il n'y en a plus ». L'ombre devient un phénomène à explorer, qui dépend à la fois de la lumière et de la position des objets. Les élèves doivent vivre des expériences uniques, mais déjà régulées par une consigne, par l'attention portée à certains effets : ombre claire ou sombre, grande ou petite.

Les deux séquences sont en lien étroit avec les programmes de l'école maternelle, au-delà du contexte spécifique de l'astronomie. Elles permettent en effet d'apprendre aux élèves à :

- se repérer dans le temps : à travers l'alternance jour/nuit, l'observation quotidienne du ciel, les rituels de la « carte du ciel », le calendrier et l'horloge ;
- se repérer dans l'espace : situer le soleil, observer les ombres dans la cour, représenter la position des objets par rapport à soi ou à un repère ;
- construire des représentations : dessins annotés, légendes dictées à l'adulte, cartes colorées, gnomon installé dans la cour ;
- explorer les grandeurs et les mesures : observer la variation des ombres, comparer des tailles, évoquer des trajectoires.

Nous considérons ces deux séquences, « Observation du ciel » et « Ombre », comme des séquences indépendantes. Cependant, c'est bien un même processus de modélisation qui est attendu dans les deux.

3.2. - Analyse *a posteriori*

Le passage du monde expérimental au monde des modèles (flèche 2) à travers le langage a été un des éléments marquants du déroulement des deux séquences. Celles-ci commencent par des observations. Avec l'aide de l'enseignant, les élèves mettent des mots sur ce qu'ils voient. Concernant *Observation du ciel*, les élèves disent : « le soleil est là », « il est monté », « il est parti ». Concernant *Ombres*, on entend les expressions : « mon ombre est grande », « elle est derrière moi ». Des séances en classe sont ensuite consacrées à faire le point sur les observations passées, à formuler des régularités, afin de passer de la description du monde perceptible au monde des modèles (flèche 2, description). Les objets (soleil, lune,

ombre) sont encore singuliers, mais des catégories ou des régularités commencent à se dégager (flèche 4, modèle) : « le matin, le soleil est là-bas », « à midi, il est haut », etc. Parfois, bien que rarement, des élèves observent : « quand il y a du soleil, il y a une ombre ».

Les enseignantes insistent particulièrement sur les progrès remarquables en langage oral. Nous reprenons ici un exemple caractéristique de verbatim recueilli lors d'un rituel d'observation du ciel

Un élève : *On voit un peu le soleil.*

Un élève : *Le Soleil est derrière.* [il montre un immeuble].

Ens. : *S'il n'y avait pas les nuages, il serait derrière l'immeuble et après il passe de l'autre côté de l'immeuble.*

Un élève : *Le Soleil il tourne par là et après il s'arrête et il fait demi-tour.*

Un élève : *Il se cache derrière la lune le soir, c'est pour ça que la lune brille.*

[...]

Un élève : *On voit la Lune et le Soleil en même temps tous les jeudis.*

[...]

Ens. : *Est-ce que la Lune est cachée derrière les nuages ou elle n'est pas là du tout ?*

Un élève : *Il faut un télescope pour le savoir.*

Tous les élèves, y compris les plus jeunes ou les plus fragiles, ont pris la parole dans les discussions collectives. Ils ont appris à écouter les autres, à s'exprimer de manière de plus en plus claire, à formuler un avis ou une explication. Des élèves de Petite Section ont ainsi pu dire : « Le soleil, il éclaire l'immeuble, mais on voit aussi la lune » ou encore « Peut-être que la lune, elle vient le matin aussi ». La pratique de la dictée à l'adulte s'est révélée essentielle pour garder trace des raisonnements, mais aussi pour valider symboliquement la parole de l'enfant. Selon les enseignantes, les élèves adaptent leur débit, reformulent, s'ap-

roprient le lexique, retiennent les propos des autres. La dynamique collective donne naissance à une véritable communauté de chercheurs, dans laquelle chacun participe à la construction du savoir.

Les enseignantes introduisent progressivement un vocabulaire plus spécifique, tout en maintenant le lien avec les mots des élèves. Elles parlent de « lumière », de « source », d'« objet », d'« ombre ». L'espace et le temps deviennent des notions structurantes : « le matin », « le soir », « au milieu », « à gauche », « à droite ». Le langage oral est soutenu par des dessins, des jeux de position, des reconstitutions en salle.

La récurrence des situations d'échange, la valorisation de la parole, le respect des idées de chacun permettent aux élèves de dépasser la simple description pour entrer dans une démarche explicative. Des connecteurs comme « parce que », « peut-être que », « alors » apparaissent dans leurs phrases, signes d'un premier raisonnement scientifique en train d'émerger.

Les dessins des élèves intègrent initialement des éléments de leur imaginaire (fusées dans le ciel par exemple). Ces éléments vont se mélanger avec des observations de plus en plus précises — les immeubles sont ajoutés après quelques séances d'observation pour préciser la position du soleil dans le ciel. L'expérience sensible s'ajoute au langage et est ici centrale (flèche 1). Le Soleil chauffe, éblouit et provoque l'apparition de zones claires et sombres dans la cour. Les objets du ciel sont observés dans leur unicité (caractéristique du monde expérimental), comme le soleil « d'aujourd'hui » ou la lune « de ce matin ».

