

Chaînes énergétiques et modèles scientifiques scolaires de l'énergie. Analyse d'une séance de formation continue

ESTELLE TISON, EMMANUEL ROLLINDE

LDAR
CY Cergy Paris Université
France
estelle@etison.fr
emmanuel.rollinde@cyu.fr

ABSTRACT

We analyzed an in-service training session on energy for secondary school teachers, in order to characterize the school science model of energy proposed to the teachers. This model is based in particular on energy transfers, conversion and storage, and is based on the representation of energy phenomena by energy chains that respond to a particular formalism. Conservation is mentioned, but is not at the heart of the model. Degradation, an essential property of energy in a societal context, is not part of this model.

KEYWORDS

Energy, energy chain, in-training service, school science model

RÉSUMÉ

Nous avons analysé une séance de formation continue à l'énergie à destination d'enseignants de collège afin de caractériser le modèle scientifique scolaire de l'énergie proposé aux enseignants-stagiaires. Il s'appuie en particulier sur le transfert, la conversion et le stockage de l'énergie, et repose sur une représentation des phénomènes énergétiques par des chaînes énergétiques selon un formalisme particulier. La conservation est évoquée, sans être au cœur du modèle choisi. La dégradation, propriété indispensable pour parler d'énergie dans un contexte sociétal, ne fait pas partie de ce modèle.

MOTS-CLÉS

Énergie, chaîne énergétique, formation continue, modèle scientifique scolaire

INTRODUCTION

En 2015, l'énergie apparaît comme un thème d'enseignement dans les programmes de collège (MENESR-BO, 2015). Or, ce concept est difficile à définir rigoureusement. C'est une grandeur physique conservative, abstraite, qui relie entre eux les domaines scientifiques. Son utilisation dans ces domaines implique l'élaboration de modèles basés sur certains de ses aspects. Au secondaire, l'enseignement de l'énergie en tant que concept unificateur implique l'utilisation de modèles scientifiques scolaires (Kermen, 2018) qui évoluent selon le niveau d'enseignement.

Des entretiens menés avec cinq enseignants de collège nous ont montré que la place qu'ils donnent à l'énergie dans leurs enseignements est variable et que les chaînes énergétiques qu'ils associent à un même événement sont différentes les unes des autres. Tous ne donnent pas

le même sens au concept d'énergie et aux propriétés qu'ils lui attribuent. Ce constat n'est pas surprenant : le mot énergie fait partie du vocabulaire courant, où il prend de multiples sens, souvent éloignés de celui qu'il prend en physique. Dans la vie quotidienne et dans un contexte scolaire, l'énergie est souvent confondue avec d'autres grandeurs physiques (e.g. Watts, 1983). Certains auteurs (e.g. Lancor, 2014) mettent en avant une considération substantialiste de l'énergie et l'association de l'énergie à certains types d'objets. Des études (Bodzin, 2012; Watts, 1983) montrent une mauvaise compréhension du principe de conservation de l'énergie. Enfin, comme le soulignent Bächtold et al. (2014), les confusions entre sources, formes et transferts d'énergie sont fréquentes. Ces difficultés ont été mises en évidence des élèves du primaire aux enseignants du secondaire (e.g. Pintó et al., 2005; Trumper, 1998).

Ce constat nous a conduits à nous intéresser à la formation continue à l'enseignement de l'énergie, afin d'identifier les choix de modèles scientifiques scolaires et de chaînes énergétiques faits par les formateurs. Nous ne proposons pas ici une mise en œuvre au niveau curriculaire (e.g. Koliopoulos & Ravanis, 2000) et n'aboutissons pas à une prescription de modèle scolaire.

CONTEXTE SCIENTIFIQUE ET DIDACTIQUE

Propriétés de l'énergie en thermodynamique

Les deux principales propriétés de l'énergie sont sa conservation et sa dégradation, formalisées par les deux principes fondamentaux de la thermodynamique. L'énergie se conserve : quelles que soient les transformations¹, la quantité totale d'énergie ne varie pas au cours du temps. L'énergie peut passer d'un système à un autre : on parle de transfert d'énergie. Au cours d'un transfert, l'énergie « perd de sa qualité » : elle se dégrade. Cette propriété est liée à l'idée d'« économies d'énergie » : il ne s'agit en fait pas d'économiser l'énergie, mais de préserver les sources d'énergie les plus « utilisables ».

En thermodynamique, on distingue deux types de transferts : le travail (qui met en jeu une force dont le point d'application se déplace) et la chaleur (transfert qui n'est pas un travail). Certains auteurs considèrent le rayonnement comme un travail (Borel, 1987; Prigogine & Kondepudi, 1999) ; d'autres l'incluent dans la chaleur (Brunet et al., 2019; Diu et al., 2007, p. 487). Le changement de type de transfert au cours d'un événement est appelé « conversion ». En sciences, il est habituel d'attribuer des formes à l'énergie (e.g. Feynman et al., 2014). Certains auteurs préfèrent éviter ces distinctions, supposées masquer la dimension universelle du concept d'énergie (Lancor, 2014). Si l'énergie prend différentes formes, elle peut en changer au sein d'un système (« transformation ») ou passer d'une forme dans un système à une autre forme dans un second système (« modification »).

Enfin, pour certains auteurs, l'énergie est nécessairement contenue dans des systèmes. Cette caractéristique de l'énergie, controversée mais courante en didactique (Millar, 2005; Vince & Tiberghien, 2015), est appelée « stockage ».

