



UFR SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES
DÉPARTEMENT DE PHILOSOPHIE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU MASTER DE
LOGIQUE, ÉPISTÉMOLOGIE ET HISTOIRE DES SCIENCES

**Une contribution des sciences
cognitives à l'enseignement de la
physique**

Mémoire présenté et soutenu par Cyril DENIS
Sous la direction de Cyrille IMBERT.

Septembre 2018

Remerciements

Ce mémoire de fin d'études a été encadré par Cyrille Imbert. Je souhaite le remercier pour sa bienveillance et sa patience. Merci de m'avoir aidé à discerner ce dont je voulais vraiment parler et à organiser les idées de ce mémoire. Merci aussi pour votre exigence et votre confiance qui m'ont permis d'oser lire des articles en anglais sans être trop complexé par mon niveau linguistique.

Merci à Philippe Nabonnand pour son implication dans la formation MADELHIS et pour son accueil toujours chaleureux. Merci à l'ensemble des professeurs pour leur disponibilité et la qualité de leur enseignement. Durant ces deux années d'études¹, j'ai appris plus sur la science que durant ma formation initiale. Merci pour ces nouveaux horizons de connaissances.

Je remercie mes collègues et amies, Françoise et Elodie, pour nos discussions sérieuses au sujet de la physique et moins sérieuses sur tous les autres sujets.

Un grand merci, à Anna mon épouse qui a assuré l'équilibre de notre famille en toutes circonstances, à Augustin, Louise, Guilhem et Romaine, nos enfants.

1. qui dans mon référentiel ont duré trois ans

Introduction

Dès les premiers mois de sa vie, le mouvement suscite l'attention du bébé qui suit du regard les déplacements de ses parents autour de lui. Une fois capable de se déplacer par ses propres moyens, le jeune enfant que nous avons été associe des sensations à la vitesse, à l'accélération ou encore à l'inertie. Finalement, nous pratiquons la mécanique depuis les premiers jours de notre existence. Une telle expérience devrait faire de nous des experts ou tout au moins des sujets clairvoyants lorsqu'il s'agit de discuter du mouvement dans des situations proches du quotidien.

Les connaissances que nous possédons au sujet de la physique sans pour autant avoir étudié cette discipline forme ce qu'on appelle communément : la physique naïve. Nous verrons que bien que nous soyons tous différents, on peut s'accorder sur le fait que nous partageons assez largement un ensemble de règles à propos du mouvement. C'est avec ces règles que l'on explique ou que l'on prédit le mouvement des objets qui nous entourent.

Pourtant, malgré nos expériences sensibles et notre physique naïve, nous échouons pour la majorité d'entre nous à prédire le mouvement de certains objets y compris dans des situations simples (voir chapitre 1). C'est l'échec de notre raisonnement spontané en mécanique qui constitue le point de départ de la réflexion menée dans ce mémoire.

Nous constaterons dès le premier chapitre que la physique naïve est un obstacle important de l'apprentissage de la mécanique classique. Mon intention est d'apporter un élément de réponse à la question : "Comment améliorer l'apprentissage de la mécanique classique en tenant compte des conceptions initiales erronées des élèves ainsi que de leur résistance au changement conceptuel ?"

Dans le premier chapitre, nous présentons une tâche qui permet de révéler le contenu du raisonnement spontané. Nous montrerons que l'on peut dégager deux règles (fausses) particulièrement utilisées par les sujets naïfs pour penser le mouvement. Dans le chapitre suivant, nous verrons ce qui distingue la physique naïve d'une véritable science. Au-delà du raisonnement, nous montrerons que la posture du naïf n'est pas scientifique (manque de systématичit   et incohérence dans l'argumentation). Cette caractérisation de la physique naïve met en évidence le problème que posent les conceptions initiales pour l'apprentissage, mais ne révèle pas assez

d'éléments permettant d'élaborer une stratégie pédagogique. C'est pourquoi nous irons puiser dans les sciences cognitives un apport plus fondamental sur les mécanismes mobilisés lors du raisonnement en physique (catégorisation et explication).

Il ne suffit pas d'avoir l'intention d'effacer ce qui est erroné dans l'esprit de l'élève pour le faire progresser. Les progrès de l'imagerie cérébrale et l'identification de certains biais cognitifs nous indiquent qu'il y a des connaissances initiales qui semblent indélébiles dans notre esprit et que le sujet doit inhiber afin de raisonner correctement. Ce phénomène d'inhibition sera présenté au chapitre 4 ainsi que quelques-unes de ses conséquences sur l'apprentissage dans le cadre d'un changement conceptuel.

Enfin, à l'aide des mécanismes cognitifs discutés précédemment, nous essaierons dans une dernière partie de formuler une critique ferme, mais constructive concernant les programmes officiels de l'enseignement de la mécanique dans les classes du secondaire.

Table des matières

1 Expérience du marcheur	9
I. Préambule	9
II. Constat d'une conception initiale erronée	10
III. Résultats de l'étude	11
IV. Première interprétation : La conception aristotélicienne	12
IV.1. Le statut de l'objet mobile	12
IV.2. L'expérience de la rampe	12
IV.3. Résultats	13
IV.4. Théorie de l'impetus	14
IV.5. L'élève raisonne-t-il selon la théorie de l'impetus ?	15
IV.6. Force et vitesse	15
V. Deuxième interprétation : principe de relativité	16
V.1. Aspect historique du principe de relativité	16
V.2. La difficulté de la notion de référentiel	18
VI. Interprétation en terme d'illusion de perception	21
VII. Conclusion	24
2 La physique naïve est-elle une science ?	25
I. Introduction	25
II. Des explications improvisées	26
III. Un raisonnement incohérent	27

TABLE DES MATIÈRES

III.1.	Des connaissances fragmentées	27
III.2.	Décomposition d'un raisonnement naïf en éléments simples (p-prims)	28
IV.	Poids du contexte sur le raisonnement naïf	29
V.	Conclusion	31
3	La physique naïve éclairée par les sciences cognitives	33
I.	Introduction	34
II.	A l'origine du raisonnement physique	35
II.1.	Quel modèle de développement cognitif?	35
II.2.	Hypothèses	35
III.	Catégoriser	37
III.1.	Catégorisation chez le physicien professionnel	37
III.2.	Catégorisation chez le jeune enfant	37
III.3.	Catégoriser novices vs experts	39
III.4.	Bilan et perspectives de recherches	40
IV.	Importance de l'explication	41
IV.1.	Distinction entre théorie et explication	42
IV.2.	L'explication facilite l'élaboration de connaissances	42
IV.3.	Existence d'un couplage entre explication et catégorisation	44
IV.4.	Bilan et bénéfices pédagogiques	46
V.	Le changement conceptuel	48
V.1.	Analogie entre évolution de la science et développement cognitif	48
V.2.	Critiques du modèle de Gopnik	49
V.3.	L'apprentissage de la physique chez le très jeune enfant	50
V.4.	Lorsque la révision théorique échoue	53
4	L'inhibition comme levier du changement conceptuel	57
I.	L'inhibition	58
I.1.	Mise en évidence	59
I.2.	Inhibition et raisonnement	60
II.	Changement conceptuel et inhibition en mécanique	61
II.1.	Aspect cumulatif de l'apprentissage	61
II.2.	Aspect disruptif du changement conceptuel	62

TABLE DES MATIÈRES

II.3.	Lien entre changement conceptuel et inhibition	63
II.4.	Présentation de l'étude de Foisy	66
II.5.	Résultats	67
III.	Conclusion	68
5	Critiques de l'enseignement du mouvement	71
I.	Introduction	71
II.	Ignorance des particularités du changement conceptuel	72
II.1.	Penser le mouvement	72
II.2.	Révision conceptuelle trop tardive	73
II.3.	Renforcement involontaire de la méconception par l'enseignement . . .	74
III.	Stratégie pédagogique	74
IV.	Bilan	75

TABLE DES MATIÈRES

Chapitre 1

Expérience du marcheur

Seules les pensées que l'on a en
marchant valent quelque chose

Le Crépuscule des idoles - Nietzsche

I. Préambule

Si l'on admet que pour bien enseigner il est important de caractériser le raisonnement de l'élève alors on s'intéressera particulièrement aux situations dans lesquelles il se trompe.

Dans cette partie du mémoire, nous allons mettre en évidence l'étonnante proximité entre la conception du mouvement chez un débutant et la mécanique aristotélicienne. De manière à caractériser précisément le mouvement tel que le conçoit le naïf, nous nous référerons souvent à une expérience que nous appelons : expérience du marcheur¹. À partir de l'analyse des réponses de l'élève, nous relèverons les éléments qui permettent de distinguer la théorie de l'impetus des justifications proposées par le sujet interrogé. Ainsi, nous constaterons que l'élève confond vitesse et force et a une conception absolue du mouvement. Enfin, nous mettrons en relation le biais de perception révélée dans (McCloskey, Washburn, et Felch 1983) avec le fort ancrage des conceptions initiales erronées des élèves.

1. Elle sera détaillée dans la suite.

II. Constat d'une conception initiale erronée

En 1632, Galilée rédige un dialogue entre trois personnes. Le premier personnage se nomme Salviati², il est favorable au système héliocentrique de Copernic. Simplicio, lui est adepte de la théorie d'Aristote et de sa vision géocentrique du monde. Le dernier personnage, Sagredo joue un rôle de médiateur. Il n'a pas de conception arrêtée et se nourrit des arguments de Salviati pour en faire la synthèse. Parmi les nombreuses expériences de pensée que l'on trouve au fil de la conversation dans *Dialogue concernant les deux grands systèmes du Monde* (Galilei 2000), certaines d'entre elles nous montre à quel point le principe de relativité est en germe dans la pensée de Galilée. C'est le cas, lorsqu'il discute de l'expérience du boulet lâché en haut du mât d'un navire. A cet endroit de l'ouvrage, Salviati énonce le point de vue aristotélicien de l'interprétation de cette expérience.

Laissons tomber une boule de plomb du haut d'un mât d'un navire au repos et notons l'endroit où elle arrive, tout près du pied du mât; si du même endroit, on laisse tomber la même boule quand le navire est en mouvement, le lieu de sa percussion sera éloigné de l'autre d'une distance égale à celle que le navire aura parcourue pendant le temps de chute, et tout simplement parce que le mouvement naturel de la boule, laissée à sa liberté, se fait en ligne droite vers le centre de la Terre. (Deuxième Journée p 241 paragraphe 255)

Ainsi, Galilée stimule nos aprioris aristotéliciens pour mieux les combattre dans la suite de son dialogue. En effet, Salviati déclare à propos de cette expérience de pensée :

Que n'importe qui la fasse et il trouvera en effet que l'expérience montre le contraire de ce qui est écrit : la pierre tombe au même endroit du navire, que celui-ci soit à l'arrêt ou avance à n'importe quelle vitesse. Le même raisonnement valant pour le navire et pour la Terre, si la pierre tombe toujours à la verticale au pied de la tour, on ne peut rien en conclure quant au mouvement ou au repos de la Terre. (Deuxième journée p 264 paragraphe 284)

Dans son article (McCloskey, Washburn, et Felch 1983) McCloskey soumet de nombreuses variantes de ce problème à de jeunes étudiants. Il constate que nombreux sont ceux qui ont une vision qui s'accorde au moins en apparence à la physique d'Aristote. Dans le premier test qu'il soumet à un échantillon de sujets, McCloskey remplace le boulet par une boule en fer et le mât du navire est incarné par le bras tendu d'un marcheur.

Contexte Dans tout ce qui suit, les frottements sont négligeables devant les autres forces. L'image montre, vue de côté, un homme qui marche à vitesse constante à une allure modérée sur un sol plat. L'homme porte, bras tendu, à la hauteur de son épaule, une boule en métal. Cette boule est représentée par le disque hachurée sur le schéma. Lorsque l'homme atteint la position correspondant à ce qui est représenté sur le schéma, il lâche la boule, tout en poursuivant sa marche à la même vitesse.

2. C'est le personnage qui porte les idées de Galilée

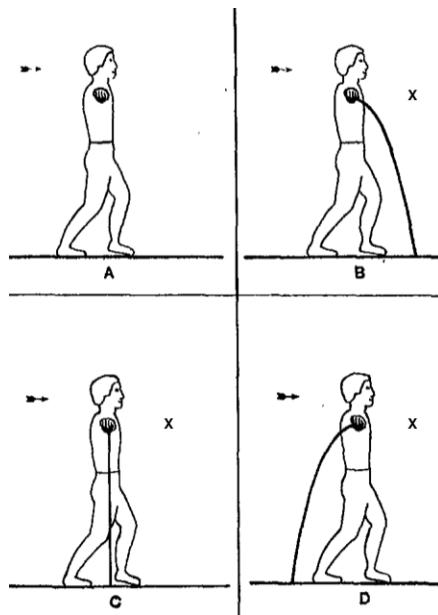


FIGURE 1.1 – Figures extraites de McCloskey(1983). Intuitive physics : The straight-down belief and its origin. Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition

Travail à effectuer par le sujet On demande au sujet de :

1. Marquer par un point sur le sol, l'endroit où la boule va venir frapper le sol.
2. Dessiner la trajectoire suivie par la boule pendant sa chute.
3. Indiquer par une croix, l'endroit où se trouvera la main de l'homme au moment de l'impact de la boule avec le sol.

La figure ci-dessus est composée de quatre schémas A,B,C et D. Le schéma A est le support sur lequel le sujet doit réaliser le travail demandé. Les schémas B,C et D montrent les trois catégories de réponses que l'on peut isoler à partir des réponses de l'ensemble des personnes interrogées. La réponse C est la réponse la fréquente, elle est néanmoins erronée. En effet, la situation conforme à la réalité est représentée dans le schéma B. Parfois, certains sujets ont l'intuition que la boule va subir un effet de recul ou bien exprime maladroitement que la boule va tomber derrière le marcheur. Cela concerne une minorité des réponses.

III. Résultats de l'étude

Cette tâche a été soumise à 99 étudiants de première année universitaire. Parmi ces étudiants, 62 ont suivi un enseignement de physique au lycée ou en première année contrairement au 37 autres qui n'ont pas suivi ce type de cours. Seul 45 % des sujets initiés fournissent une réponse qui indique un mouvement vers l'avant de la boule. 49% des sujets indiquent un mouvement purement vertical. Cette réponse erronée est présente à 60% chez les étudiants non initiés et encore 40% chez les étudiants de physique.

1. Expérience du marcheur

Ces résultats montrent que les étudiants ont du mal à prédire correctement le mouvement d'un objet en chute libre lâché depuis un support qui se déplace. Cette difficulté est moins présente chez les étudiants initiés que chez les naïfs. Néanmoins, ils sont encore presque une moitié à se tromper.

Ce type de tâche mettant en scène un objet lâché depuis un autre en mouvement a été plusieurs fois évaluée avec des échantillons de sujets variés (Eckstein et Shemesh 1993), (Kaiser, Proffitt, et McCloskey 1985) et (Krist 2000). On observe à chaque fois une part importante des sujets qui pensent que la boule lâchée par le marcheur tombe à la verticale du lieu où elle a été abandonnée.

Comment interpréter l'existence de cette conception initiale erronée chez les débutants ? Comment expliquer que cette erreur perdure après un enseignement de la mécanique chez de jeunes étudiants ? Si l'on parvient à isoler les éléments clés de cette mauvaise conception du mouvement peut-on alors élaborer un enseignement de la mécanique mieux adapté aux élèves ?

IV. Première interprétation : La conception aristotélicienne

IV.1. Le statut de l'objet mobile

Bien souvent lorsqu'il se trompe, le sujet naïf attribue aux objets des propriétés intrinsèques erronées. Il considère que la boule est un objet inerte qui subit le mouvement du marcheur tant qu'il est en contact avec. Lorsque ce contact est rompu, la boule se met en mouvement en rejoignant son état naturel, c'est à dire le sol. On retrouve là une conception aristotélicienne du mouvement. Le marcheur, lui est vu comme un objet disposant de sa propre faculté de mouvement. On peut dire que le marcheur possède un moteur lui permettant d'être en mouvement. La dichotomie entre la boule inerte et le marcheur muni d'un moteur interne est peut-être renforcée par le caractère vivant du marcheur qui s'oppose à la matière inanimée de la boule en métal. Pour le sujet, il y a donc dans cette situation deux catégories distinctes d'objets. Ceux qui possèdent une vitesse "propre" qui leur vient d'un moteur interne comme c'est le cas du marcheur. Et ceux qui en sont démunis et qui doivent leur mouvement à un moteur extérieur.

Il s'agit maintenant de confirmer cette différence de statut de l'objet chez le naïf. Pour cela, on analyse les prédictions des sujets à propos de deux mouvements qu'ils perçoivent différents et qui sont pourtant identiques du point de vue de la mécanique newtonienne.

IV.2. L'expérience de la rampe

Considérons une série d'expériences analogues à celle du marcheur. Son but sera d'interroger le statut de l'objet en mouvement. Cette fois, on propose au sujet deux situations A et B (voir figure 1.2). Dans la situation A, une boule est accrochée à un système nommé convoyeur qui

coulisse sur un cable horizontale à vitesse constante. Le convoyeur à mi-parcours abandonne la boule. Cette expérience est l'analogue de l'expérience du marcheur qui est substitué ici par le convoyeur. On demande au sujet de décrire la trajectoire de la boule à partir de l'instant où elle a été lâchée par le convoyeur. Pour la situation B, on lance, en la poussant brièvement, une boule sur une rampe horizontale qui surplombe un espace creux. On admet qu'une fois lancée la boule roule tout droit à vitesse constante sur la rampe. On demande au sujet interrogé de décrire le mouvement de la boule après qu'elle a franchie l'extrémité de la rampe. Dans la suite, cette situation est appelée : expérience de la rampe.

Si l'analogie entre la situation A et B est claire pour un individu qui a assimilé la mécanique de Newton et analyse la situation au travers de ce schéma de pensée, pour un débutant en physique ces deux expériences sont radicalement différentes. En effet, les propriétés mécaniques de la boule qui vient de quitter la rampe sont les mêmes que celle qui vient de quitter le convoyeur (ou la main du marcheur). Plus précisément, dans ces deux situations, la boule ne subit qu'une force : son poids et à l'instant où elle quitte son support (rampe ou convoyeur) sa vitesse est purement horizontale. En admettant que la vitesse du convoyeur est égale à la vitesse de la boule sur la rampe, on peut conclure que le mouvement de la boule dans l'expérience A sera strictement le même que dans l'expérience B.

L'analyse des situations A et B va permettre de mettre en évidence la différence de statut supposé par le sujet naïf entre la boule et le convoyeur (ou le marcheur si on raisonne sur la première expérience). Cette expérience a été présentée dans (McCloskey, Washburn, et Felch 1983) (Expérience préliminaire 2 p 638).

IV.3. Résultats

Les résultats de cette expérience montrent, pour la situation B (expérience de la rampe), que la quasi totalité des étudiants interrogés sur le mouvement de la boule affirment que la boule va avancer pendant sa chute. En revanche, ils sont à peine deux tiers à proposer un mouvement vers l'avant en ce qui concerne la situation A³.

La difficulté principale se situe dans le statut de la boule après qu'elle soit lâchée par le convoyeur. Cela peut s'expliquer par le fait que les étudiants considèrent que la transmission de la vitesse du marcheur à la balle cesse dès que le contact entre ces deux objets cessent. Dans l'expérience de la rampe, la boule qui a été lancée au départ garde le bénéfice de ce qu'un sujet naïf appelle "l'élan" ou "la force qui fait avancer la boule". Cette boule a stocké quelques choses qui lui permet d'avancer. En analysant les réponses des élèves telles qu'ils les formulent, il semble que leurs explications se fondent sur des croyances analogues à l'impetus (Maria Kozhevnikov et Hegarty 2001). Dans la suite, nous exposons brièvement le contenu de la théorie de l'impetus. Nous constaterons que l'élève partage avec l'impetus une approche causale du mouvement.

3. Cette expérience étant analogue à celle du marcheur, on n'est pas étonné de retrouver des résultats similaires à ceux présentés au II.

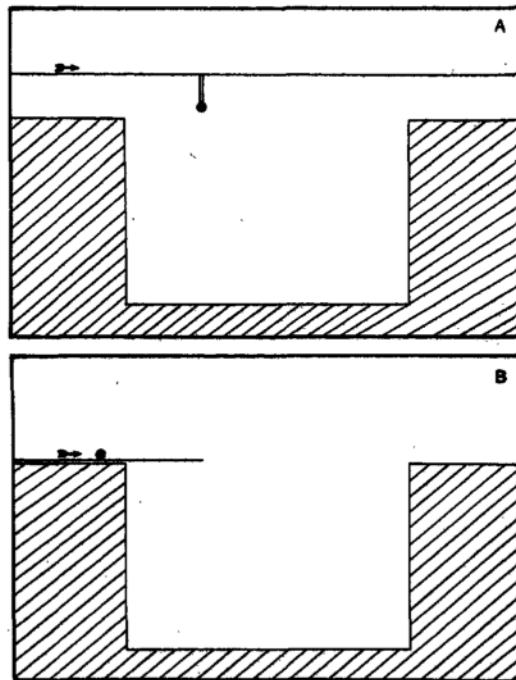


Figure 2. The conveyor problem (A) and the ramp problem (B).

FIGURE 1.2 – Expérience de la rampe - Extrait de McCloskey 1983

IV.4. Théorie de l'impetus

Pour l'élève, la boule qui a été lancée sur la rampe possède quelques choses qui lui a été conféré par la main au moment du lancé. Voyons si l'histoire des sciences éclaire le fondement de cette physique spontannée.

C'est Jean Buridan, maître à la Faculté des arts de Paris vers 1330, qui utilise le premier ce terme. On retrouvera le concept d'impetus chez d'autres auteurs mais parfois sous une autre expression comme par exemple : "impression de mouvement" ou "habitus" chez Benedetti⁴ (1530-1590) ou bien "virtus impressa" chez Galilée (1564-1642). La théorie de l'impetus s'étend du XIV^e au XVII^e et naît d'une réponse à un problème mal résolu par la physique d'Aristote : le mouvement d'un projectile.

Rappelons que pour Aristote, les mouvements violents comme celui d'un projectile ne peuvent se faire qu'avec du contact. Par opposition, les mouvements naturels se produisent d'eux-mêmes et dépendent de la nature du corps. Aristote constate que le mouvement du projectile s'accompagne de la libération de la portion d'espace que celui-ci occupait auparavant. Cet espace libéré, derrière le projectile, crée une sorte "d'appel d'air" qui participe à son mouvement. L'air serait le moteur du projectile. Finalement pour Aristote : « Tout ce qui est mû est mû par autre chose... ».

4. Mathématicien à Venise qui remet en cause la théorie d'Aristote selon laquelle la durée de chute d'un corps dépend de la masse de ce corps

En s'appuyant sur quelques expériences, Jean Buridan conteste les explications d'Aristote. Par exemple, le bateleur installé à l'avant de son bateau se déplace dans l'air et pourtant l'action qu'il ressent de l'air s'oppose à son mouvement. Il propose une théorie selon laquelle lorsqu'un corps est jeté, il reçoit de la part du lanceur une force qui s'imprime en lui : l'impetus. Le transfert entre le lanceur (ou *le moteur*) et le mobile dépend de la capacité du corps à recevoir l'impetus ((Koyré 1939) p49) et de la durée d'impression. A propos de l'impetus Benedetti dans De Mechanicis déclare :

"C'est une espèce de qualité, puissance ou vertu qui s'imprime au mobile ou, mieux qui l'imprègne (...) C'est aussi une espèce d'habitus qu'acquiert le mobile, et cela d'autant plus qu'il est plus longtemps soumis à l'action du moteur."

Chacune de ces expressions est une tentative d'explication du mouvement par une propriété qui réside uniquement dans le mobile. L'impetus est une propriété de l'objet. Lors de son mouvement le mobile transporte avec lui sa cause.

IV.5. L'élève raisonne-t-il selon la théorie de l'impetus ?

Finalement, la théorie de l'impetus ne semble pas contradictoire avec le fait que la boule possède, en plus de son mouvement vertical de chute, un mouvement horizontal dans le sens de déplacement du marcheur. En effet, la main du marcheur a permis à la boule d'acquérir par contact de l'impetus. Si l'élève raisonne avec une théorie de l'impetus, le contact prolongé entre la boule et la main du marcheur implique l'impression d'un mouvement horizontal dans la boule. Ainsi, il devrait prédire un mouvement vers l'avant dans l'expérience du marcheur. Dans ce cas, le raisonnement d'impetus ne devrait pas conduire l'élève à une réponse erronée.

Il est plus probable que l'étudiant qui se trompe, utilise une théorie moins raffinée que celle de l'impetus que nous venons de décrire. Pour lui, il n'y a pas d'impression d'impetus⁵ entre le marcheur et la boule car le marcheur ne fait pas d'effort en lâchant la boule. Comment pourrait-il transmettre une force sans faire un effort physique ? Le sujet qui se trompe est convaincu que le mouvement horizontal n'est possible que si l'objet mobile subit une force horizontale. Or, le marcheur a lâché la boule, il n'a donc pas exercé de force de lancer horizontale ainsi, la boule tombe verticalement conformément à la gravité.

Finalement, on peut expliquer la prédiction erronée de l'élève par la mobilisation d'une croyance qui considère que la force est une condition nécessaire au mouvement. On aperçoit là, une confusion entre force et vitesse et plus généralement entre dynamique et cinématique. Afin d'évaluer la distance qui sépare la conception intiale du mouvement et la mécanique classique, nous allons détailler la relation entre force et vitesse chez le naïf.

IV.6. Force et vitesse

Sur quoi est fondée cette confusion entre force et vitesse ? On peut commencer par remarquer que cette confusion est largement présente dans le langage que nous utilisons au quotidien.

