

Modèles et modélisation dans les séquences de travaux pratiques sur le haut-parleur en classe de seconde

Claude LUC, Alain DUREY

LIREST
ENS Cachan,
61 Avenue du Président Wilson
94235 Cachan, France.

Résumé

Cet article traite de l'analyse de neuf séquences de travaux pratiques de 90 minutes réalisées dans des classes de seconde de lycée. Les neuf classes et leurs professeurs sont différents. Le thème, imposé par le programme, est identique : le haut-parleur comme objet technique et son phénomène principe (la force électromagnétique de Laplace). Il ressort de cette analyse que les progressions sont organisées en étapes. Chaque étape comporte l'étude d'un système technique, modèle physique du haut-parleur, alimenté par un type de courant électrique. Dans toutes les séquences, l'essentiel du temps est consacré à l'établissement du modèle quantitatif $F=k.i$ (linéarité entre la force de Laplace F , et l'intensité i du courant continu circulant dans le conducteur). Le temps consacré à l'interprétation du fonctionnement du haut-parleur est le plus souvent limité, voire inexistant. Dans les séquences où elle est présente, cette interprétation prend appui sur les relations analogiques existant entre les systèmes étudiés et leurs phénoménographies, et sur les simulations d'un système par un autre. Elle n'a jamais pris appui sur le modèle construit : $F=k.i$. Les professeurs ont ainsi privilégié l'étude du phénomène en courant continu à celle du haut-parleur fonctionnant en régime alternatif.

Mots clés : travaux pratiques, objet technique, phénomène physique, modélisation, explication

Abstract

This article deals with the analysis of nine ninety-minute practice works sequences carried out within fifth form's groups. Those nine classes and their teachers are different. The theme, imposed by the program, is the same : loudspeaker as a technical object and its principle phenomenon – Laplace's electromagnetic force –. It is deduced from this analysis that progressions are organized into steps. Each one is meant to the study of a technical system- loudspeaker physical model- powered by a type of electric current. In all the sequences, most of the time is devoted to the drawing up of the quantitative model $F = k.i$ – linearity power strength of direct current within the conductor –. Time related to the interpretation of the working of the loudspeaker is usually limited, even non existent. When sequences comprise an interpretation , this one relies on : analog relations existing between studied systems and their phenomenographies, simulations of a system by one another. But it never relied on the drawn up model $F = k.i$. Hence the teachers have favored the study of the phenomenon working with direct current over the one working with alternating current.

Key words : *practice works, technical object, phenomenon physical, modelling, explanation.*

Resumen

Este artículo trata de la análisis de nueve secuencias prácticas de 90 minutos realizadas en clases de secunda de institutos de secunda enseñanza. Las nueve clases y sus profesores están diferentes y el tema, impuesto por el programa, idéntico : el altavoz como objeto técnico y su fenómeno principio (la fuerza electromagnética de Laplace). Resalta de esta análisis que las progresiones están organizadas en etapas. Cada etapa compone el estudio de un sistema técnico, modelo físico del altavoz , alimentado por un tipo de corriente eléctrica. En todas estas secuencias, la mayor parte del tiempo está consagrada a la elaboración del modelo cuantitativo $F = k.i$ (linealidad fuerza, intensidad del corriente continua en el conductor). El tiempo consagrado a la interpretación del funcionamiento del altavoz es las más de las veces limitado o inexistente. La interpretación se apoya sobre : las relaciones analógicas entre sistemas estudiados y sus fenomenografías, las simulaciones de un sistema por un otro. Nunca se apoya sobre el modelo cuantitativo establecido : $F = k.i$. Los profesores han dado preferencia al estudio del fenómeno en corriente continua y han dejado de lado el funcionamiento del altavo.

Palabras claves : *prácticas, objeto técnico, fenómeno físico, modelización, explicación.*

INTRODUCTION

Notre préoccupation de recherche est celle de l'articulation, au sein des curriculums de sciences physiques, (De Landsheere, 1979, p. 79) entre le monde des objets techniques et celui des phénomènes physiques. Pour G. De Landsheere un curriculum est un ensemble d'actions planifiées pour susciter l'instruction avec définition des objectifs de l'enseignement, des contenus, des méthodes, des matériels, des dispositions relatives à la formation des enseignants. Dans cet article, nous souhaitons porter notre attention, à l'occasion de l'analyse de curriculums réels¹, (Perrenoud, 1990) sur la façon dont les enseignants conduisent, concrètement, la description-explication du principe de fonctionnement d'un objet technique à l'aide des savoirs propres aux «*phénomènes physiques naturels détournés*» (Martinand, 1995, p. 347) pour faire fonctionner l'objet.

Traditionnellement, les objets dont on étudie le principe de fonctionnement sont inscrits dans les programmes pour que leur principe vienne illustrer, par application directe, les savoirs de la physique préalablement construits (par exemple le principe de l'alternateur ou du transformateur après les lois de l'induction électromagnétique). Les textes des actuels programmes de lycée marquent une certaine évolution dans les relations entre le monde des objets techniques et celui des savoirs de physique. Le découpage classique des contenus en électricité, mécanique... fait maintenant place à une approche par thèmes conducteurs (BOEN, 1992). Ainsi, «*le programme de seconde prend appui sur un thème conducteur qui concerne l'environnement quotidien ... sons, reproduction des sons, musique et lumière*». Les auteurs poursuivent en indiquant que la présentation de l'enseignement doit s'attacher à «*montrer que la compréhension des objets techniques ou des phénomènes rencontrés dans la vie quotidienne nécessite des connaissances variées. Celles-ci seront mises en place, chaque fois qu'elles sont nécessaires et seulement dans ce cas*». Il ne s'agit donc plus d'introduire des connaissances pour elles-mêmes, mais pour comprendre le monde naturel et technique.

Au sein de ce thème du programme de seconde, dans la rubrique «contenus», il est précisé au paragraphe 2.1.4. «*Principe du haut-parleur (HP)*» et aussitôt après «*Fondements physiques : action d'un aimant sur un conducteur parcouru par un courant. Expression de l'intensité de la force dans un cas simple $F = k.i$* ». Ce contenu présente une double originalité : d'une part le phénomène de Laplace est introduit au sein du thème acoustique, thème fort éloigné de l'électromagnétisme, d'autre part

1 Perrenoud distingue le curriculum formel/prescrit et le curriculum réel mis en œuvre dans les classes.

le modèle $F = k.i$, sans doute introduit pour interpréter le fonctionnement du HP, est lui aussi très éloigné du modèle savant $F = B.i.l. \sin \alpha$.

Les recommandations concernant l'étude du HP sont les suivantes :

- analyser la fonction transducteur électro-acoustique (puissance, bande passante, identité fréquence son émis/membrane) ;
- analyser la structure des organes internes ;
- expliquer le comportement en fonctionnement.

Quant aux recommandations concernant l'étude du phénomène de Laplace, il est précisé :

- mettre en évidence les conditions de son existence ;
- développer son étude qualitative ;
- développer son étude quantitative à partir d'une expérimentation et d'un relevé de mesures sur un vrai HP alimenté par une intensité continue. Cette dernière recommandation nous paraît assez nouvelle dans l'enseignement de la physique au lycée.

Il ressort de ces textes la volonté d'une double relation entre l'étude du HP et celle du phénomène de Laplace. Le HP doit servir de dispositif pour la modélisation expérimentale du phénomène. Parallèlement les connaissances établies sur le phénomène doivent être les outils d'interprétation du fonctionnement normal de l'objet technique associé au phénomène.

Comment ces recommandations originales et fortes des curriculums prescrits, à propos de ce thème, se traduisent-elles au niveau des curriculums réels ? C'est pour tenter de répondre à cette question que nous avons décidé de porter un regard de recherche sur le terrain, en enregistrant et en analysant des séquences de travaux pratiques sur le HP dans les classes de seconde de lycée.

2. UN PROBLÈME *A PRIORI* AU NIVEAU DE LA COHÉRENCE INTERNE DES SAVOIRS PRESCRITS

Il nous semble qu'un problème de cohérence interne se pose, dès le départ, au cœur même des savoirs à enseigner relatifs à ce thème. Le haut-parleur, comme transducteur électro-acoustique en fonctionnement usuel, est le siège de multiples phénomènes physiques (force de Laplace, élasticité de la membrane, courants induits et auto-induits, forces de viscosité et de pression des couches d'air sur la membrane, résonance,

etc.) L'équation mécanique $mx'' + ax' + kx = B.i.l$ (Pérez, 1995, p.475 ; Scache et al, 1997) qui gère le fonctionnement usuel du HP traite, de façon dynamique, un oscillateur masse-ressort, amorti par des frottements fluides, et soumis à une force de Laplace. Alimenté en courant continu, le HP devient régi par l'équation $kx = B.i.l$. Cette relation traduit l'équilibre de la membrane entre la force de Laplace due au système aimant-bobine et la force élastique de la suspension sur la membrane. Pour le HP alimenté en continu, il y a donc proportionnalité entre le déplacement de la membrane (x) et l'intensité du courant électrique (i) qui circule dans la bobine.

Les auteurs de programme demandent d'extraire expérimentalement du HP réel le modèle «physique» $F = k.i$. Cette expérimentation suppose que l'on passe sous silence, en la neutralisant, l'élasticité de la membrane, propriété tout aussi fondamentale pour le fonctionnement du HP que la force de Laplace.