Au fil des jours, le modèle que les élèves construisent collectivement est confronté à de nouvelles observations. Par exemple, la lune

est parfois visible en même temps que le soleil, ce qui trouble la représentation « nuit/lune » et « jour/soleil ». Ou encore, un jour nuageux, l'ombre disparaît, alors que le soleil est censé être là. Ces moments de discontinuité déclenchent de véritables mini-enquêtes. Pourquoi l'ombre a disparu ? Où est passé le soleil ? Est-ce qu'il est toujours là ? L'enfant est alors amené à remettre en cause ou à adapter son modèle. L'enseignant favorise ces confrontations par des jeux de questions, par des variations volontaires (observer le ciel à différents moments de la journée et sous différentes conditions météorologiques). Les élèves peuvent ainsi distinguer les éléments importants : la lumière est nécessaire à l'ombre, le nuage cache le soleil — source de l'ombre, mais ne le fait pas disparaître. Les élèves passent peu à peu d'une description à une prédiction accompagnée d'une explication : ils ne disent plus seulement ce qu'ils voient, mais ce qu'ils s'attendent à voir.

Nous considérons que la notion de « modèle » est présente lorsque la description d'observations indépendantes se transforme en la description de régularités. En effet, ces régularités peuvent conduire à des prédictions (flèche 3) qui pourront être anticipées, testées, vérifiées. L'enfant commence à « penser avec » ces régularités pour prédire ou comprendre ce qu'il voit. Dans le cas du rituel d'observation du ciel, les élèves conviennent ensemble qu'un même objet (le Soleil) suit un mouvement régulier : il change de position dans le ciel, son ombre varie. Ce qui était observé — le soleil « se lève », « monte », puis « descend » — devient une frise du temps en classe. Lors du rituel du matin, les élèves montrent le soleil (observation), puis décrivent son mouvement dans le ciel sur la journée (modèle). Ils savent où le soleil sera lors du prochain rituel de midi (prédiction) et le vérifient effectivement. Dans le cas de l'ombre, les élèves savent comment déplacer une lampe

pour que la pointe de l'ombre de l'objet éclairé atteigne un point spécifique.

3.3. - Retour des enseignantes

Les enseignantes soulignent combien ce projet a fait évoluer leur propre regard sur l'enseignement des sciences. Loin d'un programme figé, qui suivrait une « démarche scientifique », le modèle du ciel s'est construit collectivement au fil des observations, des imprévus, des réactions des enfants. Un matin, la lune est visible alors que le soleil est déjà levé : cette simple co-présence déclenche des discussions riches, relance les observations, fait évoluer les représentations. Cette souplesse dans l'organisation, cette prise en compte des imprévus naturels ou cognitifs constitue l'un des traits marquants de cette démarche inhabituelle dans leur pratique de l'enseignement des sciences en maternelle. Il s'agit moins d'amener l'enfant à une « bonne réponse » que de le mettre en position d'enquêteur : celui qui observe, qui s'étonne, qui cherche à comprendre, qui échange avec les autres. En cela, la démarche correspond pleinement à la théorie de l'enquête selon Dewey (1938) : une situation indéterminée (par exemple, voir la lune le jour), un questionnaire collectif, des hypothèses formulées, des essais, des comparaisons, des ajustements. L'enfant apprend en retrouvant de la continuité dans une situation troublée et en construisant peu à peu un modèle explicatif du monde qui l'entoure. Ce projet montre que la maternelle peut être un terrain fécond pour initier les élèves à une posture scientifique : observer, décrire, représenter, questionner, formuler une hypothèse, écouter l'autre, accepter le doute. Les connaissances scientifiques des élèves sont encore fragmentaires, mais elles deviennent de plus en plus organisées (Hamdani-Bennour, 2024). Le lexique s'enrichit, les phrases gagnent en complexité, les idées se connectent. Pour les enseignantes, cette expé-

rience est aussi formatrice et enthousiasmante : elle renouvelle leur regard sur la science, leur permet de vivre une co-construction du savoir avec leurs élèves et les place, elles aussi, dans une posture d'enquête. Une belle illustration du fait que faire des sciences en maternelle, ce n'est pas faire « comme les grands » : c'est déjà penser le monde, avec rigueur et imagination.

4. – La démarche de modélisation à travers les lois de Kepler au lycée

Nous allons maintenant observer la mise en place d'une séance de TP en classe de terminale par un enseignant, que nous appellerons J. Le TP a pour thème « les relations de Kepler » et doit permettre de travailler l'acte de mesurage et son lien avec la notion de prédiction. La séance proposée s'appuie sur le planétaire humain, une représentation des orbites des planètes à échelle réelle (1 mètre pour 1 unité astronomique), sur lequel les élèves se déplacent eux-mêmes pour simuler les orbites des planètes et des comètes du Système solaire.

L'enseignant a construit la séance seul. Il anime un club d'astronomie au lycée et a découvert le planétaire humain par l'intermédiaire de collègues de l'université de Cergy. Il a assisté à des séances menées par un chercheur avec sa classe, mais n'a jamais suivi de formation spécifique sur l'usage du planétaire humain. Il enseigne les relations de Kepler depuis de nombreuses années, à partir de l'analyse de documents et de tableaux de valeurs (période et demi-grand axe) récupérés sur internet. Lors de cette séance, il voulait faire vivre les lois de Kepler en utilisant le planétaire humain.

