
« ZONE DE SYMBIOSE » ENTRE MATHÉMATIQUES ET SCIENCES PHYSIQUES : LE CAS DE LA PROPORTIONNALITÉ POUR CONSTRUIRE LE CONCEPT DE SOURCE PONCTUELLE DE LUMIÈRE À L'ÉCOLE PRIMAIRE

Pierre FLEURY¹

Université de Bordeaux - INSPÉ Nouvelle Aquitaine, Laboratoire LACES (EA7437) - Axe IP

Résumé. Notre étude interroge l'intimité entre les deux disciplines mathématiques et sciences physiques à l'école primaire pour construire en optique le concept scientifique de source ponctuelle de lumière. En partant d'un évènement historique (la mesure de la hauteur de la pyramide de Khéops par Thalès), des élèves de cycle 3 ont recherché les conditions expérimentales pour lesquelles la proportionnalité entre les *hauteurs* de deux objets verticaux (bâton et pyramide) et les *longueurs* au sol de leur ombre portée était vérifiée. La modélisation conclut que si les hypoténuses des triangles d'ombres des deux objets verticaux sont parallèles alors les rayons lumineux issus de la source de lumière le sont aussi et réciproquement. Ceci identifie une des caractéristiques communes (que nous qualifierons « zone de symbiose ») aux deux concepts scientifiques en jeu dans cette étude, celui de source ponctuelle de la lumière et celui de proportionnalité. Les élèves auront pu enclencher la construction du concept physique (de source ponctuelle) en s'appuyant sur le concept mathématiques (de proportionnalité) en produisant des langages pour penser et communiquer (domaine 1 du socle).

Mots-clés. Concept scientifique, proportionnalité, source ponctuelle, « zone de symbiose », école primaire.

Introduction

L'enseignement des concepts scientifiques à l'école primaire est un défi permanent à relever. Certains sont concrets (lampe, bâton, pyramide) quand d'autres, moins immédiatement accessibles, sont abstraits (faisceau, ombre portée, proportionnalité). Cette différenciation concret/abstrait peut s'apparenter à l'approche catégoriel/formel suggérée par Lemaignan et Weil Barraix (1993). Dans la sphère des concepts, les abstraits sont les moins compréhensibles, comme en témoigne la difficulté immédiate à les définir, ce qui est le cas du concept de source ponctuelle. C'est la problématique majeure que nous travaillons dans cette étude, à savoir éprouver une stratégie didactique qui permette de pouvoir accéder à l'abstraction. Nous formulons l'hypothèse que l'accessibilité du concept abstrait de source ponctuelle chez les élèves sera facilitée grâce au concept de proportionnalité en mathématiques dans la mesure où ces deux concepts, bien qu'étant sur deux champs disciplinaires distincts, possèdent un caractère commun (dans le cas historique illustré), celui du parallélisme des droites en jeu, les hypoténuses des triangles d'ombres issus des objets verticaux d'une part et les rayons lumineux de la source d'autre part. Notre objectif est de parvenir à ce que les élèves réalisent que la lumière issue du point source placé à l'infini (source ponctuelle) peut être assimilée à un faisceau de rayons lumineux parallèles entre eux. Afin de provoquer l'émergence de cette caractéristique commune que nous qualifierons de « zone de symbiose » entre les deux concepts scientifiques, nous avons

¹ pierre.fleury@u-bordeaux.fr

exploité l'expérience menée en Égypte et attribuée à Thalès. Ainsi, les élèves ont été amenés à modéliser l'expérimentation et à en identifier la condition nécessaire sur la qualité de la source de lumière pour comprendre en quoi la mesure de ce fameux philosophe est scientifiquement recevable tout en s'appuyant sur le concept de proportionnalité. Nous présenterons notre expérimentation dans une première section puis, en nous appuyant sur les approches épistémologiques des deux concepts en jeu, nous analyserons les résultats obtenus à partir des productions des élèves en nous focalisant sur les éléments de langage qu'ils sont parvenus à mobiliser (MEN, 2023). Afin d'objectiver notre étude, nous nous aiderons de deux grilles heuristiques élaborées pour des élèves de cours moyens. La première est construite sous la forme d'une échelle à quatre paliers, et identifie ce qui peut être raisonnablement attendu en termes de production écrite, s'agissant des corrélations entre les deux concepts en jeu au sein de la « zone de symbiose ». La seconde grille sert à appréhender l'amorce de la construction du concept de source ponctuelle en sciences physiques et reprend l'échelle classique à quatre niveaux qui sont ceux de l'évaluation d'une compétence dans le premier degré. Notre intérêt principal réside dans l'analyse des productions langagières écrites des élèves afin d'apprécier en quoi le concept d'une discipline pourrait éventuellement concourir à la construction du concept d'une autre. Cette idée a été suggérée en tant que « pont » entre mathématiques et physique, avec la représentation graphique de la relation de proportionnalité (Baldy *et al.*, 2007, p. 81). Dans le cadre de notre étude, l'identité du « pont » est d'ordre épistémologique et nous la nommons « zone de symbiose » conceptuelle. Nous avons choisi le terme de « symbiose » par analogie avec le règne animal pour lequel l'association biologique entre deux organismes vivants est durable et réciproquement profitable.

1. Présentation de l'expérimentation

1.1. La situation d'apprentissage

Nous avons travaillé avec six classes de cours moyens deuxième année (CM2), soit 159 élèves au total, encadrés par trois enseignants professeurs des écoles maîtres formateurs au sein de la même commune à forte mixité sociale durant deux années scolaires (2021-2023) en période 5. Les élèves bénéficient de l'enseignement scientifique de manière régulière depuis plusieurs années selon la démarche par investigation. Les résultats scolaires aux évaluations nationales en mathématiques et en français sont dans la moyenne départementale pour chaque école. Le concept de proportionnalité a été abordé en classe avec le modèle rapport/proportions. Des problèmes nombreux et divers exploitant des tableaux de mesures d'une part, des coefficients de proportionnalité d'autre part jalonnent les cahiers d'exercices des six classes. Dans notre contexte expérimental, le problème posé traite des données de même nature (des longueurs) sans référence temporelle ce qui simplifie la situation (René de Cotret, 1991, p. 19). La séquence d'apprentissage² débute par la lecture silencieuse d'un texte fictionnel expliquant l'expérience historique de la mesure de Thalès. Il s'en suit un débat collectif rapide qui permet de stabiliser la situation à partir des éléments qui la composent (deux objets : un bâton et une pyramide tous les deux verticaux ; une mesure d'ombre portée au sol : celle de la pyramide réalisée par Thalès ; une donnée sur la hauteur du bâton ; une source de lumière). Les élèves sont alors répartis en petits groupes et sont invités à réaliser l'expérience à partir de matériel identique, à savoir, deux objets verticaux de hauteur différente dont celle de l'objet le plus petit est connue, une source de lumière et une règle graduée. Comme évoqué par Guedj (2013), la classe modélise la situation,

² La séquence d'apprentissage est inspirée de celle publiée (03/2005) sur le site de l'école des sciences de Bergerac https://www.ecole-des-sciences-bergerac.com/_files/ugd/7c7b52_565a21c905d54184abb4de9ef2a71e33.pdf

avec, faisant office de pyramide, un simple objet vertical (plutôt que de devoir construire l'édifice). Le problème à résoudre est de trouver sa hauteur sans passer par la mesure de contrôle direct.

1.2. L'expérimentation des élèves

Le matériel utilisé en classe

Nous présentons (cf. figures 1 et 2) le matériel qui a été manipulé. Ci-dessous, une source de lumière est posée sur la table (une glissière montée sur un bloc en PVC permet de faire varier la hauteur de la lampe). Les deux objets sont des cure-dents (leur aspect pointu facilite la précision des mesures) de hauteurs très différentes collés sur la base de demi-disques en liège.

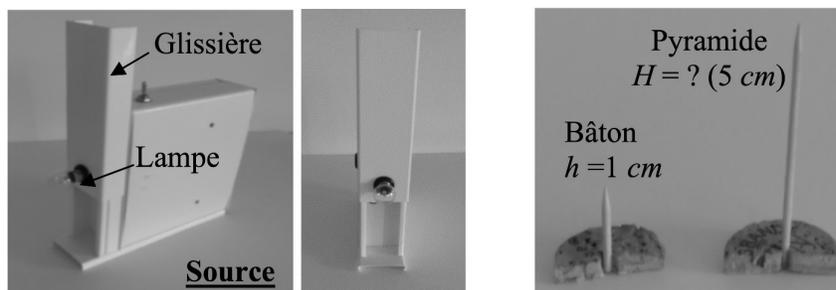


Figure 1 : La source de lumière (de profil et de face), les deux objets verticaux, bâton et pyramide.

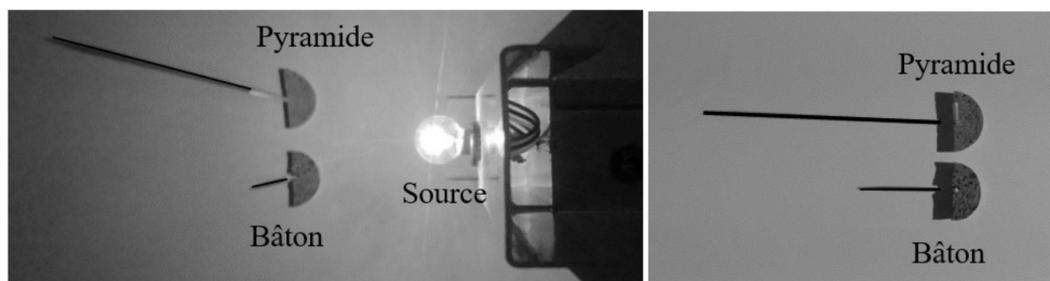


Figure 2 : La situation (vue de dessus) : à gauche dans le cas où les ombres portées des objets sont divergentes et à droite (avec zoom sur les objets) dans le cas où elles sont parallèles.

Quand la source de lumière est proche des deux objets, les ombres portées sont divergentes alors qu'elles sont parallèles dans le cas d'un éloignement suffisant ce qui correspond alors aux conditions nécessaires pour pouvoir utiliser le théorème de Thalès.

L'utilisation du matériel et premiers échanges maître/élèves

Les élèves, dans un premier, temps positionnent sur leur table la source de lumière et l'objet-bâton afin d'obtenir un rapport hauteur/longueur de son ombre portée égal à 1 (consigne donnée par le chercheur aux enseignants). Puis ils mesurent l'ombre portée de l'objet-pyramide faisant office d'édifice. Ils comparent leur mesure à celle de l'objet lui-même et s'étonnent de l'écart significatif que la plupart des groupes obtiennent³. Quelque chose ne fonctionne pas !! Nous donnons ci-dessous quelques extraits de verbatims⁴.

³ Cf. annexe pour les différents résultats des groupes d'une des classes.

