

L'ELABORATION HISTORIQUE DU CONCEPT D'ENERGIE POTENTIELLE

Salmone FAYE⁽¹⁾, Jérôme VIARD⁽²⁾, Françoise KHANTINE-LANGLOIS⁽³⁾

(1) Formateur à la FASTE^F de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar

(2) Maître de conférences au LIRDHIST^{**} de l'UCB Lyon 1

(3) PRAG Docteur (HDR) LIRDHIST^{**} de l'UCB Lyon 1

Résumé

L'objet principal de notre propos dans cet article, est la mise en évidence des raisons qui ont amené les scientifiques du début du 19^{ème} siècle à introduire le concept d'énergie potentielle dans les sciences ainsi que les débats que cette introduction a suscités. Après avoir décrit le processus historique d'élaboration du concept d'énergie potentielle, l'article donne une interprétation actuelle de ce concept et débouche sur une proposition didactique pour son enseignement.

Abstract

The main purpose of this article is the putting to the fore of reasons, which brought the scientists of the beginning of the 19th century to introduce the concept of potential energy in sciences. After description of the historical process of elaboration of the potential energy concept, the article gives an « understanding » of potential energy concept and comes out a didactic proposition to its teaching.

Mots clés

énergie potentielle, configuration, force d'interaction à distance, potentiel, système matériel, travail mécanique

Keywords

Potential energy, configuration, interaction force, potential, material system, mechanical work.

Introduction

L'énergie potentielle est un concept enseigné dans les classes de première au Sénégal. L'échec constaté de son enseignement nous a amenés à nous intéresser à son élaboration historique pour comprendre les obstacles que les scientifiques ont dû surmonter et à identifier ce qui donne sens à ce concept. Cette étude part de la gestation de l'idée d'énergie potentielle à son interprétation actuelle. Les conclusions de l'étude permettent de faire des propositions didactiques qui pourraient orienter une recherche de stratégies d'enseignement pouvant permettre aux élèves de l'enseignement secondaire de construire plus efficacement le concept d'énergie potentielle.

Naissance du concept d'énergie potentielle

L'adjectif « potentiel » est introduit dans la langue française au XVI^{ème} siècle. Il dérive du mot latin « potentialis » qui, lui dérive de « potentia » qui signifie « puissance ». Cette notion, déjà présente chez Aristote, est utilisée par Galilée et Huygens.

Ces auteurs admettent que les corps pesants, qu'ils descendent verticalement ou sur des plans inclinés, acquièrent toujours des vitesses capables de les faire remonter aux mêmes hauteurs d'où ils étaient tombés.

« Lorsqu'un corps grave, après être tombé, tourne son mouvement vers le haut, il atteindra la hauteur même dont il est venu, quel que soit le nombre des surfaces planes contiguës et quelles que soient leurs inclinaisons. »
(Huygens, 1658)¹

* Faculté des Sciences et Technologies de l'Education et de la Formation

** Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche en Didactique et Histoire des Sciences et des Techniques

** Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche en Didactique et Histoire des Sciences et des Techniques

¹ Huygens, 1658, p. 146

Cette idée est reprise par Leibniz qui écrit:

« J'ai montré que la force ne se doit estimer par la composition de la vitesse et de la grandeur, mais l'effet futur [...]. Cependant il semble que la force ou puissance est quelque chose de réel dès à présent et l'effet futur ne l'est pas. D'où il s'en suit qu'il faudra admettre dans les corps quelque chose de différent de la grandeur et de la vitesse, à moins qu'on veuille refuser aux corps toute la puissance d'agir. » (Leibniz)²

Quelques années plus tard, Daniel Bernoulli, dans l'« *Hydrodynamica, sive de Viribus et Motibus Fluidorum commentarii* », publié en 1738, parle à propos de la puissance ascensionnelle, de la puissance virtuelle du mouvement.

Mais on notera que dans les deux cas, il s'agit de la puissance associée à la force vive (énergie cinétique) et non pas de la puissance que pourrait contenir un système en équilibre (énergie potentielle).

Cette idée se retrouve également dans les écrits de Newton, comme le relève Rankine:

« L'espèce de quantité³ dont il est ici question a été envisagée dans la trente-neuvième proposition des Principes de Newton, mais elle y est représentée par l'aire d'une figure ou seulement par des symboles, sans être désignée par un nom ; tel est aussi le cas de plusieurs ouvrages de mathématiques postérieurs. » (Rankine, 1868)⁴

C'est trois cents ans après l'introduction du terme « potentiel » dans la langue française, qu'apparaît l'expression « énergie potentielle ». Elle a été introduite en anglais, en 1853 par Rankine.

