
Analyse et modélisation de l'apprentissage des notions de l'énergie dans l'environnement "CHENE"

Madame Diana BENTAL
Madame Andrée TIBERGHEN
Monsieur Michael BAKER
Madame Olga MEGALAGAKI
CNRS-IRPEACS, Équipe "COAST",
École Normale Supérieure de Lyon,
46 allée d'Italie, 69364 Lyon cedex 07.

RESUME : Ce papier est centré sur une recherche menée dans le cadre du "projet CHENE" qui a pour but de favoriser l'apprentissage de la modélisation en physique, dans le cas de l'énergie. Après avoir décrit l'architecture de CHENE, en cours d'élaboration, nous décrivons un modèle IA de l'activité de modélisation des élèves (le système ModelCHENE), et nous discutons de sa validité en comparaison avec des protocoles d'élèves. ModelCHENE met en évidence une difficulté majeure de cet apprentissage, à savoir la nécessité d'élaborer des "abstractions intermédiaires" entre le champ expérimental et la théorie-modèle.

1. Introduction

La modélisation est une activité fondamentale dans les sciences (en particulier en physique) qui nécessite la mise en relation de deux "mondes" de connaissances, l'un relatif à la théorie et ses modèles et l'autre au monde réel. Cette activité pose des difficultés spécifiques pour les apprenants car, bien qu'ils possèdent des connaissances développées au sein de chaque "monde", ils peuvent difficilement établir des *relations* entre les deux.

Du côté du "monde" de la "théorie-modèle", les recherches en didactique de la physique et en psychologie cognitive ont montré que des apprenants qui sont capables de résoudre des problèmes "quantitatifs" peuvent souvent atteindre le niveau universitaire sans avoir réellement compris la nature des relations entre la théorie, le modèle et le champ expérimental de référence [Johsua & Dupin 84].

Environnements Interactifs d'Apprentissage avec Ordinateur, Eyrolles, Paris, 1995

Cette difficulté est d'autant plus importante que, du côté du "monde réel", tout apprenant a des connaissances très développées, fortement ancrées dans l'expérience quotidienne ([Driver, Guesne & Tiberghien 84],[Tiberghien 84], [Viennot 93]), mais a souvent des difficultés pour trouver une cohérence entre ces connaissances et des connaissances scolaires de la physique. Un problème semble donc être d'établir des relations entre ces deux domaines de connaissances.

La nature de cet objet d'étude nous a amenés à proposer une nouvelle utilisation de l'EIAO dans l'apprentissage de la physique. Pour la physique, les EIAO ont été utilisés soit comme outils de laboratoire, soit comme "micromondes" pour "découvrir" les lois de la physique, soit comme simulations numériques ([INRP - UdP 92],[Tiberghien & Mandl 92]). Pour le problème spécifique de *la modélisation de l'énergie en physique* par des élèves, nous avons élaboré un EIAO "CHENE" ("CHaîne ENERgetique") en tant qu'outil de recherche et d'enseignement. L'interface graphique CHENE est utilisée par les élèves dans une séquence d'enseignement expérimental pour construire des "chaînes énergétiques" relatives à une série de situations expérimentales, et pour fournir des informations nécessaires à la réalisation de ces tâches. Dans notre cas l'ordinateur est donc utilisé pour permettre aux élèves de construire une "sémantique" pour un modèle didactique, qui est contraint par une syntaxe simple [Tiberghien 94]. Par la suite le système doit fournir des informations sur l'activité cognitive des élèves ce qui permettrait aux élèves de *vérifier* leurs solutions, et au professeur de les aider dans cette activité.

Ce papier est centré sur une recherche spécifique menée dans le cadre du "projet CHENE", où le but est de construire un modèle de *l'activité de modélisation des élèves*, fondé sur des méthodes de l'intelligence artificielle : il s'agit du système ModelCHENE. Dans la suite du papier nous décrivons la séquence d'enseignement expérimentale dans laquelle CHENE est utilisé, et l'architecture générale de CHENE, en cours d'élaboration, dans laquelle ModelCHENE sera utilisé. Par la suite nous décrivons ModelCHENE, et nous discutons sa validité en comparaison avec une analyse des protocoles d'interactions produits par des groupes de deux élèves travaillant ensemble avec CHENE.

2. Étude de l'apprentissage de la modélisation en physique : le projet "CHENE"




L'apprentissage d'une notion comme l'énergie, même à un niveau très élémentaire, ne peut se faire que dans la durée. Il s'inscrit dans un enseignement, souvent d'ailleurs plus court que la durée d'acquisition. Nous avons mis au point et étudiés une situation "prototype d'enseignement" d'environ 8 heures dans laquelle les élèves réalisent une expérience (monde objets - événements) et travaillent sur un texte introduisant un germe de la théorie/modèle de l'énergie (Figure 1) incluant les éléments de la représentation symbolique de la chaîne énergétique.