⁴ PE : professeur des écoles / E5-1 : Première intervention de l'élève n° 5

- PE : *Bien donc voilà vos mesures des ombres des pyramides (Affichage des valeurs des différents groupes).*
- E1 : *On a pas tous les mêmes.*
- E2 : *La nôtre elle a un centimètre de plus que la vraie.*
- E3-1 : *Un écart de un centimètre c'est pas beaucoup.*
- PE : *Oui tu as raison, mais elle mesure combien votre pyramide.*
- E4 : *Elle fait 5.*
- PE : *Tu veux dire 5 cm, du coup cela fait 1 sur 5 pour cent.*
- E5-1 : *Donc un cinquième c'est 20 % ça fait trop c pas du tout précis alors.*
- E6 : *Et nous c'est plus que 1 cm on a fait avec la règle à partir du zéro c'était pas comme ça ?*

De nombreuses hypothèses sont formulées par les élèves — hypothèses qui ont trait aux dimensions des objets, aux épaisseurs, aux précisions des mesures. Ayant anticipé ces différentes pistes, les enseignants s'étaient entendus pour proposer de schématiser cette première expérience en vue de profil à l'échelle 1 sur une feuille de papier millimétré afin d'amener les élèves à représenter et comparer les deux triangles d'ombres⁵ obtenus au regard de la précision de la hauteur de l'édifice. Les paires de triangles d'ombres (un pour chaque objet) de chaque groupe sont alors affichées au tableau. Le parallélisme ou non des hypoténuses émerge rapidement ainsi que l'influence associée à l'éloignement de la source aux deux obstacles.

- PE : *J'ai pris en photo vos paires de triangles (Affichage dans le logiciel openboard).*
- E7 : *Ils sont tous rectangles en tout cas.*
- E8-1 : *C'est normal l'ombre elle est sur la table c'est perpendiculaire au bâton et la pyramide.*
- E9 : *Pourquoi tu as fait deux colonnes ?*
- PE : *Belle remarque la colonne de gauche j'ai regroupé les paires de triangles pour des mesures éloignées de celle de la pyramide et pour la colonne de droite on a les triangles pour les mesures les plus précises.*
- E8-2 : *D'accord mais pourquoi tu as mis les petits triangles dans les grands ?*
- PE : *Sans doute que je ne l'ai pas fait par hasard !*
- E10 : *Je sais pas c'est pour faire joli (rires).*
- E11 : *On dirait que les petits ils sont des grands, mais en plus petits.*
- PE : *Que veux-tu dire ?*
- E11-2 : *Et bien si tu l'agrandis ça va donner le grand.*
(L'enseignant utilise la fonction agrandissement et parvient à faire coïncider parfaitement les deux triangles).
- E12-1 : *Et si on fait pareil avec ceux de l'autre colonne ça va faire pareil.*
- PE : *Viens essayer.*
- E12-2 : *Non y a un écart avec le côté... c'est l'hypoténuse.*
- E9-2 : *J'ai compris à droite les côtés ils sont confondus, mais pas à gauche.*
- PE : *Bon du coup si on essaie de dire quelque chose pour reprendre la remarque de Théo sur les hypoténuses.*
- E13 : *Moi je crois que quand c'est précis donc c'est confondu pour les hypoténuses.*
- PE : *Est-ce que l'on pourrait utiliser un autre mot que « confondu » ?*
- E14 : *Superposé.*
- PE : *J'attends un mot que vous connaissez bien de la géométrie.*

⁵ Les deux côtés encadrant l'angle droit du triangle rectangle sont l'objet et son ombre portée au sol.

E15-1 : *C'est parallèle, les hypoténuses elles sont parallèles... Mais ça marche pas tout le temps c'est que quand on est au bout de table au début on avait les triangles à gauche (colonne) c'est quand on a reculé.*

PE : *Tu veux dire que la distance entre les objets et la source de lumière a de l'importance ?*

E15-2 : *Oui c'est ça ça se voit bien c'est pour ça que tu as fait deux colonnes à droite c'est précis et c'est parallèle et c'est plus loin.*

Cette phase est riche, cruciale et centrale pour que les élèves parviennent à produire du langage scientifique par la suite. Les usages numériques ont facilité les études comparées des paires de triangles d'ombres, car il a été possible de réaliser des superpositions, des déplacements, des agrandissements, des manipulations d'outils règle-équerre intégrés au logiciel⁶ pour vérifier le parallélisme. Ce débat collectif pivot de la séance interroge implicitement la *zone de symbiose* des deux concepts. Notre recherche tente d'évaluer la capacité des élèves à réinvestir par écrit ce sur quoi ils viennent de se mettre d'accord. Les groupes sont alors de nouveau invités à modéliser l'expérience et à comparer les résultats de la mesure de l'objet-pyramide dans le cas où la source est proche ou éloignée des objets et à comparer par ailleurs les deux paires de triangles d'ombres associés. La mutualisation qui s'ensuit confirme et débouche sur le consensus quant au lien causal entre éloignement de la source, proportionnalité entre hauteur/longueur, parallélisme des hypoténuses des triangles d'ombres, précision de la mesure, corrélation entre hypoténuses des triangles d'ombres et direction des rayons lumineux. Tous ces éléments de langages repérés comme essentiels ont été notés au tableau au fur et à mesure des débats. Ci-dessous, nous donnons deux paires de triangles réalisés par les élèves (*cf.* figures 3 et 4) pour les deux cas de figure où les rapports sont différents et égaux. Dans le premier cas, les hypoténuses des deux triangles rectangles (d'ombres) ne sont pas parallèles contrairement au second.

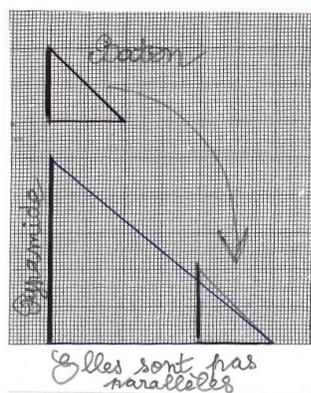


Figure 3 : Cas pour lequel les rapports hauteur/ombre portée sont différents et les hypoténuses non parallèles (ici, $L=6\text{ cm}$ et $H \neq L$).

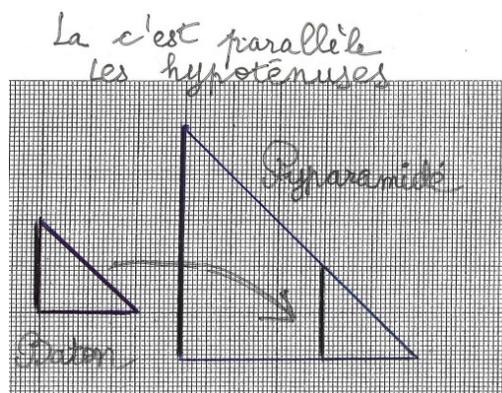


Figure 4 : Cas pour lequel les rapports hauteur/ombre portée sont égaux et les hypoténuses parallèles (ici, $L=H=5\text{ cm}$).

Derniers échanges lors de la mutualisation finale de la séance

PE : *Bien on s'est mis d'accord sur le lien entre la précision de la mesure et l'éloignement des objets avec la source maintenant je voudrais que l'on discute des orientations des côtés des hypoténuses ; à votre avis ces directions elles sont aléatoires ou pas ?*

E9-3 : *Aléatoires ça veut dire que c'est par hasard ?*

PE : *Cela signifie qu'elles auraient pu être très différentes et cela n'aurait rien changé.*

⁶ Openboard a été le logiciel exploité ici, avec ses outils associés.

E3-2 : *On dirait que ça va vers la lampe enfin à peu près.*

E5-2 : *En fait quand ça éclaire ça passe à ras.*

PE : *Qu'est-ce qui passe à ras et à ras de quoi ?*

E5-3 : *C'est la lumière elle passe pas dans le bâton ou la pyramide alors elle va juste à ras le sommet.*

PE : *D'accord la lumière rase les deux sommets et les hypoténuses elles correspondent à quoi en définitive ?*

E10-2 : *C'est la lumière c'est les droites de la lumière.*

PE : *Très bien on utilise un mot particulier pour nommer les droites qui composent la lumière est-ce que quelqu'un le connaît ?*

E9-4 : *Les rayons c'est les rayons.*

PE : *Oui et alors ils sont comment ces rayons quand ils arrivent sur le bâton et la pyramide ?*

E6-2 : *Ils sont comme les hypoténuses.*

E9-5 : *Parallèles, ils sont parallèles comme les hypoténuses.*

PE : *Bon on va récapituler tout ce que l'on a réussi à comprendre de cette expérience (l'enseignant note au tableau sous la dictée des élèves les différents éléments qui seront à mobiliser pour leurs écrits par la suite).*

La corrélation entre les hypoténuses et les trajectoires des rayons lumineux a pu émerger. Les directions parallèles des hypoténuses correspondent aux trajectoires des rayons lumineux issus de la source de lumière est une conclusion partagée.

2. Quelques outillages théoriques

2.1. La modélisation

L'expérimentation menée ici est une modélisation en ce qu'elle approche le réel tout en le simplifiant (Morge & Doly, 2013). La première et la dernière des trois suggestions portées par ces deux chercheurs pour que les élèves perçoivent les enjeux liés à l'utilisation des modèles en sciences : le lien Modèle - Réel (M-R) sont présentes sur notre situation.

- *Choisir une réalité directement perceptible.*

Les élèves peuvent, par observation directe, observer le lien de causalité qui existe entre l'évolution de la taille des ombres, leur orientation et la distance qui sépare les objets de la source de lumière.

En revanche le caractère rectiligne de la lumière demeure hypothético-déductif (Martinand, 1979) à partir de celui des hypoténuses des triangles rectangles en jeu.

- *Pouvoir utiliser plusieurs modèles pour représenter la même réalité.*

Nous avons décidé avec l'assentiment des élèves que construire des pyramides serait trop long et fastidieux et choisi d'avoir recours à un objet vertical de fine épaisseur afin de faciliter les mesures. Toutefois, cet objet ne trouvera pas d'utilisation différente très évidente sur d'autres situations de modélisation.

- *Considérer que l'existence d'un écart important entre modèle et réalité est une condition favorable à leur distinction.*

On pourra convenir qu'il est difficile d'assimiler un objet vertical de fine épaisseur avec une forme pyramidale. Toutefois, il reste opaque et d'une hauteur fixe et mesurable.

2.2. Lumière et représentations

De nombreux chercheurs ont pu montrer que la symbolisation de la propagation rectiligne de la lumière par une droite n'est pas acquise avec aisance chez les élèves (Guesne *et al.*, 1978 ; Kaminski, 1989). Dans leur étude sur la mesure de la hauteur du soleil, Merle et Meunier (2003) pointent également cette difficulté alors que le besoin de schématiser des situations de profil comme la nôtre peut faciliter la compréhension de l'objectif visé. Les formes rectilignes et des objets manipulés et des ombres portées sur la table auront favorisé la compréhension des schémas en vue de profil qui prennent l'apparence de triangles rectangles (*cf. supra* figures 3 et 4). En outre, dès le cycle 2, une étude réalisée sur le thème « Ombres et lumières » (Coda *et al.*, 1995, p. 86) montre qu'il est envisageable « [...] d'amorcer l'élaboration du modèle du rayon lumineux qui est le modèle de l'optique géométrique ». Le caractère rectiligne de la lumière est souvent observable au sein des ouvrages scolaires et de littérature de jeunesse avec des représentations très différentes. Nous donnons ci-dessous (*cf.* figure 5) quelques symbolisations tirées de la littérature.

