
ÉQUILIBRE OU ÉQUILIBRES ? LA BALANCE EN QUESTION

Michaël CANU
LDAR-Université Paris Diderot

Cécile de Hosson
LDAR-Université Paris Diderot

Mauricio Duque
GIAP-Université de Los Andes

Introduction

Les programmes du cycle 3 contiennent un volet « objets techniques » dans lequel il est demandé d'aborder les « leviers, balances, équilibres ». En CE2, CM1 notamment, les progressions pédagogiques du ministère préconisent de traiter les points suivants présentés dans le tableau 1.

CE2	CM1
<ul style="list-style-type: none">• Réaliser des équilibres (mobiles, balance romaine, Roberval...),• Mesurer des masses à l'aide de différents types de balances.	<ul style="list-style-type: none">• Analyser et comparer le fonctionnement de différents objets techniques de la vie quotidienne,• Identifier le levier et ses principes (rapport force / distance à l'axe),• Repérer des objets qui utilisent le principe du levier.
Vocabulaire : balance, masse, équilibre.	Vocabulaire : axe de rotation, pivot, force, distance, levier.

Tableau 1 : progressions pédagogiques pour le cycle 3 : leviers, balances, équilibres.

Dans les « Grilles de référence pour l'évaluation et la validation des compétences du socle commun au palier 2¹ » de 2011 relatif au Livret Personnel de Compétences, nous trouvons une rubrique « Maîtriser des connaissances dans divers domaines scientifiques et les mobiliser dans des contextes scientifiques différents et dans des activités de la vie courante » pour laquelle « l'indication pour l'évaluation » est formulées sous cette forme : « *Il [l'élève] est capable de prévoir ou d'interpréter quelques situations d'équilibre, en particulier lorsque les forces qui s'appliquent ne sont pas à égale distance de l'axe ou dans le cadre de l'utilisation de balances à plateaux.* ».

Dans le « socle commun de connaissances, de compétences et de culture » (2005, 2013), les connaissances relatives au domaine « leviers, balances, équilibres » apparaissent à travers l'exercice de capacités comme celles de « percevoir le lien entre sciences et techniques » et de « comprendre qu'un effet peut avoir plusieurs causes agissant simultanément, percevoir qu'il peut exister des causes non apparentes ou inconnues ». En effet, l'étude des objets techniques comme

¹ Fin du cycle 3

les balances a vocation à servir de support² à la « loi des leviers » (lien entre science et technique) et à mettre en évidence l'action des deux poids dans l'équilibre (des causes non apparentes qui agissent simultanément).

On peut cependant se demander dans quelle mesure l'étude des objets techniques proposés (leviers, balances) permet réellement le développement de ces capacités.

Après avoir fait un point sur la notion d'équilibre et son lien avec les objets (systèmes mécaniques) proposés aux élèves, nous analyserons, d'une part, dans quelle mesure ils peuvent ou non répondre au développement des connaissances et des capacités visées et, étudierons d'autre part quelles conceptions ils sont susceptibles de véhiculer chez les élèves.

Clarification des savoirs en jeu : systèmes et équilibre

D'un point de vue très général, par exemple celui de la Théorie Générale des systèmes (Von Bertalanffy, 1975), on appelle système un objet physique, une population, une solution chimique, etc., auquel on associe un ensemble de grandeurs (des variables et des paramètres) liées entre elles et que l'on peut traiter comme une seule entité. Parmi les variables, on peut en trouver certaines qui permettent d'agir sur le système et que l'on appelle des entrées. En agissant sur celles-ci, on peut modifier l'état du système et plus particulièrement certaines autres grandeurs que l'on peut en général mesurer et que l'on appelle des sorties. On peut par exemple s'intéresser à une population de lapins sur un territoire donné (le système) et mesurer le nombre des lapins (la sortie) sur ce territoire dont on peut faire varier la surface (l'entrée) au cours du temps.

Si l'on souhaite étudier le comportement de ce système de manière formelle, il est habituel d'en chercher une représentation mathématique (bien qu'il existe d'autres méthodes, par exemple en médecine). Cette représentation aboutit dans de nombreux cas à une ou plusieurs équations³ qui symbolisent le fait que les taux de variation des grandeurs qui nous intéressent, au cours du temps, dépendent de ces mêmes grandeurs, du temps et des entrées⁴.

On peut alors considérer un état particulier du système, s'il existe, dans lequel il n'y aurait pas de variation des variables par rapport au temps, pourvu que dans le même temps, il n'y ait pas de variation des entrées. Placé dans cet état, le système ne pourrait plus évoluer seul, sans une variation de l'entrée (s'il y en a une) ou une modification extérieure directe de l'une des variables (que l'on appelle une perturbation) : une telle situation est nommée point fixe, état stationnaire, ou encore état d'équilibre, pour le système.

Les relations précitées entre les grandeurs du système s'obtiennent à partir des lois spécifiques régissant chaque discipline : les lois de Newton en mécanique, les lois de la thermodynamique, etc. L'état stationnaire du système, suivant qu'il y a une entrée ou non, peut prendre alors un sens particulier : équilibre statique (repos) ou dynamique (mouvement rectiligne et uniforme) en mécanique par exemple. Dans tous les cas, cependant, l'interprétation que l'on peut en faire revient à définir un état stationnaire, c'est-à-dire un état indépendant du temps, pour la ou les variables que l'on considère pertinentes pour notre système.

Prenons l'exemple de la balance de type « égyptienne » (c'est-à-dire à bras égaux et plateaux suspendus) comme celle que l'on peut voir sur la figure 1.

² Des situations de découverte ou de réinvestissement.

³ On les appelle alors *équations différentielles*.

⁴ Dans notre exemple de population de lapins, on aboutit à l'équation de croissance dite « logistique » (P.F. Verhulst, 1838) dans laquelle le taux de variation de la population dépend du taux d'accroissement maximal de la population et de la *capacité de charge* du territoire.



Figure 1: balance égyptienne
(extrait de la pesée du cœur, papyrus d'Ani, British Museum)

Une telle balance peut être modélisée par une simple barre homogène en rotation autour d'un axe fixé à un support comme sur la figure 2 : la modélisation va aboutir à une équation (c'est-à-dire une relation mathématique entre des variables) faisant intervenir la position angulaire du bras (par exemple par rapport à la verticale), la masse totale du bras et la distance entre le centre de masse du bras et l'axe de rotation. Plus précisément, un équilibre est obtenu lorsque l'accélération angulaire du bras et sa vitesse angulaire sont nulles (bras au repos).

Ceci signifie que selon la géométrie du bras et les paramètres précisés ci-dessus, on peut obtenir n'importe quelle position angulaire du bras comme position d'équilibre de cette balance. Autrement dit, le bras peut être incliné ou en position horizontale et se trouver « à l'équilibre ». Ceci est illustré en figure 2 : nous pouvons y voir une balance « prototypique » en équilibre horizontal ou incliné lorsque deux poids identiques ou différents s'appliquent à des distances égales de l'axe de rotation (le point rouge) : pour cela, il faut et il suffit que ce dernier soit situé sur la même verticale que le centre de masse du système (le point jaune). Ces deux points peuvent donc être confondus ou non. Le premier cas se présente par exemple quand on applique deux poids identiques à égale distance du centre de rotation et que ce dernier est sur la droite passant par les points d'application des poids de chaque côté (figures en haut à gauche et à droite), le centre de rotation et le centre de masse sont donc confondus ce qui reste relativement peu courant en pratique. Dans les autres cas, beaucoup plus fréquents, on peut obtenir un équilibre horizontal lorsque deux poids identiques sont appliqués à égale distance de l'axe de rotation (non figuré ici) ou incliné lorsque deux poids différents sont appliqués à égales distances de l'axe de rotation, lorsque le centre de masse est situé en dessous (figure du bas) ou au dessus (non figuré) de celui-ci.

D'un point de vue pratique, on peut considérer que tous objets au repos (immobiles) dans le référentiel terrestre (i.e. le sol) sont en équilibre : tables, chaises, personne debout sur ses deux pieds, etc. L'étude de l'équilibre dans le cas général nécessite d'effectuer un bilan⁵ des efforts extérieurs, ce qui dans le cas d'un point matériel se traduit par les seules forces agissant sur lui,

⁵ Un bilan est une somme de vecteurs. La notion de vecteur regroupe la valeur, le sens et la direction, par exemple d'une force, et est symbolisée par une flèche comme sur les figures proposée.

mais qui implique dans le cas d'un solide, par exemple en rotation comme c'est le cas pour le fléau d'une balance, l'utilisation d'un bilan des moments⁶ de ces forces.

