

Doppler et Römer : physique et mathématique à l'œuvre

par **Jean-Luc LEROY-BURY**

Lycée Notre-Dame de Bury - 95580 Margency

leroy-bury@laposte.net

et **Laurence VIENNOT**

Université Denis Diderot- Paris 7

Laboratoire de didactique des sciences physiques (LDSP)

viennotl@ccr.jussieu.fr

RÉSUMÉ

L'effet Doppler intervient dans un nombre considérable de domaines, et se présente comme un sujet très riche pour des projets de recherche personnelle, TPE (Travaux personnels encadrés) en première et terminale, TIPE (Travaux d'initiative personnelle encadrés) en classes préparatoires, ceci alors qu'il est peu enseigné même au niveau universitaire. Ce manque relatif dans l'enseignement classique et la richesse potentielle du thème incitent à l'explorer dans des cadres moins académiques, et au carrefour de plusieurs disciplines. Cet article appuie tout particulièrement l'idée d'un double éclairage, mathématique et physique. Il s'agit de donner un exemple de thème de travail articulé entre ces deux disciplines, qui mène à des conclusions intéressantes, notamment parce qu'il donne du sens entre autres aux notions de périodicité, de vitesse et de célérité, de fonction linéaire, de changement de variable, de pente, de tangente, d'algébrisation (des déplacements et vitesses). De plus, cet exemple associe de manière originale l'effet Doppler et la découverte de Römer sur le caractère fini de la vitesse de la lumière.

1. INTRODUCTION

Il est un phénomène physique dont les manifestations ont permis des avancées considérables dans un nombre non moins remarquable de domaines : l'effet Doppler⁽¹⁾. En vertu d'une hiérarchie éminemment variable selon les personnes, on citera d'abord la compréhension de l'expansion de l'univers, *via* ce que l'usage scientifique a consacré sous le terme anglais « redshift », ou bien les dommages créés dans les permis de conduire à points par suite d'excès de vitesse, le bruit modulé que fait une voiture de course au passage devant une tribune, les mesures de mobilité des spermatozoïdes de taureau, ou encore les échographies médicales détectrices de vitesses - celles des battements du cœur du fœtus

(1) C'est en 1842 que le physicien autrichien C. DOPPLER expliqua la modification de hauteur d'un son associée au mouvement relatif entre source et observateur. Six ans plus tard, FIZEAU exploita la même idée pour prévoir la détection de décalages de longueur d'onde dans les spectres stellaires.

par exemple - ; autant de situations où la fréquence du signal reçu est affectée par le mouvement de la source et/ou du récepteur par rapport au milieu de propagation.

Sujet rêvé pour des projets de recherche personnelle, TPE en première et en terminale, TIPE en classes préparatoires, c'est aussi un thème, on vient de l'apercevoir, hautement favorable aux rencontres interdisciplinaires.

Pour autant, ce n'est pas un sujet que l'on enseigne, ou si peu. On en voit quelques traces dans les licences interdisciplinaires, ici ou là. À travers quelques audacieuses fins de chapitre en seconde, on voit bien des longueurs d'ondes qui jusque là étaient pratiquement définies par leur position dans un spectre et qui, on ne sait pas trop bien comment, sont reconnues et dénoncées à une autre position, témoignant ainsi de la vitesse d'éloignement d'un quasar, formule fatidique à l'appui. À l'université, l'enseignement de la relativité rencontre parfois celui de l'effet Doppler relativiste, tandis que celui des ondes ne s'arrête pas sur un effet aussi banal. C'est encore l'enseignement préparatoire aux études médicales qui fait la plus juste place à cet effet [1].

Peut-être justement ce manque relatif dans l'enseignement classique est-il une raison de plus de souhaiter croiser ce thème dans des cadres moins académiques, et au carrefour de plusieurs disciplines.

Ce texte s'emploie à appuyer toute démarche allant dans ce sens, et tout particulièrement une rencontre entre mathématique et physique. Cette bi-disciplinarité là est moins évidente que celles suggérées par les exemples précédents, qui impliquent fortement les sciences de la vie. Et pourtant nous souhaitons convaincre le lecteur qu'un double éclairage math-physique peut fonctionner ici de façon très pertinente.

Après un bref résumé des difficultés communément observées dans la compréhension de ce phénomène, en contrepoint avec quelques faits d'observation courante dans l'enseignement, nous proposons de façon argumentée une proposition de présentation de cet effet, et terminons par quelques éléments traduisant l'impact de celle-ci sur des étudiants et sur des professeurs stagiaires en deuxième année d'IUFM (Institut universitaire de formation des maîtres).

2. CONTEXTE ET DIFFICULTÉS

2.1. La propagation au lycée

L'étude de la propagation des ondes mécaniques fait sa réapparition dans l'enseignement secondaire au niveau de la classe de terminale S. Avant 1994, cette notion était introduite en classe de première S, et il s'agissait avant tout de faire étudier aux élèves des expériences de propagation de signaux variés soit à l'aide d'une représentation spatiale - l'état à un instant donné du milieu de propagation, pour chaque point de l'espace, sorte de photographie du signal - soit à l'aide d'une représentation temporelle - description de l'évolution dans le temps de l'état du milieu en un point particulier. Toute maî-

trise du formalisme mathématique associé à l'équation des ondes et à ses solutions était quant à elle « repoussée » dans l'enseignement supérieur.

Des études [2] sur les raisonnements communs des élèves et des étudiants à propos de la propagation des signaux sur une corde - ou de celle du son - ont mis en évidence une tendance marquée à considérer le signal comme un objet physique ordinaire, doué de propriétés dynamiques qui rappellent celles d'un objet en mécanique du solide. Ainsi, les élèves établissent-ils souvent un lien inapproprié entre l'intensité du signal et sa vitesse - un son qui s'atténue serait un son qui ralentit - et le milieu devient un support « passif » voire une gêne pour son « déplacement ». Ces études ont débouché sur des spécifications d'objectifs et sur la proposition [3] de faire, dans l'enseignement, une comparaison très explicite entre le déplacement d'un mobile et la propagation d'une perturbation.