L'enseignement consiste en 4 parties : (1) les élèves doivent décrire par écrit une expérience et analyser ensuite le texte qu'ils ont produit. Cette analyse a pour but de créer, chez eux, un *besoin intellectuel* d'une nouvelle connaissance du monde théorie/modèle; (2) une activité de modélisation pour différentes expériences. Le but est que l'apprenant construise un sens de la théorie/modèle dont le texte est fourni quand il établit des relations entre sa construction théorique et l'expérience; (3) le développement du modèle à l'initiative des apprenants pour interpréter les expériences pour lesquelles la "connaissance à enseigner" utilise deux quantités physiques (énergie et puissance) et des relations quantitatives; (4) l'élargissement du

champ d'application du modèle quantitative avec construction d'un nouveau paramètre (rendement), et une idée qualitative de la "qualité" de l'énergie.

Le type de tâche, dont l'étude est présentée ici, se situe au point 2 de l'enseignement. Les informations données aux élèves pour réaliser cette tâche sont :

- un texte (écran) donnant le "germe" de théorie/modèle sur l'énergie (Figure 1)
- une expérience;
- une consigne : "En utilisant le "modèle énergétique" construisez la chaîne énergétique correspondant à l'expérience";
- des informations présentant des situations concrètes qui peuvent être interprétées par le "germe" de théorie/modèle donné aux élèves..

<p>L'énergie peut être caractérisée par :</p> <p>* ses propriétés:</p> <p>- Stockage Le réservoir stocke l'énergie</p> <p>- Transformation Le transformateur transforme l'énergie</p> <p>- Transfert Entre un réservoir et un transformateur, ou entre deux réservoirs, ou entre deux transformateurs, il y a transfert d'énergie. Les différents modes de transfert de l'énergie d'un système à un autre sont:</p> <p>- <u>le travail</u>. On considère qu'il y a transfert d'énergie sous forme de travail mécanique quand il y a déplacement d'un objet ou d'une partie d'un objet lors d'une interaction, sous forme de travail électrique quand il y a du courant électrique (déplacement de charges)</p> <p>- <u>la chaleur</u>.</p> <p>- <u>le rayonnement</u>.</p> <p>L'énergie peut également être caractérisée par:</p> <p>*un principe fondamental de conservation L'énergie se conserve quels que soient les transformations qu'elle subit, ses transferts et ses formes de stockage</p>	<p>Pour construire une chaîne énergétique</p> <p>* il faut utiliser les symboles dessinés :</p> <p> pour réservoir</p> <p> pour transfert</p> <p> pour transformateur</p> <p>en indiquant :</p> <p>- dans chaque rectangle le système correspondant à l'expérience;</p> <p>- sous chaque flèche le mode de transfert; en mettant</p> <p>- une flèche par mode de transfert.</p> <p>* il faut tenir compte des règles suivantes:</p> <p>- une chaîne énergétique complète commence et se termine par un réservoir;</p> <p>- le réservoir initial est différent du réservoir final.</p>
---	--

Informations données aux élèves présentant le "germe" de théorie / modèle

Figure 1

Les élèves réalisent successivement ce type de tâches pour 3 expériences différentes qui consistent en : (1) une pile reliée, par deux fils, à une ampoule qui brille ; (2) un objet suspendu à un fil, au départ complètement enroulé sur l'axe d'un moteur, une lampe reliée aux bornes du moteur. Quand on laisse descendre l'objet la lampe s'allume ; (3) une pile reliée à un moteur électrique. Sur l'axe du moteur est fixé un fil. Un objet est suspendu à ce fil, au départ, complètement déroulé. On ferme le circuit du moteur, le fil s'enroule sur la poulie et l'objet monte. A noter que les élèves disposent d'une bonne solution de la tâche 1 après sa réalisation (voir la solution "experte" dans la figure 5 plus loin) mais pas de solution entre les tâches 2 et 3.

La modélisation de la résolution de problème présentées ici s'inscrit dans un projet plus large qui vise à étudier l'apprentissage de la modélisation dans une situation de coopération entre élèves et professeur(s), reliés à distance dans un réseau. Dans cette situation nous analyserons la résolution et la solution réalisées

par les élèves afin d'aider soit le maître avant qu'il interagisse avec les élèves pour la correction (voir par exemple [Teutch & Vivet 93]) soit les élèves eux-mêmes dans une activité de vérification. Actuellement cinq composantes de CHENE sont réalisées : (1) une interface graphique qui permet la réalisation de chaînes énergétiques ; (2) des outils "auteur" qui permettent aux chercheurs de définir une séance de travail, de créer des écrans d'information à fournir aux élèves, et de relier des informations spécifiques à une séance donnée ; (3) un système de traçage d'activité des élèves (des types d'actions à tracer peuvent être définis par le chercheur), qui permet aussi de "re-jouer" l'activité de construction pas-à-pas. (4) le système de modélisation de la résolution de problèmes "ModelCHENE" (§3 ci-dessous. (5) une interface de communication entre élèves, utilisée en réseau. Ces composantes ont été développées en SmallTalk.

