Incarner la notion de vitesse en classe de 6e

Emmanuel Rollinde, Laetitia Couanon, Sandrine Ballenghien

▶ **To cite this version:**

Emmanuel Rollinde, Laetitia Couanon, Sandrine Ballenghien. Incarner la notion de vitesse en classe de 6e. Le Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie, 2020, 114 (1023), pp.411-434. hal-02309246

HAL Id: hal-02309246
https://hal.science/hal-02309246

Submitted on 9 Oct 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Incarner la notion de vitesse en classe de 6e

Paris : vendredi 12 Septembre 2019, dernière version avant publication

par **Emmanuel ROLLINDE**
Laboratoire de Didactique André Revuz, EA 4434, Université Cergy-Pontoise, 33, boulevard du Port 95011 Cergy-Pontoise
emmanuel.rollinde@u-cergy.fr

et **Laetitia COUANON**
Laboratoire de Didactique André Revuz, EA 4434 – Paris

et **Sandrine BALLENGHIEN**

Cité scolaire Jules Ferry – Paris

Cet article présente la mise en place d'un apprentissage original de la notion de vitesse en 6e, à travers l'utilisation d'un « planétaire humain », ressource pédagogique qui permet d'incarner les mouvements des planètes du Système Solaire. En insistant sur le lien entre la cognition et l'interaction corps-monde extérieur, nous proposons un autre regard sur les difficultés liées à l'apprentissage de la vitesse. Une activité spécifique a été mise en place avec deux classes d'un collège parisien. L'engagement des élèves dans cette activité, étudié à travers des interviews est clairement favorisé par leur immersion dans le mouvement étudié. La description détaillée de la séance menée et un dictionnaire associant mouvements sur le planétaire et vocabulaire de la cinématique sont donnés dans l'objectif de favoriser la mise en place, l'évaluation et l'amélioration de cette approche originale dans l'avenir.

Mots-clés : mouvement, vitesse, compréhension du langage, cognition

1. Introduction

Le travail pédagogique présenté dans cet article porte sur l'apprentissage de la vitesse au collège. Il a été réalisé avec un outil pédagogique spécifique, le planétaire humain, basé sur la kinesthésie ou l'apprentissage par le mouvement. Ce dispositif est décrit en détail par [1,2] et sur le site planetaire.overblog.com. Nous décrivons tout d'abord les éléments essentiels à la compréhension du planétaire humain avant de décrire son utilisation pour l'apprentissage de la notion de vitesse.

1.1. Le planétaire humain

Le planétaire humain est une représentation des orbites des planètes du Système Solaire de Mercure à Jupiter ainsi que de deux comètes et de la planète naine Cérès (Figure 1[10]). L'échelle spatiale est de 1 mètre pour 1 unité astronomique. Chaque orbite est matérialisée par des points d'une couleur donnée correspondant aux positions d'une même planète repérée à intervalle de temps constant. Cet intervalle de temps peut différer d'une orbite à l'autre (il ne s'agit donc pas *stricto sensu* d'une chronophotographie). Les élèves peuvent alors marcher sur les orbites en rythme : le professeur tape régulièrement dans les mains, donnant ainsi une échelle temporelle. Dans l'intervalle de temps entre deux claps (son produit lorsque le professeur tape dans les mains), les élèves font un pas le long de l'orbite. *C'est la seule règle du planétaire humain.*

Ils vont ainsi d'un point à un autre sur leur orbite mais peuvent faire plusieurs pas entre deux points ou sauter plusieurs points à chaque pas. Ainsi les notions de distance, de durée et par suite de vitesse sont incarnées. Il est possible de modifier la distance parcourue au cours d'un pas ou de changer la durée entre deux claps. Après avoir imposé la distance parcourue et la durée entre deux claps, la vitesse de chaque élève le long de son orbite est fixée. Le planétaire devient alors un outil adapté à la compréhension des relations de cinématique entre vitesse, distance et durée. S'ils veulent respecter la cinématique du Système Solaire (et donc les relations de Kepler), les élèves doivent suivre une règle supplémentaire par orbite qui va indiquer le nombre de pas à faire entre deux points. Cette règle fixe la distance parcourue à chaque pas. A nouveau, la durée d'un pas est connue puisque c'est la durée entre deux claps.

[10] Sur toutes les photos, les visages des élèves sont cachés pour respecter leur anonymat

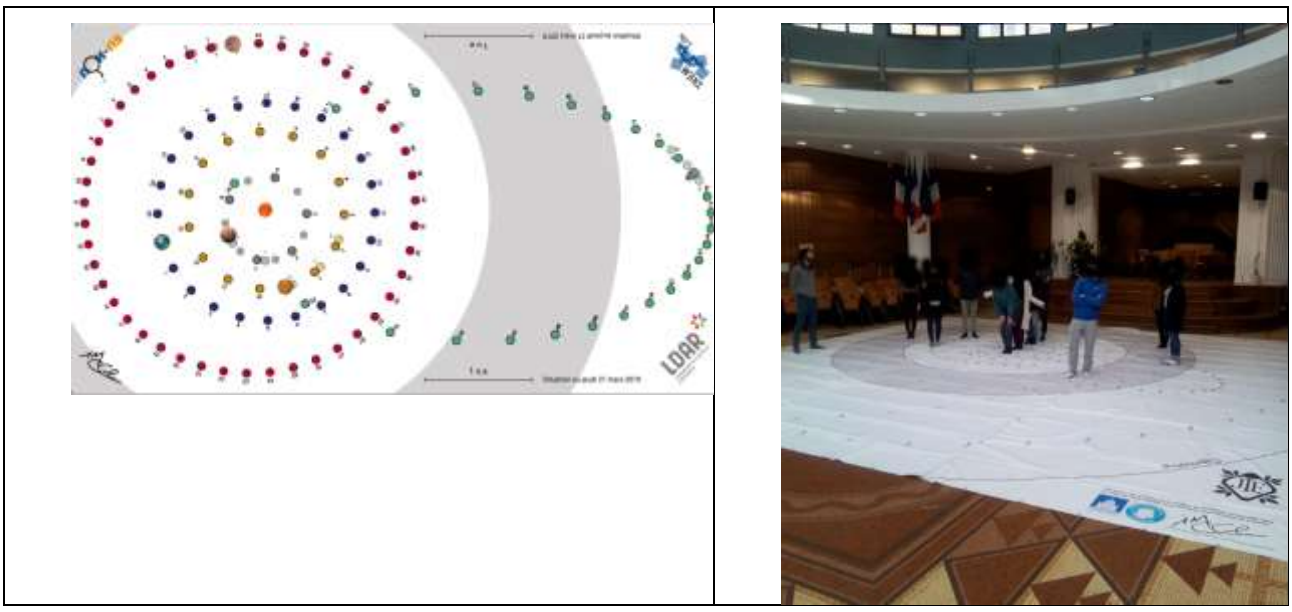


Figure 1 – Les orbites du Système Solaire (planètes internes et une comète) sur le planétaire humain du LDAR (gauche) ; installation du planétaire humain de Jules Ferry dans la salle du réfectoire (droite)

1.2. Précédentes utilisations du planétaire

L'impact didactique du planétaire humain a déjà été étudié dans des classes de seconde [2]. Cette étude portait sur les relations de Kepler et la compréhension des causes du mouvement des planètes – soit la combinaison de l'inertie et de la force de gravité. La comparaison des réponses apportées par des élèves ayant utilisé le planétaire humain avec celles d'élèves et étudiants ne l'ayant pas utilisé avait révélé un impact positif sur la compréhension de ces notions. La motivation et l'intérêt des élèves lors de l'utilisation du planétaire a été également révélée à travers un questionnaire de satisfaction.

Cependant, cette étude avait surtout permis de révéler une grande difficulté des élèves dans la gestion de la relation entre vitesse, durée et distance. A la question « pourquoi Jupiter met plus de temps que la Terre pour faire le tour du Soleil », la majorité des élèves font référence à la distance parcourue sans mentionner la vitesse des deux planètes. Seulement 2 sur 48 élèves des classes « test » y font référence. L'utilisation du planétaire permet d'augmenter cette proportion à 22 sur 52, proportion significativement meilleure mais tout de même encore très (trop) faible pour une classe de seconde (l'étude a été menée sur trois années avec des secondes du lycée Condorcet à Paris).