Le programme 2001 pour la classe de terminale S prend acte, semble-t-il, de ces difficultés, au moins par une prudente limitation de ses intentions [4] :

« Les ondes comme phénomène sont omniprésentes et familières, mais leur constitution comme phénomène physique pose des difficultés bien connues dues à leur nature pour ainsi dire insaisissable : “ quelque chose ” se déplace, qui contient de l'information et de l'énergie, mais ce n'est pas la matière ».

Et puisqu'il s'agit d'une « première approche du phénomène... » :

« ...le formalisme est réduit au minimum, l'accent étant mis sur la phénoménologie ».

Cela conduit à proposer d'une part l'exploitation :

« ...d'un document expérimental (chronophotographie, vidéo) donnant l'aspect de la perturbation à des dates données en fonction de l'abscisse »,

et d'autre part la mise en œuvre :

« ... d'un document expérimental (oscillogrammes, acquisition de données avec un ordinateur...) obtenu à partir de capteurs délivrant un signal lié à la perturbation et donnant l'évolution temporelle de la perturbation en un point donné ».

Le BO souligne dans ses commentaires que :

« Toute représentation mathématique de la forme $y = f(x, t)$ est hors programme ».

« Toute construction donnant le mouvement d'un point du milieu à partir de la représentation spatiale de l'onde, et réciproquement, est hors programme (...) ».

Établir une correspondance entre le temps et l'espace est évidemment l'un des points les plus délicats. Ces difficultés, que les recherches déjà citées mettent en relation avec une tendance à la matérialisation des phénomènes, en rejoignent d'autres liées à la représentation, à toute une culture de l'image fixe, et à la primauté, habituelle dans l'enseignement, des formes géométriques, y compris celles des trajectoires, sur les graphes de fonctions du temps.

Au carrefour de ces deux aspects - tendance à considérer les concepts comme des objets matériels et préférence pour leur géométrisation -, un risque est que la longueur

d'onde n'endosse sinon le rôle d'un objet qui « voyage » du moins celui d'une caractéristique purement géométrique de cet « objet » - la longueur (intrinsèque ?) de l'onde⁽²⁾. L'association établie en seconde⁽³⁾ avec un autre élément géométrique - de définition celui-là : une raie sur un spectre - n'est pas pour ôter de la rigidité aux premiers rudiments acquis à son propos.

Terrain d'ancrage conceptuel difficile, donc, pour cet effet Doppler.

2.2. Plus spécifiquement : problèmes liés à l'effet Doppler

L'association étroite de l'effet Doppler avec les phénomènes ondulatoires laisse prévoir le même genre de difficulté de compréhension que celles évoquées ci-dessus. Ce dont il est question plus spécifiquement, c'est de la modification de la fréquence reçue d'un signal dès lors qu'une source et un observateur sont en mouvement relatif. Or, des recherches en didactique [5] sur le changement de référentiel (voir notamment [6]) ont depuis longtemps établi que les approches cinématique et géométrique n'étaient pas facilement conciliées. Cette difficulté apparaît aussi bien dans le registre graphique que dans celui du langage.

2.3. Images pour l'effet Doppler : non évidence

Le recours aux images fixes pour illustrer l'effet Doppler est incontournable dans les livres, mais la lecture de tels documents n'est pas sans poser question. Les essais d'illustration que l'on trouve dans les ouvrages de physique en témoignent largement.

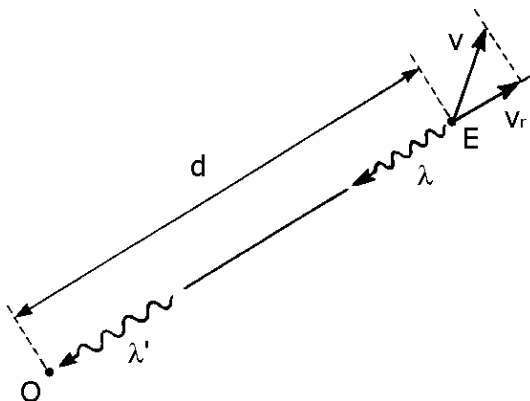


Figure 1 : Une image pour illustrer l'effet Doppler [7].

- (2) Une enquête (LEROY-BURY, communication personnelle) sur les raisonnements des élèves de seconde à propos des spectres lumineux montre de manière significative que la longueur d'onde est tantôt considérée comme une position d'un objet « raie-radiation » dans un spectre, cet objet pouvant éventuellement changer de position, tantôt comme la longueur (dimension) de la « raie-radiation ».
- (3) Programme de physique et chimie pour la classe de seconde, BO n° 6, 12 août 1999.

Ainsi, considérons l'image de la figure 1. Celle-ci accompagne un texte présentant l'effet Doppler-Fizeau. Le même type d'image est également présenté dans un autre ouvrage récent d'initiation à l'astrophysique [8].

Les signaux sont représentés par des trains d'onde, distingués sur le dessin par leurs « longueurs d'ondes » λ et λ' , si bien que le pas risque d'être vite franchi vers une géométrisation non maîtrisée, et une interprétation en termes de modification de longueur d'onde en cours de route. L'accent mis simultanément sur la distance qui sépare émetteur et récepteur ainsi que l'absence de référence explicite au temps ne sont pas pour enrayer une sélection exclusivement géométrique des paramètres jugés pertinents. C'est ce que confirme une enquête à ce sujet.

L'image a été présentée sans légende ni texte à une douzaine d'étudiants en deuxième année d'IUFM. Après un bref rappel du contexte (effet Doppler), et une question sur leur appréciation des risques d'incompréhension liés à cette image, leurs premières remarques ont été recueillies sur papier libre. Celles-ci peuvent se résumer comme suit :

- ◆ La présence de d (la distance) sur le schéma trouble la lecture de l'image et donne de l'importance à un paramètre qui pourtant n'en a pas :
 - le fait que la distance d est indiquée sur le schéma pourrait faire penser que cette distance influe sur λ' reçue alors que seule V_r intervient dans le calcul de λ' .
- ◆ Le « train d'onde » devient un *objet* qui se « transforme », phénomène accentué par la confusion des référentiels :
 - représentation des ondes : on a l'impression que λ est constant pendant un certain temps puis on ne sait pas ce qui se passe puis λ' apparaît ;
 - on a l'impression qu'au cours de son trajet l'onde s'étire progressivement dans un même référentiel (celui de O) ;
 - passage de λ à λ' bizarre ? ça fait magique.