5. L'élève utilisera le mot force bien que sa conception de force ne soit pas celle du scientifique

1. Expérience du marcheur

Par exemple, la force du vent dans un bulletin météorologique s'exprime en km/h et désigne en fait sa vitesse. Cette confusion dans le langage est peut être plus la trace que la cause des erreurs relevées précédemment et il faut détailler davantage le lien entre force et vitesse. Nos expériences quotidiennes semblent valider le fait qu'il faille en permanence pousser le chariot pour qu'il avance. On n'imagine d'ailleurs difficilement un objet qui avance sans que rien ne le pousse et pourtant...

Laurence Viennot a étudié en détail la construction du concept de force et de vitesse chez les élèves ((Viennot 1979) p 25). Elle suggère que le raisonnement naïf postule une relation pseudo-linéaire entre force et vitesse. Il en découle la propriété suivante :

S'il existe une vitesse, ou une composante de vitesse, dans une direction donnée, alors il existe une force de même direction.

Dans l'expérience du marcheur, le raisonnement naïf s'appuie sur la contraposée de cette proposition. Le marcheur lâche sans effort la boule qui alors ne possède aucune force horizontale, elle n'a donc plus de vitesse horizontale.

Dans l'expérience de la rampe, la boule a été préalablement lancée afin de rouler sur la piste. Pour le naïf, cette opération consiste à transférer de la force en provenance du lanceur et à destination de la boule. C'est grâce à cette force⁶ qu'il considère comme un capital de mouvement que la boule peut poursuivre son mouvement à vitesse constante sur la rampe. C'est aussi grâce à elle que la boule possèdera un mouvement horizontal (en plus du mouvement vertical de chute) lorsqu'elle aura dépassée la rampe.

La force est alors la cause du mouvement et non pas la manifestation d'une interaction entre deux objets. Il existe donc chez les naïfs et encore chez de nombreux étudiants, un raisonnement spontané, fréquent et faux qui considère que force et vitesse se font nécessairement dans la même direction.

V. Deuxième interprétation : principe de relativité

V.1. Aspect historique du principe de relativité

L'expérience du marcheur peut être facilement interprétée à l'aide du principe de relativité galiléenne. Avant de détailler cette interprétation, revenons sur son histoire et examinons son rôle dans la théorie actuelle la mécanique. Comme nous l'avons vu, le point de vue aristotélicien consiste à défendre l'idée qu'un projectile se meut en vertu d'une cause interne. Cela revient à dire que la vitesse est non seulement propre à l'objet mais qu'il n'existe pas de mouvement sans moteur (sans force). C'est cet argument que Galilée va contester brillamment à l'aide de quelques papillons enfermés dans la cale d'un navire.

6. Remarquons que l'on postule ici qu'une force clairement identifiée dans le passé du mobile a des effets au moment où la boule quitte la rampe. Ce glissement dans le temps n'apparaît plus dans la mécanique de Newton dont les lois s'appliquent à un instant t sans référence aux instants passés

- **Salviati** : Enfermez-vous avec un ami dans la plus vaste cabine d'un grand navire, et faites en sorte que s'y trouvent également des mouches, des papillons et d'autres petits animaux volants (...) ; puis alors que le navire est à l'arrêt, observez attentivement comment ces petits animaux volent avec des vitesses égales quel que soit l'endroit de la cabine vers lequel ils se dirigent ; (...). Faites déplacer le navire à une vitesse aussi grande que vous voudrez ; pourvu que le mouvement soit uniforme et ne fluctue pas de-ci de là, vous n'aperceverez aucun changement dans les effets nommés, et aucun d'entre eux ne vous permettra de savoir si le navire avance ou bien s'il est arrêté (...) les papillons et les mouches continueront à voler indifféremment dans toutes les directions. Et on ne les verra jamais s'accumuler du côté de la cloison qui fait face à la poupe ; ce qui ne manquerait pas d'arriver s'ils devaient s'épuiser à suivre le navire dans sa course rapide.

(extrait de (Galilei 2000))

Dans cette expérience, Galilée montre qu'il n'y pas de différences entre le mouvement rectiligne uniforme et l'immobilité. Comme l'explique Françoise Balibar (Balibar 2007) p34, puisque les mêmes causes produisent les mêmes effets, les mêmes causes doivent être assignées au mouvement uniforme et au repos, à savoir précisément l'absence de moteur (de force, dirons-nous aujourd'hui). Il s'agit de ce qu'on appelle aujourd'hui le principe de Galilée. Dans son ouvrage présentant au grand public la relativité restreinte, Einstein l'énonce ainsi : "Un point matériel abandonné à lui-même et suffisamment éloigné de tous les autres points⁷ effectue un mouvement rectiligne uniforme." (Einstein 1972) p23. On voit que ce principe est une pierre fondatrice de la mécanique car en plus de dire des choses concernant le mouvement des corps, il indique quels sont les corps de références qui peuvent être employés dans la description mécanique. Il s'agit des fameux référentiels galiléens dans lesquels Einstein a construit la relativité restreinte.

Galilée ne poussera pas son idée jusqu'à conclure au caractère relatif de la notion de vitesse. Il dira que le mouvement uniforme est imprimé de manière indélébile dans tous les corps qui le partagent. Avec cette affirmation, on comprend alors que les papillons possèdent la vitesse du bateau sans avoir à voler pour rattrapper le bateau. Pour Galilée, ce type d'expérience est d'une très grande importance et préfigure ce que pourrait être une expérience permettant de décider du mouvement ou de l'immobilité de la Terre. Il n'est pas impossible que nous soyons les papillons à bord d'un navire appelé Terre.

En reprenant l'idée de Galilée, nous pouvons expliquer l'expérience du marcheur. Tant que la boule est tenue par le marcheur, elle partage son mouvement et celui-ci est imprimé de manière indélébile. Lorsqu'elle est lâchée, elle continue à se déplacer comme lui pendant qu'elle tombe. Lorsqu'elle a chuté d'une hauteur identique à ce qui l'a séparé du sol, elle se retrouve au côté du marcheur au niveau de ses pieds.

Nous pouvons aussi interpréter l'expérience du marcheur à la lumière du principe de relativité. Lorsque le marcheur est à l'arrêt, la boule tombe à ses pieds. Or, le mouvement de la boule (comme celui des papillons) ne doit pas être affecté par le déplacement de translation uniforme

7. Il s'agit d'une manière de dire que le point matériel n'intéragit avec aucun autres systèmes ce qui revient à dire qu'il ne subit aucune force.

1. Expérience du marcheur

du marcheur⁸. On en conclut que la boule tombe aussi aux pieds du marcheur lorsque celui se déplace. Ce raisonnement se formule aujourd’hui en terme de changement de référentiel. Le sol et le marcheur sont en translation rectiligne uniforme l’un par rapport à l’autre. On dit que se sont deux référentiels équivalents. L’observation de la chute verticale de la boule lâchée par un “marcheur immobile”⁹ est identique à celle faite par un marcheur qui se déplace tout droit à vitesse constante. Dans les deux cas, la boule tombe verticalement le long du corps du marcheur. Le problème du marcheur devient alors d’une extrême simplicité si on le transpose dans le référentiel lié au marcheur : la boule tombe en chute libre verticalement.

V.2. La difficulté de la notion de référentiel

La majorité des individus ne traitent pas le problème en utilisant le principe de relativité. Pour une telle approche, un préalable est nécessaire, il s’agit de la notion de référentiel.

Si les expressions “le marcheur est en mouvement” ou “la boule est immobile” font sens pour l’homme de la rue, la question : “Quelle est la différence entre un pigeon ?” lui paraît clairement mal posée. Pourtant, ce sont ces trois énoncés qui sont incomplets. On ne peut les évaluer qu’en ajoutant un autre objet qui sert de comparaison. Nous acceptons facilement que pour effectuer une différence il est nécessaire de considérer deux objets. La physique nous apprend que pour affirmer si un objet est en mouvement ou au repos, il est nécessaire de s’imposer un préalable qui est le choix d’un référentiel. Il s’agit de désigner un objet, tout en affirmant de manière arbitraire qu’il est immobile. Ensuite pour des commodités mathématiques, on attache à cet objet un repère et une horloge qui permettent de localiser dans l’espace et dans le temps les positions occupées par le système dont on étudie le mouvement. Bien souvent, cette nécessité échappe au débutant car il est persuadé de l’existence d’un espace unique dans lequel il peut repérer le mouvement de tous les objets : un référentiel absolu. Sur quoi est fondée une telle croyance ?

Comme nous l’avons dit dans le paragraphe précédent, pour le néophyte la vitesse de l’objet est une propriété de l’objet. Même si, après un enseignement, il peut admettre que le mouvement de la boule n’est pas le même dans le référentiel du sol et dans le référentiel du marcheur. Il pourra encore douter et ne pas considérer les deux descriptions comme équivalentes. Pour mettre en évidence et préciser cette conception inachevée chez de nombreux étudiants, on peut se référer à une situation présente dans un questionnaire¹⁰ extrait de (Viennot 2007).

Nous sommes au métro Chatelet dans le grand couloir que deux immenses tapis roulants permettent de parcourir plus vite. Deux hommes, l’un A, debout, est arrêté sur le trottoir fixe, l’autre B, est sur un tapis roulant, accoudé à la rampe. Sur ce même tapis marche un troisième homme C. Les deux premiers, A et B, le regardent. La figure de cette situation est schématisée figure 1.3.

Question : *Les grandeurs suivantes sont-elles les mêmes pour les deux observateurs A et B ?*

8. La marcheur joue ici un rôle identique à celui du bateau dans l’expérience de Galilée.

9. C'est à dire un individu immobile par rapport au sol.

10. Enquête donnée en 1979 à 46 étudiants de première année

V.. DEUXIÈME INTERPRÉTATION : PRINCIPE DE RELATIVITÉ

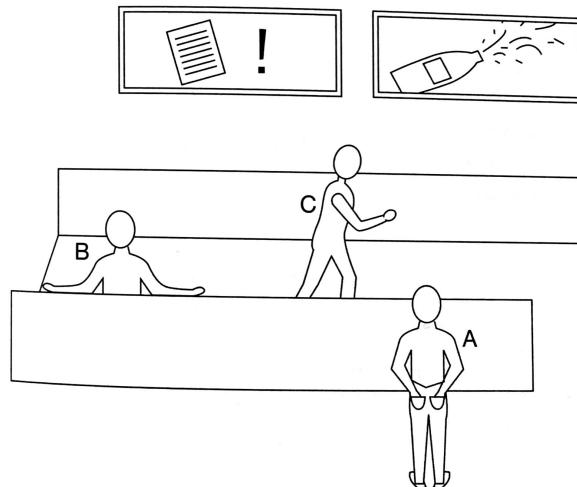


FIGURE 1.3 – Figure extraite du chapitre 3 de Reasoning in Physics. The part of common sense de Laurence Viennot

Questions	Réponses correctes
Durée d'un pas de C	OUI
Largeur d'une affiche	OUI
Distance parcourue par C en un pas	NON
Vitesse d'une affiche à un instant donné	NON
Vitesse de C à un instant donné	NON

Les deux premières questions sont sans difficulté, la durée entre deux évènements ainsi que la géométrie de l'affiche ne dépendent pas du référentiel¹¹. Ainsi, si la largeur de l'affiche est une grandeur intrinsèque qui ne dépend pas du point de vue choisi, la distance parcourue par C en un pas peut faire débat.

Certains étudiants estiment que cette distance est propre à la manière dont marche C et ne dépend de rien d'autre. D'autres constatent que vue depuis A, C se déplace davantage en un pas que vue depuis B (il est entraîné par le tapis). Mais, ils considèrent que c'est une illusion, un *mouvement apparent*. Ce qu'ils considèrent comme étant le véritable mouvement est celui de C par rapport au support (le tapis). Ainsi C possède une *vraie vitesse* celle qu'il a par rapport au tapis et une *vitesse apparente* celle que peut voir l'observateur A. De même, l'affiche collée au mur paraît reculer pour C, mais c'est une illusion, il est clair que la vitesse de l'affiche est nulle.

11. Tant que la vitesse de C par rapport au sol est négligeable devant la vitesse de la lumière

1. Expérience du marcheur

Sans le dire, les étudiants qui utilisent le vocabulaire de *vitesse réelle* considèrent la vitesse de l'objet mesurée par rapport à son support. Pour eux, cette vitesse est intrinsèque à l'objet. La *vitesse apparente* nécessite un lien physique, par exemple le contact le tapis. Ainsi, la vitesse apparente de C est celle du tapis à laquelle on ajoute la *vraie vitesse* de C. C'est le tapis qui est la cause de ce mouvement d'entrainement. On constate au travers des adjectifs qualifiant la vitesse que l'étudiant privilégie un référentiel plutôt qu'un autre et n'a pas assimilé le caractère relatif du mouvement. Il n'existe pas de *vitesse réelle* ou *apparente*, seulement une vitesse d'un système par rapport à un référentiel. Pour un mobile donné, il y a autant de vitesses envisageables que de référentiels possibles. Ces vitesses ont des caractéristiques a priori différentes et aucune d'elles ne peut être qualifiées d'apparentes.

La vitesse de C dans le référentiel A intègre géométriquement la vitesse du tapis (par rapport à A). Nous allons montrer que l'étudiant utilise une relation de causalité entre ces deux vitesses. C'est parce qu'il y a un contact entre C et le tapis que C bénéficie de la vitesse du tapis. Que devient la vitesse de C (dans le référentiel A) si le tapis disparaît brutalement ? Pour le savoir, examinons un exercice donné de l'enquête : (Saltiel et Malgrange 1979)

Dans une rivière, deux nageurs flottent, sans mouvement ; chacun est accroché à une bouée individuelle. L'un d'eux est entraîné à son insu par un fort courant, à vitesse constante.

Un petit poisson saute à peu près dans une direction parallèle à celle du courant.
La vitesse du poisson est-elle la même pour les deux observateurs ?

Un tiers des étudiants commet l'erreur de répondre oui. On constate que lorsqu'il n'y a plus d'entrainement, les étudiants reviennent souvent à la seule vitesse propre. Ces étudiants déclarent (propos extrait de (Saltiel et Malgrange 1979)) :

- "pour le poisson il n'y a qu'une seule vitesse ; puisqu'il est hors de l'eau, il n'est plus entraîné par le courant."

L'étudiant suppose donc un lien physique causale entre le mouvement du support et le mouvement du mobile. Lorsque le contact physique disparaît alors le mobile perd la vitesse qui lui était transmise par son support. Ce lien est à rapprocher du lien que fait un élève entre la boule et le marcheur. De même, le poisson hors de l'eau ne bénéficie plus de la vitesse du courant, de même la boule lâchée par le marcheur ne bénéficie plus de la vitesse du marcheur.

On peut donc interpréter l'erreur commise sur l'expérience du marcheur comme l'utilisation de la règle :

La vitesse d'entrainement est transmise par un corps moteur sur un autre tant qu'il y a un lien physique entre ces deux corps.

Ainsi, la boule lâchée par le marcheur a perdu son moteur. Elle perd instantanément sa vitesse horizontale. Jusqu'ici, la mise en évidence de la représentation du mouvement au travers de l'exemple de l'expérience du marcheur s'est faite en proposant des tâches qui mobilisent chez le sujet un raisonnement. Sur quel fondement s'appuie la notion de mouvement chez l'individu qui n'a pas étudié la physique ? Il est raisonnable de penser que dès le début de son développement cognitif, la perception visuelle participe à la conceptualisation du mouvement.

Selon McCloskey, il est possible que cette théorie spontanée du mouvement s'appuie sur le biais d'une illusion de perception.

VI. Interprétation en terme d'illusion de perception

McCloskey a montré que la croyance dans le fait que la boule lâchée par le marcheur tombe tout droit selon la verticale de l'endroit où elle a été lâchée se manifeste non seulement pour les tâches papier crayon mais aussi lorsque le sujet doit agir réellement. Ainsi, lorsque le sujet incarne le marcheur et qu'il doit lâcher la balle pour atteindre une cible repérée sur le sol, on retrouve une majorité d'individus qui déclarent qu'il faut lâcher la boule lorsqu'on se situe au dessus du repère. Il y a une cohérence entre la représentation utilisée et la manière d'agir. Comment se fait-il que ces sujets possèdent une telle représentation ?

Il existe une illusion optique pour laquelle un point immobile placé à l'intérieur d'un rectangle qui se déplace horizontalement sera perçu comme se déplaçant à l'intérieur du rectangle. Cela a inspiré McCloskey qui émet l'hypothèse que notre perception visuelle est trompée lorsqu'on observe l'expérience du marcheur. Le point de départ est d'admettre que l'observateur qui regarde le marcheur se déplacer, le considère comme un référentiel absolu. Notre perception visuelle du mouvement de la balle ne s'effectue qu'au travers cette référence. Ce choix, activé par défaut, implique un biais dans notre conception du projectile. Pour vérifier cette hypothèse, on réalise une expérience où le sujet observe sur un écran le mouvement d'une balle générée par une simulation numérique. Lors de cette simulation, un rectangle se déplace de gauche à droite à vitesse constante (comme le marcheur ou le convoyeur). D'un essai à l'autre, la trajectoire de la balle change et la moitié des essais se font sans la présence du rectangle. Les sujets ont une feuille de papier leur permettant après chaque essai, de représenter grandeur nature la trajectoire de la balle. On leur précise que cette trajectoire doit être tracée relativement à l'écran.

Parmi les nombreux essais effectués dans cette étude, celui correspondant à la trajectoire 7 (voir en bas à gauche de la figure 1.4) est particulièrement pertinent pour notre discussion.

Sur la figure 1.5, on a représenté en trait plein la trajectoire de la balle telle qu'elle a été affichée à l'écran. En pointillé, la trajectoire moyenne représentée par les sujets lorsque le rectangle n'était pas à l'écran. La courbe avec les tirets correspond à la trajectoire moyenne lorsque le rectangle est affiché et se déplace horizontalement. Cette expérience est donc l'analogue de celle du marcheur. Ce qui est nouveau ici, c'est qu'on a pu faire disparaître le marcheur (ici le rectangle) du champ de vision de l'observateur. Lorsque le rectangle n'est pas affiché, la transcription sur le papier de la trajectoire de la balle par le sujet est très fidèle à ce qui a été affiché sur l'écran. Cependant, lorsque le rectangle se déplace en suivant la balle le sujet perçoit une trajectoire quasi vertical dès que débute le mouvement verticale de la balle. On constate que la présence ou l'absence du rectangle modifie considérablement la perception de la trajectoire.

Les autres expériences confirment que la présence du rectangle se déplaçant à une vitesse très proche ou un peu supérieure à celle de la balle perturbe fortement la perception de la

1. Expérience du marcheur

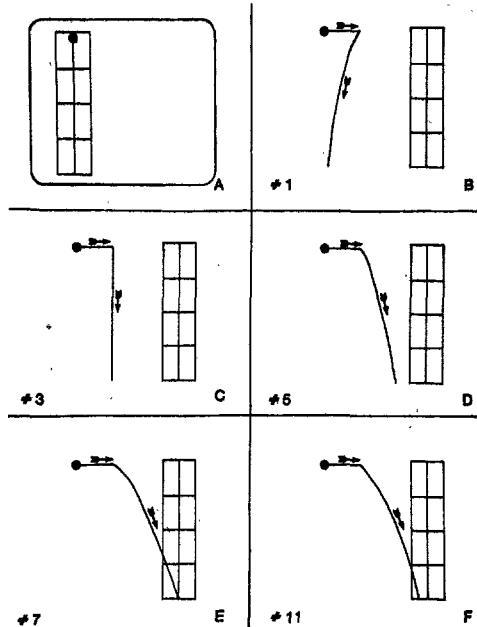


FIGURE 1.4 – Visualisations de différentes trajectoires en présence d'un rectangle en translation uniforme - Extrait de McCloskey 1983

trajectoire. En effet, pour l'expérience 5 (voir figure 1.5), 14 sujets (sur 18 étudiants) ont représenté une trajectoire vers l'arrière.

En revanche, lorsque la balle se déplace plus vite que le rectangle, la trajectoire est perçue fidèlement. Peut-être que l'attention du sujet se fixe alors sur l'objet qui va le plus vite.

Pour terminer, McCloskey effectue une dernière expérience (Expérience n°4 p 646) dans laquelle il montre un film de l'expérience du marcheur et de l'expérience de la rampe. Les sujets doivent représenter la trajectoire de la balle telle qu'ils l'ont vu à l'écran. Comme attendu, les trajectoires dessinées pour l'expérience de la rampe sont toutes correctes. Pour l'expérience du marcheur, ils sont plus de la moitié à dessiner pour la chute de la balle une trajectoire verticale par rapport au sol. Cette idée de chute verticale est si fortement ancrée dans l'esprit des étudiants interrogés qu'ils seront plus d'un tiers à déclarer dans le questionnaire post-expérimental que le film est truqué. J'ai moi-même fait cette expérience avec des élèves de seconde¹². J'ai observé qu'il est nécessaire de passer le film image par image afin de convaincre l'ensemble de la classe. Finalement, c'est en observant les images fixes du film et en localisant à chaque fois la balle et le marcheur que l'élève peut reconstruire le mouvement qu'il n'a pas perçu.

L'affirmation : "Voir c'est croire" est cohérente avec les observations de la dernière expérience de McCloskey. Si l'on pousse le raisonnement, on serait tenté de conclure que voir mal c'est alors se tromper. L'illusion de perception intervient dans la croyance qu'un objet porté qu'on lâche tombe verticalement. Pourtant cela ne prouve pas que c'est cette illusion qui est nécessairement la cause d'une conception erronée du mouvement. Cette erreur est parfois si

12. J'ai filmé en classe un élève qui marche à vitesse constante, bras tendu et qui lâche une balle.

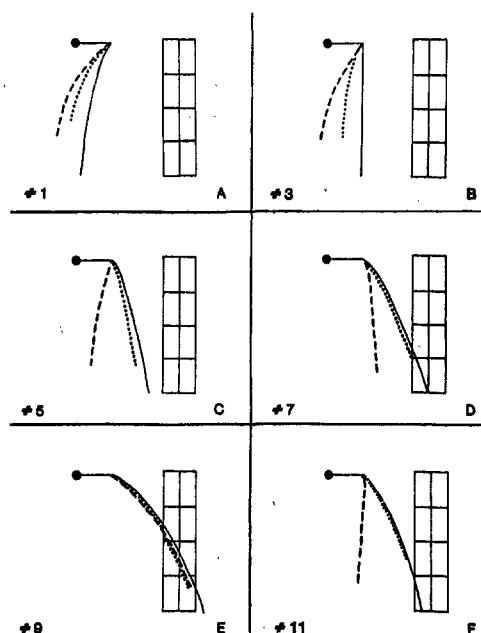


Figure 6. Actual trajectory (solid line), average drawn path for box trials (dashed line), and average drawn path for no-box trials (dotted line) for Stimuli 1, 3, 5, 7, 9, and 11. (The cross-hatched rectangle shows the position of the box at the instant the dot reached the end of its path.)

FIGURE 1.5 – Reproduction des différentes trajectoires en présence ou en l'absence d'un rectangle en translation uniforme - Extrait de McCloskey 1983

1. Expérience du marcheur

fortement ancrée qu'elle remet en cause sur ce qui est réellement observé. Difficile de savoir ce qui est premier, la conception erronée qui trouble l'observation ou bien l'observation erronée qui participe à la fondation d'une théorie fausse.

On peut faire l'hypothèse que le sujet possède une théorie inadéquate et la confirme par une observation biaisée par une illusion de perception. Pour en savoir plus, nous devons interroger comment se construit la pensée mécanique au fur et à mesure du développement cognitif du sujet. Ce sera l'objet du chapitre 3.

VII. Conclusion

Les élèves ne viennent pas vierge de toutes conceptions assister à leur premiers cours de physique. En les interrogeant autour de problèmes comme ceux évoquer précédemment, on révèle l'existence de raisonnements spontanés. Ainsi, un enseignement consistant à la transmission unilatérale de la théorie newtonienne se heurtera nécessairement aux représentations initiales que nous avons évoqué. Nous avons vu que les notions de force et de vitesse s'entremêlent et renferment la description d'un mouvement absolu qui conduit à des erreurs.

En mettant en évidence ces règles implicites qui sont à la manœuvre dans les raisonnements spontanés, on devient capable de construire un enseignement dont les objectifs prennent en compte les représentations de l'élève. Dans cette perspective, la finalité d'un cours d'initiation à la mécanique est de permettre à l'élève de faire sa révolution newtonienne en renonçant au mouvement absolu et en distinguant la vitesse de la force. Nous détaillerons au dernier chapitre une stratégie pédagogique adaptée à l'enseignement du caractère relatif du mouvement.

L'enseignement doit conduire l'élève à réviser sa théorie du mouvement pour la rendre conforme à l'enseignement qu'il reçoit. Afin d'être plus efficace, le professeur doit connaître le mieux possible, les forces et les faiblesses du raisonnement scientifique chez le naïf. Nous constaterons que le manque de cohérence, de systématicité et de généralité des règles employées par les débutants pour raisonner condamne l'élaboration autonome d'une véritable théorie scientifique. En revanche, la forte inclinaison à justifier par l'explication un phénomène observé est une ressource prometteuse pour l'enseignant et ses élèves.

Chapitre 2

La physique naïve est-elle une science ?

Sommaire

I.	Introduction	25
II.	Des explications improvisées	26
III.	Un raisonnement incohérent	27
III.1.	Des connaissances fragmentées	27
III.2.	Décomposition d'un raisonnement naïf en éléments simples (p-prims)	28
IV.	Poids du contexte sur le raisonnement naïf	29
V.	Conclusion	31

Le bon sens est la chose au monde la mieux partagée.