Si l'on peut admettre de façon générale (Deforge, 1985) que le principe d'un objet technique est «*le principal phénomène physico-chimique mis en oeuvre dans l'objet*» et que ce principe (Fourez et al, 1993) «*réduit le phénomène*» et «*n'en explique pas la totalité*», il faut reconnaître, qu'en courant continu, le HP a deux phénomènes principaux antagonistes agissant sur la membrane : la force électromagnétique, et l'élasticité de la suspension de la membrane.

Privilégier l'étude du phénomène de Laplace, c'est adopter une vision réductionniste au sens de Morin en considérant un système, de façon analytique, comme un ensemble de parties. Morin affirme avec force (Morin, 1981, p. 123) «*Ni la description, ni l'explication d'un système ne peuvent s'effectuer au niveau des parties, conçues comme entités isolées, liées seulement par actions et réactions*». Ces propos sont fondamentaux pour ce qui concerne le HP car, associer force de Laplace à force élastique antagoniste, conduit à un tout qui dépasse les parties : l'équilibre à deux forces. Le modèle réductionniste $F = k.i$, établi en courant continu sur une partie du HP est incapable d'interpréter, à lui seul, la proportionnalité entre le déplacement x de la membrane et l'intensité i . Il est évidemment encore plus incapable d'expliquer le comportement du HP en courant alternatif.

Ces savoirs à enseigner ne peuvent que conduire à une double difficulté dans leur mise en oeuvre :

- établir $F = k.i$ en courant continu avec le HP réel comme dispositif expérimental ;

- utiliser $F = k.i$ comme seul outil d'interprétation du comportement du HP en continu et en alternatif. L'analyse des séquences mettra en lumière cette double difficulté.

3. LE CADRE THÉORIQUE, LES QUESTIONS, LES MATÉRIAUX DE L'ÉTUDE

3.1. Le cadre théorique : les systèmes, les modèles, le schéma de la modélisation

Les instructions prescrivent l'étude de la fonction transducteur du HP. Il s'agit, selon la «*vision fonctionnelle de la modélisation*» au sens de Le Moigne (1994, p. 43) «*de le percevoir d'abord globalement dans sa relation fonctionnelle avec son environnement*» (Le Moigne, 1994, p. 65), ce que l'objet fait. L'objet est conçu comme un système, une boîte noire ; son entrée est commandée par un courant électrique ; sa sortie, la membrane émet des vibrations acoustiques. La bande passante rend compte du comportement entrée-sortie du système.

Les instructions prescrivent aussi l'analyse de la structure interne du HP. Celle-ci s'inscrit dans le cadre de la vision «*organique*» de la modélisation, «*ce que l'objet est*» (Le Moigne, 1994, p. 65).

Les programmes recommandent enfin d'établir la relation $F = k.i$; cette relation est aussi un modèle «*représentation mathématique d'un système réel*» (Walliser, 1977, p. 115)² : le dispositif expérimental. La grandeur d'entrée est l'intensité électrique, la grandeur de sortie, la force. La constante k est un paramètre du modèle expérimental. La démarche proposée est une «*modélisation expérimentale*» (Trigeassou & Beaufils, 1991, pp. 297-298) qui débouche sur l'établissement du modèle expérimental $F = k.i$ et le calcul du paramètre k .

Ainsi, l'essentiel des savoirs enseignés propres à ce thème devront résulter d'activités de modélisation d'objets d'étude considérés en tant que systèmes. Les travaux sur les systèmes et leurs modèles sont par conséquent une référence théorique pour notre étude, et plus spécialement les travaux de Martinand (1992, 1994) car ils sont étroitement liés aux activités d'enseignement et d'apprentissage de la modélisation en sciences.

Martinand a élaboré un schéma de modélisation, outil de questionnement, d'observation et d'analyse des démarches de modélisation en sciences. Ce schéma, représentant un moment d'un curriculum (figure 1), fait apparaître deux grands registres³ : celui du référent empirique, et celui du modèle. Le registre du référent empirique est celui des objets utilisés et

2 Pour Walliser, «*dans sa définition la plus large la notion de modèle recouvre toute représentation d'un système réel, qu'elle soit mentale ou physique exprimée sous forme verbale graphique ou mathématique.*»

3 Martinand a enrichi le schéma figure 1 d'un troisième registre, celui de la matrice cognitive (Martinand, 1994).

de leurs conditions d'utilisation (phénoménotechnique), de la description des phénomènes (phénoménographie). Le registre du modèle est celui de la représentation du référent empirique. Entre les deux registres, le schéma développe la phase de modélisation (construction du modèle) et des phases d'application du modèle ou de simulation avec le modèle conduisant à une description savante du référent empirique : la phénoménologie.

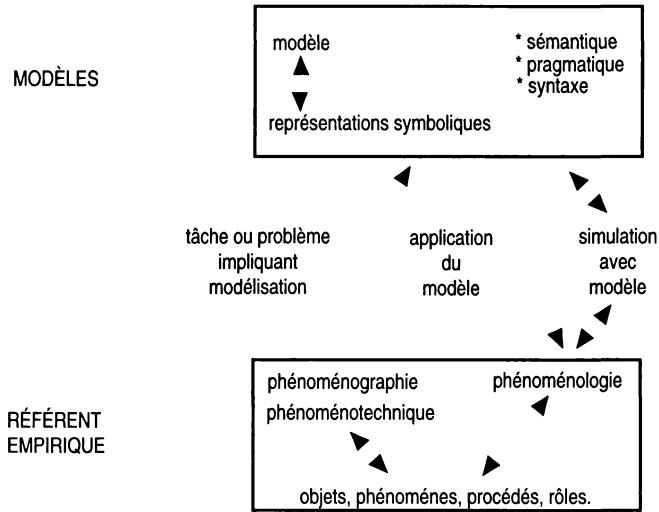


Figure 1 : Le schéma de la modélisation de Martinand

3.2. Le questionnement sur les séquences

Le schéma de modélisation ainsi décrit permet de formuler *a priori*, sur les séquences de travaux pratiques que nous avons enregistrées, les interrogations suivantes :

- peut-on discerner des étapes au sein de ces séquences, si oui, quels en sont les descripteurs ?
- au sein de ces étapes, dans le registre du référent empirique, quels sont les objets « manipulés » par les élèves ou le professeur ?
- quelles sont les connaissances phénoménographiques-phénoménotechniques mises en jeu lors de l'expérimentation sur ces mêmes objets ?
- est-ce que les tâches proposées par l'enseignant correspondent à des problèmes explicites pour les élèves ?

- comment est conduite la modélisation expérimentale $F = k.i$?
- quelle est la place du modèle expérimental $F = k.i$ dans l'explication du principe de fonctionnement du HP ? (Application du modèle selon le schéma de la modélisation figure 1).

3.3. Les matériaux sur lesquels porte l'étude

Nous postulons que la séance de travaux pratiques imposée par les textes pour établir $F = k.i$ doit être suffisamment riche, tout en étant limitée dans le temps, pour refléter la façon dont l'enseignant de physique a conçu l'articulation entre l'étude du phénomène et celle de l'objet haut-parleur. Nous avons donc procédé, au cours de l'année scolaire 1994-1995, à l'enregistrement vidéo de **neuf séances de travaux pratiques (TP) de 1h 30 dans des classes de seconde**, portant sur le thème $F = k.i$. Ces enregistrements ont été effectués dans huit établissements différents répartis sur quatre villes. Lors de chaque enregistrement, nous avons porté notre attention sur l'activité globale de la classe, et sur le fonctionnement d'un ou deux binômes en phase d'expérimentation. Nous avons aussi porté la caméra sur le matériel installé «au bureau» et sur les paillasse des élèves, ainsi que sur l'utilisation de ce matériel par les différents acteurs de la séquence. Nous avons ainsi volontairement orienté l'étude vers l'analyse de séquences, de même durée limitée, animées par des professeurs multiples et différents. Notre but a été de chercher et valider plus solidement les invariants dans les pratiques, mais aussi de découvrir des cheminements originaux. Ce faisant, nous nous sommes volontairement privés de l'histoire didactique de ces contenus enseignés. Les conclusions de l'étude se réfèrent aux seuls matériaux dont nous disposons : les enregistrements vidéo des neuf séquences.

4. ANALYSE ET DESCRIPTION DES SÉQUENCES

4.1. Les étapes que l'on peut recenser dans les différentes séquences en rapport avec les systèmes et dispositifs expérimentaux utilisés

4.1.1. Inventaire des dispositifs expérimentaux rencontrés

Qu'ils soient installés sur la paillasse du professeur ou sur les tables de travaux pratiques des élèves, tous ces dispositifs ont en commun d'être le support du même phénomène principe moteur que celui du HP : la force

de Laplace. Ces dispositifs évoluent entre «*l'objet concret*» au sens de Deforge (1985) et Simondon (1989) : le HP lui-même et ses modèles physiques, systèmes composites, représentations physiques du HP au sens de Walliser (1977). Nous avons rencontré deux types de modèles physiques : les maquettes d'une part et, d'autre part, les montages réalisés avec les objets des collections de laboratoires de physique et que Scache (1986, 1993) dénomme les «*objets expérimentaux*».

Nous avons recensé, sur les neuf séquences, cinq ensembles de dispositifs : les HP, les maquettes de HP, les systèmes bobine-aimant, les systèmes fil rectiligne-aimant, le système tubes à électrons-aimant.

a) *Les hauts-parleurs*

Le haut-parleur, objet, est physiquement absent dans trois des neuf séances de TP. Dans trois séquences, il ne figure que sous une ou deux unités, le plus souvent démonté, pour en décrire, nommer, schématiser les principaux organes internes. Dans les trois autres séquences, il est étudié en régime électrique alternatif.