Nous considérons qu'une telle architecture, et la situation d'apprentissage à laquelle elle est adaptée, comporte l'avantage de bien respecter les rôles et compétences spécifiques des acteurs concernées (professeurs et élèves), et de bien exploiter les avantages d'une technologie éducative avancée. Elle constitue également un terrain de recherche très riche pour l'étude de l'enseignement à distance.

Dans la section suivante nous décrivons un module central de CHENE, le système de modélisation de résolution de problèmes par des élèves : "ModelCHENE".

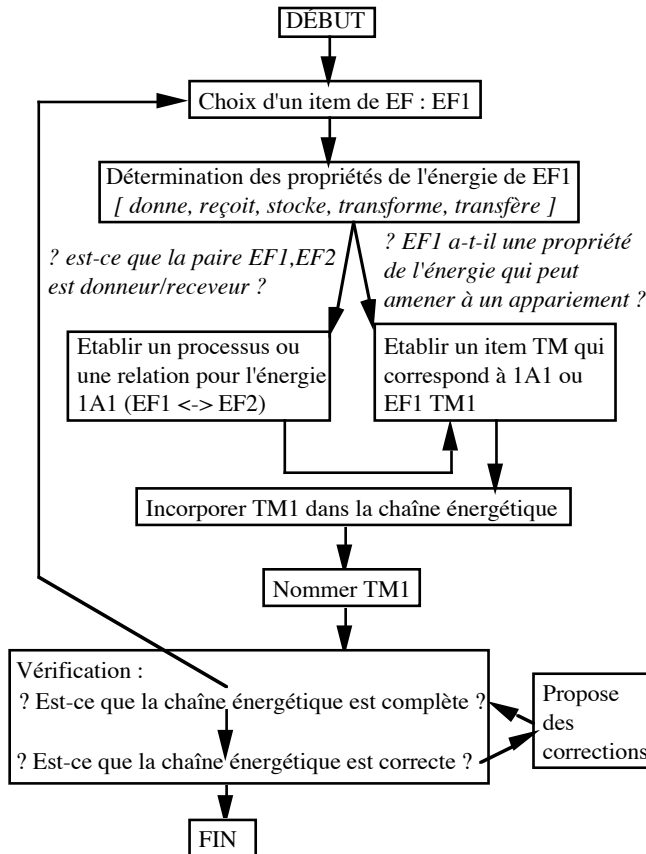
3. Modélisation de la résolution de problèmes : "ModelCHENE"

ModelCHENE est un résolveur de problème qui modélise la façon dont les élèves établissent des liens entre un modèle théorique formel de l'énergie et des expériences de physique. Le résolveur de problème dispose d'une description formelle de la théorie/modèle et d'une expérience, il construit une chaîne énergétique (représentation symbolique dans les termes du modèle) correspondant à cette expérience. Le système vise à modéliser les connaissances que l'élève mobilise pour le problème et la façon dont il résout le problème. Il prend en compte des aspects de la *forme* de la chaîne énergétique, de l'*ordre* dans lequel cette chaîne est créée, et des propositions que l'élève exprime pendant le dialogue (comme le montrent les analyses de protocole). ModelCHENE construit les chaînes énergétiques pour trois expériences, "pile-ampoule", "objet qui tombe" et "objet qui monte" (voir la §2 précédente). Ces chaînes énergétiques sont celles attribuées à un élève "abstrait" idéal. Pour la première expérience "pile-ampoule", ModelCHENE modélise aussi différentes solutions fournies par des élèves, ainsi il rend compte des écarts entre les élèves en utilisant des représentations différentes du champ expérimental et de la théorie/modèle.

ModelCHENE est implémenté en CLIPS 6.0 sur Macintosh. CLIPS est un "system expert shell" qui offre un langage de description de règles, un moteur d'inférence et la capacité de construire des structures objets et des programmations orientée objet. Nous avons utilisé la structure objet de CLIPS pour réaliser la division des connaissances en différents domaines, et les règles pour implémenter les processus de raisonnement. Les classes sont implémentées en *classes* CLIPS; les entités du modèle en *instances* CLIPS; les propriétés et les relations en *slots* CLIPS. Les règles d'inférence sont implémentées en *règles* CLIPS individuelles. Les opérateurs sont implémentés en utilisant une combinaison des *règles* et des *assertions* CLIPS.

3.1 Analyse de la tâche

Les sous-tâches que nous avons identifiées dans la construction de la chaîne énergétique consistent à : (1) choisir les parties appropriées du champ expérimental (ou les abstractions appropriées du champ expérimental) qui sont à représenter dans la chaîne et sélectionner les éléments de la théorie/modèle (réservoirs, transformateurs et transferts); (2) mettre en relation ces éléments; (3) nommer correctement chaque élément. Cette nomination est différente pour les transferts d'une part et les réservoirs et transformateurs d'autre part; on doit donner aux transferts le nom de l'un des modes de transfert de l'énergie donnés dans le modèle alors que pour les réservoirs et transformateurs on doit donner le nom du système physique.