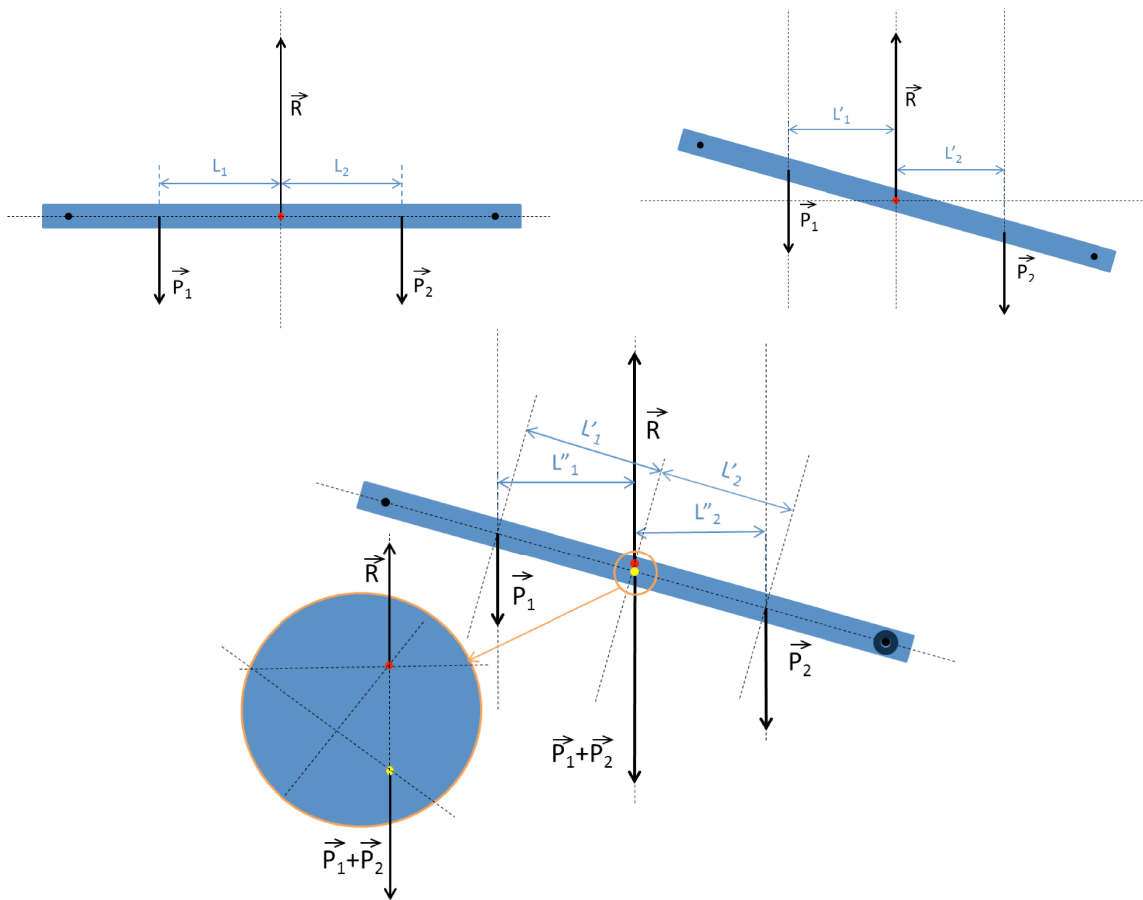


Figure 2 : Exemples de balances « prototypiques » à l'équilibre horizontal ou non : avec des valeurs de poids identiques de chaque côté en haut, et une valeur plus grande à droite (P_2), en bas.

En effet, dans le cas présenté en figure 2, par exemple celui en haut à gauche, si l'on ajoute une masse d'un côté du fléau, alors l'une des deux forces \vec{P}_1 ou \vec{P}_2 est plus grande que l'autre, du côté où il y a le plus de masse. La balance n'est alors plus en équilibre, cependant, la somme vectorielle des poids $\vec{P}_1 + \vec{P}_2$ est toujours égale à la résistance du support \vec{R} au niveau du pivot, ce qui implique un bilan des forces sur le système égal au vecteur nul. C'est bien la différence des moments de ces forces ($P_1 \times L_1 - P_2 \times L_2$) qui est non nulle et qui permet de conclure que la balance n'est pas en équilibre : ce moment va en effet provoquer la rotation du fléau.

L'équilibre (considéré sous l'angle physiologique) est sollicité dans de nombreuses activités sportives proposées aux élèves de collège mais aussi dans les expériences d'utilisation de transports ordinaires (voitures, bus, train, etc.) ; ces situations procurent une base expérientielle universelle de ce concept. La sensation d'équilibre dont il est question ici, fait appel au système auriculo-vestibulaire (situé dans l'oreille interne) couplée au système proprioceptif (le sens de la position des articulations) et au système visuel (Vibert et *al.*, 2011, p. 136). Les capteurs d'accélération dont est doté le corps humain fonctionnent sur un principe similaire à certains

⁶ Un moment est une notion utilisée dans les cas de rotation et qui permet de tenir compte de l'effet d'une force sur le mouvement de rotation d'un système selon la distance du point d'application de la force au centre de rotation.

capteurs que l'on peut trouver dans l'industrie par exemple ; ils mesurent l'accélération de la tête à l'aide de la mesure du déplacement d'éléments mobiles libres dans un milieu élastique. Ce système possède un seuil de détection non nul⁷ qui suppose un couplage avec la vision pour évaluer les déplacements en cas de faible accélération. Ceci explique en partie pourquoi lorsque l'on est assis dans un train qui commence à démarrer à côté d'un autre à l'arrêt, on a momentanément l'impression que c'est l'autre train qui se déplace et non celui dans lequel on se trouve. Nos accéléromètres ne sont pas sollicités suffisamment pour parvenir à mesurer notre propre accélération et permettre à notre cerveau d'interpréter correctement l'information visuelle de déplacement transmise par les yeux (voir le paragraphe 2 sur les conceptions des étudiants plus loin pour un exemple d'implication).

La stabilité

Dès le XVI^e siècle, certains scientifiques comme Stevin, Benedetti ou Del Monte, ont cherché à savoir ce qu'il advenait lorsque l'on déplaçait l'équilibre d'un système simple comme la balance – le système qui a servi à construire la définition de l'équilibre dans l'antiquité grecque dès Aristote – et plus particulièrement, à répondre à la question en apparence simple : « *À quelles conditions une balance revient-elle d'elle-même à sa position d'équilibre après un léger déplacement ?* ». À cette époque, il faut préciser que l'équilibre était entendu comme « position horizontale du fléau », seule position digne d'intérêt pour son utilisation commerciale (de pesée). Cette question est étroitement liée au concept actuel de stabilité d'un équilibre qui décrit le comportement d'un système en état d'équilibre lorsqu'il subit une modification (externe) d'une valeur finie et pendant un temps fini.

Bien que le concept de stabilité émerge assez naturellement et rapidement lors de l'étude de systèmes tels que la balance, on peut noter qu'il n'en est plus question dans les programmes scolaires pré-universitaires depuis les années 60 (à l'époque, on évoquait de manière très pratique la stabilité mécanique en classe de seconde). Ce n'est qu'à partir des premiers cycles d'études supérieures (classes préparatoires aux grandes écoles et universités) que la stabilité est abordée de manière formelle, algébrique, à partir des équations différentielles qui modélisent l'évolution du système considéré. En termes non mathématiques, un équilibre est dit *stable* lorsque le système, dans un état stationnaire comme celui de l'équilibre tel que nous l'avons vu au paragraphe précédent, revient de lui-même dans ce même état après un léger déplacement de celui-ci (i.e. lorsque la cause du déplacement a disparu). Il est dit *instable* lorsque le système s'éloigne⁸ de cet état après le déplacement et *indifférent* s'il reste dans la position dans laquelle il s'est trouvé déplacé (le lecteur trouvera un exemple particulièrement parlant à la page 15 de la ressource référencée « R5 » du paragraphe « Quelques exemples de séquences de classe »).

Pour ce qui est de la balance, on peut identifier les trois types d'équilibres en fonction des positions respectives de l'axe de rotation et des points d'application des poids : indifférent si l'axe de rotation est sur la même ligne que les deux points d'application des poids, instable s'il est au-dessous et stable s'il est au-dessus (ce qui conduit aux cas indifférents et stables de la figure 2). Suivant la géométrie de la balance, on peut alors considérer deux paramètres « visibles » sur lesquels on peut agir en même temps et qui vont conduire à des comportements différents : la position des masses par rapport au fléau et la position de l'axe de rotation du fléau par rapport à l'épaisseur du fléau. Il faut garder à l'esprit que ces deux paramètres « visibles » ne

⁷ Sans doute dû aux effets de seuil de décharge des potentiels d'action neuronaux.

⁸ Mathématiquement parlant, le système s'éloigne « indéfiniment » de sa position, ce qui physiquement est généralement impossible. Dans la plupart des cas, le système atteint une position conditionnée par les limites physiques du système, ce qui correspond à la définition d'un autre système.

correspondent en fait qu'à un seul paramètre physique qui est la position relative de l'axe et des points d'application des poids.

Pour bien faire comprendre cet aspect, nous avons schématisé dans la figure 3 neuf situations pour trois types de balances courantes avec des comportements différents occasionnés par des modifications de placement des masses par rapport à l'axe de rotation. La première catégorie de comportement correspond aux « balances instables » (une règle posée sur un crayon cylindrique, un trébuchet, etc.), la deuxième correspond aux mobiles fabriqués en classe (tige en bois et ficelles) et la dernière à certaines balances fabriquées en bois ou en plastique que l'on trouve chez les vendeurs spécialisés en matériel de classe ; Cette catégorie correspond également au fonctionnement classique des balances dites « égyptiennes » par exemple (aussi aux balances de Roberval dont la mécanique est cependant un peu plus complexe).