Chaînes énergétiques, un outil didactique

Pour faciliter l'enseignement et l'apprentissage de l'énergie, concept unificateur, Bruguière et al. (2002) promeuvent l'utilisation de la chaîne énergétique, « préalable utile et indispensable pour maîtriser le concept d'énergie ».

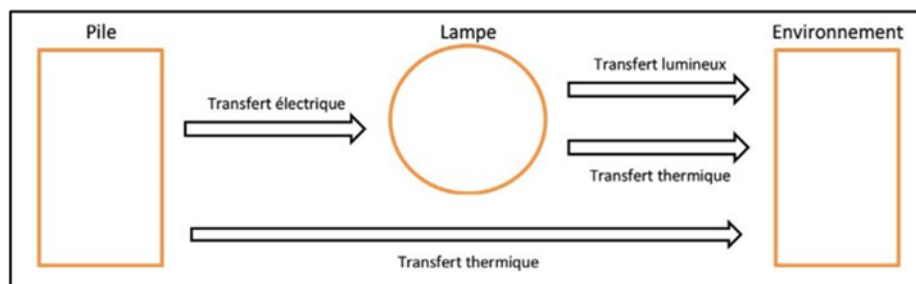
Nous appelons « chaîne énergétique » une représentation schématique qui met en évidence, en particulier par l'utilisation de flèches, a minima un ou plusieurs transferts et/ou flux d'énergie entre des systèmes et/ou un ou plusieurs changements de forme d'énergie au sein

¹i.e. « quoi qu'il se passe » ; nous utilisons ici le mot « transformation » dans son sens commun.

d'un système ou entre plusieurs systèmes. En accord avec Lemeignan et Weil-Barais (1992) et Gaidioz et al. (1998), nous distinguons les chaînes *pendant* (Figure 1), qui représentent un phénomène énergétique à un instant précis en mettant en évidence des transferts et des conversions d'énergie, mais ne pouvant pas représenter la conservation de l'énergie, et les chaînes *avant-après* (Figure 2), qui représentent l'évolution d'un phénomène énergétique au cours du temps, mettant en évidence des transformations ou des modifications de l'énergie. D'autres représentations schématiques existent et peuvent être des versions hybrides de ces deux types (voir par e.g. Scherr et al., 2012).

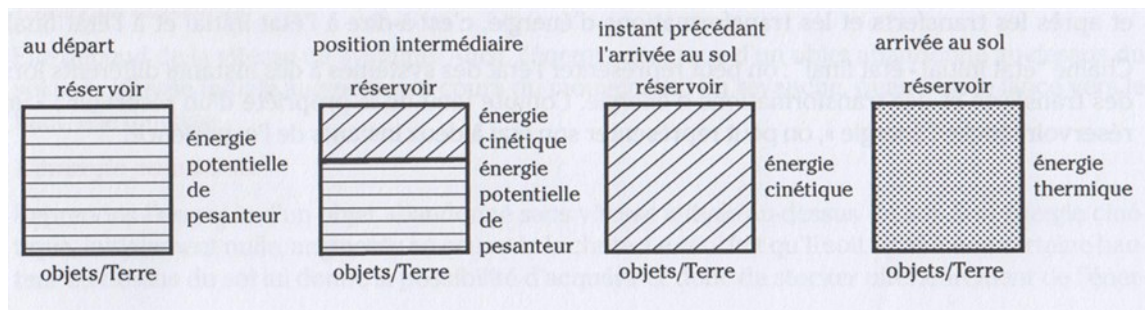
Nous précisons ici que nous n'analysons pas la manière dont les élèves peuvent interpréter les chaînes et l'apprentissage du concept d'énergie qu'elles induisent, mais les indices fournis par les chaînes pour remonter aux modèles de l'énergie utilisés pendant les formations.

FIGURE 1



Exemple de chaîne pendant (Ducourant, 2019)

FIGURE 2



Exemple de chaîne avant-après (Gaidioz et al., 1998)

QUESTION ET CADRE DE RECHERCHE

Nous avons formulé la question suivante :

(QR). Quel modèle de l'énergie et quelles représentations par les chaînes énergétiques sont privilégiés par le groupe des formateurs académiques que nous avons observés ?

Cette question est liée au modèle utilisé pendant la formation par l'ensemble des formateurs et à destination des stagiaires. Pour y répondre, nous ferons une analyse de l'ensemble du discours et des documents transmis aux stagiaires. Nous ne chercherons donc pas à identifier le modèle privilégié par chaque formateur, ni son évolution au cours des épisodes de la formation.

MÉTHODOLOGIE

Nous avons enregistré une séance de formation continue à l'énergie (trois formateurs F1A, F1B, F1C ; 14 stagiaires, enseignants de collège ; durée : 6 heures).

La chronogénèse de la formation est reproduite ci-après (Tableau 1). En début de formation, les formateurs ont laissé les enseignants-stagiaires s'exprimer, puis leur ont exposé le concept d'énergie sous un angle épistémologique, scientifique puis sociétal (épisodes 3 à 5). L'épisode 6 a été consacré à la présentation d'un modèle scientifique scolaire de l'énergie.