“Actual energy is a measurable, transferable, and transformable affection of substance, the presence of which causes the substance to tend to change its state in one or more respect; by the occurrence of which changes actual energy disappears, and is replaced by potential energy, which is measurable by the amount of a change in the condition of a substance, and that of the tendency or force whereby that change is produced (or, what is the same thing, of the resistance overcome in producing it), taken jointly.”⁵

La variation de l'énergie potentielle est mesurée par le produit d'un changement d'état du système par la résistance contre laquelle est fait ce changement. En créant les deux expressions « énergie actuelle » et « énergie potentielle », Rankine ambitionnait de créer une nomenclature qui lui aurait permis de ranger toutes les formes d'énergie en deux catégories : énergie de puissance et énergie de mouvement. La raison de ce travail est qu'il cherche à formuler la loi générale qui régit les transformations de l'énergie dans le monde. Mais à cette époque où la thermodynamique est en plein développement, les descriptions énergétiques sont encore très dépendantes des aspects phénoménologiques et Rankine n'a pas pu réaliser complètement son objectif. Ce que Brunhes résume de la façon suivante:

« Sa tentative de classification en deux catégories de toutes les formes d'énergie est donc une tentative intéressante, mais seulement prématurée ». (Brunhes, 1909)⁶

Duhem justifie la création des termes énergie potentielle et énergie cinétique dans les termes suivants.

« Une supposition très simple partage en deux termes l'œuvre accomplie au cours d'une modification ; l'un de ces termes dépend du changement apporté à l'état du système ; il ne dépend ni du mouvement local, ni du changement qu'éprouve ce mouvement ; l'autre terme dépend du mouvement local et de son changement, mais point de l'état du système, ni de ses variations. Dès lors, l'énergie totale se partage, elle aussi en deux termes : l'un ne dépend que de l'état du système et point de son mouvement local ; l'autre ne dépend que du mouvement local et point de l'état du système. Le premier terme devrait justement se nommer énergie d'état ; on le nomme énergie interne ou énergie potentielle. Le second terme se nomme énergie cinétique ou énergie actuelle. » (Duhem, 1905)⁷

² cité dans Costabel, 1981, p.42

³ Il s'agit de l'énergie potentielle.

⁴ Rankine, 1868, p.74

⁵ Rankine, 1853, p.106

⁶ Brunhes, 1909, p.265

⁷ Duhem, 1905, p. 225

Cette notion d'énergie potentielle a été d'abord combattue par des scientifiques comme Sir John Herschel. Ce dernier reproche à Rankine d'avoir, par son expression d'énergie potentielle, réduit à une tautologie le principe de la conservation de l'énergie et « *substitué un truisme à un grand fait dynamique* ». (Cité dans Brunhes, 1909)⁸.

En réponse aux critiques de Herschel, Rankine écrit :

« Comme l'énergie potentielle, si généralement employée aujourd'hui par les physiciens, a été proposée par moi dans un mémoire sur la loi générale de la transformation de l'énergie, lu à la société philosophique de Glasgow, le 5 janvier 1853, il me semble que la remarque de sir John Herschel m'oblige à expliquer les motifs qui m'ont conduit, après mûre réflexion, à adopter cette expression pour désigner toutes ces relations entre les corps ou les particules des corps qui consistent dans le pouvoir d'effectuer un travail, relations qui dépendent de leurs dispositions relatives. »

[...] *Il ne peut y avoir aucun doute sur la convenance particulière du mot énergie pour cet objet ; car non seulement la signification qu'on lui donne s'accorde parfaitement avec l'étymologie $\epsilon\nu\epsilon\rho\upsilon\gamma\iota\alpha$, mais le mot énergie n'a jamais eu d'autres sens dans les ouvrages scientifiques précis ; il n'y a donc à craindre aucune équivoque.*

J'ai donc pensé que ce qui me restait à faire c'était de qualifier le mot énergie par un adjectif convenablement choisi, afin d'établir une distinction entre l'énergie de mouvement et l'énergie de configuration. L'antithèse des deux adjectifs bien connus actuel et potentiel paraît exactement remplir cette condition ; j'ai donc proposé les expressions énergie actuelle et énergie potentielle dans le mémoire auquel j'ai déjà renvoyé⁹. » (Rankine, 1868)¹⁰

Ici on note une précision supplémentaire quant à la définition de l'énergie potentielle. En effet, Rankine donne un critère caractéristique de ce qu'il appelle énergie potentielle. Il s'agit de définir l'énergie potentielle comme de l'énergie de configuration.

Toujours d'après Rankine, les formes d'énergie actuelle sont la « force vive » de la matière en mouvement, la chaleur thermodynamique, la chaleur rayonnante et les courants électriques. Celles de l'énergie potentielle sont les puissances mécaniques de la gravitation, de l'élasticité, de l'affinité chimique, de l'électricité statique et du magnétisme.

