# QUELLES SYNERGIES POSSIBLES ENTRE MATHÉMATIQUES ET PHYSIQUE DANS L'ENSEIGNEMENT ?

ROLAND[*]Michel

**Résumé –** Ce résumé vise à étudier la place de l'interdisciplinarité physico-mathématique au sein du système scolaire francophone de Belgique. Il s'agit d'une recherche de signification interprétative faisant appel à la systémique, le système scolaire étant un système hypercomplexe (SHC). Pour cette recherche, il convient de proposer une modélisation de ce dernier en s'appuyant sur les schémas de la transposition didactique. Sur base du modèle et d'un recueil d'informations, nous obtenons des pistes pour un recours à une véritable interdisciplinarité.

**Mots-clefs** : interdisciplinarité, systémique, transposition, modélisation

**Abstract** – This summary aims to study the place of physico-mathematical interdisciplinarity in the French-language school system in Belgium. It is a research for interpretative meaning using the systemic, the school system being a hypercomplex system (SHC). For this research, it is advisable to propose a modeling of this last one by relying on the schemas of the didactic transposition. Based on the modeling and a collection of information, we obtain ways to use a real interdisciplinary approach.

**Keywords**: interdisciplinarity, systemic, transposition, modelling

## I. INTRODUCTION

Ce résumé explicite la méthodologie d'une recherche de signification au sens d'Astolfi[2]et plus précisément sa déclinaison interprétative au regard de la perception des acteurs de terrain à partir d'un recueil d'informations. Il s'agit d'étudier l'interdisciplinarité physico-mathématique au sein du système scolaire francophone belge sous l'angle des enseignants.

L'interdisciplinarité est un concept polymorphe localisé à l'intersection de la pédagogie et de la didactique ; la pédagogie pour son aspect fonctionnel ainsi que pour la diversité d'utilisation par les formateurs (enseignants, maîtres assistants, professeurs) et la didactique pour la référence aux savoirs de deux disciplines. De même, cette référence aux savoirs renvoie à leur construction, c'est-à-dire à l'épistémologie en lien avec la didactique[3]. Chacune possède des théories bien spécifiques qu'il faut envisager d'articuler, des cadres théoriques variés comme préconisés pour toute recherche de signification, avec une multitude de connexions possibles tant du point de vue des théories que des acteurs.

Le système scolaire est un système hypercomplexe (SHC) au sens de Francis Le Gallou[4] :

> Un système est un ensemble, formant une entité cohérente et autonome, d'objets réels et conceptuels (éléments matériels, individus, actions...) organisés en fonction d'un but (ou d'un ensemble de buts, objectifs, finalités, projets...) au moyen d'un jeu de relations (interrelations mutuelles, interactions dynamiques... ), le tout immergé dans un environnement.

Nous entrons ainsi de plein pied dans le champ de la complexité par notre objet d'étude complexe, notre observable, mais également par sa place au sein d'un système hypercomplexe. Il ne faut pas confondre complexité et complication. La complication s'appréhende dans sa globalité grâce à l'expertise, le travail et la méthode. Par contre, pour la

---

[1] [*] Université Catholique de Louvain-la-Neuve, IRMP et CRIDEDIS – Belgique – roland.debled@skynet.be

[2] Le nouvel « Aster » (1985), Trois paradigmes pour les recherches en didactiques (1993).

[3] M. Roland (2017), Introduction de l'ouvrage collectif.

[4] In G. Donnadieu et M. Karsky (2002)

complexité, il est illusoire de croire qu'elle s'appréhende dans sa totalité. Il faudra émettre des hypothèses, ce qui induit un axiome constructiviste entre observateur et observable. Les modèles ne sont jamais que des représentations partielles, partiales mais opératoires de la réalité. Pourquoi dès lors ne pas recourir à une théorie visant l'étude des systèmes complexes, la systémique[5] ? Chevallard (1991) utilise dans *La transposition didactique du savoir savant au savoir enseigné* de très nombreux concepts de la systémique. La recherche-action intégrale systémique[6]est un exemple de recherche alliant systémique et recherche en éducation.

La méthode systémique permet cette articulation de théories diverses et une analyse des systèmes dans leur complexité, leur globalité, fournissant ainsi une ossature, une colonne vertébrale à notre recherche. Nous la déclinons en cinq points inspirés de Donnadieu et Karsky (2002): l'observable, l'exploration systémique, la modélisation qualitative, la modélisation quantitative et finalement la simulation. Cette déclinaison fournit le cadre méthodologie afin de répondre à nos quatre "questions" de recherche (Roland & Dedonder).

## II. OBSERVABLE

Notre observable est l'interdisciplinarité physico-mathématique qu'il convient de bien définir.