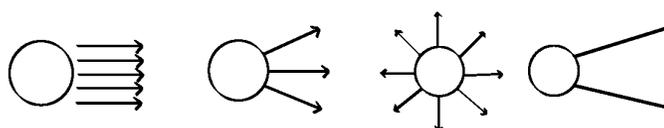


Figure 5 : Quelques symbolisations d'une source de lumière.

Certains symboles utilisent des flèches (rayons orientés), d'autres des cônes (faisceau) ; les trajectoires sont parfois divergentes, parfois parallèles. La diffusion dans l'espace est directionnelle ou sur 360° d'angle. Cette diversité dans la manière de schématiser la propagation de la lumière peut nuire à la compréhension du phénomène lui-même. Le caractère rectiligne de la propagation de la lumière était un pré requis pour les différentes classes ayant participées à notre étude, il l'était également dans celle travaillant sur la mesure du rayon de la Terre (Ératosthène) mené par de Hosson et Decamp (2011).

Nous allons maintenant présenter un outillage théorique sur les concepts scientifiques avant de l'appliquer aux deux concepts de notre étude (source ponctuelle et proportionnalité).

2.3. Les concepts scientifiques

Un concept pour outiller la pensée

Un concept scientifique se pose avant tout comme un outil qui permet de mieux percevoir le monde et ses caractéristiques, un outil de la pensée.

Si Barth (1987) indique que les concepts possèdent des identités communes (des attributs, des caractères communs), ce principe fondateur de tout concept scientifique semble convenir pour ceux de la vie quotidienne, comme « fruit », « sucre », ou encore « cube ». On peut alors effectivement identifier des récurrences pour chaque concept précité, un organe végétal contenant une ou plusieurs graines, une molécule chimique composée des éléments carbone, hydrogène et oxygène, un solide à six faces carrés égales. Cette approche peut fonctionner pour des concepts scientifiques simples et concrets, mais ne convient plus dès qu'ils deviennent abstraits comme pour les concepts d'énergie, de métamorphose, ou de translation.

Nous admettons qu'un concept scientifique doit pouvoir être défini de manière unanime en cela que sa définition est universelle avec des bords nets (Sallaberry, 2004). Vergnaud (1985), par ailleurs, suggère que tout concept scientifique est associé à un invariant, voire à un système

d'invariants qui lui donne une meilleure lisibilité même si cet invariant procédural est d'une autre nature.

On peut donc tenter de classer les concepts en différentes catégories (concrets vs abstraits). Mais on peut aussi tenter de les classer en fonction des invariants auxquels ils sont associés.

Le duo invariant-concept

L'idée selon laquelle un concept scientifique est lié à un invariant (ou à un système d'invariants) est tirée de la proposition de Vergnaud (*ibid.*) et importée dans le domaine des sciences physiques (Sallaberry, 2004). Celui-ci suggère en outre de différencier les concepts à partir de leur invariant et de leur caractère *statique* ou *dynamique* selon qu'ils émergent dans le fonctionnement (Sallaberry & Claverie, 2018, p. 27). Fleury (2012), reprenant la première suggestion, construit une catégorisation des invariants pour la discipline des sciences physiques. Cet auteur montre sur quelques concepts (élément chimique, pression) que faire émerger les invariants en situation d'apprentissage facilite la construction des concepts auxquels ils sont associés (Fleury, 2013a, 2015a, 2015c) et identifie trois catégorisations des invariants qu'il nomme par *collection*, *compensation*, *transformation*.

Pour le concept de *planète*, la forme de l'invariant sera dite *par collection*. L'invariant a un caractère *statique* (et non pas *dynamique* comme pour le concept de système solaire où les objets sont en rotation et/ou révolution avec un invariant qui émerge dans le fonctionnement). Ce concept de *planète* a été redéfini par l'UAI (Union Astronomique Internationale) en 2006 à Prague. Les attributs de sa collection sont au nombre de trois et ainsi énoncés :

- *est en orbite autour du soleil ;*
- *possède une masse suffisante pour que sa gravité l'emporte sur les forces de cohésion du corps solide et le maintienne en équilibre hydrostatique, sous une forme presque sphérique ;*
- *a éliminé tout corps susceptible de se déplacer au voisinage de son orbite.*

Nous verrons en détail dans la section suivante pourquoi le concept de source de lumière est également un concept associé à un invariant *par collection*.

Pour les concepts liés à un invariant *par compensation*, les systèmes en jeu (une balance, un objet posé sur un support, certaines transformations chimiques), sont soumis à des interactions contraires qui aboutissent à un équilibre (qui se compensent). Le principe de *compensation* se matérialise, pour rendre compte des interactions liées au système étudié, par une égalité mathématique qui peut être par exemple celle de deux produits (cas du concept de dilution en chimie), ou de deux rapports (cas du concept de pression en physique). Nous verrons en détails dans le chapitre suivant pourquoi le concept de proportionnalité peut être un concept associé à un invariant *par compensation*.

Pour les concepts liés à un invariant *par transformation*, « quelque chose se conserve malgré ses transformations ou bien qu'ayant subi des transformations, quelque chose s'est conservé ». C'est le cas du concept d'*énergie*. L'invariant ici a un caractère *dynamique*. Si une éolienne transforme utilement du travail mécanique (déplacement d'un fluide, de l'air ou de l'eau) en travail électrique, de l'énergie inutile est également produite (en particulier sous forme de chaleur due aux frottements des objets). Le bilan énergétique mis en jeu dans ce convertisseur reste néanmoins constant. On ne crée pas d'énergie, elle se conserve bien qu'elle se transforme ou, malgré ses transformations, elle se conserve. Là encore, l'invariant émerge dans le

fonctionnement des objets que l'on nomme « convertisseurs » comme, par exemple, un moteur, une lampe, une pile.

Voici (cf. tableau 1) un tableau inspiré par celui de Fleury (2019a) qui donne quelques concepts scientifiques classés au regard de leur *forme* et de leur *caractère* en sciences physiques.

		Caractère	
		Statique	Dynamique
Forme	Par collection	Planète - Source ponctuelle	Éclipse - Saison
	Par compensation	Pression - Dilution	Débit - Thermostat
	Par transformation		Énergie

Tableau 1 : Catégorisation de quelques concepts des sciences physiques en fonction du caractère et de la forme de son invariant associé.

3. Les concepts en jeu dans notre étude

3.1. Le concept de source de lumière

Les programmes du premier degré mentionnent de l'intérêt pour les phénomènes liés à la lumière dès la maternelle. On peut lire au sein du domaine 5 intitulé *Explorer le monde* dans la partie *Utiliser, fabriquer, manipuler des objets* (MEN, 2021) :

Les enfants ont besoin d'agir de nombreuses fois pour constater des régularités qui sont les manifestations des phénomènes physiques qu'ils étudieront beaucoup plus tard (la gravité, l'attraction entre deux pôles aimantés, les effets de la lumière, etc.).

Pour le cycle 2 (MEN, 2020) dans le volet 3 nommé *Questionner le monde*, plus précisément pour la partie *Questionner l'espace et le temps*, il est attendu de traiter le phénomène de « [...] l'alternance jour/nuit ».

Enfin, s'agissant du cycle 3 (MEN, 2023) dans le champ des *Sciences et technologie*, figure pour la partie *Signal et information* une thématique nommée explicitement *Lumière* au sein de laquelle il est noté :

Produire expérimentalement une ombre (déficit de lumière associé à une source) à l'aide d'un objet opaque et distinguer ombre propre et ombre portée. Observer, schématiser et nommer les phases de la Lune. Réaliser des ombres et associer leurs positions à celles de la source lumineuse et de l'objet opaque.

Nous positionnons notre étude en cycle 3 et souhaitons mettre à l'épreuve expérimentale des relations entre ombre portée et source lumineuse. Une source lumineuse émet de la lumière dans toutes les directions de l'espace. On distinguera deux catégories de source de lumière, les sources *primaires* et *secondaires*. Les premières pouvant émettre de la lumière par elles-mêmes (étoile, flamme, luciole), les secondes pouvant réémettre tout ou partie de la lumière qu'elles ont reçue (lune, ciel, table). S'agissant des sources primaires, on distinguera deux sous-catégories. Certaines seront dites *ponctuelles* (celles qui interrogent notre étude) quand les autres seront qualifiées d'*étendues*. Les premières sont suffisamment éloignées des objets qu'elles éclairent pour que les ombres portées produites soient nettes et sans pénombre, contrairement aux secondes. Le caractère « ponctuel » de la source se pose lorsque la dimension de la source devient assimilable à un point par rapport aux dimensions de l'objet qu'elle éclaire. Dans un tel cas, la source peut être alors considérée comme se situant « à l'infini ». La lumière émise peut

alors être modélisée par des droites parallèles (des rayons). Dans le cas d'une source étendue (insuffisamment éloignée de l'objet), la lumière émise sera modélisée par des droites qui divergent.

Selon la catégorisation des concepts (cf. partie 2.3., tableau 1), le concept de source ponctuelle est adossé à un invariant de forme *par collection* de caractère *statique*. Les attributs de la collection de ce concept, pour des élèves de l'école primaire, peuvent se limiter aux deux suivants :

- *émet de la lumière par elle-même*⁷ ;
- *est assimilable à un point le quel, s'il est suffisamment éloigné de l'objet qu'elle éclaire, émet de la lumière modélisable par des lignes (rayons) parallèles.*

L'éloignement de la source à l'objet éclairé et le parallélisme des rayons sont indissociables dans le cas de la modélisation réalisée par les élèves. Nous interrogeons leur capacité à identifier plus particulièrement le second attribut d'une source ponctuelle, à savoir que les rayons qu'elle émet et qui parviennent au contact des objets sont parallèles entre eux dans le cas où source et objet sont éloignés.

3.2. Le concept de proportionnalité : cadre de référence

Le concept de proportionnalité est un incontournable des cycles 3 et 4 (MEN, 2020). Il y est mentionné — pour les cours moyens et la sixième — au sein de toutes les parties du programme (*Nombre et calculs, Grandeurs et mesures, Espace et géométrie, Croisement entre enseignements*). Il est suggéré de travailler avec des activités spatiales et géométriques avec des réinvestissements dans d'autres disciplines. On retrouve dans la partie *Modéliser* : « *Reconnaître et distinguer des problèmes relevant de situations additives, multiplicatives, de proportionnalité* » (*ibid.*, p. 90) et avec une partie dédiée nommée *Proportionnalité* : « *Reconnaître et résoudre des problèmes relevant de la proportionnalité en utilisant une procédure adaptée : propriétés de linéarité (additive et multiplicative), passage à l'unité, coefficient de proportionnalité* » (*ibid.*, p. 94) et « *Identifier une situation de proportionnalité entre deux grandeurs à partir du sens de la situation. Résoudre un problème de proportionnalité impliquant des grandeurs* » (*ibid.*, p. 96).