Analyse de la tâche de construction de chaînes énergétiques

Figure 2

Notre analyse des tâches sépare le processus de résolution de problème en trois phases principales (voir figure 2) : construction, vérification et correction. Pendant la construction, le résolveur de problème raisonne sur les items du champ expérimental et crée les éléments de la chaîne énergétique qui correspondent à ces

items. Le résolveur de problème crée aussi des abstractions à partir du champ expérimental et les utilise dans la chaîne.

La construction est la phase majeure de raisonnement dans ModelCHENE. Pendant cette phase, ModelCHENE choisit les entités du champ expérimental, détermine les propriétés clés qui lui permettent d'établir les appariements avec les éléments de la chaîne et établit les appariements. Les deux propriétés clés de l'énergie sont : un objet donne et/ou un objet reçoit de l'énergie.

ModelCHENE a deux stratégies possibles pour choisir une entité du champ expérimental. Tout d'abord ModelCHENE essaie d'identifier "une cause première" en utilisant un raisonnement causal linéaire. Un objet qui donne de l'énergie et qui n'en reçoit pas est un candidat. C'est le cas de la pile. Quand une "cause première" a été identifiée ModelCHENE linéarise toutes les entités en assignant une valeur d'un entier correspondant à la position topologique de chaque objet dans l'expérience. Ensuite, ModelCHENE permet de déterminer les propriétés relatives à l'énergie de chaque entité du champ expérimental. Ces propriétés sont dérivées des connaissances de sens commun en association avec des observations sur l'objet.

La propriété d'appariement ne fonctionne que si une entité du champ expérimental a la même propriété qu'une classe de la théorie/modèle; alors l'entité du champ expérimental doit être représentée dans la théorie/modèle par une instance de cette classe. Ainsi, quand il est connu qu'un objet **stocke** ou **transforme** l'énergie, il s'en suit que cet objet peut être représenté par un réservoir ou un transformateur et un élément est créé dans la chaîne. Pour les transferts, quand un objet **donne** de l'énergie et est connecté à un objet qui **reçoit** de l'énergie avec le même mode de transfert, alors un transfert d'énergie peut être créé entre eux.

Pendant la vérification, le résolveur de problème vérifie que la chaîne énergétique respecte les contraintes de la théorie/modèle, par exemple il vérifie que la chaîne énergétique commence et se termine par un réservoir. Si la phase de vérification reconnaît un problème, alors durant la phase de *correction* la chaîne énergétique peut être corrigée afin de respecter les contraintes de la théorie/modèle. ModelCHENE répète ces trois phases jusqu'à ce que ou la phase de vérification indique que la chaîne est correcte ou autrement ModelCHENE peut ne pas trouver la façon de corriger les problèmes qu'il a identifiés.

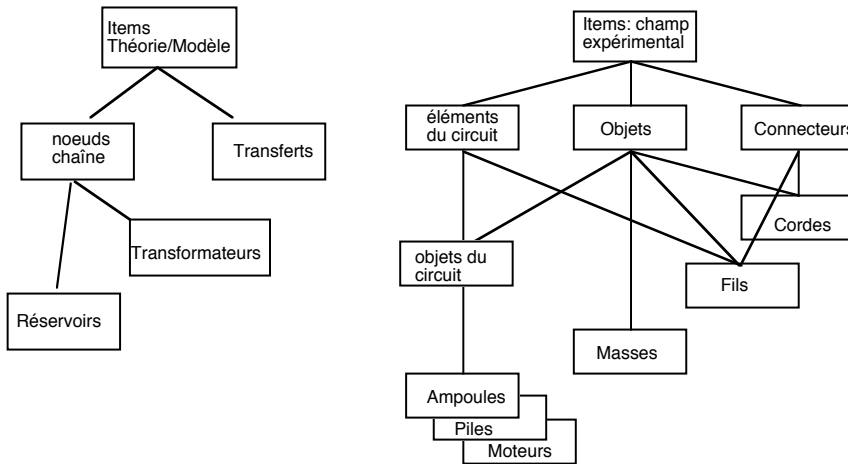
3.2 Représentation des connaissances

ModelCHENE inclut des connaissances à long terme et une mémoire de travail à court terme. Les connaissances à long terme sont dans la forme des connaissances schématiques générales, des règles d'inférence et des opérateurs. La mémoire de travail consiste en des instances spécifiques de la connaissance schématique.