### *1. Interdisciplinarité*

> L'interdisciplinarité scolaire est un instrument curriculaire, pédagogique et didactique visant, au sein d'une discipline, la construction et l'intégration de savoirs, l'appropriation de concepts et une modélisation du réel à partir de connaissances disciplinaires provenant d'au moins une autre discipline avec laquelle doit s'établir une réciprocité.

Cette définition s'inspire de la pensée développée par Jean-Pierre Astolfi (2010), Alain Maingain, Barbara Dufour et Gérard Fourez (2002), Yves Lenoir et Lucie Sauvé (1998). Les deux disciplines mises en jeu sont les mathématiques et la physique, les compétences acquises au sein de l'une pouvant participer aux apprentissages de l'autre et inversement.

### *2. Physico-mathématique*

L'adjectif physico-mathématique est un concept unificateur. Il apparaît au début du 17ème siècle et est consacré en 1644 avec la parution de *Cogitata physico mathematica* et, en 1647 de *Novarum observationum physico-mathematicarum, tomus III*, de Marin Mersenne. Les travaux effectués par Michèle Artaud (1999) et Yves Chevallard (2003) montrent l'évolution des liens entre mathématiques et physique durant les derniers siècles laissant entrevoir l'apparition d'obstacles par le sentiment de domination d'une discipline sur l'autre ou de dérives empiristes engendrant un risque de repli disciplinaire. L'étude épistémologique montre que ce ne sont pas les disciplines qu'il faut remettre en cause, mais qu'il faut prendre conscience de la variabilité de leurs frontières et même de leur porosité. Il suffit pour cela de renvoyer le lecteur *Au système figuré des connoissances humaines* de d'Alembert (1751).

Le 17ème siècle foisonne de questionnements physico-mathématiques engendrant la naissance du calcul infinitésimal. De cette période, nous extrayons des associations utiles entre les concepts de l'analyse et de la mécanique (Roland, 2016 et 2018), des concepts interdisciplinaires. Nous mettons en exergue une double approche du concept de dérivée,

---

[5] G. Donnadieu et M. Karsky (2002)

[6] André Morin et Pierrette Cardinal (2004)

toujours présente aujourd'hui dans la notation leibnizienne ou lagrangienne, pierre d'achoppement entre les enseignants de physique et de mathématiques. Cette double approche s'exploite dans l'analyse de la résolution de problèmes de cinématique (Roland, 2014 et 2017).

Un autre concept unificateur est celui de phénoménotechnique développé par Gaston Bachelard (2002), qui exprime une trilogie relationnelle : la physique, les mathématiques et les techniques. En fait, Bachelard développe dans de nombreux ouvrages des exemples de dualité (pratique-théorique, concret-abstrait, physique-mathématique, symbole-symbolisant, temps qui tourne-temps qui se balance, rationalisme électrique-rationalisme mécanique, ... ) de type *doublets brunschvicgiens* (Bachelard, 1949) associant la technique, qui sont semblables à des praxéologies de type *modélisation.*

Nos concepts interdisciplinaires sont des dualités, des concepts physico-mathématiques. Un premier concept fait référence à la dualité fonction-mouvement (un monde de relation, prémices à la modélisation). Les élèves perçoivent-ils la similitude entre les fonctions f(x) de l'enseignant de mathématiques et les positions x(t) du mouvement de l'enseignant de physique ? Une deuxième dualité est le couplage dérivée-vitesse instantanée et même une bipolarité de la dérivée à la différentielle et de la vitesse à l'accélération (un monde d'incompréhension). La question est alors de comprendre les difficultés entre mathématiciens et physiciens engendrées par la notation de la dérivée, leibnizienne ou lagrangienne ? La dérivée est-elle un rapport de différentielle ? Le dernier couplage renvoie à la modélisation par la paire d'équations différentielles ordinaires (EDO)-loi fondamentale de la mécanique (un monde de modélisation). L'étude du pendule simple en est un exemple. Comment justifier que son mouvement est un mouvement harmonique ?

## III. RECUEIL D'INFORMATIONS

Après avoir construit notre observable et précisé quelques concepts interdisciplinaires, le temps est venu de s'attaquer aux questions sur la réalité du terrain en s'appuyant sur l'élaboration d'un recueil d'informations[7]. Comment les injonctions sont-elles perçues et appliquées ? Quelle est la réalité du terrain et la place de l'interdisciplinarité au sein de ce dernier et ces différentes formes ? Quelle est la notation utilisée dans l'enseignement pour la dérivée lagrangienne ou leibnizienne ? Est-elle adaptée en fonction des disciplines ?