Cette même image a été proposée lors d'un entretien à un enseignant chargé de TD pour une licence pluridisciplinaire scientifique⁽⁴⁾, avec cette fois pour objectif de reconstruire le discours qui pourrait bien l'accompagner... Là encore, les difficultés ne manquent pas :

- ◆ Le problème de la représentation de la distance d , grandeur non pertinente pour l'effet Doppler :
 - « Et... mais sinon on indique la grandeur d (distance entre O et E)... en fait elle n'est pas pertinente ! (...) les gens auront tendance à dire E (l'émetteur) est à une certaine distance de l'observateur... ».
- ◆ Le problème d'un référentiel mal défini et l'absence de repère dans le temps :
 - « Parce qu'il faudrait bien savoir... oui c'est ça quand même qui est un peu... peut

(4) Cette licence comporte des enseignements de physique, chimie et mathématiques, par la suite, les étudiants se destinent principalement au professorat des écoles. L'effet Doppler y est enseigné dans le cadre d'un cours sur les ondes.

être... ennuyeux, c'est que autour du point O, le dessin est fait dans le repère fixe lié à O, tandis qu'autour du point E le dessin serait dans le repère mobile lié à E. Hein et... cela n'apparaît absolument pas sur le dessin que les deux choses sont faites dans des repères différents ».

– « Voilà... on ne précise pas que E est dans un autre repère... et surtout que dans cet autre repère, on est à une date différente... hein il y a... le temps retardé n'apparaît pas ».

◆ et des incohérences sont inévitables faute de repère spatio-temporel clair :

– « Donc le... celui qui réfléchit va se dire oui mais pendant que E bouge les ondes il faut qu'elles tournent tout le temps... autrement dit, ce que reçoit le point O ce n'est pas l'onde visualisée par λ sur le dessin... hein parce que quand l'onde λ' arrive en O, ...c'est une onde qui ne vient pas du point E tel qu'il est dessiné sur le papier... ».

– « ...les photons ou je ne sais pas quoi... euh... λ' qui arrive en O, ont été émis par un point E' qui n'est pas visualisé sur le dessin ».

2.4. La cause d'un changement : une grandeur qui change

L'aspect graphique n'est pas le seul registre de difficultés dans l'enseignement et l'apprentissage de l'effet Doppler. L'ambiguïté de certaines expressions peut entrer en résonance avec le raisonnement commun pour renforcer l'importance accordée à la distance entre émetteur et récepteur. Cela peut mener à considérer que l'écart observé entre fréquence reçue et fréquence émise est fonction de l'éloignement entre source et observateur, ce qui n'est pas inscrit dans le principe de l'effet Doppler⁽⁵⁾.

En effet, lorsqu'il s'agit de comprendre l'origine d'une transformation, l'une des procédures les plus communément mises en œuvre est la recherche des grandeurs physiques qui permettront d'une part, une description simplifiée du phénomène et, d'autre part, un paramétrage de son évolution. Cette dernière opération consiste à distinguer parmi les grandeurs physiques pertinentes celles qui sont invariantes de celles qui varient, en essayant d'établir des correspondances fonctionnelles. Or, la structure préférentielle du raisonnement commun est celle d'une *chaîne causale linéaire* [9] où, notamment, la variation d'une (seule) grandeur détermine celle d'une (seule) autre grandeur. Cet aspect complète ici les mécanismes réducteurs de la géométrisation, comme on peut le constater dans ce petit extrait d'un dialogue engagé autour de la figure 1 entre un professeur et ses étudiants en module de pré-professionnalisation de licence de sciences physiques :

– *P (enseignant)*- Quel est le facteur qui vous semble, euh, justifier, qu'est-ce qui fait qu'il y a cette transformation ?

– *Et .C*- C'est à cause de la distance, on dirait...

(*explications du professeur sur la non-pertinence de la distance, résistance de l'étudiante*).

(5) Même si, en astrophysique, le lien cosmologique entre vitesse d'éloignement et distance se traduit par une dépendance de fait entre décalage spectral et distance de la source.

- *Et .C-* Mais là, la vitesse, elle est constante, enfin... (...) Parce que si elle est constante la vitesse, enfin, je sais pas si ça change λ , quoi.
- *P-* C'est-à-dire que vous, si la vitesse est constante, la vitesse d'éloignement, vous vous demandez si ça change λ (...) ?
- *Et .M-* Ben moi je comprends pas trop comment elle peut dépendre de la vitesse et puis quand la vitesse est constante, (...) ...euh, elle change.
(...)
- *Et .C-* C'est que... si c'est fonction de la vitesse, et que la vitesse varie, donc ça veut dire qu'en E et en O, y aura pas la même vitesse, donc automatiquement λ sera pas le même.
(...)
- *Et .C-* Pour moi, il y a une grandeur λ et puis après on regarde par exemple au point E, et après on regarde au point O, et pour moi, si, cette grandeur, elle est fonction de v, et ben en fait, en E et en O elle va être la même si v est constant.

C'est la recherche de liens simples de cause à effet qui amène à conclure que, puisque la vitesse est constante et que la distance d change, alors la modification de la longueur d'onde λ ne peut être imputée qu'à la seule variation de distance : il semble alors qu'il y ait dépendance fonctionnelle entre la longueur d'onde et la distance et, surtout, que l'on ne puisse envisager de dépendance entre la longueur d'onde, qui change, et la vitesse, qui ne change pas.

Il faut reconnaître que les explications souvent fournies et l'importance qu'y prennent les aspects spatiaux favorisent ce type de glissement :

« L'effet Doppler-Fizeau affecte la durée qui sépare deux événements, durée que perçoit un observateur animé d'un mouvement par rapport au système dans lequel se produisent ces événements, parce que l'information concernant ceux-ci se transmet à l'observateur à une vitesse finie : entre les deux événements, la distance entre la source et l'observateur a varié et la durée du parcours de chacun des deux signaux n'est donc pas la même. En particulier, l'effet Doppler-Fizeau modifie la période d'un signal périodique » [10].