Dans une seule séquence (1)⁴ il sert de dispositif pour la modélisation quantitative $F = k.i$ et la modélisation de la réponse en fréquence.

Il n'y a aucune explication du fonctionnement alternatif de sa membrane dans trois séquences (2, 8, 9). Deux séances de TP (3, 7) débutent directement par l'étude du HP.

b) *Les maquettes de haut-parleur.*

Ces maquettes possèdent les trois organes du HP : la bobine, l'aimant, la membrane. Elles sont donc susceptibles de fonctionner comme sources sonores. Elles sont construites et commercialisées à des seules fins pédagogiques par deux fournisseurs en matériel de laboratoire que nous nommerons A et B.

La maquette A permet, par une méthode d'équilibre entre le poids d'une masse marquée mise sur la membrane et la force magnétique antagoniste, de mesurer cette force et d'établir $F = k.i$. Dans trois des neuf séquences (4, 5, 6) les élèves en binômes ont ainsi opéré.

La maquette B, présente dans quatre séquences (4, 5, 6, 7), transparente et projetable, permet de montrer l'agencement, la forme des organes du HP et le mouvement en basse fréquence de la membrane. Elle émet un son aux fréquences audibles et simule ainsi le fonctionnement du HP. La maquette B a été ainsi utilisée dans les mêmes séquences que la maquette A, en expérience unique projetée sur écran. Dans une autre classe (7), le professeur s'est servi de cet objet alimenté en courant continu,

4 Les nombres entre parenthèses désignent les séquences correspondantes.

pour établir le modèle expérimental $d = a.i$ qui exprime la linéarité entre le déplacement de la membrane et l'intensité du courant i . Ce modèle est cohérent avec le fonctionnement de l'objet et il ne figure évidemment pas dans les recommandations curriculaires.

c) Les systèmes bobine-aimant.

Dans ces dispositifs, la membrane est absente⁵. Il s'agit de bobines fabriquées avec du fil émaillé, ou de bobines de collection de laboratoires (bobines A dites de flux maximal, ou bobines de transformateur démontable). Quant aux aimants, il s'agit des classiques barreaux aimantés ou aimants en U. Nous avons recensé ces dispositifs dans huit séances de TP. Ils ont été introduits par le professeur, le plus souvent après une expérience au bureau, de présentation du phénomène à l'aide du fil de Laplace. Ce matériel constitue, en raison de l'absence de la membrane, un système, modèle du HP, **intermédiaire** entre le HP ou ses maquettes et le système fil-aimant. Comme dispositif charnière, il permet d'atteindre des objectifs multiples.

- Introduire le phénomène de Laplace en courant continu.

L'expérience est faite au bureau, par le professeur. Ainsi en est-il dans les séquences 3 et 4.

- Généraliser la mise en évidence du phénomène en courant continu.

La démarche est identique à celle décrite précédemment, le phénomène ayant été introduit par l'expérience du fil de Laplace (1, 5, 6, 8, 9).

- Etablir le modèle expérimental $F = k.i$.

Ce système a servi de support à l'établissement de la loi $F = k.i$ dans quatre séquences (2, 3, 8, 9). Les élèves, le plus souvent en binômes, effectuent les mesures de forces et d'intensités électriques. Les dispositifs pour la mesure de la force de Laplace sont variés :

– la bobine est équilibrée par des masses marquées, bobine et masses sont suspendues à deux brins verticaux de part et d'autre d'une poulie mobile dont l'axe est fixe ;

– la bobine est posée sur une balance Roberval ou sur une balance électronique ; les élèves calculant la correspondance masse lue/force ;

– la bobine est suspendue à un dynamomètre ce qui permet de «voir» l'effet de l'aimant sur la bobine et de mesurer directement la force avec son unité légale d'intensité, le newton.

⁵ Dans certaines séquences, les propriétés élastiques de la membrane ont été obtenues en suspendant la bobine à un ressort ou à un dynamomètre.

- Visualiser le comportement du phénomène en courant alternatif.

La bobine est suspendue à un ressort. Elle est alimentée par un GBF (Générateur Basses Fréquences), à très basse fréquence. Les élèves découvrent que si la tension d'alimentation est alternative, le mouvement de la bobine l'est aussi et que l'amplitude du mouvement croît avec celle de la tension électrique appliquée.

- Introduire les liaisons avec d'autres dispositifs et des simulations du HP.

Il ressort de l'analyse des séquences que les professeurs ont privilégié l'étude du système bobine-aimant pour établir des liaisons avec l'étude d'autres dispositifs pour lesquels ils font comparer aux élèves, de façon analogique, les organes, les signaux d'entrée et les signaux de sortie.

d) Les systèmes fil rectiligne-aimant

L'ensemble fil rectiligne-aimant modélise encore plus les organes moteurs du HP. Nous avons relevé, parmi les conducteurs, le fil de Laplace vertical suspendu à une potence et la tige métallique susceptible de rouler sur les rails dits de Laplace. Comme précédemment, les aimants sont de type barreau ou aimant en U. Contrairement aux indications des programmes, nous n'avons pas rencontré de balance de Cotton.

Les séances de TP débutent fréquemment par la description ou l'évocation d'un dispositif de type fil-aimant. Sans lien clairement affirmé avec le HP, le professeur montre une expérience directe au bureau (1, 2, 6), ou la rappelle (5, 9). La fonction pédagogique des systèmes fil-aimant la plus souvent rencontrée est d'introduire le phénomène et son interprétation en termes de force ; de développer les aspects qualitatifs du phénomène mettant en relation le sens de la force avec celui du courant ou celui du champ magnétique B. Dans la séquence 7, cette analyse qualitative en signal continu sert de support à une interprétation analogique du mouvement de la membrane de la maquette B alimentée en courant alternatif. Le professeur développe ainsi le schéma explicatif : *«Lorsqu'on applique une tension variable, un courant variable passe dans la bobine. Quand on a fait les rails de Laplace, on a vu que quand on changeait le sens du courant, la tige, son déplacement changeait de sens. Un courant variable va changer de sens. Chaque fois que le courant change de sens, le déplacement de la membrane change de sens, c'est pourquoi elle se déplace alternativement à gauche, à droite, à gauche, à droite»*. Cette forme de raisonnement sera analysée au paragraphe 4.3.2.

Les dispositifs fil rectiligne – aimant n'ont fait l'objet d'aucune étude en courant alternatif. De plus, ils n'ont pas été retenus pour établir la loi $F = k.i$, contrairement aux recommandations des instructions officielles.

e) Le système tube à électrons- aimant.

Ce système, recensé dans une séquence, installé sur la paillasse du professeur, n'a été ni décrit ni utilisé.

4.1.2. L'alimentation électrique des dispositifs utilisés

Dans le déroulement des séquences, nous avons relevé trois types d'activités en rapport avec l'alimentation électrique des dispositifs répertoriés précédemment.

a) Les activités sur des dispositifs non alimentés

Avant d'être alimenté, le dispositif monté au bureau est décrit par le professeur. Le dispositif est testé sans passage de courant : l'aimant est mis près du fil de Laplace lorsque le circuit est ouvert.

b) Les activités sur des dispositifs alimentés en courant continu

Le comportement du dispositif est analysé en fonction du sens du courant, de la croissance ou décroissance de i , des mesures respectives de i , F , ou du déplacement de la bobine.

c) Les activités sur des dispositifs alimentés en courant alternatif

Le dispositif est alimenté par des signaux alternatifs, le plus souvent à l'aide d'un générateur de basses fréquences. Le comportement du dispositif est analysé, de façon qualitative et quantitative, en fonction de la variation de la fréquence, de l'amplitude, de la nature (sinusoïdal, triangle, carré) du courant d'alimentation.

4.1.3. Le repérage des étapes

En ayant comme préoccupation les systèmes et dispositifs étudiés, nous avons pu repérer, au sein de toutes les séances de TP analysées, un certain nombre d'étapes successives. La séquence 5 proposée à titre d'exemple (figure 2), montre une succession de 7 étapes, de l'étape 0, celle du début, à l'étape 6 de fin. Chaque étape se différencie de ses voisines selon deux modes :

– on change de dispositif expérimental en conservant le même type de courant d'entrée (dans les étapes 3 et 5, figure 2, le dispositif bobine-aimant-ressort et la maquette B sont étudiés en courant alternatif) ;

– on conserve le même dispositif, mais on l'alimente «au niveau de l'entrée» avec des courants de natures différentes (tel est le cas des étapes 1, 2, 3, figure 2, où le système bobine-aimant-ressort sert de support à des activités sans courant, puis en courant continu, et enfin en courant alternatif).

En conséquence, chaque étape peut être caractérisée par des activités du professeur «au bureau» (étapes 0 à 5), ou des élèves en binômes (étape 6), **centrées sur un dispositif expérimental**, système porteur du phénomène, ayant **un type de signal en entrée**. L'étape 2, par exemple, traite du comportement du système bobine-aimant-ressort alimenté en courant continu.