Au cycle 4, le concept est un attendu de fin de cycle du thème 2 : *Organisation et gestion de données, fonctions* : « *Résoudre des problèmes de proportionnalité* » (MEN, 2020, p. 132).

Ce concept a été défini de plusieurs manières, dont :

Deux suites de nombres qui se correspondent un à un sont proportionnelles lorsque les rapports de deux nombres correspondants sont égaux (Philippe & Dauchy, 1920).

On observera, comme le fait remarquer très justement Simard (2012), que cette approche fait l'impasse sur le couple $(0,0)$ — ce qui n'est pas sans être une source de difficulté chez les élèves (Oliviera, 2008) —, qu'il soit intégré dans un tableau de données ou solution de l'équation d'une droite passant par l'origine.

Pour sa part, Hersant (2001, p. 28) réalise une analyse mathématique du concept de proportionnalité pour les situations d'enseignement en mettant en évidence que :

La proportionnalité est d'abord une relation particulière entre des grandeurs que l'on peut traduire par une relation entre les valeurs de ces grandeurs, puis par une relation entre deux suites

⁷ Cet attribut est un prérequis dans le cadre de notre étude.

numériques via les mesures de ces grandeurs. La proportionnalité entre deux grandeurs peut s'appréhender en utilisant le modèle des proportions ou celui de l'application linéaire.

Les termes *extrême-moyen* pour le modèle « rapports/proportions » qui définissent les valeurs des deux rapports en jeu d'une part sont alors introduits (*ibid.*, p. 21) ainsi que les termes *image-antécédent* pour le modèle « application linéaire » identifiant les valeurs des couples de points solutions de l'équation affine, s'agissant du concept de proportionnalité que deux modèles possibles sont exploitables tout en étant complémentaires. Nous résumons dans le tableau 2 ce qui leur est commun et par quoi ils se distinguent. Notre étude étant positionnée à l'école primaire, le modèle « rapports/proportions » sera celui exploité.

	<i>Principe</i>	<i>Points communs</i>	<i>Différences</i>
Modèle « rapports/proportions »	Conservation des rapports et propriétés des proportions	Coefficient de proportionnalité Propriété de linéarité	Rapport, proportion, extrême et moyen
Modèle « application linéaire »	Linéarité et propriétés de l'application linéaire		Application et fonction linéaire, image et antécédent

Tableau 2 : Comparaison entre les deux modèles associés au concept de proportionnalité.

Nous n'avons pas la prétention de positionner le concept de proportionnalité lié au champ des mathématiques au sein de notre catégorisation des concepts des sciences physiques. Un travail spécifique des didacticiens des mathématiques pourrait consister à identifier une catégorisation propre à leur discipline. Pour autant, si nous devons nous autoriser à porter au débat les caractéristiques du concept de proportionnalité, nous dirions en l'état que l'invariant qui pourrait lui convenir au mieux serait celui de forme *par compensation* à caractère *statique* (peut-on le considérer comme *dynamique* dans le cas de notre expérimentation ?). En reprenant le modèle « rapports/proportions » par exemple, le concept émerge dans l'égalité de deux rapports (ou de deux produits : « produits en croix »). En effet, les deux rapports extrêmes/moyens sont égaux (se compensent) tout comme le produit des extrêmes est égal (compensé) par le produit des moyens.

3.3. La symbiose disciplinaire

*L'expérience historique de Thalès de Milet*⁸

On parle souvent de l'expérience historique de Thalès quand Brousseau (1995, p. 32) utilise le terme de légende. Le théorème qui porte le nom de ce philosophe pourrait effectivement dater de cette époque à en juger par sa période de parution (200 ans plus tard environ) dans les éléments d'Euclide. Brousseau (*ibid.*) nous explique que la mesure de la pyramide avec l'aide d'un bâton vertical impose que le calcul ait été fait dans des conditions très particulières d'orientation de l'édifice, sans quoi la mesure semble plus compliquée. Dans l'absolu, la mesure est réalisable quelle que soient les conditions à partir du moment où l'on parvient à identifier la position du centre de la base pyramidale. L'auteur mentionne que l'ombre portée de la pyramide doit être un triangle isocèle et que cela oblige néanmoins à prendre pas moins de cinq mesures ! Dans son article, il suggère une seconde méthode, pour laquelle il faut faire coïncider les sommets des deux ombres des deux objets (bâton et pyramide) ce qui, en s'appuyant sur une figure géométrique simple, permet d'obtenir la hauteur du monument avec seulement deux mesures. On obtient alors une égalité de deux rapports : les deux mesures et les deux hauteurs du bâton et de

⁸ Ancienne cité Grecque d'Ionie aujourd'hui située sur la côte sud-ouest de la Turquie.

la pyramide (ibid, p. 34). De nombreux ouvrages scolaires mettent en scène cette expérience (cf. figure 6) en vue de profil (en coupe), ce qui ne permet pas d'apprécier les contraintes d'orientation de la pyramide. Les ombres portées du bâton de hauteur h et de la pyramide de hauteur H ont des longueurs au sol respectivement de longueur ℓ et L . On peut alors écrire $\frac{\ell}{h} = \frac{L}{H}$.

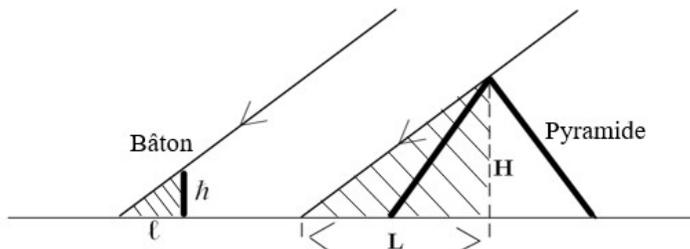


Figure 6 : Représentation de profil de l'expérience de Thalès (sont hachurés les deux triangles d'ombres).

Afin de pouvoir concevoir la manière d'appréhender la situation, il faudrait utilement travailler la schématisation (cf. figure 7) qui reprend la condition évoquée par Brousseau (cf. supra) selon laquelle l'ombre portée de la pyramide réalise au sol un triangle BDF isocèle (on a alors $\ell = EF$ et $L = AF$). On peut alors écrire que $EF/h = AF/H$ (on accède à AF en ajoutant à CF la longueur AC de la demi-base de la pyramide).

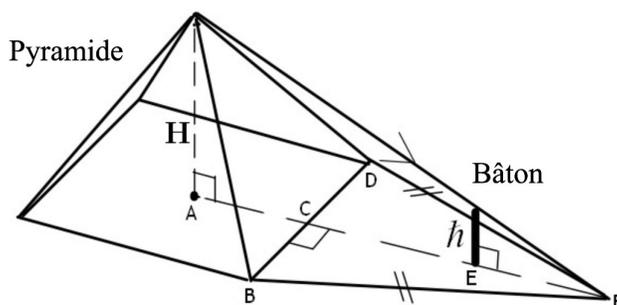
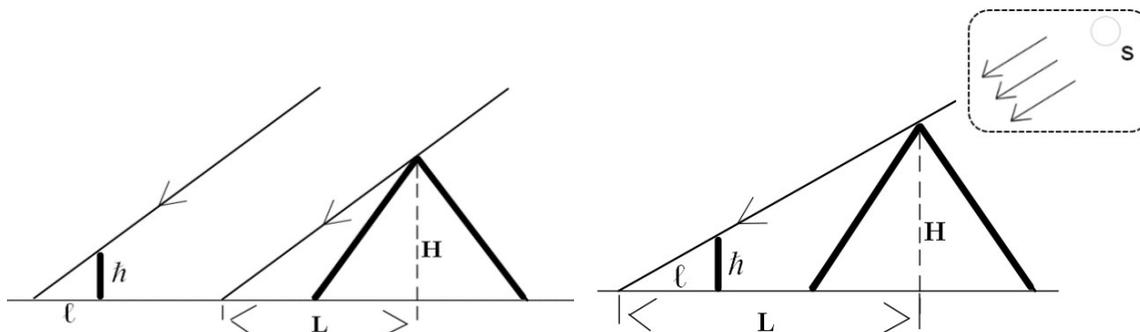


Figure 7 : Représentation en perspective de l'expérience de Thalès.

L'interrelation entre les mathématiques et les sciences physiques



Figures 8a et 8b : Schématisations explicites du parallélisme des rayons lumineux mis en scène avec des rayons bien distincts (figure du haut) auquel est ajouté le symbole du soleil (S) (figure du bas) assimilable à un point situé à l'infini.

Nous abordons ici le lien scientifique entre les deux concepts de *proportionnalité* et de *source ponctuelle* de lumière. Pour qu'une source de lumière soit qualifiée de ponctuelle, il faut que les rayons qu'elle émet et qui parviennent sur l'obstacle soient parallèles entre eux. Or ce parallélisme est une condition obligatoire pour obtenir les rapports/proportions équivalents pour le concept de proportionnalité dans l'expérience de Thalès, sans quoi point de mesure possible pour la pyramide. Quand on représente la situation expérimentale de la mesure de l'édifice, la première schématisation (cf. figure 8a) fait clairement apparaître les rayons parallèles en jeu alors que la seconde représentation (cf. figure 8b) donne cette information de manière indirecte dans la mesure où les rayons sont confondus (non dissociés). Certaines représentations plus naïves donnent aussi des schémas dans lesquels le soleil (S) émet un faisceau de rayons parallèles livrant par cette symbolisation l'information capitale (ajout du cadre en pointillés sur la figure 8b). Comme l'indique de nouveau Brousseau (*ibid.*) à propos de la mesure réalisée par Thalès :

Le soleil est indispensable comme sommet du faisceau de parallèles (pas visible, car le parallélisme des rayons n'a rien d'un modèle spontané) qui objective le plongement dans un même espace du petit et du grand. L'instrument mathématique principal du théorème reste étrangement l'élément le plus caché : le parallélisme de ces plans et de ces droites ou de ces rayons n'est même pas évoqué (Brousseau, 1995, p. 34).

Nous arrivons désormais au cœur de notre étude qui est de corréler les conditions scientifiques de cette expérience afin de construire une relation symbiotique des deux concepts. La « zone de symbiose » (cf. figure 9) est le parallélisme des rayons lumineux, conditionnant en mathématiques pour le concept de *proportionnalité* l'égalité des rapports [hauteur-longueur], et pour le concept des sciences physiques un attribut essentiel de l'invariant *par collection* du concept de *source ponctuelle*.