La connaissance schématique est divisée en quatre domaines de connaissances : (1) théorie/modèle (réservoir, transformateur, transfert); (2) champ expérimental (pile, ampoule, fils ...); (3) électrocinétique; (4) abstractions intermédiaires (chaleur, lumière, environnement, ...). La théorie/modèle contient les éléments qui peuvent apparaître dans la chaîne énergétique. Le champ expérimental contient les connaissances concernant les items physiques qui sont dans l'expérience. Les abstractions intermédiaires contiennent les connaissances qui ne sont ni au niveau des connaissances de base de la théorie/modèle ni à celle du champ expérimental. Le domaine de l'électrocinétique contient les connaissances sur des items associés à l'électricité, spécialement la notion d'un circuit. Dans chaque domaine de connaissances, les connaissances schématiques sont formalisées en hiérarchie de classes générales et de sous-classes. Classes et entités sont décrites par des

propriétés avec des valeurs. Par exemple le fait qu'une ampoule brille est représenté dans l'entité ampoule comme une propriété appelée **propriété-observationnelle** avec la valeur **brille**.

Les classes sont organisées en hiérarchie et il y a quatre hiérarchies séparées de classes et de sous-classes, une pour chaque domaine de connaissances. Au sommet de chaque classe hiérarchique il y a le domaine de connaissance; au bas il y a les classes pour lesquelles nous pouvons avoir des entités spécifiques. La pile dans l'expérience 1 est une entité dans la classe générale des piles; le réservoir qui correspond à la pile est une entité dans la classe des réservoirs. Le réservoir qui correspond à l'environnement dans l'expérience 1 est une entité différente dans la même classe générale des réservoirs. La structure de classes pour la théorie/modèle et le champ expérimental est montrée dans la figure 3.



Les structures de classe pour la théorie/modèle et le champ expérimental

Figure 3

A mesure que progresse le résolveur de problèmes, les nouvelles propriétés sont dérivées pour les entités, les entités sont créées, et de nouvelles relations sont créées entre les entités.

Un exemple de règle d'inférence spécifique simple est :

```
;; L'ampoule brille, alors elle "donne" de la lumière
SI une ampoule B a la propriété de briller
ALORS B donne de la lumière
```

Un exemple d'un opérateur de résolution de problème très général est :

```
;; La propriété de l'opérateur appariement
SI une entité E du champ expérimental a la propriété P avec la
valeur V et une classe théorie/modèle T (réservoirs,
transformateurs ou transferts) a la même propriété P avec la
valeur V
ALORS créer une entité dans la classe T et associer la avec E
```

3.3 La résolution par ModelCHENE d'un problème : l'exemple du "pile-ampoule" par "l'étudiant abstrait"

Au départ de l'expérience pile-ampoule, la mémoire de travail consiste en des entités pour chaque item du champ expérimental, plus une abstraction intermédiaire pour l'environnement : (1) il y a une pile, une ampoule et deux fils (EF) ; (2) ces éléments sont tous connectés (EF) dans un circuit (EK); (3) l'ampoule brille et est chaude (EF); (4) la pile stocke de l'énergie (EF); (5) l'environnement entoure l'expérience et stocke de l'énergie (IA).

Une règle de sens commun établit que les piles stockent et donnent de l'énergie, alors la pile est la "cause première" et donc le point de départ de la chaîne. Le raisonnement démarre alors à partir de la pile. La pile stocke de l'énergie, alors l'opérateur ayant la propriété d'appariement l'identifie comme le premier réservoir dans la théorie/modèle. Un réservoir est créé et nommé pile. Le raisonnement porte ensuite sur les fils qui sont connectés à la pile. Ceux-ci n'ont pas de propriétés pertinentes et ainsi aucune inférence n'est faite à leur propos. Puis le raisonnement porte sur l'ampoule connectée aux fils. Une règle de sens commun dit qu'une ampoule dans un circuit électrique **reçoit** de l'électricité. D'autres règles disent que l'ampoule est **chaude** et alors donne de la chaleur, et qu'elle **brille** et alors donne de la lumière. Chaleur, lumière et travail électrique sont toutes des formes de transfert de l'énergie. L'ampoule **reçoit** de l'énergie transférée sous une forme et **donne** sous une autre forme et alors elle **transforme** l'énergie. L'opérateur ayant la propriété d'appariement identifie l'ampoule comme un transformateur dans la théorie/modèle. Un transformateur est créé et nommé ampoule. A ce point, le résolveur de problème a l'information que la pile donne de l'électricité et l'ampoule la reçoit. Une règle relie cette information et infère que la pile donne de l'électricité à l'ampoule. Une autre règle crée cela comme un processus de l'énergie pour l'électricité. Les processus de l'énergie sont associés directement à des transferts dans la théorie/modèle, ainsi un transfert est créé du réservoir (pile) au transformateur (ampoule) et nommé avec le mode de transfert "travail électrique".