TABLEAU 1
Chronogénèse de la formation

N° de l'épisode	Durée	Contenu
1	21'40''	introduction de la formation
2	28'06''	activité « étiquettes »
3	56'06''	éclairages théoriques
4	36'30''	quiz vocabulaire
5	34'43''	difficultés liées à l'enseignement-apprentissage de l'énergie
6	31'57''	modèle scientifique scolaire de l'énergie pour le collège
7	35'53''	chaînes énergétiques
8	23'36''	points de vigilance
9	26'47''	programmes et progressivité des enseignements liés à l'énergie
10	12'23''	activité « battle schéma électrique / chaîne énergétique »
11	15'57''	activité « défi : de l'énergie en bouteille »
12	15'43''	activité « la pile s'use »

TABLEAU 2
Caractéristiques de l'énergie pour l'enseignement

Propriété	Description
Grandeur	L'énergie est une grandeur à laquelle on peut attribuer une valeur et une unité
Abstrait	L'énergie est un concept abstrait formel
Puissance	Un débit d'énergie peut être associé à un transfert d'énergie
Conservation	Entre deux instants, la quantité d'énergie totale ne varie pas
Dégradation	Au cours d'une transformation, la qualité de l'énergie ne peut que se dégrader : l'énergie thermique augmente, et cette forme d'énergie est « moins utilisable » que les autres
Transfert	Si on considère deux systèmes distincts, il peut y avoir transfert d'énergie d'un système vers l'autre
Formes	Certaines des grandeurs mesurables associées au système lui confèrent une certaine quantité d'énergie particulière
Conversion	Le type de transfert peut être modifié
Transformation	L'énergie peut changer de forme au sein d'un système
Modification	La forme d'énergie cédée par un système est différente de la forme d'énergie reçue par l'autre système
Stockage	L'énergie est contenue dans des systèmes

Les formateurs présentent les chaînes énergétiques comme une représentation de l'ensemble du modèle scientifique scolaire de l'énergie qu'ils proposent. De ce fait, les éléments du modèle

et des chaînes sont souvent confondus. Le modèle proposé par les formateurs est ainsi déterminé à travers les éléments de langage des formateurs dans un premier temps puis dans les choix des chaînes montrées aux stagiaires. Nous avons donc effectué une transcription de leur discours, que nous avons analysé à partir des propriétés de l'énergie et de ses éléments caractéristiques (Tableau 2) (analyse lexicographique). Ensuite, les chaînes énergétiques présentées pendant la formation ont été relevées, puis analysées. Nous avons décrit le formalisme qui les régit, leur nature et les propriétés de l'énergie qui les sous-tendent, ainsi que leur finalité.

ANALYSE

Caractéristiques de l'énergie révélées par le discours des formateurs et les supports de la formation

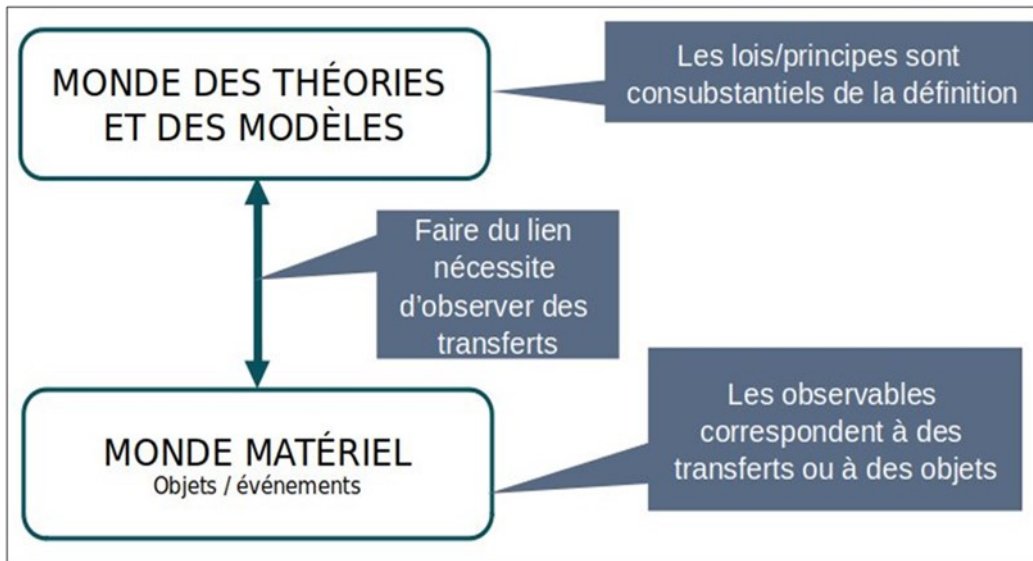
Dans un premier temps, nous avons relevé l'ensemble des caractéristiques de l'énergie qui ont été abordées par les formateurs pendant la formation et la manière dont ils les ont présentées. Le modèle scientifique scolaire de l'énergie mis en œuvre pendant la séance de formation reprend plusieurs **caractéristiques « habituelles »** de l'énergie telles que nous les avons précédemment décrites. L'énergie est présentée comme une grandeur abstraite dès l'épisode 3 ; la puissance est brièvement abordée pendant la formation (épisode 6) ; transformation et conversion d'énergie sont décrites de façon classique.

Dans la partie théorique, F1B évoque plusieurs **classifications des formes d'énergie**, dont deux présentées comme scientifiquement valides : (1) Distinction des formes d'énergie selon « les domaines de la physique » (énergies mécanique, thermique, électrostatique, chimique et nucléaire) ; (2) Distinction entre les énergies macroscopiques et microscopiques, chacune avec une forme cinétique et potentielle. La classification proposée pour l'enseignement en collège est une version réduite de la première (sans la forme électrostatique).