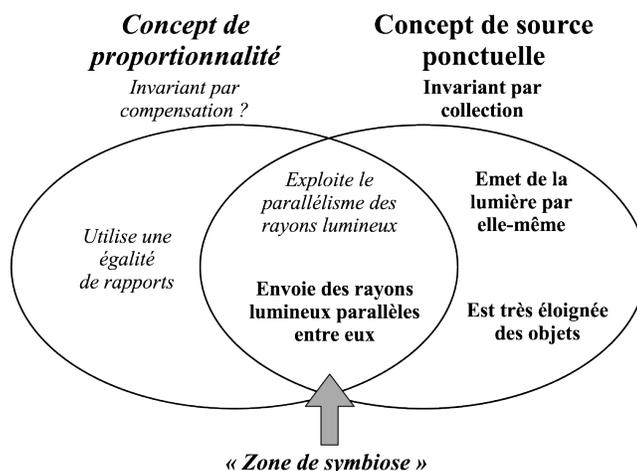


Figure 9 : Interrelation entre les deux concepts de proportionnalité et de source ponctuelle avec la « zone de symbiose » correspondante (pour le cas de l'expérience historique de Thalès).

Le langage scientifique pour penser et communiquer

Vygotsky (1985) convoque le langage en tant qu'outil de la pensée. La narration est le processus de construction de la science (Bruner & Bonin, 1996, p. 157). Léna (2012) prône que l'enseignement scientifique soit articulé autour de quatre fondamentaux de l'école du XXI^e siècle, à savoir : « Lire, écrire, compter, raisonner ». Pour ces auteurs, sciences et langages sont indissociables. Afin de pouvoir observer le niveau de compréhension de la « zone de

symbiose » chez les élèves, nous nous appuyerons sur leur production écrite à l'issue de l'expérience. Nous tenterons de mettre en correspondance leur conclusion avec l'appui d'une grille non tautologique qui rende compte du niveau des productions écrites. Pour ce faire — comme pour toute évaluation —, nous partons de la *tâche parfaite* (ce qui nous semblerait correspondre au plus haut niveau de compréhension exprimée par un élève de cycle 3). Nous exprimons ci-dessous différentes formulations qui rendent compte scientifiquement des relations entre les deux concepts qu'il est envisageable de construire à l'issue de la modélisation.

Si l'on réalise le bilan de ce qui pourrait être produit, nous pouvons identifier :

- une expression de causalité (par exemple : « Si ..., alors ... ») qui nous semble la plus simple d'accès ;
- quatre observations qui sont potentiellement reliées entre elles deux à deux :
 - (1) rapports proportionnels entre les ombres portées des deux objets verticaux et leur hauteur,
 - (2) parallélisme des hypoténuses des triangles d'ombres,
 - (3) éloignement de la source aux obstacles,
 - (4) rayons parallèles émis par la source.
- l'écriture d'une affirmation, de sa réciproque ou de sa contraposée⁹.

Afin de différencier les différentes productions écrites, nous utilisons le codage F_{12} qui représente une formulation, dont la cause est (1) et l'effet (2), *si les rapports hauteur-longueur des ombres portées de deux objets verticaux sont proportionnels alors les hypoténuses des triangles d'ombres sont parallèles*, sa réciproque F_{21} , *si les hypoténuses des triangles d'ombres sont parallèles alors les rapports hauteur-longueur des ombres portées de deux objets verticaux sont proportionnels* et sa contraposée F'_{12} , *si les rapports hauteur-longueur des ombres portées de deux objets verticaux ne sont pas proportionnels alors les hypoténuses des triangles d'ombres ne sont pas parallèles*. On obtient donc vingt-quatre formulations possibles pour six jeux de cause à effet soit douze formulations et leur réciproque codées ci-dessous (cf. figure 10).

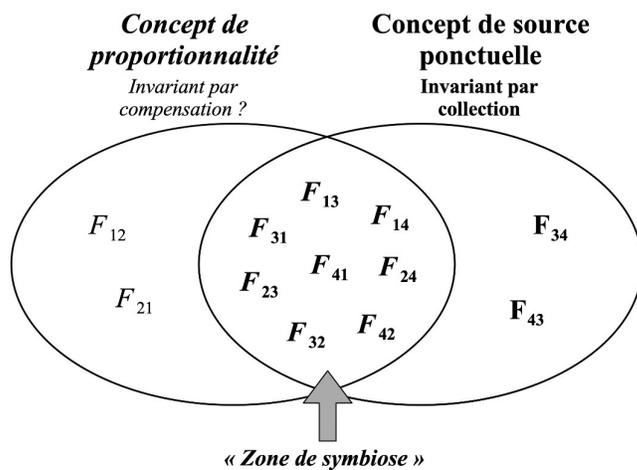


Figure 10 : Bilan de l'ensemble des différentes formulations possibles et de leur réciproque (les contraposées ne sont pas représentées ici).

⁹ L'implication « $A \Rightarrow B$ » est équivalente à l'implication « $\text{non } B \Rightarrow \text{non } A$ » qui est sa contraposée.

Dans un second temps, une définition du concept de source ponctuelle de lumière pourra alors émerger en exploitant plus particulièrement l'observation (4). L'observation (3) vient en appui pour consolider la définition.

Nous retiendrons par conséquent pour définir le concept :

Une source de lumière sera qualifiée de ponctuelle si elle émet des rayons lumineux parallèles entre eux tout en étant éloignée de l'objet qu'elle éclaire (on notera qu'il existe aussi la réciproque et la contraposée).

4. Méthodologie et résultats

4.1. Méthodologie

À l'issue du consensus qui finalise la séance, l'enseignant demande aux élèves de rédiger des conclusions qui permettent de faire des liens avec les différentes observations. Chaque élève, durant un quart d'heure, est donc invité à produire des écrits courts et intermédiaires qui seront débattus par la suite. Une feuille de format A5 est distribuée à chaque élève. Aucune donnée n'est à leur disposition, ils se retrouvent « seuls » face à leur document A5, les paires de triangles d'ombres ont été ramassées, l'écran du vidéoprojecteur est éteint, aucune expression des quatre observables n'est accessible. Dans un second temps, l'enseignant demande aux élèves de donner une définition d'une source ponctuelle de lumière. Ils ont de nouveau dix minutes pour rédiger leur réponse dans les mêmes conditions organisationnelles.

4.2. Deux grilles pour évaluer les productions des élèves

Nous avons élaboré une grille d'évaluation (cf. tableau 3) des productions écrites des élèves à partir des éléments constitutifs des formulations qu'il est *a priori* possible de construire. La grille donne des exemples tirés du corpus de niveaux de langage scientifique atteints par l'élève. Les critères retenus se basent sur les quatre éléments identifiés par les observations lors de la modélisation (cf. partie 3.3. Le langage scientifique pour penser et communiquer).

<i>Niveau</i>	<i>Critères</i>	<i>Exemples (sic)</i>
1	Pas de formulation conditionnelle Aucun des éléments attendus.	<i>Quand on met la lumière loin on a du mal à faire la mesure / La pyramide il faut la mettre à côté du bâton.</i>
2	Un seul des quatre éléments attendus sans formulation conditionnelle.	<i>La mesure est plus précise quand les triangles d'ombres ont les hypoténuses parallèles / On doit obtenir des rapports égaux pour les longueurs et les hauteurs / On trouve la hauteur quand la lampe est plus loin.</i>
3	Deux des quatre éléments attendus sans formulation conditionnelle.	<i>On a éloigné la source pour que les hypoténuses quand on les trace deviennent parallèle / Les bons rapports ça va avec les hypoténuses qui sont parallèles / Les rayons sont parallèles avec les hypoténuses des triangles.</i>
4	Deux des quatre éléments attendus avec formulation conditionnelle.	<i>Si les hypoténuses sont parallèles alors c'est que la lumière est au bout de la table loin de la pyramide / Si les rayons sont parallèles alors les hypoténuses des triangles d'ombres aussi / On obtient les bons rapports seulement si la source est loin / Plus la source est éloignée et plus les rapports sont les mêmes.</i>

Tableau 3 : Grille d'évaluation du niveau de construction du langage scientifique des élèves pour un critère donné et exemples de productions associées

Ces écrits peuvent être considérés comme des écrits intermédiaires (Chabanne & Bucheton, 2000) dans le sens où ils se situent à l'interface entre des « [...] brouillons et des formes dignes de conservation. » (p. 2). Vérin (1995, pp. 21 et 24) parle d'« écrits de travail » qu'elle qualifie de courts et légers. Dans notre cas de figure, les écrits attendus sont des phrases qui utilisent des implications. Elles peuvent être considérées comme des hypothèses, aussi, le terme léger ne semble pas approprié sur notre terrain cognitif. Ces écrits doivent servir l'étape suivante. En effet, nous nous intéressons particulièrement à la manière dont les élèves, *in fine*, vont enclencher la définition scientifique du concept de *source ponctuelle*, ce qui nous amène à penser une seconde grille pour objectiver leur performance. En effet dans ce cas l'élément (4) doit être obligatoirement présent au même titre que celui de l'éloignement de l'objet (élément (3)).

Nous donnons la définition d'une source (primaire) ponctuelle de lumière en des termes accessibles qui peut être retenue pour des élèves de cycle 3 : « Une source de lumière est ponctuelle si elle émet des rayons parallèles en étant éloignée de l'objet qu'elle éclaire ». Le caractère émission par elle-même n'est pas attendu ici. On rappelle que l'idée d'éloignement, bien qu'attendue, demeure relative car la relation dimensionnelle entre source et objet peut amener à qualifier de ponctuelle ou d'étendue une même source. On ne retiendra pas non plus pour caractériser le concept la netteté de l'ombre portée ou l'absence de pénombre car ces observations relèvent de l'effet et non de la cause. La grille d'évaluation pour la définition du concept de source ponctuelle est donnée (*cf.* tableau 4), elle reprend donc les deux attributs retenus liés à l'invariant *par collection*, à savoir le parallélisme des rayons et celui de son éloignement à l'objet éclairé.

Notre étude se focalise sur l'identification au sein des écrits des élèves de l'attribut majeur du concept de source ponctuelle à savoir celui lié au parallélisme des rayons lumineux issus de la source lequel participe à la « zone de symbiose ». Le caractère étendu d'une source pourra faire l'objet d'un apprentissage lors d'un prolongement. Notre grille fait correspondre les critères associés aux observables (attendus) et à une échelle d'acquisition classique (Non acquis (NA) / En cours d'acquisition (ECA) / Acquis (A) / Dépassé (D)).

<i>Critères</i>	<i>Observables</i> Exemples (sic)	<i>Échelle</i>
Absence du parallélisme des rayons et éloignement de la source aux objets.	<i>Une source ponctuelle on l'utilise pour mesurer la pyramide.</i>	NA
Présence de l'un des deux critères : Éloignement des objets présents ou parallélisme des rayons.	<i>La source doit être loin des objets.</i> <i>La source elle envoie des rayons parallèles.</i>	ECA
Présence des deux critères : Parallélisme des rayons présent et éloignement de la source.	<i>Une source ponctuelle doit avoir ses rayons parallèles et aussi il faut qu'elle est loin de l'objet.</i>	A
Parallélisme des rayons, éloignement de la source et réciproque (ou contraposée) évoquée.	<i>Quand la source a ses rayons parallèles alors elle se trouve loin de la pyramide elle est ponctuelle et le contraire c'est vrai aussi.</i>	D

Tableau 4 : Grille d'évaluation pour déterminer le niveau de construction de la définition du concept de source ponctuelle de lumière.