La séance a été menée avec une classe de terminale en fin d'année. La séance dure

2 heures au cours desquelles les élèves, par groupes de 3, doivent mettre en place les trois relations de Kepler. Chaque groupe d'élève a à sa disposition une fiche à suivre, reproduite en annexe 2. Nous avons interviewé J avant et après la séance et nous avons observé la séance lors de son implémentation. L'interview avant la séance a eu lieu en distanciel et a porté sur les objectifs d'apprentissage, les conditions de mise en place, l'intérêt et la spécificité d'une séance basée sur le déplacement des élèves sur le planétaire humain, les choix didactiques de J en lien avec l'acte de mesurage sur le planétaire et enfin ses attendus sur la réalisation des tâches par les élèves. L'interview après la séance a eu lieu à nouveau en distanciel pour permettre à J de s'exprimer sur les difficultés et les réussites qu'il a observées pendant le TP. Les étapes de ce TP ont été décrites en détail dans le cadre des ateliers du colloque AstroEdu-FR en 2023 (Rollinde, 2025). Dans le cadre de cet article, nous commençons par montrer comment le cycle de modélisation pourrait être suivi dans le cadre d'une séance cherchant à faire retrouver les relations de Kepler à travers des activités de mesurage sur le planétaire humain. Cette séance n'est pas toujours identique à celle proposée par J. Nous indiquons dans la section suivante comment la relation au cycle de modélisation s'est modifiée dans la séance proposée effectivement par J et ensuite dans la réalisation effective des tâches par les élèves.

4.1. - Place possible du cycle de modélisation

La première approche des relations de Kepler est fondée sur une expérience perceptive du mouvement : les élèves observent leurs camarades, ressentent eux-mêmes la vitesse variable de déplacement, comparent les trajectoires. Le monde perceptible (flèche 1) est ici celui du mouvement dans l'espace et c'est par le corps que les élèves entrent dans la dyna-

mique des orbites. Ils vivent concrètement le fait que les trajectoires ne sont pas toutes circulaires (première relation de Kepler, annexe 2), que les vitesses changent selon la position (version moderne de la seconde relation de Kepler qui porte sur une égalité d'aire). Cette perception devient le point de départ d'un questionnement. À ce stade, les élèves formulent des hypothèses intuitives sur les formes des orbites (cercle, ellipse), sur les vitesses (constantes ou non) ou sur les relations entre distance et durée. Le rôle de l'enseignant est alors de structurer cette phase expérimentale en posant un problème : comment décrire ces observations ? Peut-on les mesurer ? les relier par des lois ?

La seconde étape du travail relie la description des perceptions en lien avec un monde des modèles scientifiques connus pour un élève de lycée (ou donnés par l'enseignant). Pour chacune des trois relations de Kepler (éléments du modèle connu), les élèves sont amenés à choisir des grandeurs pertinentes, à les mesurer et à les mettre en relation selon une hypothèse donnée. Cette activité mobilise ainsi toutes les dimensions de la modélisation : identification des paramètres, mise en œuvre d'un protocole, estimation des incertitudes, comparaison avec un modèle théorique.

Relation 1 - Forme des orbites (ellipse, cercle)

Les élèves doivent déterminer si la trajectoire est circulaire ou elliptique et si le Soleil en est le centre ou s'il est un foyer. Pour les orbites planétaires, ils mesurent les distances entre le Soleil et différents points de l'orbite. Si ces distances varient, le modèle du cercle est réfuté (Rollinde et Maisch, 2023). L'orbite de la comète Encke est évidemment non circulaire et permet ainsi de tester une construction expérimentale d'une ellipse (Rollinde, Nechache et Abboud, 2022). Les élèves testent

différentes positions du second foyer à l'aide d'une corde, suivant la méthode du jardinier. Ce travail transforme leur première perception en objet géométrique manipulable. Ils vérifient que tous les points de l'orbite peuvent être atteints à partir d'une ellipse à double foyer : une validation par l'expérience du modèle mathématique de l'ellipse.

Relation 2 - Aires balayées égales en temps égal

Les élèves apprennent ici à mesurer des aires quelconques, balayées par le rayon vecteur entre deux instants successifs. La tâche est complexe : les aires ne sont pas triangulaires, les bords sont incurvés. L'estimation passe par un pavage de la surface à l'aide de « carreaux ». Les carreaux peuvent être fournis sous la forme de cartons de taille constante ou de feuilles de papier toilette (choix de l'enseignant pour la séance observée !). Les élèves doivent placer les carreaux sur toute la surface pour réaliser le pavage avec deux conditions : ne pas laisser d'espace libre, ne pas faire chevaucher les carreaux. Ils comptent alors les carreaux entièrement inclus dans la surface, ce qui correspond à un nombre minimal de carreaux. En ajoutant les carreaux qui sont partiellement inclus, donc sur le périmètre, ils obtiennent une valeur maximale. Ils définissent ainsi un intervalle de valeur (aire minimale et maximale). Cette approximation prend en compte les incertitudes, qui deviennent un élément central de l'analyse. Le modèle prédit une égalité d'aires pour des durées égales. Mais l'égalité mathématique ne peut être observée directement. Les élèves doivent comparer les intervalles de mesure. Si ceux-ci se recouvrent, le modèle est compatible avec les mesures ; s'ils sont disjoints, la prédiction est réfutée. C'est une véritable confrontation entre un modèle, la loi de conservation des aires et des mesures.

Relation 3 - Proportion entre période et demi-grand axe

Les élèves mesurent les périodes de révolution à partir de l'observation du planétaire ou de leur déplacement (nombre de pas \times durée d'un pas) et les demi-grands axes (la plus grande corde reliant deux points). Ils placent ces données dans un tableau ou un graphique et cherchent à formuler une loi. Ils doivent déterminer s'il existe bien une relation, puis s'il s'agit d'une relation de proportionnalité ou en loi de puissance. La relation correcte, $\frac{T^2}{a^3} = \text{Cte}$, peut être retrouvée par exploration graphique ou par comparaison de rapports — ce qui a été le choix de l'enseignant. L'analyse permet de montrer que les planètes proches (jusqu'à Mars) semblent suivre une relation quasi linéaire, mais que l'écart croît avec la distance. Cette variation est elle-même un objet de discussion. Le modèle mathématique n'est pas immédiatement accessible, mais l'idée d'une relation non proportionnelle se fait jour : une étape-clé vers une modélisation plus formelle.

