ETUDE D'UNE APPROCHE COLLABORATIVE ENTRE MATHÉMATIQUES, PHYSIQUE ET BIOLOGIE : CAS DE L'ENSEIGNEMENT DE LA STROBOSCOPIE

MALONGA MOUNGABIO* Fernand Alfred, LOUYIDOULA BANGANA YIYA** Chris Poppel.

Résumé - La pratique de l'interdisciplinarité est considérée comme un des leviers permettant de donner du sens à certains savoirs. Nous nous proposons de présenter ici une analyse de cas de « dialogue » entre mathématiques, physique et biologique autour de l'enseignement de la stroboscopie en classe de terminale scientifique.

Mots-clefs : Interdisciplinarité ; stroboscopie ; persistance rétinienne ; périodicité ; sinusoïde.

Abstract – Texte du résumé traduit en anglais

The practice of interdisciplinarity is considered as one of the levers for giving meaning to certain knowledge. We propose to present here a case analysis of the "dialogue" between mathematics, physics and biology around the teaching of stroboscopy in the scientific terminal class.

Keywords: Interdisciplinarity; stroboscopy; retinal persistence; periodicity; sinusoid.

I. INTRODUCTION

Dans de nombreux systèmes d'enseignement, des interfaces entre les mathématiques et les autres domaines scientifiques (comme les sciences physiques ou biologiques) sont mises en évidence notamment pour tenter d'assurer une meilleure visibilité des mathématiques et en montrer l'intérêt pour la compréhension des avancées scientifiques et technologiques. Tel est le cas de l'enseignement des sciences au Congo-Brazzaville dont les programmes scolaires visent à montrer l'intérêt et la puissance des mathématiques au service d'autres domaines à travers l'activité de modélisation.

Nous rapportons ici, une réflexion sur la mise en synergie de trois disciplines (physique, mathématiques et biologie) à propos de l'enseignement de la stroboscopie, dispensé en physique en classe de terminale scientifique.

La stroboscopie est une méthode d'étude des phénomènes périodiques très rapide. Le cours sur la stroboscopie nécessite un stroboscope. Cependant, l'absence de cet appareil dans plusieurs lycées au Congo conduit la plupart des enseignants de physique d'aborder à peine (ou pas du tout) ce cours, qui est pourtant indiqué pour servir d'introduction à l'étude des phénomènes périodiques.

Nous proposons une *analyse à priori* d'une mise en scène de ce cours sans nécessairement disposer d'un stroboscope, avec l'implication des enseignants des trois disciplines à savoir, la physique, les mathématiques et les sciences de la vie et de la terre (biologie).

* Ecole Normale Supérieure, Université Marien Ngouabi - Congo Brazzaville – malongaf@gmail.com

** Ecole Normale Supérieure, Université Marien Ngouabi - Congo Brazzaville – chris.louyindoula@umng.cg

II. LES FINALITES DE L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES AU CONGO-BRAZZAVILLE : QUE DISENT LES PROGRAMMES ?

D'après les commentaires des programmes scolaires édition 2002, les finalités de l'enseignement des sciences doivent permettre de :

- stimuler la curiosité intellectuelle de l'élève ; donner à l'élève le goût de la recherche ; créer progressivement chez l'élève une attitude scientifique.

> Ce qui lui [l'élève] permettra de développer des aptitudes à la démarche scientifique, à la maîtrise du langage mathématique (interpréter des graphiques, savoir schématiser), à utiliser un dispositif expérimental permettant de valider ou d'invalider une hypothèse, etc.

(Programme de physique 2002, p. 7)

- apprendre à l'élève, les mathématiques de l'action, celles du sens. En effet, les mathématiques.

> Les mathématiques sont considérées comme un socle de la pensée commune, une pensée mobilisée pour l'action dans la vie quotidienne, comme discipline de service ayant une composante culturelle, comme une discipline contribuant à l'amélioration des capacités participant au développement de l'intelligence...

(Programme de mathématiques, p. 10)

- conduire l'élève à :

> Connaitre les caractères de la nature, l'homme en tant qu'être biologique et ses fonctions ; expliquer scientifiquement les lois et phénomènes naturelles dans les différentes sciences biologiques, géologiques et écologiques ; réaliser et interpréter des expériences pour la vérification de ces lois …

(Programme des sciences de la vie et de la terre, P. 9)

A la lecture de ces extraits de programmes de ces trois disciplines, bien que les termes d'inter-pluri- ou trans- disciplinarité n'apparaissent pas de façon explicite, les concepteurs de ces programmes n'excluent pas un travail pouvant s'appuyer sur une vision croisée entre ces disciplines scientifiques.