1.3. Objectifs de cette étude

Les difficultés décrites ci-dessus correspondent à des connaissances qui devraient être acquises en collège. Les nouveaux programmes du cycle 3 et du cycle 4 donnent une place importante à l'étude des mouvements. Nous revenons dans la section 2 sur la description proposée dans les programmes ainsi que sur les causes reconnues des difficultés rencontrées dans l'enseignement de la vitesse : d'une part tout raisonnement sur la vitesse doit impliquer trois variables (vitesse, distance et durée), et d'autre part ces trois notions de vitesse, distance et durée se mélangent dans le vocabulaire courant. Nous faisons l'hypothèse, justifiée par le cadre de la théorie de l'enaction (section 3), que ces difficultés sont en lien avec des problèmes de perception : la vitesse n'est pas percevable ni mesurable directement, mais dérive d'un calcul ; la durée (et le temps) sont des notions difficiles (impossible ?) à percevoir.

Nous posons alors la question suivante : le sens précis des notions de cinématique peut-il émerger grâce à une attention fine aux perceptions ressenties lors d'une marche (guidée) ? Nous utiliserons « la marche des planètes » sur le planétaire humain comme une situation déclenchante favorisant l'engagement des élèves. Au cours de la séance, plusieurs déplacements sur le planétaire illustreront le lien entre vitesse, distance et durée. Nous développons dans la troisième section un dictionnaire précisant les liens entre les mots de la cinématique (cognition abstraite) et les gestes ou les mouvements faits sur le planétaire humain (cognition incarnée). Cette section est cruciale pour pouvoir mettre en place correctement la séance sur le planétaire humain. La séance à proprement parler est présentée en section 4. Cette proposition a été testée avec deux classes de 6ème du collège Jules Ferry à Paris. Enfin, à partir d'extraits d'interviews réalisés après cette expérimentation, nous avons pu

analyser l'impact d'une séance incarnée sur l'engagement des élèves (section 5).

2. Apprendre la notion de vitesse

La classe de 6e fait le lien entre le primaire et le collège. Elle est située à la fin du cycle 3 et prépare au cycle 4. Nous nous concentrons ici sur le programme de mathématiques et de sciences du cycle 3. Bien que cela dépasse le cadre de notre étude, une séquence pluridisciplinaire est tout à fait envisageable dans le futur avec les arts (notion de rythme associée à la fréquence), l'éducation physique et sportive (« donner un sens concret aux données mathématiques en travaillant sur temps, distance et vitesse » ; « repérer un geste pour le stabiliser et le rendre plus efficace »), l'histoire, les langues, etc…

2.1. Que dit le programme ?

L'étude des mouvements est clairement identifiée dans le programme du cycle 3 (BO du 26 novembre 2015) : « Décrire un mouvement (trajectoire et vitesse : unités) et identifier les différences entre mouvement circulaire ou rectiligne. Elaborer et mettre en œuvre un protocole pour appréhender la notion de mouvement et de mesure de la valeur de la vitesse d'un objet. » « En particulier, l'étude de mouvements à valeur de vitesse variable sera poursuivie en 6e ». En sciences, plus globalement, il s'agit de savoir « mener une observation, effectuer une mesure, réaliser une expérience », « faire le lien entre la mesure réalisée, les unités et l'outil utilisés ». Les mathématiques du cycle 3 donnent alors tous les éléments de raisonnement et de calcul nécessaire à ces mesures dans le cas de la vitesse. En effet, parmi les objectifs se trouvent « la connaissance des fractions et des nombres décimaux et l'acquisition des quatre opérations ». Ce sont « les éléments qui permettent de décrire, observer, caractériser les objets (…) grandeurs attachées et nombres qui permettent de mesurer ces grandeurs ». Les mesures de grandeurs se concentrent sur les longueurs (surface, volume), l'angle et les unités associées. La distance peut être abordée comme plus court chemin entre deux points ce qui peut permettre de différencier position et distance (nous y reviendrons dans les obstacles à l'apprentissage). La mesure de durée est indiquée comme « durée écoulée entre deux instants donnés » ce qui insiste bien sur la distinction entre un instant et une durée. Ainsi, il est possible de rapporter la distance parcourue au temps écoulé faisant le lien avec la notion de vitesse.

La vitesse est abordée comme une notion reliant mathématiques et sciences. En particulier, la proportionnalité est associée dans les « repères de progressivité » aux échelles, aux vitesses constantes et aux pourcentages (dans des cas simples). Il s'agit d'enrichir le répertoire des problèmes relevant de la division et de reconnaitre des problèmes relevant de la proportionnalité.

Le cadre du Système Solaire est à la fois un contexte particulier de mesure de vitesse et un des objectifs du programme : « situer la Terre dans le Système Solaire, décrire les mouvements de la Terre ». Un travail sur les vitesses des objets du Système Solaire s'apparente à une tâche complexe, interdisciplinaire, idéale pour la dernière année du cycle 3. En effet, ce contexte fournit des mesures empiriques interprétées via des opérations et des concepts mathématiques, conduisant à un modèle physique du mouvement des planètes.

2.2. Deux sources des difficultés d'apprentissage de la vitesse

Nous présentons ici deux difficultés majeurs face à l'introduction de la vitesse comme concept scientifique : (i) la vitesse est une notion qui relie deux autres quantités (distance et durée) et nécessite donc de raisonner sur trois variables ; (ii) la polysémie et les confusions de la langue quotidienne.

Le raisonnement autour d'une quantité (la vitesse) qui dépend de deux autres variables (durée et distance) est à notre avis l'approche la plus riche autour de la notion de vitesse. De telles relations à trois variables apparaissent couramment en physique, et notamment parmi les notions enseignées au collège. Ainsi, on trouve : $P=m.g$ (lien entre poids, masse et champ gravitationnel), $m=\rho V$ (masse, masse volumique et volume), $U=R.I$ (lien entre tension, résistance et intensité pour un conducteur ohmique) et donc $D=v.\Delta t$ (lien entre distance parcourue, vitesse et durée du trajet). Il est intéressant de noter que l'étude de fonctions à plusieurs variables n'est introduite que très tardivement en mathématiques (dans le supérieur). Les élèves n'ont donc pas d'«outils mathématiques » à leur disposition pour traiter cette relation correctement.

Une telle relation est alors traitée par les élèves, et dans les exercices, selon la formule « toutes choses égales par ailleurs » en opérant une « réduction fonctionnelle ». Ce raisonnement a été observé depuis longtemps en thermodynamique et peut alors conduire à des prédictions erronées [3], mais il a été moins étudié en cinématique. Etant convaincus que cette relation à trois variables doit être prise en compte dès l'introduction de la notion de vitesse, la séquence que nous proposons y fait régulièrement référence. Nous y reviendrons comme justification d'une séquence de type « incarnée », en prenant le point de vue du lien entre ces trois

notions et les perceptions corporelles sur le planétaire humain.

Afin de rentrer dans l'apprentissage des sciences, l'élève doit apprendre des mots de vocabulaire précis pour pouvoir communiquer. En effet, il doit comprendre ce que dit l'enseignant ou ses camarades et il doit pouvoir expliciter ce qu'il a compris à l'enseignant ou à ses camarades. De façon générale, les études de PISA ont montré une forte corrélation entre les résultats des élèves dans les trois domaines de la compréhension de l'écrit, de la culture mathématique et de la culture scientifique [4]. Un des rôles de l'enseignant en science est d'aider les élèves à naviguer entre le monde des objets réels et celui des modèles et théories, et cela ne peut se faire que si le passage du registre de la langue quotidienne à la langue scientifique est possible [5,6]. Ce passage d'un registre à l'autre est à la base du raisonnement scientifique selon [7].

Or, dans le domaine de la cinématique, les termes employés dans le langage courant et dans le langage scientifique peuvent être les mêmes mais utilisés avec des sens différents ou imprécis (voir les exemples proposés par [8]). Ainsi, la notion de « vitesse » est souvent utilisée pour exprimer une durée : « il a fait ce travail vite fait, bien fait » ou encore pour accélérer un rythme « tapez des mains plus vite ». Le mot « vite » est associé à une courte durée, reliant implicitement une grande vitesse à une courte durée (l'exemple du rythme peut être discuté en lien avec l'enseignement de la musique). La notion de « distance » peut également être utilisée à la place de la durée : « cela va être court » au lieu de « cela va durer peu de temps ». La taille est parfois reliée à l'âge : « il est petit » (sans préciser ce qui est petit…) est utilisé pour des enfants de « bas » âge. Lorsque je demandais à un collègue étranger « quels sont les plus petits qui peuvent suivre cette formation ? » il n'a (logiquement) pas compris !