Chaque activité se termine par une phase de discussion collective. Les élèves présentent leurs mesures, décrivent leur protocole, comparent les résultats et débattent des conclusions. L'objectif est d'illustrer pour chaque activité le fait que la science ne prouve pas, mais qu'elle confronte des prédictions à des mesures, toujours imparfaites. Un modèle n'est pas « confirmé », mais « non réfuté » avec les mesures obtenues et les incertitudes associées. Les élèves peuvent alors apprendre l'importance d'associer une incertitude à l'estimation d'une mesure ; et à interpréter un écart entre la valeur théorique, attendue, et celle obtenue. Les outils mobilisés — la corde, le quadrillage, la table de valeurs, le graphique — sont des supports de modélisation, qui transforment une expérience vécue en une représentation partageable et discutée. Enfin, les élèves

comprennent que leurs observations les engagent dans une démarche d'enquête : formuler une hypothèse, tester, interpréter, ajuster. La rigueur mathématique se nourrit ici de l'expérience sensible et la perception initiale se transforme peu à peu en connaissance construite.

4.2. - Analyse de la séance proposée par l'enseignant

L'objectif de la séquence décrite dans la section précédente est de faire émerger les trois lois de Kepler comme des régularités observées, sans les imposer dès le départ. Le modèle doit être construit progressivement par confrontation avec les données issues de l'expérience vécue. J confirme que « les élèves comprennent mieux une loi quand ils l'ont cherchée eux-mêmes ». Cependant, la fiche construite par J commence par l'énoncé des trois lois de Kepler (flèche 4, figure 1), une explication de la méthode de construction d'une ellipse (flèche 1) et enfin l'explicitation de la constante présente dans la troisième loi de Kepler (flèche 4). Il s'agira donc plus d'utiliser les lois que de les construire ou de les identifier à travers l'observation des mouvements. Les tâches sont décrites sous forme de « défi ». Le premier défi correspond à une expérimentation, observation de l'objet « planétaire » (flèche 1). Les termes utilisés sont bien ceux du monde expérimental pour des élèves de lycée : « observer » et « se déplacer » dans les consignes ; « position », « durée » et « échelle » dans la correction. Les trois autres défis suivent la même logique. La consigne indique de « vérifier » la loi qui est fournie dans les documents. L'objectif passe de la description de données empiriques (flèche 2) à la vérification d'une prédiction (flèche 3). La correction (annexe 2) montre bien que l'attendu de l'enseignant est de prendre des mesures (flèche 1) avec différents instruments et de confronter ces mesures à la prédiction. Cette

correction n'est pas proposée pendant la séance mais fournie aux élèves après.

La séquence prévoit ainsi des activités de mesure concrètes (corde, quadrillage, table de valeurs) pouvant intégrer la notion d'incertitude. J note que ces activités sont complexes et parfois déstabilisantes. Il évoque les « difficultés des élèves à estimer des aires » ou à manipuler les grandeurs comme le demi-grand axe ou la période. Il souligne la richesse pédagogique de ces activités, mais aussi leur coût en temps et en énergie. Il a ainsi adapté les attentes : dans certains cas, « l'intuition suffisait, sans tout mesurer ». L'approche expérimentale reste centrale, mais doit être adaptée aux capacités réelles des élèves. Ainsi, la dimension quantitative de comparaison entre mesures et prédictions du modèle a parfois été absente. Il n'est jamais mentionné d'incertitudes dans la correction. Par exemple, il s'agit de vérifier que la corde qui trace l'ellipse « reste bien sur la trajectoire », que les deux aires correspondent au même nombre de feuilles « à une feuille ou deux », et que les valeurs du rapport $\frac{T^2}{a^3}$ sont « proches ». L'accord avec la prédiction est ainsi qualitatif. Pour la troisième loi, qui implique des valeurs numériques, l'enseignant estime que « les écarts sont dus à la difficulté des mesures des demi-grands axes et des périodes » et n'attend pas une estimation. Au cours de l'interview, J confirme cette approche qualitative. « Je n'ai pas mis du tout de questionnement écrit sur les questions de mesure et d'incertitude. C'est par le dialogue que les élèves vont se rendre compte si la démarche tient debout ou si on est complètement dans les choux ». Dans la discussion, il va chercher à faire réfléchir aux causes possibles d'erreur, mais le calcul d'incertitude est « hors programme ». Ainsi, l'objectif est bien de vérifier (qualitativement) une prédiction. L'estimation des erreurs (et non pas des incertitudes) permet surtout d'expliquer pourquoi les élèves

n'obtiennent pas exactement ce qui est prédit par le modèle.