4.3. Corpus de données

Notre corpus est constitué de plusieurs supports. Nous avons l'ensemble des fiche A5 de chaque élève soit 159 au total avec les écrits intermédiaires d'une part et les définitions du concept de source ponctuelle d'autre part. Par ailleurs, les séances ont été enregistrées en vidéo et audio nous permettant d'exploiter les verbatims issus des conversations des différents débats collectifs qui ont pu illustrer nos propos précédents (cf. parties 1.2., *L'utilisation du matériel et premiers échanges maître/élèves* et *Derniers échanges lors de la mutualisation finale de la séance*). Nous donnons dans les figures 11, de haut en bas, des exemples de productions pour la mise en lien des données qui illustrent les niveaux 1, 3 et 4 puis des exemples de productions pour la tentative de définition du concept de source ponctuelle qui illustrent les trois niveaux NA, ECA, et A.

On trouve la hauteur quand la lampe est plus loin
« On trouve la hauteur quand la lampe est plus loin »

Les rayons sont parallèles avec les hypoténuses des deux triangles
« Les rayons sont parallèles avec les hypoténuses des deux triangles »

Si les rayons sont parallèles alors les hypoténuses des deux triangles aussi
« Si les rayons sont parallèles alors les hypoténuses des deux triangles aussi »

La source doit être éloignée des deux objets
« La source doit être éloignée des deux (obj) objets »

Une source ponctuelle c'est quand on peut mesurer la pyramide.
« Une source ponctuelle c'est quand on peut mesurer la pyramide »

La source elle sera ponctuelle si elle envoie des rayons parallèles et si elle est loin aussi.
« La source elle sera ponctuelle si elle envoie des rayons parallèles et si elle est loin aussi. »

Figures 11 : Exemples de productions (trois premières) pour la mise en lien des données liées à la modélisation et exemples de définitions (trois dernières) d'une source ponctuelle de lumière.

4.4. Présentation des résultats et analyse

Les niveaux atteints par les élèves

Les deux grilles (cf. tableau 4 et figure 11) que nous utilisons pour rendre compte de nos résultats sont pensées à partir d'une trilogie classique (critères - observables - échelle).

Nous présentons les résultats des élèves s'agissant de leur capacité à tisser des liens causes/effets à partir des éléments identifiés lors de l'étape de mutualisation qui fait suite à la modélisation. Chaque document (format A5) fait l'objet d'une lecture fine afin de déceler chaque cause ou effet ainsi que chaque expression relevant d'un connecteur causal (Si ..., alors ; Plus ..., plus ; Plus ..., moins, etc.) qu'il est possible d'associer à une tentative d'explication, un raisonnement, une amorce d'hypothèse, voire une hypothèse proprement dite (Fleury, 2012, p. 127).

À partir de ces données tirées de notre corpus, nous pouvons alors distribuer (cf. figure 12) l'échantillon au sein de la grille élaborée que nous avons présentée dans laquelle des exemples de productions illustrent certains des niveaux atteints par les élèves (cf. tableau 3 et figures 11). Nous précisons enfin que les différents positionnements des élèves sur les niveaux de ces deux grilles ne différencient pas, pour un écrit donné, une phrase de sa réciproque ou de sa contraposée. Les trois formes différentes d'écritures aboutissent donc au même niveau final.

Une faible proportion des élèves (19/159), soit environ 12 %, ne mobilise aucune des observations identifiées par la classe au cours du débat collectif, sans pour autant être en dehors du sujet ; ils évoquent la plupart du temps des éléments liés à la manipulation proprement dite en décrivant les objets, en rapportant un geste particulier, en comparant des mesures. À l'opposé, un cinquième des sujets (20 %) rédige un écrit qui exploite un lien causal (majoritairement avec *si* ..., *alors* pour les trois quart et quelques *Plus* ..., *plus* pour un quart) tout en parvenant à relier deux observations parmi les quatre possibles. Ce sont donc plus des deux tiers des élèves (68 %) qui spontanément repèrent un observable (10 %) voire deux (58 %) mais sans pour autant élaborer un écrit qui intègre l'idée du conditionnel entre événements liés à l'observation.

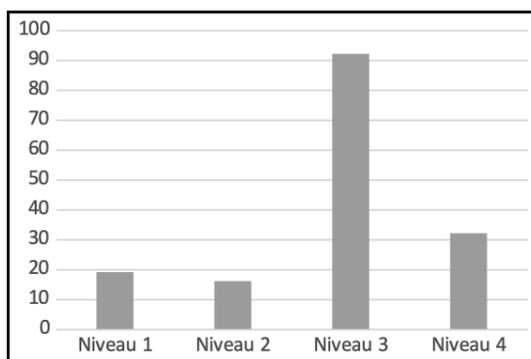


Figure 12 : Bilan des niveaux de langages atteints par les élèves.

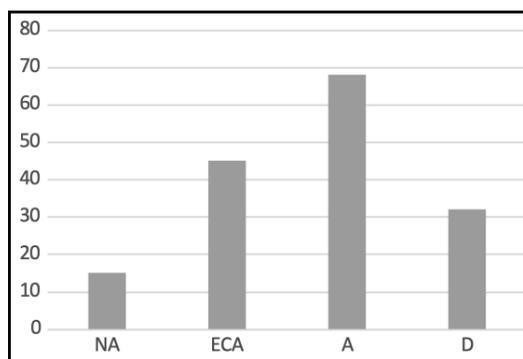


Figure 13 : Bilan des niveaux de construction du concept de source ponctuelle.

Nous poursuivons la présentation des résultats liés au concept de source ponctuelle s'agissant de l'idée que se font les élèves de sa définition. Pour cela, nous exploitons notre seconde grille (cf. tableau 4), pour laquelle des exemples de niveaux d'acquisitions parmi les productions des élèves ont été sélectionnés — afin de positionner la cohorte au regard des critères retenus (cf. figure 13). Si plus de 7 élèves sur 10 (113/159) des rédacteurs ont enclenché la définition (ECA et A), ce sont tout de même environ 20 % d'entre eux qui se hissent au niveau D pour moins de 1 % qui n'ont pas acquis l'objectif visé. L'acquisition (A et D cumulés) proprement

dite de la définition concerne *in fine* 62 % des élèves. Nous notons que parmi les 28 % des élèves qui se positionnent sur le niveau ECA, la moitié lie le concept de source ponctuelle à l'observable « éloignement de la source », ce qui, dans le contexte expérimental, renvoie à un geste effectivement réalisé par les élèves et qu'ils considèrent logiquement comme important dans cette modélisation (le soleil doit être éloigné de la pyramide et du bâton). En intégrant ces élèves dans la sphère de ceux qui auront identifié l'invariant *par collection*, ils représentent donc environ les trois quarts de la cohorte (76 %). Cette propension majoritaire et spontanée chez les élèves à vouloir tisser des liens entre les observables est un indicateur intéressant de leur implication sur le sujet alors que la consigne qui leur avait été donnée n'était pas explicite sur ce point : « Vous allez écrire tout ce que vous voulez sur notre expérience en utilisant ce que nous avons pu observer ».

Quid de la « zone de symbiose » ?

Nous avons réparti les écrits des élèves (*cf.* figure 14) en fonction des observables mobilisés selon la codification établie (*cf.* partie 3.3. Le langage scientifique pour penser et communiquer)¹⁰, rendant compte ainsi des différentes filiations cognitives des élèves.

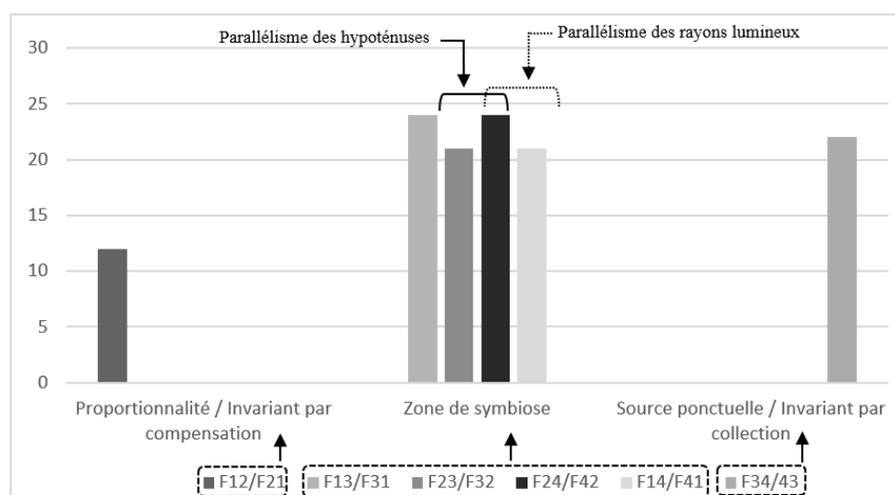


Figure 14 : Répartition des duos d'observables au sein de la cohorte des élèves ($N=124$) en fonction du concept concerné.

Ceux positionnés aux niveaux 1 ($N=19$) et 2 ($N=16$), pour lesquels aucun duo d'observable n'a été utilisé, ne font donc pas partie de cette répartition¹¹. Ainsi, un peu moins de 8 % des productions sont focalisées uniquement sur les observables du concept de proportionnalité (F_{12}/F_{21}), ce sont moins du double (14 %) qui le sont sur les seuls observables du concept de source ponctuelle (F_{34}/F_{43}). La « zone de symbiose » est majoritairement investie par la cohorte (proche des trois cinquièmes). La distribution des écrits s'y organise en quatre blocs sans que l'un prenne le pas sur les autres pour le même ordre de grandeur ($N=24; 21; 24; 22$). Trois d'entre, eux sous les indices 2 et 4 (F_{14}/F_{41} , F_{24}/F_{42} , et F_{23}/F_{32}), abordent l'attribut (le gène) commun aux deux concepts (le parallélisme des droites) et l'on note que celui-ci est mis en lien (

¹⁰ Pour rappel, les indices associés aux observables sont 1 : égalités des rapports de longueurs ; 2 : hypoténuses parallèles ; 3 : éloignement des objets ; 4 : rayons lumineux parallèles.

¹¹ Nous donnons pour autant les pourcentages de cette analyse en fonction de la cohorte complète ($N=159$).

F_{24}/F_{42}) pour 15 % des élèves. Notons enfin que les élèves ont investi les observables identifiés par les indices 1 à 4 dans les proportions approchées suivantes : 47 %, 46 %, 54 % et 54 %. Les deux indices 3 et 4 majoritairement utilisés sont ceux liés au concept d'optique (éloignement des objets et rayons parallèles), ce qui peut s'expliquer par la manipulation expérimentale proprement dite pour l'indice 3. En effet, c'est en faisant varier la distance entre les deux objets verticaux et la source que l'orientation des hypoténuses change et que la proportionnalité émerge. En revanche, pour l'indice 4, qui est bien investi dans les écrits des élèves, cela peut venir aussi du fait qu'il a été mis en évidence en fin de débat collectif et qu'il a bénéficié d'un effet mnésique.