Il faut noter qu'avant Rankine aucun physicien n'avait employé les expressions d'énergie potentielle et d'énergie actuelle, Thomson parlait d'énergie statique et d'énergie dynamique. L'idée de distinguer ces deux formes d'énergie était une nécessité pour les mécaniciens de l'époque. En effet dans un système conservatif, ils avaient remarqué l'existence de deux termes dont la somme reste constante. Ces deux termes furent baptisés « énergie statique » et « énergie dynamique » par Thomson, « énergie potentielle » et « énergie actuelle » par Rankine puis « énergie potentielle » et « énergie cinétique » par Thomson et Tait.

Outre celle de Herschel, on mentionnera une autre critique très virulente que le chimiste allemand Ostwald formule contre la tentative de Rankine de distinguer entre énergie potentielle et énergie cinétique. Pour Ostwald, le terme d'énergie potentielle implique l'idée que les autres formes d'énergies ne sont pas quelque chose d'aussi réelle que l'énergie du mouvement. Il considère que l'énergie cinétique n'est pas en soi plus « actuelle » que n'importe qu'elle autre forme d'énergie qui peut se transformer en une autre : elle est, comme toute autre forme d'énergie, potentielle au regard de celle qu'elle produit tandis que cette autre devient actuelle.

« Ce qui montre le mieux, combien est peu nette la distinction faite par Rankine entre les énergies actuelles et les énergies potentielles, distinction que l'on retrouve dans beaucoup d'ouvrages récents, c'est qu'il y a un certain nombre d'énergies bien connues au sujet desquelles on est loin de s'accorder, les uns les considérant comme actuelles, les autres comme potentielles. On voit par là qu'il n'existe pas de signe objectif auquel on puisse reconnaître si une énergie est actuelle ou potentielle. C'est en vertu d'une convention arbitraire que l'on

⁸ ib., p 266

⁹ Mémoire sur la loi générale de la transformation de l'énergie, lu à la société philosophique de Glasgow, le 5 janvier 1853

¹⁰ Rankine, 1868, pp-73-75

regarde, par exemple, l'énergie chimique comme potentielle, et l'on aurait bien de la peine à indiquer ce qui empêcherait de la considérer comme actuelle.

La seule manière légitime de comprendre les mots énergie actuelle et énergie potentielle, c'est de regarder comme actuelle une énergie présente au moment considéré, et comme potentielle une énergie qui, dans les circonstances présentes, peut se transformer au moyen de l'énergie présente. Si l'on attribue à ces deux expressions les significations que l'on vient de dire, la force de tension ou l'énergie de distance qui se trouve dans une masse élevée au-dessus de terre est actuelle, et l'énergie de mouvement qu'elle contient est potentielle ; c'est l'inverse après la chute. Pour le pendule, l'énergie de distance est actuelle quand il est en haut de sa course, l'énergie de mouvement est actuelle quand il est dans sa position la plus basse, et, pendant les oscillations, ces deux énergies échangent constamment leurs caractères.(Ostwald, 1910)¹¹.

Cette critique d'Ostwald semble indiquer qu'il ne lit pas très bien Rankine. En effet quand Ostwald dit qu'« on voit par là qu'il n'existe pas de signe objectif auquel on puisse reconnaître si une énergie est actuelle ou potentielle », il se trompe car ce qui fait le sens de l'énergie potentielle pour Rankine c'est la relation entre cette idée et la configuration. Donc la configuration peut être un « signe distinctif » entre l'énergie actuelle (liée au mouvement) et l'énergie potentielle (liée à la configuration du système). Ce critère (configuration) permet ainsi actuellement de considérer l'énergie chimique comme de l'énergie potentielle.

Il est vrai que cette distinction simple dans le cas des phénomènes macroscopiques cités par Ostwald est beaucoup plus difficile à faire dans le cas de la description microscopique de l'énergie chimique.

Malgré les critiques formulées contre la proposition de Rankine on peut noter qu'il introduit, une rupture épistémologique dans la « compréhension » des différentes formes d'énergie. En effet, contrairement aux physiciens du XIX siècle qui distinguaient les deux types d'énergie en se plaçant principalement du point de vue de leur réalité, Rankine se place, comme nous le montrons ci - dessous, suivant le point de vue de leur manifestation.

Cette distinction conceptuelle entre les deux formes d'énergie est bien antérieure à l'introduction de l'expression de l'énergie potentielle par Rankine, elle remonte, selon Thomson, à Lazare Carnot. Ce dernier, dans « *Les principes fondamentaux de l'équilibre et du mouvement* », propose de distinguer la force vive proprement dite de la force vive latente. Le produit de la masse par le carré de la vitesse est la force vive proprement dite alors que le produit d'une ligne par une force motrice, « moment de force », ou, « moment d'activité » porte la dénomination particulière de « force vive latente ».