4.3. - Analyse des activités des élèves

Les élèves ont commencé par essayer de comprendre le modèle et sa prédiction. Les documents fournis étaient suffisamment clairs et tous les groupes ont compris ce qu'ils devaient mesurer. Le lien entre le modèle et le planétaire a été effectif. Ensuite, la méthode de mesure a été menée avec succès (flèche 1). Nous notons que l'usage des papiers toilette pour mesurer un pavage a surpris. La surprise ne venait probablement pas seulement de l'outil de mesure, mais également de la proposition de ne pas utiliser des unités standard de mesure. Nous faisons l'hypothèse que les élèves n'ont pas considéré ce mesurage comme une procédure sérieuse ou digne de confiance. Cette mesure n'a pas toujours été menée de façon adéquate, les papiers pouvant être mis les uns sur les autres, par exemple. L'activité principale des élèves a alors consisté à manipuler les instruments de mesure (flèche 1) afin de les mettre en accord avec la prédiction. Le cas le plus exemplaire est celui de l'égalité des aires. Après avoir mesuré une première aire (de façon plus ou moins exacte), les élèves remplissaient le pavage de la seconde aire. En arrivant à la fin du pavage, ils ont ajouté ou retiré des papiers afin de retrouver exactement le même nombre de papiers pour les deux aires. Cela était possible car ils s'autorisaient à mettre des papiers les uns sur les autres et ne se préoccupaient pas de savoir si les papiers étaient intégralement inclus dans la surface considérée. Concernant la forme des orbites, plusieurs groupes ont considéré qu'il leur suffisait de marcher raisonnablement le long de la trajectoire en tenant la corde dans la main pour considérer que la prédiction était bien vérifiée. Certains groupes ont déplacé la corde sur le planétaire, ce qui permettait déjà de mieux vérifier le passage par tous les points de l'orbite.

Enfin, pour la troisième loi, le rapport $\frac{T^2}{a^3}$ ne pouvait pas être exactement constant. Les élèves ont utilisé la moyenne des valeurs obtenues pour effectuer les calculs suivants (défi 5), méthode qu'ils maîtrisent et utilisent régulièrement. Ils ont donc accepté la prédiction d'une valeur constante et ont contraint le monde empirique à ne fournir qu'une seule valeur... L'enseignant a conscience de ce comportement des élèves vis-à-vis des prédictions et remarque : « c'est quand même assez rare que les élèves remettent en cause [une prédiction]. C'est peut-être un défaut [de] notre enseignement ? Et pourtant, à chaque fois, on interroge les causes d'erreur ».

4.4. - Un écart dû au temps limité de la séance

Le scénario *a priori* repose sur l'idée que les lois de Kepler ne doivent pas être données d'emblée. Elles doivent émerger de l'expérience, par confrontation modèle-données, permettant ainsi aux élèves de s'approprier une construction scientifique. L'intention est que les lois soient découvertes, non imposées. Cette perspective donne une place centrale à la modélisation comme processus dynamique. Dans la mise en œuvre, cette posture est partiellement conservée. L'argument explicite de J est bien que les élèves « comprennent mieux une loi quand ils l'ont cherchée eux-mêmes ». Cependant, les lois sont déjà présentes dans la fiche distribuée. Les élèves sont invités à les « vérifier » en tant que prédiction plutôt qu'à les construire. Ainsi, le rôle des lois dans le processus de modélisation est de fournir des prédictions (flèche 3) ; elles ne sont pas « découvertes » comme le résultat d'un travail empirique (flèche 2). L'expérience conserve une place centrale, mais son rôle est davantage celui d'un support illustratif que d'un véritable test du modèle. La confrontation est ainsi biaisée par une posture de confirmation plutôt que de mise à l'épreuve.

Il y a bien eu un écart entre les intentions *a priori* et la mise en œuvre concrète, marquée par une recherche d'équilibre entre richesse didactique et contraintes pédagogiques. L'enseignant a laissé les élèves libres dans leur recherche, mais a dû ajuster les exigences par rapport aux étapes d'un cycle complet de modélisation : les lois sont données plutôt que construites, les données sont adaptées plutôt que confrontées et les erreurs sont discutées qualitativement plutôt que formellement évaluées. Ces ajustements traduisent une lucidité sur les conditions d'enseignement en terminale et la nécessité de compromis pour maintenir une dynamique d'engagement chez les élèves, sur le temps court d'une séance de TP.

5. – Discussion

Dans les deux cas étudiés, le cycle de modélisation n'était pas un objectif explicite assigné aux enseignants. Il a cependant fait l'objet d'échanges et de discussions au sein du collectif associant chercheurs et praticiens. La question qui guide cette discussion comparative n'est donc pas celle de l'application fidèle d'un modèle proposé par les chercheurs, mais plutôt de repérer dans quelle mesure les différentes dimensions du cycle apparaissent dans les situations effectivement conçues et mises en œuvre.

Un premier point commun réside dans la place accordée à l'expérience organisée (flèche 1). En maternelle comme en terminale, les séances ne reposent pas uniquement sur une transmission discursive des savoirs : elles s'ancrent dans un dispositif permettant une interaction avec un environnement matériel — observation répétée du ciel et travail sur les ombres d'un côté, planétaire humain et mesures à grande échelle de l'autre. Cette organisation rend possible pour les élèves l'existence d'un monde expérimental structuré, condition

nécessaire à toute dynamique de modélisation. Ce monde expérimental peut être organisé quel que soit l'âge des apprenants.

La dimension descriptive du cycle (flèche 2) apparaît également de manière significative dans les deux cas. En maternelle, elle prend principalement la forme d'une mise en mots progressive avec l'apparition d'un vocabulaire spécifique (ici, associé au repérage dans le temps et l'espace) et d'une stabilisation collective de régularités observées. En terminale, elle s'exprime à travers la formalisation mathématique et l'articulation entre grandeurs mesurées et prédictions issues de modèles. Dans les deux situations, l'observation est initialement à l'état d'expérience immédiate ; elle est ensuite intégrée à un système de représentations plus ou moins abstraites ou éloignées des perceptions.