C'est en ce sens que nous nous sommes proposés de mener notre réflexion autour de l'enseignement de la stroboscopie dans un contexte de transdisciplinarité entre la physique, les mathématiques et la biologie.

III. PROBLEMATIQUE ET METHODOLOGIE

1. *Problématique*

Notre étude part du constat que la plupart des enseignants ne traitent pas le cours de stroboscopie, pourtant inscrit dans le programme. Pour notre part, nous considérons que cette notion constitue une interface entre plusieurs disciplines. Nous nous appuyons sur une mise en relation entre la physique, les mathématiques et la biologie pour proposer un enseignement de la stroboscopie en classe de terminale scientifique (élèves de 17-18 ans). L'approche que nous préconisons relève de la transdisciplinarité en ce sens que chaque discipline conserve sa spécificité et son indépendance. Cependant la mise en pratique d'une telle approche considérée comme un facteur favorable à la conceptualisation, ne va pas de soi et conduit à se poser quelques questions :

- Comment mettre en place un scénario pédagogique tenant compte de ces trois disciplines, toutes soumises à des contraintes fortes ?

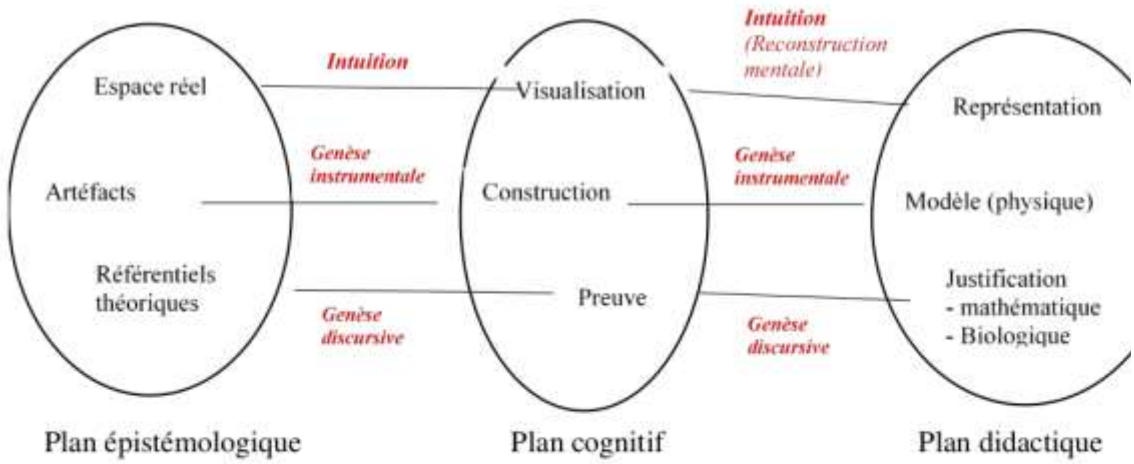
- Quelle est la part des mathématiques et de la biologie nécessaire à la compréhension du phénomène ?

2. Cadre théorique

La complexité des questions à traiter nous conduit à emprunter la notion d'Espace de Travail Mathématique (ETM) de Kuzniak (2011), qui considère que toute étude didactique suppose la description d'un Espace de Travail pour le domaine abordé. En mathématiques, la notion d'ETM s'appuie sur une articulation des plans épistémologiques et cognitifs à travers trois genèses :

- une genèse instrumentale qui permet de rendre opératoire les artefacts dans le processus constructif ;
- une genèse sémiotique basée sur les registres de représentation sémiotiques qui assure aux objets tangibles de l'ETM leur statut d'objets mathématiques opératoires ;
- une genèse discursive de la preuve qui va donner un sens aux propriétés pour les mettre au service du raisonnement mathématique.

Le caractère pluridisciplinaire de notre étude nous conduit d'envisager la construction d'un « Espace de Travail Transdisciplinaire » (ETT) à l'instar des ETM.



Le plan épistémologique est constitué d'un espace réel, des artefacts (lampe, disques) et de référentiels théoriques issus de la physique, de la biologie et des mathématiques.

Le plan cognitif est celui de la visualisation du phénomène (présenté au ralenti), de la construction de différents cas relatifs à l'apparition des points sur le disque et de la preuve.