Dans le modèle proposé, l'énergie est exclusivement **stockée**, et les formes d'énergie sont identifiées parce qu'elles sont « stockables » : ce qui ne l'est pas ne peut être considéré comme de l'énergie. L'électricité et la lumière ne sont donc pas associées à des formes d'énergie. Cependant, F1B évoque la possibilité de stocker de l'énergie électrique et de l'énergie lumineuse, mais ne les prend pas en considération parce que « ça coûte très cher » et « on ne sait pas en faire des applications concrètes ».

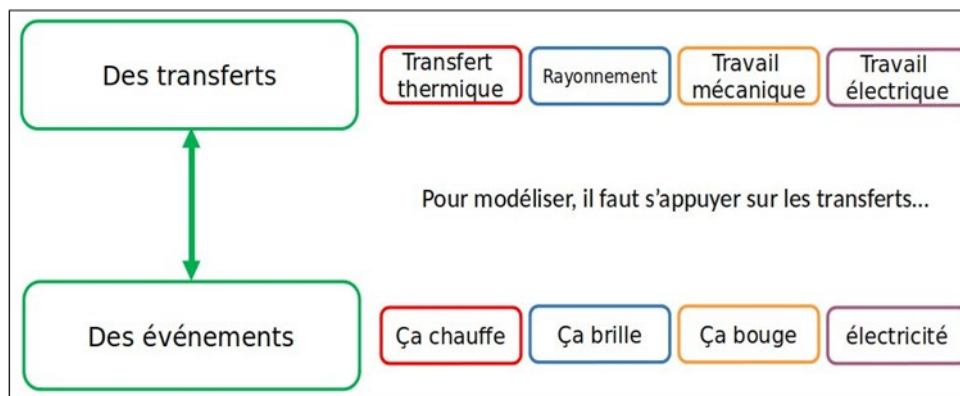
Les **transferts** ne sont pas présentés comme des flux d'énergie : les systèmes reçoivent et donnent des *transferts*, mais pas de *l'énergie*. Une discussion à ce sujet à l'initiative d'un enseignant-stagiaire a lieu, à l'issue de laquelle F1B concède que de l'énergie est bien donnée et reçue par les systèmes au cours des transferts, sans qu'il puisse la nommer (« on dit il reçoit un transfert machin et il donne un transfert truc (...) c'est bien de l'énergie et cette énergie on ne peut pas la qualifier (...) c'est ça la difficulté parce que / nous on a fait le choix qu'elle n'avait pas de forme »). Les transferts d'énergie sont présentés comme le « passage d'énergie d'un lieu à un autre ». Dans l'épisode 3, F1B distingue deux types de transferts : le *travail* et les *transferts thermiques*, auxquels il ajoute peu après le *rayonnement*. Travaux *mécanique* et *électrique* sont ensuite distingués. Les termes « travail », « transferts thermiques » et « rayonnement » n'ont pas été définis pendant la formation. Les transferts sont souvent considérés comme « observables » et leur place dans la modélisation (selon le modèle des deux mondes, proposé par Tiberghien et Vince, 2005) n'est pas claire. Si la diapositive 65 (Figure 3) les présente comme appartenant au monde des événements, la suivante (Figure 4) les inclut dans le monde théorique et les définit par leur équivalent dans le monde des événements.

FIGURE 3



Reproduction de la diapositive 65

FIGURE 4



Reproduction de la diapositive 66

Nous nous posons la question de la signification des événements décrits. Si « ça chauffe » fait référence à un objet dont la température augmente, alors cet événement est associé à une augmentation de l'énergie interne d'un système (non à un transfert thermique). Associer « ça brille » au rayonnement le limite à la lumière visible (pas de prise en compte UV / IR) ; par ailleurs, dans le langage courant, cette expression fait référence à un objet qui brille et non à la lumière qu'il émet. Associer « ça bouge » à un travail mécanique pose aussi question (que dire d'un objet en mouvement rectiligne uniforme ?), tout comme considérer l'électricité comme un événement « observable ».

Dans l'épisode 3, la **conservation de l'énergie** est présentée comme une propriété fondamentale de l'énergie. Cependant, certains propos tenus par les formateurs peuvent laisser croire que le principe de conservation de l'énergie n'est pas universel, qu'il n'est vérifié que pour certains systèmes. Les formateurs assimilent alors le concept d'énergie et l'énergie d'un système (e.g. « pour les systèmes courants // l'énergie se conserve pas »).

La **dégradation de l'énergie** ne fait pas partie des connaissances visées pendant cette formation ; elle y est évoquée de façon marginale, en opposant *énergie* et *entropie*. Les

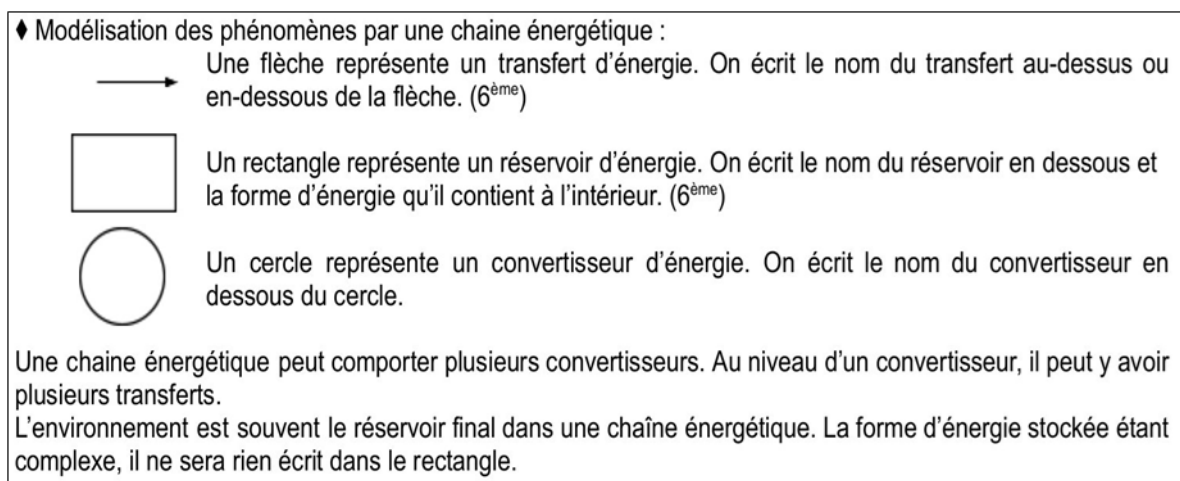
« pertes » sont souvent mentionnées, sans être définies, explicitées ou interprétées en regard du concept de dégradation de l'énergie (ou du second principe de la thermodynamique).

