



Une ingénierie didactique fondée sur une démarche d'investigation avec simulation pour enseigner les ondes mécaniques au lycée

Ahmed Ben Jemaa

► To cite this version:

Ahmed Ben Jemaa. Une ingénierie didactique fondée sur une démarche d'investigation avec simulation pour enseigner les ondes mécaniques au lycée. Education. Université de Bretagne occidentale - Brest; Université virtuelle de Tunis, 2017. Français. NNT : 2017BRES0100 . tel-01769477

HAL Id: tel-01769477

<https://theses.hal.science/tel-01769477>

Submitted on 18 Apr 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



université de bretagne
occidentale



UNIVERSITE
BRETAGNE
LOIRE

UNIVERSITE
VIRTUELLE
Tunis

THÈSE EN COTUTELLE INTERNATIONALE
THÈSE / UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE

sous le sceau de l'Université Bretagne Loire

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE

Mention : Sciences de l'éducation

**École Doctorale Education, Langages, Interactions,
Cognition, Clinique**

THÈSE / UNIVERSITÉ Virtuelle de Tunis

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ VIRTUELLE DE TUNIS

Mention : Didactique des sciences physiques

École Doctorale Didactiques, Sciences de l'Enseignement

Métiers de l'Education et de la Formation

Présentée par

Ahmed Ben Jemaa

Préparée au CREAD EA3875 à Rennes
& ECOTIDI à Tunis

Une ingénierie didactique
fondée sur une démarche
d'investigation avec
simulation pour enseigner
les ondes mécaniques au
lycée

Thèse soutenue le 12 décembre 2017
devant le jury composé de :

Monsieur Jean-Marie Boilevin

Professeur, Université UBO / *Directeur de thèse*

Monsieur Bassem Jamoussi

Professeur, Université virtuelle de Tunis / *Directeur de thèse*

Monsieur Alain Jameau

Maitre de conférences, UBO / *Examineur*

Monsieur Abdelmajid Naceur

Professeur, Université virtuelle de Tunis / *Examineur*

Monsieur Mohamed Tmar

Professeur, Université de Tunis / *Président du jury*

Monsieur Patrice Venturini

Titre, Université Toulouse J. Jaurès / *Rapporteur*

Dédicace

A mon père : Miloudi,

Pour ses sacrifices et ses efforts consacrés,

L'encouragement qu'il me porte, son soutien,

*Qu'il trouve dans ce travail le témoignage de ma profonde
gratitude et mon infini dévouement. A ma mère Hnya.*

A mes frères et sœurs

A ma chère femme : Saida

*Qui m'a soutenue et qui m'a supporté durant toutes les
étapes de ce travail.*

A mes enfants : Oussama, Rafed et Ranim

REMERCIEMENTS

A la fin de ce travail, je tiens à exprimer toutes mes reconnaissances à l'égard de M. Jean-Marie Boilevin et M. Bassem Jamoussi d'avoir accepté de diriger ce travail de thèse. Je les remercie pour le vif intérêt qu'ils ont porté à mon travail et pour leurs encouragements continus durant les mois difficiles de rédaction.

C'est ainsi qu'à travers ce thèse, je tiens aussi à remercier du fond de mon cœur madame Chiraz Ben Kilani grâce à son soutien, sa simplicité, son entière disponibilité et ses conseils. J'exprime également ma gratitude à l'égard à monsieur Jalel Saadi avec qui j'ai commencé mes recherches en didactique.

Je voudrais exprimer mes respects les plus profonds tous ceux qui, par leurs apports multiformes ont contribué à l'aboutissement et à la réussite de cette recherche, précisément M. Abdelhamid Naceur et M. René-Paul Desse.

Mes remerciements vont aussi à toutes les personnes du laboratoire qui m'ont gentiment accueilli parmi elles et m'ont aidé à diverses reprises et surtout M. Alain Jameau, Mmes Carole Le Henaff, Catherine Gougeon, Ghislaine Gueudet, Sophie Joffredo-Le Brun, Sylvaine Besnier, M. Jean-Noël Blocher et tous ceux qui m'ont aidé à m'intégrer et qui m'ont simplifié les tâches administratives.

Je tiens à remercier doublement Monsieur Ferid Wahabi professeur au lycée Echabeb de Manouba qui a accepté l'intrusion d'une caméra dans sa classe de quatrième année scientifique. Par la même occasion, que ses élèves soient remerciés pour leur participation active, leur patience et la pertinence de leurs interventions.

Ahmed BEN JEMAA

Liste des figures

Figure 1 : Schéma des jeux de savoir Gruson et al. (2012)	28
Figure 2 : Relations possibles pouvant s'établir entre les différents plans (Beaufils et Richoux, 2003)	37
Figure 3 : Exemple d'enchaînement de questions du scénario pédagogique	41
Figure 2. 1 : Enchaînement des séances du cours enseignement ordinaire.	56
Figure 2. 2: Les différentes colonnes qui constituent le synopsis d'une séance	57
Figure 2. 3: Structure du tableau d'analyse des séances d'enseignement ordinaire ..	61
Figure 2. 4: Emplacement de la 1 ^{ère} séance au cours de l'enseignement ordinaire ..	62
Figure 2. 5: Extrait du tableau d'analyse de la première séance d'enseignement ordinaire des ondes mécaniques	63
Figure 2. 6: Taux de répartition des thèmes dans la première séance	64
Figure 2. 7: tableau illustrant l'avancée du savoir du thème 3	68
Figure 2. 8: Tableau illustrant l'avancée du savoir au cours de la première séance ..	69
Figure 2. 9: Histogramme illustrant l'avancée du savoir	70
Figure 2. 10: Emplacement de la 2 ^{ème} séance au cours de l'enseignement ordinaire	71
Figure 2. 11: Taux de répartition des thèmes dans la deuxième séance	73
Figure 2. 12: Dispositif de visualisation de sinusoïde des temps	78
Figure 2. 13: Tableau illustrant l'avancée du savoir du thème 5	79
Figure 2. 14: Représentation de la sinusoïde des espaces par l'enseignant	81
Figure 2. 15: Deux sinusoïdes des espaces à deux instants très proches	82
Figure 2. 16: Tableau illustrant l'avancée du savoir du thème 6	83
Figure 2. 17: Tableau illustrant l'avancée du savoir au cours de la deuxième séance	84
Figure 2. 18: Histogramme illustrant l'avancée du savoir au cours de la deuxième séance du cours	84
Figure 2. 19: Illustration d'un jeu gagné	85
Figure 2. 20: Emplacement de la 3 ^{ème} séance au cours de l'enseignement ordinaire	86
Figure 2. 21: Taux de répartition des thèmes dans la troisième séance	89

Figure 2. 22: Tableau illustrant l'avancée du savoir du thème 3	92
Figure 2. 23: Tableau illustrant l'avancée du savoir au cours de la troisième séance	96
Figure 2. 24: Histogramme illustrant l'avancée du savoir au cours de la troisième séance du cours	96
Figure 2. 25: Tableau illustrant l'avancée du savoir	98
Figure 2. 26: Histogramme illustrant l'avancée du savoir au cours	98
Figure 3. 1: Moment de la passation du test	111
Figure 3. 2: Exemple de réponse incorrecte	117
Figure 4. 1: Extrait du programme officiel ministère de l'éducation (2009, p. 85)	122
Figure 4. 2: Extrait du programme officiel ministère de l'éducation tunisienne (2009, p. 87)	123
Figure 5. 1: Capture d'écran de la simulation	130
Figure 5. 2: Un espace des signes qui fait partie du « réel » de l'élève en classe de physique (Beaufils et Richoux, 2003).	133
Figure 5. 3: Démarches du physicien (d'après le schéma synoptique de Guillon, 1995, p.116)	134
Figure 6. 1: Exemple d'enchaînement des étapes du scénario d'enseignement par PCDR	139
Figure 7. 1: Vue d'ensemble d'enchaînement des séances suivies	147
Figure 7. 2: Prise de vue de la salle de TP	150
Figure 8. 1: Défilement des activités et des phases au cours de la séance	153
Figure 8. 2: modèle de structuration du synopsis	154
Figure 9. 1 : Découpage de la séance du TP en parties et en phases	158
Figure 9. 2: Emplacement de la première et la deuxième phase dans la séance du TP	159
Figure 9. 3 : Emplacement de la première phase dans la séance du TP	159

Figure 9. 4: Les données prises de l'écran de l'ordinateur	161
Figure 9. 5: Emplacement de la deuxième phase dans la séance du TP	164
Figure 9. 6: Détermination de la période T par suivi de sinusoïdale du point bleu ..	165
Figure 9. 7: Mesure de la longueur d'onde λ	165
Figure 9. 8: Emplacement de la troisième phase dans la séance du TP.....	168
Figure 9. 9: Résultat prévu par la tâche n°2 de la deuxième partie de la séance....	171
Figure 10. 1: Emplacement de la première phase dans la séance du TP	176
Figure 10. 2 : <i>Transcription du début du jeu d'apprentissage 3</i>	185
Figure 10. 3: Emplacement de la deuxième phase dans la séance du TP	188
Figure 10. 4: Déroulement des jeux d'apprentissage en fonction du temps 2 ^{ème} phase	194
Figure 10. 5: Critique de l'élève E6.....	198
Figure 10. 6: Critique de l'élève E8.....	198
Figure 10. 7: Emplacement de la troisième phase dans la séance du TP.....	200
Figure 10. 8: Déroulement des jeux d'apprentissage en fonction du temps 3 ^{ème} phase	208
Figure 10. 9: L'enseignant entrain de tracer les deux sinusoïdes sur le tableau	209
Figure 10. 10: Un extrait du travail réalisé par l'élève E8.	210
Figure 10. 11: Sens de déplacement des deux points de la corde.....	210
Figure 10. 12: Transcription du début de chevauchement des jeux d'apprentissage 5 et 6.....	211
Figure 10. 13: Critique de la réponse par l'élève E1	213
Figure 10. 14: Critique de la réponse par l'élève E 8	213
Figure 11. 1 : moment de passation du post-test.....	218
Figure 11. 2: Tableau n°1 résultat concernant la célérité de l'onde	220
Figure 11. 3: Tableau n°2 résultat des statistiques sur le front d'onde	220
Figure 11. 4: Tableau n° 3 résultat des statistiques sur l'aspect de la corde.....	221
Figure 11. 5: exemple de réponse des élèves à la question 3)	221
Figure 11. 6: Tableau n°4 Evolution de nombre de réponses correctes.....	222
Figure 11. 7: regard croisé sur les réponses sur le front d'onde et sur l'aspect de la corde par élèves.....	223

Figure 2 : Correspondance des erreurs des élèves avec les conceptions suspectes	228
Figure 3 : Tableau comparatif des réponses correctes avant et après enseignement par PCDR.....	231

liste des tableaux

Tableau 2. 1: Partie du tableau d'analyse de la première séance correspondant au thème mesure de la célérité	67
Tableau 2. 2: Extrait du tableau d'analyse de la deuxième séance d'enseignement ordinaire des ondes mécaniques.....	72
Tableau 2. 3: Partie du tableau d'analyse relative au thème 5 : l'étude expérimentale de sinusoïde des espaces et de temps	77
Tableau 2. 4: Tableau d'analyse du thème 6 : définitions des périodes spatiales et temporelles	80
Tableau 2. 5: Extrait du tableau d'analyse de la troisième séance d'enseignement ordinaire des ondes mécaniques.....	88
Tableau 2. 6: Partie du tableau d'analyse relative au thème 3 : sinusoïde des espaces	91
Tableau 6. 1: Le scénario pédagogique prévu par le chercheur et l'enseignant....	145

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	15
1 Introduction	16
2 Position du problème	17
3 Méthodologie de recherche et cadre théorique	20
3.1 La notion d'ingénierie didactique	20
3.1.1 Les analyses préalables	21
3.1.2 Conception et analyse <i>a priori</i>	21
3.1.3 Expérimentation, analyse <i>a posteriori</i> et validation	22
3.1.4 Conclusion	22
3.2 Démarches d'investigation dans l'enseignement des sciences	22
3.2.1 La démarche d'investigation ou une démarche d'investigation ?	23
3.2.2 Caractéristique d'une démarche d'investigation	24
3.2.3 Introduction de la démarche d'investigation en France	24
3.2.4 Conclusion	25
3.3 La théorie de l'action conjointe en didactique	25
3.3.1 Jeu didactique : jeu en tant que modèle caractérisant l'action	26
3.3.2 Jeux épistémiques et jeux d'apprentissage	27
3.3.3 Notions de contrat et de milieu dans la TACD	28
3.3.4 Le triplet des genèses : la chronogénèse, la mésogénèse et la topogénèse	29
3.3.5 Le quadruplet : définir, d'évoluer, réguler, institutionnaliser	30
3.4 Les conceptions des élèves	31
3.4.1 Intérêt des conceptions	31
3.4.2 Origine des conceptions	31
3.4.3 Modélisation des conceptions	32
3.4.4 Caractéristiques des conceptions	32
3.4.5 Conclusion	33
4 Cadre épistémologique : modèle et simulation en sciences	34
4.1 Le modèle	34
4.1.1 Notion de modèle	34
4.1.2 Caractéristique d'un modèle	34
4.2 Théorie et modèle	34
4.3 La simulation	35
4.3.1 Notion de la simulation	35
4.3.2 Un plan entre réalité et modèles	36

4.3.3 La simulation dans l'enseignement des sciences physiques	38
5 Questions de recherche	42
PREMIERE PARTIE	44
ANALYSE PREALABLE	44
CHAPITRE 1	45
ANALYSE EPISTEMOLOGIQUE ET HISTORIQUE	45
1 Introduction	46
2 Histoire du concept	46
2.1 Concept d'onde au XVII ^e siècle : naissance du concept	46
2.2 Concept d'onde au XVIII ^e siècle : le concept d'onde prend une dimension physico-mathématique.....	47
2.3 Concept d'onde au XIX ^e siècle : les ondes deviennent mesurables	47
2.4 Le concept d'onde au XX ^e siècle : le concept d'onde lumineuse perd sa « matérialité »	48
3 Le concept d'onde	49
3.1 Définition d'une onde.....	49
3.2 Propriétés fondamentales des ondes	49
3.2.1 Description d'une onde par son équation d'onde.....	49
3.2.2 Phase d'ondes d'une onde	50
3.2.3 Vecteur d'onde et nombre d'onde.....	50
3.2.4 Vitesse de phase, fréquence et longueur d'onde.....	50
3.2.5 Vitesse de phase des ondes longitudinales dans les liquides et transversales sur une corde	51
3.2.6 Représentation complexe des ondes.....	51
3.2.7 Principe de superposition et principe de Huygens	52
3 Conclusion	52
CHAPITRE 2	54
ANALYSE DE L'ENSEIGNEMENT ORDINAIRE ET DE SES EFFETS.....	54
1 Introduction	55
2 Méthodologie spécifique à l'enseignement ordinaire de la recherche....	55
2.1 Contexte de l'étude	55
2.1.1 Enseignant observé, classe et établissement concerné	55
2.1.2 Organisation des séances d'enseignement	56
2.1.3 Recueil des données	57
2.1.4 Construction des synopsis primaires	57
2.1.5 Rédaction de la narration didactique	57
2.2 Construction des échelles : granularité de plus en plus fine.....	57
2.2.1 Variétés des échelles temporelles	58

2.2.2	Structuration thématique	58
2.2.3	Structuration en jeux	58
2.2.4	Structuration en épisodes	58
2.3	Les principes de l'analyse	59
2.3.1	Des descripteurs liés à l'avancée du savoir	59
2.3.2	Construction des tableaux d'analyse	60
3	Traitement des données	61
3.1	Première séance du cours	61
3.1.1	Présentation	61
3.1.2	Narration didactique	62
3.1.3	Premier niveau d'analyse : Construction du tableau d'analyse ...	63
3.1.4	Deuxième niveau d'analyse : Analyse des thèmes	64
3.1.5	Troisième niveau d'analyse : Analyse en jeux didactiques	64
3.1.6	Conclusion	69
3.2	Deuxième séance du cours	70
3.2.1	Présentation	70
3.2.2	Narration didactique	71
3.2.3	Premier niveau d'analyse : Construction du tableau d'analyse ...	72
3.2.4	Deuxième niveau d'analyse : Analyse des thèmes	73
3.2.5	Troisième niveau d'analyse : Analyse en jeux didactiques	74
3.2.6	Conclusion	83
3.3	Troisième séance du cours	85
3.3.1	Présentation	85
3.3.2	Narration didactique	86
3.3.3	Premier niveau d'analyse : Construction du tableau d'analyse ...	87
3.3.4	Deuxième niveau d'analyse : Analyse des thèmes	88
3.3.5	Troisième niveau d'analyse : Analyse en jeux didactique	89
3.3.6	Conclusion	95
3.4	Conclusion	97
	CHAPITRE 3	100
	ANALYSE COGNITIVE	100
	LES CONCEPTS CLES DE L'ONDE : LA CELERITE ET LE FRONT D'ONDE	
		100
1	Les conceptions des élèves liées au concept d'onde : revue de littérature	
	101	
1.1	Les conceptions et les obstacles liés au concept d'onde dans	
	l'enseignement secondaire	101
1.1.1	Les travaux de Maurines et <i>al.</i> : 1986/2007	101

1.1.2 Les travaux en continuité avec ceux de Maurines menés en Tunisie	104
1.1.3 Le travail de Tongchai et al. (2011)	105
1.2 Les conceptions et les obstacles liés au concept d'onde dans l'enseignement supérieur.....	106
1.2.1 Travaux de Maurines.....	106
1.2.2 Travail de Kaya Şengören, et al. (2009)	108
1.2.3 Travail de Mihas et Gemousakakis (2007).....	109
1.3 Conclusion	109
2 Les conceptions des élèves liées au concept d'onde : résultats des analyses du pré-test.....	110
2.1 Méthodologie spécifique à la mise en œuvre du pré-test.....	111
2.1.1 Contexte de l'étude	111
2.1.2 Recueil des données.....	111
2.1.3 Outils de traitement des données.	111
2.2 Analyse des résultats	112
2.2.1 La première question : la vitesse de propagation d'une onde progressive. Contrôle de la conception hybride capital.....	112
2.2.2 Les questions 2, 3 et 4 : aspect de la corde. Contrôle de la conception de l'onde serpente.....	113
3 Conclusion.....	117
CHAPITRE 4	119
ANALYSE DU CHAMP DE CONTRAINTE	119
1 Contraintes externes et internes liées à la discipline des sciences physiques	120
1.1 Contraintes externes de nature institutionnelle	120
1.1.1 Méthodologie d'enseignement de la discipline.....	120
1.1.2 Objectifs visés	121
1.2 Contrainte interne liées à la discipline elle-même	123
2 Contraintes internes liées au savoir onde mécanique	124
3 Conclusion.....	125
PARTIE 2	126
ANALYSE A PRIORI	126
CHAPITRE 5 :	127
GENESE DE L'INGENIERIE ET DESCRIPTION DES CHOIX EFFECTUES	127
1 Genèse de l'ingénierie	128
1.1 Quel est le but principal de cette ingénierie ?	128
1.2 Synthèse	128

2	Description des choix effectués	129
2.1	Les prémisses	129
2.2	Choix de la simulation	129
2.2.1	Ce que nous pouvons faire avec cette simulation.....	130
2.2.2	Positionnement épistémologique	131
2.2.3	La place du modèle	131
2.2.4	La place des registres sémiotiques	132
2.2.5	La place de la stratégie de confrontation	133
2.3	La place de la démarche d'investigation	134
	CHAPITRE 6	136
	LE SCENARIO PEDAGOGIQUE, APPROCHE 136D'ENSEIGNEMENT PAR PCDR	136
1	Introduction.....	137
2	Elaboration des situations d'investigation de type PCDR	137
2.1	Les différents moments du scénario	137
2.1.1	Moment de prévision	137
2.1.2	Moment de confrontation.....	138
2.1.3	Moment de discussions	138
2.1.4	Moment de résolution.....	138
2.2	Exemple d'enchaînement des étapes du scénario d'enseignement par PCDR 138	138
3	Le contenu de la séance du T.P.	139
4	Préparation de l'enseignant à la nouvelle approche d'enseignement par PCDR 143	143
4.1	La première séance de formation	143
4.2	La deuxième séance de formation.....	144
	CHAPITRE 7	146
	METHODOLOGIE SPECIFIQUE A L'ANALYSE DE LA SEANCE D'ENSEIGNEMENT PAR PCDR.....	146
1	Introduction.....	147
2	Choix chronologique de l'emplacement de la séance d'enseignement par PCDR	147
3	Principe de la méthodologie	148
4	Contexte de l'étude	148
4.1	La classe observée	148
4.2	Préparation de l'environnement.....	149
4.3	L'enregistrement vidéo des séances	149
4.4	Outils de traitement des données	150

PARTIE 3	151
ANALYSE DE L'ENJEU.....	151
CHAPITRE 8	152
METHODOLOGIE D'ANALYSE.....	152
1 Vue d'ensemble	153
2 Les différents niveaux d'analyse	153
2.1 Premier grain d'analyse, le grain « macro » : le synopsis	154
2.2 Deuxième grain d'analyse : le grain « méso »	154
2.2.1 Jeu d'investigation :	155
2.2.2 Jeu de préparation :	155
2.2.3 Jeux de transition :	156
2.3 Troisième grain d'analyse : le grain « micro ».....	156
CHAPITRE 9	157
ANALYSE A PRIORI DES ACTIVITES DANS LA SEANCE D'ENSEIGNEMENT PAR PCDR.....	157
1 Introduction.....	158
2 La vitesse de propagation : la première et la deuxième phase.....	158
2.1 Première phase de la séance	159
2.1.1 Présentation du travail à réaliser par les élèves	159
2.1.2 Analyse a priori de l'activité n°1	161
2.1.3 Découpage des jeux didactiques potentiellement jouables	162
2.2 Deuxième phase de la séance	163
2.2.1 Présentation de l'activité à réaliser par les élèves	164
2.2.2 Analyse a priori de l'activité n°2.....	164
2.2.3 Découpage des jeux didactiques potentiellement jouables	166
3 L'aspect de la corde : troisième phase.....	167
3.1 Présentation du travail proposé aux élèves :	169
3.1.1 Réponse aux questions de prévision	169
3.1.2 Activité sur simulation n°3 : Représentation des deux aspects de la corde	170
3.1.3 Analyse a priori des activités n°3 et n° 4.....	170
3.1.4 Découpage des jeux didactiques potentiellement jouables	172
PARTIE 4	173
ANALYSE A POSTERIORI.....	173
Introduction.....	174
CHAPITRE 10	175
ANALYSE DES ACTIVITES AU COURS DE LA SEANCE D'ENSEIGNEMENT PAR PCDR	175

1	Introduction	176
2	Analyse <i>a posteriori</i> de la première phase	176
2.1	Le synopsis de la première phase de la séance	176
2.2	Narration didactique	179
2.3	Analyse en jeux didactiques	179
2.3.1	Jeu 1 : Jeu de préparation J.P.1	183
2.3.2	Jeu 2 : Jeu d'investigation J.I.1	183
2.3.3	Jeu 3 : Jeu de transition J.I.1-J.I.2	184
2.3.4	Jeu 4 : Jeu d'investigation J.I.2	184
2.3.5	Jeu 5 : Jeu de transition J.I.2-J.I.3	185
2.3.6	Jeu 6 : Jeu d'investigation J.I.3	185
2.3.7	Jeu 7 : Jeu d'investigation J.I.4	186
2.3.8	Conclusion	186
2.4	Jeux d'apprentissage/jeux épistémiques	186
2.5	Dialectique contrat-milieu	187
2.6	Conclusion	187
3	Analyse <i>a posteriori</i> de la deuxième phase	188
3.1	Le synopsis de la deuxième phase de la séance	188
3.2	Narration didactique	191
3.3	Analyse en jeux d'apprentissage.	191
3.3.1	Jeu 1 : jeu de préparation J.P.1	194
3.3.2	Jeu 2 : jeu d'investigation J.I.1	194
3.3.3	Jeu 3 : jeu de transition J.I.1-J.I.2	195
3.3.4	Jeu 4 : jeu d'investigation J.I.2	197
3.3.5	Jeu 5 : jeu d'investigation J.I.3	197
3.3.6	Jeu 6	198
3.4	Jeux d'apprentissage/jeux épistémiques	198
3.5	Dialectique contrat-milieu	199
3.6	Conclusion	199
4	Analyse <i>a posteriori</i> de la troisième phase	200
4.1	Le synopsis de la troisième phase de la séance	200
4.2	Narration didactique	204
4.3	Analyse en jeux d'apprentissage	204
4.3.1	Jeu 1 : jeu de préparation J.P.1	208
4.3.2	Jeu 2 : jeu d'investigation J.I.1	209
4.3.3	Jeu 3 : jeu de transition J2-3	209
4.3.4	Jeu 4 : jeu d'investigation J.I.2	210

4.3.5	Jeu 5 : jeu d'investigation J.I.3.....	212
4.3.6	Jeu 6	213
4.4	Jeux d'apprentissage/ jeux épistémiques	213
4.5	Dialectique milieu-contrat	214
4.6	Conclusion	214
5	Conclusion.....	215
CHAPITRE 11		217
ANALYSE ET RESULTATS DU POST-TEST		217
1	Introduction.....	218
2	Contexte de l'étude	218
3	Contenu de l'exercice	219
4	Résultats statistiques et analyse des réponses des élèves aux questions du pré-test et du post-test	220
4.1	Célérité de l'onde	220
4.2	Le front d'onde	220
4.3	L'aspect de la corde	220
4.4	Évolution du nombre de réponses correctes par élève	221
4.5	Etude croisée de fréquence de réponse correctes par élève	222
4.5.1	La célérité d'une onde mécanique et le front d'onde.....	222
4.5.2	Le front d'onde et la representation de l'aspect de la corde	223
4.5.3	Sens de déplacement de la source et sens de déplacement du front d'onde	223
5	Conclusion.....	224
Conclusion générale et perspectives		226
1	Analyse préalable	226
1.1	Analyse épistémologique et historique	226
1.2	Nature de l'enseignement ordinaire	227
1.3	Analyse cognitive sur les concepts clés de l'onde.	227
2	Conception et analyse <i>a priori</i> de la séquence d'enseignement par PCDR	228
3	Analyse de l'enjeu.....	229
4	Analyse <i>a posteriori</i>	230
4.1	Analyse a posteriori de la séance d'enseignement par PCDR	230
4.2	Analyse et résultats du post-test.....	231
5	Pertinence de l'ingénierie didactique.....	231
6	Limites de la recherche et perspectives futures	232
6.1	Les limites liées à l'organisation de la séance et le choix de la simulation	232

6.2	Les limites liées à la méthodologie	232
6.3	Les limites liées au cadre théorique	233
6.4	Perspectives de recherche	233
Bibliographie.....		235
ANNEXES		241
Annexe 1		242
FICHE DE TP PAR PCDR.....		242
Annexe 2		246
EXTRAIT DU PROGRAMME OFFICIEL.....		246
MINISTERE DE L'EDUCATION ET DE LA FORMATION.....		246
SEPTEMBRE 2009.....		246
Annexe 3		257
Synopsis primaires des séances d'enseignement ordinaire		257
1 Synopsis 1 ^{ère} séance du cours du 19-02-2015.....		258
2 Synopsis 2 ^{ème} séance du cours		266
3 Synopsis 3 ^{ème} séance du cours		271
Annexe 4		277
ETUDE STATISTIQUE		277
Annexe 5		292
Autorisation d'utilisation de la simulation dans le cadre de la recherche en didactique.....		292

INTRODUCTION GENERALE

1 Introduction

L'onde constitue l'un des domaines les plus problématiques de la physique. En effet, il s'agit d'un domaine de la physique s'appuyant essentiellement sur les mathématiques, apparaissant ainsi toujours abstrait aussi bien aux élèves du secondaire qu'aux étudiants de l'université.

L'objectif de notre travail est de construire une ingénierie didactique fondée sur l'investigation pour étudier le phénomène de la propagation d'une onde progressive le long d'une corde. La difficulté essentielle est due au fait que les expériences « réelles » ne permettent pas d'observer ce phénomène, vu sa rapidité.

Cependant, nous pensons que l'intégration d'une simulation informatique permet aux élèves de réaliser une observation de ce phénomène de propagation et de faire des manipulations "expérimentales".

Notre travail comporte quatre parties (Artigue, 1990).

Analyse préalable : Nous commençons par une analyse épistémologique et historique du concept d'onde. Ensuite nous analysons des séances de cours d'enseignement ordinaire sur les ondes. Ces séances sont suivies d'une analyse cognitive des concepts clés de l'onde : célérité et front d'onde. Nous finissons cette partie par une analyse du champ des contraintes internes et externes.

Analyse a priori : Nous présentons au début de cette partie l'intérêt de l'ingénierie didactique envisagée. Nous proposons des descriptions et des justifications des choix effectués quant à l'élaboration des situations d'investigation de type investigation. Nous présentons enfin notre méthodologie d'analyse.

Analyse de l'enjeu : Nous décrivons ici les détails de la méthodologie de recherche et ses différents niveaux d'analyse et nous effectuons une analyse a priori de la séance de travaux pratiques de type investigation.

Analyse a posteriori : Nous analysons les activités au cours de la séance de travaux pratiques et nous réalisons l'évaluation de l'ingénierie didactique à partir de l'analyse des résultats d'un post-test auquel sont soumis les élèves.

2 Position du problème

Une revue de la littérature scientifique montre l'existence des difficultés d'apprentissage liées au concept onde. Dans le monde francophone, les principaux résultats de ces recherches sont à l'actif de Maurines (Maurines, 1999, 2002, 2003 ; Maurines et Mayrargue, 2001), Benhassoun (2004) et Ben Jemaa (2013).

Ces auteurs montrent que la majorité des élèves développent au cours de l'enseignement du concept onde des conceptions erronées. En effet, ces auteurs annoncent que les élèves pensent que la vitesse de propagation d'un signal dépend de la force exercée par la main qui l'a créé. Par conséquent, pour les élèves, plus l'amplitude du signal est grande, plus la force initiale exercée est grande et plus la vitesse de propagation l'est aussi. A contrario, une diminution d'amplitude du signal indique une diminution de la force communiquée au signal et donc une diminution de la vitesse de propagation. Pour les élèves, la source semble communiquer quelque chose à la corde lors de la création du signal. Maurines introduit alors deux catégories principales de conceptions erronées chez les élèves : la première est la conception du type « hybride capital », où l'onde est considérée comme un mélange de force et d'énergie et la deuxième est la conception de « l'onde serpente », où l'onde est considérée comme avançant par ajout de bosses. Ces mêmes conceptions sont aussi repérées par Benhassoun (2004) dans sa thèse menée sur des élèves tunisiens (2003), et également par Ben Jemaa (2013) au cours d'une recherche d'un mastère sur des élèves tunisiens. Ces recherches étudient précisément les deux conceptions particulières telles que la conception d'onde serpente et la conception hybride capitale. Ces travaux cités précédemment lient ces conceptions à l'obstacle substantialiste.

Dans le monde anglo-saxon, deux études semblent particulièrement intéressantes. La première est celle de Tongchai, Sharma, Johnston, Arayathanitkul et Soankwan (2011), menée en parallèle dans deux pays l'Australie et la Thaïlande, avec des élèves de lycée et des étudiants de première et de deuxième année de l'enseignement supérieur. En effet, cette étude est réalisée avec un échantillon de 902 étudiants composés de sept groupes différents de l'école secondaire à la deuxième année de l'université. A la lumière de cette analyse, les auteurs ont pu identifier plusieurs conceptions, ce qui montre que le problème de compréhension du concept onde est présent au niveau de cet échantillon d'élèves et d'étudiants. De plus, ces auteurs dévoilent que la situation est beaucoup plus compliquée pour les étudiants à l'université lors de l'apprentissage d'autres concepts plus approfondis en jeu dans la mécanique quantique. En même temps, ils constatent que la résolution de cette difficulté de compréhension peut se faire

au niveau secondaire. La deuxième étude (Sengören, Tanel et Kavcar, 2009) est menée en Turquie. Elle montre d'une part que les réponses des étudiants renferment des difficultés d'ordre conceptuel (qu'est-ce qu'une onde ?) et, d'autre part, elle montre que ces étudiants rencontrent des difficultés de compréhension par rapport à la notion de la vitesse de propagation des ondes mécaniques dans un milieu homogène et lisse, sans dispersion. Nous constatons ainsi que ces difficultés sont de même type quel que soit le pays, et qu'elles ne dépendent pas en apparence du contexte d'enseignement.

Par ailleurs, le programme officiel de physique actuellement en vigueur en Tunisie (septembre 2009) prévoit de débiter l'enseignement des ondes au niveau des classes de terminale scientifique, c'est-à-dire des élèves âgés entre 17 et 18 ans. Cette partie du programme occupe un volume horaire compris entre 7,5 et 9,5 heures d'enseignement et cela pour un horaire total de physique d'environ 50 heures, ce qui correspond à pratiquement 20% du programme. L'enseignement commence par les concepts de base, ébranlement, ondes, propriétés, célérité et double périodicité, et se termine par l'interaction onde-matière. Les directives dans les textes officiels tunisiens n'imposent pas généralement la méthode d'enseignement à adopter par l'enseignant. Néanmoins, d'après les recommandations des programmes officiels de sciences physiques, nous constatons que la noosphère incite d'une façon implicite à adopter une méthode inductive au cours de tous les enseignements des concepts de physique (Ministère de l'éducation, 2009). À titre d'exemple, dans la partie du programme officiel concernée par ce travail de recherche, il est demandé à l'enseignant de réaliser « *Des mesures de la célérité v d'une onde se propageant dans un milieu donné permettront de vérifier que la valeur de cette célérité est indépendante de la forme de l'onde et de son amplitude tant que celle-ci est faible.* » (Ibid.).

Dans l'étude que nous avons menée, nous pensons que le contexte tunisien favorise le développement des conceptions erronées (type hybride capital et/ou de type onde serpente) chez les élèves de lycée. En particulier, la méthode d'enseignement inductive préconisée peut être une des sources des difficultés d'apprentissage du concept d'onde pour les élèves de terminale scientifique. Des questions peuvent alors se poser : l'obstacle substantialiste est-il créé par les dispositifs mis en place par les enseignants du secondaire sans qu'ils s'en rendent compte ? Ou bien dépend-il uniquement des élèves ? Les expériences utilisées au cours de l'enseignement des ondes en sciences physiques présentent-elles en elles même un handicap pour l'appropriation de ce concept ?

Par ailleurs, des études au niveau international montrent une certaine efficacité de l'enseignement des sciences fondée sur l'investigation pour amener les élèves à mieux maîtriser les concepts scientifiques et à mieux comprendre la démarche scientifique (Boilevin, 2013). De plus, des études mettent en avant l'intérêt du recours à des simulations informatiques pour enseigner les sciences (Chauvet et Duprez, 2003 ; Richoux et Beaufils, 2005 ; Saadi, 2003). Nous pensons que la démarche d'investigation, au sens de Morge et Boilevin (2007), permettra de se placer dans un cadre de travail mettant en jeu la simulation et l'investigation. Ces auteurs donnent une définition d'une séquence d'investigation qui n'est pas limitée aux expériences ordinaires.

« Une séquence d'enseignement serait une séquence d'investigation si l'élève effectue un ou des apprentissages au cours de la séquence, en réalisant des tâches qui ne sont pas uniquement des tâches d'ordre expérimental, et en participant à la validation des productions des autres élèves, autrement dit en participant au choix argumenté entre plusieurs méthodes, plusieurs hypothèses, plusieurs protocoles expérimentaux, plusieurs explications, plusieurs modèles. » (Morge et Boilevin 2007, p. 45).

Cette définition pourrait apporter ainsi de la flexibilité aux enseignants afin de réaliser des séances d'investigation avec des simulations, et cela dans une double perspective constructiviste (point de vue de la psychologie du développement et point de vue épistémologique), pour reprendre les propos de Bächtold (2012). C'est ce que nous visons avec le scénario pédagogique adopté lors de la séance des travaux pratiques sur une simulation des ondes, séance formée d'une série de phases d'investigation.

Les différents éléments évoqués ci-dessus nous amènent ainsi à concevoir une ingénierie didactique (Artigue, 1990) fondée sur l'investigation, et s'appuyant sur une simulation informatique des ondes. Au cours de cette séance, l'élève réalise des tâches qui ne se limitent pas à l'aspect expérimental, participe à la validation des propositions des autres élèves, participe au choix argumenté entre plusieurs méthodes, plusieurs hypothèses, résout les éventuels conflits cognitifs en convoquant les lois de la physique relative aux ondes mécaniques, objet d'un enseignement précédent. Nous adoptons en fait un point de vue constructiviste sur l'apprentissage, en partant de l'idée que la conception hybride capital et celle de l'onde serpente existaient comme support de raisonnement de la majorité des élèves, et cela en s'appuyant sur les travaux cités précédemment. La question de recherche principale peut alors être formulée de la façon suivante : une séance de travaux pratiques fondée sur

l'investigation et s'appuyant sur une simulation informatique permet-elle de surmonter les difficultés des élèves issues des conceptions erronées telles que l'hybride capital et celles de l'onde serpente au cours de l'apprentissage des ondes ?

Pour aborder cette question de recherche, la TACD - théorie de l'action conjointe en didactique (Sensevy, 2011) devrait nous permettre d'une part, d'étudier les pratiques professorales au cours de l'enseignement ordinaire des ondes mécaniques aux élèves des classes de terminale scientifique, et d'autre part, d'élaborer une étude fine de ce qu'il se passe au cours de l'enseignement par investigation des ondes mécaniques, en utilisant une simulation informatique. Ce cadre théorique nous permettra ainsi d'étudier le partage des responsabilités entre enseignant et élèves dans les transactions didactiques, la densité du savoir et la distance entre ce qui est prévu par le programme officiel du ministère (2009) et ce qui est produit réellement au sein de la classe lors de l'enseignement des ondes.

3 Méthodologie de recherche et cadre théorique

3.1 *La notion d'ingénierie didactique*

Pour répondre à notre question de recherche formulée précédemment, nous devons utiliser des outils de la didactique qui ont déjà montré leur efficacité tels que l'ingénierie didactique. Pour présenter cette méthode de recherche, nous nous appuyons sur les travaux d'Artigue (1988) : « *L'ingénierie didactique, en mathématiques comme dans les disciplines où elle a migré, se révèle comme une méthodologie toujours très performante quand la recherche doit s'appuyer pour pouvoir avancer, sur des constructions didactiques* ». Cette auteure (Artigue, 1990) ajoute que l'ingénierie didactique est différente des autres méthodes de recherche par son mode de validation interne. Chevallard (1982) explique que l'expression « ingénierie didactique » apparaît dans la didactique des mathématiques françaises, au début des années 80. Celle-ci a pour objectif de répondre à deux questions principales :

1. Comment prendre en compte la complexité de la classe dans les méthodologies de recherche ?
2. Comment penser les relations entre recherche et action sur le système d'enseignement ?

La définition du concept « ingénierie didactique » est donnée aussi par Artigue (1990) de la façon suivante : « *L'ingénierie didactique, vue comme méthodologie de recherche, se caractérise en premier lieu par un schéma expérimental basé sur des "réalisations didactiques"* »

en classe, c'est-à-dire sur la conception, la réalisation, l'observation et l'analyse de séquences d'enseignement ». De même, Artigue (1988) distingue quatre phases de la méthodologie d'ingénierie, résultat du découpage temporel de son processus expérimental :

- La phase 1 : analyses préalables
- La phase 2 : conception et analyse *a priori* des situations didactiques de l'ingénierie
- La phase 3 : expérimentation
- La phase 4 : analyse *a posteriori* et évaluation.

3.1.1 Les analyses préalables

Une recherche d'ingénierie didactique s'appuie sur un certain nombre d'analyses préliminaires, en tenant en compte des objectifs spécifiques de la recherche, le plus souvent :

1. L'analyse épistémologique des contenus visés par l'enseignement,
2. L'analyse de l'enseignement usuel et de ses effets,
3. L'analyse des conceptions des élèves, des difficultés et des obstacles qui marquent leur évolution,
4. L'analyse du champ de contraintes dans lequel va se situer la réalisation didactique effective.

Ces analyses ne sont pas visibles au niveau des publications d'une façon explicite. Cependant, elles ont servi de base aux chercheurs pour la conception de leur ingénierie. Elles sont reprises et approfondies en fonction des besoins ressentis, et elles ne sont donc préalables qu'à un premier niveau d'élaboration. Artigue (1990) ajoute de plus : « *Il est clair, de plus, que les exigences d'analyse préalable ne seront pas les mêmes pour une recherche dont l'objectif est la construction d'une genèse artificielle de la connaissance dans un champ conceptuel déterminé* ».

3.1.2 Conception et analyse *a priori*

Dans cette phase, le chercheur prend la décision d'agir sur un certain nombre de variables du système non fixées par les contraintes : *variables de commande* qu'il juge pertinentes par rapport au problème étudié. Artigue (1986) distingue deux types de variables de commande :

- variables de commande qui concernent l'organisation globale de l'ingénierie ;

- variables de commande qui concernent l'organisation locale de l'ingénierie, c'est-à-dire l'organisation d'une séance ou d'une phase, lesquelles peuvent être elles-mêmes des variables d'ordre général ou des variables dépendantes du contenu didactique visé par l'enseignement.

L'objectif de l'analyse *a priori* est donc de déterminer en quoi les choix effectués permettent de contrôler les comportements des élèves et leur sens.

3.1.3 Expérimentation, analyse *a posteriori* et validation

La phase d'expérimentation est une phase classique, qui est suivie d'une phase d'analyse dite *a posteriori*. Cette dernière phase s'appuie sur l'ensemble des données recueillies lors de l'expérimentation, en l'occurrence les observations réalisées des séances d'enseignement mais aussi les productions des élèves en classe ou hors classe.

Ces données sont souvent complétées par des données obtenues par l'utilisation de méthodologies externes : questionnaires, entretiens individuels ou en petits groupes, réalisés à divers moments de l'enseignement ou à son issue. Artigue (1990) ajoute que c'est sur la confrontation des deux analyses (analyse *a priori* et analyse *a posteriori*) que se fonde essentiellement le processus de validation interne de l'ingénierie didactique.

3.1.4 Conclusion

Finalement, notre projet consiste à proposer une ingénierie didactique pour l'enseignement des ondes mécaniques en classe de terminale scientifique. Nous justifions ce choix par le fait que d'une part, cette méthode nous permet d'organiser la confrontation de notre construction théorique à la contingence de classe et, d'autre part, c'est une méthode de recherche qui se distingue par son mode de validation interne.

Pour analyser la pratique effective en classe, nous ferons appel à des outils issus de la théorie de l'action conjointe en didactique (Sensevy, 2011) que nous décrirons dans le paragraphe suivant. Ce choix est dicté par des raisons de commodité car nous pensons que la théorie de l'action conjointe en didactique nous permet une étude très fine de ce qu'il se passe au sein de la classe, précisément l'action conjointe élèves-enseignant.

3.2 Démarches d'investigation dans l'enseignement des sciences

Connue comme étant un courant développé dans plusieurs pays du monde, les démarches d'investigation dans l'enseignement des sciences ont débuté dès les années 60 aux

USA. Elles ont marqué une évolution du rôle des activités expérimentales dans l'enseignement des sciences. C'est un courant qui oriente l'enseignement des sciences vers l'investigation scientifique. Ce courant est connu dans plusieurs pays et sous plusieurs dénominations : démarche d'investigation, *Inquiry based science*, *Inquiry based instruction*, *Inquiry based science education*, *Inquiry based science teaching*. Comme le relate Boilevin (2013), cette réflexion a été conduite par plusieurs chercheurs qui ont rencontré des difficultés pour trouver une seule définition qui posséderait un caractère universel. Dans cette partie, nous allons donner quelques éclaircissements sur la démarche d'investigation et par là-même nous allons nous positionner par rapport aux travaux de recherche antérieurs sur l'investigation afin de situer notre travail de recherche.

3.2.1 La démarche d'investigation ou une démarche d'investigation ?

Du point de vue épistémologique, le constructivisme et le socio-constructivisme sont souvent considérés comme les origines de la démarche d'investigation (Calmettes, 2008) bien que les séquences d'investigation soient diverses (Morge & Boilevin, 2007). Cette variété se proclame non seulement à travers les champs disciplinaires mais aussi au sein d'une même discipline. La question déterminante reste celle de la responsabilité de l'élève vis-à-vis du savoir (Monod-Ansaldi et al., 2011). Par ailleurs, « *la DI s'affiche dans les programmes de sciences de collège comme une modalité d'enseignement des sciences fondée sur la résolution de problèmes par franchissement d'obstacles cognitifs.* » (De Hosson, Mathé & Méheut 2010, p.20). De ce point de vue, l'usage de la démarche d'investigation entraîne une rupture avec des pratiques d'enseignement bien installées, d'où sa difficulté (Monod-Ansaldi et al., 2011). Cette difficulté apparaît en particulier lors de l'exécution de la démarche d'investigation en sein de la classe. Mathé et De Hosson (2008, p.67) pensent que « *La démarche d'investigation préconisée par les programmes de collège est une démarche hypothético-déductive, se déroulant à partir d'un conflit cognitif. Il s'agit donc d'une démarche bien particulière, non seulement d'un point de vue épistémologique, mais aussi dans une perspective pédagogique.* ». Boilevin (2013) montre que les travaux d'investigation menés avec Morge (Morge et Boilevin, 2007) sont caractérisés par des tâches, proposées aux élèves, plus riches et plus variées que celles envisagées par les instructions officielles françaises du moment. Pour cet auteur, ce sont des tâches qui peuvent aller au-delà de la démarche scientifique de type hypothético-déductive. Il ajoute dans le même sens que la « *démarche d'enseignement par investigation doit prendre en considération les élèves en les amenant à s'approprier les tâches proposées par leur professeur mais aussi en les faisant participer à la validation des productions individuelles et*

collectives. » Boilevin (2013 p. 192). Nous pensons qu'il y a un écart entre les attentes des didacticiens par rapport à la démarche d'investigation et ce qui est obtenu en classe au cours de la mise en oeuvre de cette démarche par les enseignants. Cela est dû entre autres, à la transposition de ce savoir qui n'a pas eu lieu de façon claire chez les enseignants pour qu'ils se l'approprient sans aucune ambiguïté. De ce fait, nous rencontrons plusieurs approches de démarche d'investigation.

3.2.2 Caractéristique d'une démarche d'investigation

Dans cette recherche, nous allons choisir la démarche d'investigation au sens de Morge et Boilevin (2007) car nous pensons que la définition qu'ils fournissent est plus pragmatique. Alors « *Une séquence d'enseignement serait une séquence d'investigation si l'élève effectue un ou des apprentissages au cours de la séquence, en réalisant des tâches qui ne sont pas uniquement des tâches d'ordre expérimental, et en participant à la validation des productions des autres élèves, autrement dit en participant au choix argumenté entre plusieurs méthodes, plusieurs hypothèses, plusieurs protocoles expérimentaux, plusieurs explications, plusieurs modèles.* » (Morge et Boilevin, 2007). Boilevin (2013) ajoute que la démarche d'enseignement par investigation (l'auteur ici prend position pour la démarche d'enseignement par investigation et non pas « la démarche d'investigation ») doit prendre en compte les élèves en les conduisant à s'approprier les tâches proposées par leur professeur mais aussi en les faisant participer à la validation des productions individuelles et collectives.

3.2.3 Introduction de la démarche d'investigation en France

Calmettes (2009) explique que la démarche d'investigation est proposée dans les programmes (MEN 2005, MEN 2007) d'une manière brève pour l'ensemble des disciplines scientifiques (mathématiques, SVT, physique et chimie). C'est une démarche d'investigation qui ne fait pas appel à une caractéristique importante citée dans la description de Boilevin (2013) : en ce sens que l'élève doit participer à la validation des productions individuelles et collectives. Pourtant, les décideurs proposent un « canevas » décrit par « sept moments ». Notons que cette batterie de moments, que nous citons ci-dessous, peut être réalisée au cours d'une seule séance d'enseignement ou plusieurs :

- Le choix d'une situation - problème par le professeur.
- L'appropriation du problème par les élèves.
- La formulation des conjectures, d'hypothèses explicatives, de protocoles possibles

- L'investigation ou la résolution du problème conduit par les élèves.
- L'échange argumenté autour des propositions élaborées.
- L'acquisition et la structuration des connaissances.
- L'opérationnalisation des connaissances.

3.2.4 Conclusion

Notre recherche vise une meilleure compréhension des phénomènes ondulatoires par les élèves. Plusieurs recherches montrent que les élèves développent au cours de l'enseignement du concept onde plusieurs difficultés (Maurines, 1999, 2002, 2003 ; Maurines et Mayrargue, 2001, Benhassoun 2004) ; Arayathanitkul, & Soankwan, 2011 ; Sengören, Tanel et Kavcar, 2009 ; Ben Jemaa, 2013). Par conséquent, l'ingénierie didactique que nous proposons est fondée sur une démarche d'investigation à l'instar de Boilevin (2013). Pour cet auteur, l'enseignement-apprentissage fondé sur l'investigation scientifique permet d'aborder trois dimensions : apprendre des sciences physiques, apprendre sur les sciences physiques, faire des sciences physiques. L'investigation scientifique semble ainsi une méthode pédagogique adéquate pour une meilleure formation aux sciences.

3.3 La théorie de l'action conjointe en didactique

La théorie de l'action conjointe en didactique, « la TACD », permet une analyse des séances d'enseignement en termes de jeu d'apprentissage. Sensevy et Mercier (2007) proposent trois niveaux distincts : comment le professeur fait jouer le jeu didactique ? Comment le professeur construit le jeu didactique ? Et quelles sont les déterminations qui pèsent sur le jeu didactique ? « *Ce qui me semble caractériser avant tout autre chose l'action didactique, [c'est] tout d'abord le fait qu'une action didactique est nécessairement conjointe. Le terme enseigner, d'une certaine manière, demande le terme apprendre ; le terme apprendre demande le terme personnes enseigner. Il existe certes des moments où quelqu'un enseigne sans que personne n'apprenne rien ; on peut d'autre part clairement apprendre certaines choses sans être enseigné. Mais ce qui caractérise une institution didactique, c'est qu'on y enseigne à des censées apprendre.* » (Sensevy, 2007, p. 14).

En effet, notre recherche est de nature descriptive et compréhensive, c'est-à-dire que nous cherchons à décrire ce qu'il se passe au cours des séances d'enseignement en termes de jeux d'apprentissage pour comprendre comment se produit l'avancée du savoir. De même, nous cherchons à porter un jugement sur l'activité professorale de l'enseignant et sur le sort des objectifs d'enseignement visés, et ainsi évaluer notre ingénierie didactique proposée par cette

recherche. A l'instar de Cross et Grangeat, « *cette théorie –notée TACD - est centrée sur le processus d'enseignement et d'apprentissage, vu principalement comme processus communicationnel centré sur un jeu de savoir* » (Cross et Grangeat, 2014, p.158). Dans la suite, nous proposons quelques définitions des concepts clés de la TACD.

3.3.1 Jeu didactique : jeu en tant que modèle caractérisant l'action

La TACD est une théorie qui ne cesse d'évoluer. Nous nous appuyons dans cette étude sur les travaux de Sensevy (Sensevy et Mercier, 2007 ; Sensevy, 2011) pour reprendre sa description du jeu :

« *Un jeu a un enjeu, qui fait en particulier que l'on se prend au jeu ; on y gagne ou on y perd ; on ne peut y jouer sans en connaître les règles, et au-delà de la connaissance des règles du jeu, il faut pour gagner produire des stratégies pertinentes, des stratégies gagnantes, et donc avoir le sens du jeu.* » (Sensevy, 2011, p.42).