Evidemment, ces associations sont correctes lorsque le troisième terme de l'équation est constant : à distance fixe, un même trajet dure moins longtemps si la vitesse est plus grande ; à vitesse constante, un trajet plus court dure moins longtemps. Le raisonnement commun fixe toujours une variable.

3. Relier langage et gestes pour faire émerger du sens : un dictionnaire du « planétaire humain »

L'utilisation du planétaire humain est basée sur le lien entre l'expérience sensorielle et la construction des concepts abstraits. Nous renvoyons le lecteur en particulier à l'analyse de l'enaction proposée par [9] dont nous reprenons les grandes lignes ici.

3.1. La théorie de l'enaction et l'apprentissage

La pensée psychologique traditionnelle dans la lignée de Platon, considère le corps comme un obstacle à la pensée. L'épistémologie de Piaget [10] prolonge cette vision en considérant le stade sensori-moteur comme une transition vers une pensée abstraite et en distinguant expériences sensorielles et cognition. Avec un point de vue didactique (voir par exemple [11, 12]) l'expérience sensorielle quotidienne est vue comme la source d'un premier apprentissage (ou d'un premier questionnement) mais elle peut également devenir un frein à la compréhension des phénomènes car elle implique des facteurs dont nous n'avons pas conscience (présence de frottement par exemple). La mise en place de concepts abstraits bien définis est alors limitée par des associations trop fortes avec ces perceptions globales. Dans le cadre de la vitesse, tant que l'idée de vitesse n'est pas acquise sous une forme opératoire (donc cognitive et non perceptive), c'est-à-dire comme un rapport entre l'espace parcouru et le temps, l'ordre temporel se confond avec l'ordre spatial et la durée avec le chemin parcouru [8]. Un courant plus récent en psychologie cognitive (enaction theory) propose une autre approche et considère l'interaction entre le corps et le monde extérieur comme le fondement de la cognition, « la kineflexion » [13] ou encore « a sensuous cognition » [9]. Les concepts abstraits doivent alors être incarnés et vécus dans des expériences sensorielles pour être pleinement intégrés [14] ; l'environnement devient acteur de la réflexion à la condition de favoriser une perception fine [15]. Cette distinction entre perception fine et perception grossière proposée par F. Varela permet de se rapprocher des conclusions de la didactique. L'expérience sensorielle peut alors décharger une partie du travail de raisonnement sur l'environnement : « En raison de nos capacités de traitement de l'information limitées (par notre attention et notre mémoire à court terme, par exemple), nous utilisons l'environnement pour réduire la charge cognitive. L'environnement va contenir ou même manipuler des informations pour nous et nous les récupérons en fonction des besoins. (…) Même lorsqu'elle est découplée de l'environnement, l'activité cérébrale est basée sur des mécanismes de traitement sensoriel et de contrôle moteur. (…) En général, la fonction de ces ressources sensori-motrices est la création d'une simulation d'un aspect du monde physique extérieur comme un moyen de représenter des informations ou de faire des inférences. » [16] (traduction personnelle).

Les sections suivantes décrivent l'association entre d'une part les gestes et les mouvements sur le

planétaire humain et d'autre part les concepts abstraits de cinématique. Cette association peut s'apparenter à un premier dictionnaire du planétaire humain. L'objectif à terme est de favoriser « une interaction entre différentes modalités sensorielles et différents signes » qui permettra aux « perceptions et pensées mathématiques associées » des apprenants « d'acquérir une dimension théorique » [9].

3.2. Termes et gestes associés à la durée

Pour faire avancer les élèves sur le planétaire, mais également pour faire avancer les pions, le maître de jeu (ici l'enseignante, mais ce pourrait être un élève également) tape dans les mains régulièrement. Cette action fixe le rythme « musical » et les termes de cinématique qui lui sont associés doivent être bien définis. L'aspect essentiel du discours associé aux gestes doit être la distinction entre instant et durée.

Un clap : A l'instant où le maître de jeu tape dans la main, un son est entendu. Nous appelons ici un « clap » à la fois la perception des mains qui se frappent (pour le maître du jeu), l'audition du son (pour les acteurs) et l'instant associé (pour tous).

La durée entre deux claps ou la fréquence des claps : La durée entre deux « claps » est constante (selon la régularité du maître du jeu, il est possible d'utiliser un métronome…). Nous avons remarqué que les élèves comme l'enseignante parlent souvent de « fréquence », de façon implicite parfois, c'est-à-dire le nombre de claps entendus dans une seconde (ou plutôt sur une durée constante, non définie explicitement). Il peut être préférable de ne parler que de durée entre deux claps et de définir la notion de fréquence, dont le rapport avec la vitesse est plus complexe, ultérieurement. Notons ici que la durée d'un clap n'a pas de sens car un clap correspond à un instant.

Deux autres durées interviennent fréquemment : la durée d'un pas et la durée d'une révolution autour du Soleil.

La durée d'un pas : cette durée est imposée comme égale à la durée entre deux claps, tandis que la longueur d'un pas est laissée libre. Nous reviendrons sur cette différence dans l'analyse de l'incarnation de la vitesse.

La durée d'une révolution : il s'agit là d'un temps particulier qui peut poser problème. La connaissance de la durée d'une révolution pour une planète fixe sa vitesse angulaire et également sa vitesse linéaire car la distance parcourue est fixe. Dans le cas du mouvement de deux corps (Terre et Mercure par exemple) ; s'ils mettaient la même durée pour faire un tour, ils auraient la même vitesse angulaire mais des vitesses linéaires différentes. Bien que la vitesse angulaire ne soit pas au programme du collège, nous avons eu le sentiment que cette notion était intuitive chez les élèves et qu'elle intervenait dans leur discours de façon implicite.

Echelle de durée : La durée mise par l'élève incarnant la Terre pour faire un tour permet de relier la durée « réelle » (une année) à la durée de notre modèle (mesurée par un chronomètre par exemple). La durée du modèle peut être modifiée en changeant la fréquence des claps tandis que la durée réelle ne peut pas être modifiée. Le calcul de cette échelle permet par exemple de mesurer la durée réelle mise par Mercure pour faire une révolution, c'est-à-dire la durée d'une année « mercurienne ».

3.3. Termes et gestes associés aux déplacements

Trois types de déplacements sont présents sur le planétaire. A nouveau, l'association de ces déplacements avec des positions et des distances doit être clairement précisée. La distinction position/distance (ou longueur) est fondamentale pour le concept de vitesse. Les définitions ci-dessous montrent également les liens entre distance et durée qui peuvent être faits lors de chaque déplacement.

Un pas : « Un pas » correspond au déplacement effectué pendant la durée entre deux claps. Ce déplacement ne se fait pas nécessairement d'un point du planétaire à un autre. Ainsi, les positions initiales et finales d'un « pas » ne sont pas imposées par le dessin du planétaire : la durée de ce déplacement est imposée, mais pas sa longueur.

Les points du planétaire : Chaque point correspond naturellement à une position puisque les déplacements des élèves (ou des pions) vont permettre d'aller d'un point à un autre. Ce déplacement peut se faire en plusieurs pas, mais chaque point du planétaire sera atteint à un instant donné. La distance entre les points est observée directement sur le planétaire et sera donc parcourue en un ou plusieurs pas : la durée du déplacement d'un point à un autre n'est pas imposée, mais sa longueur est fixe.

Le périmètre d'une orbite : Il s'agit d'une distance particulière sur le planétaire. A nouveau, la durée pour la parcourir n'est pas imposée, mais sa longueur est fixe.

Echelle de distance : Cette échelle est imposée par le dessin du planétaire et ne peut donc pas être

modifiée. Le demi-grand axe de la Terre peut être déterminé géométriquement sur le dessin. Cette longueur mesurée sur le planétaire correspond à une « Unité Astronomique » pour le Système Solaire réel.

A la lecture de ces associations, il apparait que les déplacements (distance et position) n'ont pas le même statut que les durées (et instants) sur le planétaire. Ces différences doivent être explicitées par le geste ou la parole pour ne pas être source de confusion. Les jeux entre ces grandeurs permettent ensuite un travail fructueux autour de la vitesse.