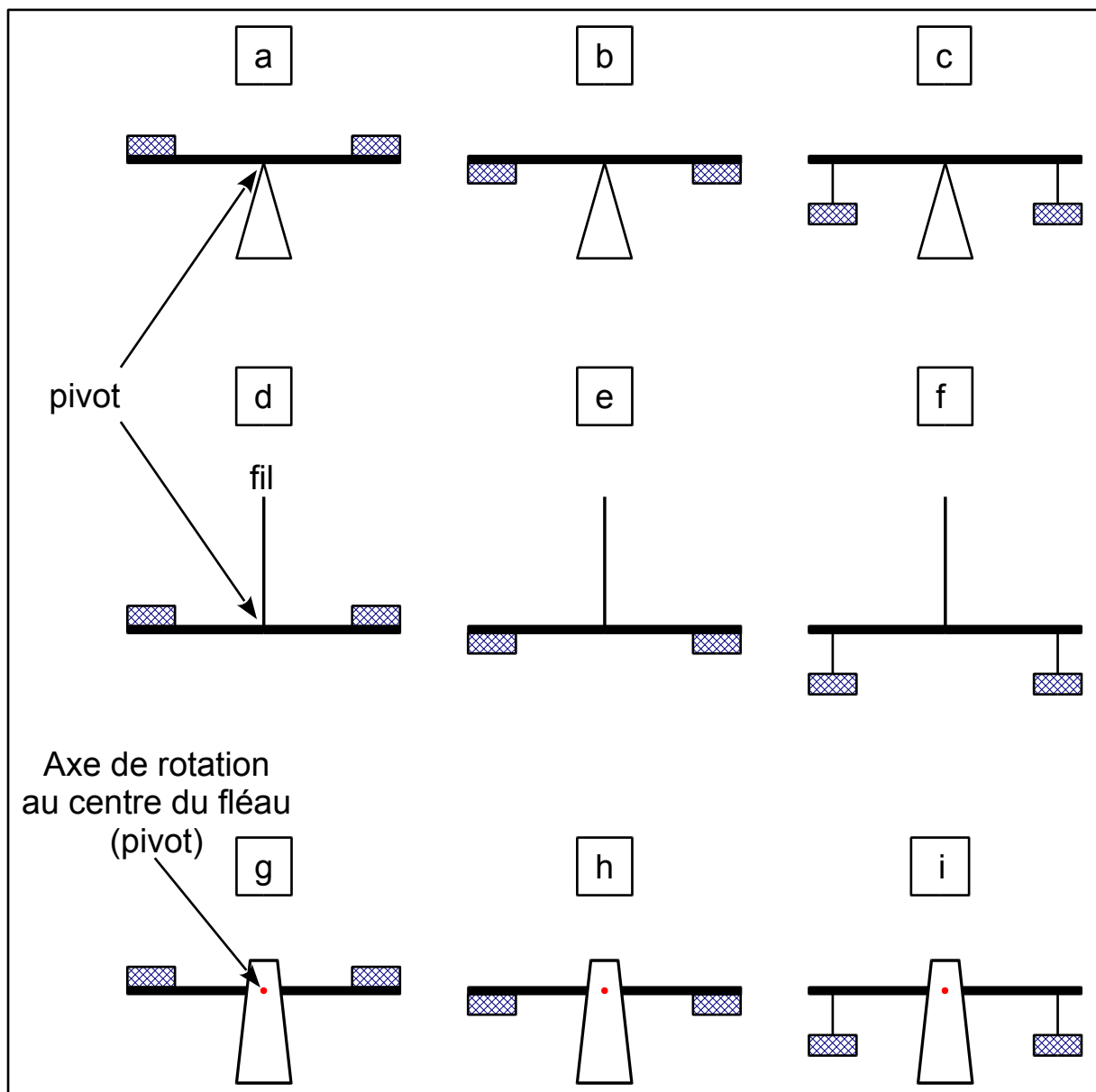


Figure 3 : Différentes configurations de balance.

On suppose, dans la figure 3, que les pièces grises sont d'une matière homogène, qu'elles ont la même masse et qu'elles sont maintenues au fléau par un dispositif adéquat (avec de la colle par exemple). Pour les fils, on suppose que c'est le point de contact entre le fil et le fléau qui est à prendre en compte comme point de pivot (exactement ce qu'il se passe dans le cas d'un mobile). Les pivots principaux au milieu de la longueur du fléau sont supposés ayant un frottement négligeable et le fléau est supposé homogène.

	a	b	c	d	e	f	g	h	i
équilibre horizontal	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
équilibre incliné 1			oui						oui ⁹
équilibre incliné 2		oui			oui	oui		oui	
équilibre indifférent			oui						oui ⁹
équilibre instable	oui			oui			oui		
équilibre stable		oui			oui	oui		oui	oui ⁹

Tableau 2 : comportements des différentes balances de la figure 3.

Ce que l'on peut observer dans le tableau, c'est que toutes ces balances, certes prototypiques, admettent toutes une position horizontale d'équilibre (« équilibre horizontal » dans le tableau) avec les masses égales, ce qui est l'effet principal recherché pour la mesure de masses par comparaison. Mais leur comportement face à une différence entre les masses, par exemple une possibilité d'équilibre incliné (« équilibre incliné 2 » dans le tableau) ou à une inclinaison initiale du fléau avec des masses identiques (« équilibre incliné 1 » dans le tableau) est différente pour plusieurs types de balances. Ceci découle en fait du comportement du système en équilibre face à une perturbation momentanée, ce que l'on a appelé sa *stabilité*. Cette perturbation peut être par exemple un appui direct et momentané avec la main d'un côté du fléau (résultat visible dans les trois dernières lignes) qui va alors provoquer un comportement différent selon que l'équilibre est stable, instable ou indifférent.

Comme on peut le remarquer dans ce tableau et conformément à ce qui a été énoncé plus haut, les propriétés de l'équilibre ne sont conservées que pour une même configuration « position du centre de gravité/pivot » comme pour {a, d, g}, {b, e, h} ou {c, f, i} alors que la « forme » générale du dispositif change (balance type égyptienne, trébuchet ou autre). L'étude d'un seul de ces cas seulement ne permet donc aucune généralisation directe ou « automatique » des possibilités et caractéristiques de tous les états d'équilibre pour des systèmes de ce type.

Sur les conceptions des étudiants

Plusieurs travaux en didactique de la physique (Gunstone, 1987 ; Ortiz et al. 2005, Newcomer et al., 2008 ; Flores-García, 2010 ; Canu et al., 2014) tendent à distinguer plusieurs conceptions de l'équilibre chez les étudiants (y compris chez ceux des cursus ingénieurs) : l'idée de « compensation », d'une influence de la hauteur par rapport au sol, de l'existence de positions « naturelles », d'une hiérarchie entre l'équilibre stable et instable, etc. Ces raisonnements peuvent

⁹ Si le fléau est très mince ou que les fils sont attachés sur le côté au milieu de l'épaisseur de celui-ci c'est un équilibre indifférent. Sinon, l'équilibre est stable.

être reliés aux différents types d'équilibre que les étudiants ont pu rencontrer dans leur passé scolaire ou dans leurs expériences quotidiennes comme l'ont souligné beaucoup de ces auteurs. Nous adoptons aussi ce point de vue, qui est aussi celui de la théorie des champs conceptuels de Vergnaud (1978, 1990). Il fournit un cadre bien adapté à la modélisation des conceptions dans le domaine de la mécanique et permet de lier les expériences vécues aux concepts construits individuellement (les *conceptions*). La base de cette théorie cognitiviste repose sur un modèle de structures, les *schèmes*, formés d'*invariants opératoires* et de *règles d'actions* liés par un *calcul relationnel*. L'idée maîtresse de cette approche est la formation d'*invariants opératoires*, « [...] Une représentation implicite ou explicite du réel analysable en terme d'objets, de **catégories-en-acte** (propriétés et relations) et de **théorèmes-en-acte** » (Vergnaud, 1990) à partir de l'action du sujet dans des situations. Ces invariants vont ensuite eux-mêmes guider l'action du sujet (ce sont les *règles d'action*) dans des classes de situations (le résultat des tentatives de généralisation des règles d'action). Il s'agit donc d'une structure dynamique qui s'enrichit ou se modifie par l'action du sujet (action manipulative ou de réflexion) dans des situations, par exemple de résolution de problème, aussi bien quotidiennes que scolaires (conscientes ou non) mais qui agit aussi comme un filtre sur le réel pour appréhender ces mêmes situations.

On note de plus, pour les notions qui nous intéressent ici, que l'impact des connaissances déclaratives scolaires (énoncés des règles, lois ou critères relatifs à l'équilibre) est relativement faible sur le raisonnement des étudiants en situation, ce qui peut s'interpréter comme un manque de lien ou une inadéquation entre ces éléments déclaratifs et les invariants opératoires du sujet (Canu & al., à paraître). Ceci conduit beaucoup d'entre eux à raisonner de manière quasi-indépendante de ce qu'ils ont appris à l'école.

Examinons les trois principales conceptions identifiées par Canu et al. (2014), que l'on peut donc considérer dans le cadre utilisé ici, comme des *catégories-en-acte* : des propriétés attribuées par le sujet aux états d'équilibre identifiés associées à des relations entre ces propriétés et les comportements observés et/ou prévisibles dans certaines situations.

1. La conception la plus proche scientifiquement du concept d'équilibre est reliée à la notion d'immobilité : l'équilibre est alors assimilé par les étudiants à un état de repos mécanique, c'est la conception « équilibre-immobile ». Cette conception proviendrait d'un raisonnement par couples « contraires » associé à une erreur de logique assez courante. En effet, les élèves et étudiants maîtrisent mal la logique formelle et un fonctionnement presque automatique du cerveau (i.e. inconscient) conduit souvent à des généralisations de type inductive conduisant à des raisonnements erronés de cet ordre. En fait, de manière formelle, on a « *Repos implique équilibre* » (dans un référentiel supposé galiléen) qui est logiquement équivalent à « non-équilibre implique mouvement ». Or les étudiants en induisent, à tort, par négation¹⁰, que « équilibre implique repos », qui est une conclusion incorrecte retrouvée chez nombre d'entre eux, et qui les pousse à dire par exemple qu'un cube qui se déplace à vitesse constante sur un plan incliné ne peut pas être en équilibre (par exemple : « vitesse non nulle du cube : pas en équilibre »). Cette conception, comme beaucoup d'autres, est par ailleurs éminemment opérationnelle dans des situations non scolaires et dans les situations scolaires simples, c'est-à-dire statiques. De manière pratique, elle est tout à fait exploitable dans le cas de la balance et dans les situations relativement courantes de déplacement rectiligne (train, voiture) ou circulaire (manège) uniformes pour peu que l'on se place dans le référentiel en mouvement.

Les deux autres conceptions qui ont été identifiées sont celles qui procèdent directement d'une identification implicite de l'équilibre avec la stabilité ou l'instabilité (qui ne sont certes pas des concepts indépendants, comme on l'a vu, mais dont les liens formels précis ne sont pas ceux exprimés sous l'autorité de ces conceptions).