Toutes les séquences présentent donc des étapes identifiables par deux critères communs : le dispositif et son signal d'entrée. Nous avons représenté (figure 2) toutes les étapes de la séquence 5. Chaque étape, matérialisée par une case, est repérée par ses deux coordonnées : nature de courant et de dispositif. Les nombres 1, 2, 3... et les flèches indiquent l'ordre de succession des étapes. Les temps en minutes signalent la durée de chaque étape. A l'intérieur de chaque case, nous avons fait figurer une description des activités de l'étape. Nous avons représenté (annexe 1) toutes les étapes de chacune des neuf séquences. Chaque case est repérée en abscisse par la nature du signal d'entrée et en ordonnée par le système étudié. Au sein de chaque case nous avons fait figurer la durée et l'ordre de succession des étapes (nombres 1, 2...) Les étapes 0 consistent en des rappels relatifs à la séquence précédente. La durée des étapes est très variable, de quelques minutes (les premières étapes le plus souvent), à près d'une heure (la dernière étape assez souvent).

4.2. Analyse interne de chaque étape avec les éléments du schéma de la modélisation

4.2.1. *Les connaissances phénoménographiques et phénoménotechniques*

En explorant les étapes de la séquence 5 (figure 2), on découvre que les activités des élèves et du professeur débouchent sur des connaissances empiriques relatives aux dispositifs expérimentaux et au phénomène de Laplace. Elles sont désignées par les termes phénoménographie et phénoménotechnique dans le schéma de Martinand. Le schéma de la modélisation distingue la phénoménographie qui est une lecture première du phénomène de la phénoménologie qui est une lecture seconde (par modèle interposé).

a) La phénoménotechnique

Ces connaissances portent sur les dispositifs expérimentaux et sur le HP. Il s'agit des savoirs et savoir-faire attachés aux conditions de mise en évidence du phénomène en courant continu et en courant alternatif (agencement des éléments du dispositif et nécessité d'un courant) ; aux

FIL A	<p>0 <i>0,5 min</i></p> <p>Rappel oral, de l'expérience des rails de Laplace faite la séance précédente et des conditions d'existence de la force électromagnétique.</p>		
BOB	<p style="text-align: center;">▼</p> <p>1 <i>1 min</i></p> <p>Description d'un montage au bureau : bobine A suspendue à un ressort alimentée en continu et placée entre les pôles d'un aimant en U.</p>	<p>▶ 2 <i>2,5 min</i></p> <p>Alimentation de la bobine en continu. Redécouverte du phénomène. (Il avait été mis en évidence la fois précédente) Rappel de la force électromagnétique. Etude du phénomène en continu : - accroissement de i, effet sur le déplacement de la bobine et sur F. - changement du sens de i, effets sur F et le déplacement de la bobine.</p>	<p>▶ 3 <i>2 min</i></p> <p>Alimentation de la bobine par un GBF en très basse fréquence. Mise en évidence du mouvement alternatif de la bobine. Etude qualitative du comportement de la bobine alimentée en alternatif : - effet de l'accroissement de la fréquence du courant sur la bobine. - effet de la variation de l'intensité sur le mouvement de la bobine.</p>
MAQ	<p style="text-align: center;">▼</p> <p>4 <i>1 min</i></p> <p>Description et schématisation des organes de la maquette transparente B projetée au tableau. Hypothèse sur l'objet modélisé par la maquette.</p>	<p>6 <i>54 min</i> ◀</p> <p>Description du montage quantitatif pour modéliser $F = k.i$ à partir de la maquette A, conseils de montage. Réalisation du montage par les élèves en binômes. Charge du HP par différentes masses et mesure des intensités correspondantes. Calcul de F. Tracé des points expérimentaux F, i.</p>	<p>5 <i>2 min</i></p> <p>Alimentation de la maquette par un GBF en très basse fréquence. Mise en évidence du mouvement de la bobine de la maquette. Explication du mouvement par comparaison avec celui du système aimant-bobine-ressort. Accroissement de la fréquence du GBF et obtention d'un son par la maquette.</p> <p style="text-align: center;">▲</p>
HAUT			
	i = 0	I CONTINU = + OU -	I ALTERNATIF

Figure 2 : Les différentes étapes de la séquence 5

réglages nécessaires pour faire varier les facteurs agissant sur le phénomène ; aux appareils nécessaires pour prélever les mesures (savoir-faire de montage et de lecture). Il s'agit aussi des savoirs et savoir-faire attachés au HP lui-même et à sa mise en œuvre dans les montages : connaissance des organes internes principaux, des conditions de montage pour la sécurité de son fonctionnement, des méthodes de prélèvement de mesures. On retrouve ces connaissances dans toutes les étapes de la séquence 5.

b) La phénoménographie

Ces connaissances décrivent qualitativement et quantitativement le phénomène et le fonctionnement du HP, avant toute modélisation expérimentale. Les connaissances associées au phénomène rendent compte de ses comportements qualitatif et quantitatif. Béguin et al. (1994, 1995) utilisent le terme de «*représentation*» du phénomène, précédant sa modélisation, pour «*toute description raisonnée et pour toute tentative de structuration de l'expérience sensible*». Les connaissances qualitatives décrivent les facteurs qui agissent sur le phénomène et dans quel sens. Dans l'étape 3 de la séquence 5, le professeur montre expérimentalement et décrit oralement l'effet de l'accroissement de l'amplitude et de la fréquence du courant i sur les caractéristiques du mouvement de la bobine alimentée en courant alternatif.

Les connaissances quantitatives décrivent le phénomène sous forme de tableaux de mesures et de points expérimentaux saisis sur un système d'axes : ce sont les «*représentations numériques et graphiques*» de Béguin et al. (1994).

Pour le HP et les maquettes, il s'agit des descriptions qualitatives et quantitatives de leur fonctionnement entrée-sortie comme émetteurs sonores. Dans la séquence 5 (étape 5), le professeur a analysé le comportement de la maquette B à basse fréquence et aux fréquences sonores. Nous montrerons dans le paragraphe 4.3., à propos de la séquence 5, que les explications du principe du HP reposent exclusivement sur les liens entre les phénoménographies de deux étapes.

4.2.2. La problématisation des activités de modélisation

De façon quasi générale, la problématisation des savoirs à enseigner mis en scène dans les séquences observées n'est pas clairement explicitée aux élèves. Toutes les connaissances liées à la description et à l'analyse du phénomène résultent d'expériences de «*monstration*» d'un phénomène nouveau (Johsua & Dupin, 1993, pp. 206-209). Elles sont faites par le professeur, au bureau, en début de séance, (séquences 1, 2, 4, 5, 6) et se succèdent avec des durées très courtes (cinq étapes en neuf minutes pour

la séquence 5). Le lien avec le HP⁶, qui devrait être le moteur de la recherche sur le phénomène, est le plus souvent implicite. Les élèves spectateurs sont censés observer, répondre aux questions de l'enseignant, noter schémas et conclusions. C'est aussi le professeur qui change de dispositif ou de type de courant et change d'étape, sans justification explicite. Le professeur 5 amorce la transition entre les étapes 2 et 3 en déclarant : «*Maintenant je vais envoyer dans cette bobine non plus une tension continue dans un sens ou dans l'autre, mais une tension variable alternative*», puis il fait le montage électrique. Lors du changement de dispositif expérimental, les comparaisons entre leurs organes respectifs sont rarement effectuées. Nous avons représenté ces comparaisons par une double flèche, au niveau des schémas des dispositifs, entre les plans de modélisation. C'est aussi le professeur qui établit le lien, quand il existe, entre les phénoménographies des étapes successives. On peut penser que la problématique de cette partie est «dans la tête» du professeur ; qu'en est-il «dans la tête» des élèves ? Dans le temps réservé à l'établissement de $F = k.i$, la problématique, (chercher à établir le lien entre F et i), est le plus souvent énoncée par le professeur. Le point de vue des élèves sur la nature de cette relation, avant expérience, n'a jamais été exploré.

4.2.3. La modélisation expérimentale quantitative $F = k.i$

Les aspects quantitatifs du phénomène sont conduits, pour huit des neuf séquences, sous forme d'activités expérimentales des élèves en binômes. Le protocole est proposé par le professeur, les élèves ayant à monter le dispositif, faire varier et noter par écrit les valeurs des mesures, tracer les points expérimentaux, tracer la droite modèle, énoncer collectivement avec l'aide du professeur, l'équation-relation : $F = k.i$, calculer k , ce qui est l'aboutissement de cinq séquences. Les dispositifs utilisés pour une telle modélisation sont : le HP pour la séquence 1 seulement (les textes recommandaient l'utilisation de deux dispositifs dont le HP lui-même), le système bobine-aimant pour les séquences 2, 3, 4, 8, 9, la maquette A pour les séquences 5 et 6. Relativement aux durées des enregistrements, le modèle $F = k.i$, une fois construit, n'a jamais été appliqué, qu'il s'agisse d'interpréter le fonctionnement du HP, ou de tout autre référent comme le moteur électrique par exemple.

Le temps consacré à l'établissement de ce modèle est considérable ; il varie de 43 à 69 minutes. Pourquoi les professeurs consacrent-ils autant de temps à une telle activité, alors que le temps imparti aux aspects qualitatifs est limité à quelques minutes, et que celui réservé à l'explication du fonctionnement du HP fait cruellement défaut ?

6 Les résultats d'un questionnaire sur le HP, avant enseignement, montrent qu'une très grande majorité d'élèves de seconde ignore les organes internes et le principe de cet objet.