Une lecture « *linéaire causale* » de ce texte au demeurant correct conduit à envisager la relation causale : *variation de distance* → *modification de durée* → *modification de période/fréquence* ; ainsi s'établit - à tort - une correspondance fonctionnelle entre la distance elle-même (et non pas son taux horaire de variation) et la fréquence d'un signal.

La facilité de tels glissements peut aussi s'interpréter par l'une des confusions que le langage commun favorise entre « être loin » et « s'éloigner », d'une part, « plus tôt » et « plus vite », de l'autre. Ceci est illustré par un extrait de cours magistral sur l'effet Doppler - cours donné dans le cadre d'un enseignement sur les ondes pour une licence pluridisciplinaire ⁽⁶⁾.

(6) Il s'agit d'étudiants qui possèdent une bonne culture en sciences mais qui ne se destinent pas à poursuivre des études scientifiques ; dans ce contexte, les cours ont un formalisme « allégé » et sont davantage axés sur les aspects qualitatifs de la physique.

« ... y a un intervalle de temps T entre ces deux signaux, mais comme ici c'est parti de plus près par rapport au récepteur... ça va arriver plus vite que (...) ... que l'intervalle de temps T . Hein ? ... puisque c'est parti de moins loin. Ça va ça ? ...ça va arriver plus vite puisque c'est parti de moins loin par rapport à R (récepteur) ».

En même temps que se construisait au tableau le schéma, une « histoire » était racontée pour le faire vivre, c'est-à-dire pour introduire la dimension temporelle. Mais ce pivot du raisonnement : « ça va arriver plus vite puisque c'est parti de moins loin » n'est pas sans ambiguïté, quand la vitesse et la cadence sont des notions si fréquemment confondues verbalement.

On peut mettre en regard de cette analyse les réponses des étudiants concernés par ce cours ⁽⁷⁾, consultés *via* un questionnaire papier-crayon ⁽⁸⁾. L'importance de la distance est particulièrement mise en lumière dans les arguments fournis. On demande de comparer entre elles les fréquences reçues des signaux en provenance de A ou de B puis de les comparer avec la fréquence du signal émis F_0 , la même pour les deux sources. Les résultats (*cf.* tableau 1) montrent de manière significative l'influence de la distance dans le choix des réponses puisque seulement une moitié des étudiants admet que les fréquences en provenance de S_a et S_b , sources de même vitesse par rapport au récepteur mais à distances différentes (*cf.* figure 2, situation 2), sont identiques.

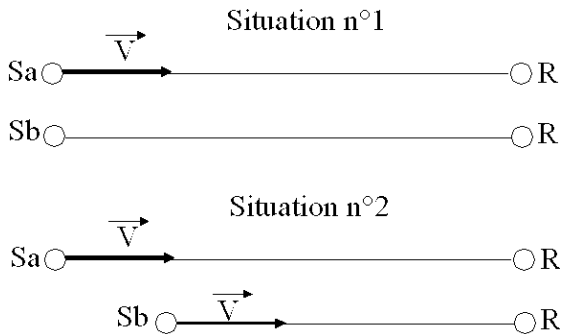


Figure 2 : Schémas présentés dans le questionnaire.

Pour la situation 2 (*cf.* figure 2) qui nous intéresse particulièrement ici, les réponses ont été justifiées dans 88 % des cas (année 2001), et on constate que :

- ◆ 18 étudiants soit 30 % seulement donnent deux réponses correctes ($F_a = F_b$ et $F_a > F_0$), parmi eux :
 - 4 indiquent explicitement l'indépendance de l'effet Doppler par rapport à la distance ;
 - 6 raisonnent avec l'aide des « formules ».

(7) Le lecteur voudra bien comprendre qu'il ne s'agit pas d'évaluer les compétences de l'enseignant mais d'illustrer un mode de raisonnement « naturel » qui surgit bien volontiers dans les discours de type qualitatif à l'appui de schéma.

(8) Après enseignement, en examen, la première année, en simple enquête la seconde.

Résultats :		Situation n° 2 :		Situation n° 1 :	
		effet de la distance ?		effet de la vitesse ?	
	Effectif	$F_a = F_b$	$F_a > F_0$	$F_a > F_b$	$F_a > F_0$
Année 2001	60	50 %	63 %	78 %	63 %
Année 2002	34	53 %	62 %	62 %	71 %

Tableau 1 : Pourcentage⁽⁹⁾ des sélections correctes pour chaque situation de la figure 2.

- ◆ 35 étudiants soit 69 % donnent au moins une réponse incorrecte sur deux ($F_a = F_b$ ou $F_a > F_0$), parmi eux :
 - 8 confondent le temps de propagation avec la période ;
 - 12 se fondent sur la distance ;
 - 4 indiquent que la fréquence ne change pas puisque la vitesse est constante ;
 - 2 utilisent une formule de manière erronée.

En résumé, si, dans 8 % des cas, la distance est signalée comme n'entrant pas en ligne de compte pour choisir la réponse, elle intervient directement ou indirectement (le temps de trajet étant confondu avec la période) dans 38 % des justifications (N = 53).

En plus des commentaires recueillis, des entretiens (avec quatre étudiants de la session 2002) permettent de compléter et de préciser ce tableau.

2.5. Des difficultés liées à l'expérience commune d'une modulation de fréquence : la parallaxe négligée au profit de la distance

Parmi les expériences le plus communément partagées de l'effet Doppler, il y a celle de la modulation de la fréquence du son émis par un véhicule en mouvement relatif - qu'il s'agisse de klaxons, sirènes ou bruits de moteur - et dont l'écoute attentive fournit encore un élément supplémentaire pour relier la distance avec la fréquence. Cela tient au fait que la parallaxe entre la direction d'observation (cf. figure 3) et la direction du déplacement de la source est très facilement négligée jusque et y compris lorsque le véhicule passe à côté de l'observateur pour le dépasser ensuite.