« ...le moment d'activité, consommé par une force P , dans un temps infiniment court, est le produit de cette force estimée dans le sens de sa vitesse, par le chemin que décrit dans ce temps infiniment court, le point où elle est appliquée¹².

« Il suit évidemment de ces deux dernières propositions, que pour élever un poids Mg à une hauteur H , et lui faire prendre en même temps une vitesse V , il faut, en supposant ce corps en repos au premier instant, que les forces employées à produire cet effet, consomment elles-mêmes un moment d'activité égal à

$$Mgh + \frac{1}{2}MV^2. »^{13}$$

On peut noter que la relation $Mgh + \frac{1}{2}MV^2$ est interprétée aujourd'hui comme étant l'énergie mécanique totale du système {terre + objet}, Mgh représentant l'énergie potentielle de pesanteur de l'objet. Carnot est ainsi le premier à distinguer nettement le résultat du travail de la force vive de ce travail lui-même par une expression formelle (Ph) et une dénomination spécifique.

Mais Carnot, en parlant de force vive cachée, reprend ici une idée encore plus ancienne, due à Black.

¹¹ Ostwald, 1910, pp. 135-136

¹² Carnot, 1797, p.70

¹³ Carnot, 1797, p.86.

Black, comme certains physiciens de son époque étaient préoccupés par la question relative à la fusion des solides. Pourquoi un solide chauffé à son point de fusion, n'avait-il besoin que d'une faible quantité de chaleur pour fondre ? C'est en tentant de résoudre cette question que Black, physicien et chimiste écossais introduisit les notions de chaleur spécifique et chaleur latente.

« Pour préciser les concepts [il s'agit de la chaleur spécifique et de la chaleur latente], Black mesure la quantité de chaleur absorbée par la fusion de la glace, par la méthode des mélanges, et inversement la quantité de chaleur dégagée par la solidification en étudiant les phénomènes de surfusion. L'égalité de ces deux chaleurs achève de fonder tout le système opératoire : la grande quantité de chaleur absorbée au cours de la fusion n'est pas détruite, mais elle est cachée, latente et peut être complètement récupérée à partir du liquide en le congelant. » (Cité dans Agabra, 1986)¹⁴

Black, dans le cadre de la chaleur, introduit une notion qui sera reprise par les physiciens du XIX siècle. En effet, ce qu'il entend par de la chaleur (de l'énergie au XIX siècle) qui reste « cachée, latente et qui peut être complètement récupérée » correspond bien à de l'énergie potentielle car elle est liée à la position relative des atomes constituant la matière.

La distinction opérée par Carnot entre le résultat du travail de la force vive de ce travail lui-même n'est pas totalement réalisée chez Rankine, elle sera achevée par Thomson et Tait. Thomson reconnaît l'importance du travail réalisé par Lazare Carnot et Tait crée l'expression d' « énergie dormante » beaucoup plus expressive que celle d'énergie potentielle mais qui ne sera malheureusement pas retenue par l'usage.

« Dans tous les cas [...] où l'énergie est dormante, elle prend le nom d'énergie potentielle ; et on la mesure par le travail qu'elle peut développer, et qu'elle développerait, en effet, si on l'appliquait convenablement. » (Tait, 1870)¹⁵.

On voit que le problème que les physiciens du XIX siècle, dans la continuité de ceux du XVIII siècle, est celui de l'identification d'un objet, une énergie, dont la manifestation n'est pas immédiate.

Trois Interprétations du concept d'énergie potentielle

- L'énergie potentielle n'est pas « réelle »

Parmi ceux qui défendent ce premier point de vue citons Tyndall.

« J'ai ici un poids de plomb attaché à une ficelle qui passe sur une poulie fixée au plafond de la salle. Nous savons que la terre et le lingot s'attirent mutuellement ; le lingot repose maintenant sur la terre et exerce une certaine pression sur sa surface. Ici la terre et le poids se touchent l'un l'autre ; leur attraction mutuelle est satisfaite autant que possible, et leur rapprochement mutuel a rendu tout mouvement impossible. En tant qu'il s'agit de l'attraction de gravité, la possibilité de produire du mouvement cesse aussitôt que les deux corps qui s'attirent sont en contact actuel.