Le même auteur donne une nouvelle description très fine et très systémique du jeu (Sensevy, 2011). Un jeu didactique est alors un jeu entre le professeur et les élèves où ces joueurs coopèrent entre eux, c'est-à-dire agissent de manière conjointe (mais pas forcément symétrique). Il ajoute que les pratiques de classe peuvent être modélisées en s'appuyant sur le modèle du jeu qui permet de prendre en compte des aspects dynamiques des situations d'apprentissage et de voir des pratiques sous l'éclairage de notions telles que le gain, les règles, les stratégies. Alors « *L'action didactique est donc une action conjointe, c'est-à-dire coopérative et coordonnée, dialogique. Elle peut être conçue comme un jeu dissymétrique* » (Sensevy, 2011, p. 65).

Sensevy ajoute que dans un jeu didactique le professeur gagne si et seulement si l'élève gagne, mais à condition que l'élève joue raisonnablement *proprio motu*, de « son propre mouvement ». Le jeu didactique est donc un jeu paradoxal où le professeur connaît les stratégies à produire mais il ne peut pas les livrer telles quelles à l'élève sous peine de perdre le jeu, car ce dernier ne les produirait pas *proprio motu*. « *La clause proprio motu est au fondement de la relation didactique, cette relation ternaire entre le professeur, l'élève, et le savoir.* » (Sensevy, 2011 p.67). Cette contrainte pèse fortement sur les transactions didactiques, au point de conduire le professeur à faire de la « rétention d'information », de la réticence didactique (Sensevy & Quilio, 2002). « *[...] la réticence est présente dans la matière même de tout dialogue didactique, elle constitue probablement l'un des indices les plus sûrs du sens du jeu des joueurs. Du professeur, dans sa capacité à ouvrir des espaces au sein desquels l'élève peut avancer ; de l'élève, dans sa capacité à s'approprier ces espaces* » (Sensevy, 2011, p.69). La

fonction de la réticence didactique est de permettre le processus de dévolution. « *Le professeur doit organiser les conditions de la dévolution, faire en sorte que l'élève prenne la responsabilité de l'apprentissage, qu'il assume la responsabilité de jouer vraiment au (le) jeu* » (Sensevy, 2011, p. 74).

3.3.2 Jeux épistémiques et jeux d'apprentissage

Santini (2012) propose un classement dans la TACD de la notion du jeu selon ses spécifications. La première spécification est celle du jeu didactique, la deuxième spécification est celle du jeu d'apprentissage, la troisième est celle du jeu épistémique. Ce dernier jeu est lié aux pratiques sociales de référence développées par Martinand (1986). Johsua (1998), de son côté, ne considère pas les pratiques en elles-mêmes servant de référence mais il avance que c'est le modèle de la pratique qui sert de référence. En effet, les jeux épistémiques permettent d'avoir une idée claire sur la transposition didactique des savoirs par une étude fine du jeu épistémique source. Ces jeux prennent en compte les pratiques des savoirs dans le monde social. Par ailleurs, les jeux épistémiques émergeant prennent en compte les savoir-faire acquis par l'action dans la classe (Cross et Grangeat, 2014).

Pour distinguer entre jeux d'apprentissage et jeux épistémiques, nous nous référons au propos de (Gruson et al., 2012, p.10) : « *Si le jeu d'apprentissage se définit comme un jeu du professeur sur le jeu de l'élève, le jeu épistémique est une modélisation du savoir conçu, dans une perspective actionnelle, comme un système de capacités. Le jeu épistémique source est, selon notre vocabulaire de description théorique, celui qui existe en dehors de la situation didactique. Il correspond à une œuvre culturelle, une œuvre humaine.* »

Ces mêmes auteurs, Gruson et al. (2012), proposent le schéma suivant qui met en évidence des relations existant entre les jeux d'apprentissage et les jeux épistémiques.

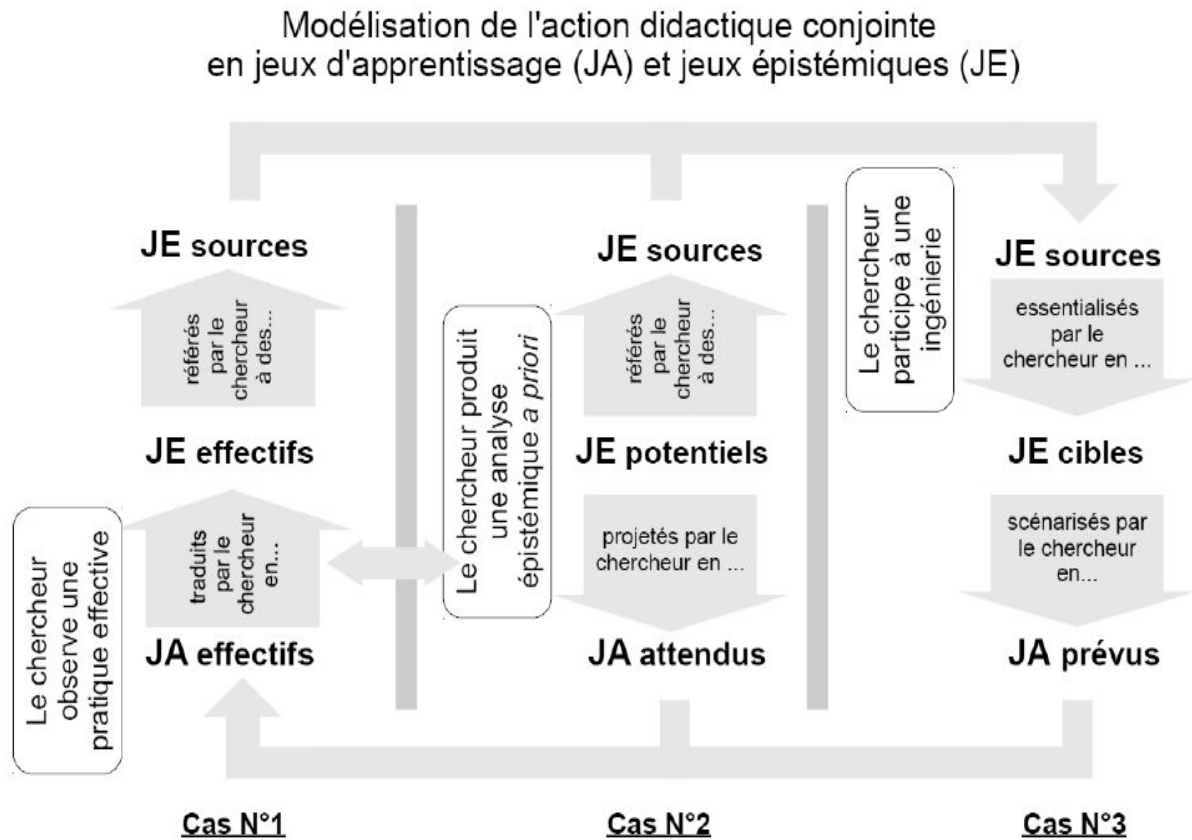


Figure 1 : Schéma des jeux de savoir Gruson et al. (2012)

3.3.3 Notions de contrat et de milieu dans la TACD

Selon Brousseau (1998), le contrat didactique correspond à l'ensemble des attentes comportementales de l'enseignant et réciproquement l'ensemble des attentes comportementales de l'élève. Cette définition est reprise et approfondie par Sensevy (2007) au cours de l'élaboration de la TACD. Cet auteur considère que « *le contrat didactique propre à une situation didactique peut alors se concevoir comme un système d'habitudes engendrant lui-même un système d'attentes, système actualisé par cette situation particulière* » (Sensevy, 2007 p.19).

Le milieu est l'ensemble des objets physiques et des composantes immatérielles mis en jeu au cours de la construction du savoir. L'élève, le savoir, les appareils de mesures, les interactions avec l'enseignant, sont donc des éléments qui constituent le milieu didactique (Cross et Grangeat, 2014). Le milieu est alors le support qui porte les actions des élèves et de leur enseignant. A l'instar de Sensevy (2011), nous constatons alors que le milieu et le contrat sont inséparables, et que le changement du milieu nécessite un changement du contrat.

3.3.4 Le triplet des genèses : la chronogénèse, la mésogénèse et la topogénèse

Mésogénèse, chronogénèse et topogénèse constituent un système descriptif lié au jeu. Ce système tente de saisir au plus près la dynamique de construction des savoirs élaborés au sein d'une transaction didactique (Sensevy, 2011,).

3.3.4.1 La topogénèse

D'une manière générale, la topogénèse cherche à décrire le partage des responsabilités entre enseignant et élèves dans les transactions didactiques. A l'instar de Le Hénaff (2013), nous illustrons la topogénèse par un exemple. Nous avons choisi un cas qu'un enseignant peut rencontrer dans son cours sur les ondes mécaniques. Lors de la découverte du mouvement des points d'une corde affectée par une onde progressive, l'enseignant, au lieu de préciser directement à la classe la nature du mouvement du front d'onde (donc de transmettre directement les connaissances), peut utiliser une simulation informatique et demander ainsi aux élèves de découvrir et décrire la nature du mouvement du front d'onde. Le professeur, dans ce cas, modifie non seulement le milieu mais également l'espace topogénétique occupé par les élèves. Dans cet exemple, il se produit un glissement topogénétique du professeur vers les élèves, car le professeur, dans ce cas, dévolue aux élèves plus de responsabilités. « *La partition topogénétique, c'est-à-dire le partage et l'occupation d'un certain type de responsabilités par le professeur et les élèves, est un outil intéressant pour l'analyse d'une séance* » (Le Hénaff, 2013). La notion de topogénèse pose la question « *comment qui* » ?

Sensevy ajoute que « *L'étude in situ des interactions didactiques, dès lors qu'on l'opère au prisme de la catégorie de topogénèse (Chevallard, 1981 ; Sensevy, Mercier, Schubauer-Leoni, 2000), incite ainsi à décrire la force transactionnelle de l'action didactique, c'est-à-dire à évaluer à quel point elles reposent organiquement sur une activité épistémique partagée entre le professeur et l'élève, en différenciant bien l'existence d'une action de l'élève, de sa densité épistémique.* » (Sensevy, 2011, p.149). Alors, nous pouvons évaluer la position topogénétique haute dans une transaction didactique, lorsqu'elle collabore plus au moins densément à l'avancée du savoir.

3.3.4.2 La chronogénèse

La chronogénèse, quant à elle, est la disposition du savoir sur l'axe du temps ou aussi le temps didactique. En effet, la chronogénèse caractérise *l'avancée du temps didactique*, et permet de décrire l'avancement et la progression dans le temps des objets du savoir en classe (Sensevy, 2011). Notons ici que le professeur est le responsable de la répartition des

connaissances dans le temps. Il peut aussi décider de faire des sauts, des avancées dans l'espace chronogénétique. L'utilisation de la simulation évoquée au paragraphe précédent peut répondre à un objectif chronogénétique, celui de faire avancer plus vite le temps didactique. La notion de chronogénèse pose finalement la question « *comment quand* » ?

3.3.4.3 *La mésogénèse*

La mésogénèse constitue un outil d'appréhension du renouvellement d'un système de significations communes dans l'action conjointe. (Sensevy, 2011,). En effet, la mésogénèse sert à décrire la manière dont le professeur dirige le rapport des élèves avec le milieu qu'il a construit. Cet aménagement du milieu correspond au processus de mésogénèse.

Cette construction du milieu est fortement emboîtée par les savoirs en jeu et profondément liée à la chronogénèse, car un changement du milieu correspond à un état différent des connaissances. Le fait d'utiliser une simulation pour accélérer l'avancée du temps didactique modifie nécessairement le milieu matériel dans lequel les élèves et le professeur travaillent. « *De certaine manière, donc, on peut dire qu'il y a solidarité profonde entre ces deux outils de description qui constituent mésogénèse et chronogénèse* » (Ibid.). Finalement, la mésogénèse pose la question « *comment quoi* » ?

3.3.5 **Le quadruplet : définir, d'évoluer, réguler, institutionnaliser**

Pour situer les définitions du quadruplet, nous commençons par cette citation : « *L'action d'enseignement comporte des dimensions essentielles (définir, dévoluer, réguler, institutionnaliser) qui tiennent à ce que le travail du professeur suppose l'établissement et le maintien d'une relation didactique, qui unit, de manière ternaire, un professeur, des élèves et un objet du savoir* » (Sensevy, Mercier & Schubauer-Leoni, 2000, p. 266).

1. La définition indique les règles que l'enseignant met en œuvre pour créer les conditions qui permettent aux élèves de gagner le jeu. En effet, le travail du professeur « *consiste d'abord à poser un certain nombre d'objets et à établir le cadre d'une situation* » (Ibid., p. 268) ;
2. La dévolution regroupe l'ensemble des comportements et les stratégies produites par le professeur pour que les élèves prennent la responsabilité de jouer le jeu ;
3. La régulation indique l'ensemble des attitudes et les stratégies du professeur pour amener les élèves à produire des stratégies gagnantes ;
4. L'institutionnalisation n'est pas seulement le processus par lequel le professeur montre aux élèves que les connaissances acquises dépassent la résolution d'une

situation mais c'est aussi une référence pour une utilisation future. Par conséquent, l'institutionnalisation est le processus par lequel les connaissances sont confirmées.

3.4 *Les conceptions des élèves*

De très nombreux travaux de recherche en didactique ont montré que certaines réponses des élèves, que l'on qualifie d'une façon générale comme « erreurs », sont issues d'un mode de raisonnement et d'un système explicatif personnel, ce qui présente pour eux une logique parfaite et structurée. Cela incite les chercheurs en didactique à s'intéresser et à donner une importance majeure à ce qu'on appelle conception, représentation, le déjà-là, selon les auteurs. Parmi les définitions existantes dans la littérature, nous choisissons celle qui met l'accent sur le rôle du chercheur dans la description d'une conception, qui n'est jamais fournie par l'élève lui-même. Pour nous une conception est « *un ensemble de connaissances ou de procédures hypothétiques que le chercheur attribue à l'élève dans le but de rendre compte des conduites de l'élève dans un ensemble de situations données.* » (Tiberghien et Vince, 2005).

En effet, ces conceptions présentent le plus souvent un écart par rapport au savoir scientifique, d'où leurs intérêts dans les recherches en didactique. Leur identification permet aux chercheurs de dévoiler les origines des erreurs des élèves, et par là-même, d'aider les enseignants et les apprenants à surmonter certaines difficultés liées à l'enseignement apprentissage d'un concept scientifique.

3.4.1 *Intérêt des conceptions*

Il ne suffit pas de donner une description complète d'une conception à l'élève pour que celui-ci s'aperçoive de ses difficultés quant à la reconstitution de ses connaissances vis-à-vis d'un concept scientifique. En fait, la simple expression des conceptions des élèves n'est qu'un point de départ à un long travail de recherche pour trouver les remèdes nécessaires ou pour amener les élèves à les dépasser pour laisser la place ainsi à des concepts scientifiques.

3.4.2 *Origine des conceptions*

D'après Giordan (2002), l'origine d'une conception est « *le fruit de l'expérience antérieure de l'apprenant (qu'il soit enfant ou adulte). C'est à la fois sa grille de lecture, d'interprétation et de prévision de la réalité que l'individu a traité. Il ne peut comprendre le monde qu'à travers cette dernière. Elle renvoie à ses interrogations (ses questions). Elle prend appui sur ses raisonnements et ses interprétations (son mode opératoire), sur les autres idées*

qu'il manipule (son cadre de références), sur sa façon de s'exprimer (ses signifiants) et sur sa façon de produire du sens (son réseau sémantique)» (Giordan, 2002). Pour cet auteur, une conception est donc ancrée dans le passé d'un individu. Nous pouvons classer ces origines en deux catégories :

- Le sens commun.
- L'impact du monde physique.

3.4.3 Modélisation des conceptions

Giordan (2002) a modalisé les conceptions sous la forme suivante :

CONCEPTION = f (P: C: O: R: S)

P (ou problème) est l'ensemble des questions plus ou moins explicites qui induisent ou provoquent la mise en œuvre de la conception. Il constitue en somme le "moteur" de l'activité intellectuelle.

C (ou cadre de référence) est l'ensemble des connaissances périphériques activées par le sujet pour formuler sa conception. En d'autres termes, ce sont les autres conceptions déjà maîtrisées sur lesquelles s'appuie l'apprenant pour produire sa nouvelle conception.

O (ou opérations mentales) est l'ensemble des opérations intellectuelles ou transformations que l'apprenant maîtrise. Elles lui permettent de mettre en relation les éléments du cadre de référence, de faire des inférences et ainsi de produire et d'utiliser la conception. Les spécialistes appellent cela des invariants opératoires.

R (ou Réseau sémantique) est l'organisation interactive mise en place à partir du cadre de référence et des opérations mentales. Elle permet de donner une cohérence sémantique à l'ensemble. En d'autres termes, c'est l'émergence issue du jeu de relations établies entre tous les éléments principaux ou périphériques qui composent la conception. Ce processus produit un réseau de significations et donne un sens bien spécifique à la conception.

S (ou signifiants) est l'ensemble des signes, traces et symboles nécessaires à la production et à l'explicitation de la conception.

3.4.4 Caractéristiques des conceptions

Les principales caractéristiques des conceptions proposées par différents auteurs (Astolfi, Clément, Giordan,) sont regroupées par Saadi (2003) dans sa thèse de doctorat.

3.4.4.1 Cohabitation mentale

Les apprenants disposent fréquemment de deux systèmes explicatifs permettant chacun de résoudre des problèmes dans un certain domaine de validité. L'un des systèmes est

scolaire, l'autre est propre à l'élève. Chacun se trouve activé en fonction des situations ou des questions proposées. Le premier système explicatif sera mobilisé pour faire face aux situations scolaires lorsque l'élève ou l'étudiant reconnaît une situation canonique déjà rencontrée.

Dès que les problèmes deviennent quelque peu nouveaux, ce sont les conceptions issues du sens commun qui sont mobilisées, même si elles entrent en contradiction avec ce qui a été enseigné. On peut donc dire que des conceptions différentes cohabitent chez un même élève de façon indépendante, chacune permettant de résoudre une classe de problèmes spécifiques.

3.4.4.2 *Caractère évolutif des conceptions*

La structure des connaissances en mémoire est en continuels changements. Ce changement s'effectue en fonction des informations collectées par l'individu dans son environnement quotidien. Cet environnement intègre l'école, la famille, les pairs et les moyens audiovisuels d'information. Donc, les connaissances des phénomènes, et par la suite les conceptions, ne sont pas statiques ; elles sont en perpétuel changement.

3.4.4.3 *Relation des conceptions avec l'histoire des sciences*

Il semble légitime de faire une relation entre les conceptions des élèves et l'histoire des sciences. Dans cet ordre d'idée, De Hosson écrit : « *Cette idée constitue l'un des pivots du cadre que nous présentons maintenant, cadre qui vise à jalonner la conception de séquences d'enseignement se donnant pour but l'apprentissage d'un savoir scientifique par la voie historique* » (De Hosson, 2011, p. 29). Les ressemblances paraissent parfois appréciables, comme si l'élève de nos jours peut dépasser des difficultés déjà vécues par les savants d'hier, ce qui conduit les chercheurs en didactique à faire une étude épistémologique des concepts objet de leurs recherches. Néanmoins nous devons être toujours vigilants car les cadres scientifiques et sociaux ne sont pas les mêmes.

3.4.5 **Conclusion**

Le mot onde existe déjà dans les esprits des élèves dès leur jeune âge. Aussi chacun d'eux possède sa propre conception qui est généralement éloignée du concept scientifique. C'est le déjà-la dont les enseignants devraient tenir compte. De plus, l'onde est un concept qui possède une histoire liée à sa construction par les scientifiques. Une étude épistémologique pourra-t-elle nous aider à résoudre quelques difficultés liées à l'enseignement apprentissage des ondes mécaniques ?

4 Cadre épistémologique : modèle et simulation en sciences

Nous voulons dans cette section éclaircir quelques notions utiles pour cette recherche, et explorer les liens qui peuvent exister entre simulation, modèle et théorie, afin de situer notre activité d'enseignement visée.

4.1 *Le modèle*

4.1.1 Notion de modèle

Dans le sens platonicien, le modèle était le paradigme. En effet, la notion de modèle peut changer de sens d'une *discipline* à une autre (Boilevin, 2013). Dans notre étude, notre préoccupation est la notion de modèle au sens des physiciens. Nous présentons ici un bref historique donné par Varenne (2008). « *Au sens du maxwell, le modèle est bien là aussi une analogie physique. Mais il vaut dans ce cas non comme une abstraction mathématique mais comme une approximation physique dans laquelle on construit et on manipule une idéalisation physique de la réalité. [...] Selon Boltzmann... le modèle - ou analogie physique - reste indispensable en ce qu'il permet la représentation visuelle (ou figurative) d'un calcul dont les termes abstraits tendent sinon à ne plus donner prise à notre capacité de visualiser les mécanismes qui sont à l'œuvre dans le calcul. [...] De nos jours, le terme modèle a même fini par désigner essentiellement et par défaut un modèle formel, à savoir un construit symbolique, logique ou, le plus souvent, mathématique : une équation, un système d'équations, des contraintes formelles diverses, un algorithme...* ». (Varenne, 2008, p. 5)

4.1.2 Caractéristique d'un modèle

Notons qu'un modèle présente toujours des limites de validation, de ce fait il est incomplet. Dans ce sens Richard et *al.* (1998,) écrivent : « *Le modèle est, par définition, une approximation de ce qui est observé. Aussi peut-on dire que, par principe, erroné [...]. L'important dans un modèle est qu'il est hautement réfutable : cela est lié à la précision des prédictions qu'il engendre. Par-là, il contient le germe de sa réfutation* » (Richard, Encyclopædia Universalis, 1998, Tome 15, p. 538).

4.2 *Théorie et modèle*

Nous proposons d'abord la description d'une théorie donnée par Varenne (2008). Pour cet auteur, il s'agit d'« *un large ensemble d'énoncés - éventuellement formalisés et axiomatisés -, reliés systématiquement entre eux, formant système donc, et donnant lieu à des inférences*

susceptibles de valoir de manière générique pour un type de phénomènes donné » (Varenne, 2008, p.11).

Le même auteur ajoute qu'une des principales utilisations des modèles aujourd'hui est de servir à faciliter une théorisation, en partant de la construction d'une théorie, de son interprétation jusqu'à son utilisation. Il distingue alors six caractéristiques du modèle qui sont liées à la théorisation :

1. Faciliter l'élaboration d'une théorie non encore maturée
2. Interpréter une théorie, en montrant sa représentabilité (Boltzmann)
3. Illustrer une théorie donnée par une autre théorie (Maxwell) (recherche d'analogies pour le calcul)
4. Tester la cohérence interne d'une théorie (en lien avec la théorie mathématique des modèles)
5. Faciliter l'application de la théorie, i. e. son calcul et sa reconnexion avec le réel (ex. : modèles heuristiques ou asymptotiques des équations de Navier-Stokes)
6. Faciliter l'hybridation des théories dans les systèmes hétérogènes (ex. : modèles de systèmes polyphasés).

Le modèle formel peut valoir comme une simple grille d'analyse de données, ou comme une pure fiction mathématique. Il est alors un instrument pour l'explication de l'expérience plutôt que pour l'explication de la théorie. On constate que le haut formalisme risque d'accentuer le mouvement de déracinement des modèles par rapport au monde physique. (Ibid.).

4.3 *La simulation*

4.3.1 *Notion de la simulation*

Le mot simulation n'est pas spécifique aux sciences physiques mais, d'une façon générale, il apparaît à chaque fois où l'expérimentateur pourra manipuler virtuellement des phénomènes ou des appareils qui présentent un risque momentané afin de prévoir les difficultés qui peuvent se présenter. Parmi les définitions, nous avons choisi celle de Dubey : « *la simulation est l'expérimentation sur un modèle, une procédure de recherche scientifique qui consiste à réaliser une reproduction artificielle du phénomène que l'on désire étudier, à observer le comportement de cette reproduction lorsque l'on fait varier expérimentalement les actions que*

l'on peut exercer sur celle-ci, et à en induire ce qui se passerait dans la réalité sous l'influence d'actions analogues » (Dubey, 2001, p.3).

Notons que plusieurs situations, qui font appel par nécessité à l'utilisation des techniques de simulation, se définissent par l'impossibilité de recourir à l'expérimentation réelle, en raison des considérations morales, des contraintes budgétaires, ou des obstacles liés à la nature du phénomène à étudier. C'est dans cette dernière situation que nous plaçons la simulation dans cette recherche, car le phénomène ondulatoire est très rapide relativement à nos capacités de perception visuelle.

4.3.2 Un plan entre réalité et modèles

Buty (2000) propose une représentation où la simulation apparaît comme un plan intermédiaire entre le monde réel et le monde des théories et des modèles, ce qui permet de mettre en relation des événements et des phénomènes du monde réel. Cette clarification peut donner des éléments de réponse à la polémique qui existe par rapport à la simulation « réel-virtuel ». Beaufils et Richoux (2003) proposent de leur côté un schéma simplifié des différentes orientations qui peuvent exister entre la simulation, le monde matériel et celui des théories.

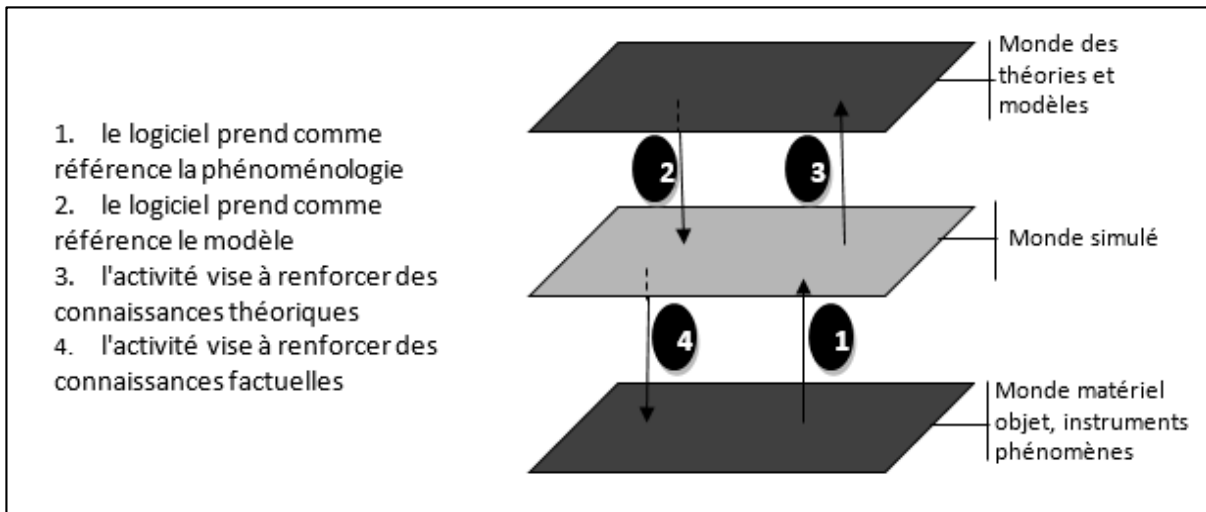


Figure 2 : Relations possibles pouvant s'établir entre les différents plans (Beaufils et Richoux, 2003)

A partir de la schématisation de Buty, Beaufils et Richoux (2003) distinguent alors deux catégories de relation possible entre les différents plans d'orientation de cette représentation :

Pour le logiciel :

- le logiciel prend comme référence la phénoménologie : les objets et instruments sont représentés (de façon plus ou moins réalistes) et la phénoménologie est représentée (aspects visibles, ou rendus visibles, des phénomènes) ;
- le logiciel prend comme référence le modèle : les objets réels sont représentés de façon symbolique, les instruments sont en principe absents (ou représentés de façon très symbolique).

Pour les activités :

- l'activité vise à renforcer des connaissances relatives au modèle et/ou à la théorie ;
- l'activité vise à renforcer des connaissances factuelles et des aptitudes à la reconnaissance de phénomènes.

Ainsi, nous pouvons déduire que les deux premières distinctions visent le choix de la simulation adéquate pour une activité sur simulation, dont la préparation du contenu de cette activité reste à la charge de l'enseignant. Les autres distinctions montrent que l'activité vise le renforcement des connaissances théoriques et factuelles. Cela nous montre que l'activité sur simulation se situe, d'après ces auteurs, dans un cadre de remédiation.

Ce que nous pouvons retenir de cette étude, c'est que pour réussir une séance d'enseignement fondée sur une simulation sur modèle, il faut que l'élève dispose des

connaissances sur la théorie et le modèle en question, et qu'il ait construit en parallèle des conceptions et des modes de raisonnement. C'est ainsi que nous pouvons nous assurer que la simulation apparaît comme plan intermédiaire entre le monde matériel et celui des théories Buty (2000). Pour cette raison, nous avons choisi de placer notre activité sur simulation à la suite de l'enseignement du chapitre onde progressive.

4.3.3 La simulation dans l'enseignement des sciences physiques

Plusieurs travaux (Richoux et Beaufils, 2005 ; Michelet, Luengo, Adam, 2005) menés sur l'utilisation des simulations dans l'enseignement des sciences physiques, dont la plupart se situent dans le cadre des remédiations (Saadi, 2003 ; Michelet, 2006), présentent généralement un apport indéniable pour la construction des connaissances chez les apprenants. Cependant des difficultés apparaissent au niveau de l'intégration de ces simulations dans les scénarios de classe. En effet, les méthodes envisagées pour utiliser ces simulations sont très variées et elles présentent un caractère intuitif du côté des enseignants comme du côté des chercheurs.

Parmi ces travaux, nous retenons ceux qui présentent une démarche d'enseignement incluant une simulation numérique ou des expériences dont nous pouvons dévoiler un scénario sous-jacent poursuivi par les chercheurs.

4.3.3.1 Les travaux de Beaufils

4.3.3.1.1 Environnements sémiotiques manipulables pour des activités sur modèle dans l'enseignement de la physique (Beaufils et *al.*, 2003)

Cette recherche a permis d'étudier principalement les logiciels de simulation dédiés à l'enseignement des sciences physiques. L'investigation a porté sur l'analyse de ces environnements (analyse sémiotique notamment) et sur la conception d'activités (TP/TD sur modèles).

Nous avons retenu une publication issue de cette recherche, qui nous paraît utile pour notre travail, intitulé « Environnements sémiotiques manipulables pour des activités sur modèle dans l'enseignement de la physique ». Les auteurs y déclarent que la simulation apparaît comme une base d'activité nouvelle centrée sur la modélisation et que la théorie et le modèle sont constitutifs de la simulation. En effet, si le modèle qui fonde la simulation a été mal précisé ou absent, l'apprenant peut construire une représentation qui peut être erronée ou incomplète. L'activité peut alors contribuer à la construction des connaissances incompatibles avec celles souhaitées. Enfin, les auteurs affirment que l'absence des informations sur le modèle sous-

jacent et les modes de calculs peut conduire à proposer des activités où les élèves ne savent pas ce qu'ils font.

Ce constat nous a permis de choisir le moment de l'intégration de notre activité sur simulation. Cette activité est proposée à la fin de l'enseignement sur les ondes mécaniques après avoir construit une représentation sur les ondes et réalisé les expériences sur paillasse.

4.3.3.1.2 Simulation en mécanique au lycée : conception et analyse d'activités sur modèle, (Richoux et Beaufile, 2005).

Ces deux chercheurs élaborent des situations d'évaluation formative mettant en œuvre des simulations informatiques. La recherche associée porte d'une part, sur l'étude de l'interaction des élèves avec la situation simulée, et d'autre part, sur l'étude des interactions entre élèves et professeurs dans le cadre des situations d'évaluation formative décrites.

Ce travail qui présente une démarche fondée sur la stratégie de prévision et de confrontation donne des résultats très significatifs. En effet, nous avons tiré de cette recherche deux points intéressants, dont nous avons tenu compte lors de la préparation de notre activité de recherche :

- Les résultats montrent que, sans médiation de l'enseignant, la réinterprétation par les élèves de la situation avec les lois de la physique n'est pas toujours réalisée. Comme pour des activités similaires, la vigilance de l'enseignant est aussi indispensable.
- Ce type d'activités implique un niveau élevé de compétence chez l'élève, puisque ce dernier se place dans une démarche ne reposant pas simplement sur des connaissances livresques qu'il s'agit d'appliquer, à y être invité à l'aide d'une consigne, mais sur sa capacité à mettre en œuvre ses connaissances en sciences physiques.

4.3.3.2 Travail de Chauvet et Duprez : la nécessité d'un scénario pédagogique

Pour Chauvet et Duprez (2003, p. 8), et en accord avec plusieurs chercheurs, l'intégration d'une simulation au cours de l'apprentissage nécessite un scénario pédagogique à adopter par l'enseignant. « *Il ne suffit pas de diffuser un logiciel, même porteur de nouvelles intentions, pour que les enseignants se l'approprient (Rebmann, 1998 ; Buty 2000 ; Richoux et al., 2002). Les résultats mitigés que nous observons, lorsqu'il s'agit de transposer dans des actions précises les éléments les plus innovants par rapport à la pratique habituelle plaident en faveur d'un accompagnement nécessaire qui va bien au-delà d'une simple présentation des possibilités du logiciel ou d'un approfondissement de la théorie. Les chemins d'appropriation*

et les scénarios produits révèlent les difficultés et les résistances pour mettre en pratique les éléments nouveaux. »

4.3.3.3 *Quelques scénarios pédagogiques*

La plupart des chercheurs souligne l'existence d'une stratégie de confrontation nécessaire pour aboutir à un résultat d'apprentissage significatif. Nous citons dans cette partie deux expériences où on peut distinguer deux scénarios différents.

4.3.3.3.1 *Travail de Michelet, Luengo et Adam al. (2006)*

Ce travail de recherche intitulé « Un questionnaire dynamique pour le suivi et l'analyse de l'activité et des productions d'élèves en électricité » porte sur la mise en œuvre des situations actives d'apprentissage intégrant une simulation dont le but est la déstabilisation des « misconceptions » des élèves en électricité et de la remédier. Le scénario adopté comprend trois phases :

- 1 : L'apprenant prend position
- 2 : L'apprenant réalise la simulation
- 3 : L'apprenant confronte l'observation avec sa prévision

Les auteurs donnent un schéma explicatif d'enchaînement des phases du scénario. Ils ajoutent que « *Ce questionnaire s'adapte en fonction des réponses fournies par les élèves, ainsi certains élèves seront confrontés à des situations qui révéleront leurs propres misconceptions.* »

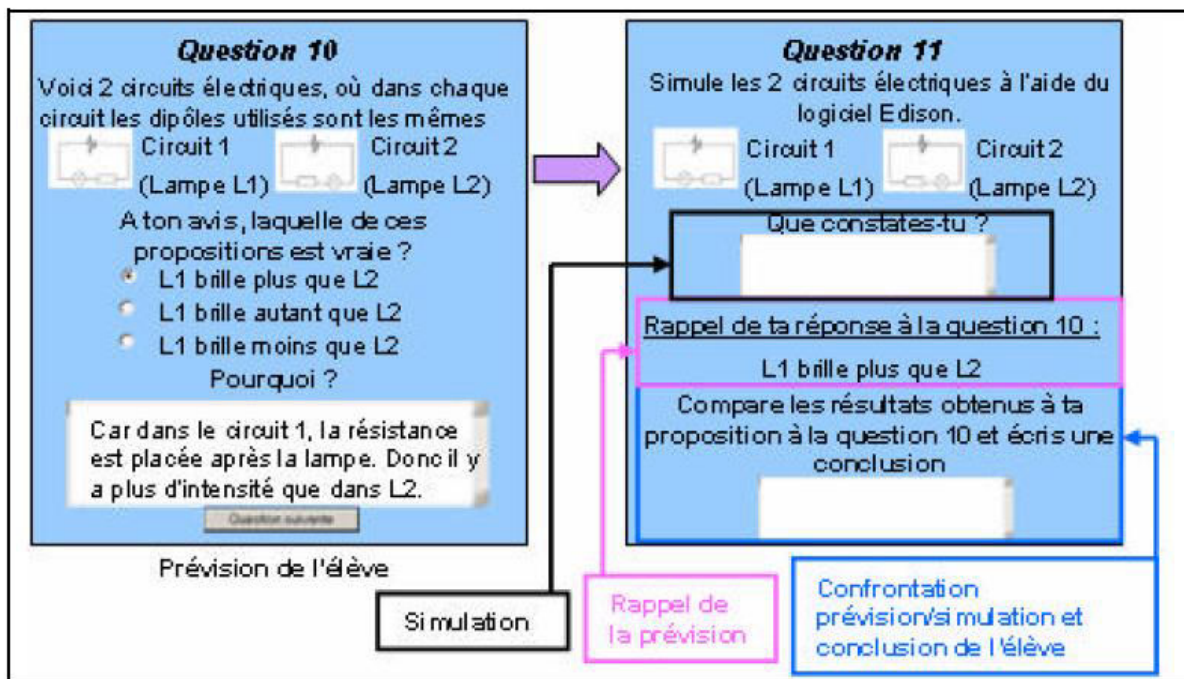


Figure 3 : Exemple d'enchaînement de questions du scénario pédagogique

(Michelet et al., 2006)

D'après Michelet et al. (2006), ce scénario, bien qu'il présente des limites, a permis de montrer que la simulation constitue une aide efficace.

4.3.3.3.2 Travail de Richoux et Beaufile

Ces auteurs précisent les lignes directrices d'élaboration des activités sur simulation. Celle-ci « comportait des phases de prévision/ confrontation par les élèves eux-mêmes portant sur des questions que la didactique a montrées comme "sensibles" et pouvant déboucher sur des conflits cognitifs a priori favorables à la structuration des activités des apprentissages » (Richoux et Beaufile, 2005, p. 2). Les auteurs ajoutent que ce type d'activités implique un niveau élevé de compétence chez l'élève et qu'il repose sur la capacité à mettre en œuvre ses connaissances de physique.

Nous pouvons tirer de ce travail un scénario fondé essentiellement sur deux étapes :

- Une première étape, que nous allons appeler étape de prévision, consiste à demander à l'élève de fournir une réponse à une question préparée préalablement par l'enseignant autour d'une conception erronée et pouvant déboucher sur des conflits cognitifs. Cette réponse va être considérée comme hypothèse de l'élève. Sa validation ou non se réalise à travers des activités sur la simulation, ce qui est pratiquement impossible avec les expériences sur paillasse.

- Une deuxième étape, que nous allons appeler étape de confrontation, au cours laquelle l'élève exploite la simulation pour tester la pertinence de sa réponse à la question de "prévision". Nous nous attendons à ce que cette situation crée chez l'élève un conflit cognitif.

4.3.3.3 Conclusion

La réussite d'une séance d'apprentissage intégrant une simulation nécessite le choix d'un scénario pédagogique, tel que nous l'avons constaté précédemment chez plusieurs chercheurs, En effet, ces chercheurs insistent tous sur la stratégie de phase de confrontation.

4.3.3.4 Synthèse

Cette revue bibliographique nous a permis de situer notre activité, de délimiter le choix de la simulation, le moment de son intégration au cours de l'enseignement. Finalement, nous allons nous inspirer des scénarios pédagogiques issus des travaux de Michelet & al. (2006) et de Richoux et Beaufils (2005) pour construire notre ingénierie didactique.

5 Questions de recherche

Nous partons dans cette recherche de l'idée que l'enseignement/apprentissage de l'onde présente des difficultés de compréhension chez les élèves, ce qui entraîne le développement de la conception hybride capital et celle d'onde serpente. Nous avons ainsi formulé notre question initiale : une séance de travaux pratiques fondée sur l'investigation, et s'appuyant sur une simulation informatique permet-elle de surmonter les difficultés des élèves liées aux conceptions erronées telles que l'hybride capital et l'onde serpente ? A partir de cette question principale émergent alors nos questions de recherche. En tenant compte des éléments avancés précédemment, nous les citons au fur et à mesure.

Q1 : Est-il possible de construire un scénario pédagogique fondé sur une démarche d'investigation autour d'une simulation informatique, différente des approches d'enseignement ordinaire au lycée, et capable de proposer à l'élève et l'enseignant des activités cognitives plus riches et plus productives ?

Lors d'une démarche d'investigation, l'élève est placé en situation de recherche assisté par son enseignant, où il doit tester ses hypothèses en utilisant soit des expériences sur paillasse soit une simulation comme pour le cas de notre recherche. Nous avons déjà lié les difficultés d'enseignement/apprentissage du phénomène d'onde à la rapidité du phénomène physique et à son abstraction, alors

Q2-1 : Une démarche d'investigation fondée sur une simulation informatique crée-t-elle un déclenchement critique chez l'élève vis-à-vis de ses conceptions erronées telles que l'hybride capital et l'onde serpente ?

Q2-2 : La simulation informatique offre-t-elle, à l'enseignant, l'occasion d'institutionnaliser les connaissances sur les phénomènes ondulatoires ?

Les travaux de didactique montrent que tout changement des modalités d'enseignement crée des difficultés d'appropriation pour les élèves, comme pour l'enseignant. L'utilisation d'une démarche d'investigation prenant appui sur une simulation informatique crée un nouvel environnement de travail pour les élèves et l'enseignant, ce qui amène des modifications au niveau du contrat didactique et du milieu didactique, alors

Q3 : Quels types de jeux d'apprentissage peut-on mettre en évidence dans une séance d'investigation s'appuyant sur des activités d'enseignement avec simulation ?

PREMIERE PARTIE

ANALYSE PREALABLE

CHAPITRE 1

ANALYSE EPISTEMOLOGIQUE

ET HISTORIQUE

1 Introduction

Le concept d'onde a été forgé au cours de l'histoire de la physique, par ajout de rectifications successives. En effet, il n'était pas pourvu de toutes ses propriétés à sa naissance, fournies à l'usage que nous en faisons aujourd'hui. Ainsi, la signification du concept d'onde ne peut se comprendre sans référence à l'histoire (Encyclopædia universalis, 2002).

2 Histoire du concept

2.1 *Concept d'onde au XVII^e siècle : naissance du concept*

Le concept d'onde est introduit par le Hollandais Christian Huygens (1629-1695) au XVII^e siècle. Ce concept prend naissance à l'origine d'une critique de la conception corpusculaire de la lumière. En effet, cette conception ne permet pas d'expliquer le fait que [des lumières] se croisent sans qu'il y ait collision comme dans le cas des particules matérielles. Dans son *Traité de la lumière* (1678), Huygens écrit « *quand il en vient [des lumières] de différents endroits, même de tout opposés, elles se traversent l'une l'autre sans s'empêcher, on comprend bien que, quand nous voyons un objet lumineux, ce ne saurait être par le transport d'une matière, qui depuis cet objet s'en vient jusqu'à nous ainsi qu'une balle ou une flèche traverse l'air* ». Pour autant, Huygens n'écarte pas l'idée philosophique de son époque selon laquelle tous les effets naturels sont engendrés par des raisons mécaniques. Alors, il explique que les ondes sont une sorte de mouvement différent de celle des particules ; les ondes ne sont pas des choses matérielles. Huygens décrit le nouvel état de mouvement en référence à la propagation du son. Il ajoute : « *nous savons que par le moyen de l'air, qui est un corps invisible et impalpable, le son s'étend tout à l'entour du lieu où il a été produit, par un mouvement qui passe successivement d'une partie de l'air à l'autre... car je les appelle ondes, à la ressemblance de celles que l'on voit se former dans l'eau quand on y jette une pierre* » (Encyclopædia universalis, 2002). Ce n'est que plus tard que l'onde prend son statut ontologique que nous connaissons, en tenant compte de la théorie ondulatoire de la lumière proposée par Huygens. Blezunski le décrit comme suit : « *Ainsi Huygens parvint à rendre compte de manière ondulatoire, de la propagation rectiligne de la lumière. En effet, le principe qu'il posa – que l'on appelle aujourd'hui principe de Huygens – selon lequel chaque point atteint par l'onde constitue la source d'une onde secondaire, aboutit à ce que l'enveloppe extérieure subisse en même temps les vibrations dues à la source originale et celles des sources*

secondaires. Les effets de toutes les sources s'additionnent sur l'enveloppe qui concentre ainsi l'énergie de l'onde » (Blezunski, 1993, p.17).

2.2 *Concept d'onde au XVIII^e siècle : le concept d'onde prend une dimension physico-mathématique*

La physique de Huygens se limite à la description du phénomène et à une représentation géométrique sans échelle. C'est une physique sans formulations mathématiques, sans équations. Il faut attendre le XVIII^e siècle lorsque la division entre mathématiques et physique prend un caractère institutionnel. Alors que le concept d'onde remplit tous les domaines de la physique, son évolution prend sens avec les travaux liés aux équations mathématiques aux dérivées partielles. Loin des descriptions des rides à la surface de l'eau, le concept onde possède des dimensions physico-mathématiques de phénomène plus varié que la lumière et sa nature électromagnétique, résultat d'une combinaison de deux champs électrique et magnétique, dont le couplage est régi par les équations de Maxwell. Mais nous devons garder à l'esprit que « *on ne saurait oublier que le concept d'onde n'est pas un concept mathématique et ne peut donc, en aucun cas, se résumer à l'étude mathématique des équations (dites équations d'ondes) qui régissent les phénomènes ondulatoires* » (Balabane et Balibar, 2002).

2.3 *Concept d'onde au XIX^e siècle : les ondes deviennent mesurables*

Il faut attendre les travaux de Thomas Young et Augustin Fresnel pour que les ondes deviennent mesurables par leur longueur d'onde avec l'apparition du concept d'amplitude complexe.

Thomas Young (1773-1829) reprend la première théorie ondulatoire de Huygens qui est tombée dans l'oubli face à la domination newtonienne. En effet « *Young reprit l'hypothèse de Huygens des vibrations longitudinales dans l'éther lumineux qui envahit tout l'espace. Il observât que la lumière provenant de la source peu intense était transmise à la même vitesse que celle provenant d'une source intense. Cette observation pesait d'un poids important à ses yeux en faveur de la théorie ondulatoire. Afin de valider son point de vue ondulatoire, Young eu l'idée de réaliser une expérience qui lui permettrait d'observer ce qu'il appela des interférences* » (Blezunski, 1993 p. 25-26).

C'est grâce à son dispositif d'interférences qui permet à partir d'une source primaire d'obtenir deux sources secondaires, et cela par deux fentes placées devant la source secondaire,

que Young se place parfaitement dans le principe de Huygens. Chaque point de la surface atteint par l'onde se comporte comme une source secondaire. La figure d'interférences, qui donne des franges alternativement sombres et brillantes, lui permet de calculer les longueurs d'onde des radiations lumineuses appelées à son époque vibrations lumineuses. En 1817, Young « *émit l'hypothèse que, contrairement à ce qu'avait supposé Huygens, les vibrations de l'éther responsables de la propagation de la lumière ont lieu transversalement et non plus longitudinalement* » (Ibid.).

De même que Young, et d'une façon totalement indépendante, Augustin Fresnel (1788-1827) reprend la théorie des ondes de Huygens pour les faire revivre. En 1814, Fresnel commence une série des expériences de diffraction. Il montre suite à ses expériences, que « *tous les phénomènes optiques pouvaient être explicités dans le cadre de l'hypothèse ondulatoire* » (Ibid.).

En 1819, Fresnel propose dans son « *Mémoire sur la diffraction* » de considérer, l'addition des ondes comme une addition de vecteurs. Cela « *marque une révolution dans la représentation des grandeurs physiques. Jusqu'alors, en effet, une grandeur qui n'était pas purement géométrique était assimilée à un nombre réel. Fresnel, lui, établit que les ondes ne peuvent être représentées que par ce que nous reconnaissons, après coup, comme étant des nombres complexes, ou imaginaires comme l'on disait à l'époque ; « après coup », car l'« invention » des nombres complexes par Carl Friedrich Gauss date de 1831* » (Encyclopædia universalis, 2002). A son époque, Fresnel, avec plusieurs autres scientifiques, comme Arago, Maxwell, revient sur la polémique de la nature de l'éther, le milieu présumé dans lequel se propage la lumière. Cette polémique persiste jusqu'à la fin du XIX^e siècle, où la physique connaît alors deux types d'ondes : l'onde immatérielle telle que le rayonnement électromagnétique en général, comme la lumière, et les ondes matérielles, comme le son ou les rides à la surface de l'eau.

2.4 *Le concept d'onde au XX^e siècle : le concept d'onde lumineuse perd sa « matérialité »*

Pendant deux siècles, le concept d'éther est inséparable de la propagation de la lumière. Par contre, pour la propagation du son, le milieu ne pose pas de problème. Huygens, dès le début, sépare ces deux ondes lumineuse et sonore, mais il croit en même temps que la propagation de ces deux ondes nécessite un milieu matériel. Il écrit dans son *Traité* «

Maintenant, si l'on examine quelle peut être cette matière dans laquelle s'étend le mouvement qui vient des corps lumineux, laquelle j'appelle étherée, on verra que ce n'est pas la même qui sert à la propagation du son » (Encyclopædia universalis, 2002). Pour abandonner cette idée, il faut attendre Albert Einstein (1905) qui annonce l'abandon de l'éther dans un article où il démontre que l'explication des propriétés thermiques de la lumière nécessite de considérer que la lumière est conçue sous forme de grain. En 1909, puis en 1916, Einstein donne l'ontologie finale de ces grains. Il leur attribue un caractère corpusculaire, que plus tard on dénommera photon. Ainsi, une trentaine d'années après Maxwell, la lumière redevient corpusculaire mais sans perdre son caractère ondulatoire.

3 Le concept d'onde

Le texte du savoir « onde » est présenté sous différentes formulations au niveau universitaire. Par exemple, Stocker et al., (2007) proposent les éléments suivants.

3.1 Définition d'une onde

Propagation d'une grandeur physique dont les variations au cours du temps en un point de l'espace sont reliées à ses variations à un instant donné en tout autre point de l'espace par une équation aux dérivées partielles. Lors de cette propagation, il y a transfert d'énergie sans transport de matière. Toute onde peut être considérée comme la superposition d'un nombre plus ou moins grand d'ondes sinusoïdales.

3.2 Propriétés fondamentales des ondes

3.2.1 Description d'une onde par son équation d'onde

Les ondes sont décrites par une fonction de la forme $f(\vec{r}, t)$ qui définit l'amplitude des oscillations en $\vec{r}$ à l'instant t . C'est une équation linéaire aux dérivées partielles du deuxième ordre par rapport au temps et à l'espace de la fonction $f(\vec{r}, t)$. Elle décrit la propagation de l'onde dans l'espace et le temps :

$$\Delta f(\vec{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 f(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 f(\vec{r}, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(\vec{r}, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f(\vec{r}, t)}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 f(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = 0$$

La solution générale de l'équation d'onde est une superposition d'ondes qui se propagent à la même vitesse c dans les directions $\vec{e}_i$ quelconques :

$$F(\vec{r}, t) = \sum_i f_i(t - \frac{\vec{e}_i \cdot \vec{r}}{c})$$

Dans la pratique, les ondes se propagent dans un espace limité. Cette limitation apparaît dans la forme des solutions puisque celles-ci doivent tenir compte des conditions aux limites.

3.2.2 Phase d'ondes d'une onde

Phase de l'onde : argument de la fonction f , écrit sous la forme $wt - \vec{K} \cdot \vec{r} + \varphi$; grandeur qui décrit l'état de vibration de l'onde.

Front d'onde et plan d'onde : les positions $\vec{r}$ de l'espace qui, à un instant donné, ont même phase, tous les points d'un plan d'onde vibrent en phase.

A l'intérieur d'un volume élémentaire ΔV , tout front d'ondes peut être approximé par son plan tangent : le plan d'onde.