Ce recueil d'informations fait appel à une stratégie composée : l'étude de documents, l'interview, le questionnaire d'enquête et le questionnaire en ligne. Il prend appui sur la démarche systémique décrite par Donnadieu et Karsky (2002).

### *1. Exploration systémique*

Nous déterminons les limites du système scolaire (SHC), le situons dans son environnement et analysons les échanges qu'il entretient avec ce dernier, pour déterminer la place de notre observable en son sein. Nous analysons son architecture interne, ses principaux composants ainsi que la nature des interrelations entre ceux-ci. Finalement, il est important d'avoir un aperçu historique du système pour analyser son comportement dans le temps.

Afin de mener à bien cette exploration, nous avons recours à la triangulation systémique : aspect fonctionnel, aspect structural et aspect historique[8]. Cette dernière se réalise à partir d'une étude de documents portant sur les particularités du système scolaire belge afin d'en

---

[7] Jean-Marie De Ketele et Xavier Roegiers (2009, 4ème édition)

[8] G Donnadieu et M Karsky (2002)

faire ressortir les trois aspects (Beckers J (1998) ; Grootaers D (1998) ; Crahay M (2000) ; Maroy C (2002) ; Draelants H, Dupriez V, Maroy C (2011)). Nous nous intéressons aux interactions complexes engendrant le recours à l'interdisciplinarité sous différentes formes.

Cette triangulation permet la construction d'une carte à partir de la théorie de la transposition didactique (Chevallard, 1991) pour analyser comment l'interdisciplinarité entre dans le système (input) et ce qu'elle apporte à la sortie (output) ; l'objectif étant de prouver une plus-value à son recours.

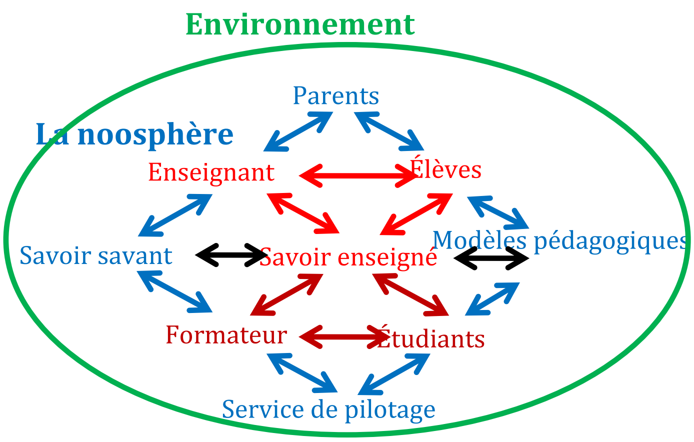



***Figure 1*** – Carte du système scolaire

Sur base de cette carte, nous construisons un canevas pour des interviews semi-dirigées (Roland, Léonard, Radelet, 2014) qui respectent les trois critères de qualité (pertinence, validité et fiabilité) décrits dans le recueil d'informations.

Notre objectif est de mettre en place une inférence, plutôt forte, c'est-à-dire une tendance importante à donner du sens à l'information recueillie, en attribuant une signification aux réponses au regard, par exemple, de notre expérience personnelle d'enseignant et de formateur. De plus, afin de permettre aux interviewés de prendre connaissance de notre référentiel, nous commençons nos interviews par une brève explication de notre sujet de recherche et du plan de l'interview en précisant une estimation du temps prévu et les modalités d'enregistrement. Il s'agit de fournir aux participants un descriptif leur permettant d'agencer leurs réponses en fonctions des différents sujets abordés, tout en leur laissant la liberté d'ajouter des informations qu'ils jugent pertinentes. Nous avons choisi trois catégories d'interviewés, chacune des catégories étant composé à part égale de deux mathématiciens et de deux physiciens de formation.

La **première catégorie** est composée de membres de notre public cible, c'est-à-dire d'enseignants des trois dernières années du secondaire (lycée) assumant des cours de mathématiques ou de physique. Ils ont en outre assumé des formations continues sur l'interdisciplinarité physico-mathématique. La **deuxième catégorie** vise à s'intéresser à la perception des formateurs des enseignants du degré inférieur (collège), c'est-à-dire à la formation initiale des enseignants, acteurs centraux du système. La **troisième catégorie** permet de renvoyer au sens premier de la didactique, son lien avec le savoir disciplinaire et donc le savoir savant. Nous interrogeons des professeurs d'Université sur la collaboration entre mathématiques et physique. Ils forment les enseignants, notre public cible, sur les différents savoirs disciplinaires. Ils transposent le savoir savant. Nous avons choisi d'interviewer des professeurs qui s'intéressent à cette relation physico-mathématique et qui possèdent une fibre pédagogique. Finalement, une **quatrième catégorie** a été établi suite à des opportunités de rencontre afin de récolter des avis de personnes en partie extérieure au système. Elle est constituée de deux professeurs italiens dont l'un s'intéresse à la promotion de l'enseignement des mathématiques (fondateur d'Il giardino di Archimedeà Florence) et l'autre est l'auteur de livres de physique pour l'enseignement secondaire italien tout en travaillant en collaboration avec le CERN sur des applications médicales d'accélérateurs de particules. Le dernier membre de ce groupe est responsable de l'agrégation de biologie dans une université francophone belge et a enseigné les mathématiques et la physique dans le secondaire.