Je soulève ce poids. Le voici suspendu à 5 mètres au dessus du plancher ; il est tout aussi immobile que lorsqu'il reposait sur le plancher ; mais, en interposant un espace entre le plancher et lui, j'ai changé la condition de son existence. En l'élevant, je lui ai conféré le pouvoir de produire du mouvement. Il y a maintenant en lui une possibilité d'action qui n'existait pas lorsqu'il reposait sur la terre : il peut tomber, et dans sa chute il peut faire tourner une machine ou exécuter un autre travail. Il n'a pas d'énergie tant qu'il pend là, mort et sans mouvement ; mais l'énergie lui est possible ; et nous pouvons très légitimement employer ce terme énergie possible pour exprimer la puissance de mouvement que le poids possède, mais qu'il n'a pas encore exercée en tombant ; nous pouvons l'appeler aussi énergie potentielle comme quelques hommes éminents l'ont déjà fait. Cette énergie potentielle dérive, dans le cas actuel, de la traction de la gravité, traction qui, néanmoins, ne s'est pas encore exprimée en mouvement. Mais je laisse maintenant aller la ficelle ; le poids tombe et atteint la surface de la terre avec une vitesse d'environ 10 mètres par seconde. A chaque instant de sa descente il était tiré en bas par la gravité, et sa force motrice finale est la somme de toutes ces tractions. Pendant l'acte de la chute, l'énergie du poids est active. On peut l'appeler énergie actuelle par antithèse avec énergie possible. On peut

¹⁴ Agabra, 1986, p.6.

¹⁵ Tait, 1870, p.73.

aussi l'appeler énergie dynamique par opposition à énergie potentielle ; et nous pouvons donner le nom de force motrice à l'énergie avec laquelle le poids descend. Gardons-nous d'être inattentifs, car il faut que nous soyons promptement en état de distinguer entre l'énergie en réserve et l'énergie en action. Une fois pour toutes acceptons les termes de M. Rankine, et appelons potentielle l'énergie en réserve ; actuelle l'énergie en action. » (Tyndall, 1874)¹⁶

La classe de savants représentés ici par Tyndall et dont fait partie Rankine, considère qu'un corps en contact avec le sol ne possède pas d'énergie potentielle. Par contre, un corps soulevé à une hauteur donnée, du fait de son altitude par rapport à la terre, acquiert la possibilité de posséder de l'énergie. L'énergie potentielle n'est pas une énergie réelle, mais c'est de l'énergie que le système, *qui ne la possède pas, a le pouvoir d'acquérir* (Maxwell, 1891)¹⁷.

L'énergie potentielle d'un système n'est pas considérée comme de l'énergie réelle au même titre que l'énergie cinétique. L'énergie que peut posséder un corps suspendu en l'air ne devient de l'énergie réelle que si ce corps se met en mouvement. L'énergie potentielle est encore appelée énergie de position.

Cette façon de voir l'énergie potentielle fait qu'elle est liée à la configuration et qu'il existe un indice de visibilité qui est le mouvement.

Selon Roche, tous les scientifiques du XIX siècle avaient cette conception de l'énergie potentielle.

« This conception, which was close to the contemporary every day meaning of the potential/actual distinction fits Rankine's contrast between potential and actual energy very well, provided [le fait de considérer l'énergie potentielle comme non réelle] as we shall see, not only did Rankine have this conception, but all of this 19th century contemporaries apparently did so as well. » (Roche, 2003).

Il est important de noter que c'est cette première conception de l'énergie potentielle que l'on trouve chez les élèves de lycée. En effet, des études menées sur les conceptions des enfants sur l'énergie (Bliss, 1985 ; Carré, 1990 ; Oliva, 1999 ; Trumper, 1990, 1991, 1993 ; Toussaint et Trellu, 1985 et 1993 ; Watts, 1983) ont montré que, pour ces derniers l'énergie ne peut être associée à un « système » inerte. Ils associent l'énergie à la « vie » ; un « système » qui ne se met pas en mouvement, qui ne provoque pas un mouvement effectif, ne possède pas d'énergie. Ils considèrent que l'énergie est exclusivement associée au mouvement ou à la création effective de mouvement ; une absence d'activité observable est interprétée comme une absence d'énergie. Pour les élèves une chose n'existe que si elle est apparente.

- **L'énergie potentielle est liée à la matière**

Un deuxième point de vue est de considérer l'énergie potentielle comme essentiellement liée à la matière. Un corps du fait de son existence même possède de l'énergie potentielle.

« L'énergie est donc un élément essentiel de toutes les choses réelles, c'est-à-dire concrètes » (Ostwald, 1910)¹⁸.

L'énergie potentielle d'un corps dépend de sa constitution et de sa configuration. Selon cette conception, l'énergie potentielle ne peut varier que si l'état physique du corps change, si les positions relatives des différents constituants du corps se modifient, ou si sa masse varie.

On le voit, ces deux conceptions semblent irréductibles. En effet pour les partisans de la deuxième conception, un corps élevé ne possède pas d'énergie potentielle car ni sa constitution ni sa configuration ne changent. Par contre ils considèrent, contrairement aux défenseurs de la première conception qu'un corps au sol possède de l'énergie potentielle car étant constitué de matière.