3.2.3 Vecteur d'onde et nombre d'onde

Vecteur d'onde $\vec{K}$: vecteur constant qui apparaît dans les solutions de l'équation d'onde. On peut comprendre sa signification en considérant la fonction $f(\vec{r}, t)$ pour $t = 0$.

Alors f prend la même valeur pour tous les points $\vec{r}$ avec $\vec{K} \cdot \vec{r} = \text{const}$ où $\vec{K}$ indique la direction de propagation de l'onde.

Vecteur de propagation $\vec{e}$, $\vec{K}$: vecteur d'onde normalisé à 1 alors $\vec{e} = \frac{\vec{K}}{k}$

Nombre d'onde, k : norme du vecteur d'onde $|\vec{K}|$

3.2.4 Vitesse de phase, fréquence et longueur d'onde.

Vitesse de phase, c : vitesse à laquelle se propage les fronts d'ondes. Cette vitesse dépend du milieu dans lequel l'onde se propage ; elle peut aussi dépendre de la fréquence si le milieu est dispersif.

Période, T : temps au bout duquel, en un point donné, l'état vibratoire se produit identiquement.

Fréquence, f : nombre de fois par seconde où, en un point donné, l'état vibratoire se produit identiquement. C'est la valeur réciproque de la période.

Pulsation w : définie de façon analogue à la vibration : $w = 2\pi \cdot f$

Longueur d'onde, λ : distance entre deux fronts d'ondes successifs de même phase. C'est une caractéristique de la périodicité spatiale de l'onde. Relation entre nombre d'onde et longueur d'onde : $\lambda = \frac{2\pi}{k}$

3.2.5 Vitesse de phase des ondes longitudinales dans les liquides et transversales sur une corde

Ondes longitudinales dans les liquides : $c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$ K module de compressibilité, ρ masse volumique.

Ondes transversales sur une corde : $c = \sqrt{\frac{F}{A\rho}}$ F tension, A section de la corde, ρ masse volumique.

3.2.6 Représentation complexe des ondes

3.2.6.1 Onde plane :

Une onde est dite plane si les fronts d'ondes sont des plans perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde.

Représentation complexe : $f(\vec{r}, t) = f_0 e^{-j(\omega t - \vec{K} \cdot \vec{r})}$

3.2.6.2 Onde sphérique :

Une onde est dite sphérique si les fronts d'ondes sont des surfaces sphériques à la source d'onde.

Représentation complexe :

Issue du point $r = 0$ $f(\vec{r}, t) = \frac{f_0}{|r|} e^{-j(\omega t - kr)}$

Se propageant vers le point $r = 0$

$$f(\vec{r}, t) = \frac{f_0}{|r|} e^{-j(\omega t + kr)}$$

3.2.7 Principe de superposition et principe de Huygens

3.2.7.1 Principe de superposition

Les ondes linéaires se superposent sans influence mutuelle ; l'amplitude des oscillations en un point $\vec{r}$ à l'instant t est la somme des amplitudes des ondes individuelles.

3.2.7.2 Principe de Huygens

Le principe de construction des fronts d'ondes lors de la propagation des ondes :

- 1 Chaque point d'un front d'onde est le départ d'une onde sphérique. Un nouveau front d'onde se déduit de la superposition de toutes ces ondes sphériques. Le nouveau front d'onde est constitué de l'enveloppe de toutes les ondes sphériques élémentaires issue d'un front d'ondes donné.
- 2 Toutes les ondes peuvent être constituées à partir d'ondes sphériques dites ondes élémentaires émise à l'instant t , son front d'onde après un temps Δt aura le rayon $r = c \cdot \Delta t$. à l'exception de la direction de la normale au front d'onde globale, toutes les ondes élémentaires se détruisent par interférence destructive.

Les phénomènes ondulatoires sont dits linéaires si l'amplitude est suffisamment petite pour que cela ne modifie pas les propriétés de propagation de l'onde

3 Conclusion

Le concept d'onde est né avec la première théorie ondulatoire de Huygens au XVII^e siècle. Cette théorie se limite alors à la description du phénomène et cela par analogie à l'onde sonore et celle à la surface de l'eau, comme dans le cas de la lumière. L'onde lumineuse est matérialisée, le milieu dans lequel elle se propage s'appelle l'éther.

Au XIX^e siècle, Young et Fresnel ont développé cette théorie. Les caractéristiques de l'onde deviennent mesurables, la formulation mathématique crée une révolution à cette théorie. Néanmoins, l'existence de l'éther comme milieu de propagation de la lumière crée une polémique. Celle-ci persiste jusqu'au début du XX^e siècle où Einstein déclare l'abandon de cette idée et attribue le non de photons à des quanta d'énergie de masse nulle qui peuvent se déplacer dans le vide. Finalement, la dématérialisation de l'onde lumineuse a pris deux siècles pour être établie. En effet, l'obstacle substantialiste existait chez les savants de l'époque ; cet obstacle épistémologique est né avec la naissance du concept d'onde par Huygens.

Le texte du savoir, ainsi présenté, montre que le concept d'onde est un concept physico-mathématique. Son niveau de formulation destiné aux classes de terminale tunisiennes l'est aussi. Nous pouvons donc nous attendre à la reproduction de ce phénomène de substantialisation lors de la construction de ce savoir par l'élève. Dans ce sens, Brousseau (1998) écrit, en se référant à Bachelard (1938) : « *Le mécanisme de l'acquisition des connaissances [...] peut s'appliquer aussi bien à l'épistémologie ou à l'histoire des sciences, qu'à l'apprentissage et à l'enseignement. Dans un cas comme dans l'autre, la notion d'obstacle apparaît comme fondamentale pour poser le problème de la connaissance scientifique* ». Notons que cet obstacle est détecté par Maurines (2001) dans le raisonnement des élèves et des étudiants qui traitent le signal comme un objet matériel mis en mouvement par la source qui l'a créé, d'où l'appellation du concept hybride capital, un concept qui rassemble plusieurs grandeurs physiques, et qui prend en compte cette « mécanique spontanée du signal ».

CHAPITRE 2

ANALYSE DE L'ENSEIGNEMENT ORDINAIRE ET DE SES EFFETS

1 Introduction

Nous souhaitons, dans ce chapitre, faire une étude descriptive et compréhensive, de ce qu'il se passe au cours de l'enseignement des ondes mécaniques à une classe de terminale, ceci afin de répondre à deux de nos questions principales de cette recherche : Quelles sont les dimensions du quadruplet (définir, dévoluer, réguler, institutionnaliser) que l'on observe dans la pratique de l'enseignant au cours de ces séances ? Quelles sont les positions topogénétiques prises par les élèves et par l'enseignant au cours de ces séances d'enseignement et quel est le rapport avec la densité du savoir ?

Pour répondre à ces questions, nous nous situons dans le cadre de l'observation d'un enseignement ordinaire des ondes mécaniques au lycée tunisien. Pour réaliser une analyse des pratiques en classe, nous nous situons dans le cadre de la théorie de l'action conjointe en didactique (Sensevy, 2011).

2 Méthodologie spécifique à l'enseignement ordinaire de la recherche.

Notre méthodologie s'appuie sur un découpage de l'action professeur-élèves de taille et de granularité différentes qui, « *dans leur dimension temporelle, représentent des échelles différentes qui font apparaître des événements inaperçus à l'échelle supérieure ou inférieure* » Marlot (2007, p.164).

Nous proposons de faire notre étude de cas de l'enseignement ordinaire dans le cadre de la TACD. Nous pensons que cette théorie offre des outils qui permettent non seulement de décrire ce qui se passe dans l'action professeur/élève mais aussi de comprendre cette action.

2.1 Contexte de l'étude

2.1.1 Enseignant observé, classe et établissement concerné

L'enseignant observé est un enseignant volontaire, possédant une maîtrise en sciences physiques de la faculté des sciences de Tunis. Il détient également un CAPES dans la même discipline. Il a une expérience de dix-sept ans d'enseignement des sciences physiques dont quinze années d'enseignement en classes de terminale scientifique. C'est donc un enseignant que nous jugeons « expérimenté ». Nous avons opté pour ce choix d'enseignant d'une part, car c'est un enseignant expérimenté dans l'enseignement des classes terminales, de ce fait, il

connaît bien les difficultés rencontrées par les élèves au cours de l'enseignement des ondes, et d'autre part, nous pensons qu'il est motivé et coopératif. Cet enseignant assure des cours de physique et de chimie. Notre étude empirique s'appuie sur une classe de 21 élèves francophones¹, soit 16 filles et 5 garçons. Notons qu'en Tunisie, l'année scolaire se divise en trois trimestres. Les élèves de cette classe ont choisi l'orientation des sciences expérimentales.

Le lycée concerné se trouve dans la banlieue de Tunis dans une zone populaire et les élèves sont issus d'une couche sociale défavorisée. L'établissement souffre, d'après les enseignants, d'un manque de matériel de laboratoire, bien qu'il nous apparaisse bien équipé. Mais en réalité, les enseignants protestent plutôt contre le manque d'entretien, car le matériel est défaillant la plupart du temps.

2.1.2 Organisation des séances d'enseignement

Les séances d'enseignement prévues par l'enseignant sont d'un volume horaire de cinq heures 30 minutes, dont deux séances de cours où la classe entière est concernée. Entre ces deux séances, a lieu une séance de travaux pratiques d'une heure 30 minutes où la classe est divisée en deux groupes d'élèves. Notons que nous n'avons pas participé aux choix ou à la planification de ces séances d'enseignement sur les ondes mécaniques. Le diagramme suivant permet d'avoir une idée sur la nature cours ou TP et sur la durée de chaque séance suivie par cette partie de la recherche.

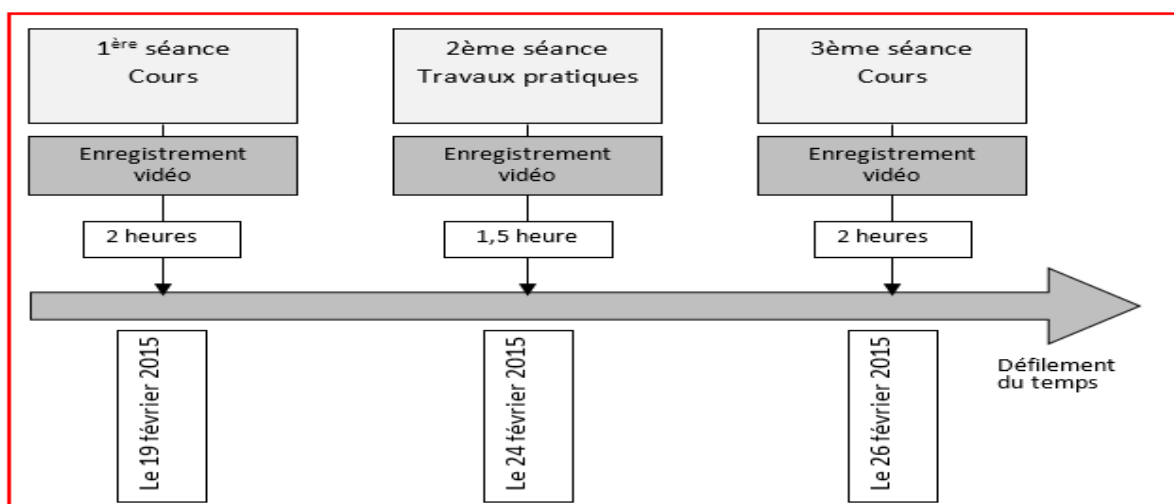


Figure 2. 1 : Enchaînement des séances du cours enseignement ordinaire.

¹ Rappelons qu'en Tunisie les sciences sont enseignées en arabe jusqu'au collège mais qu'elles sont enseignées en français à partir du lycée

2.1.3 Recueil des données

Le recueil des données est basé sur l'enregistrement vidéo des trois séances d'enseignement. Nous avons utilisé une caméra mobile et une autre, fixe, au fond de la classe. Ces enregistrements sont notre principale source de données. « *La méthodologie d'observation de la didactique ordinaire suppose un dispositif de recueil de données à faible valence "expérimentale" et un dispositif d'analyse à forte valence "clinique". C'est pourquoi, certains didacticiens comparatistes ont parfois l'habitude de nommer cette méthodologie "clinique expérimentale"* » (Marlot, 2007, p.155).

2.1.4 Construction des synopsis primaires

Nous commençons notre analyse par une description détaillée de ce qui se passe au cours de la séance d'enseignement avec le logiciel Transana. Ensuite, nous découpons la description ainsi obtenue sous des sections allant du plus grand au plus petit : la phase qui correspond à l'enseignement d'un des concepts visés, ensuite la scène qui correspond généralement à une interaction professeur-élèves. Cette dernière scène est aussi découpée suivant le rôle de l'enseignant ou la tâche effectuée par les élèves, et cela dans le cadre du suivi du déroulement de la séance. Nous avons gardé une colonne pour les observations qui dépendent de la vision du chercheur en lien avec ces objectifs de recherche.

Temps	Phases	Scènes	Déroulement		Observations
			Rôle du professeur	Activité des élèves	

Figure 2. 2: Les différentes colonnes qui constituent le synopsis d'une séance

2.1.5 Rédaction de la narration didactique

En se basant sur une description détaillée et sur les synopsis primaires (annexe 3, p. 265), nous construisons au début de l'analyse de chaque séance une description courte qui traduit brièvement le déroulement de la séance.

2.2 Construction des échelles : granularité de plus en plus fine

Le gabarit présenté figure 2.2 sert de fondement au découpage qui va être fait suivant des granularités que nous allons expliquer par la suite.

2.2.1 Variétés des échelles temporelles

Pour comprendre l'activité de l'enseignement ordinaire, nous avons choisi un découpage de la séance suivant trois niveaux : l'échelle macroscopique qui correspond au temps thématique, c'est-à-dire à un thème à enseigner au cours de la séance ; l'échelle mésoscopique qui correspond à un jeu didactique ; l'échelle microscopique qui correspond à un épisode qui peut durer de quelques secondes à quelques minutes. Notre choix méthodologique est de commencer une analyse générale présentée par l'étude des thèmes, puis de creuser dans une analyse fine des jeux, et enfin de proposer une analyse plus fine des épisodes.

2.2.2 Structuration thématique

Pour faire une comparaison entre ce qui est fait en classe et ce qui est demandé par l'institution sous forme d'objectif d'enseignement, nous avons choisi les thèmes qui traduisent les objectifs visés par chaque séance analysée. Cela correspond à une phase dans le synopsis primaire et donc les thèmes correspondent à un temps académique.

2.2.3 Structuration en jeux

L'analyse de l'enseignement ordinaire nous conduit à une analyse des jeux didactiques qui sont réalisés en classe et cela pour comprendre la nature d'un tel enseignement proposé par le professeur. Un jeu est déduit à partir de la colonne du déroulement de la séance dans le synopsis primaire. Rappelons que dans cette étape de recherche, notre rôle se limite à l'observation et à l'analyse de ce qui est produit en classe.

2.2.4 Structuration en épisodes

Étant donné qu'un jeu peut atteindre une vingtaine de minutes, nous avons opté pour un découpage plus fin en épisodes. En effet, un épisode est le résultat de la subdivision d'un jeu correspondant au rôle joué par chaque interlocuteur professeur ou élèves. Chaque épisode est alors dédié à un joueur. Mais il y a des exceptions où, dans quelque cas, nous pouvons trouver deux joueurs ensemble dans un épisode lorsque la subdivision perd le sens d'un jeu. Nous pensons que ce découpage nous permet de visionner comment le jeu a été effectué et de repérer alors le basculement topogénétique enseignant-élève ou élève-enseignant. Cela nous renseigne sur les stratégies d'enseignement adopté par l'enseignant.

2.3 *Les principes de l'analyse*

2.3.1 Des descripteurs liés à l'avancée du savoir

Notre analyse de l'avancée du savoir repose sur deux descripteurs, la topogénèse et la densité épistémique de chaque épisode. Nous pensons que ces descripteurs peuvent localiser les moments clés de la séance, c'est-à-dire déterminer par qui et comment le savoir évolue au cours de l'enseignement, et déterminer l'implication ou non des élèves dans ce processus.

La topogénèse est un descripteur interprétant celui qui assure la responsabilité dans l'avancée des savoirs. Elle est :

- TCP_H : Lorsque la position topogénétique de l'enseignant est haute alors elle est basse du côté de l'élève. Par exemple : lorsque le professeur fait un développement théorique au tableau et que les élèves prennent note sur leurs cahiers, ou si le rôle des élèves se limite à l'observation d'une explication ou du déroulement d'une expérience.
- TCP_B : Lorsque la position topogénétique de l'enseignant est basse alors elle est haute du côté de l'élève. Par exemple, c'est lorsque le rôle de l'enseignant se limite à l'observation de ses élèves, quand ces derniers réalisent eux-mêmes une expérience ou une résolution d'un exercice.
- Équilibré : La topogénèse est équilibrée appelée aussi mixte, si les deux intervenants interagissent ensemble pour assurer l'avancée de savoir. C'est lorsque le professeur produit des gestes « *en respect des grands équilibres didactiques, en particulier de l'équilibre topogénétique : il peut passer de la position (très) basse [...] à la position (très) haute.* » (Sensevy, 2011, p230). Dans ce même sens, Nouri propose la dénomination de topogénèse mixte au lieu de topogénèse équilibrée. L'auteur écrit : « la topogénèse est mixte lors d'une co-construction entre P et E » (Nouri, 2016, p. 142). Par exemple, lorsque l'enseignant et ses élèves coopèrent à la réalisation d'une expérience, à la production d'une explication d'un phénomène ou bien encore à apporter ensemble une réponse à une question.

Plusieurs auteurs (Le Henaff, 2013 ; Marlot, 2008 ; Nouri, 2016 ; Sensevy, 2011) utilisent la notion de densité de savoir ou de densité épistémique comme descripteur des jeux didactiques, mais sans proposer de définition précise. Selon nous, nous définissons la densité épistémique selon quatre critères, qui sont évalués qualitativement :

- Très élevée : lorsque la quantité de savoirs nouveaux est très grande et son introduction dans le milieu est très rapide. C'est le cas lorsque le professeur annonce plusieurs concepts nouveaux en même temps sans donner d'explications. Par exemple, le professeur dit au début de la séance « on va définir aujourd'hui ce que c'est une onde², déterminer la célérité d'une onde et les propriétés dont elle dépend ». Dans ce cas-là les concepts soulignés sont nouveaux pour les élèves.
- Elevée : lorsque la quantité des savoirs nouveaux est importante et son introduction dans le milieu permet un suivi plutôt aisé par les élèves. C'est le cas lorsque le professeur introduit un concept nouveau en le définissant et en donnant l'occasion à ses élèves de le suivre et de lui poser des questions, ou lorsque les élèves ont pu apporter une explication ou une définition d'un concept nouveau, résultat d'un débat entre professeur-élèves ou à partir d'une expérience. Par exemple, à partir d'une expérience, les élèves déduisent pour la première fois que la célérité d'une onde dépend du milieu de propagation.
- Faible : lorsqu'il s'agit de savoirs déjà rencontrés par les élèves en sciences physiques. C'est le cas lorsque l'enseignant refait une explication ou un rappel d'une définition déjà rencontrée ultérieurement
- Très faible : lorsqu'il ne s'agit pas de savoirs spécifiques aux sciences physiques mais des savoir-faire qui sont épistémiquement liés à plusieurs disciplines ou rattachés à la vie courante. Par exemple, reproduire un texte sur le cahier de cours, réparer un matériel expérimental défectueux....

2.3.2 Construction des tableaux d'analyse

Notre synopsis primaire est repris et développé pour répondre aux exigences déjà fixées en guide méthodologique : thème, jeu et épisode. Nous avons aussi ajouté deux colonnes, l'une pour l'avancée du savoir et l'autre pour les événements remarquables. Jameau (2012) les décrit ainsi : « *Ils sont identifiés par le chercheur au moment de prises de décisions du professeur, dans l'action. Ces événements peuvent être la question d'un élève ou du professeur, une réponse, une attitude, etc...* » (Jameau, 2012, p. 66). Les événements remarquables servent d'une part, à la localisation des passages qui nécessitent une transcription détaillée, et, d'autre

² Les mots soulignés représentent les nouveaux concepts énoncés par le professeur

part, à détecter un moment clé de la séance. Par exemple, si une expérience n'est pas réussie, nous pouvons voir quelles sont les difficultés rencontrées par l'enseignant et ainsi envisager de remplacer cette expérience par une simulation informatique dans notre futur scénario. Le contenu du tableau obtenu dépasse ce que nous trouvons dans un synopsis classique. Aussi, nous allons l'appeler tableau d'analyse. Ce tableau sera le support de l'analyse de l'enseignement ordinaire. Nous donnons ici la structuration de ces tableaux.

Durée	Thèmes	Jeux didactique	Episodes		Avancée du savoir		Evènements remarquables
			N°	Description	Topogenèse	Densité épistémique	

Figure 2. 3: Structure du tableau d'analyse des séances d'enseignement ordinaire

3 Traitement des données

Nous analysons d'abord chaque séance d'enseignement ordinaire séparément et nous faisons ensuite une conclusion des résultats obtenus pour l'ensemble des séances. A chaque début d'analyse d'une séance, nous donnons un schéma qui marque par un encadré rouge la séance en question.

3.1 *Première séance du cours*

3.1.1 **Présentation**

Nous commençons cette partie de l'analyse par la première séance qui s'inscrit dans trois séances d'enseignement ordinaire des ondes mécaniques. La séance est prévue pour une durée de deux heures.

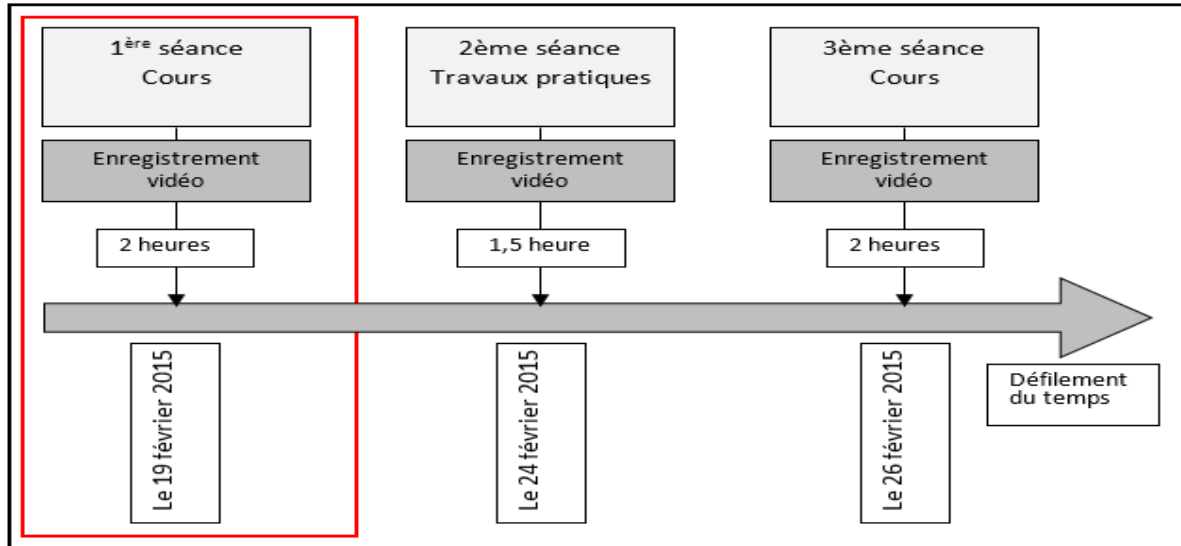


Figure 2. 4: Emplacement de la 1^{ère} séance au cours de l'enseignement ordinaire

3.1.2 Narration didactique

Les élèves sont installés dans la classe. Le professeur leur distribue des polycopiés comme support du cours contenant des schémas et des champs vides à remplir au fur et à mesure de l'avancement du cours. Le professeur prend la parole et présente brièvement le contenu de son cours. Il présente également le matériel qu'il va utiliser. À l'aide d'une corde élastique, un ressort et de l'eau, le professeur introduit la notion de milieu élastique. Il explique que seule l'énergie se propage et non pas la matière. L'enseignant énonce la définition de l'ébranlement qui se propage le long de la corde. Il attire l'attention des élèves pour comparer le déplacement de l'ébranlement et le déplacement le long de la corde mais il n'obtient aucune réaction de ses élèves. Par une deuxième expérience (à l'aide d'un ressort), l'enseignant illustre l'ébranlement longitudinal. Suit une série d'expériences pour introduire la notion de milieu bidimensionnel (l'eau) et tridimensionnel (propagation du son dans l'air) mais cette expérience n'est pas réussie. Le professeur avoue à ses élèves que le résultat de cette expérience n'est pas tranchant puisque certains élèves disent que le son a diminué, alors que pour d'autres il a augmenté et pour d'autres encore, il est toujours le même. Le professeur donne alors le résultat auquel on doit s'attendre. L'étape suivante est consacrée à l'étude de la célérité de l'onde. L'enseignant souhaite montrer que la célérité dépend des propriétés du milieu de propagation d'un ébranlement à l'aide d'une échelle de perroquet, deux capteurs et un chronomètre. De même, l'expérience ne donne pas de résultat à cause d'un problème de matériel ; c'est le deuxième échec. L'enseignant fournit alors aux élèves un tableau des mesures pour faire les calculs de célérité. Sans réaliser d'expériences, l'enseignant dit à ses élèves qu'ils pourraient, avec le

même matériel, faire varier l'amplitude ou bien, avec les masselottes de l'échelle du perroquet, laisser la célérité constante. Il généralise alors son propos et avance que la célérité d'un ébranlement varie avec le milieu. Il accorde enfin un moment aux élèves pour qu'ils prennent des notes sur leurs cahiers de cours.

3.1.3 Premier niveau d'analyse : Construction du tableau d'analyse

Rappelons que nous nous basons sur le synopsis primaire des séances pour construire le tableau que nous avons appelé tableau d'analyse. Ce nouveau tableau tient compte des différentes granularités d'analyse et de la description de l'avancée du savoir, la topogénèse et la densité épistémique. Le premier tableau d'analyse de la première séance montre que la séance a duré 1 heure 45 minutes où l'enseignant a traité trois thèmes : milieu élastique, ébranlement et célérité d'un ébranlement. Nous donnons un extrait du tableau d'analyse.

Durée	Thèmes	Jeux didactique	Episodes		Avancée du savoir		Evènements remarquables
			N°	Description	Topogénèse	Densité épistémique	
0 :01 :03		Jeu 1 Présentation du contenu à enseigner au cours de la séance Durée 48s	Ep_1.1 Durée 48s	Le professeur annonce aux élèves qu'il va aborder un nouveau chapitre et qui va commencer par les ébranlements en suite les ondes mécaniques progressives alors à l'aide des expériences ou on va définir un ébranlement dans différents milieu et enfin on va étudier la célérité d'un ébranlement.	TCP_H	Très élevée	Aucun apport aux élèves, utilisation de termes inconnu pour les élèves
0 :01 :51	Thème 1 Milieu élastique Durée 3min54s	Jeu 2 Présentation de matériel et Expérience Durée 1min17s	Ep_2.1 Durée 19s	Le professeur présente le matériel qui va utiliser pour introduire la notion d'ébranlement à l'aide d'une corde élastique, ressort et de l'eau	TCP_H	Très faible	
0 :02 :10			Ep_2.2 Durée 58s	il déforme la corde et en le relâchant, et de même il fait pour les autres ressorts et eau les élèves répondent que tous ces milieux reprennent sa forme après déformation	Mixte	Faible	
0 :03 :08		Jeu 3 Définition d'un milieu élastique Durée 2min36s	Ep_3.1 Durée 7s	le professeur dit que tous ces milieux sont appelés milieu élastique.	TCP_H	élevée	
0 :03 :15			Ep_3.2 Durée 24s	Le prof pose la question aux élèves qui peut me définir alors un milieu élastique les élèves répondent au même temps que c'est un milieu qui reprend sa forme le professeur dit après quoi ? ils répondent après déformation.	Mixte	Faible	Effet Topaze
0 :03 :39			Ep_3.3 Durée 1min2s	Le professeur dicte la définition d'un milieu élastique	TCP_H	Très faible	
0 :04 :41			Ep_3.4 Durée 1min3s	le professeur introduit la notion du milieu unidimensionnel comme le cas d'une corde.	TCP_H	élevée	

Figure 2. 5: Extrait du tableau d'analyse de la première séance d'enseignement ordinaire des ondes mécaniques

3.1.4 Deuxième niveau d'analyse : Analyse des thèmes

A partir du synopsis, nous avons pu extraire un histogramme qui traduit la durée du temps accordée par l'enseignant durant la séance. Rappelons qu'un thème correspond à un concept particulier en lien avec les ondes, ce concept fait partie des objectifs visés par la séance en cours.

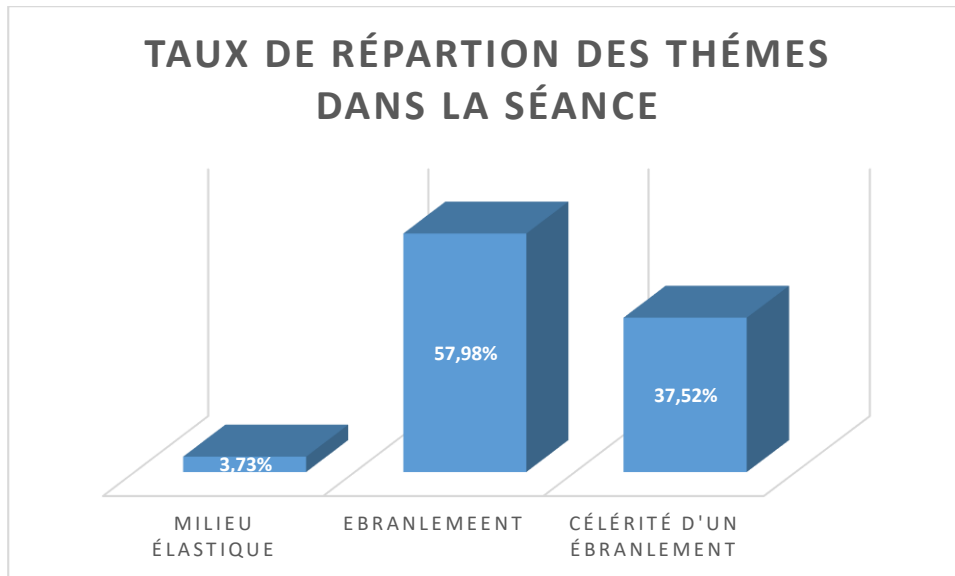


Figure 2. 6: Taux de répartition des thèmes dans la première séance

Nous constatons que ces thèmes répondent aux objectifs institutionnels de cette première séance. Néanmoins, l'enseignant n'a pas accordé beaucoup d'intérêt à la notion de milieu élastique. Par contre, il était très attentif à l'enseignement de la célérité de l'ébranlement qui a duré 39 min.

3.1.5 Troisième niveau d'analyse : Analyse en jeux didactiques

Nous traitons les jeux en lien avec leurs thèmes d'origine³, c'est-à-dire que nous gardons chaque jeu dans son contexte thématique. Par conséquent, nous effectuons l'analyse des jeux par thème déjà cité dans le paragraphe précédent.

³ Le jeu 1 n'est pas analysé ici car il s'agit d'un jeu introductif aux différents thèmes

3.1.5.1 *Thème milieu élastique*

Ce thème dure 3 minutes 54 s ; il est constitué de deux jeux :

Jeu 2 : Présentation du matériel et Expérience. Durée totale 1min17s

Jeu 3 : Définition d'un milieu élastique (2min36s).

Nous constatons durant ce thème que pour aucun épisode la topogénèse est du côté élèves.

3.1.5.2 *Thème notion d'ébranlement*

La durée totale de ce thème est de 54 minutes 49 secondes. Ce thème est formé de six jeux comme suit :

Jeu 4 : Introduire la notion d'un ébranlement. Durée 2min18s

Jeu 5 : Définir un ébranlement. Durée 2min4s

Jeu 6 : Ebranlement transversal. Durée 7min47s

Jeu 7 : ébranlement longitudinal. Durée 10min48s.

Jeu 8 : Ebranlement dans un milieu bidimensionnel. Durée 27min49s

Jeu 9 : Ebranlement dans un milieu tridimensionnel. Durée 9min32s

Durant tous les épisodes de ce thème, la topogénèse est du côté de l'enseignant, sauf pour un épisode, où la topogénèse est du côté élèves, d'une durée de 39 s et de très faible densité épistémique.

3.1.5.3 *Thème célérité d'un ébranlement : effet zoom*

Rappelons que nous sommes intéressés dans cette recherche par deux conceptions citées dans l'introduction générale. L'une est la conception hybride capitale, identifiée par Maurines (1988) « *la source semble communiquer quelque chose à la corde lors de la formation du signal, quelque chose qui se déplace et reste localisé dans la bosse. Les élèves l'appellent le plus souvent force ; mais c'est en réalité une notion hybride, mélange de force, de vitesse, d'énergie* ». Cette conception se manifeste généralement lors de l'étude de la célérité de l'ébranlement ou de l'onde.

Nous citons d'abord les différents jeux au cours de ce thème qui figurent dans le tableau d'analyse suivant :

Première partie : analyse préalable
Chapitre 2 : Analyse de l'enseignement ordinaire et de ses effets

Durée	Thèmes	Jeux didactiques	Episodes		Avancée du savoir		Evènements remarquables
			N°	Description	Topogénèse	Densité épistémique	
1 :06 :02	Thème 3 Célérité d'un ébranlement Durée 39min21s	Jeu 10 Notion de la célérité d'un ébranlement Durée 8min	Ep_10.1 Durée 4min8s	L'enseignant commence par faire au tableau un schéma d'une déformation en deux instants différents et il introduit que l'ébranlement se déplace avec une célérité égale au rapport distance sur durée de temps les élèves reproduisent sur leur copies le schéma du tableau et la formule de la célérité	TCP_H	Élevée	Sans indiquer que c'est la vitesse est constante
1 :10 :10			Ep_10.2 Durée 3min52s	Le professeur dicte et explique le retard du temps mis par l'ébranlement pour parcourir la distance SA et donne aussi l'unité en SI	TCP_H	Élevée	
1 :14 :02		Jeu 11 Mesure de la célérité d'un ébranlement Durée 17min28s	Ep_11.1 Durée 2min46s	Le professeur déclare qui va déterminer les facteurs dont dépend la célérité d'un ébranlement pour cela il utilise une échelle de perroquet, il provoque une perturbation les élèves visualisent l'ébranlement qui se déplace, le il passe à la quatrième page du document il explique de nouveau l'expérience et comment peut-on mesurer la durée du parcours avec un chronomètre,	TCP_H	Élevée	P dit qu'on peut déterminer cette vitesse avec un mesureur de vitesse
1 :16 :48			Ep_11.2 Durée 2min46s	Le professeur prend un rapporteur pour mesurer l'angle que fait le premier palier de l'échelle de perroquet il prend un angle de 60° et il la libère le chronomètre affiche 8.38s il note les valeurs au tableau il montre qu'il y a deux capteur tel que on doit mesurer la distance qui les sépare c'est 0.45m	TCP_H	Élevée	
1 :19 :34			Ep_11.3 Durée 6min3s	Le professeur change alors cette distance en déplaçant, le deuxième chronomètre et de l'attacher par un ruban adhésif mais ce dernier ne marque pas l'arrêt, le prof annonce aux élèves que c'est un problème technique il continu à essayer,	TCP_H	Très faible	Expérience échouée
1 :25 :37			Ep_11.4 Durée 58s	Il demande l'aide d'un élève pour tenir le fil attaché au chronomètre la valeur obtenue est 0.831s, il refait l'expérience le prof demande au élèves un téléphone portable muni d'un chronomètre, il obtient un, il mesure la durée trouvée manuelle 0.840s	TCP_H	Très faible	Expérience échouée

Première partie : analyse préalable
Chapitre 2 : Analyse de l'enseignement ordinaire et de ses effets

1 :26 :35			Ep_11.5 Durée 1min36s	Il refait l'expérience, il n'est pas convaincu par la valeur la deuxième valeur est 1.12s est que la distance qu'il a mesurée est 0.54m s faute de matériel les deux valeurs trouvées sont 0.536m/s et 0.435m/s	TCP_H	Très faible	Expérience échouée
1 :28 :11			Ep_11.6 Durée 1min07s	Le calcul est fait par les élèves le prof dit que ces valeurs sont différentes.	TCP_B	Très faible	Expérience échouée
1 :29 :18			Ep_11.7 Durée 44s	Il refait la mesure de la distance il corrige la deuxième valeur est prend comme valeur 0.5m/s	TCP_H	Très faible	
1 :30 :02			Ep_11.8 Durée 1min28s	P déclare que ces valeurs doivent être égales ou très proches enfin le prof abandonne l'expérience	TCP_H	Elevée	Résultat parachuté
1 :31 :30		Jeu 12 La célérité de l'ébranlement dépend des propriétés du milieu de propagation Durée 13min33s	Ep_12.1 Durée 36s	P dit même si on change l'angle du palier c'est à dire l'amplitude la vitesse reste constante	TCP_H	Très élevée	Résultat parachuté
1 :32 :06			Ep_12.2 Durée 3min08s	P montre qu'on pourra déplacer les masselottes de l'échelle au milieu pour changer le milieu et essaye de faire des mesures nouvelles fait des réglages du matériel en suite il prend un chronomètre d'un téléphone portable la première valeur est de 3.08s	TCP_H	Très élevée	
1 :35 :14			Ep_12.3 Durée 1min39s	P la compare avec la deuxième valeur de la première expérience puisque c'est la même distance entre les deux capteurs $v=0.36\text{m/s}$	TCP_H	Faible	
1 :36 :53			Ep_12.4 Durée 1min	P annonce que les valeurs sont changées complètement lorsqu'on a changé les caractéristiques du milieu et que la célérité d'un ébranlement varie avec le milieu et que ceci est général	TCP_H	Très élevée	
1 :37 :53			Ep_12.5 Durée 7min10s	P dicte alors ce résultat aux élèves, et conclut que la célérité d'un ébranlement dans un milieu homogène est constante elle ne dépend de l'amplitude de la déformation mais dépend des propriétés physiques du milieu matériel et il finit ainsi la séance	TCP_H	Très élevée	
1 :45 :03	Les élèves rangent leurs affaires et quittent la salle.						

Tableau 2. 1: Partie du tableau d'analyse de la première séance correspondant au thème mesure de la célérité

3.1.5.3.1 Jeu 10 : Notion de la célérité d'un ébranlement

Ce jeu d'une durée de 8 min comporte deux épisodes où la topogénèse est du côté professeur et de densité épistémique élevée. Il n'y a aucune interaction verbale entre les élèves et leur enseignant.

3.1.5.3.2 Jeu 11 : Mesure de la célérité d'un ébranlement

La durée de ce jeu est très importante puisqu'elle atteint 17 minutes 28 secondes. Nous repérons 8 épisodes dont sept de topogénèse du côté du professeur et de densité épistémique élevée, et un épisode de topogénèse du côté élèves mais de densité épistémiquement faible. De plus, nous constatons que l'expérience proposée par l'enseignant échoue à quatre reprises. Celui-ci reconnaît cet échec ; c'est pourquoi il donne des résultats « parachutés » aux élèves pour qu'il puisse continuer l'enchaînement de son cours (dernier épisode Ep_11.8 de densité épistémique très élevée).

3.1.5.3.3 Jeu 12 : La célérité de l'ébranlement dépend des propriétés de milieu de propagation

Ce jeu dure 13 minutes 33 secondes. Il comporte 5 épisodes, de topogénèse du côté professeur dont quatre de densité épistémiquement très élevée et un faible qui consiste à comparer des valeurs de célérité. Notons que le premier épisode de ce jeu aboutit à un résultat « parachuté » d'une expérience qui n'est pas faite. Nous pouvons donc conclure que ce jeu est joué en totalité par l'enseignant en absence de toutes interactions du côté des élèves.

3.1.5.3.4 Topogénèse et densité épistémique

Nous avons choisi deux descripteurs de l'avancement du savoir : topogénèse et densité épistémique. Notre analyse est regroupée dans le tableau suivant :

Densité épistémique	Très élevée											X	X		X	X
	Elevée	X	X	X	X						X					
	Faible													X		
	Très faible					X	X	X	X	X						
Episode		1	2	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5
Jeu		Jeu 10		Jeu 11								Jeu 12				

Topogénèse haute (du côté de l'enseignant)
 Topogénèse basse (du côté des élèves)

Figure 2. 7: tableau illustrant l'avancée du savoir du thème 3

Ce tableau montre que ce thème comporte 14 épisodes sur 15 où la topogénèse est du côté du professeur et un seul épisode du côté des élèves. De plus pour ce même épisode, la densité épistémique est très faible. De même, cinq épisodes du jeu 11, qui sont dédiés à la mesure de la célérité de l'ébranlement, sont de très faible densité épistémique. Ils ont une durée de 9 minutes 44 secondes, soit 55,7% du temps accordé à ce thème. L'enseignant n'a pas réussi à illustrer cette partie du cours par des expériences qui sont à sa disposition, en effet les expériences sur paillasse dans ce cas ne sont pas concluantes.

3.1.6 Conclusion

Du point de vue institutionnel, au cours de cette première séance, l'enseignant a réussi à donner un cours qui touche en profondeur les objectifs visés. L'enseignant a fourni un effort indéniable pour réaliser des expériences qui illustrent les quatre thèmes : milieu élastique, ébranlement célérité de l'onde et la célérité en relation avec les caractéristiques du milieu de propagation. Néanmoins, les expériences quantitatives n'ont pas donné de résultat probant à cause du matériel défectueux.

Du point de vue didactique, nous avons constaté que la topogénèse est pratiquement toujours du côté de l'enseignant (84.78% des épisodes). Néanmoins, on peut constater que pour les quatre épisodes où la topogénèse est du côté des élèves, 3 parmi ces épisodes présentent une densité épistémique très élevée. Ceci pourrait montrer que les élèves présentent une certaine dévolution avec le contenu du cours sur les ondes mécaniques.

Topogenèse Densité épistémique	Topogenèse cote prof Haute	Topogenèse mixte	Topogenèse coté prof basse
Très élevée	14	1	3
Elevée	13	0	0
Faible	4	2	1
Très faible	8	0	0
Bilan	39	3	4
Pourcentage	84.78%	6.52%	8.69%

Figure 2. 8: Tableau illustrant l'avancée du savoir au cours de la première séance

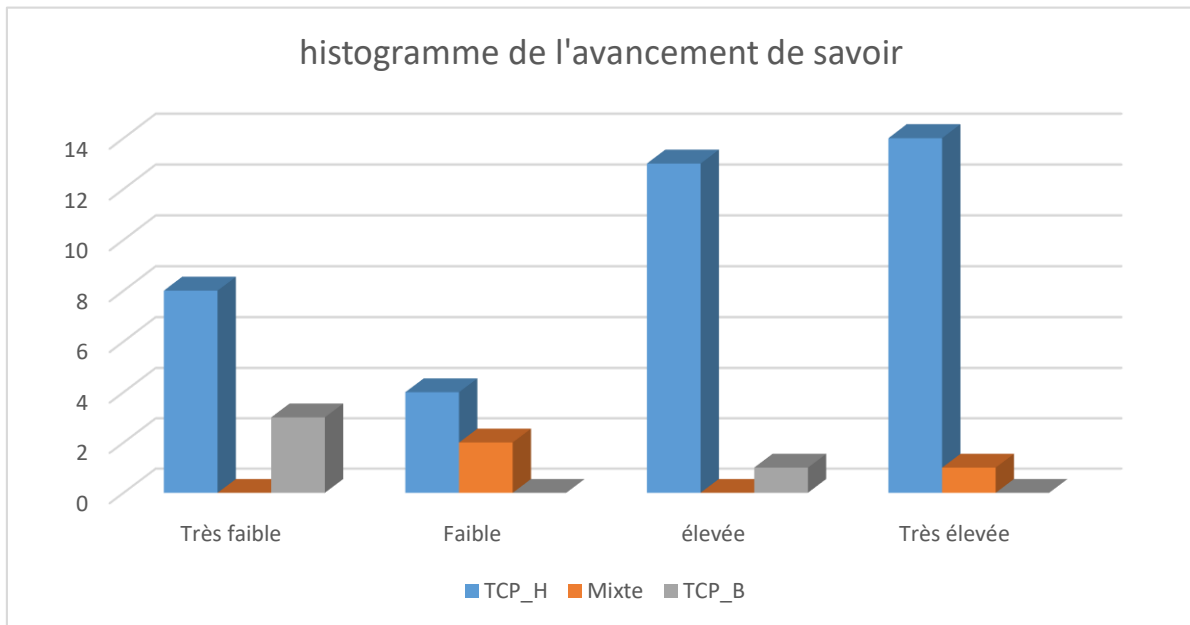


Figure 2. 9: Histogramme illustrant l'avancée du savoir

Le zoom sur le thème 3 montre que l'enseignement sur la célérité est fait. Mais comme pour les autres thèmes, c'est un enseignement de type transmissif, les expériences que l'enseignant a voulu faire n'ont abouti à aucun résultat, en effet les épisodes correspondants à ces expériences présentent une très faible densité épistémique

D'après ce qui précède, nous constatons que l'approche d'enseignement adoptée est loin d'être constructiviste puisque le professeur prend une position topogénétique haute durant pratiquement toute la séance. Dans ce cas, nous pensons que le rôle des élèves est de mémoriser le contenu du cours sans produire des interactions pour manifester leurs compréhensions ou non du contenu de leur cours.

3.2 *Deuxième séance du cours*

3.2.1 **Présentation**

Pour cette deuxième séance du cours, les élèves ont déjà assisté à la première séance où l'enseignant a évoqué l'ébranlement, le milieu de propagation et la célérité d'un ébranlement. La deuxième séance est prévue pour une durée d'une heure 30 minutes comme l'indique le chronogramme suivant :

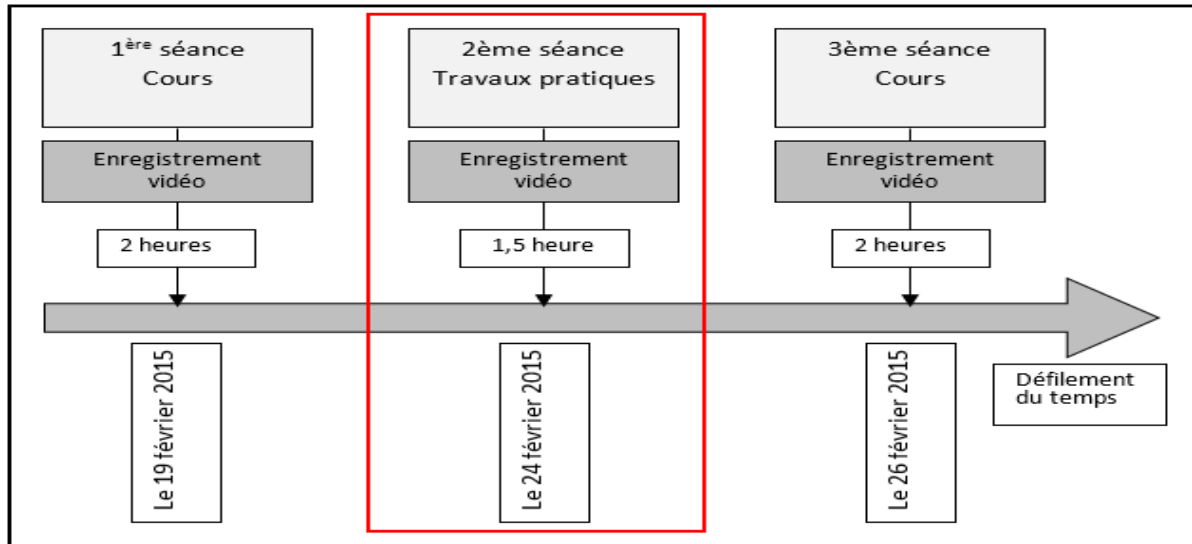


Figure 2. 10: Emplacement de la 2^{ème} séance au cours de l'enseignement ordinaire

3.2.2 Narration didactique

Les élèves entrent en classe et s'installent à leurs places. L'enseignant commence sa leçon par un résumé de ce qu'il a déjà fait avec eux. Il enchaîne cette nouvelle partie en expliquant à ses élèves l'intérêt du stroboscope. A l'aide d'un disque tournant muni d'une tache, le professeur illustre la rapidité d'un mouvement périodique et démontre ainsi la nécessité d'une étude stroboscopique. Malheureusement, le stroboscope est en panne et le professeur explique oralement le phénomène de l'immobilité apparente et celui du mouvement ralenti. Il pose ensuite une question à la classe : « quelles sont les fréquences capables d'obtenir l'immobilité apparente ? » Aucune réponse n'est fournie par les élèves. La partie suivante du cours est dédiée au principe de propagation. L'enseignant représente au tableau un repère (x ; y) et fixe deux elongations qui sont égales à l'amplitude. Il pose la question suivante : « le retard t_{éta} de vibration dépend de quoi d'après vous ? » Les élèves répondent de la position, l'enseignant prononce les débuts des mots pour garantir une réponse correcte ! L'enseignant définit ensuite ce que c'est une onde sinusoïdale progressive. Il enchaîne par l'étude expérimentale des sinusoïdes des espaces et celle du temps et cela dans un laboratoire proche de la salle. Ce sont des moments où les élèves semblent motivés car ils réagissent vis-à-vis des questions et des interprétations de leur professeur. Néanmoins, l'étude expérimentale de la sinusoïde des espaces n'a pas lieu à cause du stroboscope qui est en panne. Le professeur se contente de décrire ce qu'ils devraient observer. Les élèves retournent dans la salle de classe, un nouveau silence s'installe. L'enseignant présente alors les deux sinusoïdes temps et espaces au tableau.

Il introduit ensuite la définition de la longueur d'onde spatiale et finit par expliquer la double périodicité de l'onde. Enfin, les élèves prennent note et quittent la salle.

3.2.3 Premier niveau d'analyse : Construction du tableau d'analyse

La séance dure 1 heure et 24 minutes. En effet, c'est une séance consacrée aux travaux pratiques selon l'emploi du temps des élèves, ces derniers étant divisés en deux groupes. Nous avons enregistré et analysé la séance du premier groupe. Elle comporte une expérience qui est préparée préalablement par l'enseignant dans un laboratoire près de la salle de classe. Cette expérience nécessite l'obscurité ce qui permet, par un dispositif approprié, de visualiser le mouvement d'un point de la corde et de visualiser aussi l'aspect de la corde à l'immobilité apparente et aux mouvements ralentis par un stroboscope. Au cours de cette séance, l'enseignant a assuré l'enseignement de six thèmes. Nous présentons ci-dessous un extrait du tableau d'analyse de la séance.