Le canevas s'établit selon cinq points afin d'analyser la position de l'interdisciplinarité au sein du système à partir de la carte.

Le premier point s'intéresse aux perceptions de l'interdisciplinarité dans le temps par le changement de posture des interviewés (élève, étudiant, enseignant, formateur), leur parcours curriculaire. Le deuxième point étudie le regard porté sur les différentes réformes et les différents programmes d'enseignement, autrement dit l'influence du service de pilotage et des modèles pédagogiques prescrits ou conseillés sur l'observable. Au troisième point, nous nous intéressons au sablier central de la carte (en rouge), c'est-à-dire aux collaborations tant internes, à une discipline, qu'externes, entre disciplines pour la formation des apprenants. Le quatrième point porte sur la place dans le curriculum des deux disciplines, pour une analyse du rôle des savoirs, savant et enseigné. Le dernier point concerne la vision de l'interdisciplinarité des interviewés.

Ces interviews confirment la pertinence et la validité de notre liste d'obstacles a priori. Elles nous permettent d'en ajouter un (l'obstacle de type traditionnel). Elles font aussi ressortir de grandes difficultés de collaboration entre les enseignants des deux disciplines et surtout avec une confrontation des positions au sein des universités, lieux des savoirs savants. Les obstacles sont présents dès l'enseignement des savoirs savants au sein des universités. Le cas de la différentielle en est une excellente illustration. Il suffit de se référer au projet réalisé à l'université Paris-Diderot dans les années 1980 ou à un article[9] intitulé *Obstacles to Mathematization in Physics : The case of the Differential.* De plus, lors des interviews, un questionnement a été formulé sur la relation possible entre nos recherches et la dialectique outil-objet de Régine Douady (1984 et 1992). Ce questionnement nous a poussé à étudier cette possibilité au regard de notre étude épistémologique sur la dualité de concepts, les concepts interdisciplinaires. Cette dialectique établit un dialogue, trop souvent rompu dans l'enseignement, entre les mathématiques et la physique.

*2. Modélisation qualitative*

L'objectif est de passer de la cartographie à la modélisation. Afin d'affiner nos premiers constats obtenus sous l'angle des formateurs, nous avons réalisé un questionnaire d'enquête remis à des étudiants en début de parcours universitaire dans des orientations scientifiques (Roland & Dedonder, 2018). Nous souhaitions analyser la perception des apprenants sur l'interdisciplinarité et les moyens mis en place par leurs différents enseignants pour faire ressortir les liens entre les deux disciplines. De ces questionnaires, il ressort que l'interdisciplinarité rencontrée est surtout à sens unique: les mathématiques, outils pour la physique. La collaboration entre les enseignants est rare. De plus, il est apparu des difficultés dans la résolution de trois exercices de cinématique et des approches différentes à mettre en parallèle avec l'étude épistémologique du Calculus. C'est l'occasion de faire appel à la dialectique outil-objet et les changements de cardes de Douady (1984 et 1992). Le changement de cadre permet de synthétiser les méthodes de résolution, mais aussi la mise en place de pistes pour l'enseignement fournissant une double approche des problèmes, mathématique ou physique, évitant la simple répétition d'une méthode non comprise par un changement de cadre.

Comme indiqué dans l'introduction, le cadre épistémologique fournit une double approche de la dérivée, les prémices d'une dialectique outil-objet. Il convient dès lors d'effectuer un

[9] Ricardo Karam and others (2015)

parallélisme avec la situation actuelle conflictuelle autour de sa notation. Un concept, comme celui de dérivée ou de vitesse instantanée, est **outil** lorsque nous y recourons pour résoudre un problème (outil explicite) ou pour introduire un nouveau concept (outil implicite). Ces deux concepts sont intimement liés car l'un, la dérivée, est un outil constitutif du sens de l'autre, la vitesse instantanée. La dérivée, appartenant au domaine des mathématiques, permet de comprendre la signification du terme instantané du domaine de la physique.