*Le Discours de la Méthode -
R.Descartes*

I. Introduction

La mise en évidence de Mc Closkey d'une illusion de perception lors de l'observation d'expériences analogues à celle du marcheur ne clot pas le questionnement à propos du raisonnement spontanné erroné en mécanique. De nombreuses études ont confirmé à la suite de Mc Closkey l'ancrage important et précoce de cette erreur (Kaiser, Proffitt, et McCloskey 1985) (Howe, Tavares, et Devine 2012)(Eckstein et Shemesh 1993). On peut alors se demander quel est le rôle jouer par cette illusion de perception dans la formulation du raisonnement. Une première

2. La physique naïve est-elle une science ?

hypothèse est que cette illusion vient confirmer une théorie mécanique erronée déjà présente chez le sujet. Dans ce cas, le biais vient conforter une théorie fausse ce qui est un élément d'explication de son fort ancrage.

Il se peut aussi que cette illusion de perception soit première et vienne corrompre les fondations de la théorie mécanique qui se construit lors du développement de l'individu. La chronologie entre la perception et l'élaboration (et/ou révision) d'une théorie paraît difficile à atteindre. Dans un premier temps, je renonce à questionner toutes les étapes qui justifient la construction d'une physique naïve. Je me propose d'examiner le statut de théorie mécanique chez le naïf. Dans le chapitre précédent, on a mis en évidence certaines règles :

Règle 1 : S'il existe une vitesse, ou une composante de vitesse, dans une direction donnée, alors il existe une force de même direction.

Règle 2 : La vitesse d'entraînement est transmise par un corps moteur sur un autre tant qu'il y a un lien physique entre ces deux corps.

C'est à partir de ces règles que le débutant construit son raisonnement pour produire une explication visant à justifier le mouvement qu'il étudie. Cependant, nous allons voir que les justifications proposées manquent de cohérence et de généralité. Finalement, l'expert se distingue du débutant non seulement par son savoir, mais surtout par son attitude systématique dans l'analyse des problèmes rencontrés.

II. Des explications improvisées

Face à un problème, la posture du novice est beaucoup plus inconfortable que celle de l'expert. La théorie dont il dispose est insuffisante pour répondre de manière pleinement argumentée. Il doit créer une explication à partir des moyens du bord et sans procédure définie à l'avance. Le naïf possède une autre ressource pour penser le mouvement que les règles 1 et 2. Il s'agit de sa mémoire.

En proposant des problèmes de mécaniques dont les contextes sont variés et concrets¹, K.Wood et R.P McLaren (« Naïve Physics the wrong theory ? » 2013) ont obtenu des résultats qui montrent que le sujet interrogé (ici des adultes âgés de 18 à 35 ans) sollicite sa mémoire associative en activant un souvenir d'une situation identique ou très proche de celle du problème.

Par exemple, si la question du problème concerne le mouvement d'une balle de cricket, le sujet va puiser dans ce qu'il a vu lors de ses observations de mouvements d'une balle dans un contexte sportif. Dans ce cas, il semble que la réponse soit formulée sur la base de l'extrapolation d'expériences passées. Ainsi, dans ((« Naïve Physics the wrong theory ? » 2013) p1012) un étudiant formule une réponse correcte à un problème identique au marcheur en tirant avantage d'un contexte lui est familier. Après avoir proposé une trajectoire correcte, il

1. Toujours pour des situations physiques isomorphes à celle du marcheur

se justifie par les mots : “From my experience of ball games, they don’t just drop downwards.” Ainsi, plutôt que de mobiliser un savoir théorique en utilisant des concepts qui sont souvent à l’état d’ébauche, le sujet utilise sa mémoire et procède à une analogie entre une situation vécue et le problème posé. La prédiction de la trajectoire du projectile consiste à accéder à une situation passée et ressemblante en puisant dans la base de données des faits expérimentaux mémorisés au fil de l’existence.

On constate que la démarche suivie est très différente de l’application d’une théorie scientifique. Elle consiste uniquement à trouver une situation mémorisée qui fournit une base empirique ad hoc à l’explication proposée. Cet aspect montre que le souci du novice n’est pas de tester ou de compléter sa théorie naïve, mais plutôt de justifier sa réponse. Ces justifications sont fondées soit sur des évidences (aux yeux du novice) qui sont liées à la physique soit sur l’utilisation de résultats observés et collectés dans des situations analogues. Nous retrouverons cet aspect improvisé de la justification lorsque nous montrerons à quel point celle-ci est dépendante du contexte dans lequel est formulé le problème posé. On trouvera de nombreux détails à ce propos dans l’article de (Cooke et Breedin 1994; M Kozhevnikov et Hegarty 2001). Nous allons montrer que la conséquence du caractère improvisé de l’argumentation des naïfs est la présence d’incohérences dans leurs raisonnements.

III. Un raisonnement incohérent

III.1. Des connaissances fragmentées

Que valent les connaissances dont dispose le naïf et avec lesquelles il raisonne et se sent capable de prédire le mouvement d’un corps ? Pour diSessa, les règles sur lesquelles s’appuient le naïf forme un ensemble fragmenté qui ne jouit pas d’une structure que l’on peut qualifier de théorie (diSessa 1988). L’argument principal est que ces règles ne sont pas suffisamment voir pas du tout intégrés les unes aux autres contrairement à ce qu’on observe dans une théorie scientifique.

De manière plus précise, diSessa n’utilise pas le terme de règle mais celui de p-prim pour *phenomenological primitive*. Un p-prim est le fruit d’une abstraction produite à partir d’expériences banales c'est-à-dire de situations dans lesquelles on ne ressent pas le besoin d’explication du phénomène qui agit. Par exemple, croire que l’on déplacera davantage un rocher si on le pousse plus fort fait partie des phénomènes que nous avons encodés à partir d’expériences vécues analogues à cette situation. Ainsi, le p-prim associé à cette situation est le fait que dans un milieu résistant, l’agent qui exerce un effort pour réaliser un certain but réussira d’autant mieux que ces efforts sont importants et que la résistance du milieu est faible. C’est ce que diSessa appelle “La loi d’Ohm” car elle est conforme à la loi d’électricité éponyme selon laquelle le courant électrique traversant un conducteur est proportionnel à la tension électrique investie aux bornes du conducteur (effort) et décroît linéairement avec la résistance électrique du dipôle.

2. La physique naïve est-elle une science ?

III.2. Décomposition d'un raisonnement naïf en éléments simples (p-prims)

DiSessa propose des p-prims particulièrement judicieux pour décomposer le raisonnement des élèves soumis à une tâche de mécanique. Voici les p-prims publiés dans (diSessa 1988)

Nom	Caractéristiques clés	Situation typique
Loi d'Ohm	Résistance d'un milieu	Pousser une boîte en agissant de manière variable sur un support plus ou moins rugueux
La force,source de mouvement	Violence	Jet d'une flèche
Force continue	Effort constant	Le moteur qui fait avancer la voiture
Mort au loin	Amplitude qui diminue	Le son produit par une cloche que l'on a frappé
Équilibre dynamique	Conflit, antagonisme	Deux forces de mêmes valeurs mais de sens opposées
Dépassement	Succès	Une force plus grande domine sur une autre plus faible

Ainsi ce que l'on croyait proche d'une théorie de l'impetus chez le naïf peut être représenté par un enchaînement improvisé de p-prims. En prenant l'exemple d'une balle jetée verticalement vers le haut, voyons quelle séquence de p-prims représente le raisonnement erroné fréquemment observé chez le débutant.

La phase de lancement (lorsque la balle est en contact avec la main) fait appel au p-prim *Force source de mouvement*. Pour la quasi-totalité des individus, cette partie du mouvement n'est pas à expliquer tellement elle est évidente. Le mouvement ascendant pose davantage de difficultés, car bien que la gravité tende à provoquer un mouvement vers le bas, la balle monte ! On invoque alors naturellement le p-prim *Force continue* : la balle possède une force ascendante qui dépasse la gravité (*Dépassement*). Cette force diminue au cours de l'ascension (*Mort au loin*) jusqu'à compenser exactement la gravité (*Équilibre dynamique*). Enfin, la gravité prédomine (*Dépassement*) et la balle descend.

Cette décomposition se rapproche du contenu des témoignages recueillis par Laurence Viennot (Viennot 1979) p28-29.

La force que lui a imprimée le bonhomme diminue de plus en plus. En haut, elle est compensée complètement par la pesanteur et puis ça redescend. (Etudiant littéraire)

En décomposant en éléments simples les explications fournies par un sujet naïf à propos d'un mouvement, on obtient un discours où chaque proposition semble cohérente. Cependant, l'ensemble de ces propositions forme un discours qui lui ne l'est pas.

Par exemple, à propos du jet vertical d'une balle, on demande à un étudiant : "Quelles sont les forces qui s'exercent sur la balle quand elle monte puis redescend". L'étudiant répond : "Seule la gravité agit sur la balle". On peut interpréter cette réponse comme l'activation du p-prim *gravité* ou simplement l'utilisation des lois physiques admises. Puis, on pose une deuxième question : "Que se passe-t-il à l'endroit où la balle rebrousse chemin ?" Le même étudiant répond en affirmant que deux forces s'exercent, la gravité et la résistance de l'air et que ces deux forces s'équilibrent momentanément. On constate l'utilisation du p-prim *Équilibre dynamique*, mais surtout l'incohérence des deux réponses.

En effet, au début de l'entretien l'étudiant affirme qu'une seule force agit sur l'objet durant l'ensemble du mouvement. Puis, lorsqu'il doit justifier en détail le passage de la phase ascendante à descendante, il est contraint d'invoquer une seconde force. Il est important de noter l'absence de recul du sujet qui ne prend pas conscience de cette contradiction et se satisfait d'être capable de donner une explication à chacune des questions posées.

C'est cette absence de cohérence qui permet à diSessa d'affirmer que la physique naïve n'a pas le statut de théorie. Il me semble qu'au-delà de la recherche visant à caractériser la valeur des connaissances initiales dans le domaine de la physique, le travail de diSessa renseigne aussi sur l'attitude intellectuelle du naïf. Celui-ci justifie au coup par coup ce qu'il perçoit du mouvement sans jamais vérifier la cohérence de l'ensemble de ses déclarations. Cette posture l'éloigne du scientifique et doit inspirer la pédagogie de l'enseignant. Nous allons voir qu'il en est de la cohérence comme de la quête d'une certaine généralité. Celle-ci a de la valeur pour le scientifique, mais ne fait pas partie des préoccupations du débutant.

IV. Poids du contexte sur le raisonnement naïf

Au cours de l'histoire des sciences, on observe que les lois physiques sont reformulées et gagnent en généralité. Lorsqu'une loi physique est suffisamment générale, elle permet de regrouper dans une même catégorie des problèmes dont les énoncés sont très différents. Par exemple, la seconde loi de Newton permet aussi bien de déterminer la trajectoire d'une balle lancée par un joueur de baseball que celle d'un électron dans un champ électrique uniforme. Pour l'expert, ces deux problèmes sont analogues et conduisent naturellement au même traitement mathématique. Pour le naïf, il s'agit de deux problèmes très différents puisque les objets, les échelles et les interactions (électrique/gravitation) sont différents. Le naïf ne disposant pas de catégories générales va raisonner à partir d'une accumulation d'informations contextuelles sans être capable de discerner celles qui sont pertinentes pour la résolution du problème. Nous étudierons plus en détail le rôle des catégories chez l'expert et le novice au chapitre 3. Dans l'immédiat, nous allons montrer que la prise en compte d'éléments contextuels superflus permet de révéler le manque de généralité des règles utilisées.

Pour cela on utilise des tâches qui sont en fait plusieurs variantes d'un même problème de physique. Dans l'article de (Cooke et Breedin 1994), une des tâches consiste à prédire la trajectoire de sortie d'une bille après qu'elle soit passée dans un tuyau courbe (voir figure 2.1).

Dans les trois cas, la réponse attendue est une trajectoire rectiligne tangente à la sortie du tube. Bien que ces trois situations sur le papier semblent différentes, elles sont identiques sur

2. La physique naïve est-elle une science ?

Tube (Standard, Perceptual Set, and Orientation)

This display shows a thin curved tube. Note that the tube is smooth, even though the graphics may tend to appear rough. In the display you are looking down on the tube. In other words, the tube is lying flat on a horizontal surface. Therefore, gravity is not a factor. A metal ball is put into one end of the tube and the ball is shot out the other end of the tube at high speed. Ignore air resistance and any spin the ball may have. Your task is to determine the correct path the ball will follow after emerging from the tube. After you have finished, please provide a rating indicating your degree of confidence in your answer.

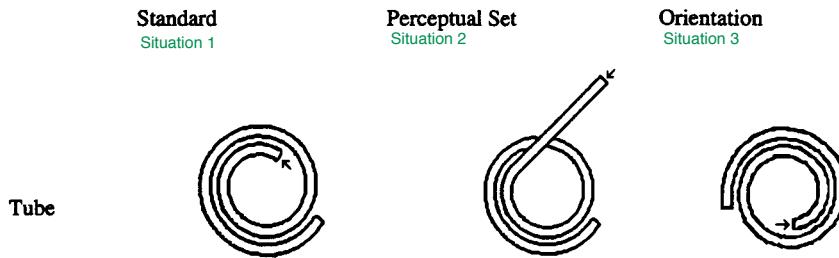


FIGURE 2.1 – Tâche du tube - Extrait de Cooke et Breedin (1994)

le plan de l'application des lois de la mécanique.

Premier constat, chez les novices, l'idée que le mouvement circulaire s'est imprimé dans la bille est sollicitée à 35% pour la situation 1, à 27% pour la situation 2 et à 12% dans la situation 3. On peut considérer qu'il s'agit d'une manifestation du p-prim *Force source de mouvement* ou bien le recours à une théorie voisine de l'impetus, mais dans le cas d'un mouvement circulaire. Ce qui me semble important ici est le recours non systématique du sujet à un même argument.

Dans les trois situations de la figure 2.1, la prédiction d'un même sujet ne mobilise pas toujours l'impetus circulaire (ou équivalent). Sur l'ensemble des novices interrogés, on voit que la situation 3 est réussie à 88% contre seulement 65% pour la situation 1. Il y a donc une part des naïfs qui réussissent la situation 3 et se trompent pour la situation 1. Or, ces deux situations sont identiques mis à par l'orientation de la figure qui les représente. Parmi les naïfs, il y a donc des sujets qui n'appliquent pas systématiquement l'argument de l'impetus circulaire. A partir de ce résultat, nous pouvons formuler deux hypothèses : soit la règle utilisée n'est pas assez générale soit l'attitude du sujet n'est pas assez systématique.

Il est peu probable que le naïf ait redécouvert le principe d'inertie tout en résolvant la tâche de la situation 3. Comment expliquer alors une telle différence de performance pour une tâche similaire ?

Malgré les précautions prises dans la consigne, il est possible que l'orientation du schéma de la situation 3 ait conduit certaines personnes interrogées à représenter une trajectoire verticale par analogie avec une chute libre. On peut faire l'hypothèse de l'existence d'une heuristique de la chute verticale qui devance le recours à l'impetus circulaire lors du raisonnement du sujet. Cette trajectoire serait intuitive et rapidement accessible contrairement à la trajectoire curviligne qui mobilise une conception issue de la logique² du naïf. C'est ce que Kahneman appelle l'activation du système 1 dans son modèle de la pensée. Ce système 1 est caractérisé

2. C'est à dire l'application raisonnée de la conservation du mouvement curviligne de la bille en sortant du tube

par son caractère immédiat, non logique par opposition au système 2 qui supporte une pensée rationnelle, mais plus lente. Kahneman a expliqué de nombreux biais cognitifs par la domination du système 1 sur le système 2 voir (Kahneman 2018). Ici, l'aspect vertical de la sortie du tube stimule la croyance intuitive et immédiate d'un mouvement vertical ce qui permet à certains sujets de fournir une bonne réponse sans pourtant disposer de connaissances scientifiquement correctes.

L'hypothèse précédente ne peut être évaluée à l'aide des résultats de l'étude de (Cooke et Breedin 1994). Cependant, on peut affirmer que certains éléments contextuels non signifiants du point de vue scientifique ont conduit des sujets naïfs à une mauvaise appropriation du problème. Pour en savoir plus, il aurait fallu un temps d'échange avec chaque individu de manière à obtenir une justification détaillée de leur réponse.

À partir de plusieurs problèmes de mécanique analogues à ceux de (McCloskey, Washburn, et Felch 1983) Cooke et Breedin ont obtenu des résultats qui montrent que les éléments contextuels pèsent fortement sur le raisonnement des naïfs. Cet effet est négligeable chez les experts qui réussissent à 97% chacune des trois versions du problème du tuyau. La capacité à ignorer les éléments non pertinents augmente avec l'expertise. C'est un résultat que l'on retrouve aussi chez (Chi, Feltovich, et Glaser 1981).

V. Conclusion

Les travaux de diSessa, Viennot ou encore (Halloun et Hestenes 1985) ont montré que le naïf s'appuie sur des règles pour élaborer des explications ou proposer des prédictions concernant le mouvement des corps. La décomposition des explications naïves en combinaison de p-prims confirme l'existence d'un noyau de connaissances assez stable d'un sujet naïf à un autre. Cet aspect ne suffit pas pour assimiler ce savoir à une théorie scientifique. En effet, l'analyse des explications naïves fondées sur ces règles a révélé des incohérences.

Plus que le savoir, c'est la posture intellectuelle qui éloigne le novice de l'expert. La principale préoccupation du novice est de fournir une explication. Pour cela, il utilise des ressources cognitives assez variées comme la mémoire associative, certains p-prims ou encore des heuristiques. Le fait que le raisonnement du naïf puisse être influencé par des éléments qui ne sont pas liés à ses règles de physique naïve (ou p-prims) montre le caractère non systématique de son raisonnement et le manque de généralité de ses procédures de résolution de problème.

Nous devons néanmoins nuancer ce qui vient d'être dit en notant qu'il est difficile de garantir que les raisonnements de physique spontanée puissent être systématiquement décomposés en p-prims. D'ailleurs, la méthodologie qui consiste à analyser les réponses des étudiants soumis à des problèmes conçus pour mettre en évidence les conceptions erronées ne permet pas toujours d'identifier exactement la nature de la connaissance mobilisée. S'agit-il d'un p-prim, d'une combinaison de p-prims ou bien d'une déclinaison d'impetus ? Il faut bien reconnaître que l'interprétation des déclarations des sujets formulées lors des expériences est parfois problématique. La signification d'un mot employé par un étudiant est souvent éloignée du concept scientifique auquel il fait référence et à partir duquel le chercheur élabore son analyse. Ainsi, pour une tâche particulière, Laurence Viennot (Viennot 1979) p 81 renonce à distinguer

2. La physique naïve est-elle une science ?

force et énergie dans les réponses d'étudiants. À quel concept mécanique associer l'expression : "L'énergie ... de la force..." ? En effet si les mots sont présents dans les formulations des sujets, il n'est pas toujours possible de les rattacher aux notions théoriques de la mécanique associées aux mêmes noms.

Certes, les structures cognitives³ des novices n'ont pas la cohérence des théories scientifiques académiques. Mais forcé de constater que c'est la ressource intellectuelle qu'utilise le sujet pour produire son raisonnement erroné. Ce prototype de théorie est la théorie du moment pour le sujet et c'est au travers de ce filtre que le débutant reçoit l'enseignement. Caractériser en détails le raisonnement du naïf permet de mieux comprendre ses erreurs et questionne l'enseignement.

Pour aller encore plus loin, on peut étudier la dynamique de la construction des ressources cognitives dès le début du développement de l'individu. Ainsi, on découvrira peut-être des éléments de compréhension sur la manière dont apprend le naïf et ainsi contribuer à une optimisation de l'enseignement.

Comment dès le début de sa vie, un individu acquiert-il des savoirs scientifiques ? Et plus généralement, quels sont les rapports entre la science et l'apprentissage de la science ? Pour explorer ces questions, nous nous tournerons vers les sciences cognitives.

3. p-prims pour diSessa, raisonnement spontané chez Viennot ou encore Misconceptions chez McCloskey

Chapitre 3

La physique naïve éclairée par les sciences cognitives

Il vient un temps où l'esprit aime mieux ce qui confirme son savoir que ce qui le contredit, où il aime mieux les réponses que les questions. Alors l'instinct conservatif domine, la croissance spirituelle s'arrête.

Bachelard - La formation de l'esprit scientifique

Sommaire

I.	Introduction	34
II.	A l'origine du raisonnement physique	35
II.1.	Quel modèle de développement cognitif?	35
II.2.	Hypothèses	35
III.	Catégoriser	37
III.1.	Catégorisation chez le physicien professionnel	37
III.2.	Catégorisation chez le jeune enfant	37
III.3.	Catégoriser novices vs experts	39
III.4.	Bilan et perspectives de recherches	40
IV.	Importance de l'explication	41
IV.1.	Distinction entre théorie et explication	42
IV.2.	L'explication facilite l'élaboration de connaissances	42
IV.3.	Existence d'un couplage entre explication et catégorisation	44

IV.4. Bilan et bénéfices pédagogiques	46
V. Le changement conceptuel	48
V.1. Analogie entre évolution de la science et développement cognitif	48
V.2. Critiques du modèle de Gopnik	49
V.3. L'apprentissage de la physique chez le très jeune enfant	50
V.4. Lorsque la révision théorique échoue	53

I. Introduction

Nous avons constaté au chapitre 1 qu'un élève qui reçoit pour la première fois un enseignement de mécanique ne doit pas être vu par l'enseignant comme une page blanche sur laquelle il suffit de déposer les lois de Newton. Cet élève possède déjà de nombreuses connaissances sur le mouvement des corps. En utilisant des règles qu'il s'est forgées lui-même, il est capable de proposer des explications sur les causes du mouvement et d'effectuer des prédictions. Quelle est l'origine de ses règles ? Est-ce un bien commun à l'espèce humaine ou se forment-elles lors du développement cognitif de chaque individu dès le début de la vie ?

Dans un contexte darwinien, on peut envisager qu'un noyau minimal de ces règles s'est construit au cours de notre évolution. Elles ont permis d'intégrer l'intelligibilité de notre environnement physique nécessaire au maintien de notre espèce. Au cours de notre développement individuel, nous apprenons à internaliser un certain nombre de lois décrivant le monde extérieures.

Nous portons en nous un univers d'objets mentaux dont les lois imitent celles de la physique et de la géométrie. C'est dans la perception et l'action que ces lois physiques internalisées se manifestent le plus clairement. Notre appareil sensorimoteur connaît la cinématique lorsqu'il anticipe les trajectoires des objets.
DEHAENE, Stanislas. *Vers une science de la vie mentale : Leçon inaugurale du Collège De France prononcée le jeudi 27 avril 2006*

Bien entendu dans notre vie quotidienne nous anticipons fréquemment et avec réussite des trajectoires d'objets. Cependant, nous avons montré que notre conceptualisation de celles-ci n'est pas parfaite et nous conduit à des prédictions erronées. Il se peut donc que pendant notre développement cognitif nous ayons mal encodé certaines lois physiques ce qui nous conduit à formuler des règles qui ne sont pas aussi universelles que nous le pensons. Cela expliquerait pourquoi dans certaines situations notre intuition nous trompe.

Dans cette partie, j'ai fait le choix d'étudier deux activités particulières qui sont très souvent mobilisées lors du raisonnement en physique. Il s'agit de la catégorisation et de l'explication. Dans les deux cas, j'essaierai de mettre en relation ces fonctions cognitives avec leurs rôles dans l'apprentissage de la physique. Nous montrerons que la catégorisation d'un problème de mécanique marque une différence majeure entre le novice et l'expert. Puis, nous verrons que l'explication a pour principale vertu de favoriser l'accès vers un savoir plus général que celui obtenu par simple observation. Enfin, nous nous demanderons si certaines erreurs attribuées à la physique naïve peuvent être interprétées comme l'absence de révision d'une théorie fausse au moment du développement cognitif de l'enfant.

II. A l'origine du raisonnement physique

Le raisonnement scientifique mobilise une grande diversité de fonctions cognitives : l'induction, la déduction, l'analogie, la catégorisation, etc. On se demande comment certaines de ces fonctions nourrissent le raisonnement chez les jeunes enfants. Peut-être, certains mécanismes permettront de formuler des hypothèses sur la formation de biais analogue à celui du marcheur. Par comparaison à ce qui est observé chez l'adulte, ou en comparant le novice et l'expert, on montrera que l'explication et la catégorisation sont des ressources cognitives qui soutiennent des aspects précis du raisonnement en physique.

II.1. Quel modèle de développement cognitif ?

Lorsqu'un enfant de dix mois apprend à manger à table, ses parents se lassent parfois de ramasser sa cuillère toutes les trente secondes. Bébé semble aussi maladroit qu'obstiné. On dirait qu'il collecte des observations pour élaborer sa théorie sur la chute de la cuillère. En regardant le comportement d'un bébé, il est difficile de se débarrasser de notre grille d'analyse d'adulte et d'imaginer ce que sont les raisonnements des jeunes enfants. Pour Piaget, l'enfant est un logicien qui par l'action sur les objets qui l'entourent réussit à faire émerger leurs propriétés. L'enfant reconstruit intellectuellement le monde qui l'entoure en expérimentant sur celui-ci. En étudiant le comportement de nombreux enfants lors de la réalisation de tâches souvent logicomathématiques, Piaget a élaboré une théorie du développement de l'enfant qui a connu un large succès et a marqué en profondeur le monde éducatif. Bien que certains résultats obtenus par Piaget comme l'existence de stades de développements soient aujourd'hui largement contestés, il n'en demeure pas moins que les tâches Piagetaines sont toujours un support de choix dans l'exploration du raisonnement par les neuroscientifiques et très utilisées en psychologie du développement.