Outre les plans épistémologiques et cognitifs des ETM, nous nous proposons de préciser le plan didactique comme cadre d'intelligibilité (Malonga, 2009, 2010) du phénomène étudié.

Ce cadre théorique devrait nous permettre de décrire le phénomène observé ainsi le scénario pédagogique conçu.

3. Méthodologie

Pour tenter de répondre à nos questions, nous examinons les possibilités d'une mise en place d'une expérimentation dans une classe de terminale scientifique ; nous nous envisageons un scénario découpé en plusieurs phases, comme l'indique le tableau ci-dessous :

Phase	Discipline	Action	Connaissances en jeu
1	Mathématiques	Etude d'une situation concrète périodique	Congruence, Fonctions périodiques, sinusoïde, représentation graphique
2	Biologie	Cours sur la représentation visuelle	Fonction de la rétine, persistance rétinienne
3	Physique	Caractéristique des phénomènes périodiques : formalisation	Mouvement circulaire, vecteur de Fresnel, différence de phase, avance, retard, opposition, quadrature de phase
		Cas de la stroboscopie	Fréquence : éclairs et disque tournant
4	Réinvestissement	Evaluation	

Tableau 1 *: organisation des enseignements selon les disciplines*

Les deux premières phases se déroulent indépendamment car elles n'ont aucun lien direct. En mathématiques, il est nécessaire de s'assurer que l'élève maîtrise les principales notions liées à l'étude des fonctions sinusoïdales et de congruence.

De même en biologie, il est important que l'élève ait déjà vu les caractéristiques de l'œil notamment celles liées à la rétine. C'est à ce niveau que l'on présente la notion de la persistance rétinienne c'est-à-dire la capacité de l'œil, pouvant être perçue comme étant un défaut aussi bien qu'un atout, consistant à ce que l'image observée soit gardée en mémoire par la rétine un court instant après l'observation.

C'est à la troisième phase (cours de physique) que les notions traitées en mathématiques et en biologie sont mises à profit. La préparation de ce cours de physique se fait par les enseignants des trois disciplines.

IV. L'ENSEIGNEMENT DE LA STROBOSCOPIE EN PHYSIQUE

Matériel :

- Deux disques en carton D1 et D2 d'un rayon donné ;
- Une lampe torche ;
- Un cylindre creux en carton dont le diamètre de sa base correspond à celui de la lampe torche ;
- Trois potences de taille différente réalisée en fil de cuivre (fil électrique) ;
- Un marqueur de couleur noire.

Déroulement

Au début de ce cours de physique, les élèves sont invités à suivre un extrait de film afin de remarquer le phénomène stroboscopique.

Etant donné que nous ne disposons pas d'un moteur électrique, ni d'un stroboscope, nous allons reproduire cette expérience au ralenti et avec du matériel de récupération. Prenons les deux disques en carton fixés par leur centre à une potence. Sur le premier disque, on marque un point noir à l'aide d'un marqueur et sur le second disque, on perce un trou de sorte que si l'on superposait les deux disques, ce trou coïncide avec le point noir. Tout est disposé de la manière suivante.