- Nous proposons les hypothèses explicatives suivantes : les professeurs
- savent conduire la démarche d'établissement d'un modèle expérimental ;
 - ne maîtrisent pas les démarches relatives à l'étude d'un objet technique de la vie quotidienne ;
 - ne peuvent pas appliquer le modèle $F = k.i$ au contexte du fonctionnement du HP ;
 - ont leur épistémologie de la physique (le HP c'est accessoire, voire ce n'est pas de la physique, $F = k.i$ persistera même si la technologie des HP change) ;
 - retrouvent des «*scénarios conceptuels*» (Fillon, 1995, p. 16), coutumes pédagogiques classiques de l'enseignement des sciences physiques au lycée pour lesquelles les expériences de monstration, les protocoles, les conclusions relèvent de tâches du professeur, alors que les tâches les moins nobles d'exécution de montages, mesures, tracés, calculs relèvent des élèves et ils doivent y consacrer le temps nécessaire ;
 - sont soumis aux contraintes de l'évaluation ; $F = k.i$ peut donner lieu à des exercices graphiques et numériques classiques de ce niveau d'enseignement.

Le travail conduit ne nous permet pas de trancher entre les diverses hypothèses mais d'autres chemins sont possibles.

La démarche différente empruntée dans la séquence 7 (*annexe 2*) illustre un autre chemin. L'expérience quantitative (étape 7) est conduite en groupe classe, dans un temps plus modeste (21 minutes). Le dispositif utilisé est la maquette transparente B montée par le professeur et projetée au tableau. Le professeur fait varier l'intensité i ; un élève lit le déplacement d du «cône membrane». Les élèves effectuent le tracé des points expérimentaux et de la droite modèle. La conclusion collective débouche sur la relation mathématique $d = a.i$. (Notations du professeur 5. Il s'agit de la modélisation du comportement en continu de la maquette lié aux deux phénomènes associés : Laplace et élasticité de la membrane.) Le professeur conduit ses élèves à **déduire**, de $d = a.i$, le modèle $F = k.i$, selon le cheminement : d est proportionnel à F (proposition du professeur admise par les élèves), d est proportionnel à i , donc F est proportionnelle à i (proposition énoncée par un élève).

En fin de séquence, le professeur éclaire et interprète, en faisant «parler implicitement» le modèle $d = a.i$. La conclusion écrite au tableau rend compte de la démarche. «*Les vibrations de la membrane étant responsables de l'émission du son, on en déduit donc que les caractéristiques*

du son (hauteur, intensité) sont liées⁷ aux caractéristiques de l'intensité du courant dans la bobine, donc de la tension appliquée aux bornes du HP (fréquence, amplitude)».

Dans ce cheminement original, il est aisé de prélever les mesures de d et I sur la maquette, pour établir $d = a.i$. Parallèlement, il est tout aussi aisé d'appliquer ce modèle au contexte du fonctionnement du HP, voire d'en apercevoir les limites. Un modèle «hors la loi du prescrit» est plus cohérent que le modèle officiel.

4.3. Comment a-t-on expliqué le fonctionnement du HP ? Les liaisons entre les différentes étapes

Il ressort des textes curriculaires trois niveaux d'explication souhaités :

- quelle est l'origine du mouvement de la membrane ?
- pourquoi une tension alternative produit-elle un déplacement alternatif de la membrane ?
- pourquoi la fréquence de la membrane est-elle la même que celle du signal électrique et son amplitude de vibration croît-elle avec celle du signal ?

Qu'en est-il dans les contextes de classe enregistrés ?

4.3.1. L'origine du mouvement de la membrane

Dans toutes les séquences, le phénomène de Laplace a été montré ou rappelé et décrit en continu, sur des dispositifs «*objets scientifiques*» (Scache, 1986, 1993) prototypiques des laboratoires de sciences physiques : fil ou rails de Laplace/aimant, ou bobine-aimant. Il faut aussi rappeler que dans les séquences 2, 5, 9, le HP était absent de la salle de TP.

4.3.2. L'interprétation des propriétés caractéristiques du HP fonctionnant en émetteur sonore

Dans les séquences 2, 8, 9, il n'y a pas eu d'étude de dispositif fonctionnant en alternatif. Seule l'influence du sens du courant sur le sens de F a été montrée à l'aide d'un dispositif, objet scientifique, sans lien explicite avec le fonctionnement du HP.

7 Le lien ne peut être déduit que de $d = a.i$, le terme de force est absent du libellé, $F = k.i$ n'entre pas dans la chaîne de déductions du texte de conclusion.

L'analyse de la séquence 5 nous a permis de mettre à jour trois stratégies d'explication : deux formes de raisonnement systémique qualitatifs et la simulation d'un système par un autre.

a) Première forme de raisonnement systémique : l'analogie entre les phénoménographies de deux étapes différentes

Le cheminement est le suivant : les deux dispositifs sont analogues, l'un est la source (fil-aimant par exemple), l'autre la cible (bobine-aimant). La cible a des organes analogues à ceux de la source (aimant/aimant et fil/bobine). La cible et la source sont alimentées par des signaux d'entrée simples et identiques. Alors les comportements de sortie sont de même nature en force et en déplacement.

Voici comment procède le professeur 5 au début de sa séquence. Il commence par décrire le système : une bobine horizontale suspendue à un dynamomètre, un aimant en U vertical fixe, ainsi que le circuit d'alimentation en continu de la bobine (générateur, potentiomètre de réglage, ampèremètre à zéro central, interrupteur à bouton poussoir). Tout ce matériel est installé au bureau. Ensuite le professeur alimente la bobine et fait constater aux élèves : *«la bobine se déplace vers le bas»*. Puis il avance l'interprétation suivante : *«c'est tout à fait normal... à une intensité... la bobine se trouvant au voisinage d'un aimant, apparaît une force électromagnétique et un déplacement de la bobine»*. Ensuite le professeur change le sens du courant dans la bobine. Il fait constater aux élèves et écrit au tableau le complément de phénoménographie : *«i change de sens déplacement change de sens»*, il interprète de façon analogique par : *«on avait vu ça aussi avec la tige métallique, si le sens du courant change, le déplacement ou la force va s'exercer dans l'autre sens»*. Nous dirons qu'une telle forme de raisonnement introduit une liaison analogique entre les phénoménographies de deux étapes.

Dans la séquence 5 le professeur a utilisé trois fois cette forme de raisonnement :

- entre l'étape 0 et l'étape 2, ce que nous venons d'analyser ;
- entre l'étape 2 et l'étape 3 (analogie entre le mouvement oscillatoire d'une bobine suspendue à un ressort et alimentée en alternatif et celui de la même bobine alimentée en continu dans un sens puis dans l'autre) ;
- entre l'étape 3 et l'étape 5 (analogie entre le mouvement de la membrane de la maquette B, alimentée en alternatif, et celui de la bobine d'un système bobine-aimant ressort, alimentée dans les mêmes conditions).

Il semble que le système bobine-aimant, dispositif intermédiaire entre le système fil de Laplace-aimant et le HP, facilite l'établissement de liaisons analogiques inter-étapes. Nous avons relevé des liaisons analogiques

dans les séquences (1, 3, 4, 5, 6, 7). Sur les douze liaisons analogiques recensées, onze concernent le système bobine-aimant. René de Cotret & Larose (1994) et Orange (1994) soulignent et justifient le rôle intermédiaire de certains dispositifs tels que les maquettes. Ils le jugent essentiel pour l'apprentissage des élèves.

Nous devons noter que les séquences (2, 8, 9) sont dépourvues de liaisons analogiques inter-étapes. Et donc aucun rapport explicite, dans la séquence entre le TP et le HP.

b) Deuxième forme de raisonnement systémique : l'analogie entre le sens de variation du signal d'entrée et le sens de variation du signal de sortie d'un même système (le signal de sortie suit le signal d'entrée)

Le mode de raisonnement est le suivant : le professeur fait constater, sur un dispositif, que le signal d'entrée et celui de sortie évoluent dans le même sens ; il généralise ce résultat à l'interprétation de l'évolution du même système pour d'autres formes de signaux. Le professeur 5 (étape 2) poursuit en développant l'étude qualitative du phénomène. Il augmente l'intensité i , fait constater aux élèves et note au tableau : « *i augmente F augmente déplacement plus important* ». Les élèves voient directement l'évolution dans le même sens de l'entrée, via l'aiguille de l'ampèremètre, et de la sortie, via le déplacement de la bobine associée au ressort du dynamomètre. Le professeur alimente (étape 3) le dispositif bobine-aimant ressort en courant alternatif très basse fréquence. Il note au tableau : « *Tension alternative déplacement alternatif* ». La phrase d'interprétation qui suit : « *Donc vous voyez ici, la tension excitatrice varie, positive, négative, (référence analogique à l'étude en continu, dans un sens et dans l'autre, vue précédemment) et bien évidemment, la bobine elle suit* ». Nous dirons que le professeur construit (étape 2) ou applique (étape 3) le modèle «suiveur» quand il établit et utilise cette forme de raisonnement (nous avons repris le terme énoncé par le professeur 5).

c) La simulation d'un système par un autre

Dans la séquence 5, les élèves voient les oscillations de la bobine d'un système bobine-aimant-ressort alimenté en courant alternatif. Ces oscillations simulent celles de la membrane du HP. Ils voient, à basse fréquence, que l'aiguille de l'ampèremètre à 0 central change de sens quand la bobine change de sens de déplacement, que l'aiguille et la bobine ont la même fréquence, que l'amplitude du mouvement de la bobine croît avec celle de l'aiguille. La simulation par un modèle physique et transparent de l'objet renforce le schéma explicatif analogique précédent. Les simulations introduisent des liaisons inter-étapes entre les dispositifs.

Les simulations du mouvement alternatif de la membrane du HP par un autre dispositif ont été rares. Nous ne les avons recensées que dans deux séquences (3, 5).