Pour ce mémoire, il m'a paru pertinent de m'appuyer sur le modèle d'Alison Gopnik (Gopnik 1996). Son approche consiste à faire une analogie entre le développement de la science et le développement cognitif. Ainsi, l'épistémologie et l'histoire des sciences pourraient nous renseigner sur la manière dont les enfants se développent. Réciproquement, Gopnik avance l'idée que les résultats des recherches en psychologie cognitive permettent de mieux comprendre comment se développe la science. Bien que ces travaux aient été largement critiqués ((Fine 1996), (Giere 1996)(Faucher et al. 2009)), j'estime qu'une large partie du modèle proposé peut être conservé si notre but est de comprendre comment se construit la physique naïve. Voyons à présent, sur quelles hypothèses repose ce modèle.

II.2. Hypothèses

Comment imaginons-nous un physicien ? L'image d'Épinal est une personne en blouse blanche, sérieuse qui élabore des théories et réalise des expériences. Comment imaginons-nous un enfant de deux ans ? Nous voyons un bambin fragile, aux gestes mal assurés, dont on ne comprend pas toujours le discours. En le regardant jouer, on observe qu'il essaye, échoue, recommence et parfois modifie sa façon de faire pour gagner. L'enfant expérimente, mais peut-on dire qu'il

3. La physique naïve éclairée par les sciences cognitives

construit des théories ? L'activité des enfants n'est pas de la science a proprement parler, ne serait-ce que par son interaction sociale limitée et différente de celle d'un scientifique. De plus, contrairement aux scientifiques qui sont conscients de ce qu'ils élaborent, l'enfant n'agit pas de manière intentionnelle lorsqu'il ébauche une théorie sur les objets qui l'entourent. Pourtant, on peut montrer qu'il y a de nombreuses similitudes entre le développement cognitif et les théories scientifiques.

Gopnik postule que c'est en utilisant des ressources psychologiques qui ont été façonnées par l'évolution que la science est capable de produire des énoncés vrais. Les humains seraient dotés dès leur naissance d'un appareil cognitif puissant et flexible qui leur permet de construire des représentations précises de nouvelles choses.

Pendant la période de l'enfance, l'humain vit une longue période protégée par ses parents qui subviennent à la plupart de ses besoins. C'est à cette période que l'activité de l'individu est la plus tournée vers la construction d'une juste représentation du monde. D'ailleurs, les progrès observés lors des premières années de la vie humaine sont éloquents : motricité, langage oral, premières intuitions du nombre, etc. Ce modèle postule que les enfants sont capables d'élaborer dès leur plus jeune âge des théories.

Il y a un autre contexte où l'humain construit de nouvelles représentations, c'est lorsqu'il procède à la révision d'une théorie. Afin d'étudier les mécanismes qui conduisent à la connaissance, il semble naturel de conjuguer les deux situations évoquées en analysant des situations où les enfants révisent une connaissance afin de la compléter ou de la remettre en cause. C'est ce que nous ferons dans les paragraphes qui traitent de la révision d'une théorie.

II.2.a) Théorie scientifique et théorie enfantine

L'histoire des sciences montre que l'activité scientifique est particulièrement vive lorsqu'il s'agit de réviser une théorie qui n'est plus en accord avec de nouveaux résultats expérimentaux. Selon Gopnik, lors de la révision d'une théorie, le rapprochement entre l'activité du scientifique et celle d'un enfant se justifie par l'usage de règles et de représentations mentales (Gopnik 1996). À bien des égards, l'enfant se comporterait comme un scientifique (à moins que ce soit le scientifique qui cultive sa part d'enfance (Gopnik 2010)). Avant de détailler ce point, précisons ce qu'on entend ici par théorie.

Gopnik définit une théorie comme étant un système abstrait d'objets et de lois formant un ensemble cohérent ((Gopnik 1996) p496). Il est intéressant de constater que les lois dont il est question ici ne sont pas nécessairement formalisées mathématiquement. C'est heureux, car les connaissances mathématiques d'un jeune enfant sont très modestes sur le plan du formalisme. Cependant, des expériences menées sur les enfants ont montré que l'émergence du concept de nombre a lieu dès la première année (Stanislas Dehaene¹) contrairement au modèle de Piaget dans lequel les deux premières années sont dédiées à l'intelligence sensorimotrice. Peut-être encore plus étonnant, au regard de nos a priori sur les capacités des très jeunes enfants, on a montré qu'ils sont capables de raisonner par induction et même de mettre en oeuvre des notions de probabilité afin de catégoriser des objets (Gopnik et al. 2001) et (Gopnik 2010).

1. leçon de Stanislas Dehaene au collège de France du 12 février 2008

Les lois utilisées par les enfants pour élaborer des théories sont des relations causales entre les objets manipulés (extérieurement ou intérieurement par la pensée). Dès la petite enfance, la manipulation de ces objets se fait par l'explication et l'expérimentation (Legare 2014a). Comme c'est le cas en général pour les théories physiques, Gopnik fait l'hypothèse de l'existence d'une structure causale pour ces lois.

Dans les paragraphes suivants, nous étudierons comment les activités cognitives de catégorisation et d'explication contribuent à l'élaboration d'une théorie. Nous montrerons que la structure des catégories des connaissances différencie le novice et l'expert. Puis, nous discuterons du rôle clé de l'explication dans l'activité scientifique et dans l'apprentissage de la science. Enfin, nous mettrons en évidence un couplage entre explication et catégorisation et essaierons d'en tirer les conséquences pédagogiques.

III. Catégoriser

III.1. Catégorisation chez le physicien professionnel

La catégorisation permet au physicien de regrouper dans une même catégorie différents faits expérimentaux et d'en écarter d'autres non concernés par la théorie invoquée (et négligeables en première approximation). Par exemple, l'arc-en-ciel est un phénomène que le physicien associe à la catégorie optique. Le mouvement des planètes autour du Soleil est décrit par la théorie newtonienne de la mécanique.

Mobiliser ou créer des catégories est une activité importante lorsque l'on construit une théorie. En effet, il a fallu rapprocher l'arc-en-ciel formé par les gouttes de pluie et le spectre que l'on observe après que la lumière blanche a traversé un prisme. Dans un même geste intellectuel, le physicien a relié la chute des corps sur Terre et le mouvement de la Lune autour de la Terre. Catégoriser nécessite parfois de généraliser une propriété à des objets qui paraissent différents : la goutte d'eau et le prisme ou encore un boulet et la Lune. Cette généralisation nous conduit à des objets plus abstraits qui échappent à nos sens. Nous allons voir que c'est un des moyens pour atteindre une propriété physique cachée à nos sens. Dans le cas de la goutte d'eau et du prisme, il s'agit de l'indice de réfraction. En ce qui concerne le boulet et la Lune, il s'agit du champ gravitationnel terrestre.

III.2. Catégorisation chez le jeune enfant

Les psychologues qui observent la manière dont un jeune enfant interagit avec son environnement estiment que cette activité cache des mécanismes clés qui renseignent sur son développement cognitif. Un enfant qui joue se retrouve sans le savoir à expérimenter, formuler des hypothèses et réviser parfois son jugement en prenant en compte ses observations. Ces différents aspects ont été mis clairement en évidence lors d'expériences de catégorisation (Legare, Gelman, et Wellman 2010).

Dans ces expériences, on dispose de différents objets de forme et de couleurs différentes. Lors de chaque essai, on montre à l'enfant un objet que l'on pose sur une boîte. Si celle-ci s'allume

3. La physique naïve éclairée par les sciences cognitives

en faisant de la musique alors l'objet est un “bliket”. Si l'objet est sans effet sur la boîte alors ce n'est pas un bliket. Les objets manipulés ont des formes, des couleurs différentes qui ne sont pas reliées à leur propriété d'être ou non un bliket. Précisons que pendant cet apprentissage, l'enfant ne manipule pas les objets directement. Il se contente de regarder l'expérimentateur faire et lui dire si l'objet est un bliket ou non en fonction de ce qu'on observe sur l'état de la boîte.



FIGURE 3.1 – Un enfant devant un détecteur de bliket sur lequel est posé un bliket (cube rouge). D'après Gopnik, A. (2010). How Babies Think. Scientific American, 303(1), 76–81.

Lorsque la phase d'apprentissage est terminée, on propose à l'enfant un nouvel objet et on lui demande si c'est un « bliket ». Ainsi l'enfant doit associer une propriété à un objet qui n'est pas perceptible par ses sens, mais qui peut être découverte par l'expérience. On constate que dès 3 ans la majorité des enfants réussissent cette tâche. Cette capacité à catégoriser rapproche l'enfant du physicien qui souvent doit déterminer des propriétés des objets qui échappent aux sens, mais peuvent être évaluées par l'expérience. Par exemple, lorsque l'on approche un aimant d'un objet, on peut savoir s'il est ferromagnétique ou non.

Nous allons voir dans la suite que les catégories sont non seulement utiles pour l'activité scientifique, mais que leurs qualités conditionnent la performance lors de la résolution d'un problème.

III.3. Catégoriser novices vs experts

Afin d'évaluer si un élève a assimilé l'enseignement de la physique qu'il a reçu, on le soumet en général à un examen dans lequel il doit résoudre des exercices. Ne soyons pas naïfs, trouver la solution numérique d'un problème de mécanique ne signifie pas nécessairement que l'on a compris les concepts de la mécanique. Dans les années 80, à l'université du nouveau Mexique, 80% des étudiants commençant leurs études d'ingénieurs affirmaient que la force nette subie par un système est proportionnelle à sa vitesse². Après un semestre d'enseignement de physique, ils sont encore 60% à commettre cette erreur (Van Heuvelen 1991)(Halloun et Hestenes 1998). Les enseignants de physique connaissent et déplorent ces résistances au changement de conception.

En analysant les réponses des étudiants, ils ont pu observer quelques faits qui reviennent régulièrement. Les novices ne pratiquent pas de raisonnement qualitatif préalable pour amorcer la résolution du problème. Ils relèvent quelques éléments descriptifs de la situation (plan incliné, ressort, mouvement vertical, etc.) et fouillent dans leur mémoire à la recherche d'une formule à mettre en face. Une stratégie d'enseignement envisageable serait de favoriser la construction d'un savoir dont l'organisation se fonde sur des catégories plus générales tout en étant associées à des techniques qui permettent au sujet de les adapter au cas particulier à traiter. Afin de vérifier et préciser la pertinence d'une telle intention pédagogique, il faut détailler précisément les catégories utilisées par les experts et les comparer à celles des novices.

Lors de ses travaux, Chi et ses collaborateurs (Chi, Feltovich, et Glaser 1981) constituent un groupe d'étudiants novices³ et un groupe d'experts⁴. Chaque individu de chaque groupe est soumis à une série d'exercices de mécanique. Le but est de mettre en évidence les différentes catégories mobilisées dans la résolution d'exercices de mécanique par les novices et les experts. Dans une première tâche, on demande de regrouper par catégorie 24 exercices extraits d'un manuel conforme à ce qui a été enseigné aux novices. On constate que les catégories des experts sont étiquetées selon des lois ou des concepts généraux pertinents pour la résolution du problème. Il y a un nombre de catégories moins élevé chez les experts. Quant aux novices, ils classent les exercices selon des objets descriptifs ou des notions physiques très précises (plan incliné, ressort, vitesse angulaire, frottements, etc.). Il est intéressant de remarquer que les experts sont plus lents à mener cette tâche que les novices. La performance des experts se situe davantage dans la pertinence de la catégorisation du problème et sur les conséquences favorables de celle-ci que sur la rapidité de décision. On peut penser que cette étape de catégorisation constitue un enjeu dans la bonne conduite de la résolution.

La catégorisation chez les experts s'accompagne de la mise en relation des objets physiques présents⁵ et conduit généralement à une représentation diagrammatique mathématisable. Les catégories des experts ont plusieurs avantages. Elles sont générales et peu nombreuses. Ces catégories sont donc fréquemment utiles, mais aussi facilement mémorisées. De plus,

2. On retrouve la loi de raisonnement spontané rencontrée au chapitre 1 : « s' il y a une vitesse, il y a une force. » On peut aussi dire qu'il y a confusion entre vitesse et accélération, car la loi de Newton affirme que la force est proportionnelle à l'accélération.

3. des étudiants de première année qui viennent de terminer leur premier semestre de mécanique

4. il s'agit de doctorants

5. ou plutôt de leurs idéalisations

3. La physique naïve éclairée par les sciences cognitives

elles contiennent des procédures qui s'adaptent au problème et favorisent sa résolution p 137 (Chi, Feltovich, et Glaser 1981). C'est l'association de catégorie générale avec des procédures systématiques qui rend la catégorisation des experts très efficace. C'est probablement cette association entre catégorie générale et schème d'action qui nécessite un long apprentissage de la part du novice.

Je pense que l'on peut mettre en question la fertilité des catégories utilisées par les novices. En général, ses catégories ne permettent pas l'élaboration d'une représentation du problème ni d'effectuer un raisonnement qualitatif qui permet de prédire l'essentiel du comportement du système sans calculs. Au contraire, le novice est contraint de mobiliser des formules spécifiques apprises par coeur. La conséquence est que chaque problème lui semble unique et sa résolution est peu transférable à un autre problème.

III.4. Bilan et perspectives de recherches

Dès l'enfance, la catégorisation intervient dans les mécanismes de l'apprentissage, mais aussi dans ceux qui permettent de résoudre un problème. La généralité conceptuelle des catégories et leurs richesses procédurales sont très différentes chez le novice et chez l'expert.

Nous pouvons maintenant apporter un éclairage complémentaire à propos de l'échec des novices face au problème du marcheur. Le débutant ne dispose pas de la catégorie adéquate⁶ et raisonne majoritairement à partir des éléments contextuels du problème. Avec une telle approche, on peut émettre l'hypothèse que ce problème est mis en relation avec la catégorie : chute sans vitesse initiale. En effet, le contexte insiste sur le fait que le marcheur lâche la balle sans vitesse initiale. L'analyse qui en découle le conduit naturellement à conclure à un mouvement vertical par rapport au sol.

A ce stade, nous disposons des caractéristiques principales des catégories chez l'expert et nous avons mesuré la distance qui les sépare de celles présentes chez le débutant. En 2011, trente ans après l'étude de Chi, A.Mason et C.Singh réalisent une étude similaire sur un échantillon beaucoup plus important de sujets⁷. En réalisant la tâche de catégorisation de 25 problèmes sur trois populations au lieu de deux, cette recherche (Mason et Singh 2011) a conduit à une mesure de l'expertise chez l'étudiant de première année, chez le doctorant et chez le professeur d'université. Les entretiens conduits avec des novices confirment l'usage de catégories peu générales et paradoxalement révèlent que les concepts plus généraux sont connus. Cette situation tient souvent du fait que le novice possède des procédures spécifiques qu'il n'a pas encore unifiées. Ainsi, puisqu'il s'agit de catégoriser selon ce qui permet de résoudre l'exercice, le novice choisit plutôt la catégorie "frottements" que "relation fondamentale de la dynamique". Cette catégorie plus spécifique lui permet d'invoquer une procédure qu'il situe précisément dans son savoir. A partir de là, on peut émettre l'hypothèse que les catégories se généralisent probablement en fusionnant des catégories spécifiques qui partagent des procédures identifiées comme communes par le sujet.

6. Dans ce cas précis, les experts invoquent la catégorie relativité du mouvement

7. environ 200 étudiants de première année, 21 diplômés et 7 professeurs d'université à comparer aux deux groupes de 8 dans l'étude de Chi

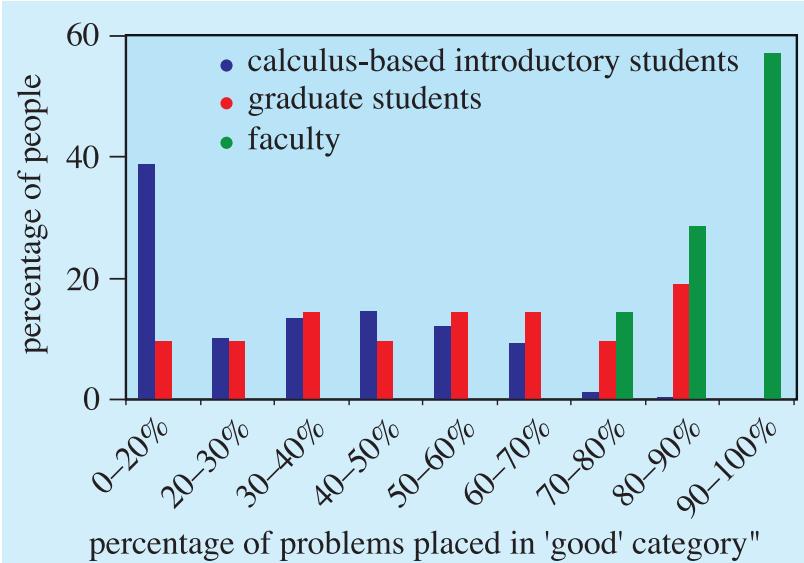


FIGURE 3.2 – Histogramme représentant les pourcentages de bonne catégorisation de 25 problèmes selon leurs solutions. D'après Using categorization of problems as an instructional tool to help introductory students learn physics. Andrew Mason et Chandrakha Singh. Physics Education. 51 (2016)

La figure 3.2 montre une dynamique dans la transformation des catégories pendant l'apprentissage de la mécanique. Pour l'enseignant, il paraît raisonnable d'amener ses élèves à prendre conscience qu'il est efficace de catégoriser les résultats de la physique de manière à structurer leur savoir. L'enseignant doit veiller à ce que ces catégories soient liées à des méthodes de résolution sur des problèmes simples qui constituent des archétypes de la catégorie.

Pour autant, il n'a pas été établi qu'améliorer les catégories des novices facilite leur apprentissage. Les travaux de (Chi, Feltovich, et Glaser 1981), (Mason et Singh 2011), (Mason et Singh 2016) ouvre une perspective pédagogique qui consisterait à clarifier le lien entre catégorisation et expertise pendant la durée de l'apprentissage. Améliore-t-on l'expertise en améliorant les catégories des novices ? Quelles sont les modalités d'un tel enseignement ? L'apprentissage nécessite-t-il le passage par des catégories de plus en plus générales et conceptuelles ?

IV. Importance de l'explication

Après avoir montré que les catégories sont une marque d'expertise et une ressource pour la résolution de problèmes en physique. Nous allons nous intéresser aux vertus de l'explication pour le raisonnement. Nous verrons ensuite qu'il existe un couplage entre explication et catégorisation.

IV.1. Distinction entre théorie et explication

Duhem oppose la théorie physique à l'explication (Duhem 2016). Il met en garde celui qui assimilerait ces deux notions.

"Toute la vision moderne du monde repose sur l'illusion que les prétendues lois de la nature sont des explications des phénomènes de la nature."⁸

Il y a donc chez Duhem un espace entre la théorie et l'explication. Ainsi, la théorie de la gravitation de Newton fournit des équations qui rendent compte du mouvement des planètes sans pour autant expliquer la cause de ce phénomène. Cette théorie de la gravitation dit seulement comment deux masses s'attirent mutuellement. Elle ne dit pas pourquoi ces masses s'attirent entre elles. De même, la relativité restreinte qui prédit le phénomène de dilatation du temps n'explique pas ce qu'est le temps. Bien souvent, les théories physiques ne disent pas ce que sont les objets, mais prédisent assez bien la régularité de leurs comportements. Pour Duhem, l'explication associée à une théorie a très peu de valeur. En effet, il estime que cette explication est erronée ou le sera prochainement. Dès lors, il faudra la modifier à mesure que la théorie progresse.

«Ce qui est stérile et périssable, c'est le labeur entrepris pour expliquer ces principes, pour les rattacher à des suppositions touchant les réalités qui se cachent sous les apparences sensibles.» Pierre Duhem. L'esprit scientifique. La théorie physique. Son objet, sa structure. p 71.

Cette position se défend lorsque l'on regarde la science déjà faite, mais elle me paraît contestable si l'on analyse la science en train de se faire.

IV.2. L'explication facilite l'élaboration de connaissances

IV.2.a) Chez le scientifique professionnel

Il est évident que la recherche d'explications est une des motivations qui accompagne le scientifique dans son quotidien. La curiosité et l'obstination à vouloir comprendre nourrissent un questionnement qui ne semble ni périssable ni stérile. Certes, la construction d'explication n'est pas une fin en soi. Pourtant, c'est souvent la fondation sur laquelle le scientifique s'approprie une théorie ou en construit une nouvelle. Par exemple, lorsque Maxwell travaille sur le phénomène d'induction électromagnétique, il élabore un modèle qui nous est décrit par Nancy Nersessian (Nersessian 1995) p 214. Ce modèle a un caractère déroutant puisqu'il propose une description de la situation contraire à la perception physique du système étudié.

En effet, Maxwell a schématisé une machine mécanique qui transporte un fluide pour rendre compte d'un phénomène magnétique. Le courant électrique est traité comme un fluide et la machine possède une structure causale qui peut être décrite par la théorie de la mécanique

8. Les prétendues lois de la nature sont pour Duhem les théories et les phénomènes de la nature les lois empiriques.

des fluides. Maxwell a construit cette théorie à partir de la formalisation mathématique et mécanique de la machine qu'il a imaginée. On peut donc voir cette machine comme une explication causale du magnétisme. Bien entendu, la machine n'est pas le système réel étudié, mais il partage avec lui la même structure causale. Tout se passe comme si le système réel se comportait comme la machine imaginée. La construction d'explication est un élément fructueux de l'activité scientifique que l'on peut rapprocher à certains aspects de l'activité cognitive chez l'enfant qui expérimente dès son plus jeune âge.

IV.2.b) Chez l'enfant

Dans ce paragraphe, j'appelle explication, la tentative d'un sujet qui le mène à la compréhension d'une relation causale entre des objets physiques. Une explication est une construction assez changeante et bien moins robuste en général que les théories physiques. Cela en fait un outil de choix pour la construction intellectuelle à la fois simple, adaptable et souvent communicable sans formalisme. Il n'est pas étonnant que l'explication joue un rôle important dans le développement cognitif des enfants, particulièrement lorsqu'on les soumet à des tâches qui relèvent de la mécanique.

Dans une étude conduite en 2014, Legare et Lombrozo ont présenté à des enfants âgés de trois à six ans, un jouet sous la forme d'un assemblage d'engrenages et d'autres pièces (Legare et Lombrozo 2014).

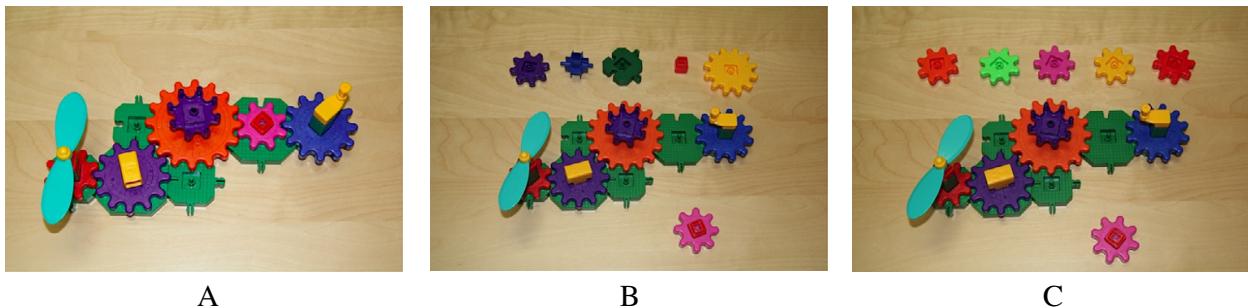


FIGURE 3.3 – (A) jouet monté, (B) jouet dans lequel on demande au sujet d'identifier la pièce manquante (C) jouet dans lequel on demande d'identifier la couleur de la pièce manquante - Extrait C.H. Legare, T. Lombrozo / Journal of Experimental Child Psychology 126 (2014)

Après avoir constitué deux groupes d'enfants, les chercheurs ont montré que les enfants qui ont été incités à formuler des explications sur le fonctionnement du jouet sont plus performants, en ce qui concerne l'apprentissage causal, que leurs pairs (non stimulés sur ce plan). La construction d'explication a permis à ces enfants d'accéder à une meilleure compréhension du mécanisme causal du jouet. En revanche, ils sont moins performants lorsqu'il s'agit de mémoriser des informations qui ne sont pas en relation avec le fonctionnement de la machine, comme la couleur d'une pièce par exemple. La production d'explication a amélioré l'appropriation du fonctionnement de la machine. De plus, en soumettant les enfants à une

3. La physique naïve éclairée par les sciences cognitives

autre tache⁹, on a pu montrer que l'explication a développé la capacité d'étendre la fonction d'une pièce particulière du jouet à celle d'une autre pièce analogue dans une autre machine. Finalement, il semble que l'explication facilite le raisonnement causal ainsi que la généralisation de propriétés découvertes par l'enfant.

IV.3. Existence d'un couplage entre explication et catégorisation

Le raisonnement même lors de l'exécution de tâches élémentaires ne se laisse pas facilement disséquer de manière univoque en fonctions cognitives. On peut mettre par exemple en évidence la présence d'un couplage entre catégorisation et explication. C'est un des résultats de l'étude menée en 2009 par T. Lombrozo et J J. Williams au laboratoire de psychologie de l'université de Berkeley sur des étudiants. Cette étude est intéressante à plusieurs égards. Tout d'abord, elle permet de tester assez rigoureusement l'effet de l'explication sur l'apprentissage et sur la généralisation, car les tâches utilisées ici ne font appel à aucune connaissance préalable. Enfin, cette étude fournit des résultats qui permettent d'associer une activité cognitive (explication ou catégorisation) à une intention pédagogique. Décrivons les quatre étapes de l'expérience 1 de l'étude (Williams et Lombrozo 2010) voir aussi (Lombrozo 2016)

Présentation de l'expérience Lors de la première phase, on informe le sujet qu'il va devoir regarder deux types de robots les « drents » et les « glorps ». On lui donne une feuille représentant 8 robots qui contient quatre représentants de chaque famille clairement nommés. Le sujet dispose de quinze secondes pour étudier la feuille et la conserve pendant l'étape suivante (voir figure 3.4).