Les écarts entre les deux niveaux d'enseignement sont plus marqués concernant la prédiction et la confrontation explicite entre modèle et mesure (flèche 3). En terminale, cette dimension est clairement identifiable : le calcul permet d'anticiper des résultats et la discussion de l'incertitude engage une réflexion sur la validité du modèle. Cependant, il s'agit plus de confirmer un modèle que de vérifier une prédiction, la possibilité de réfuter un modèle semble ne pas être envisagée par les élèves. En maternelle, cette confrontation reste plus implicite et moins systématisée ; la prédiction apparaît davantage sous forme d'hypothèses, qu'il est alors possible, et naturel, de réfuter si nécessaire.

Ces observations suggèrent que le cycle de modélisation peut apparaître dans des contextes variés sans avoir été explicitement prescrit comme tel. Il est présent dans l'existence d'une tension entre expérience, mise en mots, structuration et ajustement des représentations. Les traces des différentes étapes

peuvent être plus ou moins visibles selon le niveau scolaire et les outils mobilisés. Cette analyse reste limitée à deux situations singulières et ne permet pas de conclure à une généralisation. Elle met néanmoins en évidence que la discussion autour de la modélisation, sans nécessairement structurer explicitement la planification d'une séance, peut contribuer à maintenir une vigilance didactique quant aux relations entre observation, représentation et validation.

Conclusion

Cet article visait à explorer comment le cycle de modélisation (figure 1) peut décrire les modèles scientifiques historiques, et également structurer une démarche scientifique de la maternelle jusqu'au lycée. Nous avons examiné des situations contrastées : une séquence de découverte des ombres et des objets du ciel en maternelle, une activité autour des lois de Kepler en terminale. Ces deux études de cas illustrent de manière complémentaire l'usage du cadre de la modélisation. En maternelle, le cycle de modélisation et la théorie de l'enquête se traduisent dans la conception même des activités : les élèves observent, décrivent, formulent des régularités et ajustent collectivement leurs représentations, suivant ainsi naturellement les étapes de ce cycle. Au lycée, nous avons observé des tensions entre intentions didactiques et mise en œuvre effective : la vérification d'un modèle y prend le pas sur sa construction, montrant combien le temps, les attentes scolaires et la complexité des savoirs influencent la dynamique de modélisation.

Ces différentes analyses montrent que la modélisation, loin d'être réservée à un enseignement « avancé », peut prendre des formes accessibles et formatrices à tous les niveaux. Elle permet aux élèves de construire des liens

entre expériences vécues et idées théoriques, d'explorer activement des hypothèses, de tester des prédictions et d'interroger les écarts entre ce qui est observé et ce qui est attendu. Les trajectoires d'apprentissage qui en résultent ne sont pas linéaires ni uniformes, mais elles ouvrent des espaces de discussion, d'argumentation et de reformulation particulièrement riches.

Pour les enseignants, ces dispositifs exigent un pilotage fin. Il s'agit de soutenir les démarches de modélisation sans les contraindre et de ménager des moments d'institutionnalisation adaptés au niveau des élèves. L'exemple historique des modèles du Système solaire — dont la modélisation a été lente, tâtonnante et progressive — nous rappelle qu'enseigner la science, c'est aussi donner accès à ses modes de production, pas seulement à ses résultats. Ainsi, la modélisation apparaît comme un levier puissant pour articuler les apprentissages scientifiques à une compréhension plus large de ce qu'est « faire science ». Elle donne aux élèves des occasions de penser, de débattre, de représenter et de transformer leur compréhension du monde.

Remerciements

Nous tenons à remercier l'ensemble de l'équipe des enseignants et chercheurs du LÉA VIVAP, sans qui la séquence qui fait l'objet de la section 4 n'aurait pas pu être construite. Nous remercions également les collègues de l'INSPÉ de Versailles qui ont participé à la formation de formateurs autour de la modélisation en 2024-25.

Emmanuel ROLLINDE

IREMS de Paris
 CY Cergy Paris Université, Université de Paris
 Univ Paris Est Créteil, Univ. Lille, UNIROUEN
 LDAR, F-95000 Cergy-Pontoise, France

Soria HAMDANI-BENNOUR

CY Cergy Paris Université, Université de Paris
 Univ Paris Est Créteil, Univ. Lille, UNIROUEN
 LDAR, F-95000 Cergy-Pontoise, France

Clément MAISCH

CY Cergy Paris Université, Université de Paris
 Univ Paris Est Créteil, Univ. Lille, UNIROUEN
 LDAR, F-95000 Cergy-Pontoise, France,

Géraldine CAVALLO

École Armand Carrel, 75018 Paris
 LéA-Ifé VIVAP

Jocelyn CLÉMENT

Lycée Louis Armand, 95600 Eaubonne

Marie-Christine LEBLOND

École Cité Lepage, 75018 Paris
 LéA-Ifé VIVAP

Valérie LOZACH-LEGENDRE

École Cité Lepage, 75018 Paris
 LéA-Ifé VIVAP

Noël ROBICHON

LIRA, Observatoire de Paris, Université PSL
 Sorbonne Université, Université Paris Cité, CY Cergy
 Paris Université, CNRS, 92190 Meudon, France

Références bibliographiques

- Dewey, J. (1938). *The theory of inquiry*. PUF (traduit en français par G. Deledalle).
- Earle, C. (2014). The Use of Practical and Theoretical Geometry in Early Modern Astronomy. *Tooth & Claw*, 11, 38–45.
- Etkina, E. (2023). When learning physics mirrors doing physics. *Physics Today*, 76(10), 26–32.