Réservoir-1	Transformateur-1	Transfert-1
domaine (théorie-modèle) classe (réservoirs) stocke (énergie) sorties (transfert-1)? étiquette (pile) représente (pile-1)	domaine (théorie-modèle) classe (transformateurs) transforme (énergie) entrées (transfert-1) sorties (transfert-2, transfert-3) étiquette (transformateur) représente(ampoule-1)	domaine (théorie-modèle) classe (transferts) de (réservoir-1) à(transformateur-1) étiquette (travail-électrique) représente(électricité-1) (dans les abstractions intermédiaires)
Transfert-2	Transfert-3	Réservoir-2
domaine (théorie-modèle) classe (transferts) de (transformateur-1) à (réservoir-2) étiquette (chaleur) représente(chaleur-1) (dans les abstractions intermédiaires)	domaine (théorie-modèle) classe (transferts) de (transformateur-1) à (réservoir-2) étiquette (rayonnement) représente(lumière-1) (dans les abstractions intermédiaires)	domaine (théorie-modèle) classe (réservoirs) stocke (énergie) inputs (transfer-2, transfer-3) étiquette (environnement) représente (environnement) (dans les abstractions intermédiaires)

Les réservoir, transformateurs et transferts créés pendant la résolution de problème pour l'expérience 1 (modèle idéal).

Figure 4

L'environnement stocke de l'énergie et est associé à un réservoir. L'ampoule donne de la chaleur et de la lumière, qui sont absorbées par l'environnement, alors l'environnement reçoit de la chaleur et de la lumière ce qui conduit à créer les processus énergie. De ces processus, deux transferts sont créés du transformateur (ampoule) au second réservoir (environnement), respectivement nommés avec les modes "chaleur" et rayonnement".

ModelCHENE vérifie la chaîne et trouve qu'elle remplit toutes les règles. La chaîne est imprimée. La figure 5 (plus loin) "étudiant idéal" montre sous forme de diagramme la chaîne énergétique que ModelCHENE a créée, et la figure 4 montre la description interne, donnée par ModelCHENE, des entités de la chaîne énergétique.

3.4 Abstractions intermédiaires

La résolution de problème de ModelCHENE repose sur l'utilisation d'abstractions intermédiaires. Ce sont soit : (1) des éléments qui pourraient être à la fois être relatifs au champ expérimental décrit en langage naturel et à la théorie/modèle, (2) des éléments du champ expérimental pour le physicien mais qui nécessite une construction conceptuelle si on se réfère aux connaissances quotidiennes.

Dans le premier cas, nous avons recensé 3 entités : lumière, chaleur et énergie. Lumière et chaleur désignent à la fois des concepts physiques et des phénomènes observables relatifs à l'éclairage ou au chauffage (quelle chaleur, la lumière est forte, ...). Ainsi, ces deux termes sont dans le texte théorie/modèle pour désigner deux des modes de transfert de l'énergie. Cependant, dans cette théorie/modèle, **ils ne sont pas au même niveau** que réservoir, transformateur et transfert qui désignent les grandes catégories pour découper le champ expérimental. Ces termes de lumière et chaleur appartiennent à une des catégories, le transfert. Il s'agit de processus du point de vue de la théorie physique formalisée dans ModelCHENE. On pourrait dire pareil du terme "travail" dans la mesure où il désigne également un processus. Cependant, le concept de travail en physique a un sens très éloigné de celui de la vie quotidienne et donc de la description en langage naturel du champ expérimental. C'est pour cela qu'il a été mis d'emblée dans le monde théorie/modèle. Le terme "énergie" fait partie du langage naturel, sans désigner effectivement un phénomène, il est soit associé à des objets comme attribut soit une entité; on dira qu'une pile a de l'énergie, qu'on va payer sa consommation d'énergie, ou qu'il faut économiser de l'énergie, ... Il est également un concept en physique qui peut être à un haut niveau de formalisation. Ces mots de "lumière", "chaleur" et "énergie" sont, même pour le physicien, utilisés à la fois pour désigner des phénomènes et pour désigner des concepts, on parlera de phénomènes lumineux comme de phénomènes énergétiques, ou encore de phénomènes calorifiques. Le physicien parlera aussi de quantité d'énergie, de chaleur, de fonction énergie, Ainsi, cette double appartenance du signifiant, pose des questions importantes pour la modélisation. C'est pour cela qu'il était nécessaire de faire un traitement spécifique pour ce type de termes.

Dans le deuxième cas, nous avons une entité : **l'environnement**. Elle est un terme que l'expert mettrait dans le champ expérimental puisqu'il est relatif à l'ensemble des objets physiques de l'univers, on aurait également pu mettre "l'univers". C'est en même temps une reconstruction intellectuelle puisqu'il s'agit d'un seul terme désignant un ensemble extrêmement vaste dont la nécessité de regroupement vient de la théorie physique qui introduit la notion de système isolé pour la conservation de l'énergie. C'est donc un découpage du réel à partir d'un

besoin théorique et qui est en même temps très éloigné du découpage que l'on fait dans la vie quotidienne. Ce n'est pas le cas par exemple pour pile et ampoule.

Nous discutons ultérieurement du rôle de ces abstractions intermédiaires dans la modélisation des solutions des élèves.