- Deuxième phase, chacun des huit robots est ensuite affiché successivement à l'écran avec sa catégorie. Parmi 150 sujets, la moitié reçoivent une consigne du type : « Ce robot est un glorp. **Expliquez** pourquoi il s'agit d'un glorp. » et le restant du groupe reçoit comme consigne : « Ce robot est un glorp. **Décrivez** ce glorp. ». Après cette phase d'apprentissage, on retire au sujet la feuille présentant les 8 robots initiaux.
- Troisième étape (Test de catégorisation), on montre successivement 18 robots¹⁰ et on demande à quelle catégorie appartient ce robot.
- Dernière étape (Test de mémorisation), on montre successivement 23 robots. Parmi ces robots, 8 sont ceux déjà étudiés dans la première étape. Le sujet indique s' il s'agit d'un robot rencontré dans l'étape initiale. Il possède 2s pour se prononcer pour chaque robot.

Qu'est-ce qui fait qu'un robot est un glorp ? Après avoir examiné les 8 robots un court moment, on est peut-être tenté de proposer qu'un glorb est un robot qui possède un corps carré. Cette règle est vérifiée pour 3 glorps sur 4 (on l'appelle règle des 75% dans la suite). Elle n'est donc pas générale. En regardant avec plus d'attention, nous observons que les glorps ont les pieds pointus. Ce critère est valide pour 100% des glorps. De même, les drents ont les pieds

9. il s'agit après une phase d'apprentissage de demander au sujet de construire une machine à la manière de celle présentée initialement

10. Ce robot ne figure pas nécessairement parmi les 8 étudiés, mais peut être catégorisé en glorp ou drent

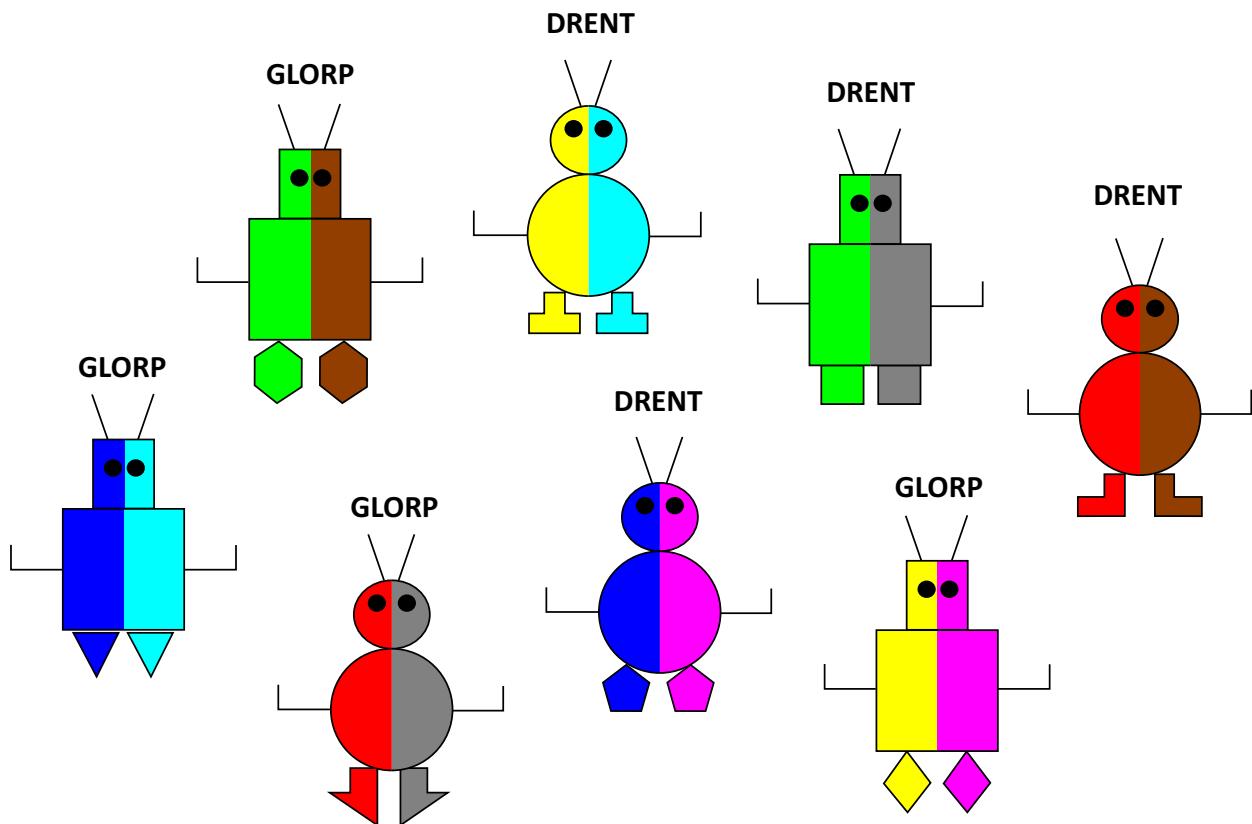


FIGURE 3.4 – 8 robots dont 4 Glorp et 4 Drent - Document donné au sujet de l'expérience pendant les phases 1 et 2 - Extrait de (Williams and Lombrozo 2010)

plats. Cette étude permet de mettre en évidence les performances de catégorisation et de mémorisation des sujets selon qu'ils ont abordé la tâche par l'explication ou la description.

Résultats Sur la tâche de catégorisation, un sujet sur trois du groupe ayant produit des explications ont utilisé la règle de 100% contre moins d'un sujet sur dix dans le groupe ayant décrit les robots dans la deuxième étape. En revanche, les sujets qui ont fait des descriptions utilisent davantage la règle des 75% (40 sujets contre 14 parmi le groupe qui a fourni des explications). Les sujets qui ont pratiqué une activité d'explication pendant la deuxième phase réussissent mieux à élaborer une généralisation abstraite qui les mène à la règle 100%. Expliquer favorise la découverte du lien subtile qui relie les éléments d'une même catégorie.

Les sujets qui ont décrit les robots montrent des performances plus importantes que ceux qui ont expliqué quand il s'agit d'effectuer le test de mémorisation (étape 4). La description conduit à une mémorisation de meilleure qualité des objets observés.

IV.4. Bilan et bénéfices pédagogiques

IV.4.a) Les vertus de l'explication

Chez le scientifique, mais aussi chez l'enfant, l'explication est plus qu'une manière de communiquer une compréhension du monde c'est un véritable moteur de découverte (pour la science et l'apprentissage).

Comme nous venons de le voir, explication et catégorisation ne sont pas deux fonctions cognitives disjointes. Dans un cadre où les connaissances initiales n'interviennent pas, le sujet qui produit une explication améliore ses chances d'élaborer un critère de catégorisation pertinent ce qui le conduit à un plus haut niveau d'abstraction. Comment bénéficier de cet effet en classe ? Dans l'expérience 1 de Lumbrozo et Williams, on remarque que le sujet n'est pas abandonné à lui-même pour rechercher l'explication. Il dispose d'un guide présentant chacune des catégories avec quatre exemples. Cependant la tache reste assez difficile (24 participants sur 75 trouveront la règle 100%). Cela invite, peut-être, à éviter de mettre l'élève en face de problèmes trop ouverts sans exemples préalables. On peut faire l'hypothèse que le questionnement traditionnel : observation, interprétation, conclusion peut se reformuler par : description, explication, abstraction. Dans ce cas, il est souhaitable de réduire le questionnement en fonction des objectifs pédagogiques. Par exemple, si le but est de cerner un phénomène qui se manifeste au cours d'une expérience, il est préférable de demander uniquement à l'élève d'expliquer ce qui se passe à la lumière de quelques-uns des résultats de l'expérience. On évitera ainsi de le noyer dans une description détaillée de la situation qui risquerait de lui faire perdre de vue les paramètres pertinents du problème.

Explication et description apparaissent comme deux stratégies complémentaires intervenant dans l'apprentissage. Il appartient à l'enseignant de favoriser plutôt l'explication si son but est de faire trouver à l'élève les aspects pertinents qui relient les régularités observées entre elles. En revanche s'il s'agit d'acquisition de connaissances destinées à être mémorisées pour alimenter des connaissances de fonds qui ensuite aideront à la découverte alors la description est à encourager.

Chez l'enfant plus âgé et chez l'adulte, la quantité de connaissances existantes conduit à de multiples interactions entre la situation étudiée et le savoir existant. L'explication tient compte de ce qui est connu et aborde parfois les aspects nouveaux par l'analogie avec des choses déjà connues. L'explication est en quelque sorte négociée avec les connaissances initiales dans le domaine étudiée (Williams et Lombrozo 2013), (Chi et VanLehn 1991) et (Walker et al. 2016). Ce couplage peut être fructueux, mais il peut conduire aussi à une généralisation abusive. C'est pourquoi, dans le cadre de l'enseignement, il est nécessaire de s'assurer que les étudiants possèdent les prérequis qui peuvent mener aux généralisations attendues (Williams et Lombrozo 2013).

IV.4.b) Les pièges de l'explication

Le problème du marcheur que nous avons détaillé au début de ce mémoire est souvent utilisé pour introduire la relativité du mouvement. Il s'agit du premier cours de mécanique en seconde et les élèves ont des notions sur la vitesse et la trajectoire d'un objet. Lorsque l'on demande à quel endroit la balle touche le sol après avoir indiqué à quel endroit le marcheur l'avait lâché, on constate que la quasi-totalité des élèves pense qu'elle tombe à la verticale. Lorsqu'on leur demande d'étayer leur prédiction par un argument, l'explication la plus fréquente est que lorsque l'on lâche une balle elle tombe verticalement. On voit bien ici, l'usage d'une généralisation abusive d'une explication confortée par de nombreuses expériences passées. Cette loi qui semble être du bon sens et qu'on énonce : « un objet lâché tombe verticalement » nous l'avons peut être obtenue par la généralisation de résultats d'expériences faites ou observées (avec éventuellement un biais de perception voir chapitre 1). Le fait que cette explication soit très représentée parmi les sujets interrogés peut être relié avec la tendance que nous avons de manière générale à préférer les explications les plus simples (Goodman et al. 2006).

Un autre aspect négatif de l'explication peut apparaître lorsque la situation examinée comporte peu de données ou bien que l'on observe un comportement non systématique. Par exemple, lorsqu'on étudie les oscillations d'un pendule simple ¹¹, on remarque que le chemin suivi par la masse qui oscille est d'autant plus grand que l'angle initial ¹² est grand. Ce chemin étant plus long, on pense alors que le temps pour effectuer une oscillation augmente lorsque l'angle initial augmente. On réalise 3 expériences dans lesquelles on fait varier cet angle et on mesure la durée d'une oscillation à l'aide d'un chronomètre. On obtient les résultats suivants :

angle initiale en degrés	10°	20°	30°
durée d'une oscillation en s	1,21	1,29	1,40

Les résultats expérimentaux montrent une relation entre l'angle initial et la période des oscillations. C'est ce que croira un élève qui réalise cette expérience, cette conviction sera renforcée d'autant plus fortement que les mesures valident son explication (biais de confirmation). Il aura le sentiment d'avoir découvert et expliquer un phénomène physique. Le problème est que

11. Il s'agit d'une masse accrochée à un fil dont l'extrémité est fixe

12. C'est l'angle avec lequel on a écarté le pendule de la verticale avant de lâcher

3. La physique naïve éclairée par les sciences cognitives

la période des oscillations ne dépend pas de l'angle initial¹³ et que les écarts observés sont dus aux incertitudes de mesures (essentiellement le réflexe de l'expérimentateur). Il se trouve que dans cette situation les écarts étaient croissants et cohérents avec la théorie initiale ce qui donne l'illusion de la valider. Il manque à l'élève une approche systématique du problème qui est d'autant plus difficile à suivre qu'il doit se débarrasser de ses a priori.

IV.4.c) Perspectives pédagogiques

De manière générale, la construction d'explication pour soit même ou sa formulation pour autrui améliore la qualité de l'apprentissage. En physique, elle permet une meilleure appropriation des principes et concepts du domaine étudié notamment en mécanique (Chi et VanLehn 1991). Pour Gopnik, le recours à l'explication enrichit la conception de l'apprentissage qui ne se résume plus à une accumulation d'informations obtenues par l'observation et le témoignage. L'explication va produire une nouvelle connaissance uniquement à partir d'informations que le sujet possède déjà.

When learning by explaining, the learner gains “new” knowledge by engaging with information that she already has. This phenomenon of learning by thinking challenges a simple data-driven view of knowledge acquisition, in which learning is simply a function of observations and testimony. (Walker et al. 2016)

Toutes les explications ne se valent pas, celles qui conduisent à un haut degré de généralisation sont à privilégier dans l'apprentissage des sciences. Comment favoriser l'émergence de ce type d'explication chez l'élève ? Bien que certaines expériences conduites en laboratoire donnent quelques pistes (Williams et Lombrozo 2013), le passage du laboratoire vers la salle de classe reste compliqué. L'enseignement en classe est collectif contrairement aux tâches individuelles des expériences conduites dans les laboratoires. Il s'effectue sur une longue durée où l'attention et l'engagement des sujets ne sont pas toujours optimaux. Bref, les résultats obtenus par les sciences cognitives éclairent la manière dont la connaissance se construit, mais ne sont pas des prescriptions pédagogiques. C'est à l'enseignant d'expérimenter à son tour des pratiques cognitivement pertinentes et d'évaluer ensuite leurs efficacités pédagogiques.

V. Le changement conceptuel

V.1. Analogie entre évolution de la science et développement cognitif

L'histoire des sciences nous montre qu'au cours du temps une théorie physique s'affine, mais aussi laisse sa place à une autre dont les pouvoirs explicatifs sont plus grands. Un des événements qui favorise le remplacement ou tout au moins la remise en question d'une théorie est la présence de résultats expérimentaux contredisant la théorie actuellement admise.

13. D'un point de vue plus rigoureux la période dépend de l'angle initial à l'ordre 2, mais ce n'est pas décelable dans les conditions de l'expérience

Gopnik fait un parallèle entre les changements successifs de théories observées en histoire des sciences et les théories élaborées par les enfants au cours de leurs développements cognitifs (Gopnik 1996). Elle propose un modèle dans lequel l'enfant remet en question sa théorie à partir du moment où il se retrouve confronté à un nombre important de faits incompatibles avec sa théorie. Il y a plusieurs similitudes entre la révision de théorie chez l'enfant et en science.

Par exemple, un seul fait contradictoire ne suffit pas en général à faire reconnaître à la communauté scientifique que la théorie est fausse. Souvent, on se contente soit de minimiser le fait en question soit de trouver un aménagement ad hoc de la théorie. Il est moins risqué de modifier habilement une théorie que de convaincre une communauté qu'elle doit renoncer à la confiance qu'elle a pu placer dans une théorie maintes fois confirmée. Parfois, c'est au prix de beaucoup d'efforts que l'on fera tenir debout l'édifice qui menace de s'écrouler. On peut penser par exemple à la description du mouvements des planètes à l'aide d'épicycles afin de conserver un point de vue géocentrique (voir figure 3.5).

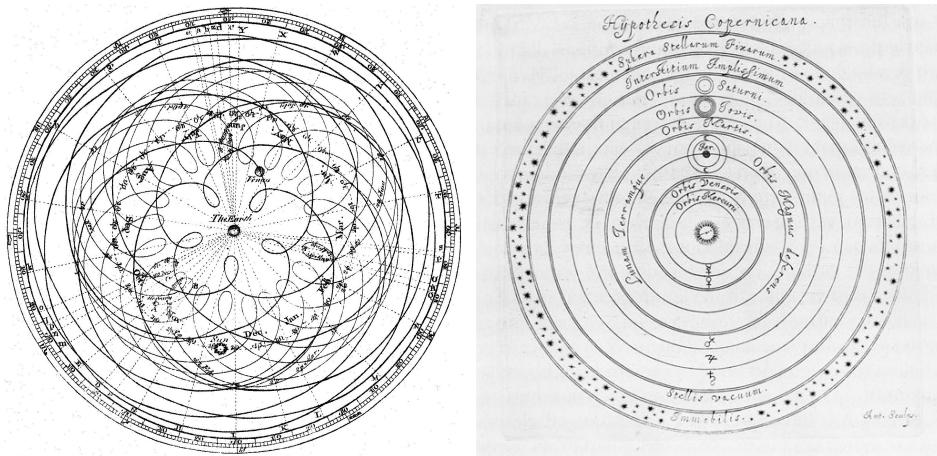


FIGURE 3.5 – Epicycles : mouvement des planètes dans le modèle géocentrique - modèle héliocentrique de Copernic

Ce type de comportement a été observé aussi chez l'enfant par Gopnik et ses collaborateurs. Autre point commun, c'est face à l'accumulation de faits qui contredisent leurs représentations que les enfants montrent le plus d'engagement et de créativité dans une activité de découverte (Legare, Gelman, et Wellman 2010) (Legare 2014b).

V.2. Critiques du modèle de Gopnik

Le modèle d'Alison Gopnik a largement été critiqué notamment sur le versant de sa description de ce qu'est l'histoire des sciences (Fine 1996). Pour Gopnik la science se développe d'elle-même grâce à sa structure interne. De plus, les aspects sociaux ont été écartés du modèle en envisageant une pratique solitaire de la science. Fine insiste sur le fait que la science est un objet historique et se fait aussi par l'histoire. Dans le cadre de ce modèle, la dimension

3. La physique naïve éclairée par les sciences cognitives

sociale de l'activité scientifique ne semble pas influencer l'aptitude de la science à produire des vérités sur le monde. Cependant, si la science dit des choses vraies c'est souvent grâce à la communauté scientifique et rarement le fait d'un scientifique isolé. Enfin, le travail quotidien du scientifique est moins d'énoncer des vérités que d'élucider pourquoi les choses ne se comportent pas comme attendu et d'imaginer des explications satisfaisantes qui amènent à nouveau de la cohérence entre ce qui est observé et ce qui est pensé.

Un autre aspect ignoré par Gopnik est celui du poids des normes notamment lors des révisions de théories. Rappelons que selon Gopnik le passage d'une théorie à une autre se fait par l'accumulation de faits qui falsifie la théorie admise. Cette simplification semble exagérée et peut conduire vers l'erreur si le but est d'étudier en détail l'activité scientifique qui est aussi dépendante de normes (Faucher et al. 2009).

Malgré toutes ces critiques, si l'on se contente de mettre en lien ce qu'il y a de communs entre la science et son apprentissage précoce, le modèle proposé me semble adapté. Certes, il existe quelques moments de la vie intellectuelle où chacun réalise de profonds changements conceptuels. Ces bouleversements peuvent être comparés aux fameuses révolutions scientifiques identifiées par Kuhn. Mais en dehors de ces tempêtes, on observe dans l'histoire de la physique des périodes moins polémiques et davantage consacrées à la maturation des idées ainsi qu'au perfectionnement de la théorie. La période que Kuhn désigne par science normale a son analogue dans le développement cognitif. Le passage d'une conception à une autre chez l'enfant est rarement disruptif avec la conception initiale. Bien souvent, un concept change et évolue par tâtonnement au cours de l'apprentissage. Les étapes de ces évolutions successives ont bien été caractérisées pour ce qui concerne le concept de nombre (Dehaene 2008). Nous montrons dans la partie suivante, comment la notion de contact physique entre deux corps se construit dès la première année de la vie. Les résultats de cette étude donnent des indications sur la manière dont un concept physique est réévalué et affiné au cours du développement cognitif.

V.3. L'apprentissage de la physique chez le très jeune enfant

La majorité des chercheurs qui étudient le développement cognitif de l'enfant s'accordent sur le fait que la représentation du monde physique chez le jeune enfant est plus sophistiquée que celle que Piaget¹⁴ avait imaginé. Dans la théorie de Piaget, le développement cognitif débute par un stade sensorimoteur durant les deux premières années de vie. Pendant cette période, l'enfant ne serait pas encore capable de produire un raisonnement logique. Nous allons voir que l'enfant raisonne et cela dès le début de sa vie. Bien entendu, obtenir des indications sur les connaissances physiques disponibles chez un bébé est très difficile. Son langage n'est pas formé et son attention est fluctuante.

Pour dépasser ces obstacles, les chercheurs ont imaginé une sorte de théâtre de marionnettes dans lequel on montre des événements à l'enfant. Tout d'abord, on montre à l'enfant des situations familières et on vérifie que son comportement est stable. À l'aide d'outils de contrôle adaptés, on peut évaluer le temps de fixation de son regard. Ce temps s'accroît lorsque

14. Jean Piaget (1896-1980) Psychologue, biologiste et philosophe. Sa contribution à l'étude du développement cognitif a marqué la sociologie et les sciences de l'éducation.

la situation présentée est inattendue. La mesure de ce temps va permettre de repérer si l'évènement présenté à l'enfant est perçu comme conforme ou non aux représentations du sujet. En ayant recours à des situations contrafactuelles en plus des situations familiaires, Renée Baillargeon et son équipe ont mis en évidence de manière détaillée l'évolution de quelques concepts liés à la représentation physique des objets. L'expérience suivante étudie plus particulièrement la notion de contact entre deux objets.

Expérience

- Description de l'évènement conforme : On montre un objet carré (illustré d'une tête de clown) que l'on déplace de gauche à droite à la main sur un support horizontale de forme rectangulaire (voir figure 3.6).



FIGURE 3.6 – Evènement conforme

- Description de l'évènement non conforme : On déplace le carré jusqu'à ce qu'il quitte son support sans pour autant tomber ! (voir figure 3.7).



FIGURE 3.7 – Evènement non conforme, puis conforme après 5 mois

Résultats

3. La physique naïve éclairée par les sciences cognitives

- Les bébés de trois mois manifestent leur étonnement face à l'évènement non conforme ce qui laisse supposer qu'ils possèdent la notion de contact entre deux objets et qu'ils estiment qu'un objet sans support ne peut rester immobile.
- Pourtant des bébés plus âgés (environ 5 mois) montrent une réaction beaucoup plus faible à l'évènement non conforme. Cette énigme a conduit les chercheurs à émettre l'hypothèse que ces bébés avaient modifié le rôle de la variable de contact. Pendant toute la durée du mouvement présenté, le doigt et le carré sont en contact. Pour les bébés, le doigt et le carré sont comme attachés, ils estiment que c'est ce contact qui permet au carré de ne pas tomber.
- Afin de vérifier cette hypothèse, ils ont modifié l'évènement non conforme en séparant le doigt du carré à la fin du mouvement horizontal qui déplace le carré de gauche à droite. Le carré restant immobile « dans les airs » après avoir été séparé du doigt.



FIGURE 3.8 – Evènement définitivement non conforme

Cette fois, cet évènement provoque à nouveau l'étonnement des bébés plus âgés. Le fait que le carré reste figé dans les airs alors qu'il n'entretient plus aucun contact extérieur est contraire à leurs représentations du monde.

Conclusion Ces études montrent que les bébés mettent en relation la stabilité d'un objet et son contact avec un support. A l'âge de trois mois, le contact entre le support et l'objet est envisagé de manière binaire. Pour l'enfant l'existence d'un contact implique nécessairement la stabilité de l'objet avec son support. Par conséquent, si ce contact est perdu l'objet doit tomber. À mesure que l'enfant se développe, il affine son jugement sur la stabilité d'un objet en contact avec un support. On peut caractériser cette évolution par l'enrichissement de la notion de contact. D'abord cette notion apparaît binaire, puis elle tient compte de l'horizontalité et enfin de la surface entre les deux objets. Au-delà d'un an, l'enfant va encore réviser sa théorie sur la stabilité d'un objet et introduire une autre propriété de l'objet : la répartition de sa masse. La figure 3.9 résume l'évolution des connaissances des jeunes enfants concernant la stabilité d'un objet en contact (ou non) avec un support.

La théorie de la stabilité d'un objet se construit de manière progressive. Dans l'étude présentée, on ne révèle pas comment c'est fait cette construction. On ne connaît pas la part de l'observation ou de l'expérimentation du bébé avec son environnement dans cette évolution sur la notion

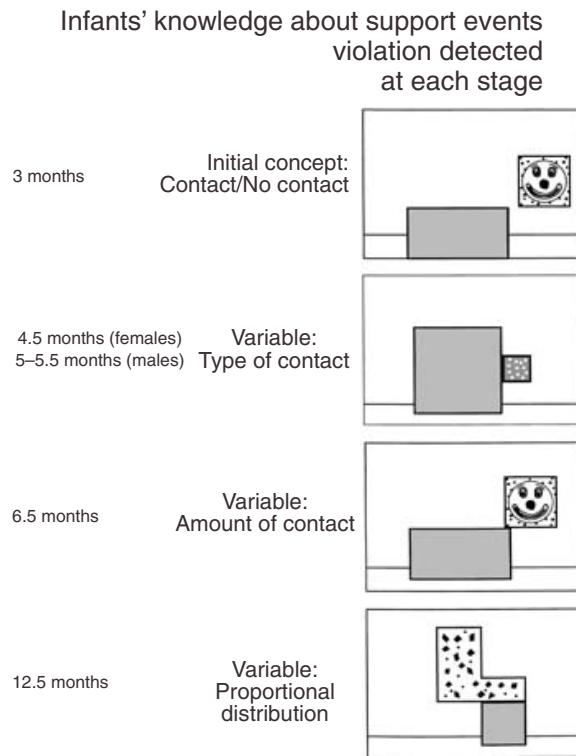


FIGURE 3.9 – Evolution de la variable contact chez l'enfant

de stabilité d'un corps. On constate que tout se passe comme si les enfants révisaient leur théorie sur la stabilité d'un corps en affinant la variable de contact puis en tenant compte de la géométrie de l'objet étudié. Ainsi la théorie de la stabilité d'un corps se développe en mobilisant une description de plus en plus fine et d'autre part en prenant en compte davantage de paramètres. Cette complexité croissante s'accompagne d'une meilleure adéquation entre les représentations mentales et ce qui est observé.