- Gilbert, S. W. (1991). Model Building and Definition of Science. *Journal of research in science teaching*, 28(1), 73–79.
- GUM (2008). *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*. JCGM 100:2008 <http://www.bipm.org/fr/publications/guides/gum.html>
- Hamdani-Bennour, S. (2024). Approaching astronomy at nursery school: a reflection on pupils conceptions and their evolution. Dans *4th World Conference on Physics Education (WCPE)*.
- Hestenes, D. (1987). Toward a modeling theory of physics instruction. *American journal of physics*, 55(5), 440–454.
- Lapaire, J. R., Maisch, C., Nogry, S. & Rollinde, E. (2025). À l'école du planétaire humain. *Cahiers pédagogiques*, 597(1), 58–59.
- Le Verrier, U. (1846). *Lettre de M. Le Verrier à M. Galle et réponse de ce dernier, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, séance du 5 octobre 1846, tome 23*, 428–430.
- Ledrapier, C. (2010). Découvrir le monde des sciences à l'école maternelle : quels rapports avec les sciences ? *Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 2. DOI : 10.4000/rdst.291
- Munier, V. & Passelaigue, D. (2012). Réflexions sur l'articulation entre didactique et épistémologie dans le domaine des grandeurs et mesures dans l'enseignement primaire et secondaire. *Tréma*, 38, 106–147.
- Radford, L. (2013). Three key concepts of the theory of objectification: Knowledge, knowing, and learning. *Journal of research in mathematics education*, 2(1), 7–44.
- Rollinde, E. & Maisch, C. (2023). Les orbites planétaires sont-elles circulaires ? *Grand N*, 111, 5–39.
- Rollinde, E., Nechache, A. & Abboud, M. (2022). Étude du travail géométrique autour des ellipses avec le planétaire humain. Dans *Actes du colloque ETM7* (p. 309–320).
- Rollinde, E. (2025). Les relations de Kepler et le planétaire humain. Dans E. Rollinde (dir.), *Astronomie pour l'éducation dans l'espace Francophone* (p. 31–44). <https://hal.science/hal-05195898v1>
- Sensevy, G., Tiberghien, A., Santini, J., Laubé, S. & Griggs, P. (2008). An epistemological approach to modeling: Cases studies and implications for science teaching. *Science education*, 92(3), 424–446.
- Thievenaz, J. (2019). La théorie de l'enquête de John Dewey: réexplorations pour la recherche en sciences de l'éducation et de la formation. *Recherche et formation*, 92, 19–38.

Annexes

Annexe 1 – Séquence en maternelle

Les objets du ciel		
Séance	Tâche	Modélisation
1	Lecture d'album sur le jour et la nuit. Description du jour et de la nuit.	Modèle initial.
2	Classer et colorier des photos d'un paysage.	Modèle initial.
3	Observation du ciel.	Observations directes.
	a-t-on besoin de lunettes ? Où est le soleil ?	Prédictions.
4	Construction de cartes du ciel à différents moments Choix de repères.	Description du modèle.
5	Ordonner les photos du ciel prises à différents moments.	Utilisation du modèle.
6	Dessiner et faire des modèles en 3D du Soleil et de la Terre.	Évolution du modèle.
7	Visionnage de vidéos scientifiques. Observation du globe.	Confrontation des modèles.

Les ombres		
Séance	Tâche	Modélisation
1	« Je dessine ce qu'il y a dans l'espace ».	Modèle initial.
2	Découvrir son ombre et celle d'un objet.	Manipulation et observation.
3	Modifier l'ombre d'un objet en le déplaçant ou en déplaçant la source.	Manipulation et observation. Construction du modèle
4	Rituel d'observation : ombre de l'arbre.	Observation.
5	Décrire le mouvement du soleil et de l'ombre.	Description.
6	Reproduire l'observation sur une maquette de la cour.	Modèle.

Annexe 2 – Séance de TP au lycée

Nous reproduisons ci-dessous les fiches fournies aux élèves, ainsi que la correction proposée par l'enseignant J, notée en gras à la suite de chaque question.

Terminale
Chapitre P3
Mouvements
des satellites
et planètes

Lois de Kepler et planétaire CORRECTION

OBJECTIFS

À l'aide du planétaire peint dans la cour, vérifier les trois lois de Kepler.
Présenter oralement la démarche.

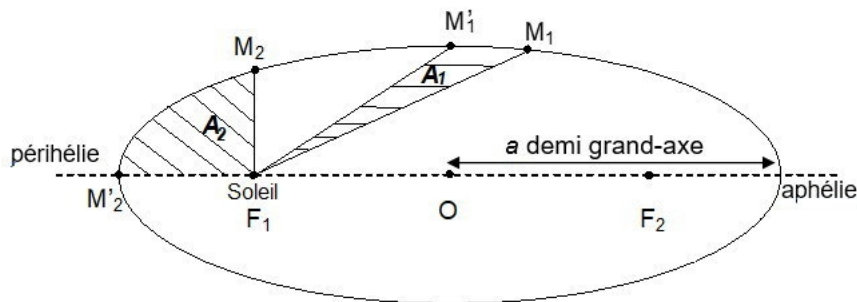
MATÉRIEL

- rouleau de papier toilette
- triple-mètre + décimètre
- calculatrice
- ficelle
- planétaire peint dans la cour
- tableaux blancs + feutres

Document 1 Les lois de Kepler

1^{ère} loi : loi des orbites

Dans le référentiel héliocentrique, la trajectoire du centre d'inertie M d'un astre en orbite autour du Soleil est une ellipse de centre O et de foyers F_1 et F_2 .



2^e loi : loi des aires

Le rayon vecteur $\overline{F_1M}$ allant du Soleil à l'astre en orbite balaye des surfaces égales pendant des intervalles de temps égaux.

3^e loi : loi des périodes

Le rapport du carré de la période de révolution T d'une planète autour du soleil au cube du demi-grand axe a de l'ellipse est constant.