Il nous apparaît intéressant de rechercher des liens éventuels entre toutes ces données, niveaux de productions et de définition d'une part et le choix des observables d'autre part. Le tableau 5 ci-dessous livre cette information. En colonne, on retrouve les différentes formes de productions liées aux observables, en ligne le niveau atteint de la définition du concept de source ponctuelle et dans chaque case la notation x^y , où x représente l'effectif et y le niveau de construction du langage scientifique atteint. Ainsi, à titre d'exemple, on observe que, sur les trente-cinq élèves qui n'ont pas investi d'observables attendus (colonne de gauche du tableau), dix-neuf sont positionnés sur le niveau 1, et seize sur le niveau 2. Dix d'entre eux n'ont pas acquis le concept de source ponctuelle (NA), vingt et un sont en cours d'acquisition (ECA) et quatre ont le niveau acquis (A), quand aucun n'atteint le niveau dépassé (D).

	/	F_{12}/F_{21}	F_{13}/F_{31}	F_{23}/F_{32}	F_{24}/F_{42}	F_{14}/F_{41}	F_{34}/F_{43}	Total
NA	10^1	3^3		2^3				15
ECA	5^1 et 16^2	3^3	7^3			14^3		45
A	4^1	5^4	17^3	12^3	7^3	2^3 et 5^4	16^3	68
D		1^4		7^3	17^4		2^3 et 4^4	31
Total	$(19^1 + 16^2)$	12	24	21	24	21	22	159
Zone de symbiose $N = 124$								

Tableau 5 : Ventilation des élèves au regard des corrélations d'observables (colonne) en fonction des niveaux d'acquisition de la définition du concept de source ponctuelle (ligne) et du niveau des productions écrites individuelles par effectif (symbolique x^y).

Une analyse en première lecture montre que les élèves qui ne sont pas parvenus à mettre en corrélation deux observables (niveaux 1 et 2) ont peu réussi à acquérir le concept ($4/35$ uniquement). En revanche, tous sans exception acquièrent ce dernier voire le dépassent ($22/32$ pour la colonne F_{34}/F_{43}) quand ils atteignent le niveau 4. On retrouve des élèves du niveau 3 sur l'ensemble de la grille d'évaluation de la définition avec une prédominance sur ECA ($24/45$) et A ($54/68$). Sur les six corrélations possibles entre observables, seules quatre d'entre elles débouchent sur le niveau dépassé D (F_{12}/F_{21} , F_{23}/F_{32} , F_{24}/F_{42} , F_{34}/F_{43}). Le cumul des élèves qui se situent sur la « zone de symbiose » représente 78 % ($124/159$) des élèves et les trois quarts d'entre eux ($95/124$) ont acquis, voire dépassé le concept visé. Parmi eux, tous ceux qui construisent du langage (F_{24}/F_{42}) autour de l'attribut commun aux deux concepts maîtrisent la définition attendue. Il en va de même pour les écrits relevant de l'invariant par collection directement lié au concept de source ponctuelle et ses deux observables associés (F_{34}/F_{43}).

Une analyse en seconde lecture interroge les élèves du niveau 2, dont aucun n'acquiert le concept bien qu'ayant mobilisé un observable. Ils se situent exclusivement sur le niveau (ECA). Sur les seize concernés, trois avait pourtant identifié l'attribut commun sans le réinvestir dans la définition par la suite. Un entretien individuel aurait pu être mené pour comprendre de manière plus fine ce cheminement. Enfin, comment passer sous silence cette surprenante répartition des élèves en fonction des corrélations qui fait qu'il n'y a que trois cases du tableau dans lesquelles on obtient deux types de niveaux. Nous ne nous expliquons pas ces deux constats qui prennent l'apparence d'une tautologie-cognitive.

En guise de résumé, l'aptitude à écrire des observations tirées de la modélisation serait un premier atout pour approcher de la définition en jeu. Parvenir, par ailleurs, au sein de ces écrits, à corrélater des événements observés en serait un autre. Une devise séduisante : « pas de corrélation, pas d'acquisition » est mise à mal par quelques élèves du niveau 1. En outre, si le langage élaboré se saisit de la « zone de symbiose » la définition du concept en est d'autant mieux acquise.

Enfin, plutôt que se poser comme un obstacle à l'apprentissage, l'émergence de la « zone de symbiose » entre concepts pourrait s'avérer utile sans en faire une valeur axiomatique.

5. Discussion

Cette étude se veut exploratoire, au sens où elle n'est pas construite avec une méthodologie comparative autour d'un paramètre mis à l'épreuve du terrain qui pouvait être ici le choix de l'expérimentation par exemple. Nous sommes partis sur l'hypothèse que la « zone de symbiose » entre les deux concepts, proportionnalité et source ponctuelle allait être investie par les élèves et potentiellement les aider à construire du langage scientifique.

Nous observons une majorité des élèves qui parvient à tisser des liens entre les observables retenus. Si le lien cible la « zone de symbiose », alors l'accès à la définition du concept semble en être facilitée. Au de-là des observations faites et détaillées à partir du corpus, nous identifions de nouveau un préalable à toute compréhension des phénomènes scientifiques, à savoir la capacité à retranscrire précisément à l'écrit une observation (Fleury, 2012). Ce que les élèves semblent tenir à l'oral, ils ne le tiennent pas de fait à l'écrit. En situation expérimentale, tous les élèves, par leur investissement, leur engagement, peuvent laisser croire aux enseignants qu'ils ont compris les essentiels d'une leçon. Ici, ils sont, bien que très minoritaires sur cette étude, 12 % à ne pas avoir su par l'écrit trouver les moyens d'exprimer leur éventuelle maîtrise¹² du phénomène étudié lors de la modélisation. Quelques rares élèves sont en outre parvenus à acquérir la définition en étant toutefois sur le niveau 1. Nous n'avons pas eu la possibilité de nous entretenir avec eux pour tenter de comprendre ce que pouvait expliquer un tel écart entre les premières productions et les dernières. Il n'est pas exclu d'avancer qu'avoir été en situation de devoir réécrire aura pu faire évoluer leur pensée, ce qui invite à considérer utiles les « écrits intermédiaires » (entre mutualisation et synthèse). Nous terminons ce premier échange en rapportant que les écrits des élèves ne présentent que quelques rares réciproques (neuf au total) et un seule contraposée.

Nous nous interrogeons sur la manière d'inciter les élèves à rédiger au plus près des attributs du concept sans pour autant les sur-guider. Nous rappelons que les élèves n'avaient pas, au moment

¹² Nous n'avons pas eu la possibilité de mener un entretien avec ces élèves afin de confirmer leur niveau de maîtrise du phénomène étudié.

où ils ont été invités à rédiger, d'accès visuel aux conclusions des observables écrites au tableau. Les exigences du « français dans les disciplines » qui sont parfois évoquées au sein des maquettes de master MEEF (Métiers de l'enseignement de l'éducation et de la formation) s'imposent à nous. Au moment où, de manière concomitante, se pose l'avenir de l'enseignement scientifique qui serait diffus au sein d'une des deux épreuves du CRPE (Concours de recrutement de professeurs des écoles) dont le format préconisé serait sous forme de QCM (Questionnaire à choix multiples), le niveau récurrent en français des élèves aux enquêtes PISA (Programme international pour le suivi des acquis des élèves) émerge (ou s'impose) comme une conciliation utile, voire judicieuse, le duo exigeant *sciences et langages*. L'enseignement des sciences génère une confrontation à l'exigence de l'écriture nécessitant un effort singulier. À travers cette recherche, il nous semble que ce sont les expériences à caractère paramétrique qui pourraient servir de support préférentiel pour travailler la maîtrise du lexique spécifique scientifique. De l'identification des paramètres à maintenir constants d'une part à celui étudié d'autre part, le langage se doit d'être précis et rigoureux. Un avantage intéressant de ce style d'expériences réside dans l'immédiateté de la réponse à un changement de variables, celles-ci étant aisément manipulables en sciences physiques (masse, volume, distance par exemple). L'élève, dans notre cas de figure, peut facilement identifier les effets de la position de la source de lumière sur la longueur de l'ombre portée. Il peut tout aussi bien observer l'effet de l'augmentation de la masse d'un objet sur l'équilibre d'une balance, ou celui de l'éclairement des lampes d'un circuit en série quand il y en introduit une supplémentaire, ou l'absence d'effet d'une variation de volume d'une pomme de terre sur sa flottaison. Nous avons au départ pris le parti d'écarter la distance entre objets et source comme étant un caractère singulier de celle-ci, le caractère « à l'infini » de la source étant lié au caractère du parallélisme des rayons émis, mais bien sous condition que la dimension de la source soit négligeable devant celle des objets éclairés. Nous avons en définitive décidé d'intégrer cet attribut dans la définition au même titre que celui de la « zone de symbiose ».

Enfin, la polyvalence du métier de professeur des écoles donne aux enseignants la liberté de pouvoir convoquer plusieurs disciplines pour nourrir un même projet et développer leur apprentissage de manière opérationnelle et concomitante. En l'occurrence, comme nous l'avons présenté ici, le français et les mathématiques ne devaient plus être considérées comme des outils pour les sciences, mais bien comme des éléments constitutifs. En retour, faire des sciences permet aussi de développer des compétences langagières et mathématiques. Ainsi, avec cette recherche, nous souhaitons porter le débat sur l'idée potentiellement féconde de penser les disciplines de manière transdisciplinaire (Fleury & Sallaberry, 2013) dans l'esprit de l'EIST (enseignement intégré des sciences et de la technologie) en sixième au collège. Toutefois, il ne s'agirait plus de convoquer des disciplines pour nourrir un projet afin de lui donner du sens mais bien de les convoquer pour leur intimité épistémologique. En quoi l'épistémologie d'une discipline peut-elle rendre plus lisible celle d'une autre ? Nous pouvons, à l'issue de cette recherche, pour le moins mettre en débat cette approche qui va au de-là du seul bénéfice tiré de l'exploitation des mesures obtenues en sciences physiques pour les réinvestir en mathématiques (comme s'y prête bien la thématique « Grandeurs et mesures »). Un enseignement basé sur la « zone de symbiose » demanderait, il est vrai, que chaque discipline définisse sa propre catégorisation d'invariants pour pouvoir élaborer des stratégies adaptées à chaque situation transdisciplinaire de l'apprentissage. D'autres duos disciplinaires que mathématiques-sciences et technologie seraient susceptibles d'émerger. Ce travail pourrait intéresser les chercheurs en didactique et être exploité au sein des futures unités de formations des maîtres.