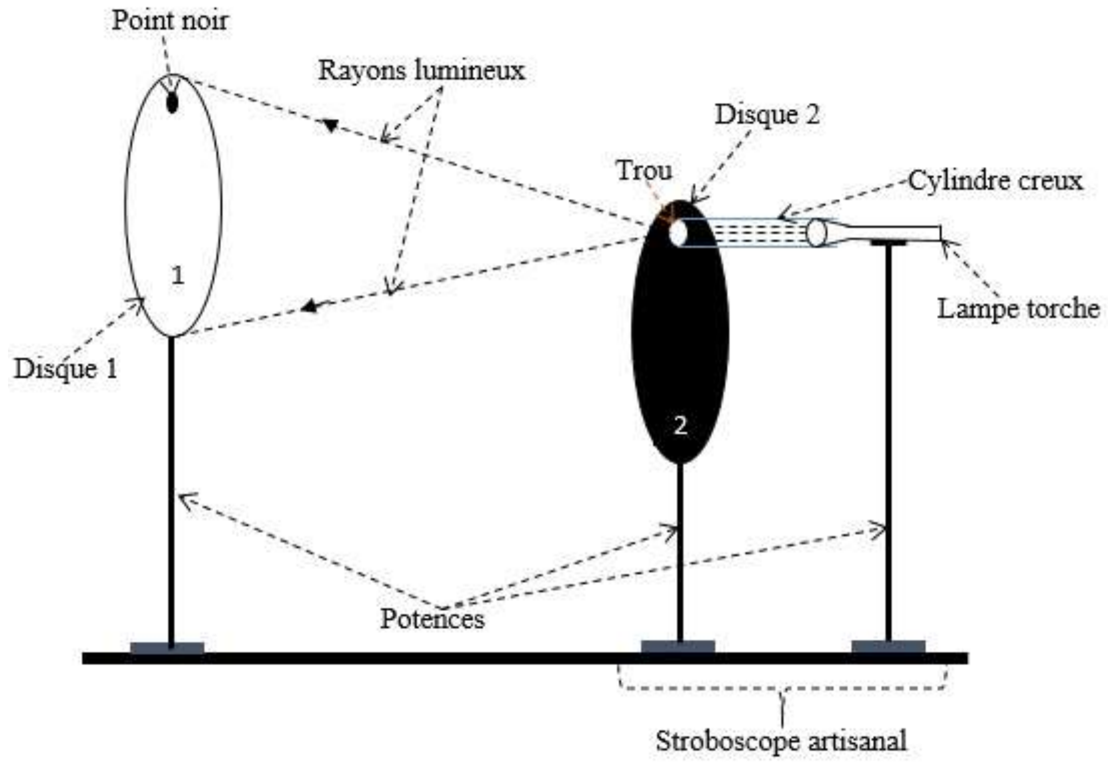


Figure 1 *: Dispositif expérimental*

La lampe torche est allumée en continue et le cylindre en carton empêche toute diffraction de la lumière sauf lorsque la base du cylindre creux coïncide avec le trou du disque 2 ; dans ce cas, le disque 1 sur lequel est marquée la tâche noire est éclairé.

Le disque 1 et le disque 2 tournent avec des fréquences de rotation respectives f et f_e. La fréquence f_e correspond à la fréquence des éclairs c'est-à-dire celle du stroboscope artisanal ainsi constitué.

- Si $f_e = \frac{f}{k}$ ou $T_e = k.T$ avec k un entier non nul, T la période de rotation du disque 1 et T_e celle du disque 2.

Entre deux éclairages consécutifs (intervalle de temps T_e), le premier disque effectue un nombre entier k de tours. Le point noir est toujours éclairé à la même position, le disque parait donc immobile.

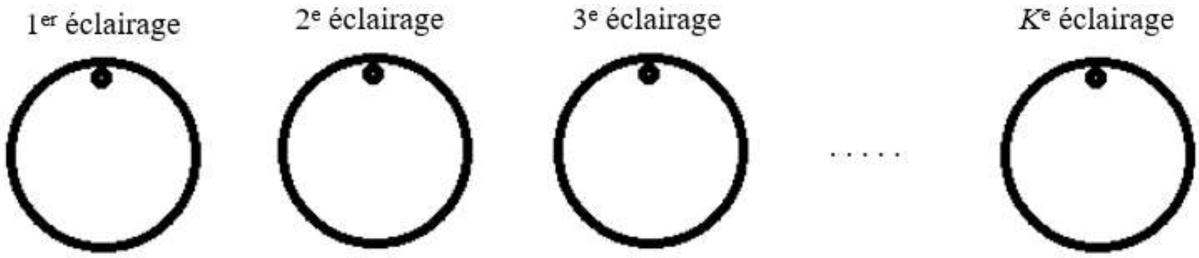


Figure 2 *: Immobilité du point noir*

Justification mathématique

Nous considérons un repère orthonormé (O, $\vec{\imath}$, $\vec{\jmath}$) placé au centre du disque 1. On suppose que le point noir est un point A auquel on associe le vecteur OA (vecteur de FRESNEL). La position de A peut être décrite par l'équation horaire $X_1 = acos(\omega_1 t + \varphi)$

avec $\|\overrightarrow{OA}\|$ = a, φ = $(\overrightarrow{ox}, \overrightarrow{OA}$ et la pulsation telle que ω_1 = 2π f_1 = $\frac{2\pi}{T_1}$.

En prenant l'axe (Ox) sur la verticale (A appartient à (Ox)), on a $X_1 = acos(\omega_1 t)$.

Par un jeu de translation, on trouve l'équation horaire du point associé au trou du disque 2. Ainsi on a $X_2 = acos(\omega_2 t)$

A l'instant t=T_e=kT, on a X_1 = X_2 = a ; ce qui justifie l'immobilité du point noir.