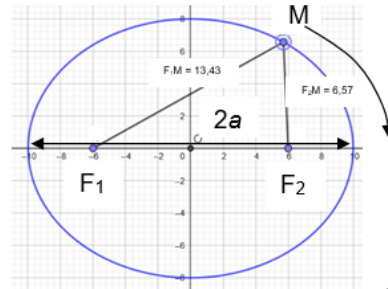
$$\frac{T^2}{a^3} = k .$$

Document 2 Tracer une ellipse avec la méthode du jardinier



Vidéo (13 secondes) <http://acver.fr/jardi>

Attacher une ficelle en deux points fixes situés aux foyers.
Tendre la ficelle en un troisième point M.
Tracer l'ellipse en maintenant la ficelle tendue.



$$F_1M + F_2M = 2a$$

Document 3 De Kepler à Newton

À partir des travaux de Kepler, Newton pu établir sa théorie de la gravitation universelle.

Il démontra notamment que $\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_s}$.

$$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$$

a demi-grand axe de la trajectoire elliptique (en m)

T période de révolution (en s)

M_s masse du Soleil (en kg)

MODÉLISER POUR COMPRENDRE LE SYSTÈME SOLAIRE : UNE APPROCHE DIDACTIQUE DE LA MATERNELLE À LA TERMINALE

Défi 1 : Observer et comprendre le planétaire

Se déplacer sur le planétaire et résumer ce qu'il représente (Unité de temps = 16 jours ; 1 u.a. → 1 m).

Le planétaire montre les positions des planètes du système solaire (et d'une comète en vert).

Ces positions sont espacées dans le temps par des durées égales de 16 jours.

L'échelle choisie est de 1 m pour une u.a. (unité astronomique = env. distance Terre-Soleil)

Défi 2 : Vérifier la 1^{ère} loi de Kepler (loi des orbites) et indiquer la démarche.

On va utiliser la méthode du jardinier pour retrouver une ellipse avec les positions de Mars.

Un élève (E1) se place sur le Soleil (foyer n°1), un autre élève (E2) se place sur une position de Mars, un troisième élève (E3) va chercher le foyer n°2.

On tend une corde entre les trois élèves.

E3 se place sur le grand axe vers une position qui pourrait correspondre au foyer n°2.

Alors E2 se déplace (corde tendue) et on vérifie qu'il reste bien sur la trajectoire de Mars.

On fait plusieurs essais, jusqu'à obtenir un bon fonctionnement de la méthode du jardinier avec toutes les positions de Mars.

Défi 3 : Vérifier la 2^e loi de Kepler (loi des aires) et indiquer la démarche.



Toujours avec la planète Mars.

À l'aide d'un pavage avec du papier toilette, on dépose des feuilles pour couvrir l'aire balayée pendant une durée de $2 \times 16 = 32$ jours (donc entre 3 positions successives).

On garde ces feuilles et on les déplace sur une autre aire qui correspond à une même durée.

On constate qu'à une feuille ou deux près, le pavage est réalisé. On peut conclure que l'aire balayée est bien la même.

1 feuille d'erreur / 28 feuilles en tout

Défi 4 : Vérifier la 3^e loi de Kepler (loi des périodes) et indiquer la démarche.

On veut vérifier que $\frac{T^2}{a^3} = k$.

Pour tous les astres en orbite autour du Soleil, il faut déterminer la période T et le demi-grand axe.

On compte le nombre de positions pour que l'astre fasse un tour complet. On en déduit la période.

Astre	T (en jours)	a (en u.a.) (1 u.a. \Leftrightarrow 1 m)	$\frac{T^2}{a^3}$ (en jours ² /ua ³)
Mercure	$5 \times 16 + ??6 = 86$	$0,73/2 = 0,37$	$86^2/0,37^3 = 1,5 \times 10^5$
Venus	$13 \times 16 + ?18 = 226$	$1,41/2 = 0,72$	$226^2/0,72^3 = 1,4 \times 10^5$
Terre	$22 \times 16 + 13 ! = 365$	1	$365^2/1^3 = 1,3 \times 10^5$
Mars	$43 \times 16 = 688$	1,5	$688^2/1,5^3 = 1,4 \times 10^5$
Comète	$75 \times 16 = 1200$	2,2	$1200^2/2,2^3 = 1,4 \times 10^5$

Remarque : Mesures délicates pour le demi-grand axe comète, et pour la période Mercure.

Conclusion : On trouve des valeurs proches. Les écarts sont dus à la difficulté des mesures des demi-grands axes et des périodes.

Défi 5 : Masse du Soleil ? À l'aide de mesures et de calculs, vérifier que la masse du Soleil est $M_S = 1,988 \times 10^{30}$ kg. On donne 1 u.a. = 149 597 870 km.

On prend $\frac{T^2}{a^3} = \frac{1,4 \times 10^5 \text{ jours}^2}{\text{ua}^3} = \frac{1,4 \times 10^5 \times (24 \times 3600)^2}{(149597870 \times 10^3)^3} = 3,1 \times 10^{-19} \text{ s}^2.m^3$

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_S}$$

$$M_S = \frac{4\pi^2}{\frac{G}{a^3} T^2}$$

$$M_S = \frac{4\pi^2}{\frac{6,67 \times 10^{-11}}{3,12 \times 10^{-19}}} = 1,9 \times 10^{30} \text{ kg}$$

$$\frac{1.4E5 * (24 * 3600)^2}{149597870E3^3} = 3.12161465E-19$$

Rep→A

$$\frac{4 * \pi^2}{\frac{6.67E-11}{A}} = 1.896071071E30$$

On trouve une valeur très proche de la masse théorique du Soleil.