3.4. Comment est incarnée la vitesse ?

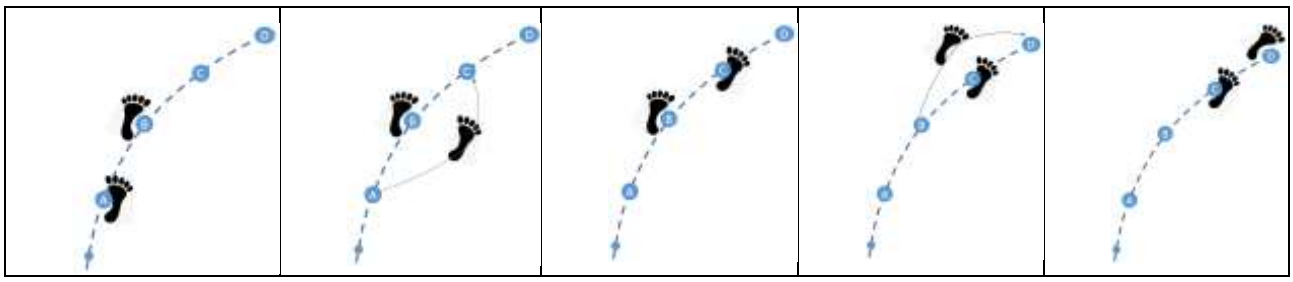
La longueur parcourue ou mesurée est incarnée par la vision (points du planétaire) et par l'action kinesthésique (déplacement du corps, ou des pions dans la séance décrite en section 4), de manière active. La durée est incarnée par l'audition du clap, de manière passive. Comment est incarnée la vitesse ?

Avant de répondre à cette question, nous insistons sur le fait que l'expression « vitesse des claps » n'a pas de sens dans le contexte du planétaire. En effet les claps doivent être uniquement associés à un instant (pour un clap) et à une durée (entre deux claps). Remarquons qu'il pourrait être intéressant de regarder, dans une séance indépendante, si les mains se déplacent nécessairement plus vite lorsque la durée entre deux claps diminue (par exemple).

Le concept de vitesse n'est pas visible (comme la distance) ni audible (comme la durée). A priori, aucun sens ne permet de « mesurer » une vitesse. Comme évoqué en section 2, la vitesse doit être comprise comme un lien entre distance et durée. Pourtant, chacun peut ressentir, percevoir s'il a une vitesse importante ou non, s'il ralentit ou accélère. Nous pensons que ces ressentis sont surtout des comparaisons de vitesse. Cela peut se faire à distance parcourue fixe. Ainsi, en voiture, si les maisons dans le paysage, de largeur fixe, passent en moins de temps devant nos yeux, nous savons que la vitesse de la voiture a augmenté. Cette comparaison peut se faire également à durée fixe. La perception des vitesses de deux voitures se fait en regardant la distance qu'elles parcourent sur une courte durée identique. Il est utile de rappeler ici que toute vitesse mesurée est une vitesse moyenne mesurée sur un temps qui dépend bien sûr de l'outil d'observation (œil, radar ou même effet Doppler avec un temps très court, mais non nul !). Le raisonnement commun suppose alors que la « vitesse » ne varie pas au cours de cet intervalle de temps, devenant alors égale à une vitesse instantanée. La vitesse instantanée est plus intuitive que la vitesse moyenne (« vitesse théorique », résultant d'une opération mathématique) qui est introduite plus tard dans le contexte scolaire et social [17]. Par ailleurs, la conception de la vitesse (vue comme « instantanée ») n'implique pas nécessairement une mise en lien en amont avec les notions de distance et d'intervalle de temps chez tous les élèves [18].

Pour expliciter la manière dont la vitesse est incarnée sur le planétaire en lien avec les notions de distance et de durée, il est intéressant de décomposer le mouvement sur trois temps et autour de 4 positions (A, B, C et D). Insistons sur le fait que ces positions ne sont pas nécessairement les points du planétaire (par exemple, les points sur l'orbite de Encke seraient situés aux positions A et D puisqu'il faut 3 pas pour aller d'un point à l'autre).

Instant 1	Entre instant 1 et instant 2	Instant 2	Entre instant 2 et instant 3	Instant 3
Le pied droit est posé sur la position A et le pied gauche sur la position B. Un clap retentit.	Le pied droit se lève de la position A et avance vers la position C. Le corps entier a ainsi parcouru une certaine *distance* entre les deux positions.	Le pied droit est posé sur la position C et le pied gauche sur la position B.	Le pied gauche se lève de la position B et avance vers la position D	Le pied droit est posé sur la position C et le pied gauche sur la position D



Cette proposition de chorégraphie peut être modifiée selon les idées et envie en particulier en lien avec les enseignants d'EPS, tout en restant attentif à deux aspects qui nous paraissent importants. Tout d'abord, la distinction instant/durée et position/déplacement doit être claire pour l'enseignant afin d'amener ces concepts chez l'élève sans confusion. D'autre part, le mouvement doit se faire sans arrêts : éviter de s'arrêter entre deux claps et de faire un pas rapide à l'instant du clap. Ceci est nécessaire afin que la notion de vitesse instantanée ait un sens dans cette gestuelle. Cet objectif (idéal) n'est pas facile à atteindre et les élèves sont souvent très concentrés sur leur pas. Nous y reviendrons dans la discussion.

A partir de ces éléments de langage associés aux gestes, nous pensons que le travail sur le planétaire peut amener à une mise en place efficace des notions de cinématique.

4. Une séquence incarnée autour des vitesses des planètes

Dans le cadre de l'hypothèse d'une « cognition incarnée » décrite ci-dessus, l'utilisation du planétaire humain prend tout son sens et va permettre d'offrir aux élèves un parcours sensoriel adapté, ou congruent [19], aux notions abstraites à construire. Mme Ballenghien, professeur de physique-chimie de la cité scolaire Jules Ferry, participe à ce travail depuis l'année 2014-2015. M Rollinde et Mme Ballenghien ont mené une première séance avec des cinquièmes en 2015 sur deux jours. En 2016, l'établissement acquiert son propre planétaire que nous avons utilisé ensemble dans la salle du réfectoire (Figure 1) ou dans la cour avec des élèves de seconde dans le cadre d'un atelier MPS. Cet article concerne deux séances menées avec deux classes de 6e. Nous avons installé le planétaire près de leur classe et du laboratoire de physique (Figure 2).

Figure 2 - Le planétaire humain de la cité scolaire Jules Ferry à Paris

4.1. Dispositif

Nous avons travaillé avec deux classes de 6e divisées chacune en deux demi-groupes de TP. Les 4 groupes sont suivis par Mme Ballenghien. Une première séance préliminaire a permis d'introduire les objets du planétaire pour discuter des saisons sur la Terre. Seule l'orbite de la Terre a été utilisée. Les orbites et les points représentant la position des corps au cours du temps ont été décrits, sans entrer dans les détails. L'enseignante n'a pas évoqué les idées de vitesse lors de cette séance.

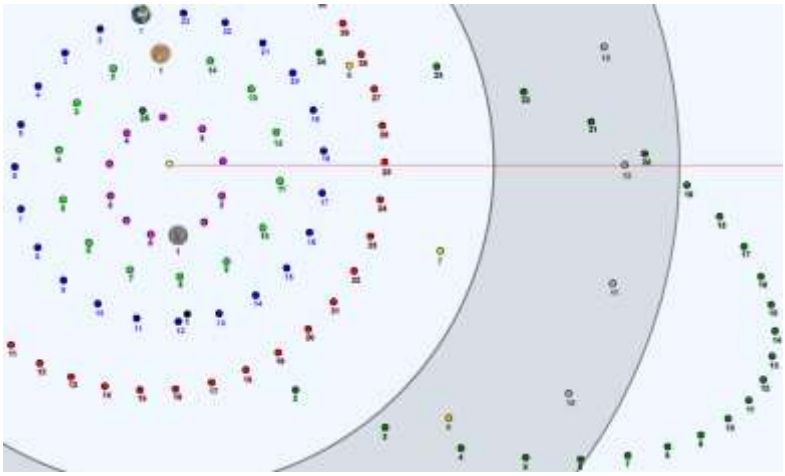


Figure 3 – Partie du planétaire humain utilisée avec les classes de 6e, incluant les orbites de Mercure (violet), Vénus (vert clair), Terre (bleu) et de la comète Encke (vert). Une partie de l'orbite de Mars (rouge) et de la comète Chury (jaune) est visible.