> La dimension outil est constitutive du sens d'un concept. Dans la constitution du sens interviennent des relations développées dans le contexte avec d'autres concepts relevant du même domaine ou d'autres domaines.[10]

Ces mêmes concepts sont **objets** lorsqu'ils réfèrent à l'objet culturel ayant sa place dans l'édifice plus large que sont les savoirs des deux disciplines à un moment donné et reconnu socialement, par exemple, par les pairs. L'objet est défini indépendamment de ses différents usages et permet ainsi son réinvestissement dans de nouveaux contextes éventuellement très éloignés du contexte d'origine. L'outil devenu objet accroît l'ensemble des connaissances. C'est pourquoi, la dérivée est outil à la fois en mathématiques (c.a. de la tangente au graphique), en cinématique (vitesse instantanée) et en économie (coût marginal) et c'est pourquoi il faut que la vitesse instantanée se définisse indépendamment de l'outil mathématique pour avoir le statut d'objet de la physique. S'instaure ainsi une dialectique outil-objet-outil entre les deux disciplines scientifiques. Comme l'indique Douady (1987), la dialectique est créatrice de sens et au sein de ses différentes phases intervient le changement de cadre.

Un **cadre** *est constitué des objets d'une branche des mathématiques*, par exemple l'analyse, ou d'une branche de la physique, par exemple la cinématique, *des relations entre les objets, de leur formulation éventuellement diverses et des images mentales associées à ces objets et ces relations. Ces images jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement comme outil, des objets du cadre. Cela conduit à envisager la notion de cadre selon au moins trois dimensions : une dimension mathématique* ou physique, *une dimension socio-culturelle, une dimension individuelle chacune indexée par le temps (Douady, 1992).* Nous avons identifié deux cadres dans la construction du concept de dérivée. Nous les retrouvons dans la résolution de problèmes de cinématique (voir plus loin les tableaux de synthèse de la résolution des problèmes). Le premier se caractérise par le recours à des relations algébriques obtenues (**le cadre géométrico-algébrique**) soit en combinant des distances (aspect géométrique) soit en effectuant un rapport de quantités ($t(s) = d(m)/v(m/s)$ ou $t(s) = v(m/s)/a(m/s^2)$). Le second s'appuie sur le recours aux fonctions « positions » (**le cadre analytique**). Il existe ainsi deux approches possibles des problèmes permettant le recours au changement de cadre, explicité par Douady (1992).

> Le changement de cadres est un moyen d'obtenir des formulations différentes d'un problème qui sans être nécessairement tout à fait équivalentes, permettent un nouvel accès aux difficultés rencontrées et la mise en œuvre d'outils et techniques qui ne s'imposaient pas dans la première formulation… L'intérêt réside dans une nouvelle approche des difficultés rencontrées et dans la mise en œuvre d'outils et de techniques qui n'avaient pas de raison d'être impliqués dans la première approche.

Il est également possible d'étudier la résolution des problèmes sous l'angle des fenêtres conceptuelles (Douady, 1992).

> Nous appelons fenêtre conceptuelle l'ensemble des objets, des outils et des relations mobilisées par quelqu'un, à un moment donné, pour analyser l'énoncé d'un problème ou de la situation, ou pour développer une stratégie de résolution, quels que soient les cadres dont ils relèvent…

---

[10] Régine Douady (1992)

> Ainsi, en mathématiques **ou en physique**, une fenêtre conceptuelle est un fragment de mathématiques **ou de la physique** attaché à un problème et à quelqu'un qui le cherche, ou attaché à une stratégie de résolution choisie et éventuellement mise en œuvre par le chercheur, indexé par le temps. Un cadre est une partie d'une branche des mathématiques **ou de la physique**, indexée par le temps. Les deux notions de cadre et de fenêtre sont complémentaires. **(Ajouté par nous)**

| | CADRES | |
|---|---|---|
| | Géométrico-algébrique | Analytique |
| FENETRES CONCEPTUELLES | Relation algébrique | Relation numérique |
| | Vitesse relative | Fonction numérique |

Ainsi, une analyse de l'énoncé ou une stratégie de résolution des problèmes peut s'appuyer sur la recherche de relations entre les quantités, soit sous forme algébrique (représentation schématique de la situation en termes de distance et égalité de distances) soit sous forme numérique (représentation à partir de tableau ou de graphique), premier type de fenêtre. De même, en poussant plus avant dans la recherche des solutions, une nouvelle analyse ou une nouvelle stratégie peut être établie à partir d'un concept de la physique, la vitesse relative, ou d'un concept des mathématiques, la fonction numérique. Les notions de cadre et de fenêtre étant complémentaires, nous synthétisons l'ensemble sous forme d'un tableau à double entrée.