¹⁰ On a en effet seulement une équivalence logique entre « A implique B » et « non-B implique non-A » (qui s'appelle la *contraposée*)

2. Une de ces conceptions que l'on pourrait appeler « équilibre-instable » est issue l'expérience quotidienne comme beaucoup d'autres, et sans doute renforcée par les activités physiques et sportives menées à l'école primaire. On trouve en effet le terme équilibre une dizaine de fois dans le programme de cette discipline, toujours associé avec des activités mettant en jeu le corps dans des positions instables (debout sur un pied, sur une balle, etc.), l'idée étant de faire « sentir » la précarité de ces positions. Les expériences conduites avec les élèves dans les activités sportives visent donc particulièrement à dépasser le phénomène de seuil dont nous avons parlé précédemment et à solliciter de manière suffisante nos sens pour que la sensation d'équilibre soit perçue de manière non ambiguë. Pour cela, il est nécessaire de parvenir à mettre le corps dans une position d'équilibre « suffisamment instable » pour que le système interne de régulation de position de celui-ci se mette en fonction. Or, debout, en repos sur ses deux pieds, le corps est mécaniquement en équilibre (le corps est un système commandé, asservi¹¹ en permanence pour garder une position déterminée), mais ce n'est cependant pas un état, une position d'équilibre qui est examinée dans ces activités car elle ne provoque pas la sensation d'équilibre attendu. On peut remarquer que le langage, pour une part importante, renforce aussi cette conception en donnant un sens de ce mot, orienté vers l'idée de *précaire*, d'*éphémère*, de *fragile*. Dans le même temps, la stabilité est associée fortement à l'idée de *solidité*, de *permanence*, de *constance* (cf. étymologie), ce qui renforce l'idée d' « équilibre-instable » vs stabilité par un jeu de raisonnement par contraire (Wallon, 1945). On retrouve ce type de conception dans d'autres domaines de la société, par exemple, dans le domaine artistique (voir figure 4).



Figure 4 : expression de l'équilibre par des objets instables : globes de verre remplis de peinture jaune posés sur une tige cylindrique haute et de faible diamètre. (Exposition du Musée National de la Banque de la République, Bogotá, Colombie, 2013)

3. La dernière conception que nous avons identifiée, que l'on pourrait appeler « équilibre-stable » est directement reliée au fonctionnement des balances « à bras égaux », usuellement présentées à l'école primaire. C'est aussi le type de balance utilisé dès l'époque égyptienne¹² (voir figure 1) pour le commerce et qui sera ensuite modifié pendant l'antiquité grecque avec l'adjonction d'un contrepois mobile à la place d'un des deux plateaux, et la modification de la longueur du fléau du côté du plateau restant, conduisant à la balance dite « romaine » (ou *statera*). Pour ces balances, hormis le fait que la position d'équilibre « utile » est la position horizontale – ce qui

¹¹ C'est-à-dire qu'il est un système utilisant une comparaison (une soustraction) de la position courante avec la position souhaitée (la référence) afin de commander les muscles devant assurer le maintien. C'est ce que l'on appelle une boucle de rétroaction.

¹² Aussi connue en Chine, dix siècles av. J.-C.

n'est cependant pas réservé à ce seul type de balance, elles sont construites pour que l'équilibre soit stable. D'un point de vue pratique, cela facilite bien entendu la pesée mais au niveau de l'expérience empirique que fait vivre l'utilisation de cet objet, cela conduit inévitablement à un amalgame entre le concept d'équilibre et le fait que la balance revient toujours à l'horizontale (soit après que l'objet dont on cherche la masse est enlevé du plateau, soit après qu'il est déposé dans le plateau), ce qui est la caractéristique des seuls équilibres stables.

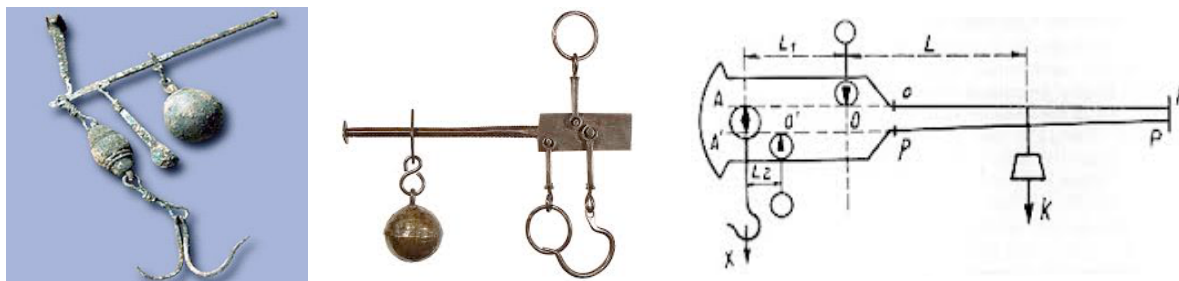


Figure 5 : Balance dite "romaine" ou *statera*, antique à gauche et du XIX^e siècle au milieu à droite, schématisation de cette balance où l'on distingue bien l'alignement du pivot (O) avec les fixations des autres éléments comme la masse pesée (A) (source : internet)

Ceci est renforcé par le fait que les autres positions stables avec le fléau incliné ne sont pas recherchées et sont donc souvent exclues des manipulations et des expériences réalisées avec cet outil.

De plus, dans les cas d'utilisation de cet objet technologique en classe, on cherche le plus souvent à mettre en évidence la « célèbre » loi des leviers d'Archimède¹³ qui n'est aisément identifiable que dans ce cas précis de l'équilibre horizontal. Cette loi s'applique bien évidemment lorsque le fléau est incliné mais alors il faut prendre en compte, soit l'angle d'inclinaison du fléau (et la formule obtenue fait intervenir un sinus), soit les distances entre les verticales des points d'application des poids et l'axe de rotation (ce que l'on peut voir sur la figure 2), ce qui est difficilement abordable à l'école primaire.

L'étude de l'équilibre à l'école primaire

L'équilibre est présent, comme on l'a mentionné plus haut, dans les programmes et les documents d'accompagnement de ces programmes. Il est donc de ce fait souvent abordé en cycle 3, souvent dans le cadre de démarches d'investigation, conformément aux directives des programmes depuis la mise en place du PRESTE¹⁴ en 2002.

Comme nous allons le voir dans la suite, les séquences de classe proposées utilisent généralement l'expérimentation directe à partir de dispositifs de deux types : les balances et les mobiles. Dans le premier groupe de dispositifs, on distingue deux sous-type de dispositifs : ceux, que l'on va appeler les « pseudo-balances instables » (trébuchet ou planchette sur un pivot, par exemple comme celle de la figure 3) et les balances stables, de type Roberval ou romaine, essentiellement.

En ce qui concerne les mobiles, le modèle le plus prisé est constitué de baguettes en bois et de fils, les masses étant en général constituées par des formes en papier. On peut déjà noter que suivant le diamètre de la baguette utilisée, on peut obtenir un comportement légèrement différent, conduisant à des possibilités d'équilibres inclinés (voir figure du bas du tableau 2) plus

¹³ loi qu'Aristote avait déjà démontrée avant lui.

¹⁴ Plan de Rénovation de l'Enseignement des Sciences et de la Technologie à l'École

ou moins prononcées, dépendant aussi du rapport entre les masses en jeu (l'influence du diamètre étant plus importante en cas de masse en suspension plus légères, du fait d'un écart plus important entre le centre de rotation du système et le point d'application de la résultante des poids).

L'utilisation d'un ensemble hétérogène de systèmes dans la même séquence d'enseignement (d'abord le mobile puis la balance ou une pseudo-balance et ensuite une balance, etc.) n'est pas critiquable en soi. Cela permet en effet de multiplier les exemples de systèmes afin d'en montrer les différences et ressemblances, pour enrichir le champ conceptuel des élèves sur ce sujet (donc enrichir leurs schèmes) : cela nécessite cependant que les caractéristiques des différents systèmes soient perçues clairement (les propriétés du tableau 2, par exemple) afin de générer des invariants opératoires adéquats qui déboucheront sur des règles d'action opérationnelles sur le champ le plus large possible de situations (les configurations de la figure 3, par exemple).

Cependant, force est de constater que si ce peut être un objectif affiché de ce type de séquence, il n'est que rarement atteint, principalement à cause du niveau de maîtrise des concepts que réclame cette approche. En effet, pour que cette étude comparative soit pertinente, il faut que l'objectif et le scénario de la séquence prennent en charge de manière explicite tous les aspects présents. On assiste cependant trop souvent à une juxtaposition d'études de plusieurs systèmes, dont les liens ne sont explicites ni pour les élèves ni même pour l'enseignant comme nous allons le voir.

Par exemple, on peut remarquer que l'utilisation de la balance « classique » ne fait intervenir qu'un unique type d'équilibre (cf. le paragraphe sur la conception équilibre-stable), ce qui ne poserait aucun problème si les élèves en avaient pleinement conscience. Cette particularité, à l'origine même de l'invention de cet outil, pourrait être mise en évidence et liée d'une manière ou d'une autre avec l'idée de stationnarité : le simple fait que le fléau puisse rester immobile dans d'autres positions qui dépendent elles aussi des masses et des longueurs en jeu dans le système, serait pourtant de l'ordre du possible à ce niveau.

En effet, bien que l'on puisse considérer les situations mécaniques statiques uniquement sous cet angle, on ne peut pas nier qu'il ne s'agit là que d'un cas particulier de situation dynamique, dont l'expression mathématique est claire : l'équilibre étant défini à partir du concept de point fixe, d'état stationnaire, de dérivée, il s'agit clairement d'un concept reposant sur l'évolution d'un système donné dans le temps et sous l'effet d'évènements extérieurs à partir d'un certain état de départ.

Or l'approche adoptée en général, dès l'école primaire, met l'accent sur les critères propres à chaque discipline qui permettent d'évaluer l'état d'un système, en éludant l'aspect temporel. Nous disons qu'il s'agit là d'une véritable gageure. Bien entendu, les critères proposés (ou les lois « découvertes ») doivent être enseignés car ils permettent de juger de l'état d'équilibre d'un système de manière opérationnelle dans chaque discipline. Mais à eux seuls, ils ne permettent pas de se rendre compte de la nature de ce concept et des liens qu'il conviendrait de faire entre les disciplines car ce lien est justement basé sur l'idée d'évolution ou de non évolution d'un état donné.