4. Discussion : relations entre analyse et modélisation (de la modélisation)

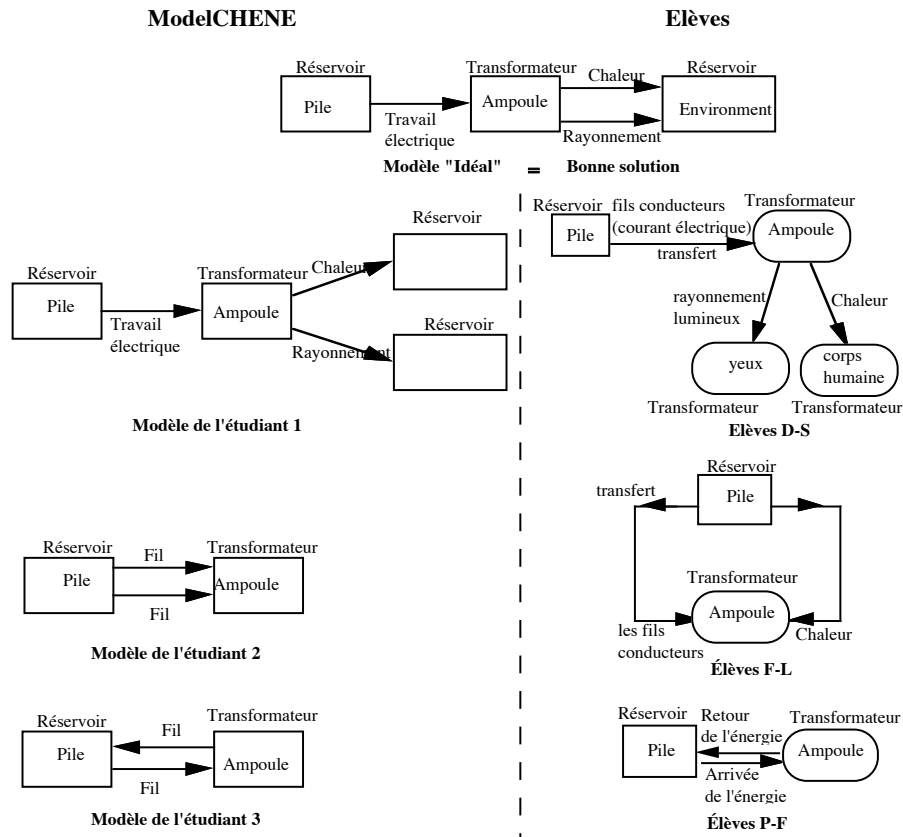
Nous discutons ci-dessous de la comparaison entre les résolutions réalisées par ModelCHENE et par les élèves. En ce qui concerne les élèves, les données consistent en 9 protocoles correspondant aux trois tâches faites par trois groupes de deux élèves. ModelCHENE produit, pour l'expérience 1, une solution correspondant à l'élève idéal, considérée comme une bonne solution. ModelCHENE permet également d'obtenir d'autres solutions proches de celles réellement produites par les élèves en supprimant partiellement ou totalement un des domaines de connaissance de la mémoire à long terme : les abstractions intermédiaires.

Supprimer simplement l'environnement des connaissances initiales conduit à la création d'une chaîne énergétique qui est similaire à celle de l'étudiant idéal mais avec deux réservoirs finaux, l'un recevant la chaleur et l'autre la lumière, aucun des deux ne sont nommés (figure 5, modèle étudiant 1). Ces deux réservoirs sont créés parce que la phase de vérification établit que la chaîne énergétique ne peut pas se terminer avec deux transferts allant nulle part - elle doit se terminer par un réservoir. La phase de correction crée un réservoir pour accepter chaque transfert. Mais il n'y a rien dans le champ expérimental avec lequel mettre en relation ces réservoirs, ils ne sont donc pas nommés. Cette solution est très proche d'une solution obtenue par un groupe d'élèves, la différence porte sur les noms des réservoirs finaux que les élèves ont appelés : les yeux et le corps.

Nous avons aussi exploré ce qui arrive quand le résolveur de problème est incapable de créer les processus de l'énergie; c'est à dire les transferts. Nous avons enlevé les règles qui créent les processus de l'énergie c'est à dire qui passe des "relations" (si X donne de la chaleur et Y reçoit de la chaleur alors il y a une relation pour la chaleur entre X et Y) aux processus (la chaleur est alors un transfert). Nous remplaçons ces connaissances par d'autres qui sur-généralisent les règles pour réservoirs et transformateurs. L'effet de cette modification est que, tout comme les réservoirs sont créés par la propriété d'appariement relative à stocker, les transferts sont créés par la propriété d'appariement relative à **transmettre**. Dans les chaînes énergétiques obtenues la pile et l'ampoule sont représentées comme avant, mais avec, entre eux, deux transferts. Chaque transfert est nommé avec le mot "fil". (L'utilisation des connaissances "électrocinétique" détermine la direction des flèches dans les modèles 2 et 3).