En effet, les variations de fréquence deviennent en fait des changement continus de fréquence si on prend réellement en compte le terme en $\cos(\phi)$ - où ϕ est l'angle entre la direction de déplacement et celle d'observation - en facteur du rapport des vitesses V_s/V_ϕ . Cet angle dépend bien évidemment de la distance entre l'observateur et la source, ceci d'autant plus que la source est près du récepteur. Or, dans de nombreuses démonstrations, on ne considère que la composante radiale - parallèle à la direction d'observation - de la vitesse, composante dont la valeur dépend éventuellement de la distance entre l'observateur et la source, mais dans ce cas la « formule » obtenue ne met pas en évi-

(9) Les pourcentages indiqués n'ont pas de valeur statistique stricte (effectif trop faible) mais facilitent grandement la présentation des orientations générales des réponses pour la population interrogée.

dence, à elle seule, le changement continu de l'angle ϕ et la dépendance de la fréquence du signal reçu à la distance entre source et récepteur (seul y figure l'angle ϕ). Paradoxalement, le fait d'expérience commune qui n'est pas traduit visiblement dans la « formule » prend alors le statut d'une propriété complémentaire, comme on a pu l'observer chez les étudiants de licence consultés à propos d'un train que l'on entend se rapprocher.

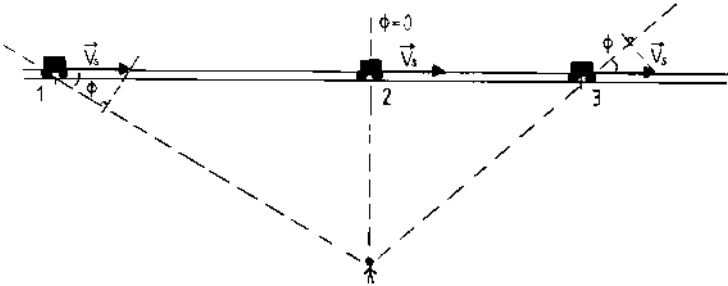


Figure 3 : Effet de la parallaxe sur la modulation de fréquence.

3. PROPOSITION POUR UNE PRÉSENTATION GRAPHIQUE DE L'EFFET DOPPLER

3.1. Raisons et éléments de base de la proposition

Ce rapide tour d'horizon permet déjà de situer les principaux obstacles auxquels s'attendre si l'on prétend faire comprendre l'effet Doppler à un public non initié à ce sujet.

Le premier intérêt de ce type de constat est d'éclairer des propositions. La nôtre, brièvement décrite ci-dessous, prend appui, en écho aux analyses précédentes, sur les idées suivantes.

- ◆ Nous considérons l'aspect graphique comme essentiel pour clarifier les ambiguïtés liées au langage courant et éviter leur résonance avec l'analyse communément préférée.
- ◆ La dimension temporelle doit faire partie des représentations graphiques associées à l'introduction du thème, et apparaître dans sa continuité. Expliquons-nous : tant que le temps ne figure que par la mention de quelques dates - émission 1, réception 1, émission 2, réception 2 - le risque est important, nous semble-t-il, d'une lecture dominée par la vision géométrique des distances. La manière de réaliser une figuration graphique possédant ces caractéristiques s'impose : un graphe de fonction de temps. Pour simplifier, on peut raisonner à une dimension, laissant pour plus tard le dernier des problèmes que nous évoquons : la parallaxe éventuelle. Notre proposition met donc en jeu des graphes $x(t)$, x désignant une position et t le temps.
- ◆ La question du référentiel se présente immédiatement. Le signal se propageant avec une célérité c dépendant du milieu de propagation, lequel peut bien être autre que le vide, nous choisissons de considérer déplacements et vitesses (V_s et V_R vitesses respectives de la source et du récepteur) par rapport au milieu de propagation.
- ◆ Pour éviter toutes les difficultés que peut apporter la compréhension de ce que repré-

sente une onde, et encore plus un train d'onde (vermicelle chosifié ?), nous proposons de travailler d'abord avec des « tops », ce qui est d'ailleurs courant. Cet article ne détaille que cette phase d'analyse, car, sur le passage de tops aux extrema d'amplitude d'une onde, notre proposition n'apporte rien de particulier⁽¹⁰⁾.

- ◆ Enfin, le passage à plusieurs dimensions est confié aux méthodes habituelles. Notre proposition n'aborde pas non plus l'effet Doppler relativiste, même si les graphes horaires qu'elle met en avant annoncent les lignes d'univers de la relativité restreinte.

3.2. En pratique

Une première image peut être introduite pour illustrer le fait que la célérité des signaux considérés (c ⁽¹¹⁾) ne dépend que du milieu, et non, par exemple, de la vitesse de la source par rapport à ce milieu. La figure 4 illustre cette proposition : un tapis roulant à vitesse constante par rapport au milieu emporte les traces d'encre déposées par une pointe fine (la source) à intervalle de temps régulier (la période d'émission). Un lecteur optique enregistre l'arrivée des dites taches. La pointe source peut bien se déplacer entre deux dépôts, cela ne change rien à la vitesse de transport des taches par rapport au milieu de propagation considéré.

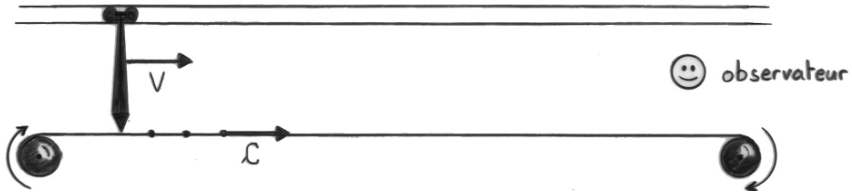


Figure 4 : Une illustration de l'indépendance de la célérité du signal par rapport au mouvement de la source : une pointe qui dépose des taches sur un tapis roulant.

Une fois considérée comme acquise l'invariance de c dans notre problème, des graphes de fonctions affines $x = x_i + c(t - t_i)$ servent de base à l'introduction de l'effet Doppler, à une dimension. Tous reposent sur le fait qu'un signal, disons ici un « top », voyage dans le milieu de propagation à la célérité c , à partir de l'abscisse x_i et de l'instant t_i . Le devenir d'une série de tops (i) émis à intervalles réguliers - la période d'émission T_s - par rapport au milieu de propagation se représente dans un tel graphe « horaire » par une série de demi-droites inclinées de pente c , partant de points équidistants de l'axe des temps, d'abscisses t_i .