Quoi qu'il en soit, sans aller jusqu'à cette approche interdisciplinaire, si l'on se cantonne au seul domaine des objets techniques au cycle 3, l'objectif en terme d'enseignement de ce concept n'est bien souvent pas rempli. En effet, on ne peut que constater que l'étude des *équilibres*, souhaitée dans la partie du programme relative à ce thème, dérive assez facilement sur l'étude d'un unique type d'*équilibre*, l'équilibre stable, dont on peut supposer qu'il marque de manière forte l'esprit des enfants, en participant à la construction de certaines des conceptions erronées précitées. En effet, il ne suffit pas de proposer l'étude de plusieurs systèmes à l'équilibre pour atteindre une compréhension suffisante de cette notion, cela suppose, comme on va le voir dans le paragraphe

suisant, de maîtriser l'étude de chaque système et l'enchaînement de ces études, ce qui n'est pas toujours le cas.

Examinons cela au travers de quelques exemples.

Quelques exemples de séquences de classe

Les ressources pour l'éducation sont très nombreuses (manuels scolaires, logiciels, sites Internet, etc.). Parmi celle-ci, nous avons cherché celles émanant d'un groupe ou d'une institution bénéficiant d'une certaine renommée (Baron et Dané, 2007). On en trouve par exemple qui bénéficient d'un label institutionnel (RIP : reconnue d'intérêt pédagogique) mais aucune de celles répertoriées ne traitent de notre thème. D'autres, comme celles du CNS (canal numérique des savoirs) ou du KNE (kiosque numérique de l'éducation) proposent tous les thèmes des programmes mais dans un catalogue de ressources payantes. Il nous a paru utile d'examiner plutôt des ressources numériques à la fois gratuites, créées et partagées par des enseignants et disposant d'un certain degré de visibilité institutionnelle comme celui d'Eduscol. Le portail « Eduscol », du Ministère de l'Éducation Nationale, propose en effet plusieurs liens vers des ressources locales académiques sur le sujet, sur sa page « Ressources pour l'enseignement des sciences et des technologies à l'école¹⁵ ».

Dans la rubrique « Sciences expérimentales et technologie au cycle 3 », on peut trouver plusieurs liens vers des ressources pour la classe que nous allons toutes passer en revue. En fait, on trouve cinq liens contenant des ressources sur l'équilibre :

- Le premier lien proposé est celui de l'académie de Bordeaux
<http://educ47.ac-bordeaux.fr/sciences/>, ressource **R1**
- Le deuxième lien proposé (académie de Toulouse) ne contient pas directement de ressources sur notre thème mais propose des ressources du site de *La main à la pâte* que nous examinerons en dernier.
- Parmi les liens suivants, seul celui de l'académie de Créteil contient des ressources sur le thème de l'équilibre : un canevas de séquence sur les leviers et un lien vers le site de le site de *l'école des sciences* de Bergerac (Périgord) qui propose un document basé sur la fiche 24 des documents d'accompagnement des programmes de 2002
http://www.perigord.tm.fr/~ecole-scienc/pages/document/fiches_conn/leviers_balanc.pdf, ressource **R2**
- Puisqu'il est pointé par beaucoup de sites locaux, le site de *La main à la pâte* apparaît comme plutôt fourni sur ce thème. On y trouve trois ressources :
 - <http://www.fondation-lamap.org/fr/page/11615/equilibres-et-balances-extraits-dun-journal-d-cole>, ressource **R3**
 - <http://www.fondation-lamap.org/fr/page/11623/7-equilibre-de-la-fl-che>, ressource **R4**
 - http://www.fondation-lamap.org/sites/default/files/upload/media/ressources/activites/11416_Construire_et_quilibrer_un_mobile_em_La_Classe_em_/seq_mobiles.pdf, ressource **R5**

Examinons dans l'ordre ces ressources.

Ressource R1

Dans le module "Les objets technique" on peut trouver un chapitre intitulé "leviers, balances, équilibres" qui contient trois séances dont la dernière s'intéresse spécifiquement à la réalisation d'équilibres. Voici un extrait de la séquence proposée qui est constituée de 7 étapes. Les premières étapes permettent d'introduire le vocabulaire autour de la construction de mobiles constitués de tiges de bois (pic à brochettes) et d'objets légers suspendus à des ficelles dont on précise que les pics se doivent de "rester horizontaux, qu'ils ne penchent pas".

¹⁵ <http://eduscol.education.fr/pid26231-cid46919/ressources-pour-l-enseignement-des-sciences-et-des-technologies-a-l-ecole.html>

Ce site académique propose des guides de séance et des vidéos en libre accès. Les extraits présentés ici (figure 6 et transcriptions) en sont issus.

[...]

Étape 5 : Hypothèse, schématisation et validation

« L'enseignant propose une nouvelle situation : « *Si vous devez réaliser un mobile avec deux charges identiques, où placeriez-vous le pivot sur le fléau pour que celui-ci soit horizontal ? Où attacheriez-vous le fil rouge (pivot) sur la baguette (fléau) si les deux solides (charges) sont identiques ?*

Réalisez un schéma du montage. Utilisez le codage et légendez avec le vocabulaire scientifique. ».

Les élèves réalisent leur schéma, qui a une valeur d'hypothèse.

L'enseignant sélectionne deux types de réponse :

- le pivot est central,
- le pivot est excentré.

À l'aide de matériel, l'enseignant réalise les montages, en commençant par le pivot excentré et conclut avec les élèves que l'équilibre est obtenu lorsque le pivot est central.

Il réalise le schéma légendé au tableau, et les élèves le recopient ; il sert de trace écrite.

L'enseignant illustre l'utilisation de ce principe avec des images de balance Roberval. »

Étape 6 : Trace écrite

Les élèves recopient sous le schéma de l'étape 5 : « *Pour que le fléau soit en équilibre (en position horizontale), il existe un point précis où doit être placé le pivot. Quand les charges sont de même masse, ce point se situe au milieu du fléau. »*

[...]

Figure 6: Extrait des documents-guides proposés en accès libre.

Dans l'extrait vidéo correspondant, l'enseignante montre un mobile devant la classe, constitué d'un fléau suspendu par un fil, de deux masses suspendues par des fils reliés au fléau, le tout quasiment horizontal. Puis suit un échange¹⁶ entre le professeur (P) et les élèves (E) :

(00:22) « [...]

P : *Où est-ce que je vais devoir le [le pivot] placer à votre avis ?*

E : *Au milieu.*

P : *Au milieu ? Est-ce que quelqu'un pense qu'il va falloir le mettre ailleurs ?*

E : *Si on déplace le pivot... heu... plus près d'une charge, eh ben... elle va pas être... heu...*

P : *Elle ne va pas être quoi ?*

E : *Y en a une qui va pencher.*

P : *Tu penses que ça va pencher ? Le fléau ne sera plus en ? ... é- ?*

E + P : *É-qui-libre.*

P : *On va essayer de la mettre en équilibre.*

[...]

¹⁶ Source : http://www.dailymotion.com/video/x10n03g_sciences-cycle-3-leviers-balances-et-equilibres-ot-lb-s3-e5-3_webcam

Plus loin dans la séance on peut entendre :

(01:20) « [...] »

P : *Est-ce que vous connaissez d'autres systèmes comme ça ? Où il y a quelque chose qui est à l'équilibre, c'est-à-dire qui est bien horizontal... quand les deux masses... (c'est une question à la classe)*

E : *Une balance...*

P : *Une balance.*

[...]».

Analyse

Dans les premières étapes (non présentées ici), il n'est nulle part précisé ce qui est entendu par le terme « équilibre » qui ne figure même pas dans le lexique proposé par l'enseignant alors qu'il est utilisé plusieurs fois en alternance avec le terme « horizontal ».

Dans l'étape 5, les passages soulignés correspondent à des communications directes des conceptions de l'enseignante comme « équilibre = horizontal » (un processus d'induction *explicite*). Celui en **gras** correspond plutôt à un processus d'induction *implicite* de conceptions erronées comme par exemple lorsque l'enseignante propose de présenter le cas de la balance de Roberval juste après l'étude des mobiles en équilibre horizontal, en guise de généralisation. Ce faisant, de façon implicite, elle laisse le soin aux élèves de repérer les points communs et les différences entre ces deux systèmes relativement au concept qui nous intéresse ici. Par exemple, le fait que les masses soient, dans un cas, en dessous du fléau et au-dessus dans l'autre, ce qui est pour le moins visible, n'est pas discuté (au moins pas dans le document guide). Or ceci peut conduire les élèves à inférer que ce paramètre n'a aucune espèce d'importance dans le fonctionnement de la balance, ce qui est erroné, comme nous l'avons vu dans le paragraphe relatif à l'analyse de contenu sur l'équilibre.

En fait, cette question de la position des masses par rapport à l'axe de rotation du fléau est cruciale pour comprendre le comportement de ce dispositif et l'étendre à d'autres, comme nous l'avons mentionné plus haut. Et, comme le montre le tableau 2, une étude de la seule position horizontale d'équilibre d'un système particulier ne permet aucune généralisation directe aux autres systèmes.

Ressource R2

S'agissant d'une copie de la fiche connaissance n°24 des documents d'application des programmes pour les cycles 2 et 3 (CNDP, 2002), il s'agit essentiellement d'une mise à disposition de connaissances (contenu, difficultés, etc.).

Analyse

On remarque que les consignes données sont très explicites : « *L'étude de situations de rotation d'un solide autour d'un axe fixe suppose, dans le cas général, la maîtrise de compétences abordées seulement au lycée. À l'école primaire, on se limite donc à l'étude de dispositifs (réels, fabriqués ou simulés) dans lesquels l'équilibre est obtenu avec un fléau horizontal : balançoire horizontale, balance romaine, flèche d'une grue, « mobiles » construits par les élèves.* »

Les programmes eux-mêmes ne précisant pas les conditions d'étude des dispositifs proposés aux élèves, c'est la seule mention officielle¹⁷ existante de ce type ; il est bon de l'avoir à l'esprit avant d'entreprendre l'étude de ce thème.

¹⁷ On ne peut que déplorer que ce document ne soit plus diffusé officiellement depuis.