¹⁶ Tyndall, 1874, p.128.

¹⁷ Maxwell, 1891, p.120

¹⁸ Ostwald, 1910, p.v.

Mais, en réalité, une étude plus poussée montre que ces deux conceptions sont complémentaires. En effet, Helmholtz, en 1847, réussit à expliciter l'origine de l'énergie potentielle et à lui donner du sens.

- **L'énergie potentielle est une énergie d'interaction**

On peut dire avec Helmholtz que les difficultés qu'il y a à admettre l'existence et la réalité de l'énergie potentielle vient du fait que seule *la matière active peut être connue car nous n'avons la connaissance des objets que par leur influence sur nos organes.* (Helmholtz, 1847)¹⁹. La connaissance des objets ne peut donc passer que par la connaissance des effets qui par la suite, nous conduisent, selon Helmholtz, à la cause ou à l'agent.

Il faut rappeler que l'une des grandes préoccupations de Helmholtz, à l'instar des savants du XIX siècle, est le problème de la « conservation de la « force » ». Il est convaincu que

« le principe de la conservation de la force vive n'est vrai que pour des forces motrices susceptibles d'être décomposées en forces émanant de points matériels, dirigés suivant les droites qui lient ces points, et dont les intensités ne dépendent que des distances de ces points. » (Helmholtz, 1847)²⁰

Voici la démonstration qu'il propose.

« Soit φ l'intensité de la force, agissant dans la direction de r , positive quand elle attire, négative quand elle repousse ; ses composantes sont :

$$X = \frac{x}{r} \varphi, \quad Y = \frac{y}{r} \varphi, \quad Z = \frac{z}{r} \varphi \quad (1).$$

Appelons Q et q les vitesses tangentielles en deux positions quelconques, R et r les distances correspondantes, et intégrons, il vient :

$$\frac{1}{2} m Q^2 - \frac{1}{2} m q^2 = - \int_r^R \varphi dr. \quad (2)$$

Le premier membre de cette équation (2) représente la différence des forces vives que possède le point matériel m à deux distances différentes. Quand à la signification de l'intégrale définie $\int_r^R \varphi dr$, on la trouvera facilement, en imaginant que les valeurs de φ , correspondantes aux différents points de la droite ma , soient représentées par des ordonnées perpendiculaires à cette droite. Alors cette intégrale ne sera autre chose que l'aire comprise entre l'axe des abscisses, les ordonnées qui mesurent les valeurs extrêmes de φ , entre r et R , et la courbe qui relie les sommets de toutes les ordonnées mesurant les valeurs consécutives de φ depuis la première limite r , jusqu'à la seconde limite R .

Appelons tension la force qui tend à mouvoir le point matériel m , avant que le mouvement soit effectué, par opposition à ce que la mécanique appelle force vive.

Nous appellerons alors Quantité des tensions agissant entre les limites r et R , l'intégrale $\int_r^R \varphi dr$, par analogie à ce que la mécanique désigne sous le nom de Quantité de forces vives ; et l'équation (2) s'énoncera ainsi : L'accroissement de la force vive d'un point matériel dans son mouvement sous l'influence d'une force centrale, est égal à la quantité des tensions qui correspondent à la variation relative de sa distance au centre d'action. »

Helmholtz postule l'existence de la force centrale d'interaction entre deux points matériels. Ce sont ces forces centrales d'interaction qui lui permettent de donner un sens à la « quantité de tensions » c'est-à-dire l'énergie potentielle. L'énergie potentielle est donc une énergie d'interaction. Ainsi pour la première fois un scientifique

¹⁹ Helmholtz, 1847, p 60

²⁰ *ibid.*, p 68.

donne du sens au concept d'énergie potentielle. Une analyse de la formule (2) de Helmholtz montre que l'intégrale $\int_r^R \phi dr$ représente une variation. Elle est donc une variation d'énergie potentielle.

On fera la remarque que des scientifiques autres qu'Helmholtz ont trouvé des relations similaires à la relation (2) de Helmholtz. Parmi ces derniers on peut citer Coriolis qui, dans ses recherches sur le principe de conservation des forces vives aboutit à la relation :

$$\sum \int P \cdot ds - \sum \int P' \cdot ds' = \sum \frac{p \cdot v^2}{2g} - \sum \frac{p \cdot v_0^2}{2g},$$

avec $\frac{p}{g}$ la masse du système, v la vitesse finale et v_0 la vitesse initiale. Coriolis énonce ensuite ce principe comme il suit :

“Dans tous système de corps en mouvement, la différence entre la somme des quantités de travail dues aux forces mouvantes, et la somme des quantités de travail dues aux forces résistances, pendant un certain temps, est égale à la variation de la somme des forces vives de toutes les masses du système pendant le même temps.” (Coriolis, 1829)²¹

On le voit ce que Helmholtz appelle « quantité de tension » est appelé « quantité de travail » par Coriolis.