Le premier cas envisagé est celui où ni la source ni le récepteur ne se déplacent par rapport au milieu (cf. figure 5).

(10) Il apparaît cependant une difficulté chez les étudiants (étude en cours) pour traiter de manière homogène les cadences de salves de trains d'onde, d'une part, et les fréquences de chaque train d'onde, d'autre part.

(11) Nous adoptons ici cette notation souvent conseillée, non sans quelques doutes sur son opportunité étant donné qu'elle désigne aussi la constante fondamentale que l'on sait.

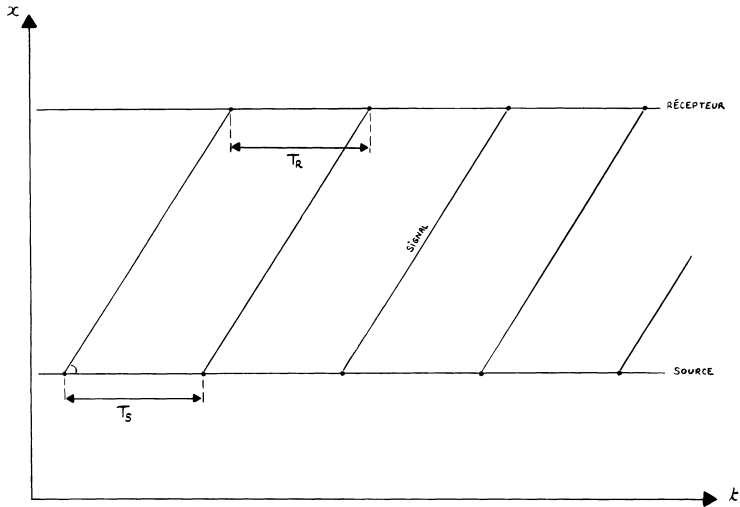


Figure 5 : Graphe horaire du déplacement de signaux émis à intervalles réguliers par une source immobile par rapport au milieu, et reçus par un observateur également immobile par rapport au milieu : la période de réception est égale à la période d'émission.

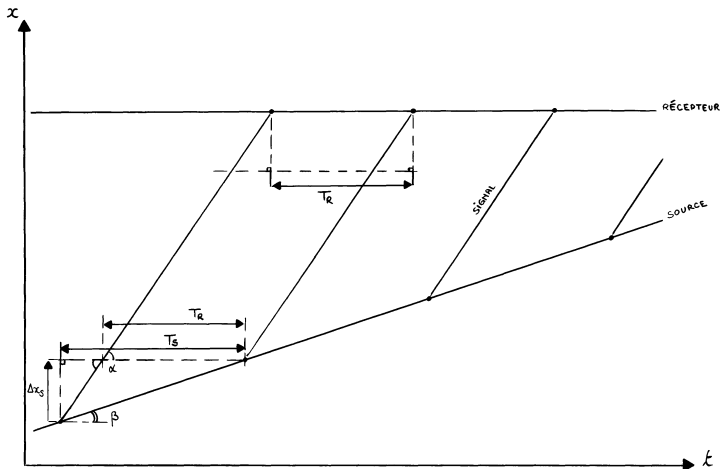


Figure 6 : Graphe horaire du déplacement de signaux émis à intervalles réguliers par une source qui se déplace à vitesse constante v par rapport au milieu, et reçus par un observateur immobile par rapport au milieu : la période de réception T_r est inférieure à la période d'émission T_s . Le déplacement de la source pendant la période T_s , Δx_s , s'exprime de deux façons :

- $\Delta x_s = v T_s = c(T_s - T_r)$,
- soit, en posant $u = -v$, pour exprimer une vitesse d'éloignement, $(T_r - T_s) / T_s = u/c$.

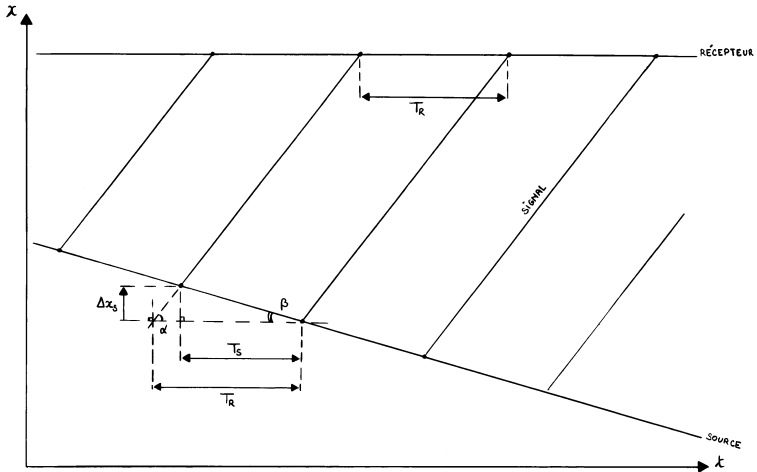


Figure 7 : Graphe horaire pour une situation analogue à celle traitée en figure 5, la source s'éloignant cette fois de l'observateur : la période de réception T_R est supérieure à la période d'émission T_S . Comme pour la situation de la figure 5, le déplacement de la source pendant la période T_S , Δx_S , s'exprime de deux façons :

- $\Delta x_S = v T_S = c(T_S - T_R)$;
- soit, en posant $u = -v$, pour exprimer une vitesse d'éloignement, $(T_R - T_S) / T_S = u/c$.