On peut cependant noter que la suppression du schéma contenu dans la fiche originale ne permet plus une compréhension aisée de la notion de *moment* dans la rubrique « Pour en savoir plus ». Or il montrait de façon claire ce qu'implique l'horizontalité du fléau en termes de simplification dans le calcul des moments des poids (le fait de se contenter de prendre la distance masse-pivot comme bras de levier).

Ressource R3

Le document proposé est en fait composé de plusieurs extraits d'un journal d'école écrit par les élèves, dont le numéro est consacré aux équilibres. Il ne s'agit donc pas d'une source que l'on peut considérer comme fiable même si elle a sans doute fait l'objet d'une supervision par un ou plusieurs enseignants.

Description et analyse

Le document est composé de 4 extraits.

Le premier extrait relate un défi consistant à faire tenir en équilibre bouchon de liège sur un fil tendu à l'aide de deux balanciers formés de pics supportant des boules de pâte à modeler. Cette partie de recherche, plutôt libre, débouche sur la formulation de quelques hypothèses sur le phénomène.

Dans le deuxième extrait, il est proposé de poursuivre de manière plus scientifique la recherche précédente : la recherche de paramètres d'influence. Les élèves identifient un paramètre qui est la « position » des pics que l'on pourrait traduire par *orientation* des balanciers ce qui est présenté sur la figure 7.

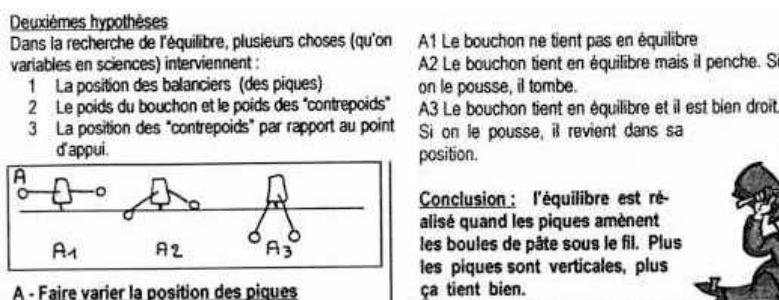


Figure 7 : Une partie de l'extrait 2 du document ressource R3

Alors que l'observation de l'influence du paramètre sur le comportement du système est tout à fait adéquat (A1, A2 et A3), on observe que la conclusion proposée montre clairement la conception « équilibre-stable ». L'équilibre est en fait réalisé en A2 et A3 mais seule l'observation A3 est retenue pour cause de stabilité.

Le troisième extrait présente une balance de type romaine (figure 8) pour laquelle on cherche des relations entre les distances du pivot aux points auxquels sont suspendues des masses de pâte à modeler (l_1 et l_2) et les masses en jeu (m_1 et m_2). Sans l'expliciter, seule la position horizontale est prise en compte (« Nous équilibrons » = rendre horizontal), ce qui aboutit à la conclusion imprécise « Quand il y a équilibre, on peut dire que $m_1 \times l_1 = m_2 \times l_2$ » (ce qui est vrai seulement en cas d'équilibre horizontal).



Figure 8 : première partie de l'extrait 3, à gauche, et de l'extrait 4, à droite

Dans le quatrième extrait (figure 8), il est proposé une manipulation de la balance romaine¹⁸ et les élèves en présentent les règles d'utilisation.

Ressource R4

La séquence proposée, qui s'intitule « l'équilibre de la grue », est présentée sous forme de tableau qui commence par cette « mise en place de l'activité » :

Discussion collective :

- Que se passe-t-il lorsque la grue soulève une charge lourde ?
- Quels sont les risques, comment remédier au problème ?
- On va travailler aujourd'hui uniquement sur l'équilibre de la flèche.

Présentation du matériel : le tasseau tenu par la ficelle fixée en son milieu représente la flèche en équilibre (montrer à la classe que le tasseau, en l'absence de charge, est bien horizontal).

Une colonne nommée « le mot du maître » indique à ce niveau que « L'objectif étant d'étudier l'équilibre lié à la répartition des charges, il n'est pas gênant de passer du dispositif de la grue à celui du mobile. » sans plus d'explication.

Analyse

Comme dans les cas mixtes d'étude de balances et de mobiles, cette séquence vise une certaine transposition du fonctionnement d'un système à un autre, ce qui, en soi, est de nature à favoriser les décloisonnements propices à l'apparition de conceptions très dépendantes du contexte. Cependant, comme dans le premier exemple, il n'est proposé (clairement) aucune définition de l'équilibre et seule l'horizontalité de la flèche de la grue symbolisée par une tige de bois est noté mais ne fait l'objet d'aucune discussion, y compris dans la suite de la séquence (deux séances).

Signalons que le passage du mobile à la grue n'est pas si évident malgré ce qui est indiqué : d'une part, la position et la signification même de l'axe de rotation du mobile dans le cadre d'un modèle de grue (dont la flèche n'est pas un élément qui peut tourner autour d'un axe) est très discutable et, d'autre part, la participation de la base de la grue dans son équilibre n'apparaît pas dans le cas du mobile (ce qui implique l'existence de valeurs maximum de charge). Bien sûr, cela permet de découvrir une partie de la loi des leviers (le contrepoids étant fixe), cependant, la conséquence est qu'il est ensuite difficile d'expliquer que l'on puisse déplacer la charge le long de la flèche de

¹⁸ Il est déclaré que les romains ont inventés la balance romaine, ce qui est inexact. D'une part, le terme romain fait référence au castillant romana venant de l'arabe al roummanha signifiant grenade (le fruit) et non l'adjectif relatif à l'empire romain (de Rome). D'autre part, il semble que l'invention de ce type de balance revienne aux Chinois et que son usage soit passé dans la Rome antique via le commerce de la soie, au début de l'Empire romain (Mazaheri, 1960).

la grue, ce qui est impossible dans le cas du mobile mais tout à fait visible dans le cas de la grue (et on pourrait même dire que c'en est l'intérêt principal).

Ressource R5

Cette dernière ressource, propose une progression complète sur le thème de l'équilibre, uniquement basée sur la construction de mobiles, et constitue la seule répertoriée dans cet ensemble de ressources pour la classe qui ne tombe pas dans les pièges classiques mentionnés plus haut. Certains de ces pièges y sont clairement identifiés et notamment l'aspect « horizontal » comme étant un cas particulier d'équilibre. On note de plus que c'est la seule ressource qui définit de manière claire l'équilibre avant d'en proposer l'utilisation dans une séquence ! Ceci n'est pas anodin. Comme on va le voir dans la suite, plusieurs conceptions erronées que l'on retrouve chez les élèves sont aussi partagées par beaucoup d'enseignants. Il n'est donc pas inutile, dans un document ayant une visée formative auprès des enseignants, de clarifier les concepts en jeu.

Un dernier exemple

Pour terminer, examinons une ressource prise au hasard sur l'Internet. Il s'agit d'une séquence avec présentation et expérimentation autour d'une pseudo-balance instable comme celle de la figure 9 (correspondant au cas « g » de la figure 3) puis ensuite autour de la balance de Roberval ; on ne discute pas non plus le fait que l'une puisse rester en équilibre incliné et l'autre non (puisque ce phénomène n'est pas recherché). Ceci reste donc à la charge des élèves, avec la difficulté, ici, que les masses sont bien du même côté du fléau (au-dessus) ce qui va conduire à une assimilation directe des deux cas par les élèves alors que le principe mis en jeu est différent.



Figure 9 : Pseudo-balance instable (source internet) correspondant au cas « g » de la figure 3

Ces quelques exemples sont autant de pistes pour des formations prenant en compte la difficulté à manipuler les concepts (complexes) en jeu dans les situations pouvant servir de support à l'enseignement de l'équilibre en cycle 3.

Afin de sonder les conceptions des enseignants à propos de ce concept, nous avons mené quelques entretiens exploratoires. Les questions auxquelles nous avons tenté de répondre sont les suivantes :

- Comment des enseignants des écoles primaires définissent-ils l'équilibre ?
- Voient-ils la différence entre une balance de type instable et une autre stable ?
- Si oui, sont-ils en mesure d'expliquer ces différences ?

Les questionnaires enseignants

Pour cette étude, nous avons sélectionné trois enseignants de cycle 3 (identifiés E1 à E3) et trois étudiants de master (un en M1 et deux en M2) en formation au professorat, en stage au cycle 3 (identifiés S1 à S3), tous répartis sur les trois niveaux : CE2, CM1 et CM2. Ils ont été choisis sur la base du volontariat (mais sans connaître le sujet de l'entretien) dans une école primaire faisant partie d'un réseau ECLAIR¹⁹, que l'on peut considérer comme représentative de ce type d'établissement. Ce dernier a été choisi au hasard parmi les établissements Nantais de ce réseau et on peut noter qu'aucun de ces enseignants ou futurs enseignants interrogés n'a fait étudier à ses élèves la partie du programme « leviers, balances, équilibres » dans l'année en cours ou même l'année précédente.

Nous avons mené des entretiens courts, autour d'un questionnaire regroupant deux séries de croquis de balances (un type de balance instable au recto et un autre, indifférent, au verso de la même page, selon figure 10.) dans trois positions différentes caractérisant des difficultés déjà identifiées dans la littérature.

L'entretien débutait par deux questions générales sur l'équilibre : « *Quelle est pour vous la définition de l'équilibre ?* » et « *Pouvez-vous donner un exemple d'objet en équilibre ?* ») suivies des 6 croquis représentant des prototypes de balance dans 3 positions différentes chacune que l'on peut voir sur la figure 10. Elles sont présentées en deux temps (recto : balances instables ; verso : balances indifférentes) afin que l'enseignant ne puisse pas voir les 6 croquis en même temps.