Dans la séquence 5, il n'y a aucune liaison entre l'étape 6, étape de modélisation expérimentale, et les étapes antérieures. Il en est de même pour toutes les séquences où $F = k.i$ a été établi. Ceci confirme le pouvoir explicatif limité du modèle $F = k.i$ quant au référent HP. C'est ce pouvoir explicatif limité qui a probablement conduit les professeurs à emprunter les chemins de la simulation et des explications analogiques pour interpréter le fonctionnement du HP. L'analyse de la séquence 7 aurait tendance à le prouver : ces derniers chemins explicatifs y sont peu présents alors que le modèle quantitatif $d = a.i$ est au cœur de l'interprétation du fonctionnement de l'objet.

4.4. Représentation des séquences en plans successifs de modélisation

4.4.1. Le plan de modélisation

En prenant le schéma de la modélisation comme outil de lecture des activités d'une étape, on peut représenter chaque étape par son plan de modélisation. Ainsi le plan de modélisation 6 (figure 3) représente les caractéristiques principales de l'étape 6 (séquence 5).

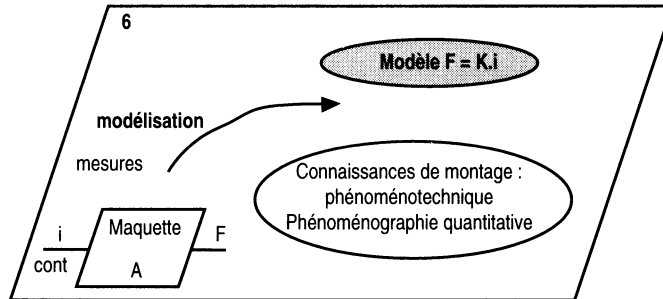


Figure 3 : Le plan de modélisation 6 représente les caractéristiques de l'étape 6 (séquence 5)

Géographiquement «au bas du plan», nous avons fait figurer comme référent empirique la maquette avec son signal d'entrée i continu et son signal de sortie F . Nous avons aussi représenté le domaine des connaissances phénoménotechniques nécessaires au montage du dispositif et à ses réglages. La phénoménotographie quantitative est l'ensemble des données expérimentales : tableau et graphique. Dans le «haut du plan» figure le modèle expérimental établi. La flèche ascendante signale la construction du modèle confronté aux mesures.

4.4.2. Les plans successifs de modélisation (annexe 3)

La séquence 5 perçue comme une succession d'étapes peut être représentée par une succession de plans de modélisation, depuis le plan de début (plan O, «en haut»), jusqu'au plan de fin de séquence (plan 6, «en bas»). Les durées des étapes figurent en regard de chaque plan de modélisation. Les liaisons analogiques entre étapes sont représentées par une flèche à double sens qui relie les phénoménographies des deux étapes. La simulation d'un dispositif par un autre est représentée par une flèche orientée du dispositif simulant vers le dispositif simulé. La flèche à double sens reliant les dispositifs des plans 3 et 4 signale que le professeur a explicitement comparé leurs organes de même fonction. Dans le plan de modélisation 2 le professeur a construit et appliqué la forme de raisonnement analogique entrée-sortie que nous avons appelé modèle «suiveur».

Si on compare les séquences représentées en plans successifs de modélisation, elles se différencient par :

- le nombre de plans de modélisation recensés (de 3 à 8) ;
- la présence ou l'absence de tel ou tel plan de modélisation ;
- l'ordre dans la succession des différents plans présents ;
- le plan de départ et le plan d'arrivée ;
- la succession des activités attachées à chaque plan ;
- la nature et durée de ces activités ;
- l'existence (ou non) de transitions entre les différents plans ;
- l'existence (ou non) de liaisons entre les plans, leur nombre et leur nature ;
- l'application ou non d'un modèle expérimental construit ;
- la présence (ou non) de simulations.

4.5. Le profil des séquences

En prenant comme critères la nature du système, la nature de son signal d'entrée, la nature et le type de réponse analysée en sortie (force ou déplacement de la membrane-son), il est possible de différencier, qualitativement, au sein des séquences observées, deux temps d'études principaux : l'un centré sur le haut-parleur et l'autre centré sur son phénomène moteur associé.

Dans le temps d'étude **centré sur le haut-parleur**, les activités prennent appui sur les dispositifs haut-parleur ou maquette complète, alimentés en courant alternatif. Les plans de modélisation concernés par ce temps sont repérables par les systèmes dont le signal d'entrée est alternatif. L'étude porte essentiellement sur les propriétés du mouvement de la membrane et du son émis.

Pour le temps d'étude **centré sur le phénomène**, les activités prennent comme support les systèmes fil-aimant, bobine-aimant, voire maquettes ou HP, alimentés en courant continu. La réponse traitée étant la force de Laplace. Les plans de modélisation en rapport avec ce temps d'étude sont ceux dont les systèmes ont un signal d'entrée i continu. En analysant les successions des temps d'étude, nous avons dégagé trois profils de déroulement des séquences.

4.5.1. Le profil phénomène physique seul (séquences 2, 8, 9)

Le haut-parleur est absent physiquement de la salle de TP. Les études sont centrées sur les systèmes fil-aimant, bobine-aimant alimentés en courant continu exclusivement.

4.5.2. Le profil phénomène physique, HP, phénomène physique (séquences 1, 5, 6)

Dans ces séquences, il y a alternance entre les deux temps d'étude. Elles débutent par la mise en évidence du phénomène en continu, voire en alternatif, puis vient la préoccupation de l'objet, la découverte de ses organes internes avec ou sans une rapide explication du principe de son fonctionnement, puis retour, et le plus souvent fin, sur les aspects quantitatifs du phénomène en continu à savoir : $F = k.i$.

4.5.3. Le profil HP, phénomène, HP (séquences 3, 4, 7)

Ces séquences débutent par un temps d'étude centré sur le haut-parleur : une description de ses organes internes (3), et/ou un rappel de ses organes (4). Succède à ce temps, celui de la mise en évidence et des analyses qualitative et quantitative du phénomène. Ces trois séances de travaux pratiques prennent fin avec un retour sur le haut-parleur, en ayant le souci d'interpréter et de simuler son comportement en fonctionnement.

Dans la séquence 7, dont nous avons noté la démarche originale, le premier temps est consacré à l'étude de l'objet en fonctionnement. Le second temps est réservé à l'étude du phénomène dont le modèle de comportement $F = k.i$ est **déduit par le calcul** de $d = a.i$. Dans la dernière

partie de la séance, les propriétés qualitatives du haut-parleur en fonctionnement sont interprétées de façon plus complète, en les déduisant du modèle $d = a.i$. Cette démarche en «boucle fermée» (objet, phénomène objet), établit une cohérence entre les savoirs et modèles construits expérimentalement, et leur utilisation, à des fins d'interprétation de propriétés caractéristiques de l'objet technique en situation de fonctionnement réel. Scache (1986) recommande une telle démarche cyclique pour l'enseignement des sciences en Lycée Professionnel (LP) : « *Notre objectif (dans l'article cité) est de montrer que l'objet expérimental sur lequel s'exerce la mesure est indispensable pour accéder à la loi ou au modèle mais que, d'une part, cet objet doit être issu, au LP, d'un objet technique et que, d'autre part, les connaissances acquises doivent permettre de résoudre le problème posé par l'objet technique* ».

4.6. Tableau de synthèse de l'analyse des séquences

LA FORME DES SÉQUENCES

- durée : 1h 30,
- une succession d'étapes : de 3 à 8 selon les séquences,
- chaque étape est caractérisée, quelle que soit la séquence, par des activités d'expérimentation sur un dispositif, alimenté par un type de courant,
- durée des étapes très variée : de 0.5 à 60 minutes,
- changements d'étape à l'initiative du professeur, le plus souvent sans justification explicite,
- peu de liens entre les différentes étapes,
- début de la séquence : le plus souvent, par une expérience de monstration du phénomène à l'aide du fil de Laplace ou d'une bobine ; elle ne débute par l'étude du HP que dans deux séquences,
- fin de la séquence : le plus souvent par l'établissement du modèle expérimental $F = k.i$ et le calcul de k .

LA MISE EN ÉVIDENCE DU PHÉNOMÈNE

- le plus souvent au début de la séquence et sans rapport explicite avec le HP,
- dans les séquences commençant par le HP, le dispositif de mise en évidence du phénomène est articulé aux organes du HP, mais c'est le professeur qui propose ce dispositif.

LA MODÉLISATION EXPÉRIMENTALE

- durée de cette activité conséquente : de 43 à 69 minutes,
- modèle établi : $F = k.i$, le modèle prescrit, dans 8 séquences et, dans 1 séquence, $d = a.i$, le modèle "du professeur",
- dispositif expérimental : le plus souvent, système bobine-aimant ou maquette A, le HP dans une seule séquence,
- application du modèle $F = k.i$: inexistante.

L'INTERPRÉTATION DU FONCTIONNEMENT DU HP

- inexistante dans trois séquences,
- par des raisonnements analogiques et qualitatifs entre systèmes (six séquences),
- par simulation : mouvement d'une bobine suspendue à un ressort alimentée par un GBF (deux séquences),
- par application du modèle $d = a.i$: dans la séquence originale où il a été établi.

LE PROFIL DES SÉQUENCES

Trois profils :

- le profil phénomène physique seul ; pas de référence au HP (trois séquences),
- le profil phénomène, HP, phénomène (trois séquences),
- le profil objet, phénomène, objet (trois séquences).