Nous avons vu que certaines propriétés de l'énergie ont été adaptées pour l'enseignement (en particulier *formes* et *transferts* d'énergie). Certains éléments, spécifiques au modèle scientifique scolaire de l'énergie et qui n'appartiennent pas au savoir scientifique relatif à l'énergie (Tableau 2), sont proposés pendant la formation : les *réservoirs* et les *convertisseurs* d'énergie. Un **convertisseur d'énergie** est présenté comme un dispositif ou un système qui modifie un type de transfert sans stocker d'énergie^{2,3} (e.g. « certains dispositifs ont la capacité / sans stocker // de recevoir un (...) type de transfert // et donner un autre type de transfert »). Pour un convertisseur « idéal », « le transfert reçu est totalement converti en un ou plusieurs transferts utiles », par opposition aux transferts « perdus ». Les convertisseurs sont implicitement identifiés au monde matériel (e.g. « certains dispositifs ont la capacité (...) de recevoir un (...) type de transfert » ; « le piston c'est un convertisseur » ; « les centrales (...) sont des convertisseurs »). Bien que les **réservoirs** aient été mentionnés à de multiples reprises avant la présentation du modèle, ils n'ont jamais été définis. Dans la fiche à destination d'élèves fournie aux enseignants-stagiaires, on lit que « l'énergie est stockée dans les réservoirs », présentés en opposition aux convertisseurs. Ceci suggère qu'une unique fonction (réservoir ou convertisseur) est associée à chaque système.

Représentation du modèle de l'énergie à travers les chaînes énergétiques

Une grande partie de cette formation a été consacrée au tracé de chaînes énergétiques (épisodes 6 à 12). Les formateurs ont fourni aux enseignants-stagiaires un document « modèle de l'énergie », créé à destination d'élèves de troisième, où figurent les règles de représentation des chaînes énergétiques (Figure 5). Pendant cette formation, seules des chaînes énergétiques de type *pendant* ont été présentées. Les chaînes de type *avant-après* ont été brièvement évoquées par un des formateurs, pour mettre l'accent sur le fait que les chaînes *pendant* ne représentent pas l'évolution d'une situation au cours du temps. Les chaînes *avant-après* n'ont pas été présentées comme des outils utiles pour l'enseignement, F1B précisant que « ça n'a jamais vécu parce que c'est très long » à représenter.

FIGURE 5



Règles de représentation des chaînes énergétiques

²C'est-à-dire : sans que la quantité d'énergie qu'il contient ne varie.

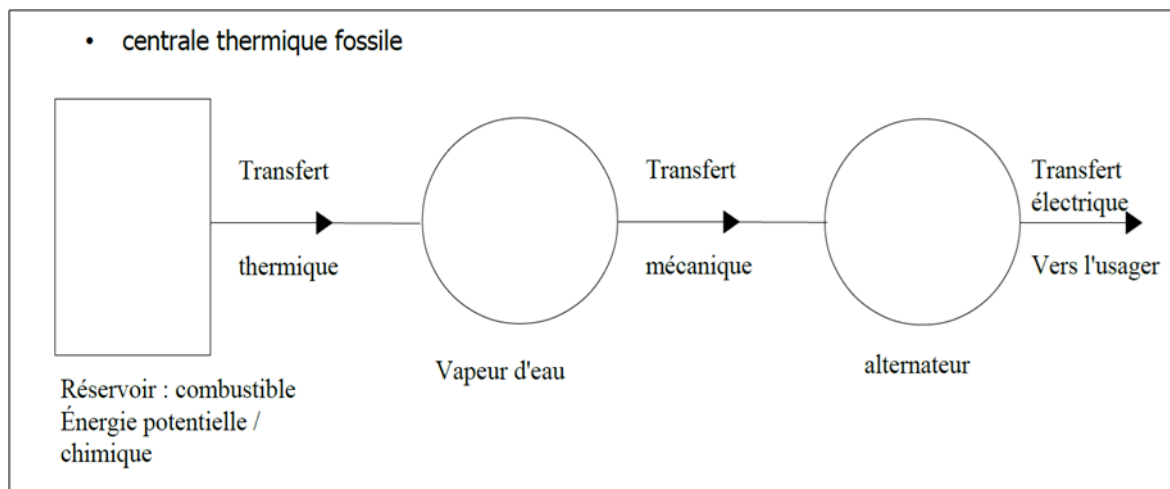
³Dans l'épisode 3, F1B souligne que ce type de systèmes n'« existe » pas. Cependant, lors de la présentation du modèle, les convertisseurs sont présentés comme des systèmes dont l'énergie se conserve.