Chaque groupe a ensuite suivi deux séances utilisant les mouvements de Mercure, de la Terre et de la comète Encke sur leurs orbites (couleurs violet, bleue et vert foncé sur la Figure 3). Ces deux séances étaient identiques quant à leur contenu (décrit en détail dans la suite), mais utilisaient un support différent à une semaine d'intervalle. L'une de ces deux séances se fait sur le planétaire humain sur lequel les élèves se déplacent tous ensemble. La moitié du groupe observe et l'autre moitié est en mouvement, puis les deux rôles sont échangés (Figure 4). L'autre séance se fait sur un dessin du planétaire au format A3 sur lequel les élèves déplacent un pion. Ils travaillent alors en binôme sur une table (Figure 5).

Deux groupes (une classe) commencent par le format A3, puis utilisent le planétaire humain la semaine suivante. L'ordre est inversé pour les deux autre groupes (l'autre classe).

Le déroulé prévu initialement pour ces deux séances est explicité dans les sections suivantes, en précisant les quelques différences nécessaires entre les deux formats. Nous avons interviewé cinq élèves une semaine plus tard.

Figure 4 - Les élèves marchent le long de l'orbite d'une comète. Ils accélèrent près du Soleil et ralentissent loin du Soleil

Figure 5 - Les élèves, en binôme, font déplacer un pion le long de l'orbite d'une comète

4.2. Comment marcher sur le planétaire ?

Le professeur commence par donner les deux règles principales d'évolution sur le planétaire (Figure 6) : il faut rester sur l'orbite en suivant les points tracés sur le planétaire ; entre deux claps du meneur de jeu, il faut faire un pas (ou un « saut » pour le pion) en suivant l'orbite.

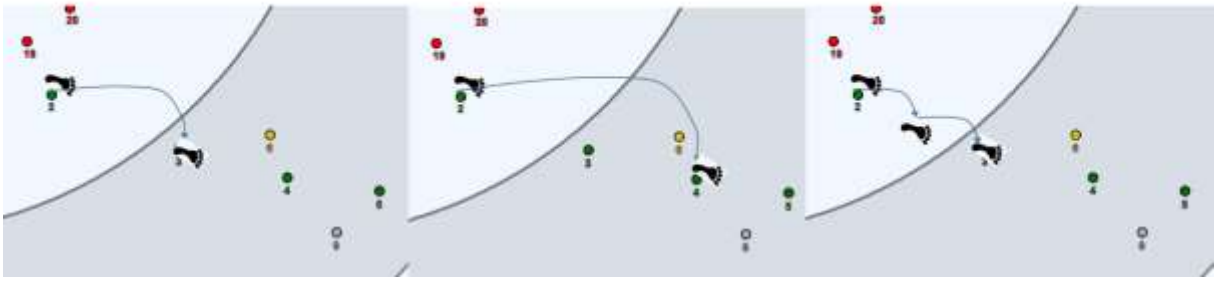


Figure 6 – Différentes marches possible en suivant l'orbite de la comète Encke : un pas entre deux points, sauter un point à chaque pas, deux pas entre deux points (de gauche à droite).

4.3. Orbite de la Terre

Sur le planétaire humain, un élève se place sur l'orbite de la Terre et les autres regardent, puis la moitié des élèves se placent sur l'orbite de la Terre. Sur le planétaire A3, tous les binômes mettent un pion sur le premier point de la Terre. L'élève-Terre fait un tour en allant au rythme d'un pas par point. Afin de vérifier que les consignes sont bien comprises, l'enseignante vérifie que les élèves font un tour complet ensemble ou que tous les binômes finissent leur tour en même temps.

L'enseignante demande alors : « Que peut-on changer dans le mouvement pour que vous alliez moins vite tout en respectant la consigne : faire un pas entre deux claps ? » Cette question amène un raisonnement inhabituel en cinématique, puisqu'une des variables (la vitesse) doit diminuer sans préciser de consignes sur les deux autres paramètres. Une réponse entendue dans plusieurs groupes révèle un obstacle relié à l'identification avec la Terre : « c'est impossible car la Terre a une seule vitesse… » Cette identification est positive car elle montre l'implication des élèves mais elle empêche de réfléchir sur des modifications dans les mouvements. Nous reviendrons sur cette difficulté dans la discussion.

La discussion de groupe doit amener à deux éléments : il est possible de changer la longueur du pas sans modifier la fréquence des claps ou de taper plus ou moins vite sans modifier la longueur du pas, ce que l'enseignante formalise par : *« Si la longueur du pas est constante mais que la durée d'un pas augmente, alors*

la valeur de la vitesse diminue » et « *Si la durée pour faire un pas est constante, mais que la longueur du pas diminue alors la valeur de la vitesse diminue.* » Il s'agit donc de revenir à un raisonnement plus simple en fixant une des deux variables (durée ou distance). Au cours de cette discussion, le vocabulaire décrit en début d'article intervient très régulièrement.

Pour prolonger la discussion en se focalisant cette fois sur la durée, l'enseignante demande *: « Finalement, combien de temps mettez-vous pour faire un tour ? ».* La même identification implique que plusieurs élèves répondent une année, donc 365 jours…. En précisant que la question concerne l'élève sur le planétaire et la durée de son tour, nous faisons allusion à la notion d'échelle de temps, difficulté ou concept additionnel requis dans cette séance. La durée d'un tour (pour une distance fixe) dépend de la vitesse qui n'est pas fixée ici. La formalisation après discussion peut être : *« Le temps mis par un objet pour se déplacer le long d'une trajectoire connue dépend de sa vitesse »*

4.4. Terre vs Mercure

Sur le planétaire humain, 6 enfants sont mis sur l'orbite de la Terre et 3 sur celle de Mercure, les autres regardent. Pour le planétaire A3, un pion suit l'orbite de Mercure et un pion celle de la Terre, tenus chacun par un des élèves. L'objectif est maintenant de favoriser des raisonnements mélangeant durée, distance et vitesse.

L'enseignante demande : *« Quel groupe va mettre le moins de temps pour faire un tour ? ».* Les résultats obtenus par [2] sont confirmés par la réponse la plus courante : « Mercure, car le trajet à parcourir est plus court ». Si cette réponse est correcte dans le cas des planètes (on retrouve à nouveau l'identification forte aux objets réels), la justification n'est pas suffisante dans le cas des mouvements de deux groupes qui ne sont pas contraints par la 3^{e} loi de Képler ! Dans un premier temps, les deux groupes (ou pions) avancent en rythme avec un pas par point et vérifient qu'en effet Mercure met moins de temps. La distance entre deux points de Mercure est assez proche de celle entre deux points de la Terre. En suivant ce rythme d'un point à chaque pas, les deux groupes vont à la même vitesse. L'enseignante demande ensuite *« Est-ce que cela pourrait être autrement, tout en respectant la règle du planétaire ? ».* Il s'agit ici de faire comprendre que la durée mise par chaque groupe pour faire un tour dépend de leur vitesse.

Lorsque les élèves proposent de changer la durée d'un pas, le professeur rappelle que les deux groupes font un pas entre deux claps. Donc la durée d'un pas est la même pour les deux groupes. En faisant les claps à une autre fréquence, les élèves voient que la vitesse a changé dans un même rapport pour les deux groupes et que cette proposition ne modifie donc pas le « gagnant ». La discussion doit faire ressortir au final que Mercure pourrait mettre plus de temps que la Terre pour faire un tour si sa vitesse était bien plus petite que celle de la Terre. Différentes solutions ont été proposées dans les quatre séances : la Terre peut sauter plusieurs pions à chaque pas, Mercure peut faire plusieurs pas entre deux pions (ou attendre sur un pion, mais cela pose un problème vis-à-vis du lien entre vitesse instantanée et vitesse moyenne mentionné plus haut).

Il est utile de finir cette partie en précisant les déplacements qui permettent de respecter les vitesses (relatives) réelles des planètes Mercure et Terre : les élèves sur l'orbite de la Terre vont au point suivant à chaque pas, tandis que ceux sur l'orbite de Mercure sautent un point sur deux. Mercure va alors plus vite que la Terre et met beaucoup moins de temps que la Terre pour faire un tour. Un prolongement intéressant est le calcul de l'âge des élèves en année mercuriennes.

L'enseignant peut formaliser la discussion : « *Mercure va plus vite et a un trajet plus court : il met donc beaucoup moins de temps pour faire un tour ! L'année sur Mercure est bien plus courte !* »

4.5. Mouvement de la comète

Sur le planétaire humain, la moitié du groupe va sur le trajet de la comète ; sur le planétaire A3, chacun place son pion sur un point de l'orbite de la comète. L'objectif est ici de regarder un objet qui a une vitesse de norme variable le long de son orbite. Après avoir bien expliqué le déplacement de la comète (il faut faire trois pas pour aller au point suivant), l'enseignante lance la chorégraphie sur un tour de l'orbite et vérifie que tout le monde finit en même temps (en particulier pour la séance avec les pions).