L'ACTIVITÉ DES ÉLÈVES

Essentiellement en binômes : montage expérimental, relevé des mesures, traitement graphique des données, calcul de k , observation des expériences au bureau et réponse aux questions du professeur.

L'ACTIVITÉ DU PROFESSEUR

Dans les étapes de monstration au bureau il présente, schématise, réalise, met en fonctionnement des montages successifs, questionne les élèves sur les faits observés, formule les conclusions.

Dans l'étape de modélisation expérimentale, il propose le plus souvent le montage, le décrit, donne les consignes aux binômes élèves pour sa réalisation et formule, en synthèse des tracés des élèves, l'expression du modèle expérimental $F = k.i$.

Il fixe, sans justification explicite ni négociation, le changement et l'ordre des étapes.

CONCLUSIONS

Les textes officiels relatifs aux actuels programmes de sciences physiques de seconde des lycées d'enseignement général recommandent de conduire de pair l'étude du haut-parleur et ses fondements physiques. Selon les auteurs de programmes, il faut entendre par fondements physiques le phénomène force de Laplace, ses propriétés qualitatives et son embryon de modèle de comportement $F = k.i$. Dans cette étude, nous avons souhaité en savoir plus sur la façon dont était poursuivi, concrètement, sur le terrain, ce double objectif : l'étude d'un objet dans son fonctionnement courant et celle du phénomène principe moteur associé à cet objet. Nous avons sélectionné dans le programme la séance de TP sur $F = k.i$, car elle est clairement identifiée dans les textes, et autorise les comparaisons. Nous avons privilégié la multiplicité des "acteurs enseignants" sur un même thème limité en temps à 1h 30 pour dégager, dans les parcours curriculaires réels, les invariants, mais aussi les éléments originaux. Ce choix restreint la portée des conclusions de l'étude aux données recueillies. Nous avons ensuite analysé les enregistrements vidéo des neuf séquences à l'aide du schéma de modélisation de Martinand avec deux objectifs : le faire fonctionner pour interroger les séquences, proposer quelques ajustements pour mieux rendre compte des activités propres à ce type de séquence. Les conclusions de cette étude font donc référence à l'analyse des séquences et au schéma de modélisation comme outil.

Le plan de modélisation et la dynamique des séquences

L'étude du phénomène-objet s'appuie sur quatre systèmes techniques modèles physiques du haut-parleur et de même phénomène principe moteur que lui : le haut-parleur, la maquette pédagogique, le système bobine-aimant, le système fil rectiligne-aimant (système scientifique le plus modélisé constitué à partir d'objets propres aux collections des laboratoires de physique).

Chaque système ainsi constitué est alimenté en courant électrique et sa réponse est interprétée-mesurée en termes de force ou de déplacement du conducteur. Nous avons noté trois types d'études selon la nature du signal courant i en entrée : celles à intensité nulle, celles à intensité continue positive ou négative, celles à intensité alternative-variable.

Chaque séquence de travaux pratiques se déroule selon un ensemble d'étapes comportant des tâches de modélisation du phénomène et de l'objet.

Chaque étape de la séquence comporte des activités de modélisation avec comme référent le couple dispositif sur lequel on expérimente/nature du courant d'entrée.

Nous avons été amenés à introduire le concept de plan de modélisation. Il représente le déroulement d'une étape lu avec le schéma de la modélisation de Martinand. Cet outil permet de rendre compte «graphiquement» des activités de modélisation de chaque étape et de l'interroger sur la présence ou l'absence, la nature, le rôle de telle ou telle activité de l'élève ou du professeur. L'ensemble des plans de modélisation traduit graphiquement les caractéristiques de la dynamique de la séquence : nombre de plans, plans présents/absents, ordre de succession, interactions entre plans, présence/absence de tel ou tel temps de modélisation.

Le plan de modélisation est un outil d'investigation, il permet de questionner avec pertinence les séquences sur le HP, peut-être est-il adapté à la description de séquences portant sur l'étude en physique d'autres objets, mais ses limites s'arrêtent aux portes de l'interprétation de curriculums réels.

Le modèle expérimental $F = k.i$, son établissement et son utilisation

En ce qui concerne l'étude du phénomène et le modèle $F = k.i$, le bilan est le suivant :

- l'essentiel du temps, (le plus souvent 50 minutes), est consacré aux activités, en binômes, orientées vers l'établissement de $F = k.i$ et la détermination de k ;

- ce modèle, construit le plus souvent en fin de séance de TP, n'a jamais été utilisé, dans les séquences, ni à propos du HP, ni à propos de tout autre dispositif de même principe moteur que lui. Le manque de temps ne peut être la seule justification. Le domaine d'application du modèle est celui d'une partie du système HP. Il régit l'interaction conducteur-aimant, en termes de courant et de force. On peut penser que le professeur et les élèves feront fonctionner ce modèle dans des exercices numériques formels de calculs de forces, de courants, de constantes k , en prolongement de ce TP ;

- seuls des raisonnements qualitatifs (les liaisons analogiques entre les phénoménographies des systèmes; la variation du signal de sortie suit celle du signal d'entrée) ont servi d'outils pour expliquer, dans quelques séquences, le comportement du HP.

Le modèle $d = a.i$ élaboré expérimentalement dans la séquence 7 est un «bon modèle» : il n'offre pas de difficulté particulière de construction par

la mesure, il rend compte du fonctionnement réel du HP alimenté en signaux alternatifs. On peut même en montrer les limites lors de l'interprétation de la forme de la courbe de bande passante du HP.

L'objet HP et son étude

En ce qui concerne l'objet et son étude, nous avons pu faire les constats suivants :

- il n'est pas ou est peu présent physiquement dans les séances de TP enregistrées ;
- le temps consacré à son étude et à son principe est souvent limité, voire inexistant ;
- lorsqu'on analyse ses organes internes, le lien avec ceux du système étudié en amont et en aval est peu souvent assuré, ce qui appauvrit la problématique des activités ;
- les systèmes sont le plus souvent étudiés en courant continu, ce qui prive les élèves de simulations alternatives de la mécanique motrice du HP et de descriptions phénoménographiques nécessaires à l'établissement de liaisons analogiques.

Les stratégies adoptées par les professeurs pour conduire les deux objectifs du programme

Nous avons noté, au second paragraphe, que les instructions relatives au thème du HP fixaient deux objectifs : présenter le phénomène de Laplace, le modéliser par $F = k.i$, et utiliser ces connaissances pour interpréter le fonctionnement du HP. Nous avons analysé ces instructions et montré qu'elles conduisent à une impasse : il est impossible d'utiliser $F = k.i$ comme seul outil d'interprétation du fonctionnement de cet objet. Comment les professeurs ont-ils géré cette difficulté ?

Ils ont tous consacré une grande partie du temps de la séquence à la présentation du phénomène et à sa modélisation expérimentale « limitée à un facteur » : $F = k.i$ ou $d = a.i$.

Devant l'impossibilité d'utiliser $F = k.i$ comme point de départ d'une démarche explicative du fonctionnement du HP, force est de constater que les professeurs ont adopté des stratégies différentes. Certains se sont réfugiés dans la seule étude du phénomène. D'autres ont tenté, par la multiplication du nombre des étapes, d'introduire et d'utiliser des

raisonnements analogiques inter-étapes, ou de simuler le fonctionnement d'un dispositif par un autre. Enfin un professeur n'a pas hésité à faire construire un modèle expérimental « hors programme » : $d = a.i$. Il a ainsi pu expliquer, au terme de sa séquence, pourquoi le son émis a la même fréquence que la tension électrique d'alimentation du HP et pourquoi le niveau sonore émis par cet objet croît avec celui de sa tension d'alimentation, propriétés que les textes curriculaires de seconde demandent d'interpréter.

Nous tenons à remercier les neuf professeurs de lycée qui nous ont accueilli dans leurs classes.

BIBLIOGRAPHIE

- BÉGUIN C., GURTNER J.L., DE MARCELLUS O., DENZLER M., TRYPHON A., & VITALE B. (1994). Activités de représentation et de modélisation dans une approche exploratoire de la mathématique et des sciences. 1ère partie. Les activités de représentation. *Petit x*, n° 38, pp. 41-71. Revue IREM Université Grenoble.
- BÉGUIN C., GURTNER J.L., DE MARCELLUS O., DENZLER M., TRYPHON A., & VITALE B. (1995). Activités de représentation et de modélisation dans une approche exploratoire de la mathématique et des sciences. 2ème partie. Les activités de modélisation dans le continu. *Petit x*, n°41, pp. 51-82. Revue IREM Université Grenoble.
- BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1992). *Numéro hors série du 24 Septembre 1992*. Paris, Ministère de l'Éducation nationale.
- DEFORGE Y. (1985). *Technologie et génétique de l'objet industriel*. Paris, Maloine.
- DE LANDSHEERE G. (1979). *Dictionnaire de l'évaluation et de la recherche en éducation*. Paris, PUF.
- FILLON P. (1995). Quelques ruptures et continuités dans l'enseignement de la chimie en troisième et seconde. In «*Actes du 5ème séminaire national de recherche en didactique des sciences physiques*». IUFM Reims.
- FOUREZ G., ENGLEBERT-LECOMTE V. & MATHY P. (1993). Un modèle pour un travail interdisciplinaire. *Aster*, n°17, pp. 119-142.
- JOHSUA S. & DUPIN J.-J. (1993). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. Paris, Colin.
- LE MOIGNE J.-L. (1977-1983). *La théorie du système général*. Paris, PUF.
- MARTINAND J.-L. (1992). Présentation in *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris, INRP
- MARTINAND J.-L. (1994). Quels enseignements peut-on tirer des travaux dans la perspective du développement de curriculum? In *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris, INRP.
- MARTINAND J.-L. (1995). Rudiments d'épistémologie appliquée pour une discipline nouvelle : la technologie. In M. Develay (Collectif), *Savoirs scolaires et didactique des disciplines une encyclopédie pour aujourd'hui*. Paris, ESF.
- MARTINAND J.-L. (1997 à paraître). Introduction à la modélisation. In *Actes du séminaire de didactique du LIREST 1994-1995*. Cachan.
- MORIN E. (1977-1981). *La méthode 1. La Nature de la Nature*. Paris, Seuil.