V.4. Lorsque la révision théorique échoue

Le modèle imaginé par Gopnik justifie bien les observations faites en laboratoire notamment à propos des progrès réalisés par les jeunes enfants. De nombreuses expériences ont montré que les enfants appréhendent certaines tâches en utilisant des règles qu'ils sont capables de réformer lorsque les faits incompatibles avec ses règles s'accumulent. C'est ainsi qu'il passe de la n ième théorie à la $n+1$ -ième. Pourtant, le fait que la majorité des élèves expliquent le mouvement selon des règles analogues à la physique d'Aristote montre que cette machine à produire des énoncés vrais tombe en panne de temps en temps. Pour quelles raisons une théorie fausse ne serait pas révisée ? On peut proposer plusieurs hypothèses pour justifier qu'une théorie n'est pas révisée par un sujet.

L'histoire des sciences montre qu'un événement falsifiant une théorie ne suffit pas nécessairement à déclencher la révision de celle-ci. De même, pour un individu, si les preuves contredisant

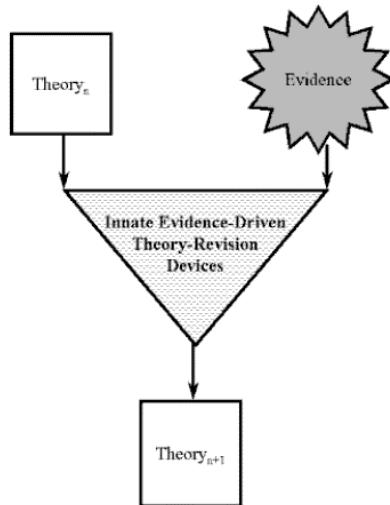


FIGURE 3.10 – Révision de la théorie n et élaboration de la théorie $n + 1$ selon Gopnik - illustration provenant de (Faucher et al. 2009)

la théorie n sont peu nombreuses ou bien ne se manifestent que dans des contextes étrangers au sujet, à quoi bon modifier cette théorie n ? Par exemple, il n'est pas étonnant que l'homme de la rue ne modifie pas sa conception du temps en prenant en compte les effets relativistes qui finalement ne concernent que des particules qu'il ne verra jamais ou bien interviennent dans des technologies qu'il peut utiliser sans connaître leurs fondements. Modifier une conception a un coût cognitif et sans bénéfice il y a peu de chances que le sujet s'engage dans cette démarche.

Il peut arriver qu'une théorie erronée soit conservée, car nous n'avons pas accès aux éléments qui pourraient la contredire. Soit nous avons inconsciemment ignoré ces éléments soit nous n'y avons pas eu accès. Dans ce cas, la théorie actuelle nous paraît régulièrement confirmée et ainsi de plus en plus fiable. Ce type de situation peut se rencontrer lorsque nous sommes victimes d'une illusion de perception comme celle qui a été décrite dans le début de ce mémoire (McCloskey, Washburn, et Felch 1983). Moins spectaculaire, mais tout aussi efficace pour nous tromper, certains biais cognitifs nous confortent dans nos représentations erronées c'est le cas du biais de confirmation qui nous pousse à donner davantage de valeurs à toutes les informations qui confirment nos hypothèses plutôt qu'à celles qui les contredisent.

Parfois, bien que les éléments qui falsifient la théorie soient pris en compte par la conscience du sujet, celui-ci ne parvient pas à les fondre dans une nouvelle théorie. Le changement à effectuer s'avère profond. Il bouleverse nos représentations et implique de repenser certains concepts que l'on croyait figés. C'est ce type de changement radical dont il est question lorsqu'on s'initie à la mécanique de newton. On a vu au chapitre 1 que la notion de mouvement qui semble absolu doit être repensée comme une relation entre deux objets et non une propriété de l'objet. De même, la loi de la chute des corps est tellement contre-intuitive qu'elle nécessite un enseignement pour véritablement être assimilée par un individu. Un des enjeux de l'enseignement de la physique est d'assurer les conditions permettant à chaque étudiant de

réussir sa révolution conceptuelle. Une de ces conditions est la pratique d'un enseignement explicite qui insiste sur le fait que l'ontologie des objets de la physique newtonienne n'est pas la même que celle de la physique naïve. Ainsi pour le physicien il est naturel qu'une voiture qui se déplace à vitesse constante dans un rond-point accélère.

Il y a donc de nombreuses explications possibles pour justifier la non-révision d'une théorie au cours du développement cognitif. Pour ce qui concerne la physique, on peut penser qu'une bonne partie de ce qu'on appelle la physique naïve est héritée de représentations qui se sont figées et ont cessé d'être remises en cause. Lorsque l'enseignement de la mécanique commence, l'élève a donc non seulement de nouvelles connaissances à acquérir, mais aussi de véritables révolutions conceptuelles à conduire.

On peut se demander alors si ces révolutions se font nécessairement en perfectionnant ce qui est connu ou bien si ce n'est pas une nouvelle construction qui va se faire de manière indépendante. Plutôt qu'une restructuration profonde des concepts, on peut faire l'hypothèse que l'élève conserve sa représentation du mouvement aristotélicien. En effet, cette représentation est simple et largement confirmée dans l'expérience quotidienne. L'apprentissage de la mécanique newtonienne ne viendrait pas concurrencer les connaissances initiales, mais se construirait à côté. Ainsi suivant les situations le sujet continuerait à mobiliser la mécanique qu'il a élaborée à partir de ses expériences quotidiennes depuis sa naissance tout en étant capable de mobiliser la mécanique newtonienne pour les situations académiques.

3. La physique naïve éclairée par les sciences cognitives

Chapitre 4

L'inhibition comme levier du changement conceptuel

Le cerveau est l'obstacle à la pensée scientifique. Il est un obstacle en ce sens qu'il est un coordonnateur de gestes et d'appétits. Il faut penser contre le cerveau.

Gaston Bachelard - La formation de l'esprit scientifique

Sommaire

I.	L'inhibition	58
I.1.	Mise en évidence	59
I.2.	Inhibition et raisonnement	60
II.	Changement conceptuel et inhibition en mécanique	61
II.1.	Aspect cumulatif de l'apprentissage	61
II.2.	Aspect disruptif du changement conceptuel	62
II.3.	Lien entre changement conceptuel et inhibition	63
II.4.	Présentation de l'étude de Foisy	66
II.5.	Résultats	67
III.	Conclusion	68

I. L'inhibition

Il y a des questions ou des tâches qui stimulent plusieurs stratégies parmi lesquelles une seule conduit à la bonne réponse. Certaines de ces situations peuvent être ressenties comme des pièges, car elles stimulent plus fortement la stratégie qui conduit à l'erreur. On peut donc se tromper tout en possédant la bonne stratégie. L'inhibition est la ressource cognitive qui permet d'activer la stratégie pertinente tout en bloquant celle qui conduit à l'erreur. Ainsi, la résolution de certains problèmes provoque une sorte de compétition dans notre cerveau où plusieurs stratégies s'activent. La solution que nous élaborons ne dépend pas uniquement de nos connaissances et de notre capacité à raisonner. Elle dépend aussi de notre capacité à inhiber les mauvaises stratégies.

Ce qui vient d'être dit a des conséquences sur l'apprentissage. Pendant que nous apprenons, nous passons d'une conception initiale à une nouvelle conception. On peut décrire ce processus comme l'évolution d'une conception initiale à une conception plus élaborée à la manière d'une pierre brute que l'on taille dans le but de construire un édifice. On peut aussi imaginer une situation où l'apprentissage apporte une nouvelle conception qui laisse intacte la conception initiale. Dans ce cas, est-il possible que la présence de ces deux conceptions perturbe notre raisonnement ? Avant de répondre à cette question, il est important de décrire comment un sujet passe d'une conception à une autre. Je pense que la manière dont s'effectue cette transition est très variable selon la notion à acquérir. Afin de simplifier le traitement de cette question, j'envisage deux cas extrêmes :

- un passage continu de la conception naïve à la conception scientifique : le savoir initial est la fondation qui accueille les nouvelles connaissances
- une rupture entre la conception naïve et le savoir à acquérir qui conduit à une construction séparée sur des bases nouvelles.

Dans les années 1980, les sciences de l'éducation ont mis en évidence, notamment en mécanique, des conceptions initiales très résistantes à l'apprentissage. Aujourd'hui, les études utilisant l'imagerie cérébrale ont permis de mettre en évidence le rôle clé de l'inhibition en comparant le raisonnement d'un expert à celui d'un novice. Il semble que pour assimiler la mécanique classique le novice doit non seulement connaître la théorie, mais aussi être capable de résister au chant des sirènes du raisonnement spontané. Ces résultats conduisent à deux conséquences pédagogiques :

1. Repérer finement les notions qui sont en rupture avec les conceptions initiales des élèves.
2. Créer des dispositifs pédagogiques favorisant l'inhibition du raisonnement spontané.

I.1. Mise en évidence

Lors de l'exécution de certaines tâches, bien que nous connaissons la stratégie pertinente nous mobilisons une stratégie inappropriée et nous nous trompons. Un exemple célèbre de tâche provoquant ce type d'erreur est celle proposée par J. Ridley Stroop (Stroop 1935) Expérience 1 p 649. Elle consiste à demander au sujet de lire une suite de mots écrits avec des couleurs différentes (voir figure 4.1). La difficulté et l'ingéniosité de cette tâche résident dans le fait que les mots sont aussi des noms de couleurs et qu'ils renvoient à une couleur différente de celle de l'encre avec laquelle ils sont écrits. On mesure le temps mis par le sujet pour parcourir la centaine de mots en donnant la couleur de chaque mot.

Bleu	Rouge	Vert	Jaune	Rouge
Jaune	Vert	Bleu	Jaune	Rouge
Rouge	Bleu	Jaune	Rouge	Vert
Bleu	Jaune	Rouge	Vert	Vert
Rouge	Bleu	Vert	Jaune	Jaune
Vert	Vert	Bleu	Bleu	Rouge
Jaune	Vert	Rouge	Jaune	Jaune
Bleu	Jaune	Bleu	Rouge	Vert
Rouge	Vert	Rouge	Bleu	Bleu
Vert	Bleu	Jaune	Rouge	Bleu

FIGURE 4.1 – Exemple d'une tâche de Stroop

Bien que le sujet sait parfaitement identifier chaque mot, il ressent une certaine difficulté dans l'exécution de cette tâche et il peut même lui arriver de se tromper. En moyenne, il met deux secondes de plus que pour effectuer une tâche où il suffirait de lire le nom des couleurs imprimé toutes en noires sur fond blanc. La difficulté vient de l'interférence qui se produit entre la couleur avec laquelle est écrit le mot et la signification d'un mot qui est une couleur. Il y a deux processus cognitifs en compétition : le décodage d'un mot par la lecture et l'identification d'une couleur. Le fait que le mot lu désigne une couleur différente de la couleur perçue produit un conflit cognitif. Il est alors nécessaire pour le sujet d'inhiber sa tendance à énoncer la couleur perçue et à maintenir actif le processus de lecture des mots.

À partir de 1950, de nombreuses recherches mobilisant des tâches analogues à celle de Stroop ont été menées. Afin de mesurer la manière dont le sujet exécute la tâche, on avait le plus souvent recours à la mesure de la durée d'exécution. On assimile alors le coût cognitif de l'inhibition d'une réponse spontanée¹ à l'augmentation de la durée de l'exécution de la tâche par rapport à une tâche analogue dans laquelle il n'y a pas de conflit cognitif.

1. fausse dans la situation à traiter

I.2. Inhibition et raisonnement

Dans les années soixante, pour mieux comprendre comment et quand apparaît le raisonnement logico-mathématique, Jean Piaget a réalisé de nombreuses expériences avec des enfants. Afin de vérifier si la construction du concept de nombre est achevée, il présente deux lignes de jetons en nombre égal. Au début de l'expérience, les jetons sont régulièrement espacés, puis on écarte les jetons (figure 4.2). Il constate que vers 4-5 ans, l'enfant reconnaît qu'il y a le même nombre de jetons sur les deux lignes avant que les jetons soient déplacés. En revanche, après modification de l'espacement, l'enfant affirme qu'il y a plus de jetons sur la ligne la plus longue. À partir de 6-7 ans, cette erreur n'est plus observée. Piaget explique qu'avant 6-7 ans la réponse de l'enfant se fonde sur une intuition perceptive qui peut être résumé par : "Plus long, plus nombreux.". D'après lui, il n'y a pas de pensée logico-mathématique chez l'enfant tant qu'il n'a pas atteint ce stade vers 6-7 ans. Aujourd'hui, ce modèle de développement par stade est largement critiqué et semble abandonné par la communauté des psychologues du développement.

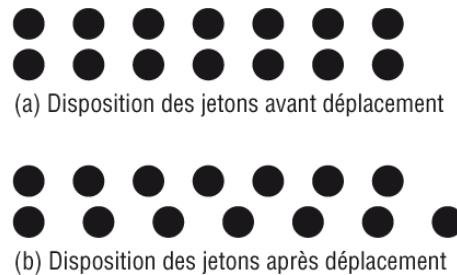


FIGURE 4.2 – Conservation du nombre

En effet, des études récentes (Gopnik, Dehaene) ont mis à mal l'existence de ces stades en montrant qu'il existe une logique du nombre bien avant l'âge de 7 ans. Olivier Houdé a repris la tâche évoquée plus haut et propose de considérer la règle : "Plus long, plus nombreux." comme une heuristique. C'est-à-dire un processus rapide et peu coûteux sur le plan cognitif. Lors de l'exécution de la tâche, il y a compétition entre cette heuristique et une approche plus coûteuse nécessitant une approche logique du nombre. L'idée centrale est que l'échec d'un enfant de 5 ans² à cette tâche n'est pas obligatoirement due à une incapacité à raisonner correctement, mais plutôt à son impuissance à inhiber l'heuristique. En 2011, Houdé (Houdé et al. 2011) et son équipe examinent à l'échelle du cerveau, en temps réel l'exécution de cette tâche de conservation du nombre. Ils concluent que le recours à l'inhibition est indispensable à la réussite de cette tâche. Ces résultats mettent à mal la représentation fréquente d'un développement cognitif qui se ferait uniquement par accumulation.

Il y a donc des problèmes devant lesquels nous mobilisons spontanément des heuristiques. Cela nous permet de répondre très rapidement. Mais, parfois, cela nous conduit à répondre de manière erronée. Notre erreur vient justement de l'activation d'une heuristique. Dans ce cas, produire une bonne réponse implique le recours à une stratégie plus difficile à activer,

2. Stade préopératoire selon Piaget

plus lente, mais scientifiquement valable. Notre capacité à raisonner mobilise nos compétences logiques, mais aussi notre faculté à inhiber des heuristiques³. Bien entendu nous pouvons raisonner logiquement, pour autant, nous ne sommes pas des êtres spontanément logiques. Doit-on apprendre à inhiber pour mieux raisonner ?

La réponse est oui ! Récemment, le laboratoire de la Sorbonne PsyDÉ a montré qu'il est possible par l'apprentissage de renforcer la capacité à inhiber chez un sujet mobilisant une heuristique inappropriée pour la tâche (Houdé et al. 2000). L'expérience met en évidence une amélioration des performances du sujet à résoudre un problème isomorphe à celui-qui le mettait en échec avant la phase de renforcement de sa capacité à inhiber. Sur le plan de l'apprentissage, une conséquence importante de ce travail et que face à une erreur chez un élève, on ne peut pas toujours conclure que celui-ci ne connaît pas la bonne stratégie. Il est possible qu'il n'arrive pas à inhiber une conception initiale au profit de cette "bonne stratégie" qu'il possède aussi.

Dans la suite, nous examinerons sous l'angle du changement conceptuel le rôle de l'inhibition dans l'apprentissage de la physique. Je fais l'hypothèse que les conceptions initiales erronées de mécanique des sujets novices sont analogues aux heuristiques chez Houdé. Je décris l'apprentissage de la physique selon deux aspects qui dépendent du type de notion à acquérir. De manière assez fréquente, on peut utiliser les représentations initiales pour construire la notion scientifique. Par exemple, en mathématisant, la notion commune de vitesse on aboutit à celle de vecteur vitesse couramment utilisée en mécanique classique. En revanche, d'autres savoirs bien que partageant un vocabulaire en apparence identique sont par leur signification radicalement éloignés des conceptions initiales. Ces notions nécessitent un changement conceptuel chez l'élève et nous verrons que l'inhibition y joue en rôle clé.

II. Changement conceptuel et inhibition en mécanique

II.1. Aspect cumulatif de l'apprentissage

Une vision communément répandue dans le monde enseignant est que le savoir de l'élève s'accumule au fur et à mesure des leçons qu'il apprend. Chaque leçon amène son lot de nouvelles connaissances qui sédimentent peu à peu devenant ainsi de nouveaux prérequis. L'acquisition des connaissances se fait progressivement par ajout et modification d'informations. Les objets utilisés par les théories deviennent plus complexes et leurs assimilations s'accompagnent aussi d'une réorganisation des relations entre les concepts. Ainsi on peut caractériser le développement d'une théorie chez un individu par l'augmentation du nombre de concepts mobilisés, de leur complexité et des relations qui les relient. La croissance de la complexité de l'édifice est motivée par un succès croissant à rendre compte des résultats observés lors des expériences. La théorie gagne alors en généralité.

Par exemple, la notion de vitesse est initialement associée à un nombre qui qualifie le déplacement en un temps donné d'un objet en mouvement. Plus tard, lors de l'apprentissage de la cinématique, la vitesse d'un mobile est un vecteur qui indique non seulement la valeur

3. qui s'activent spontanément

4. L'inhibition comme levier du changement conceptuel

de la vitesse, mais aussi la direction et le sens du mouvement. Du point de vue ontologique, l'apprentissage consiste à passer d'un nombre à un vecteur pour penser la vitesse. La nouvelle conception contient l'ancienne puisque la valeur de la vitesse est une des caractéristiques du vecteur vitesse. Il s'agit d'un concept construit par extension du concept initial. L'extension est ici constituée par des caractéristiques géométriques. Le passage de la conception scalaire à vectorielle nécessite une certaine réorganisation des connaissances, car les lois qui s'appliquent aux nombres ne sont pas identiques à celles qui s'appliquent aux vecteurs⁴. Cet apprentissage ne se fait pas uniquement dans le sens d'un accroissement de la complexité des représentations. Au contraire, le mouvement rectiligne uniforme s'envisage simplement comme mouvement d'un corps dont le vecteur vitesse est constant. Le novice peut donc prendre appui sur sa conception initiale de la vitesse pour construire une conception plus scientifique de la vitesse.

Ce qui vient d'être dit sur l'exemple de la vitesse n'est pas applicable à toutes les notions de mécanique. Dans le prochain paragraphe, nous allons voir que sur le chemin de la connaissance nous rencontrons parfois de nouvelles notions qui se présentent de manière inconciliable avec nos conceptions initiales. Pour de telles notions, les conceptions initiales ne sont pas toujours des fondations viables sur lesquelles les nouvelles connaissances peuvent s'enraciner. Au contraire, l'apprentissage de ce type de théorie conduit à une construction intellectuelle inédite et séparée des conceptions initiales. Bien souvent, l'élève devra faire taire son intuition afin de ne pas se tromper. Pour ce type de notion, l'élève doit le plus souvent effectuer un changement conceptuel pour lequel nous allons mettre en évidence le lien avec l'inhibition.

II.2. Aspect disruptif du changement conceptuel

Selon Kuhn, certains concepts physiques appartenant à des théories qui se sont succédées dans l'histoire des sciences sont incommensurables. C'est par exemple le cas du temps, qui en mécanique classique est une variable continue, indépendante de la vitesse du mobile et donc du référentiel choisi. En revanche, en relativité restreinte, le concept de temps change radicalement, il devient relatif au référentiel et est couplé à l'espace. Ce n'est pas en complétant le concept du temps newtonien que l'on peut approcher le temps en relativité. Cette construction nécessite de repartir à zéro ou plus exactement sur la base de nouveaux postulats. Par analogie, je fais l'hypothèse que certaines théories physiques ont pour conséquences la prédiction de résultats tellement éloignée des conceptions initiales que leur apprentissage ne peut se faire dans la continuité d'une extension des connaissances, mais de manière autonome et disruptive.

Il me semble que la mécanique newtonienne fait partie de ces théories. Les concepts d'accélération, de force ou encore d'énergie sont radicalement différents chez un élève qui n'a pas étudié la mécanique et chez le physicien qui a assimilé les lois de Newton (voir (Viennot 2007) chap 4 et (Viennot 1979) chap 1 et 2).

Cette théorie se construit à côté des conceptions initiales dans un espace disjoint, car elle est en forte contradiction avec ce qui est connu. Comment un novice peut-il adhérer à l'idée qu'une voiture qui roule à vitesse constante dans un rond-point possède une accélération non nulle ? Il ne suffit pas de connaître la définition mathématique de l'accélération, il faut

4. Certaines opérations comme la multiplication n'existent pas entre deux vecteurs

s'interdire d'utiliser la proposition : "Si la valeur de la vitesse ne change pas alors il n'y a pas d'accélération". Cette proposition est si fortement ancrée chez les individus, qu'elle joue un rôle d'heuristique.

Apprendre la mécanique de Newton, ne commence peut-être pas par réformer ses conceptions initiales. Il faut d'abord accepter des lois qui posent les relations entre des concepts (forces, accélérations, masse, etc.). Ces lois sont en quelque sorte les règles du jeu de la mécanique classique que l'on accepte dans un premier temps afin de pouvoir jouer avec. Bien sûr, l'appropriation des lois est difficile chez le novice, car elles impliquent des contradictions avec ses prédictions intuitives. Le changement conceptuel est au prix d'une censure de l'intuition perceptive du mouvement au profit de stratégie systématique issue d'un système axiomatique. Dans ce cadre, la théorie initiale n'est pas déconstruite d'autant que bien souvent elle est renforcée dans des situations quotidiennes où elle permet d'obtenir des résultats justes.

Le changement conceptuel ne consiste pas à remplacer une conception initiale erronée par une théorie scientifique robuste. Le changement conceptuel lorsqu'il est atteint donne l'accès à un raisonnement scientifique pertinent pour la tâche à traiter tout en ignorant le raisonnement spontané acquis lors du développement de l'individu. Le talent que le physicien a développé au cours de sa formation a pour origine l'acquisition de théories, mais aussi la capacité d'activer ces théories lors de son raisonnement tout en inhibant certaines conceptions initiales.

II.3. Lien entre changement conceptuel et inhibition

II.3.a) Deux descriptions du changement conceptuel

Comment évaluer le changement conceptuel chez un individu ? Lorsqu'un étudiant a dépassé une conception initiale, de quelle nature est ce dépassement ? Nous pouvons envisager deux hypothèses caractérisant l'acquisition de ce savoir. Première possibilité, la conception initiale a été substituée par une nouvelle plus générale. L'ancienne conception est effacée. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire d'avoir recours à son inhibition. Le sujet mobilise naturellement cette nouvelle conception qui est plus performante. On retrouve ici une situation analogue au changement de paradigme chez Kuhn.

L'autre hypothèse consiste à affirmer que la nouvelle conception est tellement éloignée de la conception initiale qu'elle se construit à côté de celle-ci sans la modifier. Le sujet serait alors capable de mobiliser, selon la situation, l'une ou l'autre des conceptions. Si cette description est juste, il sera parfois nécessaire d'inhiber la conception initiale afin de répondre correctement à un problème scientifique.

II.3.b) Etude pluridisciplinaire

Deux chercheurs de Los Angeles (Shtulman et Valcarcel 2012) ont construit un questionnaire du type vrai/faux portant sur une grande diversité de domaines : astronomie, génétique, matière, fractions, ondes, etc. Les questions posées sont de deux types :

4. L'inhibition comme levier du changement conceptuel

1. Consistante : la réponse correcte est la même que le sujet raisonne avec une conception naïve ou avec une théorie scientifique.
2. Inconsistante : la réponse valide diffère selon que le sujet possède la représentation naïve ou la représentation scientifique. (noté avec un * sur la figure 4.3)

Sample items involving the same conceptual relation. Consistent items were true on both the naïve theory (T1) and the scientific theory (T2) or false on both theories; inconsistent items (marked with an asterisk) were true on one theory but false on the other.

Domain	T1	T2	Statement
Matter	True	True	Rocks are composed of matter.
	False	False	Numbers are composed of matter
	True	False	Fire is composed of matter*
	False	True	Air is composed of matter*
Physiology	True	True	People turn food into energy
	False	False	Rocks turn food into energy
	True	False	Plants turn food into energy*
	False	True	Bacteria turn food into energy*
Evolution	True	True	Humans are descended from tree-dwelling creatures
	False	False	Humans are descended from plants
	True	False	Humans are descended from chimpanzees*
	False	True	Humans are descended from sea-dwelling creatures*
Mechanics	True	True	A moving bullet loses speed
	False	False	A moving bullet loses weight
	True	False	A moving bullet loses force*
	False	True	A moving bullet loses height*
Thermodynamics	True	True	Ovens produce heat
	False	False	Rain produces heat
	True	False	Coats produce heat*
	False	True	Pressure produces heat*

FIGURE 4.3 – Exemples de questions consistantes / inconsistantes

Si le changement conceptuel s'effectue en supprimant la conception initiale et en la remplaçant par une théorie scientifique alors les temps de réponse aux deux types de questions doivent être voisins. En effet, si la question mobilise une théorie scientifique chez le sujet, puisque la conception initiale n'existe plus, le caractère consistant ou inconsistent de la question n'intervient pas.