L'enseignante demande : « Est-ce que la vitesse de la comète varie au cours de la trajectoire ? » La variation de la vitesse est très clairement remarquée par les élèves ainsi que le lien avec la distance entre les points. Il est important d'observer au cours de cette dernière discussion si les termes employés par les élèves sont corrects : *« si la distance parcourue pendant une durée fixe varie au cours du mouvement, la valeur de la vitesse varie.* »

4.6. Application effective en classe

Nous avons rencontré deux types de difficultés, pédagogiques et pratiques.

D'un point de vue pratique, la séance sur le planétaire avait lieu dans un hall près d'un escalier. En milieu de séance, des élèves qui changeaient de salle devaient passer dans l'escalier. Certains élèves étaient perturbés par des photos affichées dans le hall. Proposer une activité hors classe mélange ainsi des éléments de motivation par la nouveauté et des éléments de perturbation qui n'existent pas dans une classe. Ces différences se rajoutent à l'apport de l'enaction dans les séances.

Les difficultés pédagogiques sont reliées à l'émergence du vocabulaire précis de la cinématique par les élèves. Une telle difficulté et surtout une telle confusion (entre durée et instant pour tous, entre distance et durée très souvent) n'avait pas été prévue lors des séances de préparation. Ceci a conduit l'enseignante à modifier l'ordre des étapes entre les séances, et les chercheurs à discuter avec l'enseignante entre les séances. Deux modifications ont été particulièrement importantes, mais justifiées par un souci de réussite pédagogique avec les élèves. Tout d'abord, la séquence sur la comète est apparue plus simple que celle sur Mercure et la Terre. Lors de la dernière séance, elle a donc été placée instinctivement par l'enseignante avant la séquence sur Mercure et la Terre. Cet ordre semble meilleur et pourra être proposé à l'avenir. Nous n'avons cependant pas d'éléments quantitatifs pour comparer les deux possibilités. La deuxième modification porte sur les séances « planétaire humain ». Nous avions prévu initialement de ne pas faire parler les élèves pendant la séance pour valoriser la perception corporelle. Or, les élèves posaient beaucoup de questions ce qui rendait l'attitude d'attente prévue impossible à tenir pour l'enseignante. Lors de la seconde séance, nous avons donc décidé de permettre les réponses aux questions. Ceci a engendré plus de discussions, dont l'impact sur l'engagement corporel est difficile à estimer. La construction du « dictionnaire du planétaire » a été motivée par ces difficultés. Nous pensons qu'il sera un élément fort à la fois pour la formation des enseignants pour l'utilisation du planétaire, et pour la construction des séances pédagogiques dans l'avenir.

Une dernière difficulté tient à l'identification des élèves aux planètes. Il a donc été difficile de leur demander d'imaginer des mouvements (périodes de révolution, vitesses relatives) qui ne sont pas ceux des planètes. Une mise en situation spécifique pour permettre ces modifications devra donc être pensée à l'avenir.

5. Discussion

Dans cette partie, nous allons tout d'abord décrire l'évolution des séances avec le planétaire A3 à travers les discussions qui ont eu lieu entre l'enseignante et les élèves, ce qui permettra de revenir sur le vocabulaire utilisé. Une semaine après la fin des deux séances, nous avons interviewé cinq élèves : quatre élèves de 6^{e} 2 (EA-2, EI-2 et un duo d'élèves EAT-2) qui ont commencé par le planétaire humain et fini par le planétaire A3 et un élève de de 6^{e} 3 (EU-3) qui a commencé par le planétaire A3 et fini par le planétaire humain. Les extraits proposés ici de ces interviews nous permettent de préciser les résultats des questionnaires ouverts proposés par [2] sur l'intérêt des élèves pour une séance incarnée, et sur leur impression de liberté associée à un apprentissage.

5.1. Evolution des séances sur le planétaire A3

Nous utilisons ici les répliques de l'enseignante enregistrées au cours des différentes séances sur le planétaire A3. Ce discours étant plus structuré, il fournit des informations plus claires sur le déroulement des séances. Il apparait ainsi que seulement 23% des répliques correspondent à une institutionnalisation et parmi elles, un certain nombre sont de simples « Oui » en réponse à une prise de parole d'un élève. Les questions de l'enseignante et les réponses des élèves (reprises par l'enseignante) constituent chacune 30% des répliques. Enfin 17% des répliques sont des instructions. Nous pouvons donc conclure que les différentes séances sont très riches en interactions avec les élèves. Nous sommes à l'opposé d'un cours magistral, les élèves sont de véritables acteurs dans la construction du savoir. L'aspect ludique du planétaire a probablement participé à cette dynamique.

Nous avons ensuite comparé les types de mots utilisés sur l'ensemble d'une séance avec le planétaire A3 menée la première semaine et sur une séance menée la seconde semaine, donc avant et après la séance sur le planétaire humain (Figure 7).

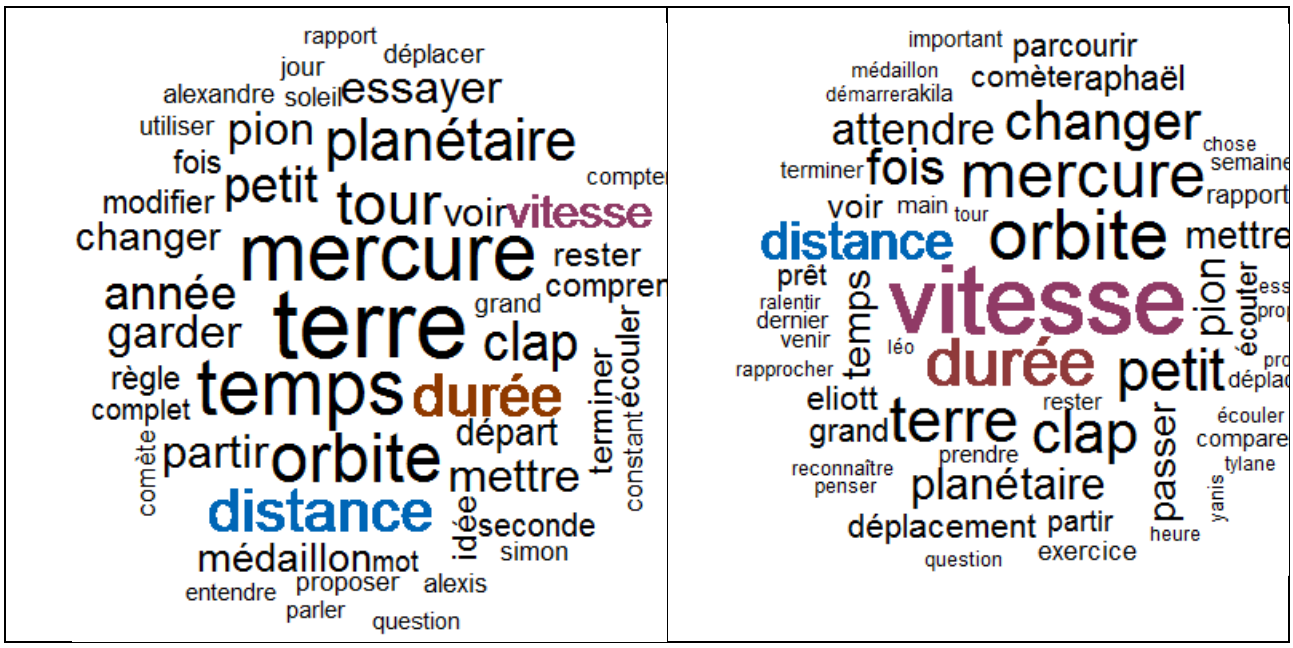


Figure 7 - Nuage des mots utilisés par l'enseignante sur l'ensemble de la séance avec le planétaire A3 avec les 6e 3a (en première semaine, avant l'utilisation du planétaire humain, à gauche) et avec les 6e 2b (en seconde semaine, après l'utilisation du planétaire humain, à droite).