Durée	Thèmes	Jeux didactique	Episodes		Avancée du savoir		Evènements remarquables
			N°	Description	Topogenèse	Densité épistémique	
0 :01 :23	Thème 1 Rappel du cours précédant Durée 1min45s	Jeu 1 Rappel Durée 1min45s	Ep.1_1 Durée 1min01s	Le prof propose de continuer la leçon déjà commencée et commence par un résumé de ce qu'ils l'ont déjà vue ou il aborde la célérité de l'ébranlement.	TCP_H	Faible	La célérité est abordée
0 :02 :24			Ep.1_2 Durée 0min08s	un élève attire l'attention du prof qu'ils ont déjà étudié un ébranlement transversale et longitudinale	TCP_B	Faible	
0 :02 :32			Ep.1_3 Durée 0min36s	le prof reprend la suite du rappel en introduisant le type d'ébranlement. Il ajoute les trois types du milieu de propagation	TCP_H	Faible	
0 :03 :08	Thème 2 la stroboscopie intérêt et principe de fonctionnement et d'utilisation Durée 23min49s	Jeu 2 Intérêt du stroboscope Durée 3min55s	Ep.2_1 Durée 0min30s	le prof débute cette leçon par l'étude d'une onde sinusoïdale entretenu, Le prof explique que pour les mouvements rapide on utilise la stroboscopie. pour déterminer leurs fréquences et leurs périodes	TCP_H	élevée	
0 :03 :38			Ep.2_2 Durée 1min43s	le prof montre un disque tournant et montre que si le mouvement est lent on peut déterminer la période et la fréquence par contre si le disque tourne à l'aide d'un moteur électrique le mouvement est rapide et on ne peut pas suivre le mouvement de la tâche d'où la nécessité du stroboscope et explique son fonctionnement à travers les éclairés	TCP_H	élevée	

Tableau 2. 2: Extrait du tableau d'analyse de la deuxième séance d'enseignement ordinaire des ondes mécaniques

3.2.4 Deuxième niveau d'analyse : Analyse des thèmes

Nous avons découpé la séance en six thèmes comme suit :

- Thème 1 : Rappel du cours précédant
- Thème 2 : La stroboscopie intérêt et principe de fonctionnement et d'utilisation
- Thème 3 : Principe de propagation
- Thème 4 : Définition d'une onde sinusoïdale progressive
- Thème 5 : L'étude expérimentale des sinusoïdes des espaces et de temps
- Thème 6 : Définition des périodes spatiales et temporelle

L'histogramme suivant donne une idée sur le pourcentage en durée d'enseignement de chaque thème. Nous pouvons tirer deux constats importants. Le thème de la stroboscopie prend une durée considérable, 28.6% du temps didactique de la séance. Bien qu'elle ne figure pas parmi les objectifs institutionnels, il s'agit d'une technique indispensable à l'étude des mouvements rapides tels que les ondes. Elle permet également de visualiser l'aspect d'une corde affectée par une onde sinusoïdale entretenue. Par contre, pour définir une onde, l'enseignant ne consacre qu'une petite durée, 8,8% du temps, par rapport aux autres thèmes visés par cette séance et qui présente pourtant l'un des objectifs d'enseignement.

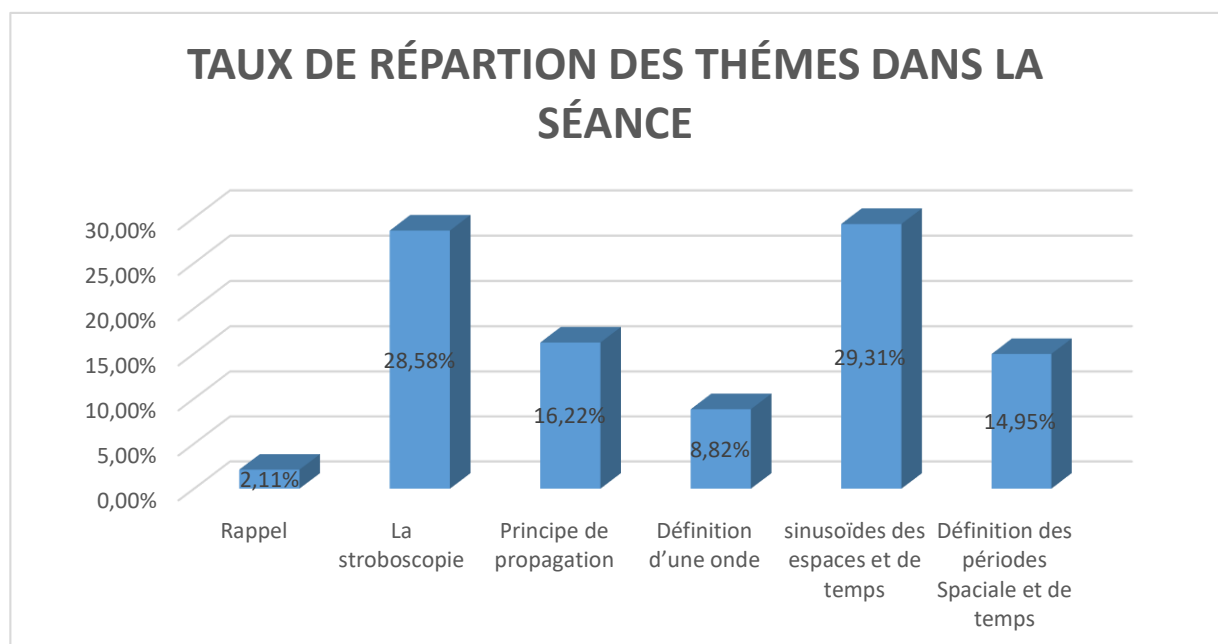


Figure 2. 11: Taux de répartition des thèmes dans la deuxième séance

3.2.5 Troisième niveau d'analyse : Analyse en jeux didactiques

Puisque nous adoptons une analyse de plus en plus fine, nous traitons les jeux d'apprentissage relativement à leurs thèmes d'existence.

3.2.5.1 *Thème rappel du cours précédant*

Ce thème dure 1 minute 45 secondes. Il est constitué d'un seul jeu, le jeu 1 qui est formé à son tour de trois épisodes, durant lesquels l'enseignant fait un rappel bref du contenu du cours de la séance précédente. Nous pouvons tirer comme événement remarquable que l'enseignant évoque la célérité de l'ébranlement sur lequel nous avons focalisé dans notre analyse de la première séance car la célérité est en lien avec la conception hybride capitale.

3.2.5.2 *Thème la stroboscopie intérêt et principe de fonctionnement et d'utilisation*

Ce thème comporte trois jeux qui durent 23 minutes 49 secondes. Il ne fait pas partie des objectifs d'enseignement mais il est indispensable pour l'étude des ondes mécaniques. Les jeux sont les suivants :

Jeu 2 : Intérêt du stroboscope. Durée 0min30s

Jeu 3 : Principe de fonctionnement du stroboscope. Durée 4min46s

Jeu 4 : Obtention des conditions de la mobilité apparente et du mouvement ralenti. Durée 14min51s.

Nous constatons que durant tout ce thème, qui est composé de 12 épisodes, la topogénèse est toujours du côté de l'enseignant. Notons que ces épisodes présentent des densités épistémiques variées dont trois de ces 12 épisodes sont de densité épistémique très élevée.

3.2.5.3 *Thème principe de propagation*

L'enseignement de ce thème, d'une durée de 13 minutes 27 secondes, constitue l'un des objectifs institutionnels. Il est indispensable pour l'étude théorique de l'onde. Notons qu'à partir de ce principe de propagation, l'enseignant aborde le formalisme mathématique de l'onde. Ce thème est constitué des trois jeux suivants :

Jeu 5 : Repérage d'un point de la corde. Durée 2min17s

Jeu 6 : Décalage horaire entre la source et un point de la corde. Durée 3min35s

Jeu 7 : Principe de propagation. Durée 7min35s

Ce thème comporte en total un ensemble de 15 épisodes, dont 14 où la topogénèse est du côté du professeur et un seul où la topogénèse est mixte et où la densité est faible épistémiquement. Par contre, six de ces 14 épisodes présentent une densité épistémique très élevée. Une fois de plus, nous constatons que les élèves ne participent pas vraiment à la construction de leurs connaissances.

3.2.5.4 *Thème définition d'une onde sinusoïdale progressive*

La durée de ce thème est de 7 minutes 19 secondes. Il est constitué de deux jeux qui sont :

Jeu 8 : Définition d'une onde. Durée 2min18s

Jeu 9 : Notion d'onde progressive. Durée 5min1s

Chaque jeu est formé de deux épisodes où la topogénèse est toujours du côté du professeur. Chaque jeu comporte chacun un épisode qui présente une densité épistémique élevée et un autre très élevée. Nous constatons que pour définir une onde l'enseignant a mis seulement 1 minute 3 secondes.

3.2.5.5 *Thème l'étude expérimentale des sinusoïdes des espaces et de temps : effet zoom.*

Nous accordons plus de soin et plus de détail d'analyse à ce thème qui présente beaucoup d'importance pour notre recherche. En effet, il s'intéresse aux sinusoïdes des espaces et du déplacement du front d'onde au cours de la propagation de l'onde le long de la corde. A ce niveau, nous pensons que les élèves développent la conception de l'onde serpente (Maurines, 2003).

L'enseignement de ce thème dure 24 minutes 12 secondes. Il est illustré par une expérience qui permet de visualiser la sinusoïde de temps par un dispositif adéquat. Néanmoins, la visualisation de la sinusoïde des espaces est impossible à cause de la défaillance du stroboscope comme le déclare l'enseignant à ses élèves. Nous présentons d'abord le synopsis complet de ce thème qui est découpé en trois jeux et nous le détaillons ultérieurement.

Première partie : analyse préalable
Chapitre 2 : Analyse de l'enseignement ordinaire et de ses effets

Durée	Thèmes	Jeux didactique	Episodes		Avancée du savoir		Evènements remarquables
			N°	Description	Topogenèse	Densité épistémique	
0:47:36	Thème 5 : L'étude expérimentale des sinusoides des espaces et de temps Durée 24min12s	Jeu 10 Etude de la Sinusoïde de temps Durée 11min13s	Ep.10_1 Durée 0min08s	le prof déclare qu'il va s'intéresser à une onde se propageant le long de la corde élastique	TCP_H	Très faible	
0:47:44			Ep.10_2 Durée 1min18s	il décrit le dispositif (corde, vibreur et du coton pour éviter la réflexion) il décrit le schéma représenter sur les fiche qui les a distribué	TCP_H	élevée	
0:49:02			Ep.10_3 Durée 1min43s	il déclare qu'on va s'intéresser au mouvement d'un point M quelconque	TCP_H	élevée	
0:50:45			Ep.10_4 Durée 4min30s	l'expérience est installé miroir tournant source de vibration source lumineuse et un écran sur l'écran les élèves observe une sinusoïde il explique que c'est le mouvement d'un seul point de la corde le prof demande a un élève d'observer la corde en mouvement l'élève dit qu'il voit une bande floue qui est correcte il e il ajuste de nouveau la position du miroir tournant	TCP_B	Très élevée	Les élèves se déplacent vers un laboratoire à côté de la salle qui est équipé est obscure
:55:15			Ep.10_5 Durée 2min14s	les élèves arrivent à observer la sinusoïde de temps un silence s'installe qui montre leurs intérêt à l'expérience	TCP_B	Très élevée	le prof règle la lumière pour mieux observer le phénomène
:57:29			Ep.10_6 Durée 0min34s	Le prof pose la question qu'est-ce qu'elle représente... il répond que la courbe traduit le mouvement d'un point de la corde	TCP_H	Très élevé	
0:58:03			Ep.10_7 Durée 0min05s	il pose la question qu'elle est la nature de mouvement du point. C'est un mouvement rectiligne.	TCP_H	élevée	Topaze
0:58:08			Ep.10_8 Durée 0min41s	les élèves répondent au même temps mouvement rectiligne sinusoïdale	TCP_H	Faible	
0:58:49		Jeu 11	Ep.11_1 Durée 1min01s	le prof retourne à l'aspect de la corde en lumière ordinaire les élèves répondent ensemble c'est une ligne floue	TCP_B	Elevée	

Première partie : analyse préalable
Chapitre 2 : Analyse de l'enseignement ordinaire et de ses effets

0:59:50		Etude de la sinusoïde des espaces	Ep.11_2 Durée 1min03s	le prof dit c'est vrai que c'est une bandelette floue des positions extrêmes de tous les points de la corde	TCP_H	Elevée	
1:00:53		Durée 7min26s	Ep.11_3 Durée 1min38s	explique la sinusoïde des espace qu'on réalité on peut l'observer par le stroboscope qui est en panne il explique qu'on peut observer l'immobilité apparente si $T_e = KT$	TCP_H	Elevée	
1:02:31			Ep.11_4 Durée 1min02s	il explique que l'onde progresse la déformation progresse donc on peut obtenir plusieurs aspect de la corde donc à partir de l'aspect de la corde on peut déterminer une période qu'on l'appelle périodes spatial	TCP_H	Très élevée	
1:03:33			Ep.11_5 Durée 2min10s	le prof dicte l'interprétation de la première expérience déjà observées il insiste que tous les point de la corde vibre sinusoïdalement	TCP_H	Faible	Les élèves de regagner leurs places
1:05:43			Ep.11_6 Durée 0min32s	tous les points de la corde reproduisent le même mouvement périodique de la source	TCP_H	Elevée	
1:06:15		Jeu 12 Equation horaire	Ep.12_1 Durée 0min54s	la période de vibration est la même que la source appelé période temporelle	TCP_H	Elevée	
1:07:09		générale de la source et d'un point M de la corde	Ep.12_2 Durée 1min45s	il écrit au tableau l'équation de mouvement de la source ainsi que celle du point M il signale qu'il on la même fréquence et amplitude et ils diffèrent par les phases initiales	TCP_H	Elevée	
1:08:54		Durée 5min39s	Ep.12_3 Durée 0min55s	l'onde se propage sinusoïdalement est présente plusieurs aspect différente	TCP_H	Elevée	
1:09:49			Ep.12_4 Durée 1min25s	il dicte en suite l'aspect de la corde en lumière ordinaire est une bandelette floue	TCP_H	Faible	
1:11:14			Ep.12_5 Durée 0min40s	A l'immobilité apparente la corde parait sous forme d'une sinusoïde	TCP_H	Elevée	

Tableau 2. 3: Partie du tableau d'analyse relative au thème 5 : l'étude expérimentale de sinusoïde des espaces et de temps

3.2.5.5.1 Jeu 10 : Etude de la sinusoïde de temps

Ce jeu dure 11 minutes 13 secondes. Il renferme 8 épisodes dont la topogénèse est du côté professeur sauf pour deux épisodes du côté élèves. C'est la première fois que des épisodes apparaissent du côté élèves et qu'ils sont de topogénèse très élevée. Il s'agit des épisodes Ep.10_4 et Ep.10_5 qui durent 5 minutes 4 secondes. Au cours de ceux-ci, les élèves visualisent la sinusoïde de temps dans un laboratoire équipé d'un dispositif expérimental formé d'un miroir tournant, d'une source de vibration, de la corde, du coton pour éviter la réflexion de l'onde, d'une source lumineuse et d'un écran. Sur ce dernier, les élèves observent une sinusoïde et

l'enseignant explique que c'est le mouvement d'un seul point de la corde affecté par une onde progressive. L'image suivante illustre ce moment.



Figure 2. 12: Dispositif de visualisation de sinusoïde des temps

3.2.5.5.2 Jeu 11 : Etude de la sinusoïde des espaces

Ce jeu qui dure 7 minutes 26 secondes renferme six épisodes, dont cinq de topogénèse du côté professeur et un seul épisode dont la topogénèse est du côté élèves et de densité épistémique élevée. Cet épisode consiste à décrire l'aspect de la corde en lumière ordinaire qui paraît sous forme d'une bandelette floue. Au cours des autres épisodes, l'enseignant explique les cas de l'immobilité apparente et du mouvement ralenti de la corde, dont la visualisation nécessite un stroboscope. Dans ce cas, et en l'absence de toute autre alternative, l'enseignant choisit de laisser ses élèves imaginer ces sinusoïdes.

3.2.5.5.3 Jeu 12 : Equation générale de la source et d'un point de la corde

Au cours de ce jeu, qui dure 5 minutes 39 secondes, l'enseignant commence par modéliser le phénomène ondulatoire, puis il introduit l'aspect sinusoïdal de l'onde. C'est un jeu qui comporte cinq épisodes où la topogénèse est du côté du professeur et de densité épistémique entre élevée et faible.

3.2.5.5.4 Topogénèse et densité épistémique

Ce thème comporte en totalité 19 épisodes, dont 17 où la topogénèse est du côté enseignant et deux seulement du côté des élèves. Ces deux derniers sont de densité épistémique très élevée, ce que nous pouvons expliquer par l'existence d'une expérience qui a permis de

visualiser la sinusoïde de temps. Par ailleurs, nous constatons, d'après le tableau suivant, qu'au cours de l'expérimentation l'avancée du savoir commence avec une très faible densité épistémique, puis la densité augmente au fil des épisodes pour atteindre un maximum lorsque la topogénèse est du côté des élèves. Puis la densité épistémique décroît en même temps que la topogénèse se déplace du côté de l'enseignant. Nous constatons que le long du jeu numéro 10 la densité épistémique commence par être très faible, elle augmente en gardant une topogénèse du côté du professeur et lorsque la densité épistémique devient très élevée, les élèves prennent une position topogénétique élevée et ensuite la densité épistémique décroît. Ce que nous ne constatons pas pour les autres jeux.

Densité épistémique	Très élevée				X	X	x						x							
	Elevée		x	x				x		x	x	x			x	x	x	x	x	
	Faible							x						x					x	
	Très faible	x																		
Episode		1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5
Jeu		Jeu 10								Jeu 11						Jeu 12				

Topogénèse haute (du cote de l'enseignant)

Topogénèse basse (du cote des élèves)

Figure 2. 13: Tableau illustrant l'avancée du savoir du thème 5

3.2.5.6 *Thème définition des périodes spatiales et temporelle : effet zoom*

Ce thème dure 12 minutes 24 secondes. C'est le fruit du thème précédent, où l'enseignant a formulé les définitions des périodes spatiales et temporelles, a représenté les sinusoïdes de temps et d'espace et aussi dégagé la double périodicité de l'onde. Nous découpons ce thème en trois jeux que nous allons analyser en nous appuyant sur le synopsis suivant :

Première partie : analyse préalable
Chapitre 2 : Analyse de l'enseignement ordinaire et de ses effets

Durée	Thèmes	Jeux didactique	Episodes		Avancée du savoir		Evènements remarquables
			N°	Description	Topogenèse	Densité épistémique	
1:11:54	Thème 6 définition des périodes spatiales et temporelle Durée 12min24s	Jeu 13 la double périodicité de l'onde Durée 5min16s	Ep.13_1 Durée 0min46s	Il initialise en suite la notion du période spatial et il demande aux élèves de formuler une définition	TCP_H	Elevée	
1:12:40			Ep.13_2 Durée 0min08s	une élève répond « C'est la distance qui sépare deux périodes »	TCP_B	Très faible	
1:12:48			Ep.13_3 Durée 0min40s	non le prof intervient pour annoncer la définition correcte il continu à dicter.	TCP_H	Elevée	
1:13:28			Ep.13_4 Durée 3min42s	en s'aidant d'un schéma au tableau il ajoute qu'en réalité le mouvement de la source décrit un arc de cercle et montre ça avec un stylo mais on peut le considérer comme segment car la trajectoire est très petite alors quand la source décrit une période T l'onde parcourt période spatial lambda et donne ainsi la formule $\lambda = c \cdot T$ est cela avec l'analogie $v = x/t$ alors $x = v \cdot t$	TCP_H	Très élevée	Les deux sinusoides des espaces de $x_1 = \lambda$ et de $x_2 = 2\lambda$ ne présentent pas la conception de l'onde serpente
1:17:10		Jeu 14 Représentation de deux sinusoides spatiales à des instants très proches Durée 5min00s	Ep.14_1 Durée 5min00s	il passe à interprété l'aspect de la corde en lumière stroboscopique en mouvement ralenti en schématisant deux sinusoides spatiaux successives à deux instants très proche	TCP_H	Très élevée	Les deux sinusoides demandées lors du pré-test et post test
1:22:10		Jeu 15 conclusion et définitions de T et λ Durée 2min08s	Ep.15_1 Durée 2min08s	il conclut-il dicte que l'onde est caractérisé par deux périodes lambda et T et il dicte la conclusion à ces élèves il achevé la leçon en leurs disant qu'il reste que l'étude théorique	TCP_H	élevée	
1:24:18	Les élèves rangent leurs affaires et quittent la salle						

Tableau 2. 4: Tableau d'analyse du thème 6 : définitions des périodes spatiales et temporelles

3.2.5.6.1 Jeu 13 : La double périodicité de l'onde

La durée de ce jeu est de 5 minutes16 secondes. Il comporte 4 épisodes dont trois sont de topogénèse du côté du professeur et de densité épistémique entre élevée et très élevée ; l'autre épisode présentant une topogénèse du côté élèves mais de densité épistémiquement très faible. L'épisode Ep.13_4 semble particulièrement intéressant car l'enseignant veut expliquer le mouvement de la source en relation avec la propagation de l'onde le long de la corde et cela en s'aidant d'un schéma au tableau. Il ajoute qu'en réalité le mouvement de la source décrit un arc de cercle en le montrant avec un stylo mais on peut le considérer comme un segment car la trajectoire est très petite alors quand la source décrit une période T , l'onde parcourt période spatial λ . Le professeur représente alors les courbes suivantes :

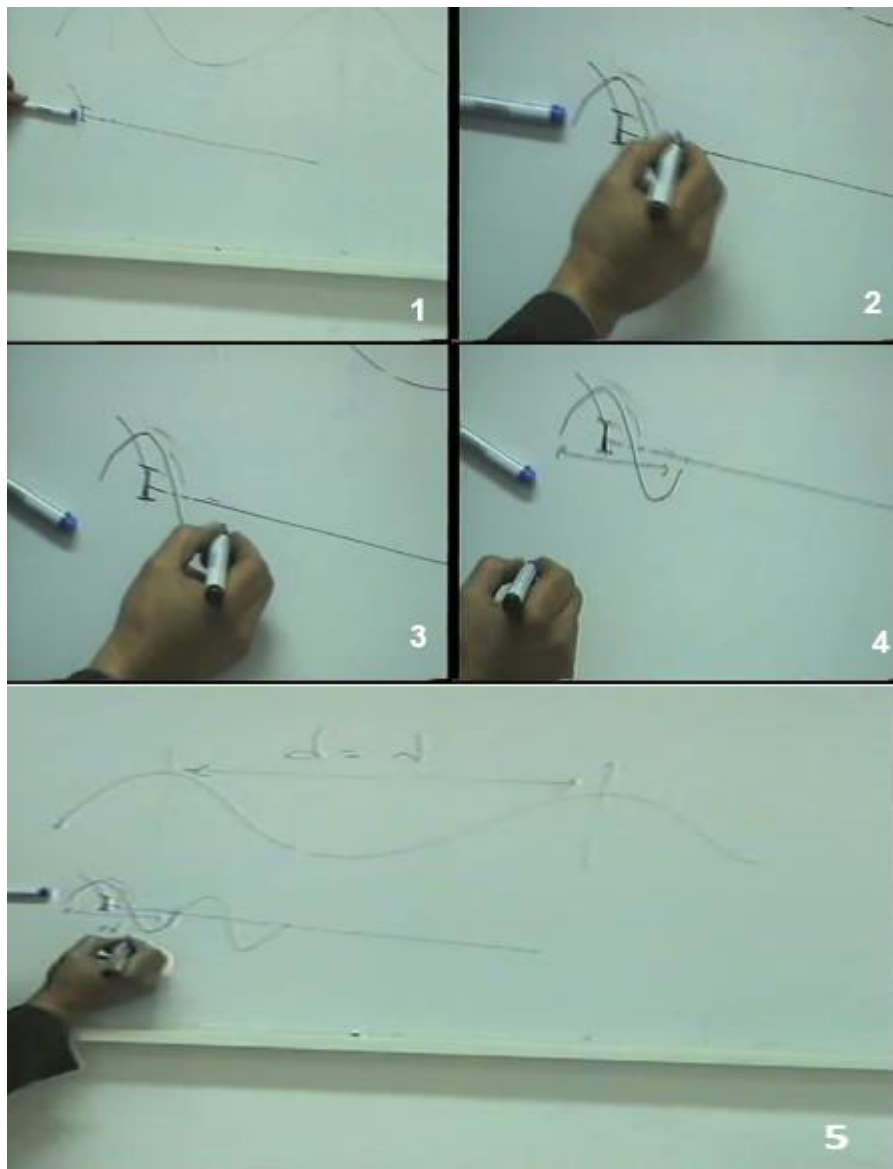


Figure 2. 14: Représentation de la sinusoïde des espaces par l'enseignant

Les captures d'images 4 et 5 montrent que l'enseignant représente ces deux sinusoides des espaces en tenant compte du mouvement du front d'onde qu'il a choisi comme creux et reste creux au cours du mouvement.

3.2.5.6.2 Jeu 14 : Représentation de deux sinusoides des espaces à deux instants très proches

Ce jeu, qui dure 5 minutes, est constitué d'un seul épisode de topogénèse du côté du professeur et de densité épistémique très élevée. Au cours de cet épisode, l'enseignant représente sur le tableau deux sinusoides des espaces pour deux instants très proches et sur le même repère d'axes.



Figure 2. 15: Deux sinusoides des espaces à deux instants très proches

Pour nous, cette représentation des deux sinusoides est importante, car la même représentation fait partie des activités des élèves lors de l'enseignement de la séance des travaux pratiques prévue sur simulation. Ces deux sinusoides seront aussi l'objet d'une des questions du pré-test après cette séquence d'enseignement ordinaire sur les ondes mécaniques, et seront aussi l'objet d'une question du post-test après enseignement de la séance sur simulation prévu.

Notons que l'enseignant n'a encore aucune idée sur le scénario pédagogique que nous allons lui proposer et pas d'informations sur les contenus des activités des élèves à exécuter au cours du travail sur simulation des ondes mécaniques.

3.2.5.6.3 Jeu 15 : Conclusion et définitions de T et λ

Le découpage de ce jeu donne un seul épisode de 2 minutes 8 secondes où l'enseignant clôture cette séance en dictant les définitions de T et λ , et en annonçant qu'il va traiter l'étude théorique d'une onde mécanique le long d'une corde entretenue par une source d'onde.

3.2.5.7 Topogénèse et densité épistémique

Ce que nous pouvons tirer du tableau qui suit de l'avancée du savoir du thème 6, c'est que la topogénèse est pratiquement toujours du côté de l'enseignant, sauf pour un épisode où elle se situe du côté des élèves. Néanmoins, la densité épistémique de cet épisode est très faible. Alors bien que ce thème soit dense épistémiquement, il s'avère qu'il est enseigné sans interaction avec les élèves.

Densité épistémique	Très élevée				x	x	
	Elevée	x		x			x
	Faible						
	Très faible		x				
Episode		1	2	3	4	1	1
Jeu		Jeu 13				Jeu 14	Jeu 15

Topogénèse haute (du cote de l'enseignant)
 Topogénèse basse (du cote des élèves)

Figure 2. 16: Tableau illustrant l'avancée du savoir du thème 6

3.2.6 Conclusion

Cette deuxième séance est consacrée à l'étude de l'onde mécanique le long d'une corde. L'enseignant définit ce qu'est une onde et, à travers une expérience, les élèves visualisent sur un écran la sinusoïde de temps du mouvement d'un point de la corde. Faute de matériel, les élèves ne peuvent pas visualiser une sinusoïde des espaces. L'enseignant donne la condition de son obtention par stroboscope et à l'immobilité apparente. Par contre, il schématise sur le tableau

Du point de vue institutionnel, l'enseignant assure un cours où il aborde les objectifs visés par cette séance.

Du point de vue didactique, le tableau suivant, qui illustre l'avancée du savoir au cours de la séance, montre que la topogénèse est à 89,8% des épisodes du côté de l'enseignant et du

côté des élèves à 8,5%. La méthode d'enseignement adoptée par l'enseignant ne peut donc pas être classée dans un cadre constructiviste. Nous pensons que les élèves n'ont pas participé à la construction de leurs connaissances, bien que la densité épistémique dans la plupart des épisodes soit très élevée.

Topogenèse Densité épistémique	Topogenèse cote prof Haute	Topogenèse mixte	Topogenèse coté prof basse
Très élevée	15	0	2
Elevée	22	0	1
Faible	14	1	1
Très faible	2	0	1
Bilan	53	1	5
Pourcentage	89,83%	1,69%	8,47%

Figure 2. 17: Tableau illustrant l'avancée du savoir au cours de la deuxième séance

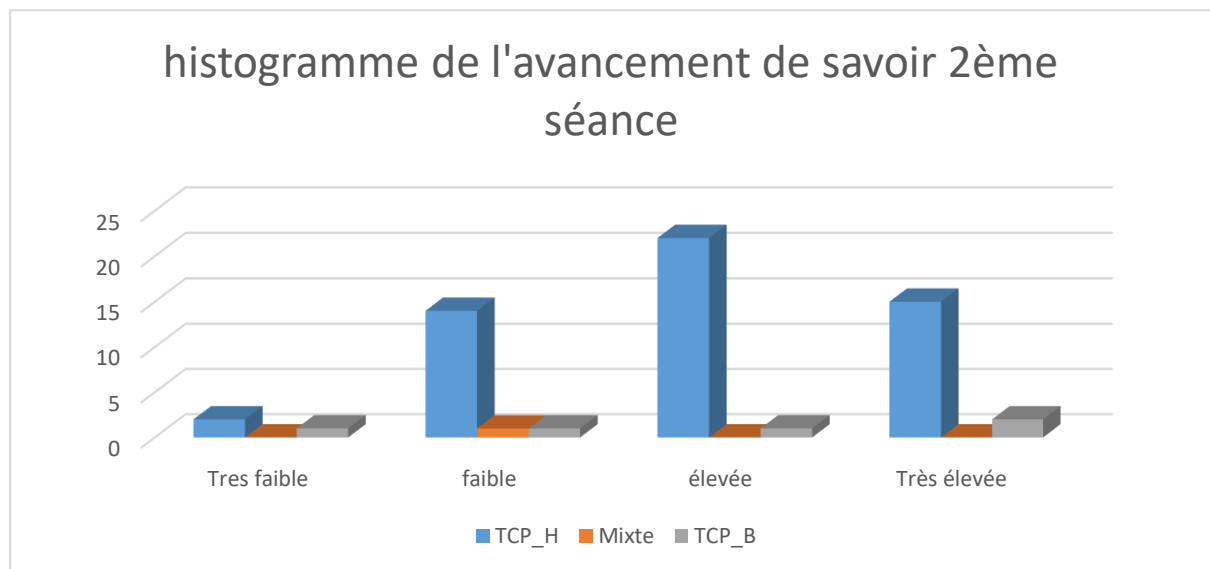


Figure 2. 18: Histogramme illustrant l'avancée du savoir au cours de la deuxième séance du cours

Pour finir avec cette conclusion, revenons sur le jeu 10 que nous jugeons très intéressant. En effet, l'enseignant commence ce jeu avec la plus basse densité épistémique. Mais au fur et à mesure, la densité épistémique augmente, alors que le professeur adopte une position topogénétique haute, jusqu'au pic de densité épistémique où s'opère un glissement topogénétique vers les élèves, produisant ainsi une dévolution. Un autre glissement topogénétique se produit vers l'enseignant au même moment où la densité épistémique diminue. Nous l'expliquons par le fait qu'il y a institutionnalisation du savoir en jeu. En effet, le tableau suivant montre que les épisodes 4 et 5 sont de densité épistémique très élevée, alors qu'en même temps, la topogénèse est du côté des élèves. Ces épisodes occupent le milieu du jeu 10.

Figure 2. 19: Illustration d'un jeu gagné

Densité épistémique	Très élevée				X	X	x		
	Elevée		x	x				x	
	Faible								x
	Très faible	x							
Episode		1	2	3	4	5	6	7	8
Jeu		Jeu 10							

 Topogenèse haute (du cote de l'enseignant)
 Topogenèse basse (du cote des élèves)

3.3 Troisième séance du cours

3.3.1 Présentation

C'est la troisième et la dernière séance du cours que nous avons enregistrée. Il s'agit d'une séance de deux heures, consacrée à l'étude théorique des sinusoides des espaces et de temps, l'étude du déphasage entre un point de la corde et la source. Le chronogramme suivant donne l'emplacement de cette séance que nous avons encerclé en rouge dans le corpus de la recherche.

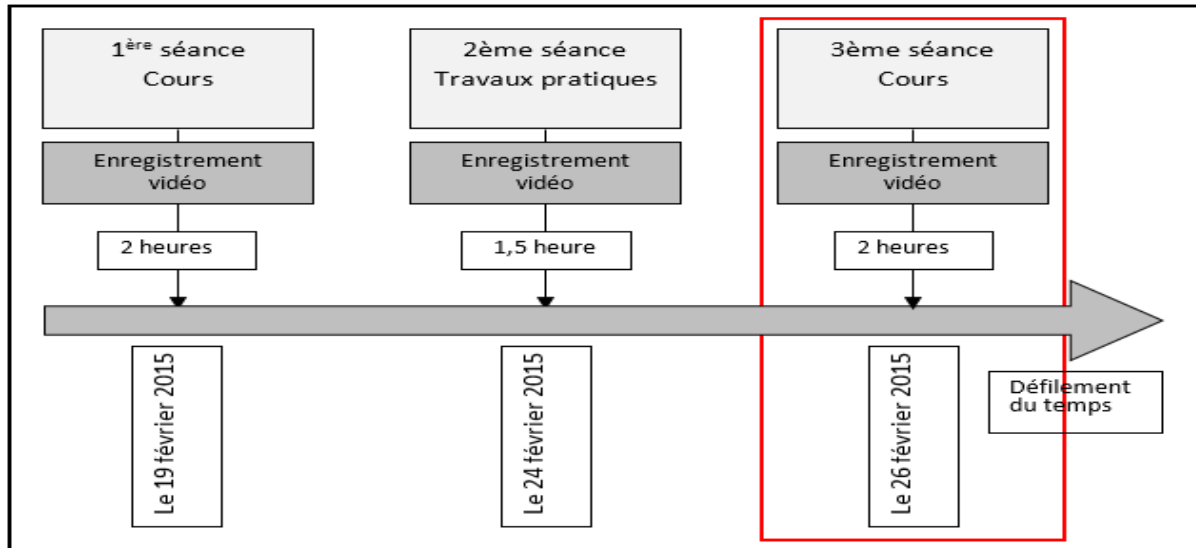


Figure 2. 20: Emplacement de la 3^{ème} séance au cours de l'enseignement ordinaire

3.3.2 Narration didactique

Le professeur commence à écrire le titre de la leçon au tableau « propagation d'une onde sinusoïdale le long d'une corde élastique : étude théorique ». Il débute la leçon par un court rappel sur les caractéristiques d'une onde. Ensuite, il écrit le principe de propagation pour un point M et donne l'équation horaire de la source et se lance dans l'étude théorique jusqu'à ce qu'il atteigne l'équation $y(t, x)$. Le professeur explique à ses élèves que cette équation est à double périodicité, il pose des questions et il répond en même temps, vu qu'il n'obtient pas de réponse des élèves. Il se lance de nouveau dans l'étude de la sinusoïde de temps en fixant un point M_1 d'abscisse x . Pour animer sa leçon, l'enseignant pose la question : est-ce que l'équation obtenue en fixant x est valable quel que soit t ? Mais n'obtenant aucune réponse, il répète la même question, puis une troisième fois mais d'une autre manière : est-ce que le mouvement du point M débute au même instant que la source ? Une élève répond par non. Le professeur explique alors que le mouvement du point M débute après un retard θ par rapport à la source. Le professeur prend une corde pour montrer qu'avant le retard θ le point M est repos. Enfin, l'enseignant trace la sinusoïde de temps correspondante de la source. En s'appuyant sur la phase de la source, il choisit la période T comme unité de l'axe de temps et sur la même courbe, il trace une sinusoïde de temps d'un point M d'abscisse x avec $\theta = T + (1/4) T$.

En deuxième étape, Le professeur passe à l'étude théorique de la sinusoïde des espaces. Il fixe alors le temps, il reprend de nouveau l'équation $y(t, x)$, et il fixe le temps. Il se lance alors dans la démonstration avec parfois l'aide de ses élèves et développe l'équation en parlant au même temps et la plupart des élèves prennent note de ce qui est au tableau sans réagir. Le

professeur pose la question : quand est-ce-que la corde est au repos ? N'obtenant aucune réponse, il explique que la corde est déformée partiellement et que l'onde atteint $x_1 = V \cdot t_1$. Le professeur suppose que la corde est déformée partiellement entre O et x_1 . Il pose de nouveau la même question : quant-est-ce que la corde est repos ? Il enchaine, sans attendre de réponse, que x est compris entre x_1 et L et il trace une sinusoïde des espaces. Le professeur passe à une autre partie du cours, l'étude du déphasage entre la source et un point de la corde. Il prend la corde pour expliquer la notion de déphasage. Ainsi l'enseignant fait l'étude des déphasages particuliers en phase, en opposition de phase et en quadrature de phase. Enfin, l'enseignant passe à la dernière étape de ce cours qui consiste à résoudre un exercice sur les ondes.

3.3.3 Premier niveau d'analyse : Construction du tableau d'analyse

Cette séance a duré une heure 53 minutes, en réalité une séance de cours prévue pour deux heures. L'enseignant a consacré une heure pour l'étude du formalisme de l'onde le long d'une corde où il a fait pratiquement toute l'étude théorique nécessaire selon le programme officiel du ministère de l'éducation tunisienne. Ensuite, l'enseignant a consacré le reste du temps à la résolution d'un exercice d'application qui touche plusieurs thèmes déjà étudiés sur les ondes au cours de ces trois séances de cours. La figure suivante présente un extrait du tableau d'analyse de la séance.

Synopsis 3^{ème} séance du cours

Durée	Thèmes	Jeux didactique	Episodes		Avancée du savoir		Evènements remarquables
			N°	Description	Topogénèse	Densité épistémique	
0:00:24	Theme1 application du principe de propagation Durée 12min 11s	Jeu 1 Rappel Durée 5min16s	Ep.1_1 Durée 0min24s	Le prof commence à écrire le titre de la leçon au tableau "propagation d'une onde sinusoïdale le long d'une corde élastique : étude théorique"	TCP_H	Très élevée	
0:01:39			Ep.1_2 Durée 1min15s	il débute par l'équation horaire du mouvement d'un point M, le prof représente sur le tableau un repère orthonormé tel que l'axe des x représente la corde	TCP_H	Très élevée	
0:04:27			Ep.1_3 Durée 2min48s	le prof donne la longueur de la corde L et l'abscisse du point M	TCP_H	élevée	
0:05:40			Ep.1_4 Durée 1min13s	le prof pose par la suite de quoi est caractérisée une onde ? Aucune réponse des élèves mais lorsqu'il commence par dire une période une élève continu temporelle et spatial le prof se contente par cette réponse	TCP_H	Faible	
0:06:21		Jeu 2 2quation à double variable	Ep.2_1 Durée 41s	et il passe au principe de propagation, il écrit le principe pour un point M et donne l'équation horaire de la source et se lance dans l'étude théorique pour déterminer l'équation $y(t,x)$	TCP_H	Très élevée	

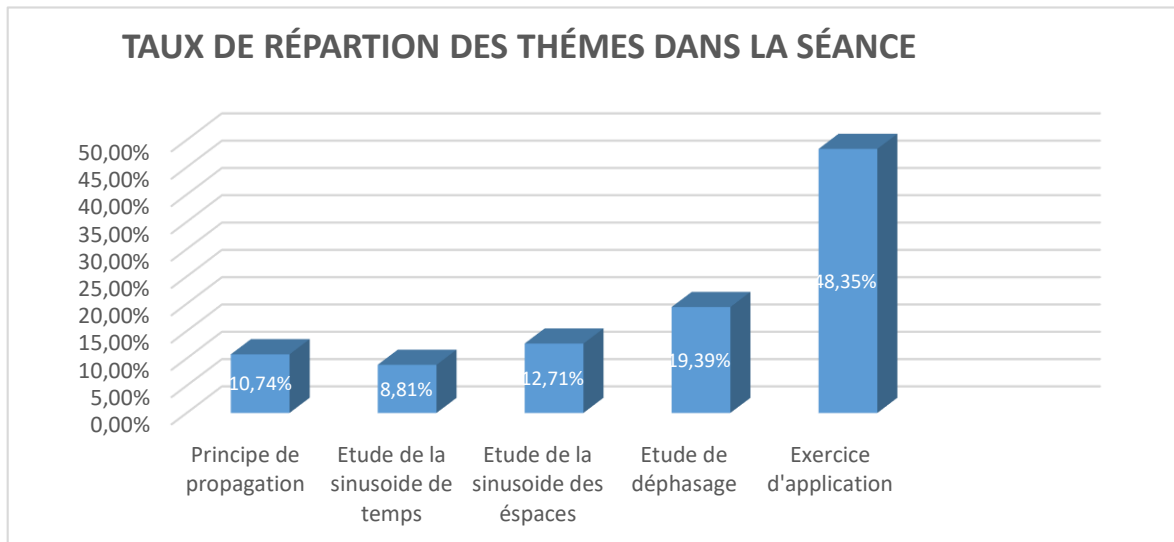


Tableau 2. 5: Extrait du tableau d'analyse de la troisième séance d'enseignement ordinaire des ondes mécaniques

3.3.4 Deuxième niveau d'analyse : Analyse des thèmes

Le découpage de cette séance a permis de localiser cinq thèmes. Ces thèmes sont repartis comme suit :

- Thème 1 : Application du principe de propagation
- Thème 2 : Etude de la sinusoïde de temps
- Thème 3 : Etude de la sinusoïde des espaces
- Thème 4 : Etude du déphasage entre la source et un point de la corde
- Thème 5 : Résolution d'un exercice d'application.

L'histogramme suivant donne les pourcentages en durée d'enseignement des différents thèmes. Nous constatons que l'étude théorique de la sinusoïde du temps n'a occupé que 8,81% de la durée globale de la séance alors que nous pensons que l'onde est principalement un phénomène sinusoïdal et que la fonction sinusoïdale de temps est le fondement de toute étude théorique sur les ondes. Par contre, le temps dédié à la résolution de l'exercice est de 48.35% de la durée de la séance. Nous pensons finalement que la répartition en durée de temps des différents thèmes n'est pas équilibrée.

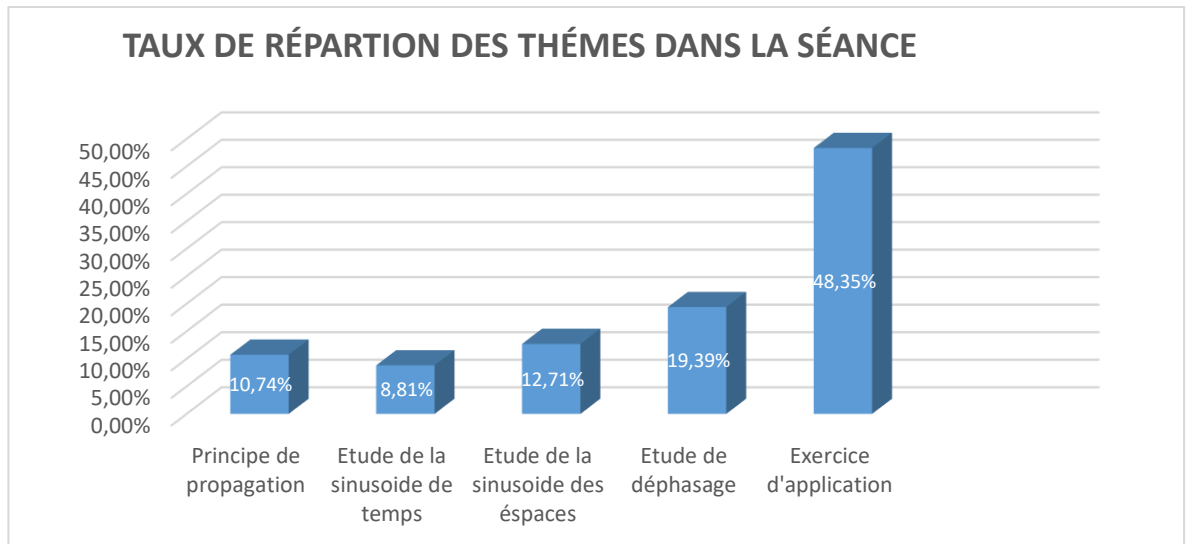


Figure 2. 21: Taux de répartition des thèmes dans la troisième séance

3.3.5 Troisième niveau d'analyse : Analyse en jeux didactique

Rappelons que nous analysons les jeux en gardant leurs positions dans leurs thèmes correspondant.

3.3.5.1 *Thème application du principe de propagation*

Le premier thème de cette séance dure 12 minutes 11 secondes, au cours duquel l'enseignant fait un court rappel sur le repérage d'un point quelconque sur la corde et sur la double périodicité de l'onde. Le professeur aborde le formalisme et se lance ainsi dans l'étude théorique en partant du principe de propagation pour atteindre la fonction à double variable spatial x et temporelle t :

$$y(t, x) = a. \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{\lambda}x + \varphi_s\right)$$

a : Amplitude

T : période temporelle

λ : période spatial c'est la longueur d'onde

φ_s : phase initiale de la source

Les jeux de ce thème sont comme suit :

Jeu 1 : Rappel. Durée 5 min 16 s

Jeu 2 : Equation à double variable. Durée 6 min 55 s

Le découpage de ce thème donne 8 épisodes dont 7 sont de topogénèse du côté du professeur. Ils ont une densité épistémique qui varie de faible à très élevée et un seul épisode, dont la densité épistémique est très faible, montrant une topogénèse du côté des élèves.

3.3.5.2 *Thème étude de la sinusoïde de temps*

Ce thème dure 10 minutes au cours duquel l'enseignant fixe la variable de l'espace x . Il se lance dans un développement théorique d'une fonction sinusoïdale du temps qui traduit le mouvement d'un seul point de la corde. Il trace enfin au tableau, en choisissant $\varphi_s=0$ rad, une sinusoïde du temps d'un point M d'abscisse x . Et à partir de cette dernière courbe, il trace sur le même repère d'axe une deuxième sinusoïde du temps qui traduit le mouvement de la source et cela en s'appuyant sur le principe de propagation. Les jeux sont les suivants :

Jeu 3 : Domaine temporel de validité physique de l'équation horaire $y_M(t)$. 6 min 39s.

Jeu 4 : Courbe $y_M(t)$. Durée 3 min 21 s

Ce thème est constitué en globalité de 11 épisodes, dont deux, de densité épistémique élevée, sont de topogénèse du côté de l'élève. Les autres épisodes sont du côté du professeur avec un seul épisode de densité épistémique faible, le reste étant entre élevée et très élevée.

3.3.5.3 *Thème étude de la sinusoïde des espaces : effet zoom*

Nous avons choisi de donner plus d'importance à ce thème car nous pensons qu'il touche de près la conception de l'onde serpente. En effet, l'étude théorique peut montrer aux élèves que la forme du front d'onde ne change pas au cours du déplacement de l'onde. En fait, la forme du front d'onde dépend de la phase initiale de la source. Elle est crête si la phase initiale de la source est nulle et creuse si la phase initiale de la source égale à π .

Ce thème, d'une durée de 14 minutes 14 secondes, est consacré au développement théorique de la sinusoïde des espaces en fixant la variable temps. Cette sinusoïde des espaces traduit l'aspect de la corde à l'instant choisi. Le développement amène à la détermination de l'abscisse du front d'onde noté x_f , puis à la détermination de l'intervalle spatial de validité physique de la sinusoïde des espaces ainsi obtenu. Le découpage de ce thème donne deux jeux comme le présente le tableau d'analyse suivant :

Première partie : analyse préalable
Chapitre 2 : Analyse de l'enseignement ordinaire et de ses effets

Durée	Thèmes	Jeux didactique	Episodes		Avancée du savoir		Evénements remarquables
			N°	Description	Topogenèse	Densité épistémique	
0 :26:02	Thème 3 sinusoïde des espaces Durée 14min 25s	Jeu 5 Domaine spatial de validité physique de l'équation $y(x)$ Durée 12min01s	Ep.5_1 Durée 3min27s	Le prof passe à l'étude théorique de la sinusoïde des espaces il fixe alors le temps	TCP_H	Très élevée	
0 :26:33			Ep.5_2 Durée 31s	il explique que l'aspect de la corde à un instant t1 donc on fixe le temps	TCP_H	Très élevée	
0 :27:20			Ep.5_3 Durée 47s	le prof revient à l'équation $y(x)$ et il fixe le temps	TCP_H	Elevée	
0 :28:06			Ep.5_4 Durée 46s	le prof dit que le seul variable alors est x et il écrit l'équation $y(x)$	TCP_H	Elevée	
0 :28:46			Ep.5_5 Durée 40s	les élèves prennent note	TCP_B	Très faible	
0 :29:04			Ep.5_6 Durée 18s	Le prof se lance dans la démonstration avec parfois l'aide des élèves pour développer l'équation en parlant au même temps et la plupart des élèves sont occupé par l'écriture de ce qui est au tableau sans réagir.	TCP_H	Très élevée	
0 :31:03			Ep.5_7 Durée 1min59s	le prof explique que la variable est x et la période c'est lambda	TCP_H	Faible	
0 :32:25			Ep.5_8 Durée 1min22s	Le prof pose la question quand est ce que la corde est au repos aucune réponse il explique que la corde est déformée partiellement est que l'onde attend $x = vt$, le	TCP_H	Très élevée	
				prof dit qu'il suppose que la corde est déformée partiellement entre 0 et ... un dit x_1			
0 :33:53			Ep.5_9 Durée 1min28s	il pose de nouveau la même question la corde est repos quant-est-ce que ? il enchaine sans attendre de réponse si x est compris entre x_1 est L	TCP_H	Très élevée	
0 :34:36			Ep.5_10 Durée 43s	Le prof prend un exemple au tableau sans équation théorique est trace une sinusoïde des espaces	TCP_H	Elevée	
0 :35:04		Jeu 6 Courbe de $v(x)$ Durée 2min24s	Ep.6_1 Durée 28s	Il place x_1 est trace la sinusoïde avant x_1	TCP_H	Elevée	
0 :35:44			Ep.6_2 Durée 40s	les élèves prennent note de ce qui est écrit au tableau	TCP_B	Très faible	
0 :36:24			Ep.6_3 Durée 40s	le prof ajoute lambda sur la courbe	TCP_H	Faible	
0 :37:00			Ep.6_4 Durée 36s	les élèves prennent note sur leur cahier	TCP_B	Très faible	

Tableau 2. 6: Partie du tableau d'analyse relative au thème 3 : sinusoïde des espaces

3.3.5.3.1 Jeu 5 : Domaine spatial de validité physique de l'équation $y(x)$

Ce jeu dure 12 minutes 1 seconde pour lequel nous avons obtenu après découpage 10 épisodes, dont neuf sont de topogénèse du côté du professeur. Ils sont répartis comme suit. Cinq de ces épisodes sont de densité épistémique très élevée, trois de densité élevée et un de densité faible. Face à ces neuf épisodes, un seulement se trouve du côté de l'élève avec une densité épistémiquement très faible. Les épisodes Ep.5_7 et Ep.5_8 montrent que les élèves n'ont pas réagi vis-à-vis des questions de l'enseignant. Nous pensons alors que leur niveau de compréhension est très faible et que l'enseignant aurait dû donner plus de temps à cette partie du cours.

3.3.5.3.2 Jeu 6 : représentation de la courbe $y(x)$

La durée de ce jeu, constitué de quatre épisodes, est de 2 minutes 24 secondes. Deux présentent une topogénèse du côté du professeur, l'un avec une densité épistémique élevée, et l'autre très élevée. Par contre, les deux autres, qui sont de topogénèse du côté des élèves, sont de densité épistémique très faible. Ce jeu est consacré à la représentation mathématique de la fonction sinusoïdale $y(x)$. Nous pensons qu'à ce niveau, l'enseignant aurait pu tracer la sinusoïde des espaces à un instant t légèrement supérieur à t pour expliquer ainsi que le front d'onde n'a pas changé de forme, ce qui pourrait remédier à la conception de l'onde serpente.