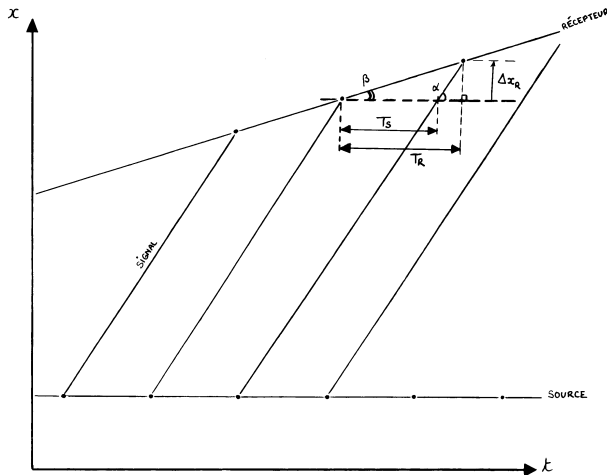


Figure 8 : Graphe horaire du déplacement de signaux émis à intervalles réguliers par une source immobile par rapport au milieu, et reçus par un observateur qui s'en éloigne à vitesse constante u par rapport au milieu : la période de réception T_R est supérieure à la période d'émission T_S . Le déplacement de l'observateur pendant la période T_R , Δx_S , s'exprime de deux façons :

- $\Delta x_R = u T_R = c(T_R - T_S)$;
- soit $(T_R - T_S) / T_R = u/c$.

Il apparaît bien clairement sur une telle représentation que la période de réception est alors égale à celle d'émission : il n'y a pas d'effet Doppler.

Les graphes représentés en figures 6 et 7 correspondent respectivement aux situations où la source se déplace par rapport au milieu, soit en se rapprochant, soit en s'éloignant de l'observateur, lequel est fixe par rapport au milieu.

La figure 8 représente de la même façon la situation d'un observateur qui s'éloigne de la source, laquelle est fixe par rapport au milieu, le cas d'un rapprochement se traitant de manière analogue.

L'analyse peut débuter par des constats visuels : selon les cas, la période de réception est égale, inférieure ou supérieure à la période d'émission. Elle permet d'établir simplement les relations entre ces périodes. Il suffit pour cela d'exprimer le déplacement de la source (respectivement du récepteur) pendant la période d'émission (respectivement de réception) de deux manières, c'est-à-dire en faisant intervenir les pentes des deux droites en cause. Dans le cas où la source est mobile par rapport au milieu (cf. figures 6 et 7), et en s'exprimant avec une « vitesse d'éloignement » u , on obtient la relation $(T_R - T_S) / T_S = u/c$, tandis que lorsque c'est l'observateur qui s'y déplace (cf. figure 8), cette relation devient $(T_R - T_S) / T_R = u/c$. Cette différence, pour l'effet Doppler non relativiste, traduit le rôle prépondérant du milieu de propagation, et l'impossibilité de ne se fier qu'à la vitesse relative entre source et récepteur. Bien entendu, on pourra faire remarquer qu'au premier ordre ces deux relations se rejoignent.

Il apparaît surtout bien clairement, et cette remarque peut avantageusement être faite avant tout calcul, que la distance entre source et observateur n'est pas un paramètre pertinent : changer cette distance revient simplement à déplacer une droite parallèlement à elle-même sur les graphes horaires, ce qui, par les vertus des parallélogrammes, n'affecte pas l'analyse.

De plus, le graphique illustre ce qui arriverait si la propagation de la lumière se faisait à célérité infinie. Les lignes y traduisant le voyage des tops seraient perpendiculaires à l'axe des temps, assurant l'égalité des périodes d'émission et de réception. Cette remarque essentielle introduit un prolongement particulièrement intéressant.

4. EXEMPLE DE PROLONGEMENT : LA DÉCOUVERTE DE RÖMER

La découverte par RÖMER (1675) du fait que la vitesse de la lumière était finie se prête tout à fait à l'analyse précédente. Chaque émergence d'un satellite de Jupiter, Io par exemple, constitue un top, et se produit à intervalles réguliers, de valeur T_S . La source, à savoir le système planétaire de Jupiter, se déplace par rapport à un observateur terrestre. Sur l'intervalle de temps d'une année, on peut assimiler la distance Jupiter-Terre, dans le référentiel de Jupiter, à la somme d'une constante - la distance entre Jupiter et le Soleil - et d'une fonction sinusoïdale, de période un an, représentant la projection sur l'axe Jupiter-Soleil du rayon vecteur Soleil-Terre (cf. figure 9). Un graphique analogue au précé-

dent verrait simplement la droite représentative de la position du récepteur remplacée par une sinusoïde. Dès lors, il convient de raisonner sur des portions de cette courbe, *via* les tangentes correspondantes. Aux positions respectivement la plus proche et la plus éloignée de Jupiter, l'observation terrestre relève du schéma de la figure 5, et enregistre une période égale à celle de la source. En revanche, aux positions médianes, équidistantes de Jupiter, la vitesse radiale de la Terre par rapport à Jupiter est maximum en module, et renvoie à la figure 8, à adapter en fonction du signe de cette vitesse. Alors, la période enregistrée pour le mouvement orbital de Io est différente de celle que l'on observerait depuis Jupiter, et surtout, car c'est l'origine de la découverte de RÖMER, cette période est bien différente dans les deux cas, c'est-à-dire à six mois d'intervalle. Le caractère fini de la vitesse de la lumière fut ainsi démontré.

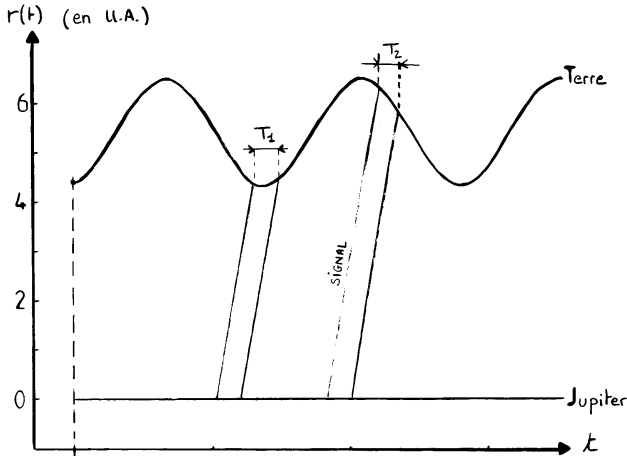


Figure 9 : Graphe horaire du déplacement de la Terre par rapport à Jupiter (référentiel jovien).