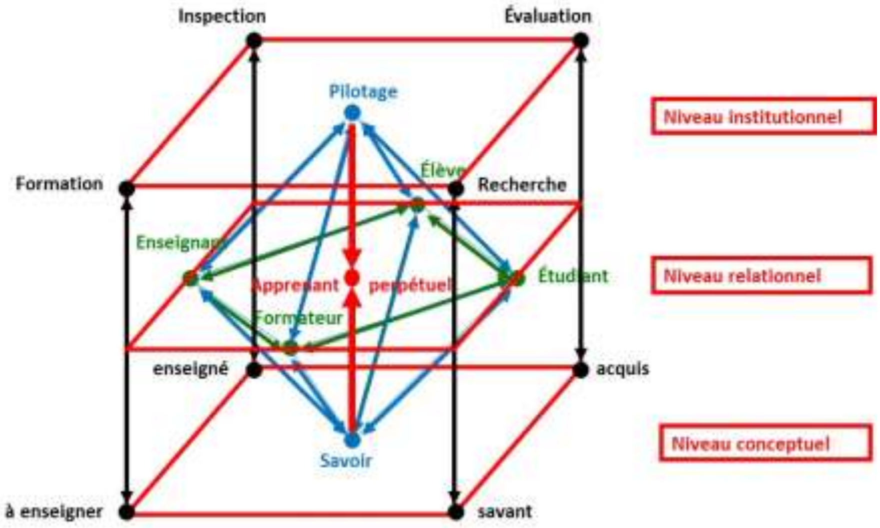
Ces différents concepts nous permettent une analyse sous l'angle de l'interdisciplinarité physico-mathématique montrant l'intérêt d'un tel recours, comme l'indique Douady (1984).

> Le jeu de cadres traduit l'intention d'exploiter le fait que la plupart des concepts peuvent intervenir dans divers domaines, divers cadres physique, géométrique, numérique, graphique ou autres… C'est ainsi que l'inter-disciplinarité peut jouer de façon efficace.

En conclusion, l'analyse des interviews et des questionnaires met en évidence des lacunes de notre carte qu'il convient d'éliminer en passant au modèle:

| Lacunes de la carte | Solution pour le modèle |
|---|---|
| Place des parents trop importante | Les localiser dans l'environnement |
| Le pilotage et son influence pas assez détaillés et explicites | Recours à une hiérarchisation et à un découpage du pilotage |
| Découpage du savoir en deux pas suffisant | Partir du découpage du savoir en quatre savoirs |
| Amplifier le rôle central de l'enseignant, acteur clef du système par ses différentes postures | Positionner l'enseignant au centre du modèle par le recours à l'apprenant perpétuel |
| Manque de nœuds (9) et de connexions représentées (16) | Augmentation des nombres par un passage en trois dimensions |

Dès lors, nous élaborons un modèle spatial du système scolaire jouant sur la dualité cube-octaèdre en trois niveaux hiérarchisés (Roland & Dedonder, 2018).




Ce modèle permet une nouvelle classification des obstacles.

| Niveau | Obstacles | Exemples |
|---|---|---|
| Institutionnel | de type institutionnel | Poids des programmes, la multiplicité des réformes, les compétences transversales, les savoirs disciplinaires, … |
| | de type formatif ou cognitif | Professeur expert, formation continuée, formation initiale, connaissance des autres programmes et des matières, … |
| Relationnel | de type corporatiste | Défense de son territoire, mathématiques pures ou appliquées, abstrait-concret, … |
| | de type organisationnel | Collaboration entre enseignants, choix des dispositifs et des locaux, … |
| Conceptuel | de type langagier | Mathématisation de la physique, géométrisation de la physique, poids des mathématiques, notations différentes, … |
| | de type traditionnel | Position des différentes matières inamovibles (suite définie comme logique depuis de nombreuses années),… |

*3. Modélisation quantitative ou dynamique*

Dans le champ des sciences humaines, nous pourrions nous contenter des trois points précédents comme l'indiquent G. Donnadieu et M. Karsky (2002).

> Toutes les fois où on le peut, cela suppose de pousser la démarche d'étude jusqu'au bout, c'est-à-dire au degré ultime de la modélisation dynamique et de la simulation. Mais comme il a déjà été noté, s'agissant du champ des sciences humaines, cet objectif n'est pas toujours réalisable. Il faut alors savoir limiter la démarche au stade de la modélisation qualitative, voire de la simple exploration systémique.

Le système scolaire possède une inertie non négligeable et des changements à différents niveaux sont sans doute nécessaires. Nous parlons donc de dynamique qui implique l'analyse des facteurs qui créent le changement, ou au contraire s'y opposent. Il faut comprendre les facteurs freinant le changement ainsi que leurs causes afin d'y remédier.