3.3.5.4 Topogénèse et densité épistémique

Ce thème est constitué au global de 14 épisodes dont onze sont de topogénèse du côté de l'enseignant, avec une densité épistémique qui varie de faible à très élevée. En face de ces épisodes, trois sont du côté des élèves avec une densité épistémique très faible. D'après la figure suivante, nous constatons que les épisodes ne sont pas équilibrés, ni en densité épistémique ni en fonction de la topogénèse.

Densité épistémique	Très élevée	x	x				x		x	x					
	Elevée			x	x						x	x			
	Faible							x						x	
	Très faible					x							x		x
Episode		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4
Jeu		Jeu 5										Jeu 6			

Topogénèse haute (du cote de l'enseignant)
 Topogénèse basse (du cote des élèves)

Figure 2. 22: Tableau illustrant l'avancée du savoir du thème 3

3.3.5.5 *Thème étude du déphasage entre la source et un point de la corde*

Ce thème, d'une durée de 22 minutes est consacré à l'expression du déphasage entre la source et un point quelconque de la corde et qui est affecté par l'onde :

$$\varphi_S - \varphi_M = \frac{2\pi}{\lambda} x$$

L'enseignant dégage ensuite les expressions des déphasages particuliers : en phase, en opposition de phase et en quadrature de phase et les repère sur une sinusoïde des espaces. Ce thème comporte quatre jeux comme suit :

Jeu 7 : Expression de déphasage d'un point de la corde par rapport à la source

Jeu 8 : Points en phase avec la source

Jeu 9 : Points en opposition de phase avec la source

Jeu 10 : Points en quadrature de phase avec la source

Au total, ce thème est constitué de 17 épisodes, tous avec une topogénèse du côté de l'enseignant. 12 épisodes sont de densité épistémique très élevée et 5 épisodes de densité épistémique élevée. Ici, les élèves ne semblent pas participer à la construction de leur savoir.

3.3.5.6 *Thème résolution d'un exercice d'application*

L'enseignant a choisi de terminer cette séquence d'enseignement sur les ondes mécaniques par la résolution d'un exercice qui touche la plupart des objectifs visés par ces trois séances d'enseignement. Nous proposons l'énoncé de cet exercice :

EXERCICE D'APPLICATION

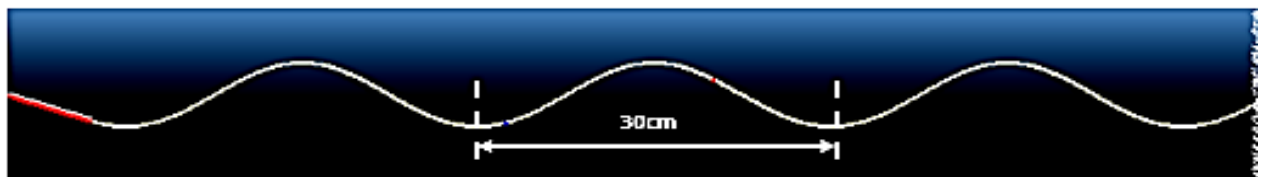
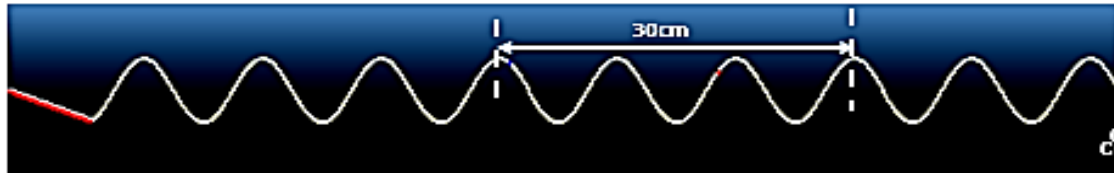
I- Deux cordes tendues horizontalement, sont excitées séparément par la même lame vibrante. Cette lame produit à l'extrémité (S) de chaque corde des vibrations verticales de même amplitude a et de même fréquence $N=80$ Hz. L'autre extrémité de chacune est fixée à un dispositif empêchant la réflexion des ondes.

1- Chacune des deux cordes est éclairée par une lumière stroboscopique de fréquence N_e

a- Déterminer la plus grande fréquence N_e permettant d'observer l'immobilité apparente de chaque corde

b- Préciser en le justifiant ce qu'on observe lorsque la fréquence des éclairs $N_e = 79$ Hz

2- On éclaire chacune des deux cordes avec une lumière stroboscopique de fréquence $N_e = 80$ Hz puis on les photographie, on obtient les deux clichés de la figure ci-dessous :



a- Déterminer les longueurs d'ondes λ_1 et λ_2 respectivement des deux ondes, le long de la corde(1) et le long de la corde(2).

b- Expliquer à quoi est due la différence entre λ_1 et λ_2 .

3- Préciser en le justifiant si ces ondes sont longitudinales ou transversales.

II- On considère maintenant l'onde progressive le long de la corde (1).

L'extrémité S de cette corde a pour équation horaire : $y_S(t) = 4 \cdot 10^{-3} \sin(160\pi t)$

1- a- Établir en fonction de x et de t l'équation horaire $y_M(t)$ d'un point de la corde d'abscisse $x=(SM)$.

b- En déduire l'équation horaire du point A de la corde d'abscisse $x_A = 25$ cm, en précisant la valeur de sa phase initiale.

c- Représenter sur le même système d'axe $y_S(t)$ et $y_A(t)$

2- Déterminer les abscisses x_B et x_C ($x_B < x_C$), des deux points B et C de la corde les plus proches de A, vibrant en opposition de phase avec A.

3- Représenter l'aspect de la corde à l'instant $t_1 = 4,375 \cdot 10^{-2}$ s.

Ce thème dure 54 minutes 51 secondes, soit la durée la plus longue par rapport aux durées des autres thèmes. Il est composé de six jeux comme suit :

Jeu 11 : Détermination de la fréquence de l'onde par stroboscopie. Durée 11 min 41s

Jeu 12 : Détermination des longueurs d'onde. Durée 3 min 18 s

Jeu 13 : Variation de la célérité de l'onde dépend des propriétés du milieu de propagation. Durée 5 min 25 s

Jeu 14 : Nature de l'onde. Durée 2 min 30 s

Jeu 15 : Expérience qualitative sur la dépendance de la célérité avec les propriétés du milieu de propagation de l'onde. Durée 1 min 21 s.

Jeu 16 : Equation horaire d'un point de la corde et sinusoïde de temps. Durée 31 min 4 s.

Le jeu 15 nous intéresse le plus, car au cours de celui-ci, l'enseignant réalise une expérience qualitative sur la variation de la célérité avec les propriétés du milieu de propagation de l'onde à l'aide d'une corde. Durant cette expérience, les élèves observent la propagation d'une onde longitudinale le long de la corde pour deux conditions de déformation différentes. Il s'agit d'une expérience prévue sur simulation mais d'une façon quantitative.

En totalité, ce thème est constitué de 57 épisodes dont 44 épisodes sont de topogénèse du côté de l'enseignant et 13 du côté des élèves. On constate ici que l'interaction des élèves a évolué par rapport aux autres thèmes.

3.3.6 Conclusion

Cette dernière séance de cours est consacrée à l'étude théorique de l'onde, c'est-à-dire à la formulation des équations horaires et spatiales, à la représentation graphique de ces équations et à l'étude du déphasage entre la source et un point de la corde affecté par l'onde et enfin à la résolution incomplète d'un exercice d'application sur la propagation d'une onde sinusoïdale progressive entretenue le long d'une corde.

Du point de vue intentionnel, l'enseignant aborde les derniers objectifs visés par ce cours sur les ondes. Il consacre, de plus, un temps important pour l'application.

Du point de vue didactique, la méthode d'enseignement adoptée est loin d'être de type constructiviste puisque la topogénèse est pratiquement toujours du côté de l'enseignant. Le tableau suivant donne une idée claire sur l'avancée du savoir au cours de cette séance. Nous constatons qu'au cours de l'avancée du savoir, la topogénèse est du côté du l'enseignant pour 81.1% des épisodes, et que la plupart de ces épisodes (56 sur 86 épisodes) sont de densité épistémique variant entre élevée et de très élevée.

Topogenèse Densité épistémique	Topogenèse côté prof Haute	Topogenèse mixte	Topogenèse côté prof basse
Très élevée	27	0	1
Elevée	29	1	5
Faible	27	0	7
Très faible	3	0	6
Bilan	86	1	19
Pourcentage	81.1%	0.9%	17.9%

Figure 2. 23: Tableau illustrant l'avancée du savoir au cours de la troisième séance

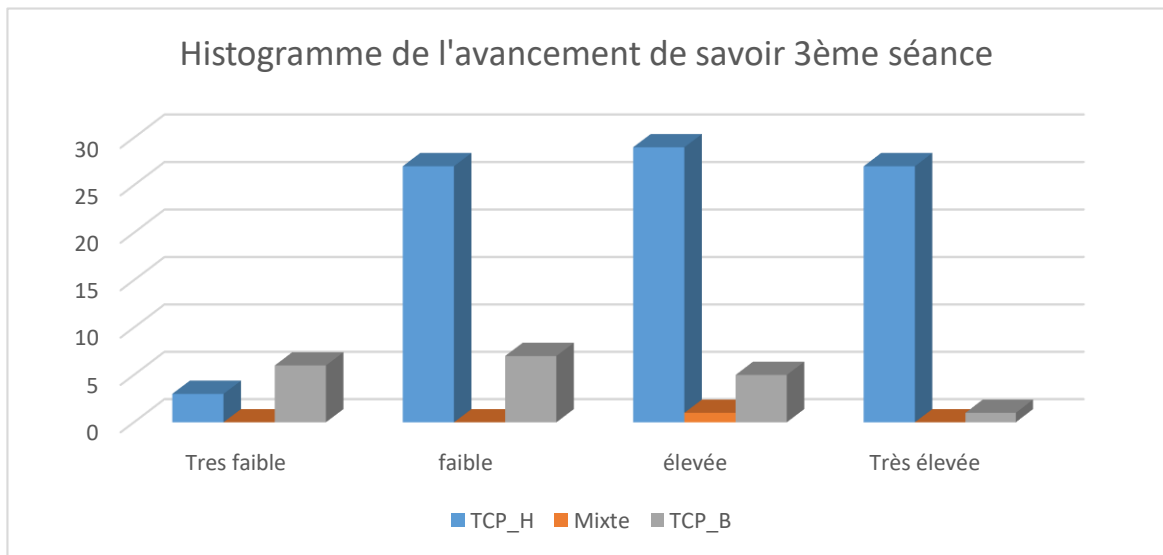


Figure 2. 24: Histogramme illustrant l'avancée du savoir au cours de la troisième séance du cours

Enfin, nous ajoutons que l'enseignant reprend (jeu 15) la notion de célérité de l'onde et sa dépendance aux propriétés du milieu élastique de propagation, et cela lorsqu'il constate que les élèves ne répondent pas correctement à une question de l'exercice autour de cette notion. En effet, l'enseignant réalise devant ses élèves une expérience qualitative illustrant la variation de la célérité avec les propriétés du milieu de propagation. Nous nous intéressons à cette expérience car elle fait partie des expériences qui seront réalisées, mais d'une autre manière, sur simulation, lors de la séance du TP, qui suit cette séance. Notons aussi que l'épisode Ep.13_12 est consacré à un rappel de la formule de la célérité d'une onde le long d'une corde qui montre que la célérité dépend de la tension exercée sur la corde et de sa masse linéique :

$$V = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

3.4 *Conclusion*

Dans cette conclusion, nous allons traiter des points de vue différents. Le premier est institutionnel, il consiste à une étude comparative entre l'enseignement donné par le professeur et les objectifs visés par le programme officiel. Le deuxième est didactique, il consiste à apporter des réponses à plusieurs des questions de notre recherche : Quelle position topogénétique prise par les élèves et par l'enseignant au cours de ces séances d'enseignement et quel rapport avec la densité du savoir ? Quelles sont les dimensions du quadruplet (définir, réguler, dévoluer et institutionnaliser) qui sont prises en compte par l'enseignant au cours de ces séances ? Le troisième est le point de vue du chercheur en lien avec l'élaboration de la séance prévue sur simulation des ondes. Ce dernier point de vue est lié à l'ensemble du travail mené dans cette thèse, en gardant toujours à l'esprit l'intérêt de cette étape d'analyse préalable à notre ingénierie didactique. Il s'agit par exemple de voir de près comment se déroule cet enseignement (quelles approches et méthodes d'enseignement) et de repérer si les questions des travaux pratiques prévues sur simulation sont traitées d'une manière ou d'une autre le long de cette séquence d'enseignement.

Du point de vue institutionnel, au cours de ces trois séances, l'enseignant réussit à donner un cours qui aborde tous les objectifs visés. Notons aussi que l'enseignant fournit un effort indéniable pour réaliser des expériences qui illustrent plusieurs étapes du cours. De plus, l'enseignant consacre un temps important pour un exercice d'application. Néanmoins, les expériences quantitatives n'ont pas donné de résultat, et cela à cause du matériel défectueux. C'est ce qui a entraîné une perte de temps de plus de vingt minutes. Nous pensons que cela peut être résolu par une simulation informatique.

Du point de vue didactique, nous constatons que dans 84% des épisodes, la topogénèse est pratiquement toujours du côté de l'enseignant, et que, dans des occasions rares, elle est du côté des élèves (13.7% des épisodes). Néanmoins, on peut constater que 12 épisodes parmi 29 ont une densité épistémique qui varie entre élevée et très élevée. Le tableau suivant et l'histogramme correspondant illustrent l'avancée du savoir au cours des trois séances :

Topogenèse Densité épistémique	Topogenèse côté prof Haute	Topogenèse mixte	Topogenèse côté prof basse
Très élevée	56	1	6
Elevée	64	1	6
Faible	45	3	9
Très faible	13	0	8
Bilan	178	5	29
Pourcentage	84%	2.3%	13.7%

Figure 2. 25: Tableau illustrant l'avancée du savoir

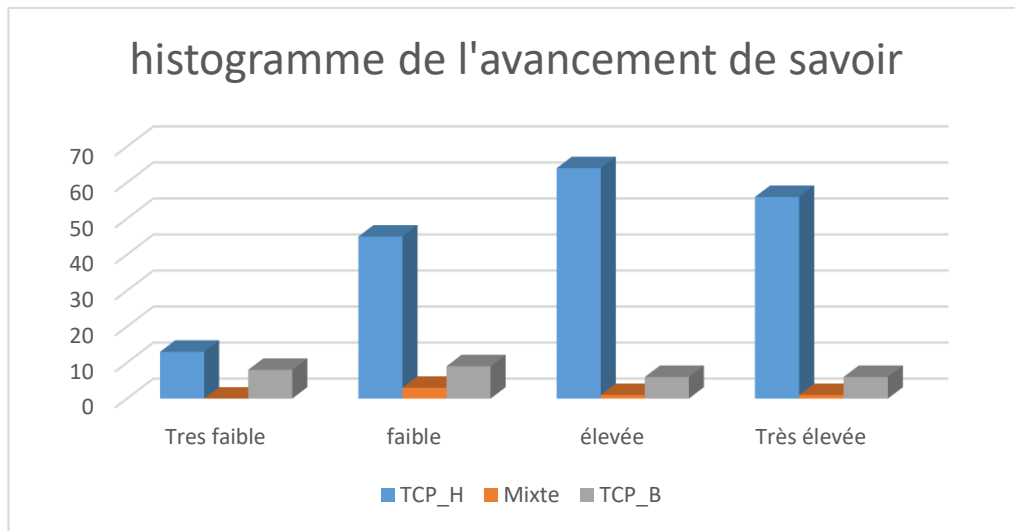


Figure 2. 26: Histogramme illustrant l'avancée du savoir au cours des trois séances

En se référant au quadruplet « définir, dévoluer, réguler, institutionnaliser » (Sensevy, Mercier & Schubauer-Leoni, 2000, p. 266) nous pouvons prendre position par rapport à chacun de ces éléments. Pour le premier, l'enseignant crée parfois des conditions de gain du jeu mais nous avons constaté que les conditions qu'il propose ne donnent pas de résultat. C'est le cas, par exemple, des expériences ratées à cause du matériel (exemple Jeu 11, mesure de la célérité d'un ébranlement dans la première séance). De même dans la plupart des cas, l'enseignant ne donne pas le temps nécessaire aux élèves. En ce qui concerne la régulation, elle est présente le long de ces trois séances du cours, mais dans la plupart des cas, elle est éteinte par l'effet Topaze : le professeur donne les premières lettres du mot et les élèves le termine sans aucun effort intellectuel (voir par exemple dans la narration didactique de la deuxième séance). Pour la dévolution, nous remarquons ici un seul cas où elle fonctionne, manifestement dans le jeu 10 de la deuxième séance. Enfin pour l'institutionnalisation, la validation des connaissances des élèves est toujours donnée par l'enseignant. Il présente les conditions de validation mais c'est lui qui fournit les réponses. Il n'y a donc pas d'institutionnalisation au vrai sens du mot. Nous pouvons conclure de ce qui précède que la méthode d'enseignement adoptée par l'enseignant

ne peut être classée dans un cadre constructiviste, car nous pensons que les élèves n'ont pas participé à la construction de leurs savoirs. Dans ce cas, nous pensons que le rôle des élèves est de mémoriser le contenu du cours sans produire de réelles interactions, ce qui pourrait manifester leur compréhension ou non du contenu abordé.

La focalisation sur le thème 3 de la deuxième séance a montré que l'enseignement sur la célérité est fait, comme dans le cas des autres thèmes, dans un mode transmissif. Les expériences que l'enseignant a voulu faire n'ont donné aucun résultat, leur apport est ainsi classé de très faible densité épistémique. Nous ajoutons ici que l'enseignant, sans le savoir, a donné une réponse à une question que nous allons proposer aux élèves au cours du pré-test et du post-test. Il s'agit de la question qui illustre la conception de l'onde serpente. Enfin, nous ajoutons que l'enseignant a repris au cours de la troisième séance la notion de célérité de l'onde et son lien avec les propriétés du milieu élastique de propagation. En effet, l'enseignant a réalisé devant ses élèves une expérience qualitative pertinente sur la variation de la célérité avec les propriétés du milieu de propagation. Nous nous occupons de cette expérience car elle fait partie des expériences qui seront réalisées d'une autre manière sur simulation lors de la séance du TP juste après cette séance.

CHAPITRE 3

ANALYSE COGNITIVE

LES CONCEPTS CLES DE L'ONDE :
LA CELERITE ET LE FRONT D'ONDE

Nous avons déjà abordé dans la section problématique, les conceptions développées par les élèves au cours de l'enseignement des ondes. En effet, les recherches dans le champ de la didactique francophone et anglo-saxonne montrent l'existence des difficultés d'apprentissage liées aux conceptions : l'hybride capital et l'onde serpente. Nous allons dans un premier temps, développer cette idée à partir d'une revue de littérature. Dans un second temps, nous allons étudier la présence présumée de ces conceptions dans le raisonnement des élèves.

1 Les conceptions des élèves liées au concept d'onde : revue de littérature

Nous allons dans cette partie présenter les principaux travaux des chercheurs sur les conceptions des élèves par rapport au concept d'onde. Nous allons les classer en deux niveaux d'enseignement, secondaire et supérieur où nous chercherons l'existence de liens présumés entre ces difficultés, à partir des conceptions que présentent ces deux types d'apprenants.

1.1 Les conceptions et les obstacles liés au concept d'onde dans l'enseignement secondaire

Les recherches publiées en didactique sur le concept d'onde ne sont pas nombreuses. Nous avons constaté que dans la communauté francophone la plupart de ces recherches sont menées par Maurines ou en collaboration avec elle, et que les autres recherches existantes sont en continuité avec ses travaux (Benhassoun, 2004 ; Ben Jemaa, 2013).

1.1.1 Les travaux de Maurines et al. : 1986/2007

L'intérêt des travaux de Maurines est qu'ils mettent l'accent sur les difficultés des étudiants liées à propagation des ondes progressives et à la substantialisation du phénomène d'onde. Le résumé de ces travaux est décrit par Beaufils dans un article intitulé « Vingt années de thèses en didactique de la physique et de la chimie » (Beaufils, 1998) :

« Le travail de Laurence Maurines (1986) à propos de la propagation des ondes transversales a permis de montrer à la fois un substantialisme et une confusion avec la dynamique des objets : un grand nombre d'étudiants pensent qu'il est possible de faire aller plus vite un ébranlement en "lançant" plus fort, que la "bosse" ralentit au fur et à mesure qu'elle s'aplatit... »

1.1.1.1 *La conception hybride capital support de raisonnement des élèves.*

Au début de ses travaux, qui ont duré plus d'une vingtaine d'années, Maurines a repéré une conception particulière que développent la plupart des élèves et des étudiants au cours de l'enseignement du concept onde : le concept hybride, mélange de force, d'énergie, de vitesse... Ce concept est lui-même inspiré des travaux de Viennot. Maurines (2001) décrit le choix de l'appellation hybride capital comme suit : « *Nous avons appelé ce concept hybride CAPITAL car il a de nombreux points communs avec le capital de force introduit par Viennot (1979)* ».

Nous nous appuyons ici sur un article paru en 1988 (Maurines et Saltiel, 1988). Il s'agit d'une recherche menée d'une part, sur 600 élèves des classes de secondaire en première année scientifique et technique, avant l'enseignement sur les ondes et d'autre part, sur 500 étudiants après enseignement des ondes de première et terminale scientifique, de la première à la quatrième année d'université scientifique, ou encore agrégatifs de physique. Cette étude tente d'analyser les modes de raisonnement les plus fréquents que présentent les apprenants avant et après enseignement sur les ondes. Les questions utilisées dans l'enquête portent sur la propagation d'ébranlement sur une corde. Par contre, pour comprendre le mode de raisonnement des élèves et des étudiants, les auteures demandent à chaque fois des réponses suivies d'arguments justificatifs. Ainsi Maurines et Saltiel présentent une étude comparative entre le raisonnement des élèves au cours de la propagation d'un signal et celui au cours du mouvement d'une balle (Viennot, 1996) où elles trouvent une grande similitude entre les arguments donnés. Le constat de ce travail est que « *les élèves expliquent la propagation d'un signal sur une corde comme si la forme visible qui se déplace (« la bosse ») était un objet matériel créé et mis en mouvement par la source, que leurs réponses peuvent s'interpréter en supposant l'existence d'un concept hybride appelé « capital ».* Ces raisonnements de type mécaniste ne sont que des tendances d'ensemble et non ceux d'un élève en particulier. Ils présentent une grande stabilité puisqu'ils se manifestent aussi après enseignement à des degrés divers. » (Maurines et Saltiel, 1988, p. 1024).

Le concept hybride capital est défini plus tard par Maurines (1991) : « *Ce capital est un concept hybride regroupant la plupart des grandeurs physiques mises en jeu dans un phénomène de propagation (force, énergie, vitesse, largeur du signal, amplitude...) et amalgamant la cause (la secousse exercée par l'opérateur pour créer le signal) et l'effet (la bosse et son déplacement).* Ce capital est un « objet » fictif, matérialisé par la « bosse » qui se propage, fabriqué et mis en mouvement par la source. » Dans ce même article, l'auteure montre

que face au nombre élevé de variables existant dans toutes les situations ondulatoires, les apprenants mettent en œuvre ce type de conception capitale rassembleur des grandeurs physiques.

1.1.1.2 *La conception d'onde serpente issue de l'obstacle substantialiste dans le raisonnement des élèves*

Pour définir l'obstacle substantialiste, Maurines et Mayrargue (2001) adoptent ces deux définitions :

- C'est "*l'idée centrale qui oriente le raisonnement commun est celle d'objet quasi-matériel doué de propriétés intrinsèques*" (Viennot, 1996, p.101) ;
- C'est la présupposition matérialiste, celle qui conduit à admettre que les comportements et des propriétés des substances matérielles doivent porter des explications à tous les phénomènes physiques (Resnick, 1989).

Enfin, les auteurs expliquent que l'obstacle substantialiste est une approche réductrice qui conduit à faire intervenir une substance enfermée dans l'objet et à tout expliquer grâce à elle. En se référant aux travaux de Maurines et Saltiel (1988) et de Maurines (1991, 1999), Maurines et Mayrargue montrent l'impact de l'obstacle substantialiste sur le raisonnement des élèves et des étudiants : « *pour expliquer la propagation d'un signal, les élèves et étudiants se centrent sur le signal en déplacement et le traitent comme un objet matériel mis en mouvement par la source qui l'a créé* » (Maurines et Mayrargue, 2001, p. 2). D'où l'idée que l'onde se déplace d'une manière analogue à un serpent, c'est-à-dire qu'elle se déplace par ajout de bosse.

1.1.1.3 *Synthèse des travaux de Maurines et al. en lien avec notre recherche*

Les principaux résultats des recherches de Maurines et al. qui nous intéressent sont regroupés dans les actes d'une université d'été tenue à Poitiers en 2001. Maurines et Mayrargue affirment que les conceptions les plus répandues et les plus développées par la majorité des élèves au cours de l'enseignement du concept d'onde sont les suivantes :

- La vitesse de propagation d'un signal sur une corde ne dépend que du milieu, mais, pour les élèves, elle dépend de la force exercée par la main qui a créé le signal. De plus, tout semble se passer comme si la force exercée au départ par la main restait attachée au signal et se déplaçait avec lui ;
- Plus l'amplitude du signal est grande, plus cette force est grande et plus la vitesse de propagation l'est aussi ;

- Une diminution d'amplitude indique une diminution de la force communiquée au signal et donc une diminution de la vitesse de propagation ;
- Pour les élèves, la source semble communiquer quelque chose à la corde lors de la création du signal. D'où le concept hybride, mélange de force, d'énergie, de vitesse...

1.1.2 Les travaux en continuité avec ceux de Maurines menés en Tunisie

Nous avons focalisé dans la partie précédente sur la conception hybride capitale, car d'une part, c'est le support du raisonnement des élèves lors des situations ondulatoires (Maurines, 2001) et d'autre part, les recherches de Benhassoun (2004) et Ben Jemaa (2013) se trouvent en continuité avec les travaux de Maurines.

1.1.2.1 *Travail de Benhassoun (2004)*

Ce travail est l'objet d'une thèse portant sur l'enseignement des ondes en terminale scientifique des lycées tunisiens.

Au cours de cette recherche, Benhassoun a repris le traitement de quelques résultats atteints par Maurines au cours de ces recherches sur les ondes, telles que la conception capitale, le raisonnement mécaniste des élèves. L'auteur s'aperçoit alors que la construction du concept d'onde chez les élèves est fondée sur une étude théorique qui ne découle pas de façon immédiate de l'observation. Ainsi, il pense que les connaissances acquises par les élèves ne permettent pas d'interpréter spontanément les phénomènes physiques non rencontrés. Les élèves pensent que le rôle du milieu de propagation d'une onde se limite à un simple support passif. Enfin, il affirme que l'enseignement des phénomènes ondulatoires en Tunisie n'aide pas les élèves à dépasser leurs difficultés.

1.1.2.2 *Travail de Ben Jemaa (2013)*

Le mémoire de master que nous avons réalisé (Ben Jemaa, 2013) s'intéresse aux difficultés liées à l'enseignement des ondes mécaniques. Il s'agit d'une recherche menée en Tunisie sur 19 élèves d'une classe de terminale scientifique (discipline sciences expérimentales) après l'enseignement des ondes progressives.

Ce travail consiste en partie à identifier deux conceptions précises que Maurines a déjà identifiées en travaillant sur les élèves en France. L'une de ces conceptions est issue du concept hybride capital : les élèves considèrent que la vitesse de propagation d'une onde progressive

dépend de ces caractéristiques. L'autre conception c'est que les élèves considèrent que l'onde progresse par ajout de "l'onde serpente".

Nous présentons un résumé des résultats obtenus pour la partie qui nous concerne :

- 59% des réponses des élèves montrent que leur raisonnement est fondé sur la conception hybride capitale, alors ces élèves pensent que si l'amplitude de l'onde augmente alors la célérité de propagation augmente aussi ;
- 37% des réponses montrent que les élèves pensent que l'onde avance par ajout de bosse, c'est l'impact de la conception d'onde serpente ;
- Seulement 10% des réponses sont correctes.

Ce travail a montré que les élèves des classes de terminales scientifiques tunisiennes peuvent développer des conceptions et des modes de raisonnement erronés issus du concept hybride capital et de l'obstacle substantialiste. En effet, ces conceptions résistent après enseignement et se présentent comme une référence à l'appréhension des phénomènes physiques.

Ce constat montre aussi une grande ressemblance avec les résultats déjà trouvés par Maurines et *al.* en travaillant avec des élèves français.

1.1.3 Le travail de Tongchai et al. (2011)

Nous pensons que ce travail est intéressant pour deux raisons. L'une repose sur le fait qu'il est réalisé dans deux pays différents avec des cultures différentes et des méthodes d'enseignements différentes. La deuxième raison, c'est qu'il est effectué avec des élèves des classes du secondaire et aussi sur des étudiants du supérieur.

Les participants étaient répartis dans sept groupes d'élèves différents, des écoles secondaires en Australie et en Thaïlande et des étudiants de première et de deuxième année du supérieur. L'étude empirique repose sur un questionnaire formé de huit questions à choix multiples. Le traitement des données est basé sur l'idée de repérer les réponses qui s'appuient sur une structure de la connaissance sous-jacente ou d'un modèle mental. Cependant, il est possible d'identifier le ou les modèles utilisés, car d'après les auteurs, l'apprenant peut y utiliser plus qu'un seul modèle.

Parmi les résultats :

- Les étudiants les plus expérimentés semblent montrer une meilleure compréhension des oscillations et une compréhension minimale des ondes longitudinales. Cela peut être expliqué par le fait que les élèves ont étudié le mouvement général des ondes en deuxième lieu ;
- La compréhension des étudiants augmente avec la maîtrise des concepts de base et que leurs améliorations favorisent l'appropriation lors de l'étude de la mécanique quantique et l'électromagnétisme.

Le problème de compréhension du concept d'onde est aussi présent en Australie et en Thaïlande. Ces auteurs ont montré que la situation devient plus compliquée pour les étudiants lors de l'apprentissage d'autres concepts plus approfondis comme la mécanique quantique, et que la résolution de ce problème peut se faire au niveau secondaire.

Cette dernière conclusion met en évidence l'intérêt de notre travail et nous amène par la suite à faire une recherche sur les difficultés rencontrées par les étudiants au supérieur lors de l'enseignement des ondes d'une façon générale.

1.2 *Les conceptions et les obstacles liés au concept d'onde dans l'enseignement supérieur*

1.2.1 **Travaux de Maurines**

Nous commençons cette partie par l'étude des recherches de Maurines pour faire le lien entre ses travaux sur les élèves du secondaire et ceux sur les étudiants au supérieur. Ainsi, nous pouvons identifier l'impact probable des conceptions déjà acquises au secondaire au cours de l'enseignement des concepts plus complexes et en lien avec le concept de base d'onde progressive.

1.2.1.1 *La propagation des ondes en dimension 3 : Analyse des difficultés des étudiants (1999)*

C'est une étude qui s'inscrit dans une perspective constructiviste de l'apprentissage, portant sur les difficultés créées par la modélisation géométrico-ondulatoire de la propagation d'une onde dans un milieu tridimensionnel.

Le recueil des données est basé sur un questionnaire de type Q.C.M. sur les concepts et les lois utilisés en géométrie ondulatoire, suivi par une série de questions portant sur les représentations graphiques de quelques phénomènes ondulatoires différents. La population

interrogée est d'environ 340 élèves ou étudiants ayant suivi un enseignement sur les ondes. Ces apprenants sont repartis ainsi : 170 élèves de première ou terminale scientifiques et 170 étudiants scientifiques en classe préparatoires.

Nous choisissons un extrait des résultats obtenus, ceux que nous pensons utiles pour notre recherche :

- Une majorité d'étudiants pensent que le concept de rayon est réservé à la théorie géométrique et celui de surface d'onde à la théorie ondulatoire ;
- Les étudiants dessinent majoritairement des rayons pour la propagation de la lumière et des surfaces d'onde pour la propagation du son ;
- Pour les étudiants, la surface d'onde sonore n'est pas une surface équiphasée ;
- Les étudiants ne considèrent que des rayons énergétiquement indépendants.

Maurines présente un modèle de raisonnement commun chez les étudiants. Il s'agit de la propagation des ondes en trois dimensions à deux caractéristiques qui sont reliées : il tend à réduire la complexité des phénomènes et des théories, il est de type géométrique et mécaniste. En effet, les étudiants, non seulement, ne différencient pas d'une façon claire les concepts mis en jeu mais ils les amalgament, ils les utilisent d'une manière dissociée.

Enfin, Maurines explique que « *Cette tendance à une analyse géométrico-mécaniste des phénomènes s'accompagne d'une tendance à matérialiser les concepts, c'est-à-dire à les appréhender au travers d'aspects immédiats et perceptifs des phénomènes ou en référence à l'idée d'objet matériel* » (Maurines, 1999, p.106).

Nous constatons que cet article met en relief l'obstacle substantialiste, que l'auteure présente comme source de difficultés des étudiants et support de raisonnement de type géométrique et mécaniste.

1.2.1.2 *Analyse des difficultés des étudiants à propos des concepts de phase et de surface d'onde de principe de Huygens (2003)*

C'est en continuité avec les travaux précédents de Maurines que s'inscrit cet article. Le travail est réalisé sur une population de 550 étudiants, qui sont repartis de la façon suivante : 170 étudiants qui ont déjà suivi un enseignement sur les ondes au secondaire et 380 étudiants qui ont suivi un enseignement supérieur.

Il est demandé aux étudiants de remplir un questionnaire dont la moitié des questions portent sur la phase d'une onde progressive et l'autre moitié sur la surface d'onde et sur le principe de Huygens. La plupart des questions sont qualitatives et accompagnées d'une demande de justification.

Parmi les résultats, nous citons les exemples suivants :

- La plupart des étudiants sont incapables de tracer la courbe représentant la forme de l'onde à un instant différent de l'instant de référence et de positionner des points de l'onde à cet instant. Les réponses incorrectes sont variées. Notons, par exemple, des réponses qui sont fondées sur la conception de l'onde serpente, par conséquent la courbe reste identique à elle-même et l'onde progresse par ajout de bosses et d'autres réponses qui montrent que les étudiants confondent entre les points de l'onde et les points du milieu ;
- La majorité des étudiants considère que la phase est la même en deux sommets différents de l'onde. En fait, les étudiants raisonnent sur les points de l'onde comme si c'était les points de la corde ;
- Pour calculer la vitesse d'un point de l'onde, beaucoup d'étudiants font comme si ce point était un point du milieu. Ainsi, ils procèdent par la dérivée de l'expression horaire du mouvement d'un point du milieu et considèrent la vitesse de l'onde en un point.

Dans cet article, Maurines (2003) montre que les étudiants ont une grande tendance à raisonner sur des concepts indifférenciés. « *En effet, pour les étudiants un point d'une onde n'est pas distingué d'un point du milieu. Sur les graphes associés à la description spatiale de la propagation d'une onde, un point d'une onde garde une abscisse fixe au cours du temps au lieu de se déplacer avec l'onde* » (Maurines, 2003, p.33). Nous voyons que ce résultat est en continuité avec les résultats déjà trouvés au cours des travaux précédents sur les élèves du secondaire. En effet, les conceptions sont issues du concept capital, qui est déjà développé par les élèves au cours de l'acquisition des concepts de base de l'onde.

1.2.2 Travail de Kaya Şengören, et al. (2009)

C'est un travail réalisé en Turquie, paru dans la revue "Journal of Turkish science education" en 2009, intitulé "*Students' Difficulties about the wave pulses propagating on a rope*".

La méthodologie de travail est basée sur un questionnaire contenant des questions à choix multiples et des questions ouvertes qui ont été fournies à un nombre total de 147 étudiants. A la suite de la passation de ce questionnaire, des entretiens ont été menés avec 21 autres étudiants.

Les résultats montrent que les réponses des étudiants renferment des difficultés d'ordre conceptuel à propos de ce qu'est une onde, et que ces étudiants ont des difficultés vis-à-vis de la vitesse de propagation des ondes mécaniques dans un milieu homogène, lisse et sans dispersion.

Les auteurs avancent que les programmes d'études devraient être élaborés afin d'éliminer les « misconceptions », et que les enseignants du secondaire doivent également tenir compte des origines probables de l'existence de ces conceptions.

1.2.3 Travail de Mihas et Gemousakakis (2007)

Les travaux sur les ondes étant rares, cela nous lance sur d'autres pistes, même celles liées avec le formalisme du concept d'onde, d'où l'étude de cet article. Le type de difficultés d'ordre mathématique étudié dans cette étude est important et nous aide à mieux comprendre le mode de raisonnement des étudiants.

Ce travail est réalisé en Grèce sur un groupe composé de 36 étudiants soumis à un questionnaire. Les principaux résultats sont :

- Les étudiants savent déjà résoudre les problèmes, mais leurs niveaux de compréhension des principes de la physique étaient minimes ;
- Les étudiants trouvent des difficultés de compréhension des phénomènes où le mouvement est en deux dimensions. Cela influe sur leur mode de raisonnement sur des phénomènes en physique de ce type de mouvement.

1.3 Conclusion

Nous avons constaté que les travaux de Maurines sont les plus approfondis parmi toutes les recherches rencontrées. Nous proposons alors de classer les origines des difficultés des élèves et des étudiants selon Maurines :

- Le concept hybride capital :

C'est un amalgame de plusieurs concepts de force, d'énergie, de vitesse, etc. que les élèves utilisent comme support de raisonnement face à un phénomène ondulatoire. Cela crée à titre d'exemple, pour les élèves du secondaire, une confusion entre la vitesse de propagation de l'onde et la vitesse d'un point du milieu. Ce problème devient plus compliqué dans l'enseignement supérieur car la majorité des étudiants confond entre les points du milieu et les points de l'onde.

- La substantialisation :

C'est une approche réductrice qui conduit à faire intervenir une substance enfermée dans l'objet et à tout expliquer grâce à elle. La substantialisation devient obstacle d'enseignement car au secondaire les élèves l'utilisent pour expliquer la propagation d'un signal. Ce même phénomène persiste au supérieur pour créer à son tour chez les étudiants une tendance à une analyse géométrico-mécaniste des phénomènes ondulatoires.

Tous les travaux rencontrés dans cette recherche montrent l'existence des difficultés d'apprentissage du concept d'onde pour les élèves au niveau secondaire. Ces difficultés seront plus compliquées lors de l'enseignement de concepts plus délicats comme ceux rencontrés au cours de l'étude de la mécanique quantique et l'électromagnétisme au supérieur. En effet, ces mêmes difficultés sont repérées dans les divers pays où les chercheurs se sont intéressés à l'étude didactique du concept d'onde comme objet d'apprentissage. Ce lien entre ces deux niveaux secondaire et supérieur nous renvoie à la recherche de solutions au niveau secondaire lors de l'enseignement des concepts de base du phénomène ondulatoire.

2 Les conceptions des élèves liées au concept d'onde : résultats des analyses du pré-test

Nous poursuivons toujours notre étude avec les mêmes élèves qui ont reçu un enseignement ordinaire sur les ondes mécaniques. Nous les avons soumis à un test sur la célérité, sur le front d'onde et sur la sinusoïde des espaces de façon à repérer chez eux la présence éventuelle des conceptions déjà citées précédemment. Il s'agit en fait du pré-test faisant partie de notre ingénierie didactique et qui sera l'objet ultérieurement d'une étude comparative dans la partie analyse *a posteriori*.

2.1 Méthodologie spécifique à la mise en œuvre du pré-test

2.1.1 Contexte de l'étude

2.1.1.1 Moment de passation du pré-test

Le schéma suivant donne l'emplacement chronologique de la passation du questionnaire.

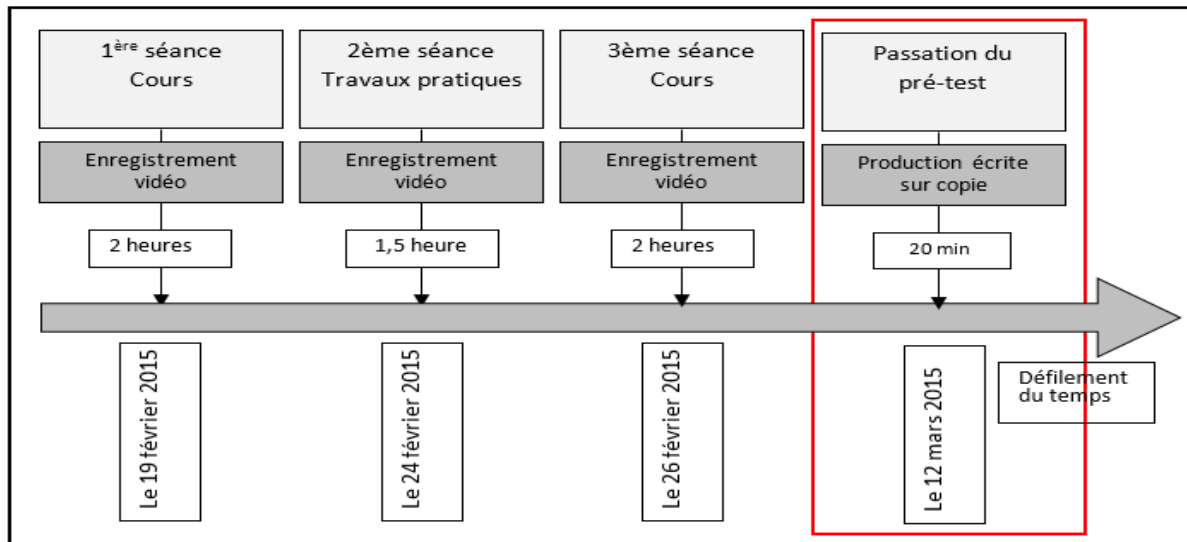


Figure 3. 1: Moment de la passation du test

2.1.1.2 Classe concernée

Durant toute cette étude, nous suivons la même classe de terminale scientifique au lycée Echabeb de la banlieue du Tunis, et cela durant l'enseignement des ondes mécaniques avec leur professeur déjà observé dans les deux autres parties précédentes. La classe est constituée de 21 élèves mais seulement 19 ont assisté à cette séance.

2.1.2 Recueil des données

La prise de données est basée sur le recueil des traces écrites de l'ensemble des élèves. Un pré-test a lieu au début d'une séance de TP. Nous avons demandé aux élèves de répondre à quatre questions (dont trois ouvertes) portant sur la vitesse de propagation d'une onde, sur le déplacement du front d'onde, sur le sens de déplacement de la source et sur l'aspect de la corde.

2.1.3 Outils de traitement des données.

Les tests ont d'abord été traitées question par question en tenant compte à la fois de la réponse brute et du schéma lorsqu'il est demandé. Nous nous sommes basés sur l'analyse a priori des difficultés susceptibles d'être rencontrées par les élèves et cela en tenant compte aussi

des difficultés non prévues. Nous avons réalisé une étude statistique systématique des réponses obtenues car nous cherchions à mettre en évidence les difficultés et les conceptions ciblées par cette étude que sont la conception d'onde serpente et celle de l'hybride capital. Les pourcentages associés à chaque catégorie significative de réponse ne peuvent être interprétés qu'en tant que tendances majoritaires ou minoritaires.

2.2 Analyse des résultats

2.2.1 La première question : la vitesse de propagation d'une onde progressive. Contrôle de la conception hybride capital

Nous présentons d'abord la question n°1 telle qu'elle est posée aux élèves

1. Question n°1 : Choisir la bonne réponse

Si on excite une corde élastique avec deux amplitudes différentes $a_1 < a_2$ Les vitesses de propagation de l'ébranlement seront :

- a) $V_1 > V_2$ ☐
b) $V_1 < V_2$ ☐
c) $V_1 = V_2$ ☐

2.2.1.1 Justification du choix de la question

Nous visons à travers cette question l'identification de la conception hybride capitale (Maurines et Mayrargue 2001) où les élèves considèrent l'onde comme étant un mélange de force et d'énergie. Cela apparaît dans le raisonnement des élèves sur le comportement de la vitesse de propagation d'une onde progressive le long d'une corde lorsqu'on fait varier l'amplitude du signal. Nous nous attendons à ce que la majorité des élèves choisissent la réponse b) c'est-à-dire : que la vitesse de propagation de l'onde augmente si l'amplitude d'excitation augmente.

2.2.1.2 Résultat

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant, la bonne réponse est présentée avec une trame de fond en gris.

Réponse choisie	Le pourcentage
a) $V_1 > V_2$	26.3%
b) $V_1 < V_2$	52.2%
c) $V_1 = V_2$	21.1%

2.2.1.3 Analyse des résultats

26.3 % des élèves considèrent que la vitesse de propagation de l'onde diminue si l'amplitude augmente. Les élèves qui ont choisi cette réponse considèrent que l'amplitude de l'onde et la vitesse de propagation sont inversement proportionnelles. Par contre, 52.2% des élèves conçoivent que la vitesse de propagation de l'onde augmente si l'amplitude augmente. Ces derniers considèrent que ces deux grandeurs sont liées par une relation de proportionnalité. Enfin, 21% des élèves ont choisi la réponse correcte (réponse c).

2.2.1.4 Conclusion

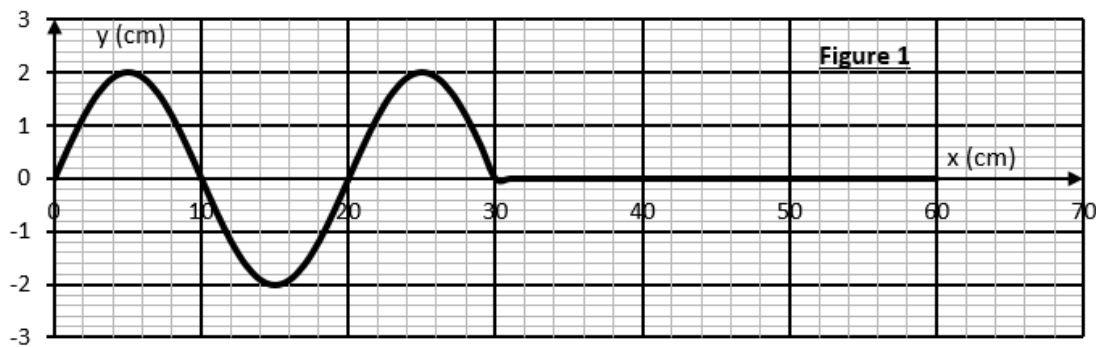
La majorité des élèves ont choisi la première et la deuxième proposition qui représentent 78.5% des élèves interrogés. Ces élèves raisonnent comme suit : puisque l'amplitude nécessite une force d'excitation pour l'appliquer et que la vitesse de propagation est issue d'un déplacement d'énergie, alors ces deux grandeurs sont nécessairement liées d'où le mélange force énergie. Ainsi, nous pouvons conclure que la majorité des élèves de terminale scientifique de notre échantillon présentent la conception hybride capitale après enseignement classique des ondes progressives. Nous retrouvons la conception identifiée chez les étudiants dans plusieurs pays du monde (Kaya Sengören, Tanel et Kavcar, 2009 ; Maurines et Mayrargue, 2001 ; Tongchai et al., 2011).

2.2.2 Les questions 2, 3 et 4 : aspect de la corde. Contrôle de la conception de l'onde serpent

Nous présentons l'ensemble des questions (n°2 à n°4) qui ont pour objectif le contrôle de la conception de l'onde serpent.

II) Aspect de la corde

On donne ci-dessous l'aspect de la corde à un instant de date t .



1) Questions

a) Question n°2 :

Peut-on prévoir à partir de la courbe le sens de déplacement de la source d'onde S ($x_s=0m$), si oui dans quel sens ?

b) Question n°3 :

Comment se déplace le front d'onde ?.....

c) Question n°4

Représenter sur la figure 2 l'aspect de la corde à instant de date t' légèrement supérieur à t (on peut prendre l'instant t' lorsque x_f avance de $\frac{\lambda}{4}$)

N.B. Aucun développement théorique n'est demandé.

2.2.2.1 Justification du choix des questions

Nous visons par ces questions la détection des difficultés des élèves face au déplacement du front d'onde. Précisément, nous visons à détecter la présence éventuelle de la conception d'onde serpente dans le raisonnement des élèves de notre étude, et ceci après enseignement ordinaire reçu sur les ondes. En effet, nous pensons que la majorité des élèves raisonnent par le fait que l'onde progresse par ajout de bosse. Ceci se manifeste par le fait que lorsque les élèves tracent la sinusoïde des espaces à un instant ultérieur, ils ajoutent une bosse au front d'onde en gardant les mêmes positions initiales pour tous les autres points de la corde.

2.2.2.2 Résultats et analyses

Nous avons choisi d'utiliser des pourcentages pour faciliter la présentation et l'analyse des résultats mais nous avons bien à l'esprit que l'effectif de l'étude est faible (19 élèves) et que l'élève représente environ 5% dans les représentations suivantes.

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant. La bonne réponse est présentée avec une trame de fond gris. Pour les tableaux correspondants aux questions n°2 n°3, la réponse présentée avec une trame de fond rouge traduit la présence de la conception de l'onde serpente dans le raisonnement des élèves.

2.2.2.2.1 Question n°2 : contrôle du déplacement de la source

Réponse	Le pourcentage
Dans le sens négatif	10.5%
Dans le sens positif	36.8%
Dans le sens horizontal	10.5%
Dans le sens direct	10.5%
Dans le sens longitudinal	5.3%
Sans réponse	26.3%

10.5% des élèves répondent correctement à cette question, c'est-à-dire que la source se déplace vers le sens négatif à l'instant t , l'instant qui correspond à la sinusoïde des espaces représentée sur leur copie. Le reste des élèves 89.5%, donnent des réponses fausses ou sans réponse. Par contre, nous constatons qu'un grand pourcentage d'élèves (36.8%) pensent que la source se déplace dans le sens positif. Peut-être confondent-ils encore entre sinusoïde des espaces et sinusoïde de temps ?

2.2.2.2.2 Question n°3 : contrôle du déplacement du front d'onde

Réponse	Le pourcentage
Dans le sens horizontal	26.3%
Vers le bas (serpente)	10.5%
Sinusoïdal	31.6%
Sans réponse	31.6

26.3% des élèves répondent correctement à cette question, c'est-à-dire que le front d'onde se déplace horizontalement le long de la corde. Relativement aux trois autres questions, c'est le pourcentage le plus élevé des réponses correctes. 10.5% des élèves pensent que le front d'onde se dirige à cet instant vers le bas, ce raisonnement est fondé sur la conception de l'onde serpente.

2.2.2.2.3 Question n°4 : contrôle de la conception de l'onde serpente

Réponses	Le pourcentage
Correcte	15.8 %
Courbe par ajout de bosse (serpente)	10.5%
Courbes quelconques	5.3%
Sans réponse	68.4%

Puisque cette question est ouverte, nous avons obtenu plusieurs catégories de réponses, dont 15.8% sont correctes. C'est à dire que 2 élèves parmi les 19 sont capables de tracer la sinusoïde des espaces demandée sans aucun développement théorique, cette sinusoïde étant tracée en avançant le front d'onde horizontalement. Nous avons classé le reste des réponses en trois catégories telles que :

- 10.5 % des élèves, dans leurs réponses, manifestent la conception de l'onde serpente : ils ont gardé la courbe de la figure 1 et en lui ajoutant 1/4 de période spatiale. Nous expliquons ce résultat par le fait que ces élèves pensent que l'onde avance par ajout de bosse. L'encadré suivant montre un exemple de réponse des

élèves. Nous constatons que c'est le même pourcentage qu'à la question n°2, qui lui, aussi manifeste la conception de l'onde serpente.