5. RÉACTIONS D'ENSEIGNANT EN FORMATION : QUELQUES INDICATIONS

Plusieurs occasions ont permis de mettre en œuvre le principe de cette introduction⁽¹²⁾. Selon les cas, le schéma de la figure 1 a été proposé en enquête préliminaire (voir plus haut) ou non ; mais tous les cas, l'extension de l'analyse à la découverte de Römer a pu être menée.

Les éléments d'appréciation que nous avons pu recueillir se résument comme suit. Par delà les variantes de mises en œuvre, nous avons pu constater, après exposé relativement magistral des graphes des figures 5, 6, 7, 8, des réponses rapides à nos sollicitations pour :

- ◆ justifier la non-pertinence de la distance source-observateur ;

(12) En formation IUFM (deux groupes en PLC2 physique, 1 h 30 chacun), en module de didactique de licence de sciences physiques (deux groupes, 2 h chacun, en stage de formation continue sur les TPE mathématiques IREM, 2 h) et en licence pluridisciplinaire (deux entretiens).

- ◆ analyser, graphiquement, le rôle d'une vitesse de propagation finie dans l'effet Doppler (en envisageant par exemple ce qui se passerait si la célérité du signal était infinie) ;
- ◆ analyser le décalage des périodes observées pour les satellites de Jupiter, dès lors que la trajectoire de Jupiter a été exposée au tableau par l'enseignant ;
- ◆ exercer un sens critique à propos d'autres présentations de la découverte de RÖMER (bien plus ambiguës quant au rôle attribué aux positions relatives de la Terre et de Jupiter).

Ces aspects positifs ne doivent pas cacher l'existence, chez certains, de difficultés persistantes, telle que celle d'associer un changement à une grandeur invariante (la vitesse de la source). La nécessité de manipuler et d'interpréter des graphiques fut souvent citée, lors de discussions, comme une difficulté alors que la tendance générale est plutôt de commenter une « formule » ou un calcul.

Même si la conclusion de telles sessions de formation a, dans tous les cas, été une confirmation quasi-unanime de l'intérêt de cette proposition, il est manifeste que, de l'aveu même des enseignants, elle constitue davantage une assez jolie occasion de travail sur les graphiques qu'une entrée totalement triviale sur le sujet.

CONCLUSION

Les discussions auxquelles nous faisons référence donnent le ton de nos remarques finales. « Il faut prendre du temps », et « ça pourrait vraiment être bien en TPE ». Il s'agit en effet ici, plutôt que de *la* façon d'introduire idéalement l'effet Doppler, de donner un exemple de thème de travail véritablement articulé entre physique et mathématique qui mène à des conclusions intéressantes, donnant du sens entre autres aux notions de périodicité, de vitesse et de célérité, de fonction linéaire, de changement de variable ($t - t_0$), de pente, de tangente, d'algébrisation (des déplacements et vitesses), et qui de plus rassemble des phénomènes qui gagnent à être associés : effet Doppler et découverte de RÖMER. Dans cet esprit, on peut relativiser les objections qui se présentent : le temps que cela prend, le caractère incomplet du traitement - à une seule dimension, et non relativiste. Substantiel, le travail requis est aussi payant en terme d'intérêt, compte tenu des terrains multiples d'intervention de cet effet Doppler. Là comme ailleurs [11], pourtant, on note à quel point toute innovation nécessite un certain approvisionnement des enseignants dont certains, ayant bénéficié pour eux-mêmes de réels éclaircissements avec cette proposition, doutent parfois que des élèves novices puissent accéder d'emblée à la compréhension du sujet sans passer par la même voie qu'eux. La réaction d'étudiants de licence pluridisciplinaire incite à l'optimisme, mais il reste à expérimenter cette proposition en fin de lycée.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Voir en particulier BOUYSSY A., DAVIER M. et GATTY B. *Physique pour les sciences de la vie - tome 3 : les ondes*. Paris : Belin, 1988.

- [2] Voir les travaux de L. MAURINES, notamment l'article MAURINES L. et SALTIEL E. « Mécanique spontanée du signal ». *Bull. Un. Phys.*, octobre 1988, vol. 82, n° 707, p. 1023-1041.
Pour un résumé : VIENNOT L. *Raisonnement en physique, la part du sens commun*. Paris : De Boeck Université, 1996, p. 166-167.
- [3] MAURINES L. « Premières notions sur la propagation des signaux mécaniques ». Thèse, Université Paris 7, 1986.
- [4] Bulletin officiel de l'Éducation nationale, 30 août 2001, hors série n° 4, p. 78-79.
- [5] Résumées dans Viennot 1996, *op.cit.*, p. 153-155.
- [6] SALTIEL E. et MALGRANGE J.-P. « Les raisonnements naturels en cinématique élémentaire ». *Bull. Un. Phys.*, juillet-août-septembre 1979, vol. 73, n° 616, p. 1325-1355.
- [7] BOTTINELLI L. et al. *La Terre et l'Univers*. Coll. Synapses, Hachette Éducation, 1993. *L'effet Doppler-Fizeau*. Encadré, p. 137.
- [8] GOUGUENHEIM L. *Méthodes de l'astrophysique, comment connaître et comprendre l'Univers - Liaisons scientifiques - Hachette CNRS*, 5^e édition, 1997, p. 88.
- [9] Les travaux de Sylvie ROZIER in « Raisonnement en physique », *op. cit.*, p. 128.
- [10] GOUGUENHEIM L. *Méthodes de l'astrophysique*. p. 85.
- [11] Voir par exemple dans VIENNOT L., *Enseigner la physique*. Bruxelles : De Boeck Université, 2002, la réaction d'enseignants confrontés à des séquences innovantes.



Jean-Luc LEROY-BURY

Professeur de physique-chimie au lycée Notre-Dame de Bury à Margency (Val d'Oise) et membre associé du Laboratoire de didactique des sciences physiques de Paris 7 (LDSP).
leroy-bury@laposte.net



Laurence VIENNOT

Professeur à l'Université Denis Diderot - Paris 7.
Laboratoire de didactique des sciences physiques (LDSP).
viennot1@ccr.jussieu.fr