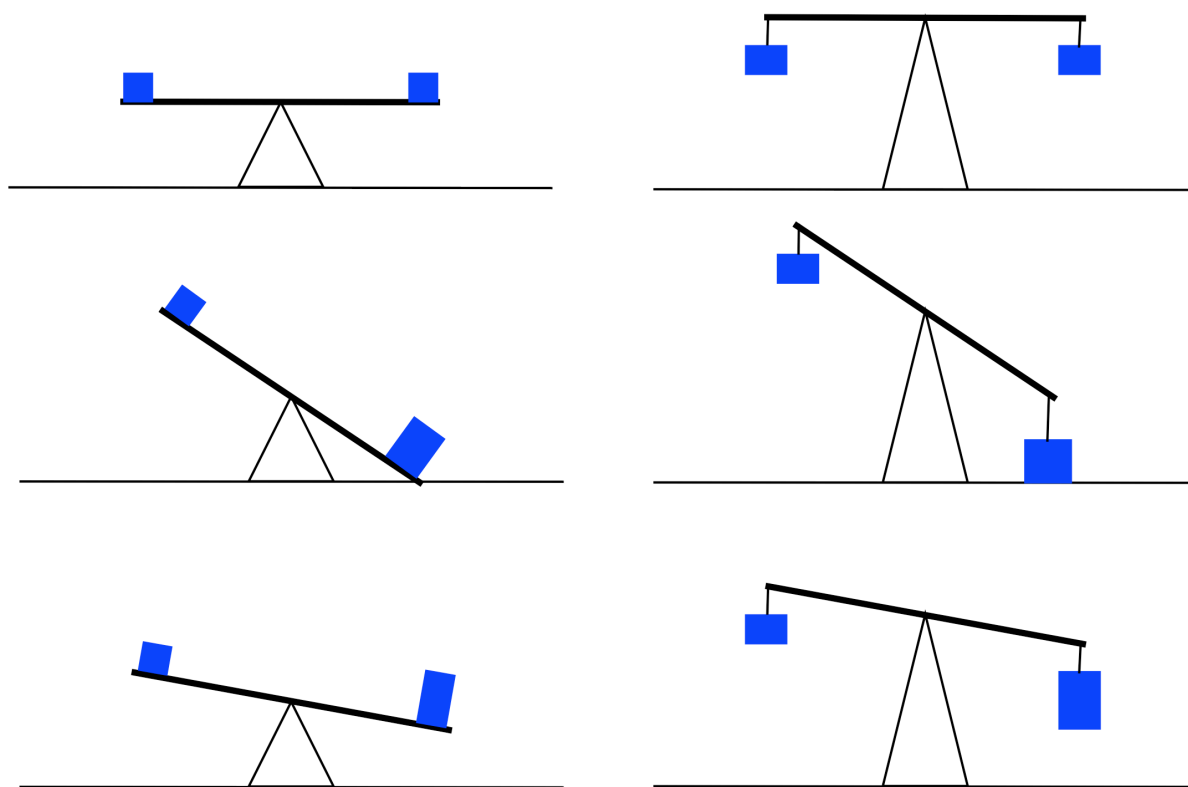


Figure 10 : les balances du questionnaire PE

À gauche : première série (recto) ; à droite, deuxième série (verso)

¹⁹ Pour plus d'informations, consulter le site officiel : <http://www.education.gouv.fr/cid52765/le-programme-clair-pour-les-colleges-et-lycees.html>

Pour chacune des balances, on demande si elle est en équilibre ; l'enseignant peut répondre « oui », « non » ou « Je ne sais pas ». Pour chaque réponse, une justification est demandée. On peut voir les réponses correctes dans le tableau 3.

À la fin de la première série de 3 croquis, on demande à l'enseignant d'identifier des paramètres (physiques) qui influencent le comportement de la balance.

À la fin de la deuxième série de croquis, on demande à l'enseignant s'il considère qu'il y a une différence entre les deux groupes de balances (différence physique constitutive, différence de comportement, etc.).

La dernière partie de l'entretien consistait à montrer un mobile constitué d'une tige (fléau) en bois et de deux masses différentes (rondelles de métal) suspendues à une ficelle de chaque côté, en position d'équilibre incliné.

On lui demande alors si, selon lui, il est en équilibre ou non (réponse correcte : oui, car au repos). Et en cas de réponse négative, l'enseignant doit proposer un moyen de le rendre en équilibre.

Ligne	Equilibre cas gauche	Equilibre cas droit
1	Oui : masses et distances au pivot égales et fléau horizontal.	Oui : masses et distances au pivot égales.
2	Oui : position de repos	Oui : position de repos
3	Non : centre de gravité au-dessus du pivot, masses inégales et distances au pivot égales.	Non : masses inégales et distances au pivot égales avec pivot et point d'application des poids alignés.

Tableau 3 : Réponses et justifications correctes

Dans ce questionnaire, les réponses sont assez prévisibles si on tient compte des études précédemment citées : l'équilibre horizontal ne doit faire aucun doute (c'est le cas de référence), les balances dont un côté repose sur le support seront déclarées comme n'étant pas en équilibre et le dernier cas va susciter le maximum « d'embarras » (avec une réponse soit « non », soit « Je ne sais pas »).

Cependant, ce qui est recherché avant tout, c'est le type de justification utilisée, les différences entre celles-ci dans les deux séries de questions ainsi que l'adéquation entre la définition proposée et l'analyse des exemples proposés.

Les réponses

1) Partie définitoire

En ce qui concerne la question relative à une définition de l'équilibre, nous avons les réponses suivantes :

E1 (Florence) : « Alors l'équilibre pour moi ce serait [...] trouver un axe d'un objet d'une règle ou quelque chose de plat qui soit effectivement [...] en équilibre, c'est-à-dire en suspens et qui puisse y rester [...] »,

E2 (Estelle) : « L'équilibre... c'est la recherche du juste milieu [...] entre deux éléments ou plus [...] une répartition des charges [...] »,

E3 (Anne-Laure) : « Je vois un fil... tenir en équilibre sur un fil [...] » et « Trouver un juste milieu »,

S1 (Agnès) : « L'équilibre ça m'évoque [...] deux poids qui pèsent la même chose [...] »,

S2 (Lise) : « [...] L'équilibre c'est donc quand y'a le même... le même poids des deux côtés [...] »,

S3 (Claire) : « [...] Sur une balançoire il y a des personnes qui font le même poids d'un côté et de l'autre... Elles sont en équilibre » et « [...] Elles restent en équilibre [c'est-à-dire] elles ne bougent plus. ».

On peut distinguer deux types de réponses que l'on peut rapprocher de la distinction proposée par Canu et *al.* (2014) : une définition statique issue des critères de types mécaniques, donc disciplinaire, faisant intervenir une notion d'égalité (des masses, des poids, etc.) comme pour S1 ou S2 ci-dessus, ou une définition « évolutionniste » faisant intervenir le temps, ou plus précisément ici le fait que le système doive être stationnaire, ne plus « bouger » au cours du temps (par exemple E1 ou S3 ci-dessus).

2) Partie balances instables (recto)

Comme cela était prévu, le cas de la balance horizontale ne pose aucun problème aux enseignants interrogés que ce soit sur l'état du système (en équilibre) que sur la justification proposée : une égalité des masses de chaque côté du point de pivotement. La deuxième balance ne semble poser aucun problème non plus et son non-équilibre fait l'unanimité comme cela avait été anticipé (ce qui est incorrect, rappelons-le).

La troisième balance demande plus de réflexion de la part du sondé et elle est majoritairement considérée comme en non-équilibre après quelques échanges avec le sondeur. Les questions portent essentiellement sur le fait qu'elle est ou non en mouvement mais le retour à la définition proposée au début conduit souvent à conclure négativement quant à son équilibre étant donné que le critère proposé est relatif à l'égalité des masses posées sur la balance ou à l'horizontalité du fléau.

Quant aux paramètres d'influence, les masses des objets et la distance des masses au point de pivotement sont énoncés par tous les participants mais de façon qualitative uniquement ; aucun des enseignants n'énonce la « loi des leviers » de manière formelle (c'est-à-dire qu'ils disent par exemple « *L'objet le plus lourd doit être plus près du pivot et le moins lourd plus loin* » qui peut paraître empirique et non « masse fois distance d'un côté égal masse fois distance de l'autre côté » qui est une formule où apparaît l'idée de *moment*).

3) Partie balances indifférentes (verso)

Le schéma de réponse proposé spontanément est le même que pour la première série de croquis. Les deux premiers cas amènent une réponse tranchée (oui pour le premier, non pour le deuxième) et le troisième suscite quelques difficultés et des demandes de précisions, là aussi sur l'immobilité du fléau généralement.

Les enseignants interrogés ne relèvent pas de différence (autre que la forme) entre les deux types de balances proposées, ce qui est cohérent avec leurs réponses. Une enseignante pointe du doigt la hauteur du support, sans cependant parvenir à en déduire un effet clair sur le comportement du système (qui n'a en l'occurrence aucun effet sur l'équilibre).

4) Partie « mobile »

Pour tous les enseignants du panel, le mobile présenté (tige inclinée), bien qu'étant immobile, est majoritairement jugé comme n'étant pas en équilibre. Deux enseignantes sont cependant plus partagées et le considèrent « en équilibre mais pas équilibré » (S1) ou dans « une sorte d'équilibre » (E2). Tous proposent cependant que si l'on déplace le point d'attache du fil qui tient le mobile vers le côté de la masse la plus grande, cela permettra de rendre le fléau horizontal (ce qui est réalisé devant eux) et donc de placer le mobile en équilibre de façon claire.

Analyse des réponses

Dans tout l'entretien, comme dans la partie « définitoire », on peut distinguer deux manières de voir l'équilibre que l'on peut rapprocher de la distinction proposée par Canu et *al.* (2014) :

- 1) une définition issue des critères de types mécaniques statiques, donc disciplinaires, faisant intervenir l'égalité des masses dans un premier temps et ensuite les distances au pivot lorsqu'il s'agit de justifier un avis (voire les rapports entre ces quantités si l'on suppose des distances inégales entre la position des masses sur le fléau et le point de pivotement).
- 2) des définitions « évolutionnistes », proches des conceptions évoquées au début et faisant intervenir la nature stationnaire de l'équilibre comme par exemple le fait que le système doive « arrêter de bouger » (E2) ou « rester dans une certaine position » (E1) mais avec l'idée supplémentaire qu'il doit avoir la *possibilité* de changer, d'évoluer comme dans « *Ça tend à revenir, à se balancer [...]* » (E2) (conception équilibre-stable ou instable).