- Si $f_e \simeq \frac{f}{k}$ avec $f_e < \frac{f}{k}$ (ou $T_e \simeq k.T$ avec $T_e > k.T$)

Entre deux éclairages consécutifs, le premier disque effectue un peu plus de k tours : $\left(k + \frac{1}{n}\right)$ tours. L'observateur à l'impression qu'il n'a effectué que $\frac{1}{n}$ tours. Le disque semble tourner lentement dans le sens réel (sens du mouvement au départ).

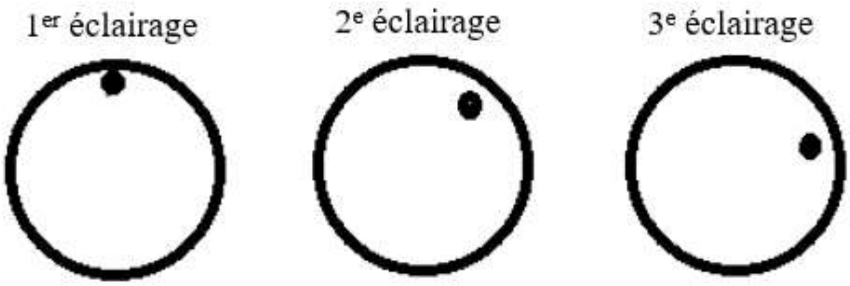


Figure 3 *: déplacement dans le sens des aiguilles d'une montre*

Justification mathématique

A l'instant t= T_e = $\left(k + \frac{1}{n}\right)$T,

X_2 $acos(\omega_2 T_2)$ = $acos(2\pi)$ = - a

X_1 $\omega_1 \left(k + \frac{1}{n}\right) T_1$] = $acos\left[2\pi\left(k + \frac{1}{n}\right)\right]$ = $acos\left(\frac{2\pi}{n}\right)$
$acos$

Or n>1 et pour tout entier naturel n, on a $X_1 < X_2$

On a l'impression d'un déplacement dans le sens des aiguilles d'une montre lorsqu'on augmente la vitesse de rotation du disque 1 c'est-à-dire qu'on fait varier les valeurs de n du plus petit au plus grand.

- Si $f_e \simeq \frac{f}{k}$ avec $f_e > \frac{f}{k}$ou $T_e \simeq k.T$ avec $T_e < k.T$

Entre deux éclairages consécutifs, le premier disque effectue un peu moins de k tours : $\left(k - \frac{1}{n}\right)$ tours. L'observateur a l'impression qu'il a effectué seulement $\frac{1}{n}$ tour en sens inverse. Le disque semble tourner lentement dans le sens inverse du mouvement réel.

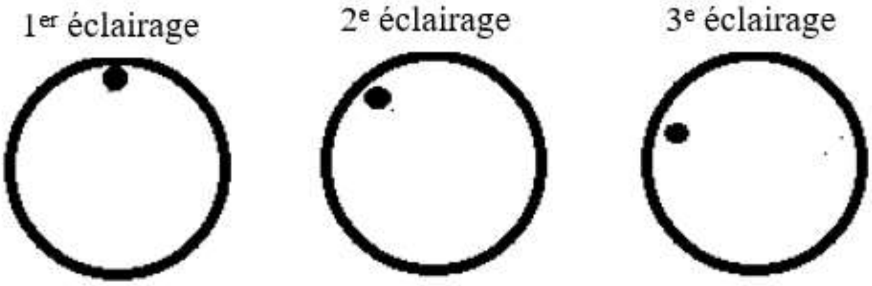


Figure 4 *: déplacement dans le sens contraire des aiguilles d'une montre*

Justification mathématique

La justification est la même que dans le cas précédent, c'est-à-dire qu'à l'instant

t= T_e = $\left(k - \frac{1}{n}\right)$T, X_2 = - a et $X_1 = a\cos\left(\frac{2\pi}{n}\right)$ et pour tout entier naturel n, on a $X_1 < X_2$

On a l'impression d'un déplacement dans le sens contraire des aiguilles d'une montre lorsqu'on diminue la vitesse de rotation du disque 1 c'est-à-dire qu'on fait varier les valeurs de n du plus grand au plus petit.

- Si $f_e = k.f$ ou $T = k.T_e$

A cause du fait que l'expérience se déroule au ralenti, entre deux éclairages consécutifs, le premier disque effectue $\frac{1}{k}$ tour. Le point noir est éclairé k fois par tour et apparait à différent endroits.