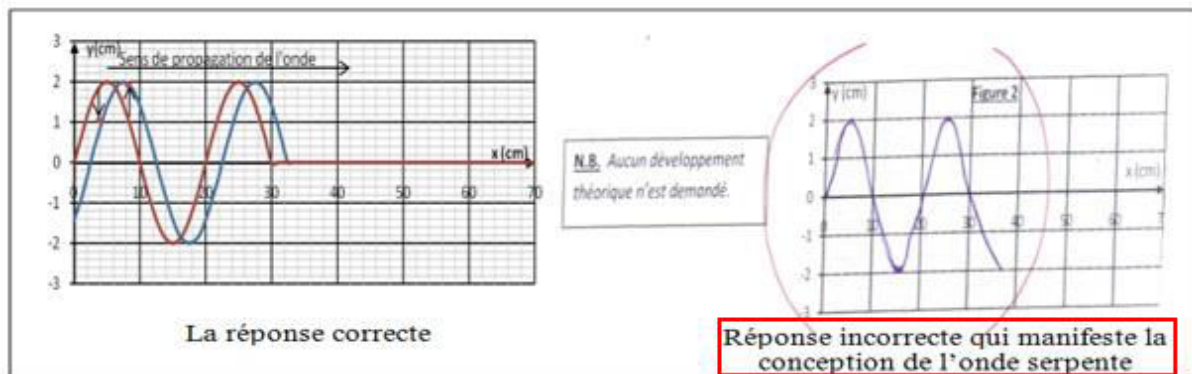


Figure 3. 2: Exemple de réponse incorrecte

- 5.3 % des élèves tracent une sinusoïde quelconque en gardant la même période et la même amplitude. La plupart de ces réponses présentent des courbes qui ressemblent à celles d'une sinusoïde de temps qui traduit le mouvement d'un point de la corde.
- Mais 68.4 % des élèves n'ont pas répondu à cette question.

2.2.2.3 Conclusion

En résumé, 89.5% des élèves sont incapables de fournir une réponse correcte. Parmi eux, 10.5% des élèves pensent que l'onde progresse par ajout de bosse. En effet, un grand pourcentage de réponses erronées, comme les non réponses, montrent des difficultés liées au concept de sinusoïde des espaces. Les deux dernières questions montrent que 10.5% des élèves pensent que l'onde progresse par ajout de bosse, ce qui est déjà repéré par Maurines (2003) avec des étudiants français âgés de 20 à 23 ans, lesquels ont suivi un enseignement de niveau supérieur (80 étudiants en deuxième année de premier cycle universitaire, 270 étudiants préparant un concours pour devenir professeur de physique et chimie dans l'enseignement secondaire).

3 Conclusion

L'analyse des réponses après enseignement des ondes mécaniques montre que les raisonnements des élèves tunisiens présentent les mêmes conceptions sur les ondes que celles rencontrées dans les recherches citées précédemment (Maurines, 1999, 2002, 2003 ; Maurines et Mayrargue, 2001 ; Sengören, Tanel et Kavcar, 2009 ; Tongchai, Sharma, Johnston,

Arayathanitkul, & Soankwan, 2011). Cela renforce l'idée que ces conceptions sont très répandues dans plusieurs pays.

Le faible pourcentage de réponses correctes montre la nécessité d'une remédiation. Nous pensons que cela est possible grâce à des activités de simulation des ondes. En effet, la simulation permet à l'apprenant de voir au ralenti le déplacement de l'onde et du front d'onde le long de la corde. Elle lui permettra aussi de faire des mesures afin de déterminer les différentes caractéristiques d'une onde en propagation. Notons que cela est impossible avec les expériences sur paillasse par le fait qu'un phénomène ondulatoire est généralement très rapide. D'où la question de recherche : est-il possible de procéder par une démarche d'investigation fondée sur l'utilisation d'une simulation des ondes mécaniques pour surmonter les difficultés des élèves ?

CHAPITRE 4

ANALYSE DU CHAMP DE CONTRAINTE

1 Contraintes externes et internes liées à la discipline des sciences physiques

Comme toutes les disciplines scolaires, la discipline des sciences physiques présente des contraintes sur l'exécution des séances d'enseignement en classe. Ces contraintes sont externes si elles sont d'ordre institutionnel qui dépend du contexte de l'enseignement. Mais elles sont également internes si elles sont liées à la discipline elle-même (Marlot, 2008).

1.1 *Contraintes externes de nature institutionnelle*

Nous considérons que ces contraintes se classent en deux catégories :

- Celles liées aux approches d'enseignement préconisées par l'enseignement des sciences physiques dans les filières scientifiques en général ;
- Celles liées aux objectifs visés par l'enseignement des ondes mécaniques aux classes de terminales scientifiques en Tunisie.

Notre étude repose sur le programme officiel de 2009 fourni par le ministère de l'éducation tunisienne (Ministère de l'éducation, 2009). Cette directive est mise à la disposition de toutes les enseignantes et tous les enseignants de sciences physiques, des formateurs et des inspecteurs. Elle à la base de toutes les activités d'enseignement de la discipline des sciences physiques.

1.1.1 *Méthodologie d'enseignement de la discipline*

Avant de présenter les méthodes d'enseignement, l'Institution précise que « *Les sciences physiques restent essentiellement une discipline expérimentale et doivent être donc enseignées en tant que telles* » (Ministère de l'éducation, 2009, p. 6) et que l'apprenant est le centre de l'action éducative. L'Institution propose de « *mettre en œuvre les principes constructivistes et d'intégration des connaissances, assignés à l'enseignement de la matière* » (Ibid.). Les prescriptions indiquent clairement qu'il faut conduire des activités d'enseignement par des méthodes actives d'où la nomination « les principes constructivistes ». Les décideurs demandent qu'au travers des activités expérimentales on amène l'élève à « *formuler les hypothèses et à les confronter aux faits, le professeur de la matière contribue au développement de la pensée logique chez les élèves* » (Ibid., p. 6). Ils ajoutent que les méthodes adoptées doivent prendre en compte des situations problèmes définies comme « *une situation qui fait initialement problème aux élèves parce qu'ils n'ont pas les connaissances scientifiques* ».

indispensables pour s'en acquitter » (Ibid., p. 6). Nous constatons aussi que l'Institution présente des activités d'investigation sans les définir et sans donner aucune explication.

Les activités expérimentales sont classées en deux catégories :

- Celle du cours où on recourt à des expériences lorsqu'elles sont dangereuses ou difficile à mettre en œuvre ;
- Les expériences des séances des travaux pratiques qui sont réalisées par les élèves. Ces expériences visent à exploiter un modèle ou à vérifier, pour les situations étudiées, la validité d'un modèle ou d'une loi, ou bien elles permettent de répondre à une situation problème.

Nous voyons que les recommandations institutionnelles sur les méthodologies d'enseignement à suivre par l'enseignant semblent intéressantes au vu de l'insistance à conduire des approches constructivistes, mais ces propositions restent vagues et sans précisions. En d'autres termes, pour que ces conseils soient exécutables, il faut envisager une transposition didactique de leur contenu.

1.1.2 Objectifs visés

Nous nous intéressons dans cette recherche au programme des sciences physiques destinés aux classes de terminale secondaire, option sciences expérimentales. A la fin de cette année, les élèves passeront leurs examens du baccalauréat. L'enseignement des ondes débute au niveau des classes de terminale, pour un volume horaire global compris entre 6 heure 30 minutes et 8 heures entre séances de cours et de travaux pratiques. La séquence qui nous intéresse est d'une durée comprise entre 4 heures 30 minutes à 5 heures 30 minutes. En effet, l'enseignement des ondes en classe de terminale scientifique tunisienne s'étend à l'étude de la nature ondulatoire de la lumière et les interactions onde-matière telles que la diffraction et la dispersion de la lumière, qui ne sont pas traitées dans cette recherche. Notons que le support (programme officiel) sur lequel l'enseignant doit préparer ses séances est réparti en quatre parties comme suit : les objectifs d'enseignement, le contenu à enseigner, des exemples de questionnement et d'activités et enfin des commentaires, comme le montre cet extrait du programme officiel (Ministère de l'éducation, 2009, p. 85).

ONDES (7,5 – 9 heures)

Objectifs	Exemples de questionnements et d'activités	contenu	Horaire
■ Distinguer entre une onde transversale et une onde longitudinale. ■ Reconnaître que la propagation d'une onde est due à une propagation d'énergie sans transport de matière. ■ Réaliser une expérience illustrant la propagation d'une onde sinusoïdale dans un milieu homogène et isotrope. ■ Identifier, dans un milieu de propagation donné, les propriétés dont dépend la célérité d'une onde. ■ Etablir l'équation horaire du mouvement d'un point donné du milieu de propagation connaissant celle de la source d'onde progressive et représenter graphiquement le diagramme du mouvement de ce point. ■ Représenter graphiquement l'aspect, à un instant donné, du milieu (ou d'une coupe du milieu) de propagation d'une onde progressive. ■ Reconnaître la double périodicité d'une onde sinusoïdale.	► Nos oreilles perçoivent des sons. Qu'est ce qui fait qu'ils nous parviennent et pourquoi les sons émis et ceux qu'on perçoit sont les mêmes ? ► La différence de salinité entre les eaux de l'Atlantique et de la Méditerranée est à l'origine d'ondes progressives au niveau du détroit de Gibraltar. Quelles sont les propriétés de ce type d'ondes ? ► Faire propager un ébranlement : - le long d'une corde élastique tendue, - le long d'un ressort, - le long d'une échelle de perroquet, - à la surface d'une nappe d'eau dans une cuve à ondes. Observer dans chaque cas l'ébranlement et comparer la direction de sa propagation avec la direction de la déformation locale du milieu de propagation. ► Mesurer la célérité : - d'un ébranlement se propageant le long d'une échelle de perroquet à l'aide de deux photos capteurs placés devant deux barreaux de l'échelle, - du son à l'aide de deux microphones reliés chacun à une entrée d'un oscilloscope.  ► Faire propager une onde progressive sinusoïdale le long d'une corde élastique, mettre en évidence sa périodicité temporelle avec la méthode optique et sa périodicité spatiale avec un éclairage stroboscopique.	I. Ondes mécaniques progressives I-1. Notion d'onde : - Onde transversale et onde longitudinale. - Célérité d'une onde. I-2. Onde progressive sinusoïdale : - Double périodicité : périodicité temporelle (T) et périodicité spatiale (longueur d'onde λ).	4,5-5,5 h

Figure 4. 1: Extrait du programme officiel ministère de l'éducation (2009, p. 85)

Les décideurs précisent dans la colonne de gauche les objectifs visés par le cours. Pour réaliser ces objectifs, ils mettent à la disposition de l'enseignant dans la colonne du milieu des propositions d'activités expérimentales à réaliser avec ces élèves. Enfin, ils donnent une série de commentaires, qui sont encadrés en rouge dans l'extrait du programme officiel (2009) suivant :

Commentaires

On introduira la notion d'onde par la réalisation des expériences permettant de générer un ébranlement dans un milieu élastique unidimensionnel (corde élastique et ressort) et bidimensionnel (surface libre d'un liquide) et on définira l'onde comme étant le phénomène résultant de la propagation d'une succession d'ébranlements dans un milieu donné.

Des mesures de la célérité v d'une onde se propageant dans un milieu donné permettront de vérifier que la valeur de cette célérité est indépendante de la forme de l'onde et de son amplitude tant que celle-ci est faible. Des mesures de la célérité v d'une onde se propageant dans des milieux de natures différentes (masses volumique, surfacique et linéique différentes ; atOMICITÉS différentes de gaz...) ou dans des états différents (tension ou torsion différentes ; températures différentes...) conduiront à montrer que la célérité v dépend des propriétés du milieu de propagation. Cependant, aucune expression de célérité en fonction de ces propriétés n'est au programme.

On insistera sur le fait qu'au cours de la propagation d'une onde mécanique sinusoïdale, les points du milieu de propagation effectuent chacun un mouvement sur place autour de sa position de repos alors que l'énergie est transmise d'un point à un autre pour affecter tout le milieu de propagation.

On montrera expérimentalement puis théoriquement la double périodicité d'une onde sinusoïdale dans le cas d'une onde transversale unidimensionnelle et on généralisera les résultats après une étude qualitative de cas variés (onde longitudinale, onde bidimensionnelle et onde tridimensionnelle : le son).

La réalisation d'une expérience de diffraction d'une onde mécanique bidimensionnelle et d'une expérience de diffraction de la lumière conduira à déduire le caractère ondulatoire de la lumière. On examinera expérimentalement l'effet du quotient $\frac{\lambda}{a}$ sur le phénomène de diffraction. Aucun développement théorique n'est au programme.

On rappellera la dispersion de la lumière blanche par un prisme et on conclura que cette dernière est constituée de plusieurs radiations monochromatiques, chacune est caractérisée par sa fréquence ν .

La différence de déviations subies par deux radiations de couleurs différentes tombant sous une même incidence sur une surface de séparation de deux milieux transparents donnés, permettra de montrer que l'indice de réfraction d'un matériau réfringent dépend de la couleur de la radiation qui le traverse.

On montrera expérimentalement que, comme l'onde lumineuse, l'onde mécanique peut subir la réflexion, la réfraction et la dispersion.

Aucun développement théorique n'est au programme.

87/155

Figure 4. 2: Extrait du programme officiel ministère de l'éducation tunisienne (2009, p. 87)

1.2 *Contrainte interne liées à la discipline elle-même*

Les sciences physiques sont une discipline de nature expérimentale. Son enseignement doit donc être basé sur l'expérimentation en classe, soit pendant les séances de cours, où les expériences sont généralement de nature qualitative, soit pendant les séances de travaux pratiques, où les expériences sont généralement de nature quantitative. Notons que durant les séances de TP, l'enseignant a une occasion supplémentaire pour l'institutionnalisation des savoirs. Le problème que nous voulons évoquer ici c'est que le phénomène ondulatoire est un phénomène rapide : la moyenne des fréquences rencontrées dans le manuel scolaire est de 50 Hz pour le cas des ondes mécaniques (le long d'une corde, à la surface de l'eau ou dans le cas des ondes sonore). Cette fréquence dépasse la capacité de perception de l'œil. Nous pensons alors que l'utilisation des simulations permettrait un suivi aisé du déroulement des phénomènes ondulatoires. Alors la simulation informatique donne-t-elle dans notre cas l'occasion à l'enseignant de valider les connaissances des phénomènes ondulatoires donc l'institutionnalisation du phénomène ?

2 Contraintes internes liées au savoir onde mécanique

Notre étude épistémologique et historique du concept d'onde montre que ce concept présente, dès sa naissance, un problème de nature épistémologique dû à la substantialisation du phénomène. Huygens pense que la propagation de la lumière est dû à des vibrations de l'éther qu'il considère comme milieu matériel de propagation (Balabane et Balibar, 2002). C'est un obstacle épistémologique au sens de Bachelard : « *il ne s'agit pas de considérer des obstacles externes, comme la complexité et la fugacité des phénomènes, ni d'incriminer la faiblesse des sens et de l'esprit humain : c'est dans l'acte même de connaître, intimement, qu'apparaissent, par une sorte de nécessité fonctionnelle, des lenteurs et des troubles* » (Bachelard, 1938). De même, Maurines (2001) pense que les difficultés rencontrées par les étudiants au cours de l'enseignement des ondes sont liées à l'obstacle épistémologique. Suite à plusieurs travaux de recherche sur les ondes qu'elle a menés, elle conclut que les obstacles épistémologiques qui se manifestent fréquemment dans les idées des élèves et étudiants sont deux types : l'obstacle réaliste et l'obstacle substantialiste. Nous donnons ici quelques éclaircissements sur ces deux concepts :

- L'obstacle réaliste qui est lié à l'expérience première. Maurines utilise plusieurs arguments illustrés par ces deux citations : « *le primat de la perception sur la conceptualisation* » (Astolfi et Peterfalvi, 1993, p.110) ou « *la prédominance de l'intuition sensible* » (Ballini et al., 1997, p.88) ;
- L'obstacle substantialiste : approche simpliste qui conduit à imaginer qu'une substance est enfermée dans l'objet. Toutes les explications sont alors fondées autour cette substance. Viennot (1996) définit cet obstacle comme étant « *l'idée centrale qui oriente le raisonnement commun est celle d'objet quasi-matériel doué de propriétés intrinsèques* » (Viennot, 1996, p.227). Mouhouche et Hajjami (2009) notent que « *Cet obstacle, issu du raisonnement commun, fait que nous percevons le réel comme constitué de substances. Le son serait perçu comme un objet responsable du bruit dont la résonance serait un attribut* » (Mouhouche et Hajjami, 2009).

Dans ses travaux, Maurines s'intéresse plus à l'obstacle substantialiste qu'à l'obstacle réaliste. Elle montre que « *pour expliquer la propagation d'un signal, les élèves et étudiants se centrent sur le signal en déplacement et le traitent comme un objet matériel mis en mouvement par la source qui l'a créé* » (Maurines, 2001, p. 2). Le résultat de ce constat, c'est que les élèves développent au cours de l'enseignement des ondes les deux conceptions déjà citées dans notre

travail : la conception hybride capital et la conception d'onde serpente. Ces deux conceptions servent de support de raisonnement à la plupart des apprenants. Cet obstacle substantialiste n'est pas propre aux ondes mais existe dans plusieurs thèmes des sciences physiques. « *C'est à travers les conceptions qu'ont les élèves de la lumière, de l'électricité, de la chaleur et de la température, que la présupposition matérialiste se manifeste le plus souvent* » (Resnick, 1989, p.107, cités par Maurines, 2001).

Ces difficultés d'enseignement-apprentissage des ondes se présentent comme des contraintes internes liées au savoir onde, généralement présentes à l'esprit du chercheur mais non déclarées dans les directives institutionnelles.

3 Conclusion

L'étude de ces différentes contraintes internes et externes et le choix de la méthode d'observation vont constituer le fil conducteur de cette partie de la recherche. Et par conséquent cela nous amène à préciser d'une part, les décisions et les positions à prendre aux niveaux des échelles temporelles et des tailles des grains d'observation et d'autre part, la construction de ces différentes échelles. Nous envisageons alors de mener une étude de nature descriptive et compréhensive de ce qu'il se passe au cours de l'enseignement/apprentissage des ondes mécaniques par la théorie de l'action conjointe en didactique.

PARTIE 2

ANALYSE A PRIORI

CHAPITRE 5 :

GENESE DE L'INGENIERIE

ET DESCRIPTION DES CHOIX EFFECTUES

1 Genèse de l'ingénierie

1.1 *Quel est le but principal de cette ingénierie ?*

Pour prendre en compte les difficultés des élèves quant au concept d'onde, nous avons déjà montré à partir d'une revue de la littérature scientifique l'existence de difficultés d'apprentissage liées au concept onde. Ces difficultés sont semblables dans l'ensemble et ne dépendent pas, en apparence, du contexte d'enseignement. Ce sont des difficultés d'ordre conceptuel (qu'est-ce qu'une onde ?) et des difficultés par rapport à la vitesse de propagation des ondes mécaniques dans un milieu homogène et lisse sans dispersion. Nous proposons de rappeler les principales conceptions qui influent négativement sur les raisonnements des élèves. Nous retenons les dénominations données par Maurines et Mayrargue. En l'occurrence, nous citons ici la conception hybride capitale, où un grand nombre d'élèves considèrent que la vitesse de propagation d'un signal dépend de la force exercée par la main qui l'a créé et la conception d'onde serpente, où un grand nombre d'élèves considèrent que l'onde avance par ajout de bosses, comme dans le cas des déplacements des serpents.

1.2 *Synthèse*

Cette étude des revues de littérature montre que les conceptions citées ci-dessus sont répandues dans plusieurs pays. Nous pensons que ceci est dû au caractère abstrait du phénomène d'onde. Nous pensons qu'une ingénierie didactique fondée sur l'investigation scientifique, intégrant en même temps une simulation, permettrait de prendre en compte des difficultés déjà citées. D'ailleurs, la simulation permet aux élèves de manipuler le phénomène, qui est en réalité rapide, sur un modèle sous-jacent en arrière-plan de la simulation. Nous pensons par là-même que ceci résoudrait une partie des difficultés rencontrées au cours de l'enseignement des élèves, et que nous pouvons créer des changements au niveau des raisonnements chez les élèves. Cette idée a pour but de placer l'élève dans une situation de recherche où il doit tester ces connaissances, où il se trouve alors obligé de se positionner par rapport aux résultats obtenus par simulation. Ce positionnement permet *a priori* un déclenchement critique vis-vis de ses idées mais aussi de créer les conditions du changement au niveau de son raisonnement.

2 Description des choix effectués

2.1 *Les prémisses*

L'expérimentation dans un laboratoire scolaire sur les ondes mécaniques est rare. Et même si elle existe, elle se limite à un niveau d'analyse et d'interprétation généralement qualitative, ceci étant dû à la rapidité relative du phénomène. Cette rapidité ne permet pas, à titre d'exemple, de réaliser des mesures d'amplitude et de longueurs d'ondes. D'où l'idée de recourir à la simulation. Par ailleurs, nous ne souhaitons pas que l'enseignement se limite à l'observation des faits de la simulation des ondes mais passe par une étude expérimentale et par des calculs de célérités. Il est donc nécessaire de construire un scénario pédagogique d'enseignement qui permet de réaliser des travaux pratiques d'investigation sur simulation des ondes mécaniques.

En effet, des études au niveau international montrent une certaine efficacité de l'enseignement des sciences fondée sur l'investigation pour amener les élèves à mieux maîtriser les concepts scientifiques et à mieux comprendre la démarche scientifique (Boilevin, 2013). De plus, des études mettent en avant l'intérêt du recours à des simulations informatiques pour enseigner les sciences (Chauvet et Duprez, 2003 ; Richoux et Beaufils, 2005 ; Saadi, 2003). Nous pensons que la démarche d'investigation au sens de Morge et Boilevin (2007) permettra de se placer dans un cadre de travail mettant en jeu la simulation et l'investigation. Ces auteurs donnent une définition d'une séquence d'investigation qui n'est pas limitée aux expériences ordinaires.

2.2 *Choix de la simulation*

Lors de notre recherche d'une simulation à utiliser dans le TP, nous avons tenu compte en premier lieu de la simplicité de l'interface utilisateur pour qu'elle ne présente pas un obstacle pour l'apprenant. Nous avons choisi une simulation réalisée par Adrien Willm, professeur de physique-chimie au Lycée Beaupré d'Haubourdin (Académie de Lille). Nous avons reçu, suite à notre demande, l'autorisation par mail de l'auteur pour exploiter la simulation dans cette recherche (voir annexe 5, p. 299). Dans un second temps, nous avons repris l'idée que « *Dans le cas des représentations codifiées, le nombre et la nature des registres sémiotiques utilisés dans une appliquette sont donc des paramètres particulièrement importants. L'idée est bien sûr d'éviter des appliquettes qui présentent à l'utilisateur un écran où se multiplient les valeurs numériques, les éléments d'un schéma complexe, les courbes, etc.* » (Beaufils, Ramage et

Beney, 2004, p.386). Ces auteurs considèrent les appliquestes comme étant des objets graphiques manipulables qui peuvent être des simulations ou des animations. Leur constat nous a amenés à une étude des registres sémiotiques de la simulation choisie.

2.2.1 Ce que nous pouvons faire avec cette simulation

Nous présentons sur la figure suivante la capture d'écran de la simulation de l'onde le long de la corde.

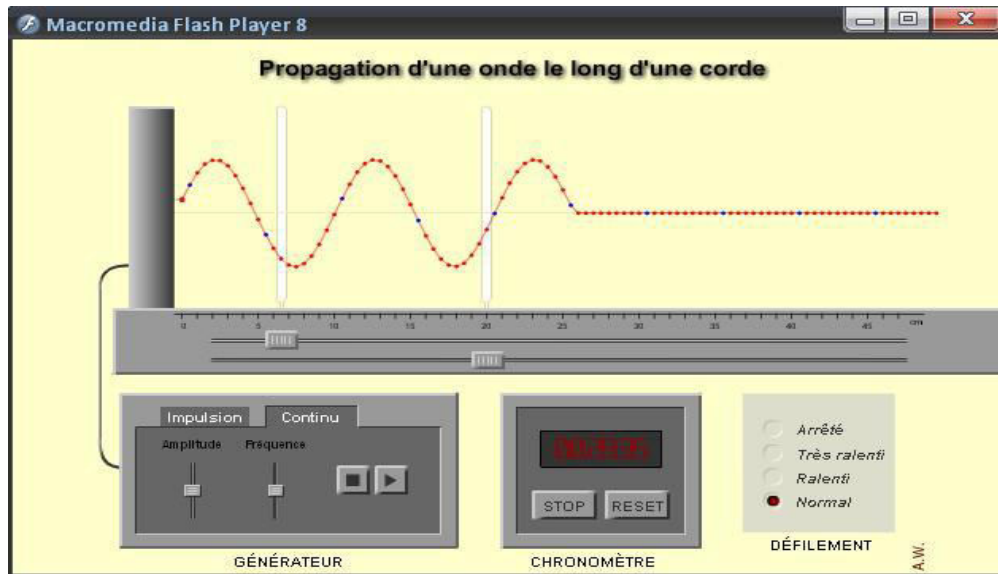


Figure 5. 1: Capture d'écran de la simulation

2.2.1.1 *Visualisation de la périodicité temporelle et mesure de la période*

Pour visualiser la périodicité temporelle, on peut observer l'évolution d'un point choisi arbitrairement de la partie de la corde en mouvement à l'aide de l'une des barres de visualisation : ce point monte et descend de façon périodique. Pour mesurer la période, on détermine le temps à l'aide de l'outil chronomètre que met ce point pour faire un aller et retour le long de la barre de visualisation.

2.2.1.2 *Visualisation de la périodicité spatiale et mesure de la longueur d'onde*

Pour visualiser la périodicité spatiale, on peut faire un arrêt sur image. On observe que les points rouges forment un dessin qui se répète au bout d'une certaine distance. Pour mesurer la longueur d'onde λ , on utilise les deux barres de visualisation qu'on fixe sur deux points de la corde affectés par l'onde et qui sont dans le même plan horizontal en se déplaçant dans le même sens.

2.2.1.3 *Mesure de la vitesse de propagation de l'onde*

Pour déterminer la vitesse de propagation de l'onde le long de la corde, on peut utiliser deux méthodes :

- Méthode directe : en mode impulsion

En mode impulsion, il suffit alors de choisir deux points de la corde sur lesquels on fixe les deux barres de visualisation. On note alors la distance qui les sépare. On mesure ensuite le temps que met l'impulsion pour aller de la première à la deuxième barre de visualisation à l'aide de l'outil chronomètre (la mesure est facilitée si on utilise le mode ralenti). Le calcul du rapport de la distance sur le temps permet alors d'obtenir la valeur de la vitesse de propagation : $v = d / t$

- Méthode indirecte : en mode continu

Cette méthode nécessite deux étapes, la mesure de la longueur d'onde λ et de la période temporelle T . La formule $v = \frac{\lambda}{T}$ permet alors de calculer la vitesse de propagation de l'onde.

2.2.2 **Positionnement épistémologique**

En nous référant à la représentation de Buty (2000), la simulation apparaît comme un plan intermédiaire entre le monde matériel et le monde des théories et modèles. En effet, cet emplacement permet de lever l'ambiguïté entre réel-virtuel. Dans notre recherche, les élèves ont déjà eu un contact avec le savoir concerné du point de vue théorique. C'est l'objet des cinq heures trente minute du cours sur la propagation des ondes mécaniques, ces séances de cours étant illustrées par des expériences réelles sur paillasse. A ce niveau, nous pouvons partir de l'hypothèse que le monde des théories et modèles est déjà installé, même en partie, et que celui du monde matériel (objets, instruments et phénomènes) est déjà pris en compte au cours de l'enseignement des ondes. Alors la simulation pourra occuper la place entre ces deux mondes. Du point de vue didactique, Beaufils et Richoux (2003, p. 13) considèrent que cela « *correspond à l'hypothèse qu'un tel intermédiaire favorise une mise en relation des événements et phénomènes du monde réel et l'interprétation du physicien en termes de théories et modèles* ».

2.2.3 **La place du modèle**

Dans notre cas, le modèle est pris en compte par le concepteur de la simulation et sa place dans la simulation est implicite, l'activité sur modèle n'est pas clairement annoncée. Néanmoins, le choix des situations nous semble permettre de placer l'activité sur le plan de la modélisation. C'est-à-dire que la simulation repose sur les principes de la théorie dans laquelle

le modèle est élaboré. Dans ce sens, la simulation, telle qu'elle est conçue, ne tient pas compte de la continuité du milieu, la corde est sous forme de points successifs et liés, le milieu est supposé infini, l'onde est alors progressive sans aucun amortissement des amplitudes. Cette modélisation permet la manipulation du modèle puisque la mise en fonction est programmée, donc les activités visent l'obtention des résultats numériques ou graphiques. Prenons l'exemple de la première activité, où nous avons demandé aux élèves de déterminer expérimentalement la célérité de l'onde qui se propage le long de la corde simulée, et cela à l'aide d'un chronomètre affiché au-dessous de la corde et une réglette fournie par la simulation pour mesurer la distance. Il reste finalement à faire les calculs de célérité qui est égale au rapport de distance par la durée de parcours.

2.2.4 La place des registres sémiotiques

Notons que l'activité des élèves sur simulation s'appuie naturellement sur l'obtention ou la manipulation de représentations sémiotiques qui peuvent être des courbes, des valeurs numériques, des expressions mathématiques, des schémas, des dessins, etc. L'élève est amené à travailler dans le monde des modèles et des théories physiques, et ainsi, très concrètement, à manipuler un « monde de signes » (Beaufils et Richoux, 2003). Ces derniers ajoutent que « l'espace de réalité » de l'élève n'est pas limité alors aux objets et aux événements, mais doit inclure aussi un « monde de signes ». Les mêmes auteurs proposent le schéma ci-dessous, qui sépare ce qui relève de l'espace de réalité, au sens de Malafosse, et ce qu'ils ont appelé « l'espace des signes ».

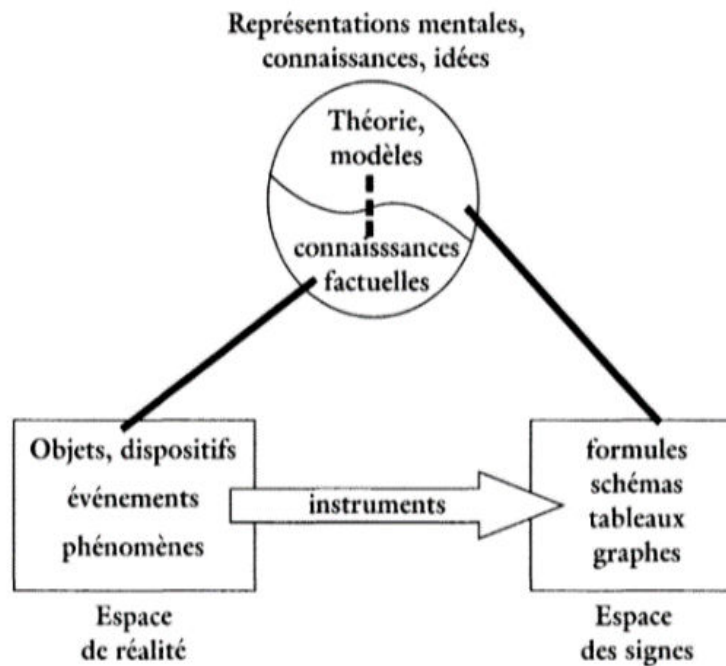


Figure 5. 2: Un espace des signes qui fait partie du « réel » de l'élève en classe de physique (Beaufils et Richoux, 2003).

Ce constat nous engage dans une étude des registres sémiotiques. Nous avons vérifié le rôle et l'emplacement des représentations figurées dans la simulation et de plus, l'aspect de la corde qui traduit la sinusoïde des espaces. Il existe d'autres informations : valeur numérique du temps d'un chronomètre intégré qui suit le mode (normal, ralenti ou très ralenti), variation de l'amplitude du signal et sa fréquence. Pour ces deux grandeurs, il n'y a pas de valeur numérique. Nous voyons que ces différents registres numériques graphiques et schématiques sont en concordance avec les activités proposées aux élèves durant la séance des travaux pratiques.

2.2.5 La place de la stratégie de confrontation

L'étude de plusieurs travaux sur les séances d'enseignement intégrant une simulation en sciences physiques montre l'importance de la place dédiée à la confrontation des conceptions des élèves avec l'expérience sur modèle contenu en arrière-plan de la simulation (Richoux et Beaufils, 2005 ; Michelet, Luengo et Adam, 2006). Beaufils (2009) va plus loin et considère que « *l'écran de l'ordinateur est rapidement devenu le lieu privilégié de ce qu'il convient d'appeler la « confrontation modèle – mesures », où se superposent la représentation du réel et celle du modèle* » (Beaufils, 2009, p. 15). Ce constat nous a conduits à construire un scénario

basé sur la stratégie de confrontation du modèle théorique à l'expérience en nous inspirant du schéma proposé par Guillon (1995).

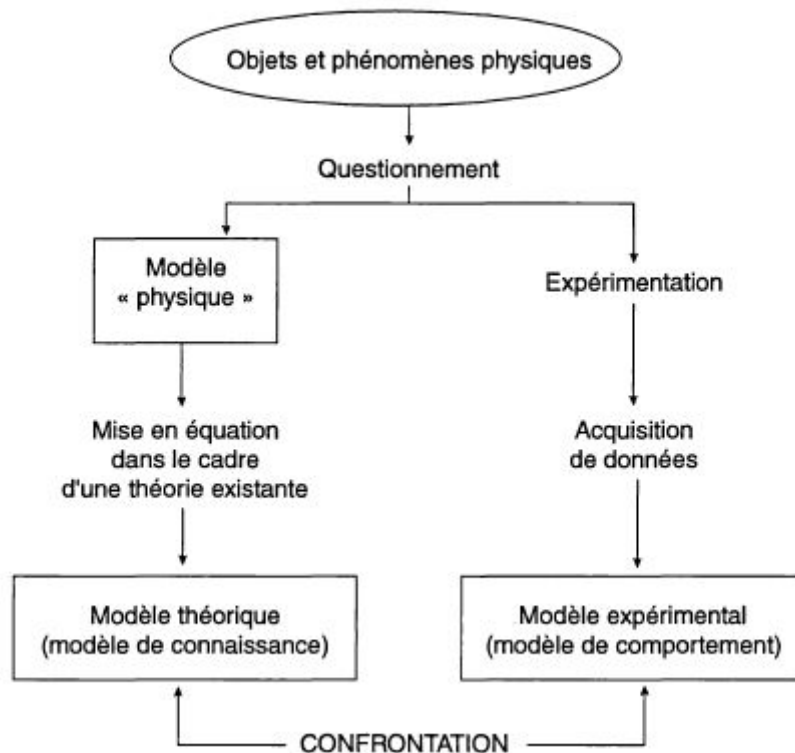


Figure 5. 3: Démarches du physicien (d'après le schéma synoptique de Guillon, 1995, p.116)

Ce choix est justifié par le fait que nous souhaitons que les élèves manipulent sur simulation de façon très proche de ce qu'ils font au cours des travaux pratiques sur paillasse donc sur des expériences réelles.

2.3 *La place de la démarche d'investigation*

Pour que nos activités proposées aux élèves dans notre projet de scénario pédagogique aillent vers une démarche de type hypothético-déductive, nous nous sommes situés dans le cadre de la démarche d'investigation scientifique. Notons ici que la définition de la démarche d'investigation n'est pas encore stabilisée puisque cette démarche dépend de plusieurs facteurs allant des connaissances de l'enseignant, l'âge des élèves, les compétences linguistiques, etc. (Boilevin, 2013). Nous devons donc choisir celle que nous pensons la plus adéquate avec notre projet. A cet effet, nous choisissons la démarche d'investigation aux sens de Morge et Boilevin (2007). Ces derniers considèrent qu'un apprentissage fondé sur l'investigation en classe suppose que les élèves soient engagés dans :

- Des contenus scientifiques ;

- Des tâches ou des problèmes à résoudre requérant des activités cognitives et expérimentales ;
- Des discussions argumentatives et des communications entre pairs ;
- Une structuration des connaissances (métacognition).

Le travail mené par Morge et Boilevin (2007) « *montre que la démarche d'enseignement par investigation doit prendre en considération les élèves en les amenant à s'approprier les tâches proposées par leur professeur mais aussi en les faisant participer à la validation des productions individuelles et collectives* » (Boilevin, 2013, p. 192).

Nous pensons alors que la démarche d'investigation au sens de Morge et Boilevin (2007) nous permettra de nous placer dans un cadre de travail mettant en jeu la simulation et l'investigation. Ces auteurs donnent une définition d'une séquence d'investigation qui n'est pas limitée aux expériences ordinaires (Morge et Boilevin 2007, p. 45). « *Une séquence d'enseignement serait une séquence d'investigation si l'élève effectue un ou des apprentissages au cours de la séquence, en réalisant des tâches qui ne sont pas uniquement des tâches d'ordre expérimental, et en participant à la validation des productions des autres élèves, autrement dit en participant au choix argumenté entre plusieurs méthodes, plusieurs hypothèses, plusieurs protocoles expérimentaux, plusieurs explications, plusieurs modèles* ». Cette définition pourrait apporter ainsi de la flexibilité aux enseignants pour réaliser des séquences d'investigation sur simulation, et cela dans un cadre socioconstructiviste. C'est ce que nous visons avec le scénario pédagogique qui sera adopté lors de la séance de travaux pratiques sur simulation des ondes. C'est une séance formée d'une série de séquences d'investigation. Elle est fondée sur l'investigation par simulation des ondes, au cours de laquelle l'élève réalise des tâches qui ne se limitent pas à l'ordre expérimental. Il participe aussi à la validation des propositions des autres élèves, en faisant des choix argumentés entre plusieurs méthodes plusieurs hypothèses, et de résoudre enfin le conflit cognitif avec les lois de la physique, lorsque les lois font l'objet d'un enseignement antérieur.

CHAPITRE 6

LE SCENARIO PEDAGOGIQUE, APPROCHE

D'ENSEIGNEMENT PAR PCDR

1 Introduction

Nous cherchons à répondre à une de nos questions de recherche suivante : une séance d'enseignement des ondes sur simulation fondée sur la démarche d'investigation, au sens de Morge et Boilevin (2007), permet-elle de surmonter quelques difficultés des élèves au cours de l'enseignement des ondes ?

Nous élaborons les situations d'enseignement qui sont fondées sur les informations que nous avons recueillies dans la revue de littérature didactique sur l'enseignement des ondes et nous procédons à une analyse du milieu matériel à la disposition des élèves.

Une analyse *a priori* des activités sur simulation était nécessaire avant de passer à l'élaboration du scénario pédagogique proposé, et cela en passant par une étude épistémologique et synoptique de la simulation choisie. Nous décrivons globalement ces activités en précisant les différentes étapes de l'approche que nous avons nommée approche d'enseignement par « PCDR ». Puis nous poursuivons l'analyse de ce qui s'est passé réellement en classe lors de l'enseignement par « PCDR » en cherchant à identifier le processus de la mise en œuvre de cette approche en classe. Cette méthodologie que nous allons expliciter dans le chapitre suivant s'inscrit dans le cadre théorique de la théorie de l'action conjointe en didactique. Ce cadre nous permet d'étudier l'analyse en termes de jeux d'apprentissages et de dialectique contrat milieu et constituera notre analyse *a posteriori*.

2 Elaboration des situations d'investigation de type PCDR

La séance de type investigation est fondée sur quatre moments organisés systématiquement comme suit : Préviation, Confrontation, Discussion, Résolution. Par la suite, nous nommons cette méthode enseignement par PCDR. Cette séance de travaux pratiques est constituée d'une succession d'activités d'ordre conceptuel qui seront à la charge des élèves.

2.1 *Les différents moments du scénario*

2.1.1 **Moment de prévision**

Les questions de prévision sont « *des questions que la didactique a montrées comme "sensibles" et pouvant déboucher sur des conflits cognitifs a priori favorables à la structuration des apprentissages* » (Richoux et Beaufile, 2005, p. 302). Les prévisions des élèves seront fondées sur les acquis au cours de l'enseignement antérieur sur les ondes mécaniques. Les

élèves vont ensuite confronter cette question de prévision à une simulation informatique. Il s'agit en l'occurrence d'une animation Flash où le mouvement d'une corde est entretenu par une source d'onde dont l'utilisateur pourra communiquer à la corde des excitations d'amplitude et de fréquence réglable ou bien ralentir le mouvement ou même l'arrêter.

2.1.2 **Moment de confrontation**

Il s'agit pour l'élève de confirmer ou non sa réponse, en confrontant le résultat trouvé en manipulant dans la simulation avec la réponse choisie à la question de prévision.

2.1.3 **Moment de discussions**

Suite à cette confrontation s'installe alors un débat scientifique au sein des petits groupes constitué chacun de deux élèves, et cela en présence de l'enseignant. En particulier, l'action de ce dernier vise à animer et orienter ces débats. Notons ici qu'au cours d'une séance des travaux pratiques, la classe est déjà divisée en deux groupes d'élèves enseignés séparément par leur enseignant en deux séances successives d'une heure trente minutes chacune.

2.1.4 **Moment de résolution**

C'est un moment où les discussions se font sous forme de réunion plénière où les élèves sont invités à résoudre les conflits déjà créés, et cela avec l'aide de leur enseignant, en s'appuyant en particulier sur les lois de la physique déjà étudiées pendant les séances du cours sur les ondes. Nous attendons à travers ces tâches un changement au niveau du raisonnement des élèves.

2.2 ***Exemple d'enchaînement des étapes du scénario d'enseignement par PCDR***

Le diagramme suivant donne un exemple d'enchaînement des différents moments : Prévision, Confrontation, Discussion, Résolution. Cela est prévu dans l'analyse *a priori* de la première question. C'est le cas des élèves qui présente dans leur raisonnement la conception hybride capital.

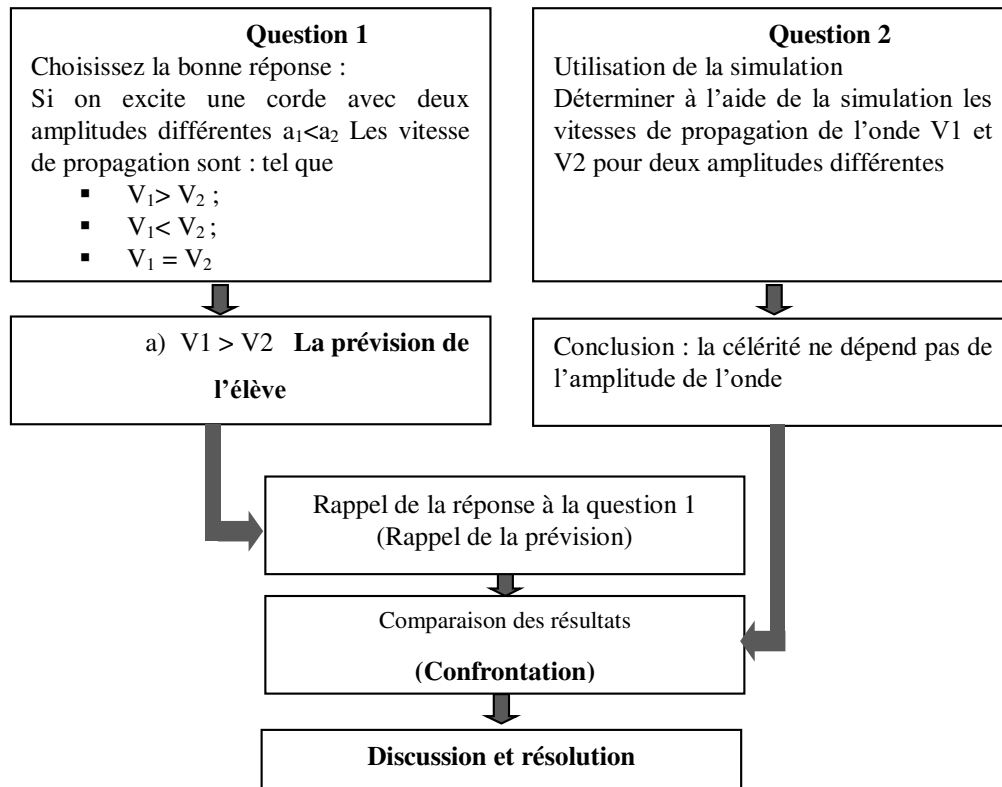


Figure 6. 1: Exemple d'enchaînement des étapes du scénario d'enseignement par PCDR

3 Le contenu de la séance du T.P.

Nous présentons la fiche de travaux pratiques telle que nous l'avons conçue préalablement avant la rencontre avec l'enseignant. Cette fiche tient compte d'une part, des différentes étapes de l'approche d'enseignement par PCDR (prévision, confrontation, décision et résolution) et, d'autre part, des conceptions hybride capital et d'onde serpente. Elle contient deux parties, une partie sur la vitesse de propagation d'une onde, et l'autre partie sur l'aspect de la corde. Chaque partie comporte une question que nous avons appelée question de prévision, qui est sensible aux conceptions erronées des élèves. Après la réponse aux questions, l'enseignant demande aux élèves, installés auparavant sur les ordinateurs mis à leur disposition, de réaliser une activité sur simulation. En effet, cette fiche donne les grandes lignes directrices du scénario pédagogique de la séance du TP par PCDR.

Le scénario pédagogique prévu pour cette séance fait l'objet d'une des deux séances de formation avec l'enseignant pour aboutir à un scénario détaillé dont l'enseignant a participé à sa construction. Notons qu'une analyse de ce scénario sera réalisé plus loin.

Nom : **Prénom :** **Classe :** 4Sc.....

TP : Physique
Les ondes mécaniques progressives
Propagation d'une onde sinusoïdale entretenue

1) La vitesse de propagation d'une onde

1. Question n°1 : Choisir la bonne réponse

Si on excite une corde élastique avec deux amplitudes différentes $a_1 < a_2$ Les vitesses de propagation de l'ébranlement seront :

- a) $V_1 > V_2$ ☐
b) $V_1 < V_2$ ☐
c) $V_1 = V_2$ ☐

2. Mesure de la vitesse de propagation

a). Mode opératoire

Se placer en mode impulsion.

Il suffit alors de choisir (et de mesurer) une distance à l'aide des deux barres de visualisation. On mesure ensuite le temps que met l'impulsion pour aller de la première à la deuxième barre de visualisation à l'aide de l'outil chronomètre (la mesure est facilitée si l'on utilise le mode ralenti).

Le calcul du rapport de la distance sur le temps permet alors d'obtenir la valeur de la vitesse de propagation : $V = \frac{d}{t}$

b) Activité n° 1

Utiliser la simulation et déterminer pour deux amplitudes différentes les vitesses de propagation V_1 et V_2

	Amplitude a_1	Amplitude a_2
Distance en m	$d_1 = \dots\dots\dots$	$d_2 = \dots\dots\dots$
Temps t en s	$t_1 = \dots\dots\dots$	$t_2 = \dots\dots\dots$
Vitesse $V = \frac{d}{t}$ en ms^{-1}	$V_1 = \dots\dots\dots$	$V_2 = \dots\dots\dots$

c) Activité n° 2

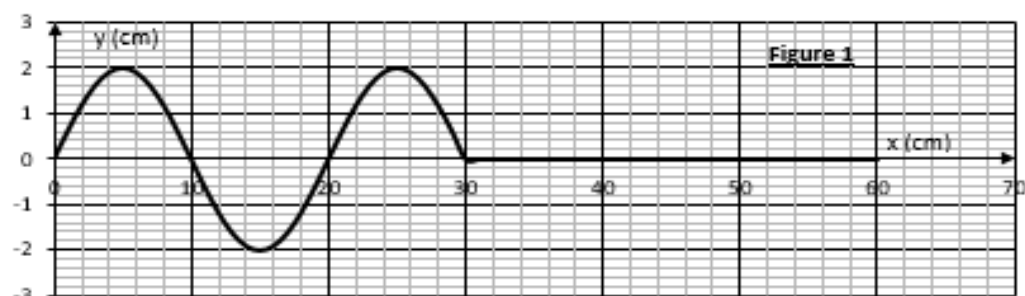
Utiliser le mode continue et déterminer la vitesse de propagation de l'onde pour une amplitude quelconque à partir de la mesure de la longueur d'onde λ et de la période T avec $V = \frac{\lambda}{T}$

$\lambda = \dots\dots\dots m$ $T = \dots\dots\dots s$ $V = \frac{\lambda}{T} = \dots\dots\dots ms^{-1}$ $V = \dots\dots\dots ms^{-1}$

d) Conclusion.
.....
.....
.....

II) Aspect de la corde

On donne ci-dessous l'aspect de la corde à un instant de date t .

**1) Questions**

a) Question n°2 :

Peut-on prévoir à partir de la courbe le sens de déplacement de la source d'onde S ($x=0\text{m}$), si oui dans quel sens ?

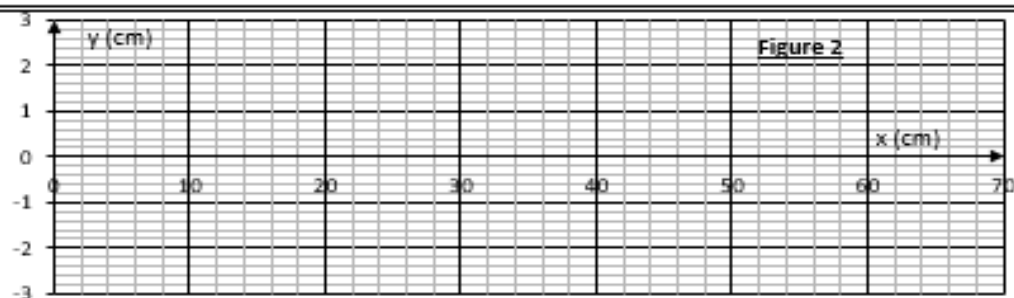
b) Question n°3 :

Comment se déplace le front d'onde ?

c) Question n°4

Représenter sur la figure 2 l'aspect de la corde à instant de date t' légèrement supérieur à t (on peut prendre l'instant t' lorsque x_f avance de $\frac{\lambda}{4}$)

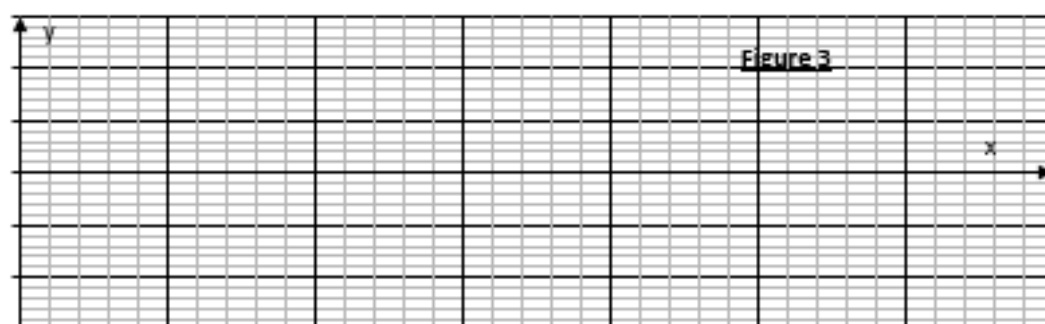
N.B. Aucun développement théorique n'est demandé.



3) Activité n° 3

Choisir le défilement du temps très ralenti, actionner le mode continue, arrêter la simulation lorsque le front d'onde $x_f = \frac{3}{2} \lambda$ environ, tracer soigneusement sur le figure 3 la courbe décrite sur l'écran. Actionner le chronomètre Démarrer la simulation et l'arrêter après environ 1s reproduire la courbe sur le même repère d'axe de la figure 3.