Dans le même ordre d'idée, Lagrange avait également obtenu une relation analogue à celle de Helmholtz au cours d'une étude qui portait sur « la conservation des forces vives ».

« [...] dont l'intégrale $S\left(\frac{dx^2 + dy^2 + dz^2}{2dt} + 1\right)m = H$, dans laquelle H désigne une constante arbitraire, égale à la variation du premier membre de l'équation dans un instant donné.

Cette dernière équation renferme le principe connu sous le nom de Conservation des forces vives. [...] on voit par l'équation dont il s'agit, que cette force vive est égale à la quantité

$2H - 2S\pi m^2$, laquelle dépend simplement des forces accélératrices qui agissent dans le corps et nullement de leur liaison mutuelle... » (Lagrange, 1811)²³

De nos jours, les physiciens adoptent l'interprétation de Helmholtz.

« Nous appelons la somme des poids que multiplient les hauteurs, l'énergie potentielle – l'énergie qu'un objet possède à cause de sa situation par rapport à la terre.

[...] Le nom général de l'énergie qui est liée à la position d'un objet relativement à quelque chose d'autre est énergie potentielle. (Feynman, 1979)²⁴

Ainsi, contrairement à ce qu'écrit Roche,

“In 20 century physics a shift of meaning occurred in the interpretation of potential energy. Its sense is now almost entirely confined to configuration energy, Rankine's own succinct description. Furthermore, in most applications, it no longer means 'undeveloped energy'.”

[...]

²¹ Coriolis, 1829, p.18

²² La lettre S de cette formule représente un signe d'intégration (\int)

²³ Lagrange, 1811, p.290

²⁴ Feynman, 1979, p.46

“Potential energy, therefore, now seems to have two quite distinct meaning in physics, ‘configuration energy’ and ‘undeveloped energy’, although the former meaning predominates.” (Roche, 2003)

L'énergie potentielle a une seule interprétation pour les physiciens d'aujourd'hui:

L'énergie potentielle est une énergie d'interaction entre les éléments d'un système et elle dépend de la situation spatiale de ces éléments.

Conclusion

On peut relever à travers cette revue historique le fait que le mot « potentiel » a existé bien avant que le concept d'énergie potentielle ne soit construit. Cet historique du concept d'énergie potentielle montre combien a été difficile sa construction par les scientifiques. Il n'a pas été aisé de lui donner un sens unique à cause de son caractère "caché".

On peut regretter l'adoption par les physiciens de l'expression " énergie potentielle " au lieu de celle d' " énergie dormante " ou d' " énergie latente ". Nous pensons que l'utilisation de l'une des deux dernières expressions eut été plus judicieuse et permettrait d'éviter les incompréhensions rencontrées dans l'introduction et l'appropriation du concept d'énergie potentielle.

Ces difficultés que les scientifiques ont rencontrées au cours de l'élaboration du concept d'énergie potentielle se retrouvent chez nos élèves et chez certains étudiants en sciences. Comme l'écrit Roche

« Experienced physics today have little trouble with ‘potential energy’, but I believe the situation may be otherwise for physics students, and it may also otherwise for some of the disciplines which have borrowed this term from physics. Each generation of students tends, unreflecting, as once I did, to apply the ordinary meaning of ‘potential’ to the term potential energy, and some, at least, experience a degree of perplexity at the lack of fit. Even though many textbooks do try to make it clear that ‘potential’ energy here means ‘configuration’ energy, words which we have been brought up with do not abandon their familiar meanings lightly. Most of those physics students who become practitioners of physics will, of course, eventually internalize the interpretation of potential energy, but how many in physics, and other disciplines, will totally shake off a puzzle association of ‘potential’ with ‘undeveloped’ in this context? ” (Roche, 2003)

La consultation des manuels de physique des classes de première S, montre (Faye, 2004) que les auteurs de manuels ainsi que la plupart des enseignants de physique des lycées donne toujours de l'énergie potentielle une interprétation qui est celle de Rankine. Ils définissent l'énergie potentielle comme une énergie de configuration. À l'instar de Roche, nous disons que l'enseignement traditionnel de l'énergie potentielle ne permet pas aux élèves de construire ce concept dans son interprétation actuelle.

Comme alternative à la façon traditionnelle d'enseigner l'énergie potentielle nous proposons :

- D'introduire les concepts d'« existence en *puissance* » et celui d'« existence en *acte* » afin que les apprenants acceptent qu'un système inerte peut posséder de l'énergie.
- D'introduire le concept d'énergie potentielle à partir de systèmes interagissant étant entendu que pour nous « **L'énergie potentielle est une énergie d'interaction entre les éléments d'un système et qu'elle dépend de la situation spatiale de ces éléments.** »
- De rendre « visible » l'énergie potentielle en faisant apparaître les dépendances de ces interactions avec les caractéristiques des éléments du système.