Il apparait clairement que les concepts visés par la séance (« vitesse », « durée » et « distance ») sont bien plus présents dans les séances en deuxième semaine que dans les séances de la première semaine où le lexique est plutôt centré sur le planétaire. Cette évolution est positive et peut s'expliquer de différentes manières, que ce soit par l'appropriation de la séance par l'enseignante ou l'impact du planétaire humain. Quelle qu'en soit la raison, nous pensons qu'il est préférable de commencer par un travail sur le planétaire humain qui introduit et motive une seconde séance plus interactive et basée sur le langage et la mesure.

5.2. Intérêt, liberté et apprentissage

Nous utilisons dans cette section des extraits des interviews pour évaluer le ressenti des élèves sur cette modalité d'apprentissage avec le planétaire humain. Tout d'abord, le fait que cette activité soit menée en dehors de la classe est toujours appréciée.

> *EA-2 : C'était bien surtout enfin sur le planétaire humain c'était rigolo / euh / du coup bah c'était assez rigolo parce que en même temps on était filmé on tournait on faisait l'orbite / j'ai bien aimé (...) bah c'était c'était mieux que d'habitude parce que c'était / on faisait des activités alors c'était rigolo*
>
> *EU-3 : j'ai pas très l'habitude de faire comme ça des activités, mais heu, 'fin j'ai aimé bien ce qu'on avait fait.*
>
> *EAT-2 : Bah oui on pouvait ressentir un petit peu plus de liberté parce qu'on était en dehors de la salle / et euh qu'on avait le droit de bouger parce que / dans la salle on est pas / on va pas / on n'est pas interdits de bouger mais / on doit rester assis euh / en gros oui c'est vrai qu'on se sentait plus libres que dans un / que dans un vrai cours*

Cet aspect ludique n'a pas caché l'intérêt pédagogique bien ressenti par les élèves. Certains ont conscience de l'intérêt d'une activité qui les implique fortement.

> *EA-2 : « ça me plaisait de le faire ce qu'elle [l'enseignante] demandait*
>
> *Interviewer : Par exemple quand madame B. te demandait de faire des choses, dans le ... sur le planétaire ou avec les pions, tu le faisais parce qu'elle te disait de le faire ou est-ce que tu le faisais parce que ça te plaisait.*
>
> *EU-3 : Ba heu, je pense que je les faisais aussi pour comprendre mieux ce qu'on apprend (...) quand je fais moi même ça me fait un peu plus comprendre que juste quand je regarde ...*
>
> *EU-3 : (...) j'ai vu comment ça marche, tout ça parce que ... c'est plus facile de comprendre quand je regarde que de, enfin, de lire un texte comme ça pour moi, du coup ...*

EAT-2 : (…) pour moi ça m'a été utile parce que je comprends mieux / et que ça m'a aidé beaucoup (…) Bah pour comprendre un peu mieux la vitesse des planètes // C'est / c'est plus facile en fait euh // En fait quand on travaille on peut travailler / et en même temps s'amuser // Des fois on travaille et on s'amuse pas (…)

Interview : alors est-ce que pendant ces séances vous avez eu des interactions avec les autres élèves / avec vos camarades

EAT-2 : Moi ça m'a aidé à mieux faire et à mieux comprendre les interactions

5.3. Engagement corporel et identification

L'engagement corporel et l'identification aux objets physiques ont été présents à différents niveaux selon les élèves, avec des conséquences différentes sur l'apprentissage.

Pour ce premier élève, l'engagement corporel était perturbé par l'attention aux consignes :

Interviewer : quand on était là et que vous y travailliez sur le planétaire / est-ce que tu avais l'impression d'être concentré juste sur ton corps et sur le pion ou tu étais aussi concentré sur euh / sur la physique / sur les questions qu'il y a derrière

EA-2 : bah j'étais concentré euh / j'étais concentré sur bah / j'écoutais les questions qu'elle posait parce que sinon je ne pouvais pas répondre ni euh / bah euh / bah ni me concentrer sur le corps parce que / si j'écoutais pas bien les questions je ne pouvais pas savoir ce qu'il fallait faire / du coup j'écoutais ce qu'elle disait et après je le faisais et je ne faisais pas vraiment attention à mon corps / enfin / je marchais juste quand elle tapait dans les mains et euh / j'écoutais plus ce qu'elle disait que euh que je me préoccupais de mon corps

Au contraire, pour un deuxième élève :

Interviewer : est-ce que t'étais plutôt concentré sur ton corps et sur les pas que tu devais faire ou est-ce que t'avais l'impression plutôt d'être en cours et de réfléchir à la physique ?

EI-2 : sur mon corps. En fait en fait je ne me voyais pas apprendre quand je faisais les pas

Enfin, une version intermédiaire :

EU-3 : Ha j'étais heu, concentré aussi sur les pas et ce que je faisais mais heu, aussi sur la physique, parce que heu ... 'fin ce qu'on fait c'est heu ... 'y faut aussi réfléchir tous les deux parce que sinon heu ... On peut pas heu ... [elle précise qu'il n'y avait pas de différence entre les deux cas, humain et A3]

Pour certains élèves, la coordination n'était pas facile. Le fait de devoir marcher en rythme a perturbé une élève en particulier qui avait des difficultés pour se déplacer sur le planétaire. Elle a essentiellement regardé ses camarades se déplacer tout en faisant des commentaires. La séance sur le planétaire A3 nécessitait également une certaine coordination :

EA-2 : et après sur le euh // sur le planétaire euh avec les pions c'était plus compliqué parce que j'avais / j'arrivais pas vraiment à comprendre et comme on était deux et que nos mains se mélangeaient j'étais j'étais un peu perdu et du coup j'ai j'ai pas bien compris le la le la deuxième séance

Certains élèves ont montré une véritable identification aux objets, ici dans le travail sur le planétaire A3 en déplaçant un bouchon sur l'orbite :

EAT-2 (a) : Euh parce que moi en fait j'ai euh // Je me concentrais sur le bouchon et en même temps quand c'est moi qui tournait // en fait moi (inaudible) le petit planétaire (la petite planète Terre ?) / avec le bouchon / bah j'imaginais que c'était moi (inaudible)

EAT-2 (b) : Oui bah / Oui moi j'étais plus concentré sur ce que je faisais / parce que y'avait pas à réfléchir / c'était euh / c'était un clap par / c'était un clap par un pas la plupart du temps euh / en gros y'avait pas à réfléchir / c'était simple

Cet engagement permet d'aider la compréhension :

EAT-2 (b) on regarde / on observe correctement quand eux ils ont fait / et on dit si c'est bon ou pas / parce que des fois euh / quand on était très serrés par exemple on était très collés / bah comme la séance j'étais avec lui / on était très collés sur le planétaire du coup on voyait pas donc c'était difficile

Interviewer : D'accord / et ça c'était plutôt aidant ou euh au contraire embêtant
EAT-2 (b) : Non / C'était aidant ça
Interviewer : D'accord
EAT-2 (a) : Euh bah oui on ça ça arrivait qu'on discute parce que parfois on est trop / on était trop proches sur l'orbite de la comète parce que // En fait l'orbite de cette comète c'est un peu spéciale les médaillons / au début à la f / quand les médaillons ils passent par l'orbite de la Terre et par l'orbite de Mercure ils sont très éloignés les uns des autres / et quand par contre quand / quand ils s'éloignent ils sont plus vers la ceinture de Kuiper et ben / ils commencent à se resserrer euh / en gros / on a du mal à faire des pas tout le monde se colle euh
Interviewer : Et ça ça fait / comprendre quelque chose / le fait que tout le monde se colle comme ça
EAT-2 (b) : Euh non pas trop // J'ai juste compris que la comète en fait / ce que j'ai compris en particulier c'est que la comète elle euh / elle ralentissait à ce moment là

On voit que l'expérience vécue permet de relier la variation de vitesse à la variation de distance parcourue. L'élève pense ne pas avoir compris quelque chose de nouveau et pourtant explicite un apprentissage. Mais cet apprentissage est valable s'il inclut le fait que la durée des déplacements le long de l'orbite de la comète était constante. Cet aspect a été discuté lors de la séance sur le planétaire A3 et justifie à nouveau l'ordre planétaire humain puis planétaire A3.

Au contraire, l'identification a parfois créé des erreurs de compréhension de l'activité. Ici, l'élève fait référence à un moment de la séance au cours duquel un groupe de plusieurs élèves a suivi ensemble l'orbite de la comète. :

EAT-2 (b) : C'est que / en fait euh / nous c'est comme si tu en quand on était sur le planétaire c'est comme si toutes les planètes étaient collées mais sauf qu'en vrai elles sont à plusieurs distances du soleil // Donc on était tout serrés / ça donnait l'impression que les planètes elles sont toutes à côté comme ça alors qu'elles sont à une distance un peu éparpillée(s ?)