N.B : On peut fixer l'amplitude et la fréquence et refaire la tâche plusieurs fois pour avoir les deux situations voulues.

**4) Activité n° 4**

a) Reprendre les questions 1 et 2

- Question n°1 : Sens de déplacement de la source :
- Question n°2 : Sens de déplacement du front d'onde :

b) Reprendre la tâche n°1 et tracer la courbe demandée sur la figure 1.

c) Considérons le point M d'abscisse $x=10\text{cm}$. Déduire le sens du mouvement du point M à l'instant t et son déphasage par rapport à la source.

Sens du mouvement Déphasages

4) Conclusion :**5) Exploitation des résultats**

Critiquer votre réponse de la tâche 2 et 1 P

4 Préparation de l'enseignant à la nouvelle approche d'enseignement par PCDR

Nous avons programmé des séances de formation de l'enseignant sur l'approche d'enseignement par PCDR, entre la dernière séance de cours ordinaire sur les ondes et la séance de travaux pratiques.

Au cours de cette étape, nous proposons à l'enseignant un scénario pédagogique sur simulation des ondes, scénario qui repose sur une démarche d'investigation que nous avons définie précédemment (au sens de Morge et Boilevin, 2007). Rappelons qu'en Tunisie la démarche d'investigation n'est pas encore officialisée. Pour que l'enseignant volontaire, novice dans les démarches d'investigation, acquière le scénario proposé et puisse aussi gérer efficacement les réunions plénières avec ses élèves, nous l'avons soumis à une formation accélérée de deux séances de deux heures chacune que nous avons animée tout autour de l'enseignement par PCDR, ces séances sont décalées d'une semaine.

4.1 *La première séance de formation*

Cette séance s'est déroulée au laboratoire du lycée, le lundi 2 mars 2015 entre 10h et 12h. C'est une séance qui porte sur un enchaînement de quatre moments de l'approche d'enseignement par PCDR. Nous avons expliqué chaque moment et son rôle dans l'acquisition du savoir chez les élèves. Ensuite, nous avons discuté ensemble sur les difficultés rencontrées par les élèves au cours de l'enseignement des ondes mécaniques. Le point de vue de l'enseignant était centré sur le manque de matériel nécessaire au laboratoire. Nous avons discuté aussi sur les conceptions hybride capital et celle de l'onde serpente et cela sans entrer dans le détail, ni dans la dénomination des conceptions ni dans leurs origines. Nous étions obligés à ce stade du travail de faire une transposition de cette partie purement didactique. Enfin, nous avons manipulé à tour de rôle la simulation en expliquant les fonctionnalités : usage de chaque bouton et les différents degrés de liberté possible, tels que celui de l'amplitude, de la fréquence du signal. Nous avons ainsi expliqué les différents modes de mouvement de la corde normal, ralenti, très ralenti ou l'arrêt. Nous avons présenté la fiche de TP à distribuer aux élèves au début de la séance. Cette fiche sera l'objet de notre discussion à la prochaine séance de formation. C'est au cours de cette deuxième séance de formation que nous allons préparer ensemble et en détail le scénario final, ainsi que la répartition horaire de toutes les activités. En

conséquence, nous avons donné l'occasion à l'enseignant durant toute une semaine de se familiariser avec la simulation.

4.2 La deuxième séance de formation

Nous nous sommes réunis une semaine après, le lundi 9 mars 2015 au laboratoire du lycée entre 10h15 et 11h40 avec un enregistrement audio à l'appui. Nous avons débuté la séance par une discussion sur le contenu de la fiche de TP. L'enseignant avait fait le nécessaire chez lui pour être prêt à cette deuxième séance de formation. Ensuite, nous nous sommes engagés dans l'organisation des différentes étapes du scénario pédagogique en accordant à chaque étape la durée prévue. Nous avons alors discuté des détails du scénario que nous avons transcrit dans un tableau, selon la responsabilité de chaque intervenant, enseignant et élèves, suivant la durée de chaque étape. Le résultat de ce travail coopératif est traduit par le tableau suivant.

Etape	Durée en min	Responsabilité de l'enseignant	Responsabilité de l'élève
1 ^{ère}	20	▪ Distribuer les fiches du TP. ▪ Expliquer aux élèves les questions à ce que les élèves répondent sur la même fiche. ▪ Veiller que les élèves répondent individuellement. ▪ Encercler les réponses de tous des élèves en rouge, pour qu'ils ne soient pas modifiées et cela pour l'authenticité de nos statistiques.	▪ Répondre à quatre questions de prévision c'est un travail individuel.
2 ^{ème}	10	▪ Expliquer les différentes fonctionnalités des boutons de la simulation ▪ Aider ces élèves à se familiariser avec la simulation	▪ Manipuler la simulation et découvrir ce qu'on pourra faire avec
3 ^{ème}	15	▪ Présenter les deux tâches. ▪ Donner de l'aide aux élèves qui n'ont pas encore la capacité à manipuler la simulation.	▪ Réaliser les deux tâches qui consistent à déterminer la célérité de l'onde par deux méthodes ▪ La première $V = \frac{d}{\Delta t}$ ▪ La deuxième $V = \frac{\lambda}{T}$
4 ^{ème}	5	▪ Veiller que les élèves discutent entre eux en petit groupe de deux élèves ▪ Orienter les débats à des débats scientifiques	▪ Vérifier les résultats trouvés avec la 1^{ère} question de prévision ▪ Discuter entre les pairs
5 ^{ème}	10	▪ Gérer des discussions plénières afin de résoudre avec les élèves le conflit par les lois de la physique. ▪ Les aider à formuler la conclusion.	▪ Participer à la discussion pour résoudre le problème ▪ Formuler la conclusion ▪ Critiquer la réponse de la question de prévision si possible.
Fin de la partie consacrée à la célérité de l'onde			

6 ^{ème}	10	▪ Expliquer la première tâche de la deuxième partie ▪ Faire un exemple tracé la sinusoïde des espaces de l'onde simulée sur le tableau blanc à l'aide d'un data Chow ▪ Les inciter à refaire la même expérience plusieurs fois et à utiliser le mode très ralenti	▪ Tracer deux sinusoïdes des espaces sur le même graphique pour deux instants très proches ▪
7 ^{ème}	5	▪ Orienter ces élèves vers la deuxième tâche en exploitant les deux courbes précédentes	▪ Répondre aux questions en petit groupe de travail en se basant sur leurs sinusoïdes des espaces obtenues
8 ^{ème}	10	▪ Demander ces élèves de vérifier les résultats obtenus par la réponse des questions de prévisions de la deuxième partie	▪ Vérifier et confronter les résultats obtenus par simulation avec les questions de prévisions, discuter entre pairs pour chercher des explications
9 ^{ème}	5	▪ Gérer des discussions plénières afin de résoudre avec les élèves le conflit par les lois de la physique. ▪ Les aider à formuler la conclusion.	▪ Participer à la discussion pour résoudre le problème ▪ Formuler la conclusion ▪ Critiquer la réponse de la question de prévision si possible
Fin de la séance			

Tableau 6. 1: Le scénario pédagogique prévu par le chercheur et l'enseignant

A la fin de ce travail, nous avons expliqué à l'enseignant que nous avons besoin de tous les écrits des élèves pour une étude statistique de leurs productions. Il est donc nécessaire avant de passer au moment de la confrontation que l'enseignant encercle la réponse choisie par l'élève sur sa copie, et tout cela dans le but de réaliser l'authenticité de l'étude statistique sur les conceptions des élèves. En effet, par cette méthode, l'élève ne pourra pas modifier sa réponse sur la question de prévision.

CHAPITRE 7

METHODOLOGIE SPECIFIQUE A L'ANALYSE DE LA SEANCE D'ENSEIGNEMENT PAR PCDR

1 Introduction

Nous débutons ce chapitre par la présentation de la méthodologie spécifique à cette partie de notre travail de recherche. En effet, notre travail s'articule autour d'une idée principale fondée sur une comparaison entre ce qui est prévisible dans le scénario pédagogique préparé et ce qu'il s'est passé réellement lors de la mise en œuvre de ce scénario en classe (Ben Jemaa et Boilevin, 2016b).

2 Choix chronologique de l'emplacement de la séance d'enseignement par PCDR

Pour prendre en compte certaines des contraintes déjà évoquées, notamment celle sur la simulation, et pour ainsi répondre au choix de la place de la simulation entre le monde matériel et celui des modèles (Buty, 2000), nous pensons que l'intégration de la simulation doit être faite après enseignement sur les ondes mécaniques. La date de la séance est choisie par l'enseignant selon sa logique d'organisation des séances de travaux pratiques et celle du cours. Rappelons que les trois premières séances sont consacrées à l'étude du contenu scientifique tel qu'il est décrit dans le programme officiel du ministère d'enseignement tunisienne (Chapitre 4, page 118).

Le diagramme suivant, permet de circonscrire cette séance (encadrée en rouge) dans le processus suivi par l'enseignant au cours de l'enseignement des ondes mécaniques.

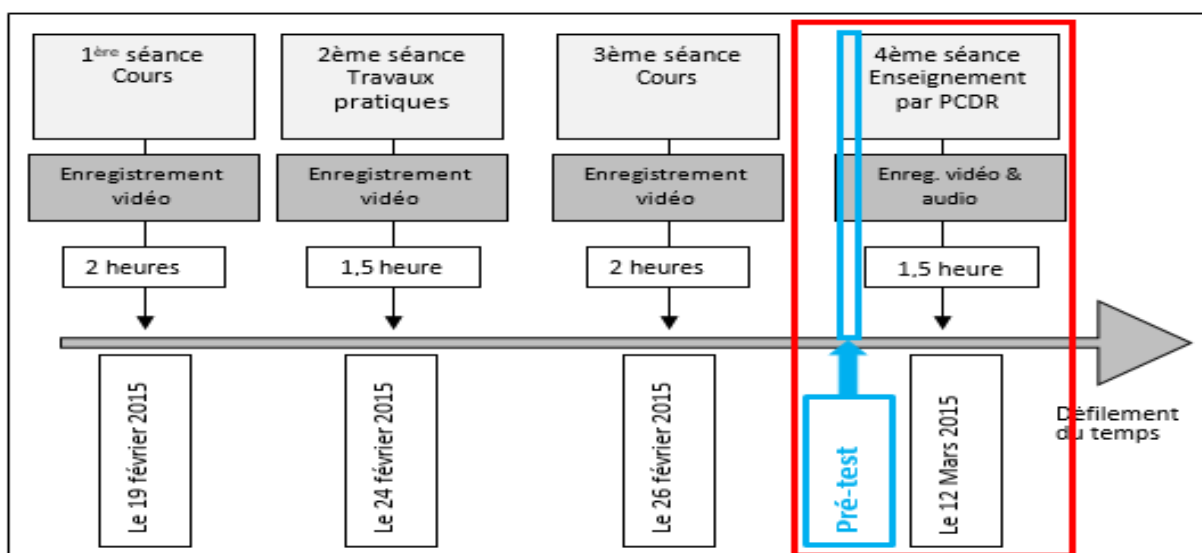


Figure 7. 1: Vue d'ensemble d'enchaînement des séances suivies

3 Principe de la méthodologie

Nous suivons dans cette étude une méthodologie déjà adoptée par Cross et Grangeat (2014). Elle consiste à comparer deux types d'analyse : la situation comme nous l'avons prévue et la situation telle qu'elle est faite en classe. « *Cette analyse de ce qui est prévisible est comparée à ce qui s'est passé effectivement, en termes de jeux d'apprentissage. Cette façon de procéder nous permet de mettre en évidence l'action conjointe dans la mise en œuvre des démarches d'investigation* » (Cross et Grangeat, 2014, p. 164). La situation telle qu'elle est prévue repose sur le scénario élaboré avec l'enseignant (voir chapitre 4). Elle est comparée avec celle réalisée au cours de la séance. L'idée est de réaliser un découpage de chaque séance d'enseignement en termes de jeux d'apprentissage prévus et joués réellement. Ces derniers vont être soumis à une autre catégorisation en jeux génériques et jeux spécifiques. A l'instar de Marlot (2008), un jeu est dit spécifique lorsque les savoirs en jeu font partie de l'enseignement visé au cours de la séance, un jeu est dit générique lorsque les savoirs en jeu peuvent être utilisés dans plusieurs situations d'enseignement et appartiennent ainsi aux habitudes d'action dans la classe.

Cette méthodologie nous permet de prendre en compte l'action conjointe dans la mise en œuvre des démarches d'investigation. Cross et Grangeat (2014) ajoutent que l'analyse en termes de jeux d'apprentissage et de jeux épistémiques d'une séance de classe, fondée sur l'investigation observée, permet de mettre en évidence différents niveaux de cohérence entre contrat et milieu. Nous pensons que ce découpage en termes de jeux d'apprentissage et de jeux épistémiques permettra aussi d'étudier de près ce qui s'est passé réellement en classe et pouvant entraîner un changement conceptuel au niveau du raisonnement chez les élèves. Cela nous permettra ainsi de donner des éléments d'évaluation de l'efficacité d'un enseignement fondé sur une démarche d'investigation et précisément sur l'approche d'enseignement par PCDR.

4 Contexte de l'étude

4.1 La classe observée

Notre étude se déroule dans la continuité de celle suivie pendant les séances de cours ordinaire sur les ondes. Rappelons que cette classe est constituée de 21 élèves francophones, soit 16 filles et 5 garçons en fin de secondaire scientifiques. Avec l'accord de l'enseignant, nous allons filmer les deux séances des deux groupes d'élèves. Mais nous n'allons analyser qu'une

seule séance sachant qu'au cours d'une séance des travaux pratiques, la classe est déjà divisée en deux groupes d'élèves enseignés séparément par leur enseignant en deux séances successives. Lesquelles ont une durée d'une heure trente minutes chacune.

4.2 *Préparation de l'environnement*

Lors d'une séance de travaux pratiques, les élèves sont habitués à étudier dans un laboratoire de physique-chimie avec du matériel concret, pour réaliser généralement des expériences réelles sur paillasse. Cependant, cette séance de TP se déroulera exceptionnellement dans une salle spécialisée pour l'enseignement de l'informatique. Nous avons choisi une salle dans le même lycée qui comporte six bureaux avec leurs ordinateurs. Nous avons vérifié le bon fonctionnement de ces ordinateurs et nous avons installé la simulation sur le bureau de chaque ordinateur pendant une journée avant la séance d'étude.

4.3 *L'enregistrement vidéo des séances*

Les dispositifs d'enregistrement sont constitués de deux caméras et de cinq dictaphones numériques. Une première caméra mobile s'occupe des interactions entre le professeur et les élèves. Des consignes sont données au cameraman de rester au fond de la salle et de se focaliser sur les actions du professeur et des élèves et surtout de veiller à ce que son déplacement ne perturbe pas le déroulement de la séance. La deuxième caméra munie d'un grand angle est fixe, elle est posée sur un trépied et filme les élèves « de dos » et zoome éventuellement sur le tableau. Un dictaphone est posé sur la table de chaque groupe d'élèves pour enregistrer les discussions entre chaque paire d'élèves. La durée totale d'enregistrement est d'une heure trente minutes. Nous illustrons les champs des caméras par les deux photos suivantes.



Prise de vue de droite de la salle



Prise de vue de gauche de la salle

Figure 7. 2: Prise de vue de la salle de TP

4.4 *Outils de traitement des données*

Nos données sont donc constituées d'enregistrements vidéo de la séance d'enseignement sur simulation des ondes où la caméra principale suivait en permanence l'enseignant et les interactions enseignant élèves. La caméra fixe sert à gérer les imprévus des enregistrements de la première. En plus nous disposons des enregistrements audios des échanges verbaux dans chaque groupe d'élèves (au total quatre binômes).

Notre méthodologie correspond à deux types d'analyse, une analyse de ce que nous avons prévu dans le scénario pédagogique, en particulier de ce qui est attendu comme objectifs de la séance, et une analyse de ce qui s'est passé réellement au cours de l'enseignement.

PARTIE 3

ANALYSE DE L'ENJEU

CHAPITRE 8

METHODOLOGIE D'ANALYSE

1 Vue d'ensemble

Rappelons qu'au cours de la préparation du scénario pédagogique, nous avons décidé en commun, chercheur et enseignant, de proposer aux élèves de répondre dans un premier temps à toutes les questions de prévision des différentes activités, et cela en se basant sur l'enseignement supposé acquis des ondes mécaniques. A des fins de crédibilité des études statistiques, l'enseignant doit encrer en rouge les réponses des élèves, pour qu'il n'y ait pas de possibilités de modifications sur ces questions de prévisions. En effet, les élèves vont garder leurs copies jusqu'à la fin de la séance. Avant de rentrer dans les détails de chaque séance, nous proposons de décrire par le schéma ci-dessous succinctement le défilement des différentes tâches suivant un ordre chronologique prévu de la séance. Le diagramme suivant présente en premier niveau (coloré en bleu, en haut) les activités sans et avec simulation et en deuxième niveau la partie qui concerne les activités sur la célérité de l'onde (coloré en vert) et les activités sur l'aspect de la corde (coloré en bleu clair). La durée totale de la séance est d'une heure trente minutes.

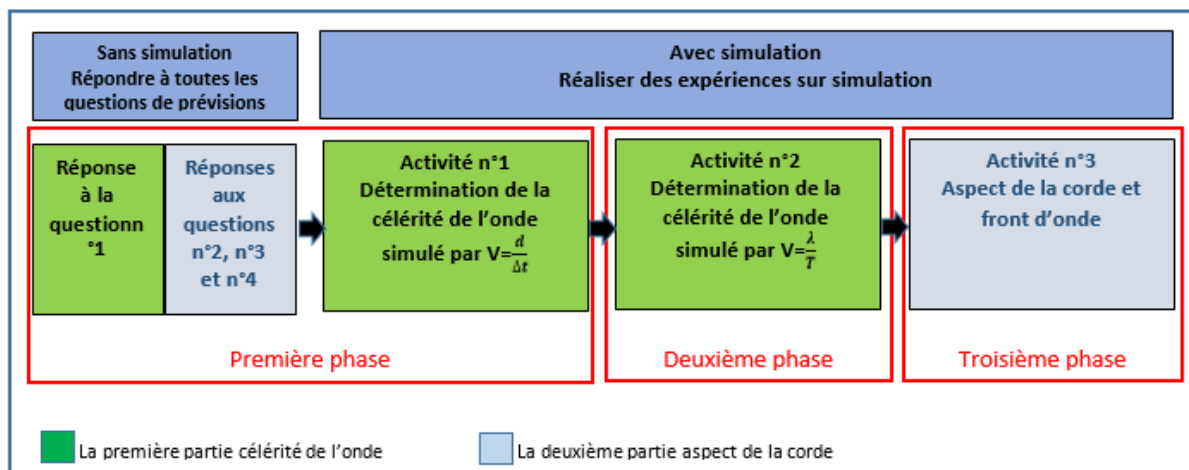


Figure 8. 1: Défilement des activités et des phases au cours de la séance

2 Les différents niveaux d'analyse

Nous avons choisi de commencer notre analyse par la construction du synopsis de la séance pour obtenir une vision globale de la séance d'enseignement. Nous continuons ensuite notre analyse selon des échelles de granularités différentes de plus en plus fine.

2.1 *Premier grain d'analyse, le grain « macro » : le synopsis*

D'un point de vue méthodologique, le synopsis (Sensevy & Mercier, 2007) permet une vision de l'ensemble de la séance étudiée, ce qui permet d'identifier les différentes phases, scènes et épisodes et permet ainsi d'accéder au découpage en jeux d'apprentissage des phases que nous jugeons intéressantes.

Notre synopsis de la séance présente une structuration particulière suivant les phases, les scènes, les épisodes et les événements remarquables qui caractérisent l'avancée du savoir :

- Une phase de la séance est une partie où l'enseignement vise un concept particulier en adoptant l'approche par PCDR qui comprend quatre moments : prévision, confrontation, discussion et résolution. Une phase est constituée de plusieurs scènes.
- Une scène permet une vision macroscopique de chaque partie de la séance. Elle engendre la progression du savoir chez l'élève. Les scènes peuvent correspondre à une activité des élèves permettant une avancée du savoir. Une scène peut engendrer un jeu d'apprentissage.
- Un épisode présente un acte joué par l'enseignant ou par l'élève. Il est identifiable par rapport à chaque rôle joué par l'un des intervenants, il peut représenter une transaction élève-enseignant. Les épisodes donnent une vision sur la structuration des scènes.
- Un événement remarquable (Jameau, 2012) engendre une prise de décision par l'enseignant, une situation de blocage qui empêche l'avancée du savoir, un déclenchement d'un nouveau jeu d'apprentissage non prévu ou l'élimination d'un jeu déjà prévu. Un événement remarquable sert alors à localiser les moments de la séance qui nécessite une transcription intégrale de l'échange verbal professeur-élèves ou élèves-élèves.

Temps	Phases	Scènes	Episodes	Déroulement		Evénements remarquables
				Action du professeur	Action de l'élève	

Figure 8. 2: modèle de structuration du synopsis

2.2 *Deuxième grain d'analyse : le grain « méso »*

Chaque phase de la séance est traitée séparément car chacune vise par l'enseignement par PCDR, un concept particulier. Il est nécessaire alors de délimiter chaque phase par deux

scènes correspondantes. En effet, chaque scène comporte en général plus qu'un seul épisode. Nous identifions ensuite les différentes scènes qui coïncident avec les moments de l'enseignement par PCDR. En effet, ces scènes correspondent aux jeux d'apprentissage potentiels. Après la localisation sur le synopsis des événements remarquables, nous réalisons toutes les transcriptions des épisodes correspondants. Par conséquent, nous détectons de près les origines de ces événements. Les décisions de régulation prises par l'enseignant aidant à l'avancée du savoir en jeu entraînent en général l'extinction d'un jeu prévu ou la création d'un nouveau jeu d'apprentissage. Enfin, nous réalisons tous les transcrits de la discussion plénière gérée par l'enseignant correspondant au dernier moment de l'enseignement par PCDR. C'est le moment qui entraîne la résolution des conflits cognitifs créés au cours du moment de la confrontation des conceptions hybride capital ou d'onde serpente par le résultat obtenu par simulation des ondes mécaniques.

Nous avons catégorisé les différents jeux d'apprentissage potentiels en trois catégories. Cette catégorisation a pour objectif d'identifier les jeux prévus de notre approche d'enseignement par PCDR. Elle permet d'identifier les jeux qui appartiennent à l'approche d'enseignement par PCDR des autres jeux qui sont joués au cours de la séance. Ainsi nous pouvons faire notre étude comparative entre les jeux prévus et ceux effectifs. En conséquence, nous avons défini les jeux comme suit.

2.2.1 **Jeu d'investigation :**

C'est un jeu d'apprentissage qui coïncide avec un des quatre moments de l'enseignement par PCDR : moment de prévision, moment de confrontation, moment de discussion et moment de résolution. En effet, ce jeu caractérise l'approche d'enseignement préconisée, et il caractérise en même temps l'avancée du savoir visé par cette séance d'enseignement.

2.2.2 **Jeu de préparation :**

C'est un jeu d'apprentissage nécessaire pour entamer un jeu d'investigation. Il s'agit d'un jeu initié par l'enseignant. Ce jeu dépend de la situation au cours de l'enseignement. Cela peut être un rappel d'un concept, d'une définition, d'une loi déjà rencontrée, d'une expérience déjà faite, etc. Cela peut aussi solliciter un changement au niveau du milieu ou du contrat. Ce jeu n'engendre aucun nouveau savoir à enseigner. C'est un jeu qui caractérise la mésogénèse, laquelle traduit l'évolution du milieu suite à l'introduction de nouveaux éléments.

2.2.3 Jeux de transition :

C'est un jeu d'apprentissage nécessaire au passage d'un jeu d'investigation à un autre. Ce jeu peut être initié par les intervenants d'une transaction didactique, il engendre un savoir non spécifique à la séance d'enseignement en cours. Il peut être un mode opératoire d'un dispositif expérimental spécifique ou non aux sciences physiques, des savoir-faire spécifiques aux mathématiques : courbe, résolution des équations, etc. Ce jeu est généralement prévu par l'enseignant.

2.3 *Troisième grain d'analyse : le grain « micro »*

Rappelons que nous avons déjà eu quatre enregistrements audios des quatre binômes d'élèves qui ont assisté à cette séance. Nous sommes revenus sur chaque bande audio et nous avons transcrit les moments de discussion des élèves que nous avons jugés intéressants. Nous parlons ici des passages qui correspondent au troisième moment de l'enseignement par PCDR. De plus, nous revenons à ces enregistrements pour la transcription des échanges entre binômes au cours des discussions plénières.

CHAPITRE 9

ANALYSE A PRIORI DES ACTIVITES DANS LA SEANCE D'ENSEIGNEMENT PAR PCDR

1 Introduction

Nous choisissons de découper dans un premier temps la séance en deux parties caractérisant le contenu scientifique ciblé. La première partie concerne la célérité de l'onde et la deuxième partie concerne la sinusoïde des espaces. Vu que l'enseignement par PCDR commence par une question dite de prévision et qu'elle est suivie d'une activité sur simulation, nous avons opté pour le choix d'un deuxième découpage en phases, sachant que les questions de prévisions sont regroupées au début de la séance, et cela avant tout travail sur simulation. Rappelons que ces questions nous ont servi dans l'analyse cognitive faite dans l'analyse préalable. Voici le diagramme qui montre le découpage en question.

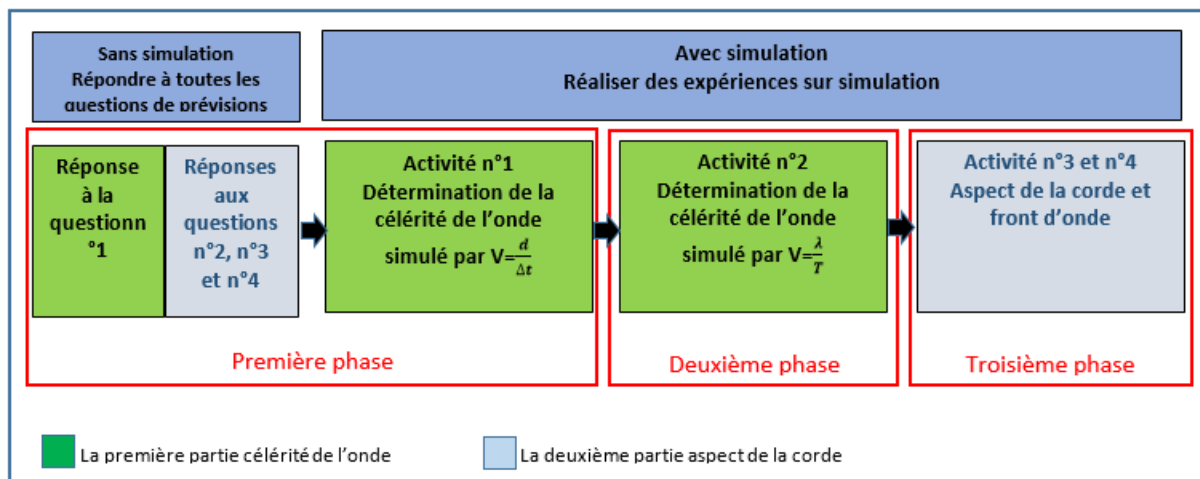


Figure 9. 1 : Découpage de la séance du TP en parties et en phases

Notre analyse *a priori* est une analyse qui consiste en un découpage de chaque séquence de la séance en termes de jeux d'apprentissage et de jeux épistémiques et une prévision des comportements des élèves vis-à-vis des conceptions en jeu (conception hybride capital et conception d'onde serpente).

2 La vitesse de propagation : la première et la deuxième phase

Cette partie comporte deux phases :

- La première phase est consacrée à la production de réponses aux questions de prévision et à la détermination de la célérité de propagation de l'onde, en utilisant comme formule le rapport de la distance parcourue par l'onde sur la durée de parcours.

- La deuxième phase consiste à la détermination de la célérité de l'onde par le rapport de la longueur d'onde λ par la période temporelle T .

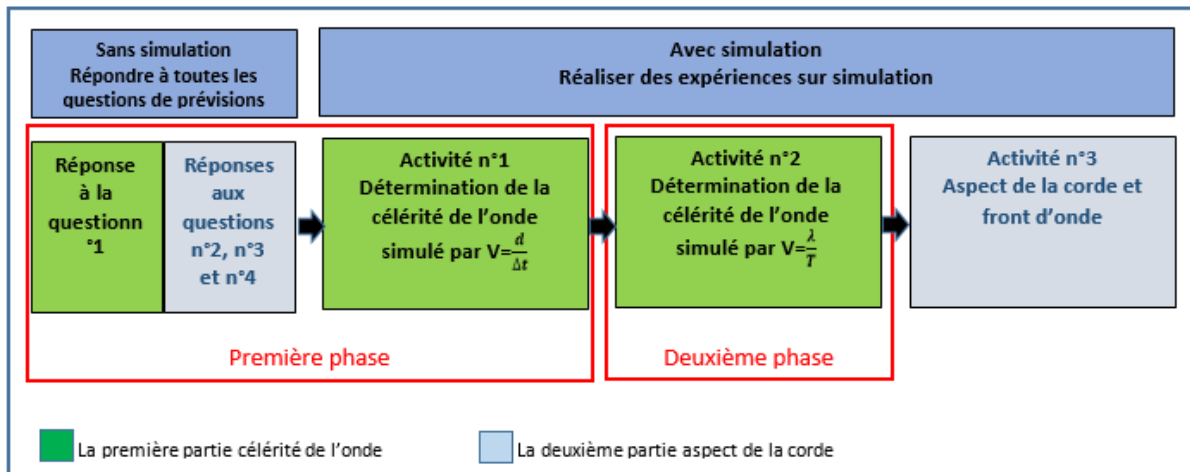


Figure 9. 2: Emplacement de la première et la deuxième phase dans la séance du TP

2.1 Première phase de la séance

Nous présentons dans le diagramme suivant d'abord l'étendue de la première phase

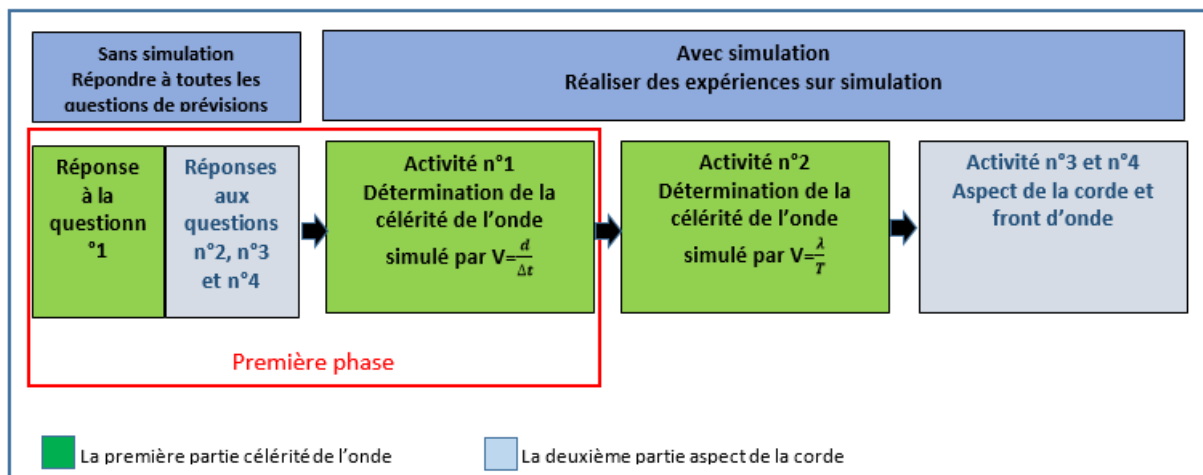


Figure 9. 3 : Emplacement de la première phase dans la séance du TP

2.1.1 Présentation du travail à réaliser par les élèves

Cette phase comprend trois étapes. Dans la première, on demande aux élèves de fournir des réponses à toutes les questions de prévision. L'activité n°1 consiste à déterminer la vitesse de propagation de l'onde par deux méthodes en se basant toujours sur la simulation.

2.1.1.1 *Première étape : réponse à la question de prévision*

Rappel de la question :

1. Question n°1 : Choisir la bonne réponse

Si on excite une corde élastique avec deux amplitudes différentes $a_1 < a_2$ Les vitesses de propagation de l'ébranlement seront :

- a) $V_1 > V_2$ ☐
 b) $V_1 < V_2$ ☐
 c) $V_1 = V_2$ ☐

Notons que cette question a un double intérêt. D'une part, nous visons à travers cette question l'identification éventuelle de la conception hybride capitale (Maurines et Mayrargue, 2001) issu d'un raisonnement substantialiste sur le concept onde, comme étant un mélange de force et d'énergie. D'autre part, la réponse à cette question constitue un premier moment indispensable à l'enseignement par PCDR. En effet, cette réponse va être considérée dans toute cette première partie, comme étant la prévision de l'élève, en particulier face au comportement de la vitesse de propagation d'une onde progressive le long d'une corde, et cela en fonction de la variation des amplitudes d'oscillation. Cette prévision sera considérée comme hypothèse de l'élève, hypothèse qui va être testée par le travail sur simulation, donc confrontée avec l'expérimentation.

2.1.1.2 *Deuxième étape, activité n°1 : Détermination de la vitesse de propagation, 1^{ère} méthode*

Nous donnons d'abord l'activité telle qu'elle est présentée aux élèves.

b) Activité n° 1

Utiliser la simulation et déterminer pour deux amplitudes différentes les vitesses de propagation V_1 et V_2

	Amplitude a_1	Amplitude a_2
Distance en m	$d_1 = \dots\dots\dots$	$d_2 = \dots\dots\dots$
Temps t en s	$t_1 = \dots\dots\dots$	$t_2 = \dots\dots\dots$
Vitesse $V = \frac{d}{t}$ en ms^{-1}	$V_1 = \dots\dots\dots$	$V_2 = \dots\dots\dots$

c) Activité n° 2

Utiliser le mode continue et déterminer la vitesse de propagation de l'onde pour une amplitude quelconque à partir de la mesure de la longueur d'onde λ et de la période T avec $V = \frac{\lambda}{T}$

$\lambda = \dots\dots\dots m$ $T = \dots\dots\dots s$ $V = \frac{\dots\dots\dots}{\dots\dots\dots} = \dots\dots\dots ms^{-1}$ $V = \dots\dots\dots ms^{-1}$

Pour réaliser cette activité, nous avons donné un mode opératoire écrit sur la fiche de l'élève dans le but de l'aider à manipuler la simulation. Cela consiste à se placer en mode impulsion, à choisir (et à mesurer) une distance à l'aide des deux barres de visualisation et de mesurer ensuite le temps mis par l'impulsion pour aller de la première à la deuxième barre de visualisation à l'aide de l'outil chronomètre (la mesure est facilitée si on utilise le mode ralenti). La célérité est enfin le rapport de la distance sur la durée du parcours.

2.1.2 Analyse a priori de l'activité n°1

Nous nous attendons à ce que la majorité des élèves choisissent la réponse b) c'est-à-dire : la vitesse de propagation de l'onde augmente si l'amplitude d'excitation augmente. C'est la manifestation de conception hybride capitale. La réponse à cette question sera la prévision de l'élève, c'est-à-dire que si l'amplitude de l'onde augmente la célérité l'est aussi. Cette prévision va être confrontée ensuite avec le résultat obtenu par la simulation, confrontation a priori devant déboucher sur un conflit cognitif.

Les élèves doivent effectuer l'expérience en manipulant la simulation pour déterminer deux grandeurs : la distance et la durée du parcours de l'onde. La figure suivante illustre le résultat du travail de l'élève. Les positions des barres de visualisation sont choisies arbitrairement.

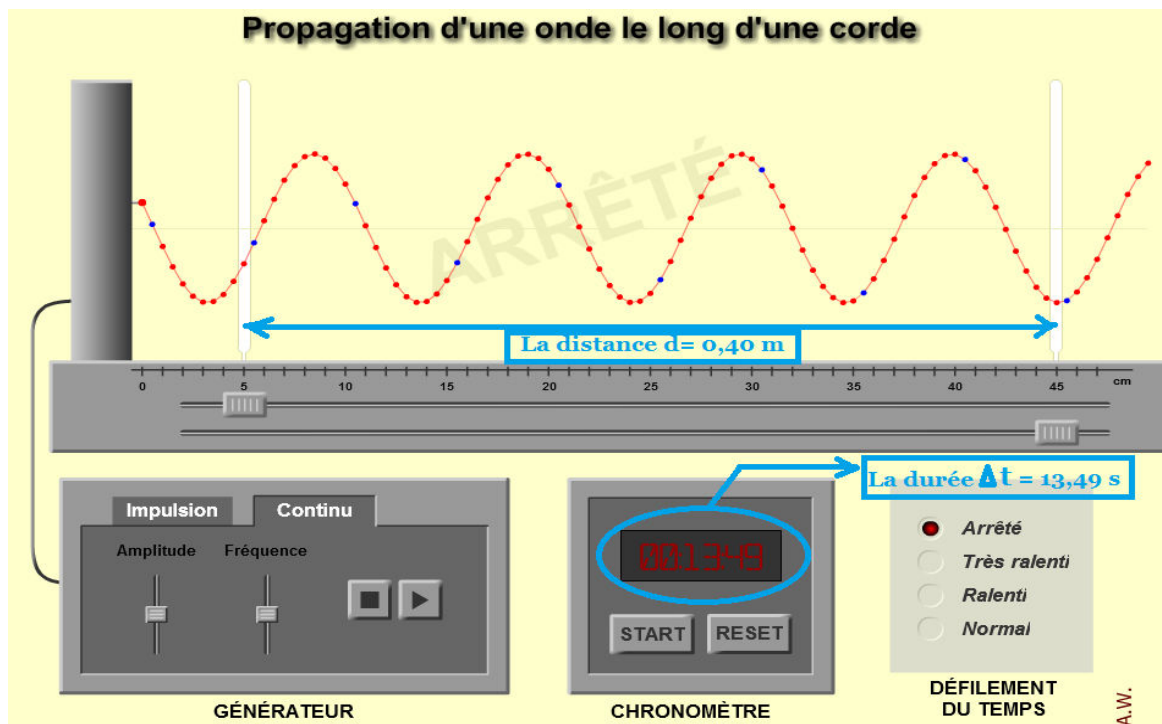


Figure 9. 4: Les données prises de l'écran de l'ordinateur

L'expression de la célérité $V = \frac{d}{\Delta t}$.

Dans notre cas $V = \frac{0,4}{13,49}$ alors la célérité $V = 29,6 \cdot 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$

Nous nous attendons à ce que la majorité des élèves soit capable de déterminer correctement la vitesse de propagation de l'onde et de trouver une vitesse de propagation de valeur pratiquement égale ou très proche à $V = 29,6 \cdot 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$. En plus, la valeur de cette vitesse de propagation est la même, à une erreur expérimentale près, quelle que soit la valeur de l'amplitude d'excitation.

Nous souhaitons aussi que ce constat mette en échec les conceptions spontanées de la majorité des élèves, qui sont face à un résultat contradictoire à leur prévision de départ (plus l'amplitude augmente plus la vitesse de propagation de l'onde augmente), ce qui met en doute leur raisonnement. Nous supposons alors qu'à cet instant s'installe un conflit cognitif intrapersonnel et un conflit sociocognitif entre les apprenants. A ce stade, l'enseignant intervient pour animer le débat et l'orienter vers les lois de la physique. Il doit en particulier mettre l'accent sur le fait que la vitesse de propagation de l'onde le long d'une corde dépend des caractéristiques de la corde elle-même, telles que sa longueur et sa masse linéique, et donc dépend du milieu de propagation et que lors du déplacement d'un ébranlement, il y a déplacement de l'énergie et non pas de matière (à grande échelle). Par la suite, l'enseignant pourra formuler avec ses élèves la conclusion de cette partie.

A la fin de cette phase, nous avons demandé aux élèves d'évaluer leurs réponses à la première question, pour avoir une idée sur l'origine de leur conception sur les ondes avant l'enseignement de cette séance. Nous nous attendons à des réponses diverses et cela dépendamment de la capacité de l'élève à porter un jugement sur ces connaissances.

2.1.3 Découpage des jeux didactiques potentiellement jouables

Dans notre analyse, nous découpons cette séquence en termes de jeux d'apprentissage. Nous donnons par la suite l'enchaînement des jeux comme nous l'avons prévu en termes de cinq jeux :

- **Jeu numéro 1 (J1)** : Préparation des élèves à la nouvelle approche d'enseignement par PCDR

Puisque c'est la première fois que les élèves découvrent cette approche, ou la démarche d'investigation d'une façon générale, il est nécessaire d'introduire ce jeu de préparation. En effet, ce changement va entraîner des changements au niveau du contrat didactique et du milieu. Ce jeu peut disparaître au cours de la séance.

- **Jeu numéro 2 (J2) :** Répondre à une question de prévision

Répondre individuellement à une question de prévision, qui sera considéré par la suite comme hypothèse de travail de l'élève.

- **Jeu numéro 3 (J3) :** familiarisation avec la simulation

C'est un jeu nécessaire pour que les élèves s'entraînent à l'utilisation de la simulation, découvrent les instruments virtuels de mesure (chronomètre, et réglette) et réalisent quelques essais.

- **Jeu numéro 4 (J4) :** Tester l'hypothèse par simulation

Utiliser la simulation pour déterminer la célérité de l'onde se propageant le long d'une corde à l'aide de la formule $V = \frac{d}{t}$

- **Jeu numéro 5 (J5) :** Discussion entre les pairs

Les résultats trouvés et la réponse sur la question de prévision ouvrent un débat scientifique entre les pairs.

- **Jeu numéro 6 (J6) :** Résolution par les lois et validation

Par la médiation de l'enseignant, ce dernier aide à résoudre le conflit par les lois de la physique déjà rencontrées en cours.

- **Jeu numéro 7 (J7) :** Critique de la réponse à la première question

L'élève est libre de porter une critique à sa réponse à la question de prévision.

2.2 *Deuxième phase de la séance*

Cette phase consiste à la détermination de la vitesse de propagation par une méthode différente de la première et en se basant toujours sur la simulation.

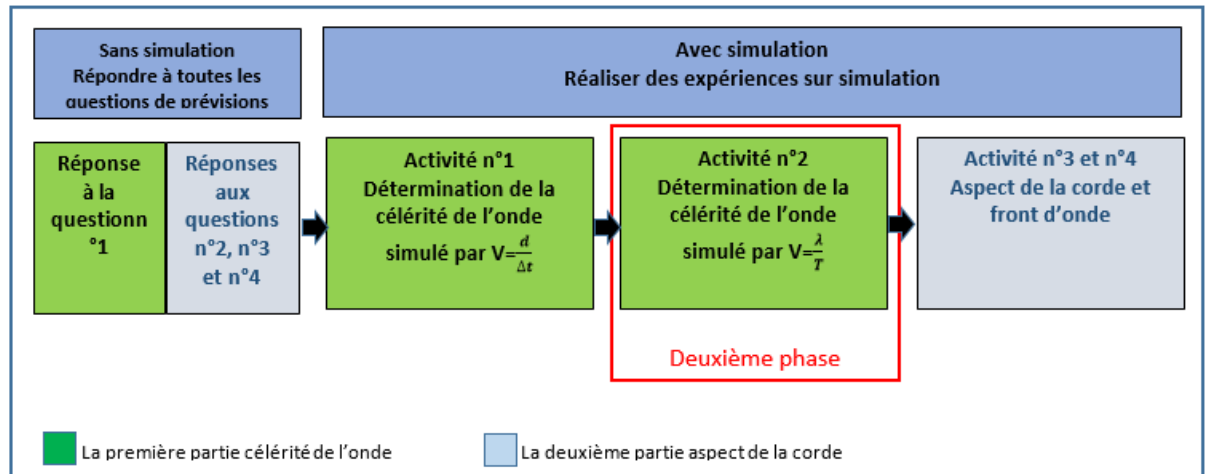


Figure 9. 5: Emplacement de la deuxième phase dans la séance du TP

2.2.1 Présentation de l'activité à réaliser par les élèves

c) Activité n° 2

Utiliser le mode continue et déterminer la vitesse de propagation de l'onde pour une amplitude quelconque à partir de la mesure de la longueur d'onde λ et de la période T avec $V = \frac{\lambda}{T}$

$\lambda = \dots\dots\dots m$ $T = \dots\dots\dots s$ $V = \frac{\dots\dots\dots}{\dots\dots\dots} = \dots\dots\dots ms^{-1}$ $V = \dots\dots\dots ms^{-1}$

d) Conclusion

.....

2.2.2 Analyse a priori de l'activité n°2

Nous nous attendons que la majorité des élèves soient capables de déterminer les deux périodes de l'onde temporelles T et spatiale λ et de déterminer enfin la célérité de l'onde correctement.

Pour la période temporelle T , nous voyons deux méthodes possibles à la portée des élèves :

- La première méthode : à l'aide du chronomètre, l'élève détermine la durée pour laquelle l'onde parcourt une distance égale à la longueur d'onde ;

- La deuxième méthode : il suffit de reproduire une expérience déjà faite pendant la détermination de la période propre d'une pendule élastique verticale au cours de l'enseignement des oscillateurs mécaniques. Les élèves doivent se fixer sur un point de la corde et utiliser le chronomètre (fourni par la simulation) pour déterminer la durée Δt de dix oscillations successives. La période temporelle de l'onde est : $T = \frac{\Delta t}{10}$

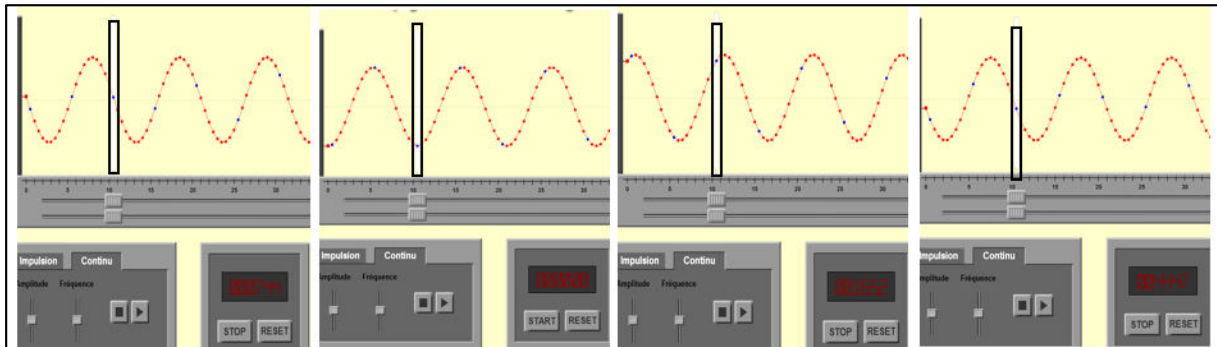


Figure 9. 6: Détermination de la période T par suivi de sinusoïdale du point bleu

Pour la longueur d'onde λ , il suffit d'arrêter la simulation à un instant quelconque, lorsque la corde est affectée par l'onde et de mesurer à l'aide des deux barres stabilisatrices la longueur d'onde λ . La capture d'écran suivante illustre l'expérience à réaliser.

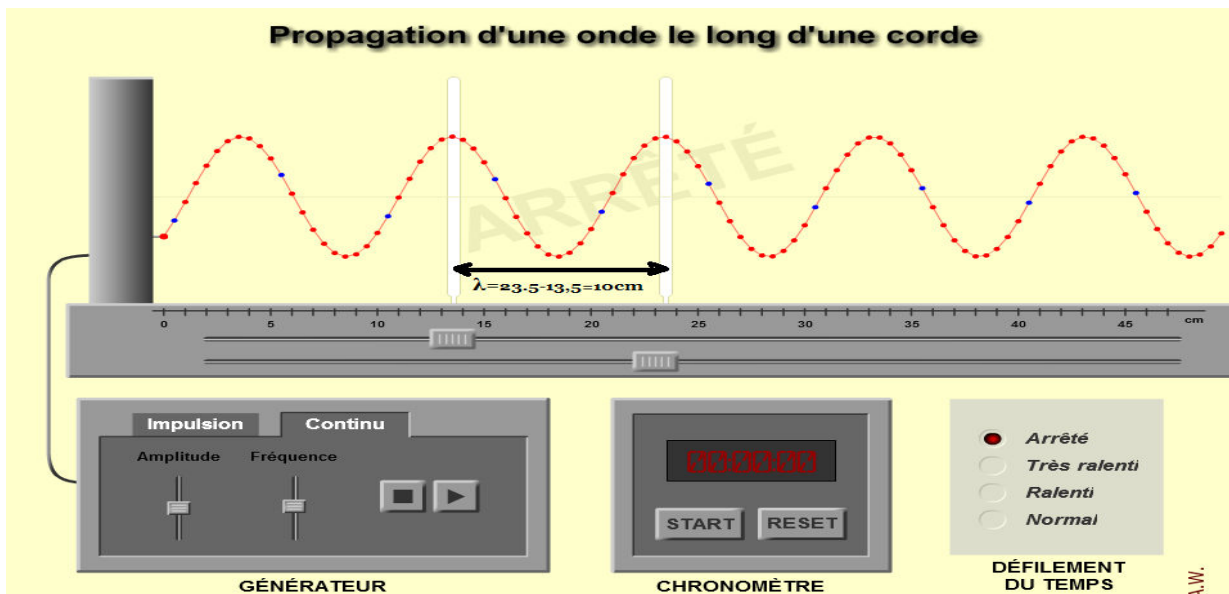


Figure 9. 7: Mesure de la longueur d'onde λ

Nous nous attendons à ce que tous les élèves puissent déterminer cette vitesse et de trouver alors la même vitesse que celle déjà calculée précédemment. La confrontation va dans le même sens que l'activité précédente. La célérité est alors toujours la même, quelle que soit la méthode expérimentale choisie. Des discussions doivent s'installer entre les pairs. Elles seront clôturées par une discussion plénière assistée par l'enseignant pour utiliser enfin les lois adéquates qui correspondent à cette situation et cela en revenant sur la définition de la longueur d'onde déjà vue en classe : la longueur d'onde λ est la distance parcourue par l'onde pendant une période temporelle T alors $\lambda = T.V$.

A la fin de cette phase, nous avons demandé aux élèves de critiquer leurs réponses à la première question de prévision. Il s'agit en effet de savoir comment les élèves réagissent vis-à-vis de leurs réponses fournies dans le post test. Nous nous attendons à ce que la plupart des élèves répondent à cette question, tant ils sont convaincus par le résultat de cette première partie du TP.

2.2.3 Découpage des jeux didactiques potentiellement jouables

Cette phase est découpée aussi comme la précédente en termes de jeux d'apprentissage que nous présentons comme suit :

Jeu numéro 1 (J1) : Mesure de la longueur d'onde

L'élève doit fixer une sinusoïde des espaces à un instant choisi arbitrairement et mesurer la longueur d'onde.

Jeu numéro 2 (J2) : Mesure de la période temporelle

L'élève doit choisir entre deux méthodes :

La première méthode : à l'aide du chronomètre, l'élève doit déterminer la durée pour laquelle l'onde parcourt une distance égale à la longueur d'onde.

La deuxième méthode : se fixer sur le mouvement d'un seul point de la corde et déterminer la durée d'une oscillation complète.

Jeu numéro 3 (J3) : Calcul de la célérité et sa vérification

Ce jeu consiste à calculer la célérité de l'onde à partir de la longueur d'onde λ et la période temporelle T , alors $V = \frac{\lambda}{T}$.