Des expérimentations dans ce sens sont en cours de réalisation et feront l'objet de publications ultérieures

Bibliographie

- (1) Agabra J. (1986). Echanges thermiques. *Aster n°2*. Paris.pp. 1,41.
- (2) Bernoulli, D. (1738) *Hydrodynamoca, sive de Viribus et Motibus Fluidorum commentarii*, Opus Academium...Stasbourg Dulscker

- (3) Brunhes B. (1909). *La dégradation de l'énergie*. réimpression 1991 . Champs.Flammarion.
- (4) Bliss J. (1985). Children's choices of uses of energy. *European Journal of Science Education*, vol. 7, n°2, pp.195-203.
- (5) Carnot L. (1797) *Essai sur les machines en général*. Œuvres mathématiques du citoyen Carnot, A Basle chez J. Decker.
- (6) Carré C. (1990). Primary teachers self-perceptions concerning implementation of the National Curriculum for science in the UK. *International Journal of Science Education*. vol. 12, n°4. pp. 327-341.
- (7) Coriolis,G.,G., (1829) *Du calcul de l'effet des machines, ou considérations sur l'emploi des moteurs et sur leurs évaluation, pour servir d'introduction à l'étude spéciale des machines*, Paris, Carilian-Golury
- (8) Costabel. P., (1981) *Leibniz et la dynamique en 1692, textes et commentaires*, Paris .Vrin
- (9) Duhem P. (1905). *L'évolution de la mécanique*. Paris.
- (10) Faye, S. (2003), mémoire de DEA, Université Claude Bernard Lyon 1.
- (11) Feynman R.P., Leighton R.B. et Sands M. (1979). *Le cours de physique de Feynman. Mécanique*. Tome I, Addison-Wesley Company.
- (12) Helmholtz, H., (1847), *Mémoire sur la conservation de la force*, traduit de l'allemand par Louis Perraud en 1864, Paris. Victor Masson et Fils
- (13) Huygens, C. (1658), *Horologium oscillatorium*, Reproduction Gallica BNF de l'édition de 1934 Œuvres S.H.S., vol.XVIII. La Haye Martinus Nijhoff
- (14) Lagrange, J-L., (1811) *Mécanique analytique*, nouvelle édition, tome premier, Paris : M^{me} V^o Courcier
- (15) Leibniz G.W. (1692), *Essay de dynamique*, éd, C.I. Gerhardt, t.VI, halle, 1855-1863, réimpr. Hildesheim, Olms, 1971.
- (16) Maxwell, J. C., (1891) *La chaleur. Leçons élémentaires sur la thermométrie, la calorimétrie, la thermodynamique, et la dissipation de l'énergie*, édition française, d'après la huitième édition anglaise, par M Georges Mouret, Paris
- (17) Oliva M. J. (1999). Structural patterns in students' conceptions in mechanics. *International Journal of sciences Education*. Vol. 21, n°9. pp. 903-920.
- (18) Ostwald, W., (1910), *L'énergie*, traduit de l'allemand par E. Philippi, F.Alcan,Paris.
- (19) Rankine M. (1853). On General Law of the Transformation of energy, *Philosophical Magazine*, vol.V, p.106.
- (20) Rankine M., (1868) Sur l'expression de l'énergie potentielle et sur la définition des quantités physiques, *Annales de Chimie et Physique* , vol 13, pp. 73-79
- (21) Roche, J.,(2003) What is potential energy?, *European Journal of Physics*, n°24, pp.185-196
- (22) Tait P. G. (1870), *Esquisse historique de la théorie dynamique de la chaleur*, Gauthier-Villars, Paris
- (23) Trumper R. (1990). Being constructive: an alternative approach to the teaching of energy concept- part one. *International Journal of Science Education*. Vol.12?, n°4, pp. 343-354.
- (24) Trumper R. (1991). Being constructive: an alternative approach to the teaching of the energy concept- part two. *International Journal of Science Education*, vol.13, n°1, pp.1-10.
- (25) Trumper R. (1993). Children's energy conceptions: a cross- age study, *International Journal of Science Education*, vol.15, n°2, pp. 139-148.
- (26) Tyndall, J., (1874) *Chaleur mode de mouvement*, 2^e édition française, traduite de l'anglais sur la 4^e édition, par M. l'abbé Moigno, Paris : Gauthiers-Villars Reproduction Gallica BNF 1995
- (27) Watts M. D. (1983). Some alternative views of energy, *Physics Education*, n° 18, pp. 213- 216.