Exemple pour $k = 3$ on a :

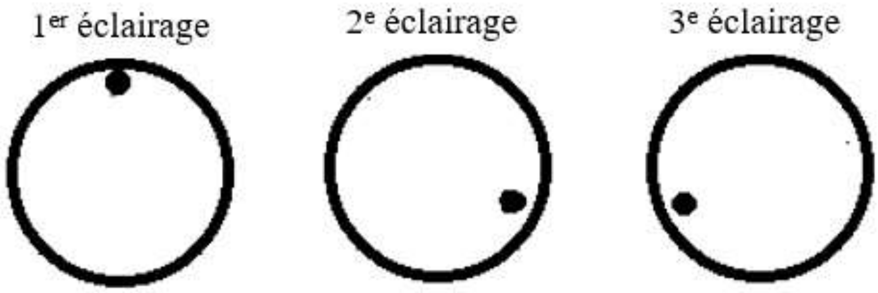


Figure 5 *: Différentes positions de la tâche noire*

Si l'expérience ne se déroule pas au ralenti et avec une période du second disque $T_e < 0{,}004s$ (temps limite pour obtenir une persistance des impressions rétiniennes[1]), à cause de la

[1] En Biologie on explique que : lorsqu'une image se forme sur la rétine, elle ne disparaît pas immédiatement mais reste "imprimée" environ un dixième de seconde avant que les cellules de la rétine redeviennent à nouveau sensibles à la lumière. Cette image est gardée quelque instant en mémoire, environ 1/25ème de seconde, même après sa disparition. Ce phénomène s'appelle la persistance rétinienne.

persistance des impressions rétiniennes, l'observateur a l'impression de voir le premier disque immobile portant k tâches noires (les trois images de la figure 5 ont fusionné).

Exemple pour $k = 3$ on a :

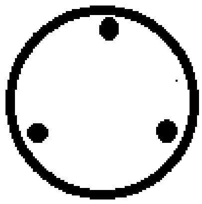


Figure 6 *: L'impression de percevoir 3 points noirs*

Par exemple sur un ventilateur en marche, il nous est impossible de distinguer les pales du ventilateur en mouvement. Mais quand on l'arrête, avant que ces pales ne s'immobilisent, on peut distinguer les pales tournées et se rendre compte qu'il y'a eu multiplication du nombre de pales à cause de la persistance des impressions rétiniennes.

V. SYNTHESE

L'espace réel permet la visualisation du phénomène décrit au ralenti. Un effort de reconstitution mentale est attendue chez l'apprenant pour pouvoir représenter sur son cahier les différents cas du phénomène (apparition de k points noirs sur le disque D1). Par ailleurs, le fait de présenter le phénomène au ralenti conduit à produire de façon pragmatique un premier niveau de preuve. Mais l'exploitation de la théorie physique en termes de « phase » et « déphasage » conduit à la mise en place d'un modèle (équations horaires) dont la justification est à la portée des élèves. Les mathématiques permettent d'expliquer la théorie de la persistance rétinienne.

VI. CONCLUSION

Deux Espaces de Travail Transdisciplinaires peuvent être dégagés : celui de l'enseignant et celui de l'élève. L'objectif de ce cours est de faire en sorte que les deux espaces soient proches, tant du moins de point de vue de l'élaboration du modèle que de la mise en œuvre des justificatifs mathématiques.

Ainsi, l'étude de la stroboscopie peut constituer une occasion de faire vivre aux élèves l'expérience d'un « dialogue » entre plusieurs disciplines scientifiques. L'activité proposée traduit une part de modélisation du phénomène des impressions rétiniennes et permet de montrer l'intérêt et la puissance des mathématiques au service de la physique et de la biologie.

RÉFERENCE

INRAP (2002) Programmes scolaires. Ministère de l'Enseignement Primaire, Secondaire et de l'Alphabétisation.

KUZNIAK A. (2011) L'espace de Travail Mathématique et ses genèses. *Annales de didactique et de sciences cognitives*, 2011, 16, 9-24.

MALONGA MOUNGABIO F. & BEAUFILS D. (2010) Modélisation et registres sémiotiques : exemple d'étude de manuels de physique de terminale. *Revue de didactique des sciences et de technologie*, Vol. 1, n°1, 293-316

MALONGA MOUNGABIO F. (2009) Les équations différentielles à l'interface mathématiques - physique : praxéologie et jeux de cadres de rationalité dans les manuels de terminale S. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, Vol. 29, n°3, 335 – 357..