On voit ici une difficulté de la personnification puisque l'élève pense que chacun représente une planète. A nouveau, il est nécessaire de faire émerger ces ressentis après la séance sur le planétaire humain.

6. Bilan et perspectives

La mise en place de plusieurs séances consécutives avec plusieurs groupes a permis une confirmation de la motivation et de l'impression positive des élèves vis-à-vis du planétaire humain en tant qu'objet étonnant et en tant que source innovante d'apprentissage. L'apport d'une attention soutenue lors de déplacements vécus réellement a été noté par les élèves interviewés, malgré des difficultés pour certains à suivre les consignes tout en continuant à réfléchir à ce qu'ils faisaient. Ce lien entre action et réflexion est à questionner. Il serait préférable de permettre aux élèves de s'engager entièrement dans leur déplacement et de mettre en place une discussion dans un deuxième temps. Ceci montre également l'intérêt d'une utilisation sur le long terme d'un tel outil basé sur l'enaction. L'élève doit se former pour profiter pleinement de cette approche !

6.1. Quelle place pour la discussion ?

Nous avons vu que l'usage scientifique des mots de cinématique n'est pas immédiat pour les élèves. Les mots peuvent alors être source de confusion ou aider à mettre en lien différentes notions [20]. L'analyse des échanges linguistiques pourrait permettre de révéler une modification des concepts chez les élèves, mais en réalité cette forme d'apprentissage par la discussion, ou l'argumentation reste très souvent sous une forme non explicitée. La recherche de moments explicites de changement conceptuel dans les discours des élèves lors d'une séance de classe (ou ici d'un apprentissage du raisonnement cinématique à trois variables) peut constituer un véritable challenge [21]. Cependant, ils proposent également un cadre intéressant pour analyser l'apprentissage au cours de l'argumentation ou de la controverse [22] que nous pourrions utiliser dans nos prochaines recherches. De façon plus générale, il s'agira alors de réfléchir à la « coordination entre changement conceptuel, argumentation, modèles et explication » [23]. Nous pensons que le « dictionnaire du planétaire » facilitera cette réflexion.

De façon plus pratique, ce lien complexe entre langage et geste pourrait inciter à commencer par une séance incarnée où la parole est limitée, suivie par une séance qui favorisera l'argumentation avec comme soutien les perceptions vécues lors de la première séance. Cette intuition devra être confirmée par de nouvelles expérimentations.

6.2. Interdisciplinarité

Un grand nombre de travaux ont été menés autour de l'enaction en didactique des mathématiques. Nous ne citerons ici qu'un cas exemplaire par son contenu et par son titre : "Why and how may gestures support the emergence of theoretical (conceptual) language?" [24]. Nous souhaitons ainsi développer le caractère interdisciplinaire de ces séances, en augmentant le lien avec les mathématiques. Une collaboration entre les classes de sciences et de mathématiques permettrait non seulement de valoriser l'interdépendance de ces deux disciplines, mais aussi de permettre la mise en place d'une série de séquences plus approfondies sur chaque discipline et ainsi sur une plus longue durée. En particulier, tout le travail de mesures sur le planétaire pourrait être prolongé par un passage au graphe et à la pente, mettant également en valeur un aspect multimodal du même concept. Le contexte de la cinématique est également pertinent pour aborder la notion de proportionnalité.

6.3. Développement de nouvelles expérimentations

Plusieurs collaborations avec des écoles secondaires et des écoles élémentaires se sont déjà mises en place en France et permettront de prolonger et de diversifier cette expérimentation. Les prochaines études qui seront menées autour de l'utilisation du planétaire humain devront alors prendre en compte en particulier la place de l'argumentation et l'interdisciplinarité avec les mathématiques, pour permettre de favoriser et de démontrer l'émergence d'un sens autour des différentes notions relatives à la cinématique.

BIBLIOGRAPHIE

[1] E. Rollinde, N. Rambaux, P. Rocher, A.L. Melchior & P. Lemaire (2015). Le planétaire à échelle humaine. In *Actes du VIIIe colloque* (p. 740-746). Brest: QPES. http://www.colloque-pedagogie.org/node/774

[2] E. Rollinde (2017). Learning Science Through Enacted Astronomy. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 1-16.

[3] S. Rozier (1988). Le raisonnement linéaire causal en thermodynamique classique *élémentaire.* (thesis). Université Denis Diderot Paris VII. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01275811/document

[4] I. Kirsch, J. Dejong, D. Lafontaine, J. Mcqueen, J. Mendelovits & C. Monseur (2002). Reading for change: Performance and engagement across countries: Results from PISA 2000 (Publication No. ED474915). *Washington, DC: US Government Printing Office.*

[5] J. Leach & P. Scott (2003). Individual and sociocultural views of learning in science education. *Science & Education*, p. 91113.

[6] G. Sensevy, A. Tiberghien, J. Santini, S. Laube & P. Griggs (2008). An epistemological approach to modeling: Cases studies and implications for science teaching. *Sci. Educ*., 92, 424 – 446.

[7] D. Kuhn (1993). Science as Argument: Implications for Teaching and Learning Scientific Thinking. *Science Education* (77), pp. 319-337

[8] J.L. Canal (1986). La vitesse au cours moyen. *Aster,* vol. *2*, p. 133

[9] L. Radford (2009). Why do gestures matter? Sensuous cognition and the palpability of mathematical meanings. *Educational studies in mathematics, 70(2).* 111-126 ; L. Radford (2014). Towards an embodied, cultural, and material conception of mathematics cognition. *ZDM Mathematics Education, 46*. 349-361

[10] J. Piaget (1946). Le développement de la notion de temps chez l'enfant. Paris. PUF ; PIAGET J. (1970). *Genetic epistemology*. New York, NY : Norton

[11] I.A. Halloun & D. Hestenes (1985). The initial knowledge state of college physics students. *American Journal of Physics*, vol. 53, n0 11.

[12] L. Viennot (1996). Raisonner en physique: La part du sens commun. De Boeck Supérieur ; L. Viennot (2002). *Enseigner la physique*. De Boeck Supérieur.

[13] J.R. Lapaire (2017). La kinéflexion : produire, exhiber, partager des actes vivants de pensée. *Intellectica*, *68*(2), 193-223.

[14] A.M. Glenberg (2015). Few believe the world is flat: How embodiment is changing the scientific understanding of cognition. *Canadian Journal of Experimental Psychology,* vol 69, n° 2, p. 165–171.

[15] F. Varela, E. Thompson & E. Rosch (1991). The Embodied Mind: Cognitive Science and Human

Experience. MIT Press. ISBN 978-0-262-72021-2

[16] M. Wilson (2002). Six views of embodied cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, *9*(4), 625-636.

[17] S. Invernizzi, C. Marioni & P. Sabadini (1989). Mouvement et vitesse au cours élémentaire. *Aster*, p. 211.

[18] P.W. Thompson (1994). The development of the concept of speed and its relationship to concepts of rate. In *The development of multiplicative reasoning in the learning of mathematics* (NY: SUNY Press, p. 181-234). Albany: G. Harel & J. Confrey.

[19] M. Segal (2011). Do Gestural Interfaces Promote Thinking? Embodied Interaction: Congruent Gestures and Direct-Touch Promote Performance in Math (Doctoral dissertation). Retrieved from *Graduate School of Arts and Sciences*, Columbia University. https://academiccommons.columbia.edu/item/ac:132260.

[20] S.A. Gelman & J.M. Dejesus (2018). The language paradox. Words invite and impede conceptual change. In *Converging perspectives on conceptual change*. Ed. Amin & Levrini, p. 89

[21] L.K. Berland & R.S. Russ (2018). Conceptual change through argumentation. In *Converging perspectives on conceptual change*. Ed. Amin & Levrini, p. 180

[22] P.L. Hammerich (2002). Confronting students' conceptions of the nature of science with cooperative controversy. In *the nature of science in science education*, Mc Comas W.F., Kluwer Academics Publisher, p.126

[23] S. Erduran, E. Kaya & P.S. Cetin (2018). Consolidation of conceptual change, argumentation, models and explanation. In *Converging perspectives on conceptual change*. Ed. Amin & Levrini, p. 153

[24] W.M. Roth & D. Lawless (2002). Scientific investigations, metaphorical gestures, and the emergence of abstract scientific concepts. *Learning and Instruction*, *12*(3), 285-304.