L'objectif est bien de fournir des pistes de dépassement des obstacles par une formulation en termes d'objectifs-obstacles[11].

Pour identifier ces facteurs et confirmer la classification des obstacles, nous construisons un questionnaire en ligne à destination des enseignants de physique et de mathématiques du troisième degré du secondaire (élèves de 17 à 18 ans). Ce questionnaire est élaboré à partir du modèle. Il a pour but de vérifier la pertinence de notre classification, de permettre l'éclosion de nouveaux obstacles non envisagés et de pointer les interconnexions du modèle faisant obstacle à l'interdisciplinarité.

Ces questionnaires sont en cours d'étude. Il est déjà intéressant de noter qu'il fut plus difficile de toucher les mathématiciens et d'obtenir des réponses sur ce sujet par eux. De même, nous avons aussi établi une distinction entre enseignants en fonction des cours enseignés depuis les 5 dernières années : enseigner des mathématiques sans le cours de physique, de la physique sans le cours de mathématiques, des mathématiques et de la physique. Nous les avons également interrogés sur trois problèmes soumis aux étudiants pour connaître leur avis sur leurs difficultés, sur le taux de réussite des étudiants. Toute l'analyse se basera sur les différentes composantes du modèle.

[11] Jean-Louis Matrinand (1986), Brigitte Peterfalvi (2001)

## IV. PISTES POUR L'ENSEIGNEMENT, SIMULATION

Il reste à montrer la plus-value du recours à l'interdisciplinarité physico-mathématiques aux enseignants car on ne change pas l'École uniquement par décret.

Avant de finaliser des pistes d'ingénierie didactique interdisciplinaire, selon la définition de Michèle Artigue (1996), une étude approfondie des réponses des enseignants est nécessaire. Elle doit en outre être mise en parallèle avec notre étude épistémologique des concepts interdisciplinaires et avec des exemples issus de notre parcours curriculaire.

L'étude épistémologique autour de la naissance du calcul infinitésimal fournit des dualités à exploiter dans le cadre d'ingénierie, fonction-mouvement, dérivée-vitesse, EDO-loi fondamentale de la mécanique, … (Roland, 2018).

La dualité fonction-mouvement est idéale comme prémices à la modélisation. En effet, l'exploitation de mesures prises en laboratoire implique une représentation graphique et une méthode permettant de définir la meilleure fonction passant par un certain nombre de points. Les enseignants ont-ils la formation utile et nécessaire à l'exploitation de cette dualité ?

À la naissance du calcul infinitésimal, les concepts de fonction et de dérivée se sont développés en parallèle sous l'angle des mathématiques (la tangente), mais également en lien avec la compréhension de la mécanique et plus précisément des concepts de trajectoire, de mouvement, de vitesse instantanée,... Comme en témoigne Dugas dans l'introduction de son ouvrage, *le développement de l'analyse mathématique permet à la mécanique de prendre une forme qui a paru définitivement achevée et qui est encore en usage dans l'enseignement classique*. Les difficultés rencontrées par les étudiants dans la résolution de problèmes de cinématique démontrent l'intérêt d'envisager les problèmes sous différentes approches. De même, il est important de réconcilier les enseignants sur la notation de la dérivée en montrant les dangers d'une interprétation non réfléchie en termes de rapport de différentielles.

En outre, derrière ces différentes notions se cachent une autre dualité celle entre les EDO et la loi de la mécanique de Newton. Comment démontrer que le mouvement du pendule simple est un mouvement harmonique ?

## V. CONCLUSION

L'élément central de notre recherche était de parvenir à conjuguer une grande variété de théories provenant de divers horizons. Vu la complexité du système scolaire rien que par l'action d'influence qu'un acteur (nœud) peut exercer sur un autre (nœud), il est apparu que la théorie de la systémique était une solution appropriée. Elle permet d'agencer les différentes théories et de servir de colonne vertébrale.

Le recours à la cartographie avant de passer à la modélisation a permis un éclairage plus précis de la problématique. La combinaison de cette cartographie avec le recueil d'informations a engendré la construction d'un modèle utile et prédictif du système scolaire fournissant la clef de l'analyse des différentes enquêtes. Finalement, ce modèle donne l'opportunité de réfléchir en termes d'objectifs-obstacles afin de mettre en place des pistes d'ingénieries permettant la remédiation des difficultés rencontrées dans la collaboration entre enseignants de mathématiques et de physique.

REFERENCES

Artigue M. (1996). Ingénierie didactique. *Didactique des mathématiques*, Delachaux et Niestlé, 243-274.

Artaud M. (1999). Conditions et contraintes de l'existence des mathématiques dans l'enseignement général. *Petit x*, 50, 23-38.