La figure 5 montre une comparaison entre les modèles des chaînes énergétiques produits par ModelCHENE et par les élèves. Le modèle "idéal" correspond à la chaîne de l'expert. Le modèle 1 correspond aux élèves "D-S", les modèles 2 et 3 correspondent à "F-L" et "P-F". Comme dans le modèle 1, D-S crée les destinations pour lumière et chaleur. Comme c'est précisé dans le modèle, les étudiants F-L et P-F ne crée par de transfert pour lumière et chaleur. Le résultat semblable entre les élèves et ModelCHENE, quand les règles créant les processus énergie sont supprimées, est important. En effet, les analyses des protocoles montrent que le transfert est la partie la plus difficile, ainsi il fait l'objet de plus de la moitié des interventions dans tous les protocoles. La principale limitation se situe dans le nom

des éléments ; par exemple, la pile et l'ampoule sont nommés par ModelCHENE comme par les élèves, mais D-S nomment les destinations pour chaleur et lumière par yeux et corps, alors que ModelCHENE ne les nomme pas. Dans cette comparaison, nous mentionnons enfin deux points : (1) tout d'abord ModelCHENE valide les connaissances de la mémoire à long terme (connaissances du sens commun, de l'électrocinétique, ...) nécessaires pour la résolution du premier des trois problèmes ("pile-ampoule"). (2) ModelCHENE met en évidence un cas où il y a des relations à établir entre un modèle théorique formel et une expérience physique quand il n'y a pas d'appariement direct possible à partir d'une propriété commune à un élément de chacun des domaines. Il explicite une partie de la résolution qui pourrait être considérée comme évidente et donc laissée implicite : le passage des propriétés aux relations (X donne de la lumière et y reçoit de la lumière alors il y a de la lumière qui va de X à Y) et des relations aux processus (si il y a de la lumière qui va de X à Y alors il y a un transfert d'énergie sous forme de lumière (ou de rayonnement) de X à Y).



Chaînes produites par ModelCHENE et par les élèves

Figure 5

Ainsi, ModelCHENE contribue à une compréhension des processus cognitifs des élèves pendant la résolution de problème en démontrant les relations qui

peuvent être formées entre un modèle théorique formel et une expérience physique, et en démontrant le besoin des abstractions intermédiaires qui correspondent, en fait, à des difficultés des étudiants quand ils essaient de comprendre et d'utiliser un modèle formel. ModelCHENE propose un mécanisme par lequel les élèves peuvent construire ces abstractions intermédiaires et montre que la résolution de problème de l'élève varie selon qu'ils fassent ou non usage de ces abstractions.

5. Conclusion

Nous avons décrit un logiciel, ModelCHENE, capable de modéliser une démarche cognitive relative à la modélisation en terme d'énergie d'élèves débutants. Ce modèle a été validé dans la mesure où d'une part il produit des solutions proches de celles des élèves et d'autre part met en évidence une difficulté majeure de cette apprentissage, à savoir l'élaboration d'"abstractions intermédiaires". Il rend explicite et formalise des résultats d'une analyse descriptive des protocoles d'élèves.

ModelCHENE va jouer un rôle original au sein de l'architecture de l'EIAO CHENE en servant de moyen d'analyse de la résolution des élèves afin de favoriser la mise en oeuvre de processus métacognitifs tels que la critique et la vérification des solutions. C'est sur l'intégration de ModelCHENE dans l'ensemble de l'architecture, en association avec des travaux expérimentaux en cours, que nous centrerons nos futures recherches.

Références

Bental, D. [1994] *A problem-solving model of students' construction of energy models in physics*, Rapport de recherche CR-6/94, Equipe COAST

Driver, R., Guesne, E., & Tiberghien, A. (Eds) [1984]. *Children's ideas in science* Milton Keynes, England : Open University Press

INRP & UdP [1992] *Cinquièmes journées 'informatique et pédagogie des sciences physiques*. INRP, UdP (Eds). Paris : INRP. 320p.

Johsua, S. & Dupin, J.J. [1984] Schematic diagrams, representations and types of reasoning in basic electricity. In R. Duit, W. Jung & C. Rhöneck (Eds). *Aspects of understanding electricity*, I.P.N. Kiel, Germany.. pp. 129 - 139.

Teutch, P. & Vivet, M. [1993] Interaction Issues in Computer Assisted Language Learning Systems. *Proceedings of the International Conference on Computers in Education*, Taiwan Décembre 15-17, 1993, pp. 144-149, (ed.) Chan, T-W.

Tiberghien A., & Mandl H. (Eds) [1992] *Knowledge acquisition in the domain of physics and intelligent learning environments*. NATO ASI Series Computer and systems sciences. Berlin : Springer Verlag.

Tiberghien, A. [1984]. Critical review of the research aimed at elucidating the sense that notions of temperature and heat have for the students aged 10 to 16 years. In *Research on physics education : proceedings of the first international workshop* (pp.75-90). Paris : CNRS

Tiberghien, A. [1994] Modelling as a basis for analysing teaching-learning situations. *Learning and Instruction*. vol 4, n°1, p.71 - 87.

Viennot, L. [1993] Temps et causalité dans les raisonnements des étudiants en physique. *Didaskalia*; vol 1, p. 13 - 27.