- ORANGE C. (1994). Les modèles de la mise en relation au fonctionnement. In *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris, INRP.
- PERRENOUD P. (1990). Curriculum : le formel, le réel, le caché. In J.Houssaye (Collectif), *La pédagogie une encyclopédie pour aujourd'hui*. Paris, ESF.
- PEREZ J.P. (1995). *Mécanique*. Paris, Masson.
- RENE DE COTRET S. & LAROSE R. (1994). Les analogons et la maquette didactique. *Didaskalia*, n°3, pp. 109-117.
- SCACHE D. (1986). Pour l'introduction d'une composante technologique au lycée professionnel en sciences physiques. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 680, pp. 409-426.
- SCACHE D. (1993). Référence technique et classe laboratoire de sciences physiques en lycée professionnel. Thèse, Université de Lille.
- SCACHE D., DUPRET C. & BAUDE J.M. (1997). Modélisation électrique des phénomènes acoustiques. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 792, pp. 391-406.
- SIMONDON G. (1989). *Du mode d'existence des objets techniques*. Paris, Aubier.
- TRIGEASSOU J.C. & BEAUFILS D. (1991). Analyse de données, méthodes numériques et sciences physiques. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 731, pp. 297-308.
- WALLISER B. (1987). *Systèmes et modèles*. Paris, Seuil.

ANNEXE 1 : Les étapes recensées dans les séquences

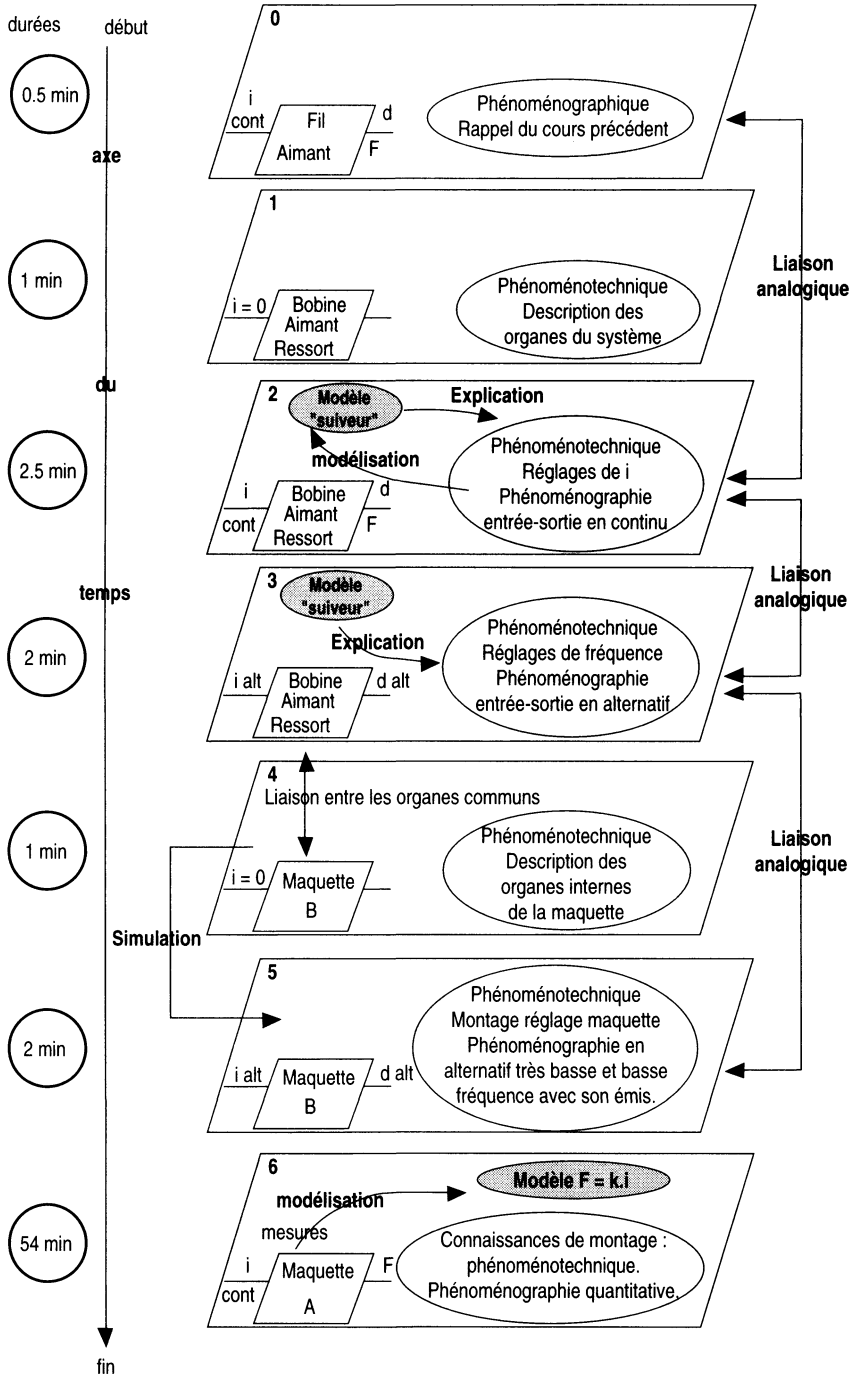
F	1	2		
	1 min	8 min		
	B	3	4	
		1 min	6 min	
M				
	H	5	6	7
9 min		41 min	21 min	
I = 0		I cont	I alt	
Séquence 1				
F	1	2		
	3 min	4 min		
	B	3	4	
		14 min	45 min	
M				
	H			
I = 0		I cont	I alt	
Séquence 2				
F				
	B	2	3	4
		15 min	28 min	8 min
	M			
H		1		5
	10 min		3 min	
I = 0		I cont	I alt	
Séquence 3				
F				
	B	1	2	
		0.25 min	2 min	
	M	3	4	5
0.5 min		46 min	1.5 min	
H	0			
	1 min			
I = 0		I cont	I alt	
Séquence 4				
F		0		
		0.5 min		
	B	1	2	3
		1 min	2.5 min	2 min
M	4	6	5	
	1 min	54 min	2 min	
H				
	I = 0		I cont	I alt
Séquence 5				
F	1	2		
	1 min	1.5 min		
	B	3	4	
		1 min	5 min	
M	6	8	7	
	5.5 min	59 min	0.5 min	
H	5			
	4 min			
I = 0		I cont	I alt	
Séquence 6				
F	4	5		
	1 min	13 min		
	B			
		M	3	7
3 min	21 min		3 min	
H	3	1	2	
		2 min	25 min	
I = 0		I cont	I alt	
Séquence 7				
F				
	B	1	2	
		3 min	58.5 min	
	M			
H		0		
	2 min			
I = 0		I cont	I alt	
Séquence 8				
F		0		
		2 min		
	B	1	2	
		24 min	60 min	
M				
	H			
I = 0		I cont	I alt	
Séquence 9				

F B M H représentent les dispositifs expérimentaux : **F** le dispositif fil/aimant, **B** le système bobine-aimant, **M** la maquette, **H** le haut parleur. Chaque case « remplie » représente une étape réelle de la séquence, les nombres 1,2... l'ordre des étapes avec les temps consacrés à chacune d'elles.

ANNEXE 2 : Les étapes de la séquence 7

FIL A	4	1 min	5	13 min		
	Description du montage dit des rails de Laplace.		Mise en évidence du phénomène de Laplace. Influence du sens du courant sur le sens de la force. Influence de l'accroissement de l'intensité sur le mouvement de la tige.			
BOB	▲					
MAQ	3		7	21 min	6	3 min
	Description des organes de la maquette transparente B de HP		Modélisation du comportement du HP : d (dépl membrane) = $a.i$ (<i>intensité</i>). Par mesures sur la maquette Pierron projetée au tableau. Modélisation $F = k.i$ déduite par le calcul de $d = a.i$ Explication à l'aide de $d = a.i$ des propriétés du HP en fonctionnement alternatif.		Alimentation de la maquette de HP transparente B par un GBF en basse fréquence. Etude qualitative du fonctionnement de la maquette. Explication de son mouvement en liaison avec le comportement du fil de Laplace alimenté en continu.	
HAUT	▲					
	3	3 min	1	2 min	2	25 min
	Description Schématisation des organes du HP à partir d'un HP démonté.		Alimentation du HP en continu. Mise en évidence de son non fonctionnement.		Alimentation du HP avec un GBF. Etude qualitative du HP en fonctionnement. Influence de la fréquence et de l'amplitude du signal d'entrée sur le son émis.	
	i = 0		i CONTINU = + OU -		i ALTERNATIF	

ANNEXE 3 : Les plans de modélisation de la séquence 5



ANNEXE 4 : Les plans de modélisation de la séquence 7