Astolfi J.-P. (1985). *Le nouvel « Aster »*. Institut national de recherche pédagogique, pp. 1-6.

Astolfi J.-P. (1993). Trois paradigmes pour les recherches en didactiques. *Revue française de pédagogie*, *103*, 5-18.

Astolfi J.-P. (2010, 2ème édition). *La saveur des savoirs*. ESF éditeur.

Bachelard G. (1949). *Le rationalisme appliqué*. Presses universitaires de France.

Bachelard G. (2002, 2e édition). *Études*. J. Vrin.

Beckers J. (1998). *Comprendre l'enseignement secondaire.* De Boeck Université.

Chevallard Y. (1991). *La transposition didactique du savoir savant au savoir enseigné*. La Pensée Sauvage.

Chevallard Y. (2003). Quel avenir pour l'enseignement des mathématiques ? *L'enseignement des mathématiques du collège au premier cycle de l'université.* Metz, 9-24.

Crahay M. (2000). *L'école peut-elle être juste et efficace ? De l'égalité des chances à l'égalité des acquis.* De Boeck Université.

De Ketele J.-M., Roegiers, X. (2009). *Méthodologie du recueil d'informations*. De Boeck.

Diderot D. (1751). Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, recueilli des meilleurs auteurs et particulièrement des dictionnaires anglois de Chambers, d'Harris, de Dyche, etc. par une société de gens de lettres, mis en ordre et publié par M. Diderot, et quant à la partie mathématique. 1751.

Donnadieu G., Karsky, M. (2002). *La systémique, penser et agir dans la complexité*. Liaisons.

Douady R. (1984). *Jeux de cadre et dialectique outil-objet*. (Thèse d'État). Université de Paris VII.

Douady R. (1992). Des apports de la didactique des mathématiques à l'enseignement. *Repères-IREM*, *6*,132-158.

Draelants H.,Dupriez, V., Maroy, C. (2011). *Le système scolaire en Communauté française*. Bruxelles, dossier 76, CRISP.

Grootaers D. (1998). *Histoire de l'enseignement en Belgique.* CRISP.

Karam R. & al. (2015). Introduction of the Thematic Issue on the Interplay of Physics and Mathematics. *Science & Education*, *Springer*, *24*, *Issue 5-6*, 487-805.

Lenoir Y., Sauvé L. (1998). De l'interdisciplinarité scolaire à l'interdisciplinarité dans la formation à l'enseignement : un état de la question. *Revue Française de pédagogie*, 124 et 125, 121-153 et 109-146.

Maingain A., Dufour B., Fourez, G. (2002). *Approches didactiques de l'interdisciplinarité*. Coll. Perspectives en Education et Formation, De Boeck Université.

Martinand J.-L. (1986). *Connaître et transformer la matière*. Peter Lang, Berne.

Maroy C. (2002). *L'enseignement secondaire et ses enseignants.* De Boeck Université.

Morin, A. Cardinal P.(2004). La recherche-action intégrale systémique. *Questions vives n°3 Lambesc*, p. 27-36

Peterfalvi B. (2001). *Obstacles et situations didactiques en sciences : processus intellectuels et confrontations ; l'exemple des transformations de la matière* (Thèse, Rouen).

Roland M. (2014). Vitesse instantanée, notion mathématique ou physique ? Approche épistémologique et didactique de la question. *Communication affichée*, Montpellier. http://www.epistemologie.univ-montp2.fr/les-journees/les-journees/journee-2014

Roland M., Léonard P., Radelet P. (2014). Interdisciplinarité physico-mathématique : comparaison épistémologique et didactique de deux modélisations en mécanique.

*Communication affichée, ARCD sur la modélisation des savoirs dans les analyses didactiques,* Bruxelles, Belgique.

Roland M. (2016). Quelle synergie entre mathématiques et physique au sein de l'enseignement universitaire ? *First conference of International Network for Didactic Research in University Mathematics (INDRUM).* Montpellier. https://hal.archives-ouvertes.fr/INDRUM2016/hal-01337876

Roland M.(2017). Vitesse instantanée, notion mathématique ou physique ? Approche épistémologique et didactique de la question. *Ouvrage collectif, Épistémologie et didactique*, Presses universitaires de Franche-Comté.

Roland M. (2018). What synergy between mathematics and physics is feasible or imaginable in education? *In Methods and Cognitive Modelling in the History of Science and Education, Special Issue of Transversal-International Journal for the Historiography of Science*, http://www.historiographyofscience.org/index.php/transversal/issue/view/10.

Roland M., Dedonder J. (2018). L'interdisciplinarité physico-mathématique du point de vue de l'élève au début de son parcours universitaire. Article soumis en attente d'avis.