On observe que les questions inconsistantes nécessitent de la part du sujet un temps de réponse nettement plus grand. Ce résultat est incompatible avec l'hypothèse d'un changement conceptuel qui se ferait par élimination de la conception initiale. En revanche, l'ensemble des temps de réaction relevés dans cette étude sont cohérents avec l'hypothèse d'une forme de persistance des conceptions initiales. L'augmentation de la durée de réponse trouve son explication par la présence d'un conflit cognitif⁵ plus marqué pour les questions inconsistantes.

Cette étude montre que lorsque l'on pose des questions dont la réponse nécessite l'appel à des conceptions issues d'un changement conceptuel alors le sujet a besoin d'un temps de réponse plus long que pour les questions où les représentations naïves permettent de répondre juste. On interprète ce fait comme l'interférence d'une conception initiale avec une théorie scientifique connue. Pour préciser la nature de cette interférence, il faut utiliser des moyens d'investigations plus sophistiqués comme l'imagerie cérébrale. Nous verrons alors que cette interférence conduit à la formulation d'une réponse unique grâce à l'inhibition.

5. Le conflit cognitif est la situation où le sujet est exposé à des faits qui lui semblent inattendus et qui contredisent sa représentation du problème.

II.3.c) Imagerie cérébrale et conflit cognitif

Il existe plusieurs techniques d'imagerie cérébrale, dans cette partie j'évoquerai uniquement l'imagerie fonctionnelle par résonance magnétique (IfRM). Cette technique a permis d'étudier en détail l'activité cérébrale du sujet pendant qu'il exécute la tâche. L' IfRM a considérablement facilité l'association d'une fonction cognitive avec les régions du cerveau qu'elle mobilise. Cependant, il est délicat d'inférer la fonction impliquée depuis l'observation d'une activation d'une zone cérébrale. Le plus souvent, on procède par dissociation en considérant que si l'exécution de deux tâches cognitives conduit à l'observation de deux zones distinctes d'activation alors on peut en conclure qu'il existe des mécanismes dissociés.

Un novice de la mécanique sera en conflit cognitif s'il observe deux corps de masses différentes tomber de la même manière. Quelles régions cérébrales s'activent en cas de conflit cognitif ? Comme le rappelle Matthew Botvinick (Botvinick 2007) il existe de nombreuses preuves empiriques montrant que le cortex cingulaire antérieur (CCA) est sollicité lorsqu'il y a une contradiction dans les informations à traiter (par exemple lorsque les informations collectées contredisent une théorie tenue pour vraie chez le sujet (Fugelsang et Dunbar 2005)). L'autre situation dans laquelle on s'attend à l'activation du CCA est la prise de décision. Botvinick propose une synthèse de ces deux approches :

Specifically, we have proposed not only that conflict, as an index of information-processing demands, drives reactive adjustments in cognitive control (as has been proposed, and supported, by previous research), but also that the ACC response to conflict also serves as a teaching signal, driving a form of avoidance learning.

p 363 Botvinick (2007). Conflict monitoring and decision making : reconciling two perspectives on anterior cingulate function.

Non seulement l'activation du CCA témoigne de la présence d'un conflit cognitif, mais il semble qu'il peut être mis en relation avec un apprentissage par évitemennt. L'étude de Foisy permettra de revenir sur ce point important.

II.3.d) Obstacle méthodologique

Quelle méthode doit-on suivre pour étudier le changement conceptuel chez un sujet si l'on souhaite tirer le bénéfice de la précision de l'IRMf ? Dans l'idéal, on peut proposer la séquence suivante :

1. Soumettre un sujet naïf à un prétest afin de vérifier qu'il mobilise une conception naïve.
2. Enseigner et entraîner le sujet.
3. Stimuler régulièrement la conception naïve et la conception en cours d'acquisition, tout en observant le sujet sous IRMf.
4. Répéter les points 2 et 3 jusqu'à l'achèvement du changement conceptuel.
5. Effectuer un post-test sur une tâche analogue au prétest afin de valider le changement conceptuel.

4. L'inhibition comme levier du changement conceptuel

Ainsi, on peut espérer voir comment se traduit dans l'activité cérébrale les différentes étapes menant au changement conceptuel. Cependant, cette méthodologie n'est pas retenue, car les processus de changement conceptuel peuvent être longs et difficiles. Cette contrainte de temps et ses implications financières condamnent cette approche qui consiste à suivre un sujet en particulier au cours de son apprentissage.

Pour étudier le changement conceptuel dans un délai raisonnable, on étudie deux populations : des experts qui ont effectué ce changement et des novices qui ne disposent que d'une conception spontanée. La comparaison entre l'activité cérébrale des experts et des novices pour une tâche donnée est courante en neuroéducation. Elle a fait ses preuves dans les domaines de la lecture et dans l'apprentissage élémentaire des mathématiques. Concernant l'apprentissage de la physique, cette démarche a été utilisée en mécanique (Dunbar, Fugelsang, et Stein 2007),(Potvin et al. 2014),(Potvin et Cyr 2017) et en électricité (Masson et al. 2014).

II.4. Présentation de l'étude de Foisy

En prenant appui sur l'étude de Foisy et de ses collaborateurs (Foisy et al. 2015), nous allons illustrer le rôle de l'inhibition lors d'un changement conceptuel. Puis, nous indiquerons quelques pistes permettant l'intégration de ce mécanisme à une pédagogie.

Dans tout ce qui va suivre, nous considérons que l'air n'agit pas sur les objets en mouvement et que seul le champ de pesanteur considéré uniforme exerce une force sur les objets étudiés. À la question : "Qu'est-ce qui tombe le plus vite une boule de pétanque ou une balle de ping-pong ?" le quidam répond instinctivement "la boule de pétanque, car elle est plus lourde". Le physicien affirme que la chute des corps ne dépend pas de la masse des corps et que ces deux objets ont le même mouvement pendant leur chute. C'est en général un long apprentissage de la mécanique qui sera nécessaire non seulement pour répondre correctement à cette question, mais pour être intimement convaincu de la validité de ce résultat.

L'équipe de chercheurs québécois a montré aux participants de l'étude, des animations simulant la chute libre de deux corps sphériques en prenant soin de leur préciser que les frottements seraient négligés. Les sphères sont faites du même matériau, ainsi plus la boule est grande, plus sa masse est grande. Sur l'animation les boules tombent verticalement, vers le bas jusqu'à atteindre le sol matérialisé par une ligne horizontale.

Trois types de situations sont soumises aux sujets :

1. Le stimulus non scientifique : l'objet le plus lourd tombe plus vite.
2. Le stimulus scientifique : les objets tombent en même temps, quelle que soit leur masse.
3. Le stimulus de contrôle : c'est une situation qui est supposée être conflictuelle pour tous les sujets. Dans ce cas, c'est l'objet le plus léger qui tombe plus vite.

Les participants se déclinent en deux groupes : les novices⁶ (qui n'ont pas eu d'enseignement

6. 19 hommes, âgés en moyenne de 23 ans, droitiers, étudiants en sciences humaines qui n'ont pas suivis d'option scientifique

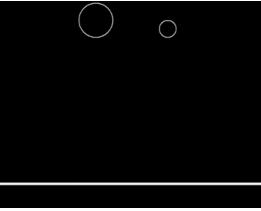
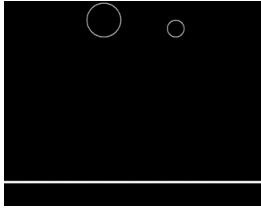
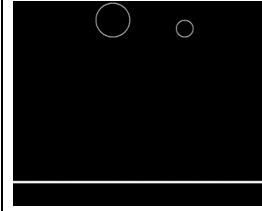
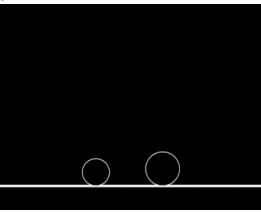
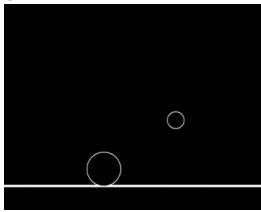
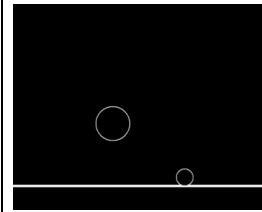
	Stimulus scientifique	Stimulus naïf	Stimulus de contrôle
Première image du film	a 	c 	e 
Dernière image du film	b 	d 	f 

FIGURE 4.4 – 3 types d’animations : non-scientifique , scientifique et de contrôle

de mécanique) et les experts⁷ (étudiants qui ont une formation en physique). Chaque sujet doit s’exprimer sur la validité de 120 stimuli présentés aléatoirement et représentant équitablement chacune des situations (40 animations pour chaque stimulus).

II.5. Résultats

Pour le groupe des novices, le stimulus non scientifique est validé. Dans cette situation, on observe l’activation du cortex frontal médial liée aux représentations déjà existantes. Le stimulus scientifique déclenche l’activation du cortex cingulaire antérieur chez tous les novices. La moitié de ces sujets estiment incorrecte l’animation conforme aux lois de Newton. Ils sont en conflit cognitif. En revanche, que dire de l’autre moitié qui valide cette animation tout en activant leur cortex cingulaire. Une hypothèse d’explication consiste à admettre que les sujets ont répondu correctement sans pour autant avoir réalisé dans leur schéma de pensée le changement conceptuel nécessaire à l’assimilation des lois de Newton. Finalement, cette réponse est un appel à la mémoire et se fait sans recours à un argument scientifique.

Pour le groupe d’experts, les stimuli scientifiques provoquent une activation du cortex frontal médial confirmant la présence de représentations mentales cohérentes avec la mécanique newtonienne. La surprise vient de l’image du cerveau d’un sujet expert soumis à un stimulus non scientifique. On observe dans son cerveau l’activation de deux zones. La première, le cortex cingulaire antérieur témoigne du conflit cognitif entre la situation observée et les représentations du sujet. La seconde, le cortex médial frontal qui s’active de la même manière que les novices. Tout se passe comme si les sujets experts avaient encore dans leur cerveau la représentation naïve non newtonienne. Comment un sujet expert parvient-il à formuler la

7. 10 étudiants, âgés en moyenne de 22 ans, étudiants en physique, ont suivi un enseignement scientifique au lycée

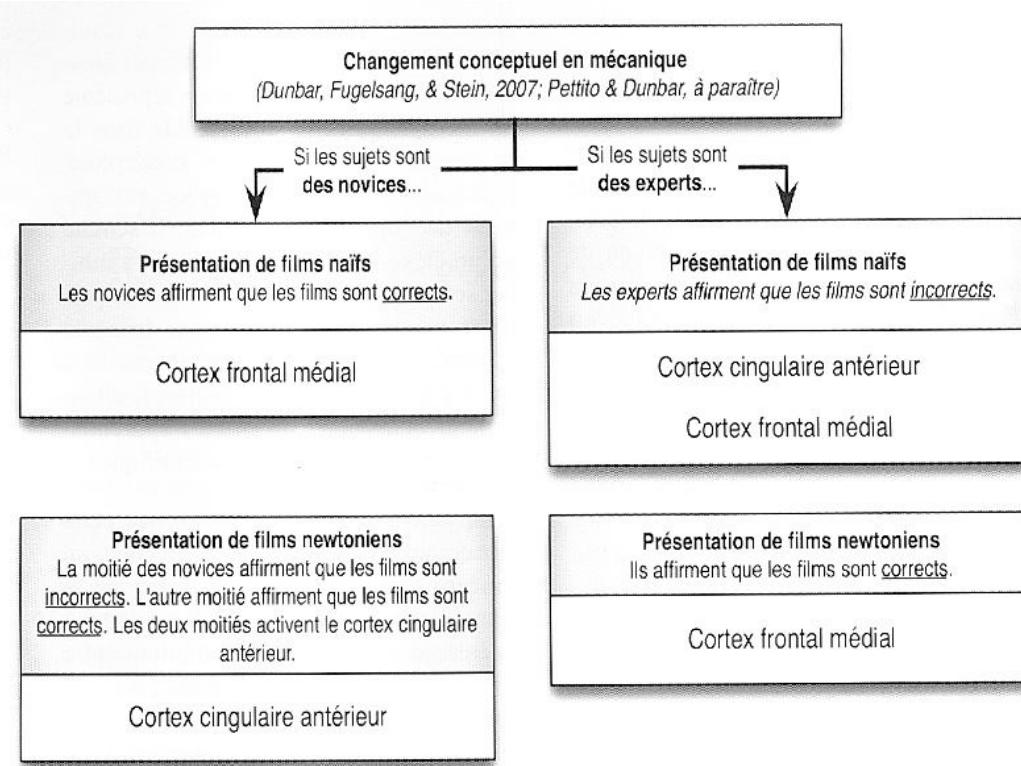


FIGURE 4.5 – Résultats

bonne réponse tout en activant dans son cerveau une zone correspondant à une représentation erronée qui elle conduit à une mauvaise réponse ?

Les chercheurs expliquent ce fait par un mécanisme d'inhibition du cortex frontal médial par le cortex cingulaire antérieur. Pour justifier cette double activation, on est conduit à supposer que les experts n'ont pas fait table rase de leurs conceptions initiales au cours de leur apprentissage de la mécanique. Leur réponse est juste, car ils ont assimilé la mécanique de Newton et sont capables d'inhiber leurs conceptions initiales toujours présentes et probablement actives dans d'autres situations.

III. Conclusion

Bien que l'inhibition n'intervienne pas systématiquement dans l'apprentissage, elle joue un rôle important et jusqu'ici ignoré dans l'appropriation de certaines théories. Ces notions sont identifiables par la rupture conceptuelle qu'elles entretiennent avec les représentations initiales de l'élève. Ce qui donne du poids à l'importance du mécanisme d'inhibition tel qu'il est présenté dans l'étude de Foisy est la convergence avec des études similaires effectuées dans d'autres disciplines scientifiques. C'est le cas par exemple en électricité (Masson et al. 2014) et en chimie (Lafortune, Véronneau, et Masson 2012). Dans le domaine du raisonnement

logique, Olivier Houdé a mis en évidence le rôle clé de l'inhibition lors de l'exécution de tâche piagétienne de conservation du nombre, mais aussi en expliquant le biais d'appariement par un défaut d'inhibition (Houdé et al. 2000) et (Houdé 2017) p 84.

Ce constat a des conséquences sur la pratique pédagogique des enseignants. Cela commence par un travail de repérage par l'enseignant des notions qui sont en rupture avec les connaissances initiales de l'élève. L'intention pédagogique n'est pas de déconstruire la conception initiale, mais de la considérer comme non pertinente dans le cadre scientifique. Après un temps d'enseignement et de pratique de la nouvelle théorie, on pourra proposer à l'élève une situation où les deux conceptions (initiale et scientifique) sont en compétition. On sollicite l'élève afin qu'il identifie les deux conceptions susceptibles d'être utilisées. L'exploration des conséquences de chaque approche doit conduire non seulement à les distinguer, mais surtout à inhiber celle qui n'est pas appropriée.

L'inhibition est vue ici comme la capacité à orienter le raisonnement suivant la stratégie scientifique et non suivant la conception initiale (erronée dans le cas présent). Comme de nombreux processus cognitifs, l'inhibition ne fonctionne pas en vase clos. Cette aptitude est dépendante aussi de nos émotions. À ce propos, Houdé signale qu'il a obtenu de meilleurs résultats chez les sujets pour lesquels on avait utilisé des alertes émotionnelles du type : « Attention, il y a un piège, vous pouvez vous tromper, il faut y résister» (Houdé et al. 2000). Il pourra être intéressant d'expérimenter ce type d'alerte en classe.

Le rôle de l'inhibition dans la description du changement conceptuel enrichit la discussion autour du statut de l'erreur. Dans ce cadre, l'élève pourra regarder son erreur comme une étape associée à l'appropriation d'une théorie difficile et ainsi en diminuer la charge émotive. De son côté, l'enseignant se gardera bien de conclure systématiquement qu'un élève qui répond de manière erronée n'a pas compris ou n'a pas appris la stratégie scientifique vue en classe. Peut-être cet élève n'est-il pas encore capable d'inhiber une conception initiale au profit de cette "bonne stratégie" qu'il possède pourtant déjà.

4. L'inhibition comme levier du changement conceptuel

Chapitre 5

Critiques de l'enseignement du mouvement

C'est ainsi que la même chose, chacun
la juge d'après sa position.

Stendhal

Sommaire

I.	Introduction	71
II.	Ignorance des particularités du changement conceptuel	72
II.1.	Penser le mouvement	72
II.2.	Révision conceptuelle trop tardive	73
II.3.	Renforcement involontaire de la méconception par l'enseignement	74
III.	Stratégie pédagogique	74
IV.	Bilan	75

I. Introduction

Dans cette partie, je confronte les conceptions initiales erronées (ou méconceptions) des élèves avec les contenus des programmes du cycle 4 et de la première année de lycée (de la classe de cinquième à celle de la seconde). Les programmes semblent faire l'hypothèse qu'il suffit de présenter les notions dans un ordre de complexité croissante pour permettre à l'élève de progresser dans son apprentissage de la physique. Si cette approche convient pour certaines notions elle s'avère probablement contre-productive dans la situation où l'élève possède une méconception qu'il doit réformer. Nous verrons sur l'exemple de l'enseignement du mouvement

5. Critiques de l'enseignement du mouvement

que les programmes proposent une remise en cause tardive du caractère absolu du mouvement qui est une conception initiale très fréquente chez l'élève. Nous discuterons des conséquences d'un traitement tardif et en demi-teinte de cette conception naïve du mouvement.

La partie précédente sur l'inhibition a montré que le changement conceptuel effectué par les experts ne consistent pas à effacer la conception initiale eronnée et à la remplacer par une nouvelle de plus grande valeur scientifique. L'enseignement de notions nécessitant un tel changement doit se faire en mettant en compétition la nouvelle conception et la méconception. Le professeur doit agir de manière à favoriser la nouvelle conception afin que celle-ci devienne prévalente devant la méconception. C'est ce que Potvin nomme la stratégie de la prévalence (Potvin et Cyr 2017) p 34. Nous détaillerons en dernière partie une stratégie en trois étapes qui permet un enseignement optimal de ce type de notion.

II. Ignorance des particularités du changement conceptuel

Nous avons déjà constaté dans les parties précédentes que les élèves viennent en classe avec des représentations initiales. Apprendre ne se réduit pas à la mémorisation de ce qu'énonce le professeur. Cela passe souvent par la confrontation entre ce que l'élève a en tête et ce qui est livré en cours. C'est pourquoi l'acte d'enseigner se heurte régulièrement à la résistance des conceptions initiales erronées des élèves qui font obstacle à l'assimilation des notions fondamentales du cours. Il existe une littérature abondante qui fait l'inventaire des erreurs fréquentes des élèves et met en évidence leurs conceptions initiales ((Viennot 2007),(Viennot 1978) pour une revue de littérature plus complète voir (Dilber, Karaman, et Duzgun 2009)). Pourtant, les programmes ne tiennent pas compte explicitement des méconceptions des élèves. Les notions sont présentées de manière cumulative et cohérente pour celui qui connaît déjà le domaine. Cependant, je défends l'idée que cette présentation peut s'avérer contre-productive lorsqu'un élève possède une méconception à propos de la notion à acquérir. Détaillons ce point sur l'exemple de l'enseignement du mouvement.

II.1. Penser le mouvement

Au collège, le début du cours de mécanique commence par compléter la notion de vitesse que l'élève possède déjà. Cet enseignement consiste à ajouter des caractéristiques géométriques (direction et sens) à la représentation initiale. Pour une notion comme la vitesse, cette approche cumulative ne pose pas de problème sur le plan cognitif.

En revanche, la notion de mouvement ne peut être construite par une accumulation de connaissances reposant sur les conceptions initiales des élèves. De quelle nature est le changement conceptuel que doit réaliser le novice afin de devenir expert ? Caractériser un mouvement est un travail très différent chez le physicien et chez le naïf. Le physicien commence par un choix éditorial dans lequel il décide arbitrairement qu'un des objets de la situation est immobile. En mécanique, un tel objet s'appelle le référentiel. Il place ensuite son attention sur

II.. IGNORANCE DES PARTICULARITÉS DU CHANGEMENT CONCEPTUEL

l'autre objet et étudie comment celui-ci bouge par rapport au premier. Le mouvement est donc une relation entre deux objets. Pour l'élève, la notion de mouvement lui paraît tellement évidente qu'il ne voit pas la nécessité de la justifier. Sans en avoir conscience, il a passé des années, à construire et affiner sa conception de mouvement à partir de sa propre perception. Aujourd'hui, elle lui suffit au quotidien pour déterminer si un objet est en mouvement ou non. La conséquence est qu'il estime que le mouvement, mais aussi la vitesse d'un objet est intrinsèque à l'objet. Cette méconception est très répandue, très résistante et a des conséquences néfastes sur l'apprentissage de la mécanique¹. Ce qui pose problème dans le programme est donc la notion même de mouvement qui nécessite la notion de référentiel dès le départ de l'enseignement.

II.2. Révision conceptuelle trop tardive

Au collège, la relativité du mouvement qui constraint à définir par rapport à quoi un mobile est en mouvement est évoquée² à la fin de l'enseignement. D'ailleurs à la lecture des programmes la notion de référentiel n'est présente qu'au lycée en classe de seconde. On commet une double erreur en n'abordant pas cette notion dès le début de l'enseignement de mécanique.

Connaissances et compétences associées	Exemples de situations, d'activités et d'outils pour l'élève
Caractériser un mouvement	
Caractériser le mouvement d'un objet. Utiliser la relation liant vitesse, distance et durée dans le cas d'un mouvement uniforme. » Vitesse : direction, sens et valeur. » Mouvements rectilignes et circulaires. » Mouvements uniformes et mouvements dont la vitesse varie au cours du temps en direction ou en valeur. » Relativité du mouvement dans des cas simples.	L'ensemble des notions de cette partie peut être abordé à partir d'expériences simples réalisables en classe, de la vie courante ou de documents numériques. Utiliser des animations des trajectoires des planètes, qu'on peut considérer dans un premier modèle simplifié comme circulaires et parcourues à vitesse constante. Comprendre la relativité des mouvements dans des cas simples (train qui démarre le long d'un quai) et appréhender la notion d'observateur immobile ou en mouvement.

FIGURE 5.1 – Extrait des programmes de 2015 pour le Cycle 4

La première est d'ignorer le fait que pour remédier à une méconception il faut s'y prendre le plus tôt possible. Les méconceptions favorisent une résistance au changement qui s'accroît au cours du temps. En effet, puisqu'elles ont été dans l'expérience du sujet maintes fois mobilisées avec succès, elles deviennent plus facilement accessibles sur le plan cognitif : c'est le mécanisme

1. Comme par exemple la persistance de l'usage de méconception par des étudiants universitaires qui ont pourtant suivie un enseignement de physique voir chapitre 1

2. Le programme ne parle pas de référentiel mais d'observateur. Ce n'est pas la même chose car le programme envisage le cas d'un observateur mobile (sans dire par rapport à quoi) la confusion est à son paroxysme...

5. Critiques de l'enseignement du mouvement

de renforcement. Cette facilité d'accès se traduit chez le sujet par une crédibilité accrue de sa conception. Dans ce cas, à quoi bon considérer une nouvelle conception puisque celle que l'on possède nous satisfait jusqu'à présent ? Dans certains cas, la conception à acquérir peut même être traitée par le sujet comme une erreur puisque différente de sa conception initiale fortement ancrée. Diagnostiquer et agir tôt sur les méconceptions facilite le changement conceptuel chez l'élève.

II.3. Renforcement involontaire de la méconception par l'enseignement

La seconde erreur est de renforcer involontairement la méconception de l'élève en favorisant sa mobilisation plutôt que son abandon. Ce programme prend comme point de départ la conception initiale de l'élève pour en fin de séquence conclure qu'il s'agit d'une méconception. C'est alors que l'on présente la nouvelle conception à acquérir : la relativité du mouvement. Le début du cours se fait en présentant des contextes variés et permet de catégoriser les mouvements selon leurs trajectoires et leurs accélérations. Ces exemples sont étudiés sans mention d'un référentiel et sur le terrain biaisé d'une conception commune du mouvement. Malheureusement, ce sont autant d'occasions pour renforcer chez l'élève sa conception absolue du mouvement, de la vitesse et de la trajectoire d'un corps. Les premières séances de mécaniques vont donc de manière involontaire enracer un peu plus les méconceptions des élèves.

On sait que la répétition de l'application de la nouvelle conception facilite le changement conceptuel et la correction de biais (voir (Houdé 2014)p84-87 et (Moutier, Angeard, et Houdé 2002)). Lorsque l'élève commence à se saisir de la nouvelle conception, il est donc capital de lui proposer des situations variées et fréquentes dans lesquelles il pourra s'entraîner à inhiber sa conception initiale au profit de la nouvelle. Dans un second temps, il faudra programmer de manière espacée des moments de réactivation de la nouvelle conception afin d'éviter que la méconception reprenne l'ascendant.

Pourtant, en lisant la suite du programme, on n'observe aucune réactivation concernant la nécessité de choisir un référentiel pour penser le mouvement. D'ailleurs, le sujet ³ de sciences du DNB ⁴ qui évalue en fin d'année les élèves de troisième propose d'étudier "Le mouvement d'une snowboardeuse" sans aucune référence à quoi que ce soit qui ressemble à un référentiel. Tout se passe comme si l'institution partageait la même méconception que les élèves qu'elle doit instruire.

III. Stratégie pédagogique

La démarche d'investigation bien qu'étant la posture pédagogique fortement recommandée par les programmes ne me semble pas toujours adaptée à la remédiation d'une méconception.