Nous rappelons que cette représentation des phénomènes énergétiques est spécifique à l'enseignement et ne fait pas partie des modèles scientifiques de l'énergie. Les chaînes sont utilisées pour représenter le modèle, et nous permettent ici de confirmer les éléments du modèle décrits par le langage et les supports de la formation.

Les chaînes sont composées d'éléments spécifiques au modèle (réservoirs, représentés par des rectangles ; convertisseurs, représentés par des cercles), de transferts d'énergie (représentés par des flèches) et de formes d'énergie (inscrites dans les rectangles).

Comme l'illustre la Figure 6, **les transferts** sont représentés par des flèches soit classiques, soit dont la pointe est représentée au milieu du segment. Les formateurs déconseillent la représentation des transferts par des flèches épaisses, bien qu'ils évoquent la possibilité d'associer des épaisseurs de flèches à des valeurs de puissances.

FIGURE 6



Chaîne énergétique associée à une centrale thermique fossile (correction)

Un point de désaccord entre les formateurs concerne la représentation (ou non) **d'un réservoir final et d'un réservoir initial** sur les chaînes énergétiques. Pour F1A, cette représentation est nécessaire : elle considère qu'une chaîne qui ne commence ou ne finit pas par un réservoir n'est pas complète, arguant qu'il y a alors « un problème de conservation », ce avec quoi F1C est d'accord. Cependant, F1C et F1B ne représentent pas systématiquement de réservoirs initial et final. En particulier, les chaînes énergétiques mettant en jeu des centrales électriques posent problème. Le réservoir final associé à l'utilisation d'une centrale est discuté (le « réseau électrique » étant associé par les élèves aux « grands poteaux avec les fils »). F1A et F1C représentent les réservoirs initiaux associés aux différentes centrales électriques, mais F1B n'y est pas favorable (« parce que franchement le rectangle qui crache de l'électricité ») et préfère commencer la chaîne par une flèche.

Identification du modèle et de sa représentation par des chaînes énergétiques

L'identification entre le modèle et sa représentation par les chaînes énergétiques, déclarée par les formateurs, pose des limites à son utilisation. Nous revenons ici sur quelques exemples caractéristiques.

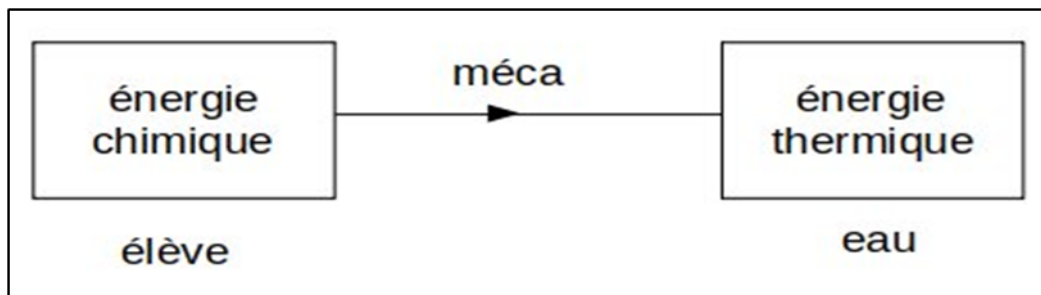
Dans l'épisode 7, un enseignant-stagiaire pose la question de la représentation de la transformation « énergie potentielle en énergie cinétique » sur la chaîne énergétique associée à une centrale hydraulique. F1C indique que les transformations d'énergie ne peuvent pas être représentées sur les chaînes énergétiques, ce qu'elle répétera plus tard (épisode 8). Si les transformations énergétiques ne peuvent pas être représentées sur les chaînes énergétiques

proposées par les formateurs, le fait qu'elles ne soient pas mentionnées comme faisant partie du modèle scientifique scolaire de l'énergie (document « modèle de l'énergie » créé à destination d'élèves) suggère une volonté d'identification des chaînes au modèle (tous les éléments du modèle devant être représentés sur les chaînes).

Les « pertes » d'énergie sont évoquées dans le document « modèle de l'énergie », où elles sont présentées sous un angle anthropocentré, par opposition aux transferts « utiles ». À plusieurs reprises, les formateurs disent qu'ils ne prennent pas en compte ces « pertes » dans les chaînes énergétiques qu'ils proposent pendant la formation, qui ne sont, selon eux, pas adaptées à la représentation de ces phénomènes.

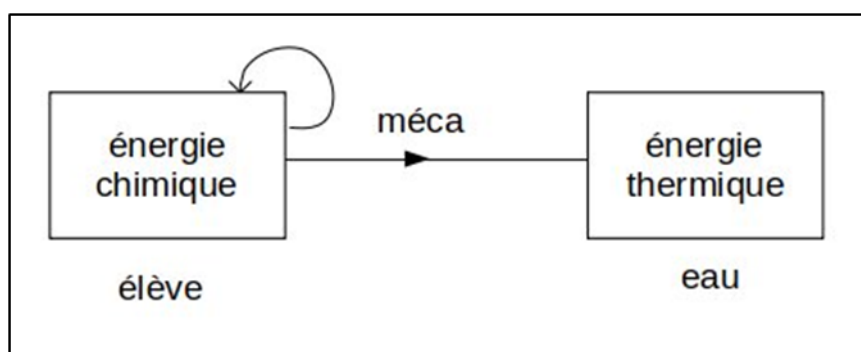
Une troisième limite est mentionnée en fin de formation, en lien avec les rétroactions qui peuvent avoir lieu entre systèmes. En fin de formation, il est demandé aux enseignants-stagiaires de réaliser la chaîne énergétique associée à une bouteille d'eau secouée ; la correction de cette chaîne est reproduite à la Figure 7. F1A fait remarquer que cette chaîne ne permet pas d'expliquer pourquoi la personne qui secoue la bouteille « chauffe », et explique que certains élèves proposent une représentation comportant une flèche supplémentaire, reproduite à la Figure 8. Cette représentation n'est pas commentée et aucune représentation alternative n'est proposée. Nous en déduisons que les rétroactions entre systèmes sont une limite des représentations de phénomènes énergétiques par des chaînes d'énergie.