On observe une certaine « concurrence » entre ces définitions et conceptions conduisant à un traitement des différents cas qui paraît incohérent car très dépendant de l'apparence du système considéré. Par exemple, l'équilibre de la balance inclinée avec une masse qui repose sur le « sol » (cas 2) est systématiquement rejeté, sans argumentation, alors qu'il satisfait à des règles plusieurs fois énoncées comme « *Ça va s'arrêter* », « *Si on [ne] fait rien, ça va rester comme ça* » etc. Mais l'impression qu'il n'y a pas de *possibilité* de déplacement conduit à la conclusion qu'il n'y a pas d'équilibre. Dans le cas de la balance inclinée, qui est celui qui pose le plus de problème aux sondés, la possibilité d'un déplacement est par contre bien perçue mais entre en conflit avec l'inégalité claire entre les masses de chaque côté qui est un contre-argument le plus souvent proposé pour justifier l'absence d'équilibre. Ce même conflit est à nouveau très présent dans le cas du mobile. L'élément supplémentaire dans ce cas est la constatation (donc pas seulement une hypothèse de réflexion) de l'absence de mouvement du système. Cet élément, qui est un critère d'équilibre implicite ou déclaré, entre en conflit avec l'inclinaison de la tige due à une inégalité des masses qui est considéré comme un critère de « non équilibre ».

Discussion

On observe chez les enseignants de notre panel les mêmes raisonnements que ceux retrouvés par plusieurs auteurs chez les élèves de collège/lycée/université (Gunstone, 1987 ; Flores-Garcia et *al.*, 2010 ; Newcomer and Steif, 2008, Ortiz et *al.*, 2005 ; Canu et *al.*, 2014). La principale caractéristique que l'on retiendra de ces raisonnements est une incohérence apparente, en fait, des *propriétés en acte* qui ne sont pas reliées entre elles au niveau conceptuel et qui dépendent donc fortement des situations qui leur ont donné naissance. Comme chez les étudiants des études mentionnées plus haut, la connaissance de quelques critères d'équilibre statique ou « évolutionniste » n'est que peu opérationnelle et lorsqu'une définition est disponible, elle n'est pas systématiquement utilisée pour répondre à la question posée même si comme l'a noté Palmer (2001) la définition issue de la conception qui apparaît la plus scientifique (ici le critère statique) est utilisée de manière plus systématique que celles issues des conceptions alternatives (ici « évolutionnistes »). En fait, lorsque deux définitions sont disponibles chez le même individu (par exemple un critère statique ET un critère « évolutionniste ») la difficulté pour choisir entre ces deux éléments explicatifs est évidente. Cependant, cette difficulté n'est pas résolue clairement en général car ces éléments ne sont pas reliés par le sujet (on pourrait dire dans ce cas que ces éléments ne font pas partie du même schème). C'est alors que la conception qui leur paraît « la plus scientifique » l'emporte.

Conclusion et perspectives

Il apparaît que les enseignants interrogés ne sont pas pleinement conscients des différents types d'équilibre existants. Il semble qu'ils ne connaissent que partiellement les paramètres qui influencent le comportement des différents types de dispositifs (balances, mobiles, etc.) que l'on rencontre pourtant couramment en classe ou dans la vie quotidienne. Or la maîtrise du contenu, bien que n'étant pas suffisante, est néanmoins nécessaire à l'exercice de l'enseignement. Cette maîtrise n'est cependant pas aisée et comme nous l'avons vu sur quelques cas, la juxtaposition d'études de quelques cas d'équilibre choisis au hasard même bien traités individuellement, ne permet pas d'en saisir la cohérence ou, au minimum, les règles globales qui le gouvernent. De plus, les enseignants ne sont pas beaucoup aidés dans cette tâche par les ressources disponibles gratuitement sur les sites spécialisés y compris institutionnels. En l'état actuel de l'enseignement, on ne peut que craindre la construction de conceptions, chez les élèves, ne permettant nullement d'atteindre la connaissance des équilibres souhaitée par le programme mais uniquement celle de l'équilibre de la balance stable (Roberval, romaine, etc.).

On pourrait donc s'interroger sur l'intérêt réel (conceptuel) de l'étude de la balance à l'école primaire étant données les limitations révélées ici. Pendant plusieurs décennies, la double pesée figurait au programme du certificat d'étude. L'intérêt pratique de cette étude pouvait alors paraître plus évident. Depuis, on l'utilise essentiellement pour découvrir la loi des leviers en cours élémentaire et moyen et, en tant que préparation à l'étude ou à la construction du concept de *moments*, cela pourrait paraître tout à fait approprié. Mais si l'on considère que les conceptions induites par celle-ci se retrouvent encore présentes chez les étudiants d'université, son intérêt peut alors sembler limité. De plus, la loi des leviers est bien entendue souvent vue lors l'étude des *leviers* qui apparaît dans la même partie du programme. Elle est alors approchée de manière plus qualitative, sans nécessairement chercher des égalités donc sans induire la ou les conceptions indiquées.

Pour terminer, on peut noter qu'il existe des approches basées sur la fabrication de mobiles multi-niveaux en bois et papier comme celle examinée dans cette étude (ressource R5) qui ne possèdent pas certains des inconvénients de celles basées sur la balance : on peut en effet focaliser le travail des élèves sur la recherche d'un équilibre dans le sens de « l'immobilité d'une baguette de bois par rapport au fil qui la tient » (horizontal ou non). Cette façon d'approcher l'équilibre, cohérente avec la définition formelle, permettrait aussi d'envisager de parler d'équilibre même en cas de rotation du mobile autour du fil principal, ce qui ne restreindrait son étude aux cas purement statiques, même si la conception « équilibre-immobile » pourrait très bien faire office de *modèle précurseur* (Ravanis et al., 2007) à ce niveau.

Références bibliographiques

- ALBANESE A., CESAR M., NEVES D. & VICENTINI M. (1998) *Students' ideas about equilibrium*, friction and dissipation. *Acta Scientiarum*, 20 (4), pp. 461-472.
- BARON G.L. & DANÉ E. (2007) *Pédagogie et ressources numériques en ligne : quelques réflexions*, *Revue électronique de l'EPI* : <http://www.epi.asso.fr/revue/articles/a0709c.htm>.
- CANU M., DE HOSSON C. & DUQUE M. (2012) *Equilibre et stabilité dans les systèmes commandés : difficultés d'élèves ingénieurs*. Septièmes journées scientifiques de l'ARDiST - Bordeaux.
- CANU M., & DUQUE M. (2014) *Didactic engineering for conceptual change in students' equilibrium and stability understanding*. In V. Villas-Boas & O. Giovani (Eds.), *Active Learning in Engineering Education*, pp. 292–299. Caxias du Sul: Editora ABENGE.
- CANU M. (2014) *Apport de l'étude conjointe de systèmes dynamiques libres et commandés dans la compréhension de l'équilibre et de la stabilité*. Paris Diderot - Paris 7. Retrieved from <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01108459>.
- CHAMPAGNE A. & KLOPFER L.E. (1983) *Naive Knowledge an Science Learning*. In American association of physics teachers. New York.
- FLORES-GARCÍA S., ALFARO-AVENA L.L., CHÁVEZ-PIERCE J.E., LUNA-GONZÁLEZ J. & GONZÁLEZ-QUEZADA M.D. (2010) *Students' difficulties with tension in massless strings*. *American Journal of Physics*, 78(12), 1412.
- GUNSTONE R.F. (1987) *Student understanding in mechanics: A large population survey*. *American Journal of Physics*, 55(8), 691–696.
- MATHIEU J.-P., KASTLER A. & PIERRE F. (1991) *Dictionnaire de physique*. (Eyrolles, Ed.) (3e ed.). Paris : Masson.
- NEWCOMER L.J. & STEIF S.P. (2008) *Student Thinking about Static Equilibrium: Insights from Written Explanations to a Concept Question*. *Journal of Engineering Education*, 481-490.
- MAZAHERI ALY. *L'origine chinoise de la balance « romaine »*. In: *Annales. Économies, Sociétés, Civilisations*. 15e année, n° 5, 1960. 833-851.
- ORTIZ L.G., HERON P.R.L. & SHAFFER P.S. (2005) *Student understanding of static equilibrium: Predicting and accounting for balancing*. *American Journal of Physics*, 73 (6), 545.
- PALMER D.H. (2001) *Investigating the Relationship Between Students' Multiple Conceptions of Action and Reaction in Cases of Static Equilibrium*. *Research in Science and Technical Education*, 19(2).
- RAVANIS K., KOLIOPOULOS D. & BOILEVIN J.-M. (2007) *Construction of a Precursor Model for the Concept of Rolling Friction in the Thought of Preschool Age Children: A Socio-cognitive Teaching Intervention*. *Research in Science Education*, 38(4), 421–434. doi: 10.1007/s11165-007-9056-7.
- VERGNAUD G., HALBWACHS F., ROUCHIER A. (1978) *Structure de la matière enseignée, histoire des sciences et développement conceptuel chez l'élève*. *Revue Française de Pédagogie*, 45, 7–15.

- VERGNAUD G. (1990) *La théorie des champs conceptuels*. Recherches En Didactique Des Mathématiques, 10(23), 133–170.
- VIBERT J.-F., SEBILLE A., LAVALLARD-ROUSSEAU M.-C., BOUREAU F. & MAZIÈRE L. (2011) Neurophysiologie. *De la physiologie à l'exploration fonctionnelle*, 2^e ed., p. 256). Issy-les-Moulineaux: Elsevier Masson SAS.
- VON BERTALANFFY L. (1969) *General System Theory: Foundations, Development, Applications (Revised)*. George Braziller, Inc.
- WALLON H. (1945) *Les origines de la pensée chez l'enfant*. Paris : Presses Universitaires de France.