3. il s'agit du sujet zéro c'est-à-dire un sujet publié en guise d'exemple lors de la réforme des programmes du collège de 2016

4. Diplôme National du Brevet

Ainsi, la construction de la conception scientifique du mouvement nécessite d'inventer une nouvelle stratégie pédagogique qui favorise l'inhibition de la conception erronée. Dans un contexte où l'élève est tellement convaincu que le mouvement est une propriété de l'objet, on ne s'étonnera pas que le passage à une conception plus galiléenne du mouvement soit un pas trop grand pour être franchi sans une guidance forte du professeur. La mission délicate du professeur est de favoriser l'abandon de cette fausse conception sans pourtant la solliciter afin d'éviter son renforcement. Je propose de détailler trois étapes qui permettent à l'enseignant d'accompagner l'élève dans son changement conceptuel. Ces étapes sont largement inspirées de (Potvin et Cyr 2017)

1. Sans évoquer la méconception, le professeur commence par enseigner la nouvelle notion. Cette notion ne doit pas être trop en rupture, mais plutôt susciter une compétition entre la nouvelle notion et celle de l'élève.

Pour cette première phase, l'enseignant prendra soin de ne pas provoquer un conflit cognitif trop radical qui pourrait engendrer le rejet chez l'élève (Fugelsang et Dunbar 2005). Il ne s'agit pas de susciter une remise en cause profonde en générant de l'insatisfaction, mais plutôt de stimuler une vigilance à comprendre.

2. On informe les élèves que leur conception initiale est insuffisante en mettant en évidence ses limites. On leur apprend à reconnaître les contextes dans lesquels la tentation de l'usage de cette méconception est forte et conduit à l'erreur.

Cette étape est particulièrement guidée. Les exemples choisis sont des archétypes de situations stimulant la méconception. L'élève va s'entraîner à résister à la tentation d'un raisonnement immédiat et faux. L'enseignant ne cherche pas à expliquer ou réconcilier les deux conceptions. Il fait simplement remarquer que dans de telles circonstances on est tenté de raisonner à partir d'une croyance, mais que cela conduit systématiquement à des erreurs.

3. Il faut maintenant rendre durable la nouvelle conception. C'est par la répétition dans des contextes variés que l'usage de la nouvelle conception s'automatise peu à peu. L'objectif est de rendre de plus en plus naturel et instinctif l'usage de la stratégie récemment apprise. La conséquence à terme sera l'abandon de la méconception.

Cet entraînement n'est pas nécessairement disjoint du cours. Au contraire, il peut s'y intégrer sous la forme d'exemple et de contre exemples. L'enseignant n'hésitera pas à proposer un peu plus tard d'autres exercices afin de contrôler la prévalence de la notion acquise sur la notion initiale.

IV. Bilan

Le programme de physique-chimie des classes de collège s'inscrit dans la continuité des recommandations du rapport de la Commission européenne (Rocard 2007) qui promeut la pédagogie par investigation⁵ laquelle prétend rendre capable les élèves de construire leurs

5. aussi appelée Inquiry Based Learning dans la littérature anglo-saxonne

5. Critiques de l'enseignement du mouvement

savoirs. Cette pédagogie place l'élève dans la posture d'un scientifique en l'invitant à formuler des hypothèses, expérimenter, valider et critiquer. Cette approche convient-elle à l'ensemble des situations rencontrées dans l'enseignement des sciences physiques ?

Il semble que non. En laissant l'initiative à l'élève, il lui arrive de mobiliser des méconceptions qu'il ne peut réformer seul. Le dépassement d'une conception initiale erronée ne peut s'amorcer que lorsque la conception à apprendre devient accessible et entre en compétition avec la conception à réformer. C'est pourquoi l'enseignant doit de manière précoce : repérer les méconceptions chez ses élèves et trouver comment rendre accessible la conception visée par l'apprentissage. Sur le plan cognitif, la finalité n'est pas le remplacement, mais plutôt l'obtention d'une prévalence de la nouvelle conception par rapport à l'ancienne. Cette modification de statut passe par le renforcement systématique de la nouvelle conception et par la reconnaissance des contextes qui stimulent la méconception. Ces situations sont signalées explicitement par l'enseignant aux élèves ainsi que la nécessité d'inhiber la conception initiale afin d'éviter l'erreur. On constate que dans ces phases d'apprentissage la guidance de l'enseignant est très forte et contraste avec la plupart des activités de démarche d'investigation.

Les résultats des recherches en sciences cognitives mettent en évidence certaines contraintes liées aux mécanismes d'apprentissage (mémorisation, attention, inhibition). Ces contraintes viennent éclairer le questionnement de l'efficacité des pédagogies existantes. Par exemple, Kirschner s'appuie sur les mécanismes liés à la mémorisation pour critiquer sévèrement les pédagogies constructivistes (Kirschner, Sweller, et Clark 2006). Les récentes découvertes au sujet du développement cognitif sont aussi un moteur d'innovation pour les enseignants. Par l'identification précise des notions qui posent problème et la prise en compte des mécanismes cognitifs mobilisés par leurs apprentissages, l'enseignant peut inventer de nouvelles stratégies pédagogiques. Ce type d'initiative s'inscrit dans une approche scientifique à l'éducation aux sciences et semble prometteuse. Il reste à évaluer précisément l'efficacité de ces pratiques dans les classes.

Conclusion

La science produit des connaissances qu'elle justifie. Pourtant elle est incapable de livrer la méthode permettant son apprentissage. Dans son dernier ouvrage (Houdé 2018) l'ancien instituteur et désormais professeur de psychologie Olivier Houdé déclare :

On éduque encore trop souvent aujourd'hui "en aveugle" des millions de cerveaux, c'est-à-dire en manipulant les entrées (rythmes scolaires, nombre d'élèves par classe, etc.) et en observant les sorties (résultats aux évaluations : contrôles, PISA), sans bien connaître les mécanismes internes du cerveau qui apprend.

En essayant de décomposer les raisonnements à la lumière des sciences cognitives, nous avons présenté dans ce mémoire des réponses pédagogiques concernant l'apprentissage de la mécanique à l'école.

Grâce notamment à l'imagerie cérébrale, il devient possible d'observer la modification du cerveau sous l'effet de telle pédagogie ou méthode. Cette approche donne naissance à une recherche interdisciplinaire dans laquelle les laboratoires de psychologie cognitive font appel aux professionnels de l'éducation. C'est ce que pratique le laboratoire français LaPsyDÉ dirigé par Olivier Houdé. L'éducation nationale après une période de résistance soutient des projets visant à expérimenter en classe l'intégration de certains principes issus des sciences cognitives. Par exemple, le projet Cogni'class piloté par Jean-Luc Berthier a pris une ampleur nationale. Il a pour vocation d'expérimenter dans les classes et non plus seulement au laboratoire certains principes d'apprentissage⁶ venant des sciences cognitives.

Quelles informations nous transmettent les sciences cognitives susceptibles de contribuer à une amélioration de l'enseignement de la physique en général et de la mécanique en particulier ?

Lorsque nous avons décrit les conceptions initiales erronées des élèves, nous avons constaté un manque de systématичité et de cohérence dans les explications produites. Ce manque de systématичité peut être relié aux défauts des catégories observées chez les novices : manque de généralité et dépendance du contexte. Il semble pertinent de réfléchir à une pédagogie qui

6. Par exemple, faciliter la mémorisation à long terme d'une leçon en espaçant progressivement les instants de révision

5. Critiques de l'enseignement du mouvement

facilite chez l'élève l'élaboration de catégories plus générales ou tout au moins une prise de conscience de celles-ci.

Les sciences de l'éducation et les sciences cognitives s'accordent sur le fait qu'un apprentissage actif est préférable. Il existe une grande variété de pédagogies actives et de nombreux débats sur l'autonomie de l'élève dans la construction de ses connaissances. À la fin de ce mémoire, ma position est qu'il ne s'agit pas de laisser l'enfant découvrir lui-même le contenu à apprendre, mais de lui proposer un environnement pédagogique structuré qui engage son attention, sa volonté et sa curiosité. De plus, pour un environnement donné, ce qu'on va demander à l'élève conditionne ce qu'il va apprendre. À cette occasion, nous avons vu (chap 3) que solliciter une explication favorise l'accès à un savoir plus général et abstrait tandis que la description facilite la mémorisation. Ainsi, les neurosciences fournissent aux enseignants des indications qui lui permettent d'adapter ses consignes en fonction de ses propres objectifs pédagogiques. La neuroéducation n'a pas vocation à prescrire une manière d'enseigner, mais elle peut légitimement donner un conseil qui éclaire les choix de l'enseignant dans sa pratique.

L'étude de l'inhibition nous a montré qu'il existe deux formes complémentaires d'apprentissage. Le premier est largement utilisé à l'école, il s'agit de l'automatisation par la pratique. Le second n'est pas pratiqué en classe et consiste en une désautomatisation par l'inhibition. Autrement dit, il s'agit d'apprendre à inhiber un raisonnement spontané pour activer la stratégie qui mène à la réponse scientifiquement correcte. Ce mécanisme nécessite la préparation et l'expérimentation d'une nouvelle pédagogie. De ce point de vue, les neurosciences sont une source d'innovation pédagogique. D'un autre côté, l'inhibition remet en question l'évaluation de l'élève. En effet, lorsqu'un élève se trompe cela ne signifie pas nécessairement qu'il ne connaît pas la bonne stratégie. C'est peut-être simplement qu'il n'a pas réussi à inhiber son raisonnement spontané. Dans ce cas, il est préférable de renforcer sa capacité d'inhiber plutôt que d'enseigner à nouveau la bonne stratégie que l'élève connaît déjà.

Bien entendu, il faut se montrer vigilant et ferme contre toute forme de réductionnisme du cerveau humain par une science qui refuserait l'aspect social et culturel du cerveau. Néanmoins, il semble que les sciences cognitives ont atteint un degré de maturité qui leur permet d'enrichir les pratiques pédagogiques. Espérons qu'une approche scientifique de l'éducation bénéficiera à la construction d'une école qui fait le pari de la réussite de tous en tenant compte des différences de chacun.

Sitographie

- Le concept du nombre par Stanislas Dehaene : [https://www.college-de-france.fr/
site/stanislas-dehaene/course-2008-02-12-09h30.htm](https://www.college-de-france.fr/site/stanislas-dehaene/course-2008-02-12-09h30.htm)
- Expériences filmées de R. Baillargeon : <https://www.youtube.com/watch?v=0eqRLY23otk>

Bibliographie

- Balibar, Françoise. 2007. *Galilée, Newton lus par Einstein*. Presses Universitaires de France. <https://doi.org/10.3917/puf.balib.2007.01>.
- Botvinick, Matthew M. 2007. « Conflict monitoring and decision making : reconciling two perspectives on anterior cingulate function. » *Cognitive, affective & behavioral neuroscience* 7 (4) :356-66. <http://eutils.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/eutils/elink.fcgi?dbfrom=pubmed&id=18189009&retmode=ref&cmd=prlinks>.
- Chi, Michelene T H, et Kurt A VanLehn. 1991. « The Content of Physics Self-Explanations ». *Journal of the Learning Sciences* 1 (1) :69-105. https://doi.org/10.1207/s15327809jls0101_4.
- Chi, Michelene T H, Paul J Feltovich, et Robert Glaser. 1981. « Categorization and Representation of Physics Problems by Experts and Novices ». *Cognitive science* 5 (2). Lawrence Erlbaum Associates, Inc. :121-52. https://doi.org/10.1207/s15516709cog0502_2.
- Cooke, N J, et S D Breedin. 1994. « Constructing naive theories of motion on the fly. » *Memory & cognition* 22 (4) :474-93. <http://eutils.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/eutils/elink.fcgi?dbfrom=pubmed&id=7934951&retmode=ref&cmd=prlinks>.
- Dehaene, Stanilas. 2008. *Psychologie cognitive expérimentale*. L'annuaire du Collège de France. Résumé des cours et travaux. .
- Dilber, Refik, Ibrahim Karaman, et Bahattin Duzgun. 2009. « High school students' understanding of projectile motion concepts ». *Educational Research and Evaluation* 15 (3) :203-22. <https://doi.org/10.1080/13803610902899101>.
- diSessa, Andrea A. 1988. « Knowledge in Pieces ». In *Constructivism in the Computer Age*, 48-70.
- Duhem, Pierre. 2016. *La théorie physique. Son objet, sa structure*. ENS Éditions. http://books.google.fr/books?id=jGcZDQAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=intitle:La+theorie+physique+son+objet+sa+structure&hl=&cd=1&source=gbs_api.
- Dunbar, Kevin N, Jonathan A Fugelsang, et Courtney Stein. 2007. « Do Naïve Theories Ever

5. Critiques de l'enseignement du mouvement

Go Away ? Using Brain and Behavior to Understand Changes in Concepts ». In *Thinking with data*, édité par & P. Shah (Eds.) M. Lovett, 193-205.

Eckstein, Shulamith G, et Michal Shemesh. 1993. « Development of Children's Ideas on Motion : Impetus, the Straight-down Belief and the Law of Support ». *School Science and Mathematics* 93 (6). Blackwell Publishing Ltd :299-305. <https://doi.org/10.1111/j.1949-8594.1993.tb12250.x>.

Einstein, Albert. 1972. *La relativité*. La théorie de la relativité restreinte et générale. La relativité et le problème de l'espace. Payot. http://books.google.fr/books?id=krURMQAACAAJ&dq=intitle:La+relativite+Albert+Einstein&hl=&cd=4&source=gbs_api

Faucher, Luc, Ron Mallon, Daniel Nazer, Shaun Nichols, Aaron Ruby, Stephen Stich, et Jonathan Weinberg. 2009. « The baby in the lab-coat : why child development is not an adequate model for understanding the development of science ». Cambridge : Cambridge University Press ; Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511613517.019>.

Fine, Arthur. 1996. « Science as Child's Play : Tales from the Crib ». *Philosophy of Science* 63 (4) :534-37. <https://doi.org/10.1086/289972>.

Foisy, Lorie Marlène Brault, Patrice Potvin, Martin Riopel, et Steve Masson. 2015. « Is inhibition involved in overcoming a common physics misconception in mechanics ? » *Trends in Neuroscience and Education* 4 (1-2). Elsevier :1-11. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2015.03.001>.

Fugelsang, Jonathan A, et Kevin N Dunbar. 2005. « Brain-based mechanisms underlying complex causal thinking ». *Neuropsychologia* 43 (8) :1204-13. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2004.10.012>.

Galilei, Galileo. 2000. *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*. Seuil. .

Giere, Ronald N. 1996. « The Scientist as Adult ». *Philosophy of Science* 63 (4) :538-41. <https://doi.org/10.1086/289973>.

Goodman, Baker, Bonawtiz, A Gopnik, Gop, Mansinghka, Henry M Wellman, Schulz, et Tenenbaum. 2006. « Intuitive Theories of Mind : A Rational Approach to False Belief », mai, 1-6.

Gopnik, A, D M Sobel, L E Schulz, et C Glymour. 2001. « Causal learning mechanisms in very young children : two-, three-, and four-year-olds infer causal relations from patterns of variation and covariation. » *Developmental psychology* 37 (5) :620-29. <http://eutils.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/eutils/elink.fcgi?dbfrom=pubmed&id=11552758&retmode=ref&cmd=prlinks>.

Gopnik, Alison. 1996. « The Scientist as Child ». *Philosophy of Science* 63 (4) :485-514. <https://doi.org/10.1086/289970>.

———. 2010. « How Babies Think ». *Scientific American* 303 (1) :76-81. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0710-76>.

Halloun, Ibrahim Abou, et David Hestenes. 1985. « Common sense concepts about motion ».

- American Journal of Physics* 53 (11) :1056-65. <https://doi.org/10.1119/1.14031>.
- . 1998. « The initial knowledge state of college physics students ». *American Journal of Physics* 53 (11). American Association of Physics Teachers :1043-55. <https://doi.org/10.1119/1.14030>.
- Houdé, O, L Zago, E Mellet, S Moutier, A Pineau, B Mazoyer, et N Tzourio-Mazoyer. 2000. « Shifting from the perceptual brain to the logical brain : the neural impact of cognitive inhibition training. » *Journal of cognitive neuroscience* 12 (5) :721-28. <http://eutils.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/eutils/elink.fcgi?dbfrom=pubmed&id=11054915&retmode=ref&cmd=prlinks>.
- Houdé, Olivier. 2014. *Le raisonnement*. Que sais-je ? n 1671. Presses Universitaires de France. http://books.google.fr/books?id=bgcLCwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=intitle:Le+raisonnement+inauthor:Olivier+Houde&hl=&cd=1&source=gbs_api.
- . 2017. « Le raisonnement », septembre. Presses Universitaires de France, 1-143.
- . 2018. *L'école du cerveau*. De Montessori, Freinet et Piaget aux sciences cognitives. Mardaga. http://books.google.fr/books?id=Ii1WDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=inauthor:olivier+Houde&hl=&cd=12&source=gbs_api.
- Houdé, Olivier, Arlette Pineau, Gaëlle Leroux, Nicolas Poirel, Guy Perchey, Céline Lanooë, Amélie Lubin, et al. 2011. « Functional magnetic resonance imaging study of Piaget's conservation-of-number task in preschool and school-age children : a neo-Piagetian approach. » *Journal of Experimental Child Psychology* 110 (3) :332-46. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2011.04.008>.
- Howe, Christine, Joana Taylor Tavares, et Amy Devine. 2012. « Everyday conceptions of object fall : Explicit and tacit understanding during middle childhood ». *Journal of Experimental Child Psychology* 111 (3). Elsevier Inc. :351-66. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2011.09.003>.
- Kahneman, Daniel. 2018. « Thinking, Fast and Slow », février. Farrar, Straus ; Giroux, 1-468. <https://libgen.pw/item/adv/5a8ee1183a04462c1e419b50>.
- Kaiser, Mary Kister, Dennis R Proffitt, et Michael McCloskey. 1985. « The development of beliefs about falling objects ». *Perception & Psychophysics* 38 (6) :533-39. <https://doi.org/10.3758/BF03207062>.
- Kirschner, Paul A, John Sweller, et Richard E Clark. 2006. « Why Minimal Guidance During Instruction Does Not Work : An Analysis of the Failure of Constructivist, Discovery, Problem-Based, Experiential, and Inquiry-Based Teaching ». *Educational Psychologist* 41 (2) :75-86. https://doi.org/10.1207/s15326985ep4102_1.
- Koyré, Alexandre. 1939. *Études galiléennes*. Hermann, 1939, i.e. 1940. .
- Kozhevnikov, M, et M Hegarty. 2001. « Impetus beliefs as default heuristics : dissociation between explicit and implicit knowledge about motion. » *Psychonomic Bulletin & Review* 8 (3) :439-53. <http://eutils.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/eutils/elink.fcgi?dbfrom=pubmed&id=11700895&retmode=ref&cmd=prlinks>.
- Kozhevnikov, Maria, et Mary Hegarty. 2001. « Impetus beliefs as default heuristics : Dissociation between explicit and implicit knowledge about motion ». *Psychonomic Bulletin &*

5. Critiques de l'enseignement du mouvement

Review 8 (3). Springer-Verlag :439-53. <https://doi.org/10.3758/BF03196179>.

Krist, Horst. 2000. « Development of naive beliefs about moving objects The straight-down belief in action ». *Cognitive Development* 15 (3) :281-308. [https://doi.org/10.1016/S0885-2014\(00\)00029-0](https://doi.org/10.1016/S0885-2014(00)00029-0).

Lafortune, Stéphanie, Karine Véronneau, et Steve Masson. 2012. « Les mécanismes cérébraux permettant de réaliser un changement conceptuel sont-ils les mêmes dans tous les domaines scientifiques ? » *Spectre* 42 (novembre) :1-3. <https://static1.squarespace.com/static/510c0d84e4b0cdc785fa72c5/t/514327d2e4b082ba5727c9a0/1363355602544/Lafortune2012a.pdf>.

Legare, Cristine H. 2014a. « The Contributions of Explanation and Exploration to Children's Scientific Reasoning ». *Child Development Perspectives* 8 (2) :101-6. <https://doi.org/10.1111/cdep.12070>.

———. 2014b. « The development of children's causal explanations ». In *The Routledge International Handbook of Young Childrens Thinking and Understanding*, 508. Routledge. http://books.google.fr/books?id=qzxWBQAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=The+Routledge+International+Handbook+of+Young+Childrens+Thinking+and+Understanding&hl=&cd=1&source=gbs_api.

Legare, Cristine H, et Tania Lombrozo. 2014. « Selective effects of explanation on learning during early childhood ». *Journal of Experimental Child Psychology* 126 (C). Elsevier Inc. :198-212. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2014.03.001>.

Legare, Cristine H, Susan A Gelman, et Henry M Wellman. 2010. « Inconsistency With Prior Knowledge Triggers Children's Causal Explanatory Reasoning ». *Child Development* 81 (3). Wiley/Blackwell (10.1111) :929-44. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2010.01443.x>.

Lombrozo, Tania. 2016. « Explanatory Preferences Shape Learning and Inference ». *Trends in Cognitive Sciences* 20 (10). Elsevier Ltd :748-59. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2016.08.001>.

Mason, Andrew, et Chandrakha Singh. 2011. « Assessing expertise in introductory physics using categorization task ». *Physical Review Special Topics - Physics Education Research* 7 (2). American Physical Society :271-17. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.7.020110>.

———. 2016. « Using categorization of problems as an instructional tool to help introductory students learn physics ». *Physics Education*, février. IOP Publishing, 1-5. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/51/2/025009>.

Masson, Steve, Patrice Potvin, Martin Riopel, et Lorie Marlène Brault Foisy. 2014. « Differences in Brain Activation Between Novices and Experts in Science During a Task Involving a Common Misconception in Electricity ». *Mind, Brain, and Education* 8 (1). Wiley/Blackwell (10.1111) :44-55. <https://doi.org/10.1111/mbe.12043>.

McCloskey, Michael, Allyson Washburn, et Linda Felch. 1983. « Intuitive physics : The straight-down belief and its origin. » *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition* 9 (4) :636-49. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.9.4.636>.

Moutier, Sylvain, Nathalie Angeard, et Olivier Houdé. 2002. « Deductive reasoning and

- matching-bias inhibition training : Evidence from a debiasing paradigm ». *Thinking & Reasoning* 8 (3) :205-24. <https://doi.org/10.1080/13546780244000033>.
- « Naïve Physics the wrong theory ? » 2013, juillet, 1-6.
- Nersessian, Nancy J. 1995. « Should Physicists Preach What They Practice ? » In *Thinking Physics for Teaching*, 77-96. Boston, MA : Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1921-8_6.
- Potvin, Patrice, et Guillaume Cyr. 2017. « Toward a durable prevalence of scientific conceptions : Tracking the effects of two interfering misconceptions about buoyancy from preschoolers to science teachers ». *Journal of Research in Science Teaching* 34 (11) :57-22. <https://doi.org/10.1002/tea.21396>.
- Potvin, Patrice, Steve Masson, Stéphanie Lafourture, et Guillaume Cyr. 2014. « Persistence of the intuitive conception that heavier objets sink more : a reaction time study with different levels of interference » 13 (1). Springer Netherlands :21-43. <https://doi.org/10.1007/s10763-014-9520-6>.
- Rocard, Michel. 2007. « L'enseignement Scientifique Aujourd'hui : Une Pédagogie Renouvelée Pour L'avenir De L'europe », décembre, 1-28.
- Saltiel, et Malgrange. 1979. « Les raisonnements naturels en cinématique élémentaire ». *Bulletin de l'union des physiciens*, mai, 1325-55. http://bupdoc.udppc.asso.fr/consultation/article-bup.php?ID_fiche=12226.
- Shtulman, Andrew, et Joshua Valcarcel. 2012. « Scientific knowledge suppresses but does not supplant earlier intuitions ». *Cognition* 124 (2). Elsevier B.V. :209-15. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2012.04.005>.
- Stroop, J R. 1935. « Studies of interference in serial verbal reactions. » *Journal of Experimental Psychology* 18 (6) :643-62. <https://doi.org/10.1037/h0054651>.
- Van Heuvelen, A. 1991. « Learning to think like a physicist : A review of research-based instructional strategies ». *American Journal of Physics*. <http://nguyendonghai.vatly.net/files/2012/01/Learning-To-Think-Like-A-Physicist-Van-Heuvelen.pdf>.
- Viennot, Laurence. 1978. « Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire ». *Revue française de pédagogie* 45 (1). Persée - Portail des revues scientifiques en SHS :16-24. <https://doi.org/10.3406/rfp.1978.1688>.
- . 1979. *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*. Editions Hermann. .
- . 2007. *Reasoning in Physics*. The Part of Common Sense. Springer Science & Business Media. http://books.google.fr/books?id=R5MRBwAAQBAJ&pg=PT11&dq=intitle:Reasoning+in+Physics&hl=&cd=1&source=gbs_api.
- Walker, Caren M, Tania Lombrozo, Joseph J Williams, Anna N Rafferty, et Alison Gopnik. 2016. « Explaining Constrains Causal Learning in Childhood ». *Child Development* 88 (1). Wiley/Blackwell (10.1111) :229-46. <https://doi.org/10.1111/cdev.12590>.
- Williams, Joseph J, et Tania Lombrozo. 2010. « The Role of Explanation in Discovery and Generalization : Evidence From Category Learning ». *Cognitive science* 34 (5). Wiley/Blackwell

5. Critiques de l'enseignement du mouvement

(10.1111) :776-806. <https://doi.org/10.1111/j.1551-6709.2010.01113.x>.

_____. 2013. « Explanation and prior knowledge interact to guide learning ». *Cognitive Psychology* 66 (1). Elsevier Inc. :55-84. <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2012.09.002>.