FIGURE 7



Chaîne énergétique associée à une bouteille d'eau secouée (correction)

FIGURE 8



Chaîne énergétique associée à une bouteille d'eau secouée qui prend en compte le fait que l'élève "chauffe"

Une autre limite de ce modèle est liée à l'attribution d'une unique fonction énergétique (réservoir ou convertisseur) à chaque système et, de façon plus large, à chaque objet considéré. Si on s'intéresse à un cycliste sur son vélo en mouvement (mouvement accéléré), il est difficile (voire impossible) de ne pas considérer certains systèmes qui aient à la fois un rôle de réservoir et de convertisseur : le cycliste (ou une partie du cycliste) doit nécessairement composer le

réservoir initial d'énergie, or il est également inclus dans le réservoir final (son énergie mécanique augmente).

Les situations de décélération de véhicules (voiture, vélo...) et la représentation de ces situations n'ont pas été abordées.

SYNTHÈSE

Le modèle scientifique scolaire de l'énergie proposé aux stagiaires lors de cette formation prend en compte un grand nombre de caractéristiques de l'énergie, mais ne propose pas de représentation pour toutes. Les chaînes proposées pendant la formation prennent appui sur les transferts d'énergie. Elles permettent la représentation des conversions et des formes d'énergie et, dans une moindre mesure, son stockage (les formes d'énergie étant écrites dans les rectangles représentant des systèmes). Elles peuvent également représenter des puissances, susceptibles d'être indiquées sur les flèches.

Le Tableau 3 montre quelles caractéristiques ont été explicitées pendant la formation, quelles sont celles qui ont été prises en compte explicitement dans le modèle, et celles qui ont été représentées sur des chaînes énergétiques.

TABLEAU 3

Prise en compte des propriétés de l'énergie dans la formation

Propriété	Prise en compte dans la formation	Prise en compte dans le modèle scolaire	Représentation dans les chaînes
Grandeur	Oui	non	non
Abstrait	Oui	non	non
Puissance	Oui	oui	oui
Conservation	Oui	(oui)	non
Dégradation	non	non	non
Transfert	oui	oui	oui
Formes	oui	oui	(oui)
Conversion	oui	oui	oui
Transformation	oui	(non)	non
Modification	non	non	oui
Stockage	oui	oui	(oui)

Nous n'avons pas pu affirmer avec certitude la prise en compte de certaines de ces caractéristiques. La puissance n'a pas été mentionnée explicitement dans le modèle (épisode 6), mais il en a été question dans un des exercices, où elle a été représentée sur une chaîne : nous la considérons comme faisant partie du modèle. À l'inverse, bien que le concept de transformation ait été mentionné et défini pendant la formation, cela a été fait dans le but de distinguer transformation et conversion, et n'a plus été évoqué par la suite : nous supposons qu'il ne fait pas partie du modèle (sans pouvoir l'affirmer). La conservation de l'énergie est mentionnée dans le document « modèle de l'énergie », mais elle n'y a pas de rôle et n'est pas représentée sur les chaînes énergétiques : nous n'avons pas pu affirmer sa prise en compte dans le modèle. En ce qui concerne le stockage de l'énergie, associer les formes d'énergie à un réservoir représenté par un rectangle peut être mis en lien avec le fait que l'énergie soit stockée dans des systèmes. Les formes d'énergie qui figurent sur les chaînes sont uniquement celles dont la quantité varie au cours du temps, c'est pourquoi nous trouvons abusif de considérer que

les chaînes sont une illustration des formes d'énergie *en général*. Bien qu'étant de type *pendant*, les chaînes proposées mentionnent les formes d'énergie dont la quantité varie au cours du temps, c'est pourquoi elles permettent de visualiser les modifications d'énergie (l'énergie initialement présente dans un système sous une certaine forme se trouve ensuite sous une autre forme dans un autre système), qui devraient plutôt figurer sur des chaînes de type *avant-après*. Le flou qui entoure les limites que nous avons mises en évidence (et qui n'ont, pour la plupart, pas été explicitées par les formateurs) peut expliquer que ce modèle ait été présenté comme essentiellement descriptif, sans dimension explicative ou heuristique. Le choix de ne pas prendre en considération les chaînes de type *avant-après* restreint les possibilités de représentation pour la conservation de l'énergie, et restreint la portée du modèle, intrinsèquement lié aux chaînes qui le représentent. L'absence de prise en compte de la dégradation de l'énergie dans le discours des formateurs et le choix de ne pas représenter les « pertes » d'énergie sur les chaînes énergétiques rend ce modèle difficilement opérationnel pour discuter du défi énergétique et de l'utilisation des ressources énergétiques en sciences.