Conclusion

Nous avons tenté de concilier deux concepts des disciplines mathématiques et sciences physiques afin d'apprécier en quoi les attributs du concept de la première pouvaient servir la construction du concept de la seconde. Dans quelle mesure le concept de proportionnalité exploité sur le contexte d'une mesure historique (celle de la pyramide de Khéops par Thalès) pouvait permettre à des élèves de cycle 3 d'approcher de manière indirecte la définition d'un concept abstrait celui de source ponctuelle de la lumière. Cette stratégie ambitieuse (nous sommes conscients qu'il aurait été plus simple de travailler *a priori* sur une expérimentation directe avec une observation circonscrite au phénomène) exploite ce que nous nommons la « zone de symbiose » des deux concepts en jeu en cela qu'ils sont — pour cette expérience — en relation avec un caractère commun, celui du parallélisme des rayons lumineux pour l'un et celui des hypoténuses des deux triangles rectangles d'ombres en jeu pour l'autre (objets bâton et pyramide). Les résultats que nous obtenons ouvrent des perspectives à explorer. Les productions langagières des élèves sont — pour ce qui concerne la manière dont ils appréhendent les conclusions de la modélisation — d'un bon niveau scientifique pour une majorité d'entre eux. Les tentatives d'explications, les (amorces) d'hypothèses, usant de liens de causalité alliées à une bonne cohérence scientifique des propos, semble donner du crédit à la démarche consistant à « faire passer » les élèves par l'écrit. Il en découle une aptitude à construire, en optique, le concept de source ponctuelle de lumière de manière satisfaisante pour une majorité d'élève (62 %) sans étayage spécifique pour les accompagner à rédiger, ce qui peut expliquer en partie la difficulté pour certains d'élaborer une définition du concept d'optique en y intégrant les deux attributs attendus (éloignement et parallélisme des rayons) de l'invariant *par collection*. Cette recherche met en évidence que si l'on met les élèves en situation de ne « compter que sur eux-mêmes », ils parviennent à produire des discours qui ont du sens. On peut (il faut) leur faire confiance tout en les étayant (Bucheton & Soulé, 2009) afin qu'ils puissent affiner leurs élaborations. On retrouve en définitive l'idée portée par la clause *proprio mutu* (« de son propre mouvement »). Cette clause nécessite l'engagement propre de l'élève et témoigne de sa capacité à agir par lui-même sur l'objet enseigné sans que le savoir lui soit « mâché » (Sensevy, 2008). Nous imaginons enfin que des études similaires pourraient interroger l'intérêt didactique de la « zone de symbiose » comme pour les duos, proportionnalité et solubilité, ou alignement et éclipse, à l'école primaire. Rien enfin ne s'oppose à rechercher d'autres combinaisons dans les programmes du secondaire faisant de la transdisciplinarité (Pasquier, 2017) un outil au service de l'acquisition de compétences scientifiques pour lesquelles les enseignants repèrent des obstacles récurrents (Bachelard, 1938 ; Brousseau, 1998). Si pensées et langages sont indissociables (Vygotsky, 1985), le langage des mathématiques ne saurait l'être de celui des sciences physiques. Peut-on raisonnablement concevoir de dissocier à l'école primaire ces deux disciplines alors qu'elles s'imbriquent par leur langage commun et leurs contenus. L'outil didactique des invariants propose une voie plus ambitieuse encore en explorant l'épistémologie respective des différentes disciplines de la polyvalence avec l'appui des « zones de symbioses » dans l'intérêt de faciliter la construction des concepts en jeu.

Références bibliographiques

- Barth, B. M. (1987). *L'apprentissage de l'abstraction, méthodes pour une meilleure réussite de l'école*. Éditions Retz.
- Bachelard, G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. Éditions Vrin.

- Baldy, E., Durand-Guerrier, V. & Dusseau, J.-M. (2007). Mathématiques et physique en classe de troisième : L'exemple de la proportionnalité. *Repères-IREM*, 66, 73-82.
- Brousseau, G. (1995). Promenade avec Thalès entre la maternelle et l'université. *Commission Inter-Irem Premier cycle, Autour de Thalès* (pp. 87-124).
- Brousseau, G. (1998). Les obstacles épistémologiques, problèmes et ingénierie didactique. *La théorie des situations didactiques* (pp. 115-160).
- Bruner, J. S. & Bonin, Y. (1996). *L'éducation, entrée dans la culture : les problèmes de l'école à la lumière de la psychologie culturelle*. Éditions Retz.
- Bucheton, D. & Soulé, Y. (2009). Les gestes professionnels et le jeu des postures de l'enseignant dans la classe : un multi-agenda de préoccupations enchâssées. *Éducation et didactique*, 3, 29-48.
- Chabanne, J.-C. & Bucheton, D. (2000) Les écrits « intermédiaires ». *La Lettres de la DFLM*, 2000, 26, 23-27.
- Coda, M., Fay, T. & Rahon, M. (1995). Ombres et lumières au cycle II. Vers une démarche de modélisation. *Grand N*, 57, 59-88.
- De HOSSON, C. & Décamp, N. (2011). La procédure de la mesure du périmètre terrestre par la méthode dite « d'Ératosthène » : un support pour une reconstruction didactique. *Grand N*, 87, 77-91.
- Fleury, P. (2012) *Repérage d'invariants et construction des concepts scientifiques - Le cas du concept d'élément chimique en sciences physiques*. [Thèse de doctorat, Université de Bordeaux II].
- Fleury, P. & Sallaberry, J.-C. (2013). Une approche par les concepts pour l'EIST. Le lien invariant-concept comme accès à la transdisciplinarité. *Spirale*, 52(1), 131-148.
- Fleury, P. (2013b). Enseigner le concept d'élément chimique en seconde générale : « quelle stratégie didactique choisir ? ». *Bulletin de l'union des physiciens*, 950, 57-71.
- Fleury, P. (2015a). « Représenter pour qui - Pourquoi représenter ». Les représentations-images et la construction d'un concept scientifique. *L'année de la recherche en sciences de l'éducation 2015* (pp. 131-146). L'Harmattan.
- Fleury, P. (2015c). Aborder le concept de pression en seconde générale - démarche et intérêt à faire émerger l'invariant par équilibre qui lui est associé. *Bulletin de l'union des physiciens*, 972, 367-382.
- Fleury, P. (2019). L'album de littérature de jeunesse comme outil pour évaluer la construction d'un concept scientifique : le cas du concept de masse en maternelle avec l'ouvrage *L'ours qui s'ennuyait sur sa balançoire 1*. *Spirale*, 64(2), 61-84.
- Guedj, D. (2013). *Le théorème du perroquet*. Média Diffusion.

- Guesne, E., Tiberghien, A. & Delacote, G. (1978). Méthodes et résultats concernant l'analyse des conceptions des élèves dans différents domaines de la physique : deux exemples : les notions de chaleur et lumière. *Revue française de pédagogie*, 45, 25-32.
- Hersant, M. (2001). *Interactions didactiques et pratiques d'enseignement, le cas de la proportionnalité au collège*. [Thèse de doctorat, Université Paris-Diderot-Paris VII].
- Kaminski, W. (1989). Conceptions des enfants et des autres sur la lumière. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 716, 973-991.
- Lemeignan, G. & Weil-Barais, A. (1993). *Construire des concepts en physique*. Hachette.
- Léna, P. (2012) Rapprocher les professeurs de la science vivante. *Pour la science*, 413, 14-15.
- Martinand, J.-L. (1979). Pensée scientifique et pédagogie en sciences expérimentales. *Repères*, 55(1), 77-87.
- Merle, H. & Munier, V. (2003). Comment conceptualiser la hauteur du soleil en tant qu'angle au cycle 3 ? *Aster*, 36(1), 39-68.
- Morge, L. & Doly, A.-M. (2013). L'enseignement de notion de modèle : quels modèles pour faire comprendre la distinction entre modèle et réalité ? *Spirale*, 52(1), 149-175.
- Oliviera, I. (2008) *Exploration de pratiques d'enseignement de la proportionnalité au secondaire en lien avec l'activité mathématique induite chez les élèves dans des problèmes de proportion*. [Thèse de doctorat, Université du Québec à Montréal].
- Pasquier, F. (2017). La transdisciplinarité, combien de divisions ? *L'année de la recherche en sciences de l'éducation 2017* (pp. 33-46).
- Philippe, P. & Dauchy, F. (1920) *Cours d'arithmétique*. Dunod.
- René de Cotret, S. (1991). *Étude de l'influence des variables : indice de proportionnalité du thème et nombre de couples de données sur la reconnaissance, le traitement et la compréhension de problèmes de proportionnalité chez des élèves de 13-14 ans*. [Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble].
- Sallaberry, J-C. (2004) *Dynamique des représentations et construction des concepts scientifiques*. L'Harmattan.
- Sallaberry, J-C. & Claverie, B. (2018) *Introduction aux sciences humaines et sociétales*. L'Harmattan.
- Sensevy, G. (2008). Le travail du professeur pour la théorie de l'action conjointe en didactique : une activité située ? *Recherche et formation*, 57(1), 39-50.
- Simard, A. (2012). Fondements mathématiques de la proportionnalité dans la perspective d'un usage didactique. *Petit x*, 89, 51-62.
- Vergnaud, G. (1985). Concepts et schèmes dans une théorie opératoire de la représentation. *Psychologie Française, numéro spécial « Les représentations »*, 245-252.

Vérin, A. (1995). Mettre par écrit ses idées pour les faire évoluer en sciences. *Repères*, 12(1), 21-36.

Vygotsky, L. S. (1985) *Pensée et langage*. Messidor/Editions Sociales.

Références institutionnelles

MEN (2020). BO n° 31 du 30 juillet 2020 (cycles 2 et 3).

MEN (2021). BO n° 25 du 24 juin 2021 (cycle 1).

MEN (2023). BO n° 25 du 20 juin 2023 (cycle 3).

Annexe

Tableau des premières mesures d'une des six classes

Sur l'ensemble des classes, on obtient les extrêmes suivants s'agissant de la longueur de l'ombre portée de la pyramide ; $L [5,1 ; 7,5]$ cm dont la hauteur H est 5 cm.

La moyenne des écarts avec H pour la première expérience est de 27,5 % sur l'ensemble des classes de notre étude. Les secondes mesures ont permis de trouver pour chaque groupe les conditions expérimentales pour lesquelles la proportionnalité est obtenue ($H = L = 5$ cm).

Nous donnons ci-dessous à titre d'exemple les résultats d'une des classes observées (6 petits groupes de 4 à 5 élèves).

	G1	G2	G3	G4	G5	G6
L (cm)	6	6,4	5,2	6,1	7	6,8
Écart (%) avec H	20	28	6	26	40	36

Rappel : Les élèves ont fixé la longueur ℓ de l'ombre portée de l'objet-bâton à 1 cm, sa hauteur étant $h = 1$ cm ; l'objet-pyramide a une hauteur $H = 5$ cm. Les valeurs extrêmes mesurées des ombres portées de l'objet-pyramide varient entre 5,2 et 7 cm.

Ce sont, ici, les résultats du G3 en comparaison avec ceux des autres groupes qui auront permis de comprendre en quoi les conditions de l'expérience (rayons parallèles de la source / éloignement de la source aux objets) permettent d'approcher au mieux la hauteur H de la pyramide.