CONCLUSION

Le modèle scientifique scolaire de l'énergie promu par les formateurs est basé sur certaines propriétés de l'énergie en particulier (transferts, stockage et conversions) et sur un paradigme : la distinction entre transferts et énergie, l'énergie étant considérée comme exclusivement stockable.

Dans ce modèle, les phénomènes énergétiques sont représentés par des chaînes d'énergie de type *pendant*, qui associent une fonction (convertisseur ou réservoir) à chaque système ou objet pris en considération, la distinction entre le monde théorique et le monde matériel n'étant pas toujours claire.

Ces chaînes sont présentées comme une image de l'ensemble des caractéristiques de l'énergie qui composent le modèle scientifique scolaire promu par les formateurs, bien qu'ils ne les utilisent pas pour représenter les phénomènes de frottements (frottements mécaniques / effet Joule).

Le modèle scientifique scolaire proposé permet une bonne appropriation des conversions, des transferts et des formes d'énergie, et une mise en relation entre les différents domaines scientifiques, le concept d'énergie étant présenté comme transverse et unificateur.

Cependant, le modèle choisi a une portée limitée : il s'appuie largement sur une représentation par des chaînes énergétiques, qui ont un rôle essentiellement descriptif et ne représentent ni la conservation, ni la dégradation de l'énergie, propriétés pourtant fondamentales de ce concept scientifique.

RÉFÉRENCES

- Bächtold, M., Munier, V., Guedj, M., Lerouge, A., & Ranquet, A. (2014). Quelle progression dans l'enseignement de l'énergie de l'école au lycée ? Une analyse des programmes et des manuels. *Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies*, 10, 63-91.
- Bodzin, A. (2012). Investigating urban eighth-grade students' knowledge of energy resources. *International Journal of Science Education*, 34(8), 1255-1275.
- Borel, L. (1987). *Thermodynamique et énergétique* (v. 1, t. 1). Presses Polytechniques Romandes.

- Bruguière, C., Sivade, A., & Cros, D. (2002). Quelle terminologie adopter pour articuler enseignement disciplinaire et enseignement thématique de l'énergie, en classe de première de série scientifique ? *Didaskalia*, 20, 67-100.
- Brunet, É., Hocquet, T., & Leynoras, X. (2019). *Cours de thermodynamique*. Sorbonne Université. Retrieved from <http://www.phys.ens.fr>.
- Diu, B., Guthmann, C., Lederer, D., & Roulet, B. (2007). *Thermodynamique*. Hermann.
- Ducourant, D. (2019). Autour du mot énergie – Partie 1. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 113(1010), 77-120.
- Feynman, R., Leighton, R., & Sands, M. (2014). *Le cours de physique de Feynman – Mécanique 2*. Dunod.
- Gaidioz, P., Monneret, A., Tiberghien, A., Bécu-Robinault K., Besson, G., Blache, M.-J., Chastan, J.-M., Clavel, C., Colonna, A.-M., Collet, G., Gibert, D., Longère, G., Le Maréchal, J.-F., Strobel M.-P., & Vagnon, H. (1998). *Introduction à l'énergie. Contenus de l'enseignement et compléments didactiques*. Lyon: Centre Régional de Documentation Pédagogique de Lyon.
- Gaidioz, P., & Tiberghien, A. (2003). Un outil d'enseignement privilégiant la modélisation. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 97, 71-83.
- Kermen, I. (2018). *Enseigner l'évolution des systèmes chimiques au lycée*. Rennes: Presses Universitaires de Rennes.
- Koliopoulos, D., & Ravanis, K. (2000). Élaboration et évaluation du contenu conceptuel d'un curriculum constructiviste concernant l'approche énergétique des phénomènes mécaniques. *Didaskalia*, 16(1), 33-56.
- Lancor, R. (2014). Using student-generated analogies to investigate conceptions of energy: A multidisciplinary study. *International Journal of Science Education*, 36(1), 1-23.
- Lemeignan, G., & Weil-Barais, A. (1992). L'apprentissage de la modélisation dans l'enseignement de l'énergie. In J. L. Martinand et al. (Éds.), *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences* (pp. 171-232). Paris: INRP.
- Millar, R. (2005). *Teaching about energy* (Report). York: University of York.
- MENESR-BO / Ministère de l'Éducation Nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, Bulletin Officiel spécial (2015). *Programme d'enseignement du cycle des approfondissements (cycle 4)*. N°11, 26. 11. 2015.
- Pintó, R., Couso, D., & Gutierrez, R. (2005). Using research on teachers' transformations of innovations to inform teacher education. The case of energy degradation. *Science Education*, 89, 38-55.
- Prigogine, I., & Kondepudi, D. (1999). *Thermodynamique – des moteurs thermiques aux structures dissipatives*. Odile Jacob.
- Scherr, R. E., Close, H. G., McKagan, S. B., & Vokos, S. (2012). Representing energy. I. Representing a substance ontology for energy. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 8(2), 020114.
- Tiberghien, A., & Vince, J. (2005). Études de l'activité des élèves de lycée en situation d'enseignement de la physique. *Cahiers du Français Contemporain*, 10, 153-176.
- Trumper, R. (1998). A longitudinal study of Physics students' conceptions on energy in pre-service training for high school teachers. *International Journal of Science Education and Technology*, 7, 311-318.
- Vince, J., & Tiberghien, A. (2015). Pourquoi n'est-il pas pertinent de faire de l'énergie électrique un concept de physique dans un programme d'enseignement ? *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 976(109), 1103-1109.

Watts, D. M. (1983). Some alternative views of energy. *Physics Education*, 18(5), 213-217.