Jeu numéro 4 (J4) : Discussion avec les pairs

La discussion est autour des résultats déjà obtenus par la première tâche effectuée. Cela permet aux élèves de confirmer que la célérité d'une onde est toujours constante et ne dépend pas de l'amplitude mais des caractéristiques du milieu élastique de propagation de l'onde.

Jeu numéro 5 (J5) : Confirmation et résolution par les lois de la physique

Une première vérification par les lois de la physique est déjà faite par la deuxième tâche. La résolution consiste à utiliser la définition de la longueur d'onde déjà rencontrée pendant le cours sur les ondes. Cette tâche comprend la consolidation du résultat déjà obtenu et la formulation d'une conclusion finale à cette partie, c'est-à-dire que :

La vitesse de propagation d'une onde ne dépend pas de son amplitude. Alors la force avec laquelle on a excitée la corde pour propager une onde dans un milieu élastique n'a aucun effet sur sa célérité.

Jeu numéro 7 (J7) : Critique de la réponse à la première question

L'élève est libre de porter un avis critique à sa réponse à la question de prévision et de préciser pourquoi il a choisi une des trois réponses à la première question de prévision. Nous estimons en effet que la plupart des élèves pense que si l'amplitude de l'onde augmente sa célérité augmente aussi.

3 L'aspect de la corde : troisième phase

Cette deuxième partie aborde :

Les réponses aux questions de prévision numéro 2, numéro 3 et numéro 4 qui s'intéressent respectivement au déplacement de la source, au déplacement du front d'onde et à la représentation d'une sinusoïde des espaces à un instant t' à partir d'une sinusoïde à un instant $t < t'$ qui est déjà représenté sur sa copie.

L'activité n°4 où il est demandé à l'élève de tracer l'aspect de la corde à partir de son aspect à un instant ultérieur très proche, mais cette fois en s'appuyant sur la simulation.

Troisième partie : analyse de l'enjeu
Chapitre 9 : analyse a priori des activités de la séance par PCDR

L'activité n°4 consiste à distinguer à partir des deux sinusoïdes obtenues par activité sur simulation le déplacement du front d'onde et celui de la source entre ces deux instants choisis.

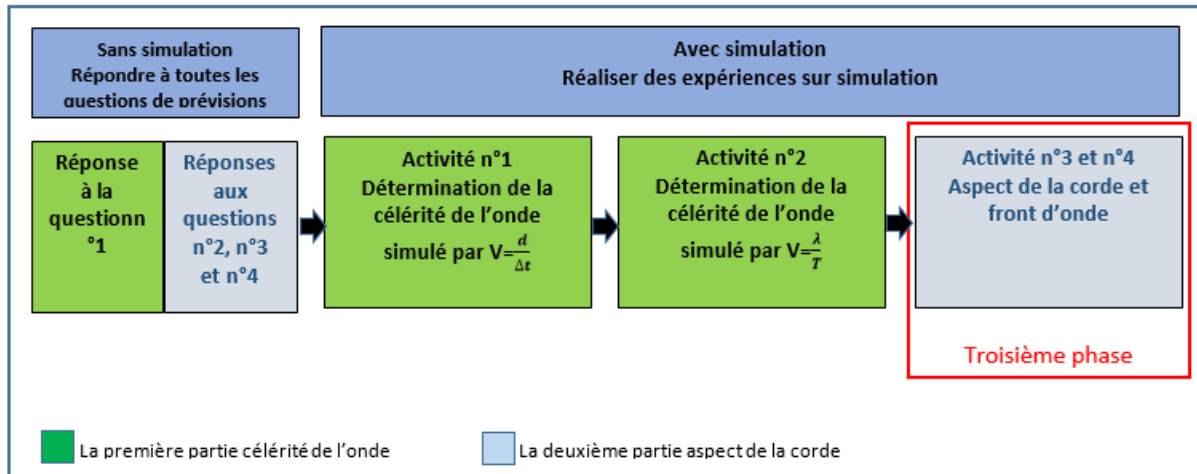


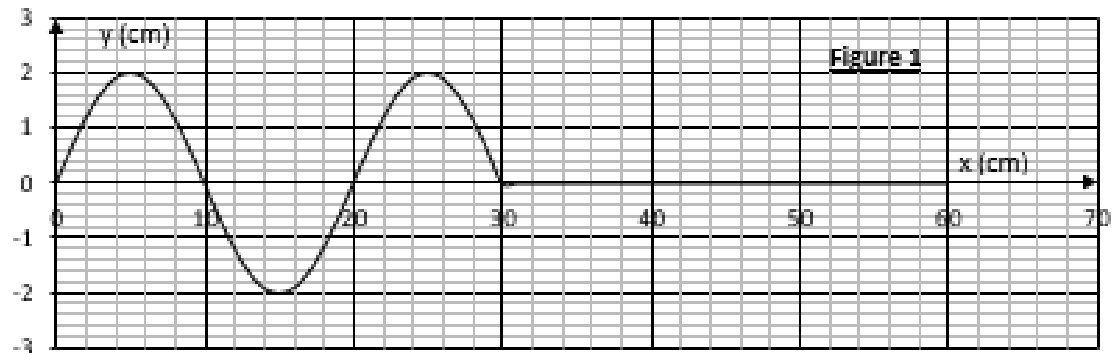
Figure 9. 8: Emplacement de la troisième phase dans la séance du TP

3.1 *Présentation du travail proposé aux élèves :*

3.1.1 Réponse aux questions de prévision

Rappel des questions :

On donne ci-dessous l'aspect de la corde à un instant de date t



1) Questions

a) Question n°2 :

Peut-on prévoir à partir de la courbe le sens de déplacement de la source d'onde S ($x_s=0m$), si oui dans quel sens ?

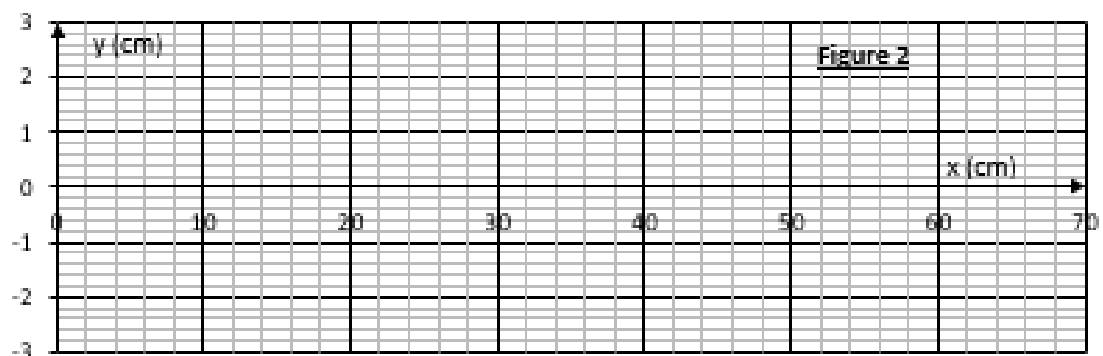
b) Question n°3 :

Comment se déplace le front d'onde ?

c) Question n°4

Représenter sur la figure 2 l'aspect de la corde à instant de date t' légèrement supérieur à t (on peut prendre l'instant t' lorsque x avance de $\frac{\lambda}{4}$)

N.B. Aucun développement théorique n'est demandé.



Toutes ces questions peuvent engendrer la conception de l'onde serpente. Nous avons déjà expliqué que ces questions ont un double intérêt. Tout d'abord, les réponses à ces questions font partie de la prévision des élèves qui est fondée sur les connaissances acquises sur les ondes mécaniques dans la séquence d'enseignement ordinaire. N'oublions pas que la prévision fait partie intégrante de l'enseignement par PCDR. Le deuxième intérêt est le contrôle de l'existence de la conception de l'onde serpente chez les élèves.

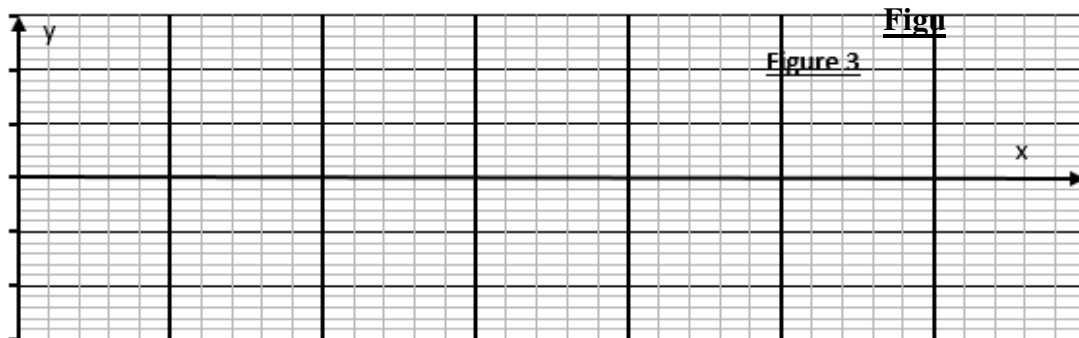
3.1.2 Activité sur simulation n°3 : Représentation des deux aspects de la corde

Nous présentons l'activité demandée telle qu'elle est donnée aux élèves.

3) Activité n° 3

Choisir le défilement du temps très ralenti, actionner le mode continue, arrêter la simulation lorsque le front d'onde $x_f = \frac{3}{2} \lambda$ environ, tracer soigneusement sur le figure 3 la courbe décrite sur l'écran. Actionner le chronomètre Démarrer la simulation et l'arrêter après environ 1s reproduire la courbe sur le même repère d'axe de la figure 3.

N.B : On peut fixer l'amplitude et la fréquence et refaire la tâche plusieurs fois pour avoir les deux situations voulues.



3.1.3 Analyse a priori des activités n°3 et n° 4

Nous nous attendons à ce que la majorité des élèves puisse suivre le mode opératoire décrit, et tracer les deux courbes sur le même graphe. Nous espérons que cette question fasse apparaître la conception de l'onde serpente, c'est-à-dire que l'élève considère que l'onde progresse par ajout de bosse. Après avoir tracé les deux aspects de la corde, la majorité des élèves va alors suivre le déplacement des points de l'onde le long de la courbe. Nous présumons que les élèves vont rencontrer les mêmes difficultés que celles mentionnées par Maurines (2003) qui explique que les étudiants considèrent que les points de l'onde ont une abscisse fixe au cours du temps. C'est pourquoi le résultat obtenu par les élèves est a priori inattendu, ce qui permettra d'entamer le moment de la confrontation des résultats obtenus par les élèves avec

leurs prévisions et leurs modes de raisonnement. L'enseignant oriente alors le discours vers un débat scientifique. Il amène les élèves à raisonner sur le front d'onde qui avance progressivement le long de l'axe des abscisses et à prendre en compte le fait que tous les points de la corde se déplacent verticalement alors que l'onde se déplace horizontalement. Les points de l'onde n'ont donc pas des abscisses fixes au cours du temps. Le même résultat pourra être obtenu à partir de l'équation horaire du mouvement d'un point de la corde (déjà enseignée en cours).

$$y_M(t, x) = a \cdot \sin\left(2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) + \varphi_s\right)$$

a : Amplitude de l'onde en m

λ : période spatiale de l'onde en m

V : La célérité de l'onde en m.s^{-1}

φ_s : Phase initiale de la source en rad

x : abscisse d'un point M de la corde en m

Alors pour deux instants différents, t et $(t + \frac{T}{4})$, on trace sur le même graphique les deux courbes suivantes.

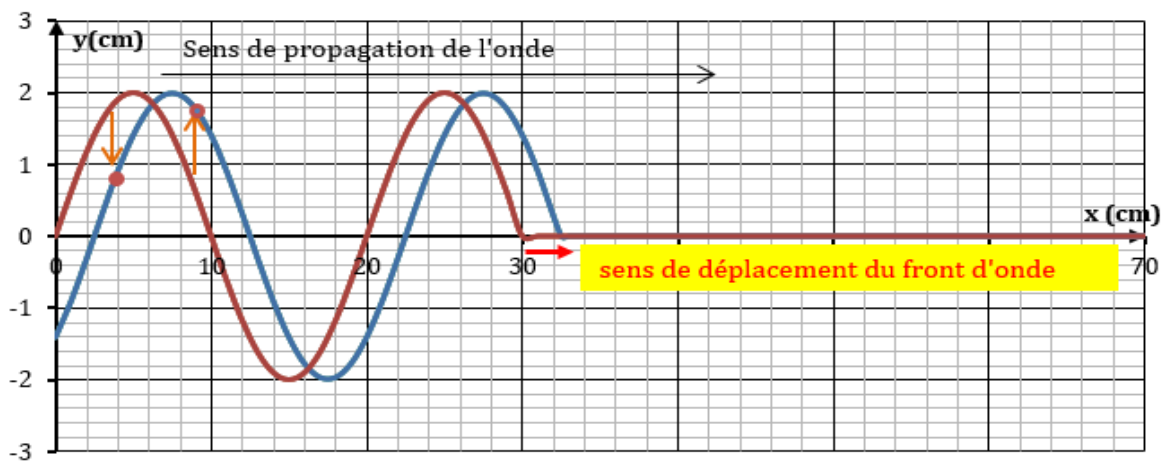


Figure 9. 9: Résultat prévu par la tache n°2 de la deuxième partie de la séance

3.1.4 Découpage des jeux didactiques potentiellement jouables

Comme pour les deux autres phases de la séance, nous avons prévu un découpage de cette troisième phase en termes de jeux d'apprentissage. En effet, nous avons choisi la même logique que celle utilisée précédemment. L'enchaînement prévu des jeux est le suivant :

- **Jeu numéro 1 (J1) : Question de prévision**

C'est un jeu qui consiste à rappeler aux élèves leurs réponses déjà données au début de la séance sur la question de prévision pour que chaque élève se rappelle de son hypothèse de travail et débute ainsi l'activité par l'approche par PCDR.

- **Jeu numéro 2 (J2) : La sinusoïde des espaces à instant t_1**

L'élève doit actionner la simulation en mode continu et en ralenti et arrêter la simulation lorsque l'onde parcourt une distance $d=3,5\lambda$. Ensuite, l'élève doit recopier soigneusement la sinusoïde des espaces donnée par la simulation à cet instant t_1 .

- **Jeu numéro 3 (J3) : La sinusoïde des espaces à instant t_2**

L'élève doit activer de nouveau la simulation et l'arrêter après une durée très brève. Il peut répéter la même expérience plusieurs fois jusqu'à ce qu'il obtienne deux sinusoïdes pour deux instants très proches (l'une est légèrement décalée de l'autre). L'élève doit recopier soigneusement la nouvelle sinusoïde des espaces qui correspond à l'instant t_2 sur le même repère d'axes que la sinusoïde précédente.

- **Jeu numéro 4 (J4) : Discussion avec les pairs**

La discussion est autour des résultats déjà obtenus par les deux sinusoïdes des espaces sur le même graphique. Cela permet aux élèves de confirmer les sens de déplacement du front d'onde et celui de la source.

- **Jeu numéro 5 (J5) : Confirmation et résolution par les lois de la physique**

A partir du graphique obtenu, il s'agit de déterminer le sens de déplacement du front d'onde et celui de la source et de formuler la conclusion.

- **Jeu numéro 6 (J6) : Critique de la réponse à la première question**

L'élève est libre de porter un regard critique sur la réponse de la question de prévision.

PARTIE 4

ANALYSE A POSTERIORI

Introduction

Nous nous intéressons dans la suite de cette recherche à l'analyse de la séance effective de travaux pratiques sur simulation des ondes mécaniques, suivant la méthodologie spécifique que nous avons déjà détaillée dans un chapitre précédent, et ceci en nous aidant des descripteurs du jeu de Cros et Grangeat (2014). Cette analyse consiste en une étude comparative entre les jeux effectivement joués et les jeux potentiellement jouables et qui sont prévus d'après l'analyse déjà faite précédemment.

Notre méthodologie comporte alors trois grains d'analyse (Jameau, 2012). Au premier grain d'analyse, nous construirons un synopsis des séances à partir d'une première analyse vidéo par le logiciel Transana. Au deuxième grain d'analyse, nous élaborons, à partir des synopsis, un tableau d'analyse qui consiste en un découpage de chaque séquence de la séance qui aboutit aux jeux d'apprentissage. Les limites de chaque jeu doivent être identifiées par le chercheur. Le troisième grain d'analyse consiste, quant à lui, à détecter les événements remarquables, événements qui peuvent initier un jeu générique ou éliminer un jeu prévu, événement qui peuvent être aussi une question, une attitude, un blocage au niveau d'une situation non prévue, etc. Ces événements donnent lieu à une transcription de la partie correspondante de l'enregistrement vidéo. Ensuite, nous transcrivons les enregistrements audios des discussions des quatre binômes d'élèves. Et enfin, nous analysons alors les résultats du post-test, c'est-à-dire que nous procédons à l'analyse des réponses des élèves à un exercice sur les ondes. Il s'agit en fait d'un exercice faisant partie d'un devoir de contrôle après la séquence d'enseignement suivie par cette recherche.

CHAPITRE 10

**ANALYSE DES ACTIVITES AU COURS
DE LA SEANCE D'ENSEIGNEMENT PAR
PCDR**

1 Introduction

Revenons sur l'idée principale de cette ingénierie. Nous souhaitons placer l'élève en situation de recherche où il doit tester sa réponse à la question de prévision. L'élève se trouve alors obligé de se positionner par rapport aux résultats obtenus par simulation, ce positionnement lui permettant un déclenchement critique, et créant ainsi les conditions du changement conceptuel attendu. L'approche d'enseignement par PCDR pourrait alors constituer un type efficace de démarche d'investigation.

2 Analyse *a posteriori* de la première phase

Pour localiser la première phase de la séance, nous reprenons le diagramme suivant :

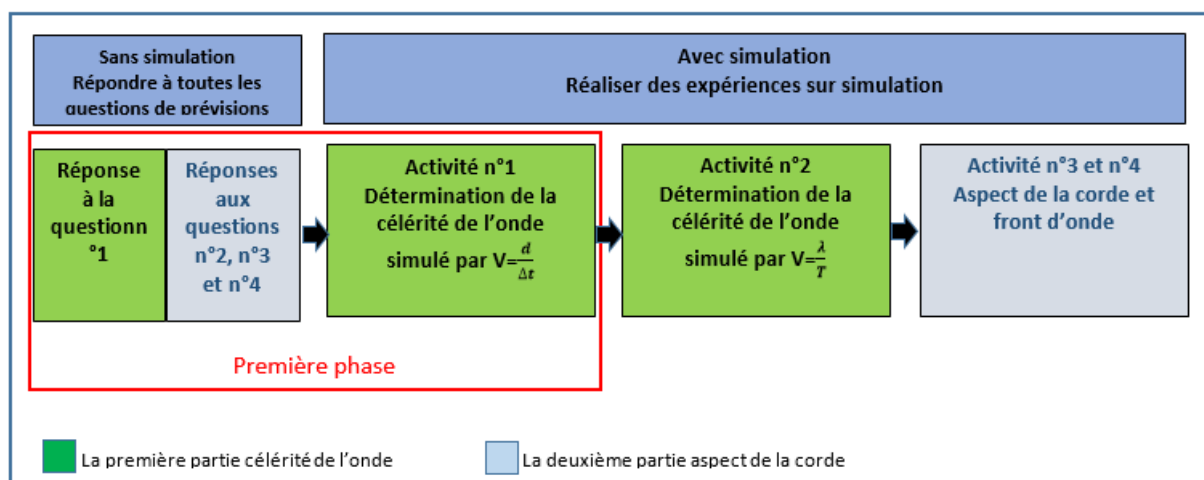


Figure 10. 1: Emplacement de la première phase dans la séance du TP

2.1 *Le synopsis de la première phase de la séance*

Le synopsis comprend sept scènes et treize épisodes, dont cinq comportent des événements remarquables pouvant être l'objet d'une transcription intégrale. La durée de cette phase est de 32 minutes 24 secondes. Notons que ce synopsis est aussi la base de la rédaction du paragraphe suivant, la narration didactique.

Nous présentons dans ce qui suit le synopsis de la première phase de la séance.

Quatrième partie : analyse a posteriori
Chapitre 10 : analyse des activités au cours de la séance par PCDR

Temps	Phases	Scènes	Episodes	Déroulement		Evènements remarquables
				Action du professeur	Action de l'élève	
0:00:0	Phase 1 Célérité de l'onde 1 ^{ère} méthode	<u>Scène 1</u>	E1	P fait entrer ces élèves, il distribue les fiches du TP et il commence par rappeler à ces élèves qu'ils ont déjà vu le chapitre onde en classe et que ce TP est une continuité de cette partie du cours.	Ces derniers cherchent à s'installer devant les ordinateurs c'est un nouvel environnement pour eux.	
0:03:32		<u>Scène 2</u> Répondre aux questions de prévision	E2	P relit la première question ; un élève pose la question à son prof., lequel répond qu'il ne sait pas et que l'élève doit répondre aux questions et que c'est un travail individuel. Le prof. relit la deuxième question sans aucune explication		Les élèves commencent à poser des questions
0:04:59			E3	Un signal pour commencer, P explique entre temps que la courbe de la question 4 doit être tracée sur la même courbe. Il accorde à ces élèves 7 min. Mais, entretemps, le prof. rappelle que ce test n'est pas noté juste pour la démarche de la séance du TP, inutile alors de discuter. P encourage ses élèves à répondre même s'ils ne sont pas parfaitement convaincus par leurs réponses. Il déclare qu'on aura besoin de cette réponse. Il circule entre les rangs, il demande à ses élèves s'ils ont terminé et en même temps, il circule et il encercle les réponses sur les fiches pour que ces derniers ne les modifient pas après	Les élèves qui sont en groupe de deux devant les ordinateurs discutent à basse voie	Pour que les réponses des élèves ne soient pas modifiées au cours de la séance, le prof. écrit des notes sur toutes les copies pour deux raisons : pour les statistiques et pour l'enchaînement de la séance La durée est de 11min au lieu du 7 min comme prévu dans la préparation
0:16:17			E3	P donne fin aux réponses		
0:17:39		<u>Scène 3</u> Préparation moment de confrontation	E4	P demande à ses élèves de commencer à manipuler la simulation qui est déjà sur l'écran des ordinateurs. Il explique à partir de la simulation sur le tableau par un data show. Il montre les modes continus et d'impulsion et il demande à ses élèves d'essayer de refaire les étapes montrées et de suivre ce qu'il fait au tableau (avec quelques mots en arabe). Il montre ensuite les barres stabilisatrices pour déterminer la vitesse	Les élèves se familiarisent avec la simulation	

Quatrième partie : analyse a posteriori
Chapitre 10 : analyse des activités au cours de la séance par PCDR

0 21:16		<u>Scène 4</u> Moment de confrontation	E5	P répète les trois réponses de la question de prévision		
0:21:36			E6	P lit le mode opératoire et demande à ses élèves de fixer les barres stabilisatrices dans les positions indiquées. Il explique ainsi que la durée va être déterminée par le chronomètre et il répète l'expérience pour deux amplitudes différentes		
0:23:55			E7	P encourage ses élèves pour utiliser le mode ralenti	Les élèves déterminent la durée mise par l'onde pour passer le long des deux barres stabilisatrices	
0:25:26			E8	P demande s'ils ont trouvé la durée		
0:26:05			E9	choisir une deuxième amplitude		
0:27:13		<u>Scène 5</u> Préparation du moment de discussion	E10	P demande de calculer les vitesses et les convertir en mètre, le prof dit montre-moi le calcul ;	Un élève déclare qu'ils ne sont pas les mêmes,	Situation de blocage qui empêche l'avancée du savoir.
			E11	P s'adresse à tout le monde et il demande de choisir trois chiffres après la virgule et de faire des arrondissements	Un élève déclare que ce sont les mêmes.	1 ^{ère} résultat convaincant pour les élèves
0:30:44		<u>Scène 6</u> Moment discussion	E12		Résultat de la discussion : les élèves affirment que la vitesse de propagation ne dépend pas de l'amplitude	
		<u>Scène 7</u> Moment résolution	E13	P demande aux élèves ce qu'ils constatent. Ces derniers répondent en même temps que la vitesse est constante. P demande aux élèves qui ont répondu à la question 1 mais ils ne répondent pas. P explique qu'il y a des élèves qui ont choisi les deux réponses fausses et que la réponse correcte c'est... les élèves répondent ensemble la vitesse de propagation ne dépend pas de l'amplitude	Les élèves répondent ensemble que la vitesse de propagation ne dépend pas de l'amplitude	
Fin de la première phase						

2.2 *Narration didactique*

Le professeur fait entrer ses élèves, ils s'installent devant les ordinateurs, avec des regards d'inquiétude et de curiosité car c'est un nouvel environnement de travail qui n'appartient pas vraiment au monde des sciences physiques. L'enseignant distribue les fiches du TP et il rappelle à ses élèves qu'ils ont déjà vu le chapitre onde en classe et que ce TP est une continuité du cours. Il lit les questions sans aucune explication et donne un signal pour commencer. Les élèves qui sont en groupe de deux devant les ordinateurs, discutent à voix basse, l'enseignant intervient et il annonce que ce test ne sera pas noté, que c'est juste pour la démarche de la séance du TP, que c'est inutile alors de discuter. Il encourage ses élèves à répondre, même s'ils ne sont pas parfaitement convaincus. Il circule entre les rangs, encercle les réponses sur les fiches des élèves pour que ces derniers ne les modifient pas pendant la séance. Vingt minutes après, l'enseignant donne fin aux réponses et il demande à ses élèves de manipuler la simulation sur les ordinateurs en marche. A l'aide d'un data show, l'enseignant agit sur la projection de la simulation sur le tableau, Il demande à ses élèves d'essayer eux-mêmes de faire ce qu'il fait au tableau. Il les encourage pour utiliser le mode ralenti, leur demande de calculer les vitesses en mètre par seconde. Un instant après, un élève annonce que ce ne sont pas les mêmes. Le professeur est étonné et entame une discussion avec l'élève. Et soudain, il s'adresse à tout le monde en disant « choisir trois chiffres après la virgule, et faire des arrondissements ». C'est à ce moment qu'un autre élève déclare que ce sont les mêmes. Le professeur demande aux autres : qu'est-ce que vous constatez ? Les élèves répondent en même temps que la vitesse est constante. Ensuite, le professeur reprend la première question de prévision, et discute avec eux. Enfin, les élèves formulent ensemble la conclusion prévue : la vitesse de propagation ne dépend pas de l'amplitude.

2.3 *Analyse en jeux didactiques*

A partir du synopsis, nous complétons le tableau d'analyse en repérant les différents jeux et les différentes catégories : jeux de préparation, jeu de transition et jeu d'investigation.

Nous présentons notre tableau d'analyse de cette phase.

Quatrième partie : analyse a posteriori
Chapitre 10 : analyse des activités au cours de la séance par PCDR

Temps	Phases	Scènes	Episode	Déroulement		Evènements remarquables
				Action du professeur	Action de l'élève	
0 :00.0	Phase 1 Célérité de l'onde 1 ^{ère} méthode	<u>Scène 1</u> <u>Jeu 1</u> Jeu de Préparation J.P.1	E1	P fait entrer ses élèves, et distribue les fiches du TP	Ces derniers cherchent à s'installer devant les ordinateurs c'est un nouvel environnement pour eux.	
			E2	Le professeur rappelle aux élèves qu'ils ont déjà vu le chapitre onde en classe et que ce TP est une continuité de cette partie du cours.		
0:03:32		<u>Scène 2 :</u> <u>Jeu 2</u> Jeu d'investigation J.I.1	E3	P relit la première question, une élève pose la question à son prof, il répond qu'il ne sait pas et qu'il doit répondre aux questions et que c'est un travail individuel, le prof relit la deuxième question sans aucune explication		Les élèves commencent à poser des questions
0:04:59			E4	Un signal pour commencer, il explique entre temps que la courbe de la question 4 doit être tracée sur la même courbe, le prof accorde à ses élèves 7 min, entre autres, le prof rappelle que ce test n'est noté juste pour la démarche de la séance du TP inutile alors de discuter. P encourage ses élèves à répondre même s'ils ne sont pas parfaitement convaincus par leurs réponses il déclare qu'on aura besoin de cette réponse. P circule entre les rangs, il demande à ces élèves s'ils ont terminé et en même temps il circule et il encercle les réponses sur les fiches pour que ces derniers ne le modifient pas après	Les élèves qui sont en groupe de deux devant les ordinateurs discutent à basse voie	Pour que les réponses des élèves ne soient pas modifiées au cours de la séance le prof écrit des notes sur toutes les copies pour deux raisons : pour les statistiques et pour l'enchaînement de la séance La durée est de 11min au lieu du 7 min comme c'est prévu
0:16:17			E5	P donne fin aux réponses		
0:17:39		<u>Scène 3 :</u> <u>Jeu 3</u> Jeu de transition J.I.1-J.I.2 Préparation moment de confrontation	E6	Le professeur demande à ses élèves de commencer à manipuler la simulation les ordinateurs étant en marche la simulation est sur l'écran. Le professeur explique à partir de la simulation sur le tableau par un data show il montre les modes continu et d'impulsion et il demande de ces élèves d'essayer de refaire les étapes montrées et de suivre ce qu'il fait au tableau (avec quelques mots en arabe) il montre ensuite les barres stabilisatrices, pour la vitesse	Les élèves se familiarisent avec la simulation	

Quatrième partie : analyse a posteriori
Chapitre 10 : analyse des activités au cours de la séance par PCDR

0:21:16			E7	Il répète les trois réponses de la question de prévision		
0:21:36		<u>Scène 4 :</u> Jeu 4 Jeu d'investigation J.I.2	E8	Il lit le mode opératoire et demande à ses élèves de fixer les barres stabilisatrices dans les positions indiquées il explique que la durée va être déterminée par le chronomètre et répéter l'expérience pour deux amplitudes différentes		
0:23:55			E9	Il encourage ses élèves pour utiliser le mode ralenti	Déterminent la durée mise par l'onde pour passer le long des deux barres stabilisatrices	
0:25:26		Moment de confrontation	E10	P demande s'ils ont trouvé la durée		
0:26:05			E11	Il faut choisir une deuxième amplitude, P demande de calculer les vitesses		
0:27:13		<u>Scène 5</u> Jeu 5 Jeu de transition J.I.2-J.I.3 Préparation du moment de discussion	E12	Et de les convertir en mètre, le prof dit : montre-moi le calcul.	Un élève déclare qu'elles ne sont pas les mêmes,	Situation de blocage qui empêche l'avancée du savoir.
			E13	Il s'adresse à tout le monde et il dit de choisir trois chiffres après la virgule et de faire des arrondis	Un élève déclare que ce sont les mêmes	1 ^{ère} résultat convaincant
0:30:44		<u>Scène 6 :</u> Jeu 6 Jeu d'investigation J.I.3 Moment de discussion	E14		Résultat de la discussion : les élèves affirment que la vitesse de propagation ne dépend pas de l'amplitude	
		<u>Scène 7 :</u> Jeu 7 Jeu d'investigation J.I.4 Moment de résolution	E15	Le prof demande qu'est-ce que vous constatez ces derniers répondent au même temps que la vitesse est constante. Le prof demande aux élèves ceux qui ont répondu à la question 1 les élèves n'ont pas répondu (honte) le prof explique qu'il y a des élèves qui ont choisi les deux réponses fausses et que la réponse correcte c'est...les élèves répondent ensemble la vitesse de propagation ne dépend pas de l'amplitude	Les élèves répondent ensemble la vitesse de propagation ne dépend pas de l'amplitude	

Nous identifions sept scènes qui correspondent aux sept jeux d'apprentissage, dont un jeu de préparation au début de la séance, quatre jeux d'investigation qui sont prévus, ce sont ceux qui coïncident avec les quatre moments de l'enseignement par PCDR, et enfin deux jeux de transition. Le schéma suivant résume les différents jeux et leurs enchaînements chronologiques au cours de cette première phase de la séance. Rappelons qu'un jeu est dit spécifique s'il fait partie de l'enseignement visé, un jeu est dit générique s'il peut exister dans plusieurs situations au cours de l'enseignement des sciences physiques en générale (Chapitre 7, page 144).

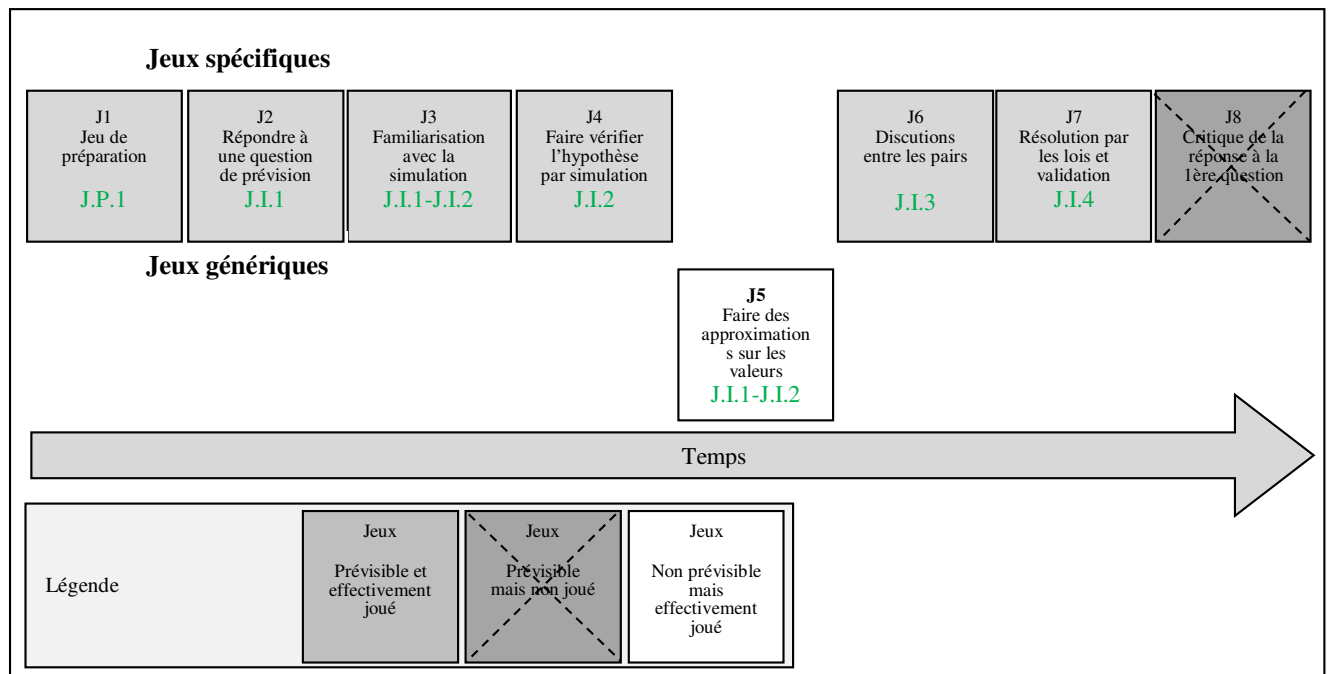


Figure 10.2 : Déroulement des jeux d'apprentissage en fonction du temps 1^{ère} phase

2.3.1 Jeu 1 : Jeu de préparation J.P.1

Ce jeu caractérise l'initiation de la séance. Il est constitué de deux épisodes : un épisode E1 ordinaire d'organisation de la classe, et un deuxième épisode E2 de présentation du cours. Il s'agit en fait d'un jeu qui ne fait pas partie de l'approche par PCDR. Ce jeu a une durée de 3 min 32 s.

2.3.2 Jeu 2 : Jeu d'investigation J.I.1

C'est le premier jeu prévu de l'approche par PCDR qui dure 11 min 28 s. Ce jeu est constitué de trois épisodes.

- Le premier épisode E3 qui consiste à présenter la nouvelle démarche à suivre au cours de ce TP et aussi de demander aux élèves de répondre aux questions de

prévision. Les élèves s'aperçoivent du changement du milieu et des éléments du contrat et commencent à poser des questions à leur professeur.

- Le deuxième épisode E4 dure 11 min 16 s. L'enseignant surveille ses élèves au cours de leur travail qui consiste à répondre aux questions de prévision, il se déplace entre les rangs et encercle les réponses fournies. Le troisième épisode marque la fin de cette épreuve.

2.3.3 **Jeu 3 : Jeu de transition J.I.1-J.I.2**

C'est un jeu qui dure 4 min 59 s. Il est prévu mais il ne fait pas partie des moments de la PCDR. Néanmoins, il est indispensable pour l'avancée du savoir visé. Ce jeu contient deux épisodes. Au cours du premier E6, l'enseignant introduit la simulation, ce nouvel élément du milieu, qui entraîne un changement de contrat puisque les élèves n'ont jamais manipulé une simulation au sein d'un TP de physique. Ils simulent une onde mécanique le long d'une corde, l'enseignant les aidant à se familiariser avec la simulation. Cette dernière fournit des instruments de mesure virtuelle : une règle et un chronomètre, ce qui renvoie à une manipulation classique. Au deuxième épisode E7, le professeur rappelle la première question de prévision, si l'amplitude d'une onde augmente, alors la vitesse de propagation de l'onde augmente, diminue ou reste constante. L'enseignant prépare alors avec succès le moment de la confrontation.

2.3.4 **Jeu 4 : Jeu d'investigation J.I.2**

La durée de ce jeu est de 4 min 29 s. Ce jeu correspond au moment de confrontation, un des moments prévus de l'approche par PCDR. Il est constitué de quatre épisodes. Le premier E8 consiste à déterminer pour une amplitude du signal choisi, et une distance fixe, la durée mise par l'onde pour parcourir cette distance nécessaire à déterminer la célérité de l'onde. L'épisode E9 est un moment où l'enseignant encourage ses élèves et leur donne des conseils pour gagner ce jeu. Au cours de l'épisode E10, le professeur cherche à recueillir les premiers résultats. L'enseignant constate que la confrontation ne donne pas les fruits escomptés et que les élèves trouvent des vitesses non concluantes. C'est une situation qui bloque l'enchaînement de notre approche d'enseignement, car le passage au moment suivant de la discussion nécessite la confrontation de la valeur de la célérité trouvée (qui doit être constante) avec la réponse que l'élève a fournie à la question de prévision.

2.3.5 Jeu 5 : Jeu de transition J.I.2-J.I.3

Ce jeu est généré par l'enseignant suite à une situation de blocage engendrée par l'échec de la confrontation. Il dure 3 min 31 s. Il est constitué de deux épisodes. Le premier E12 est déclenché lorsqu'un élève annonce que les résultats des célérités ne sont pas les mêmes. L'enseignant ne s'aperçoit pas au début qu'on doit faire des approximations sur les valeurs trouvées. Il demande à l'élève de refaire l'expérience au tour de parole 5 (Tdp5, fig. 2). De même, au tour de parole 7 (Tdp7, fig.2), l'enseignant insiste et demande aux élèves de refaire les calculs. Il demande de convertir les distances en mètres, il se déplace vers l'élève pour voir ces calculs mais il n'est pas convaincu par ce résultat. Un deuxième épisode E13 se déclenche. Nous pensons qu'à ce stade l'enseignant s'aperçoit que les vitesses sont très proches. Il s'adresse à tous les élèves et leur demande de choisir trois chiffres après la virgule et de faire des arrondis sur les valeurs, comme si c'était une expérience réelle. Enfin, les élèves déclarent que les vitesses sont égales. Ce jeu n'est pas prévu par le scénario déjà préparé, cependant, il s'avère nécessaire pour passer à la discussion entre les pairs.

Tdp	Locuteur	Production verbale
1	P	<i>Calculer les valeurs de la vitesse pour les deux amplitudes</i>
2	E1	<i>Les distances en mètre monsieur ?</i>
3	P	<i>On a besoin d'une vitesse en m par seconde. Convertir les vitesses en mètre par seconde, il faut convertir les distances en m</i>
4	E1	<i>Les valeurs ne sont pas égales</i>
5	P	<i>Répétez l'expérience réfléchit un peu (en arabe)</i>
6	E3	<i>0,02 monsieur</i>
7	P	<i>Refaire les calculs, allez les autres</i>
8	E4	<i>sont différentes</i>
9	P	<i>montre moi les calculs aller... aller... <...> voilà a peut près 0.03 c'est bon... Allez Prenez trois chiffres après la virgule. Aller...</i>
10	E3	<i>C'est 0.026</i>
11	P	<i>... c'est bon presque 0.03</i>
12	E1	<i>Oui monsieur presque égales</i>
13	P	<i>A priori qu'est-ce que vous constatez.</i>
14	E1	<i>les vitesses restent presque constantes.</i>
15	p	<i>Même si on change...l'amp...</i>
16	E4	<i>Même si on change l'amplitude la vitesse reste constante</i>

Figure 10. 2 : Transcription du début du jeu d'apprentissage 3

2.3.6 Jeu 6 : Jeu d'investigation J.I.3

C'est un jeu prévu d'une durée de 3 min 31 s. Les discussions sont variées, le résultat de ces discussions est que tous les élèves sont convaincus par le fait que les vitesses de propagation sont les mêmes quelle que soit l'amplitude de l'onde.

2.3.7 **Jeu 7 : Jeu d'investigation J.I.4**

Ce jeu d'investigation correspond au moment de la résolution de conflit à l'aide des lois de la physique. Ce jeu a une durée de 1 min 40 s. Il est constitué d'un seul épisode E15. L'enseignant rappelle aux élèves la réponse fausse que la majorité a déjà choisie : les vitesses de propagation d'une onde augmentent avec l'amplitude. Il ajoute que ce résultat a déjà été donné pendant le cours ordinaire sur les ondes, mais l'expérience réalisée alors avec une échelle de perroquet avait échoué car les capteurs du chronomètre n'avaient pas fonctionné. La résolution du conflit ne s'appuie donc pas réellement avec les lois de la physique mais avec un appui sur un résultat du cours précédent.

2.3.8 **Conclusion**

Le découpage de cette partie de la séance en jeux d'apprentissage montre qu'il y a apparition du jeu 5 (J5) que nous n'avions pas prévu et la disparition d'un jeu prévu jeu 8 (J8). L'apparition du jeu 5 est initiée par un élève. Ce jeu consiste à faire des approximations sur les valeurs de vitesse trouvées, il est imposé par l'expérience même si cette expérience s'appuie sur une simulation. Nous nous apercevons alors, que dans le cadre de l'approche par PCDR, il n'y a pas de changement du contrat didactique lors du passage de l'expérimentation sur paillasse à l'expérimentation sur simulation. Le jeu 8 est abandonné par les élèves ; ce jeu consiste à écrire une critique vis-à-vis de ses leurs réponses sur la question de prévision si elle est incorrecte. Les élèves laissent la case vide dans la fiche mais, cependant l'enseignant n'a pas insisté sur ce jeu. Dans un entretien après la séance avec celui-ci, il estime que cette question va prendre beaucoup de temps car les élèves ne sont pas habitués à ce genre d'activité qui portent sur une autoévaluation ou sur un jugement de l'exactitude de leurs connaissances sur des concepts scientifiques.

2.4 ***Jeux d'apprentissage/jeux épistémiques***

Nous constatons que les jeux d'investigation du jeu J2 (J.I.1) au J6 (J.I.4) sont des jeux d'apprentissage qui sont très proches des jeux épistémiques. Les écarts entre les valeurs de la célérité de l'onde trouvées par les élèves sont dus à des erreurs de calcul d'ordre expérimental. Cela a obligé l'enseignant à créer un nouveau jeu 5 (J.I.1-J.I.2) que nous avons catégorisé en jeu de transition. Ce jeu, qui n'était pas envisagé au départ, s'avère cependant nécessaire au déroulement de la séance pour « gagner aux autres jeux ». C'est un jeu épistémique présent dans la plupart des travaux pratiques ordinaires en laboratoire de sciences (expériences sur

paillasse). La séance, telle qu'elle est conçue, est ainsi une succession de jeux d'apprentissages qui présente une souplesse facilitant la création de nouveaux jeux gagnants d'ordre épistémique.

2.5 *Dialectique contrat-milieu*

Dans cette séance, et particulièrement au cours de la première phase, nous remarquons qu'il y a des changements au niveau du milieu. Les élèves travaillent sur des ordinateurs dans une salle d'informatique et non pas dans leur laboratoire habituel. De plus, l'expérimentation a lieu sur un monde virtuel, ce qui nécessite de mobiliser des savoir-faire qui ne sont pas spécifiques aux sciences physiques. Ce changement fait penser implicitement à un changement du contrat didactique. Or, la création du jeu 5 montre que ce changement de contrat existe mais de manière partielle et que les comportements vis-à-vis des résultats des calculs sur paillasse sont les mêmes qu'avec les résultats obtenus par simulation. On voit ici l'effet de l'approche d'enseignement par PCDR qui ne se limite pas à l'observation des faits de la simulation des ondes mais passe jusqu'à l'étude expérimentale et aux calculs des célérités. Ces expériences et leurs interprétations physiques étant réalisées par les élèves eux-mêmes, nous pouvons alors déduire que les jeux sur simulation sont basés sur la réticence et la clause *proprio motu*.

2.6 *Conclusion*

Cross et Grangeat (2014) ont montré que la mise en œuvre des démarches d'investigation est un processus complexe. « *Cette complexité génère une large disparité dans la conception et la mise en œuvre pratique de ces démarches. Pour comparer l'efficacité de ce type d'enseignement, il faut donc disposer de descripteurs des situations et de leurs mises en œuvre afin de pouvoir comparer ce qui est fait avec une plus grande validité* » (Cross et Grangeat, 2014, p. 177). Cela nous a permis d'utiliser des descripteurs de notre séquence d'investigation de type PCDR et de conclure que l'approche d'enseignement étudié ici présente une souplesse d'exécution par l'enseignant où l'élève est capable d'intervenir et d'introduire un nouveau jeu d'ordre épistémique. De même, l'enseignant peut créer des régulations pour continuer l'enchaînement des autres jeux. La formation rapide (deux séances de deux heures chacune) reçue par l'enseignant sur l'approche d'enseignement par PCDR paraît satisfaisante pour qu'il se l'approprie, bien qu'il soit novice dans le recours aux démarches d'investigation. La simulation comme support didactique peut, dans notre situation, apparaître semblable à un support d'expérimentation sur paillasse. A cet égard, le jeu 3 montre que les élèves se comportent comme si l'expérience était réelle puisqu'ils considèrent que les valeurs trouvées

de la célérité de l'onde doivent être soumises à des approximations qui paraissent nécessaires. Ce constat nous a permis de conclure qu'il n'y a pas de changement global du contrat didactique même s'il y a un changement fondamental du milieu. Il resterait alors à vérifier cette approche d'enseignement par PCDR sur des expériences sur paillasse et voir de près ce qui se passe.

3 Analyse *a posteriori* de la deuxième phase

Pour localiser cette deuxième phase au cours de la séance, nous reprenons le diagramme.

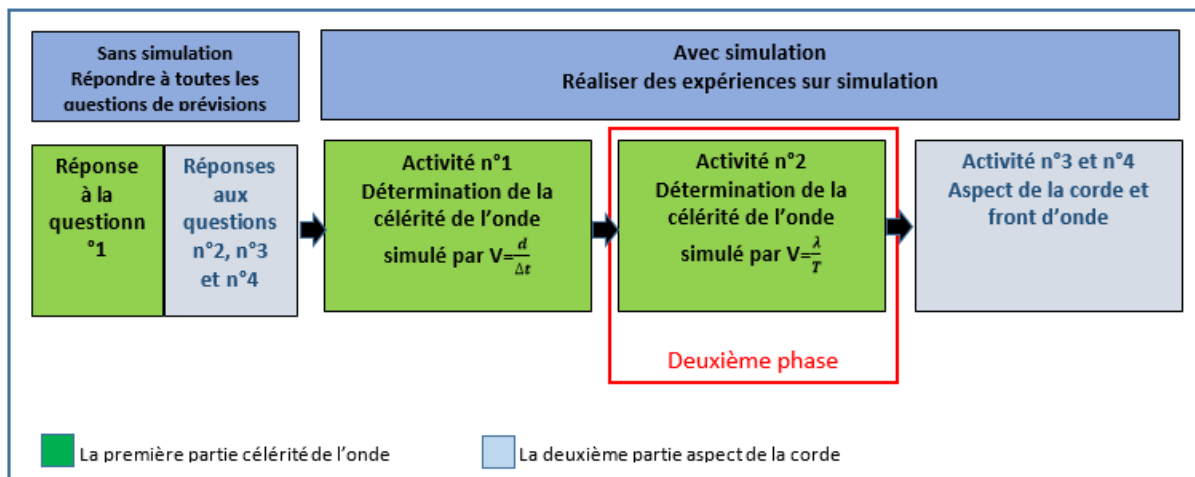


Figure 10. 3: Emplacement de la deuxième phase dans la séance du TP

3.1 Le synopsis de la deuxième phase de la séance

Cette deuxième phase de la séance dure 20 minutes 28 secondes. Le synopsis renferme six scènes et neuf épisodes, dont trois d'entre eux comportent des événements remarquables.

Quatrième partie : analyse a posteriori
Chapitre 10 : analyse des activités au cours de la séance par PCDR

Temps	Phases	Scènes	Episodes	Déroulement		Evènements remarquables
				Action du professeur	Action de l'élève	
Début de la deuxième phase						
0:32:24	Phase 2 Célérité de l'onde 2 ^{ème} méthode	<u>Scènes 8</u>	E14	P passe à la deuxième tâche aussi sur la vitesse il leur rappelle la formule $V=d/t$. Il demande à ses élèves d'utiliser le mode continue. Il suffit alors de déterminer λ et T. P demande aussi de différencier entre la sinusoïde de temps et celle d'espace. Un élève répond correctement et P pose de nouveau la question suivante : par quelle sinusoïde doit-on procéder ? Quelques élèves répondent par la sinusoïde des espaces. P écrit l'expression au tableau mais il se trompe de mode. Il affirme qu'on doit utiliser le mode continu, il refait l'expérience en mode continu et il l'arrête à un instant t arbitrairement choisi		La plupart des élèves savent que λ doit être déterminée à partir de la sinusoïde des espaces mais ne savent pas la déterminer expérimentalement. Ils ne font pas de lien entre la théorie et l'expérimentation
0:36:38		<u>Scènes 9</u>	E15	P demande à ses élèves de faire la même expérience pour mesurer la longueur d'onde entre deux maximums		Le prof. se trouve obligé de guider ses élèves pour tracer la sinusoïde de temps
0:37:56			E16	La valeur trouvée par les élèves est 10cm. P demande comment peut-on mesurer la période temporelle mais pas de réponse.		Les élèves trouvent des difficultés pour déterminer T et pour la première fois, ils s'aperçoivent que le mouvement d'un point ressemble à celui d'un pendule élastique vertical
0:38:42		<u>Scènes 10</u>	E17	P rappelle le cours, il explique que chaque point à un mouvement sinusoïdal et donc qu'il suffit de déterminer la période du mouvement d'un point, qu'on doit se fixer sur un point par exemple bleu. Les élèves disent que ce point oscille avec une période temporelle. P schématise un pendule élastique vertical pour montrer comment faire la même chose pour déterminer T et mesurer la durée de 10 oscillations	Les élèves n'ont pas d'idée sur la nature du mouvement d'un point de la corde atteint par l'onde	

Quatrième partie : analyse a posteriori

Chapitre 10 : analyse des activités au cours de la séance par PCDR

0:43:06.			E18	P explique au tableau les limites d'une oscillation. Il aide ses élèves à réaliser l'expérience, il passe entre les groupes. « Arrêtez le chronomètre » dit P, puis « si vous avez déterminé la durée de 5 oscillations, divisez alors par 5 »	Les élèves déterminent la période T	
0:44:03		<u>Scènes 11</u>	E19		Les élèves calculent la vitesse de propagation de l'onde et la compare à la vitesse déjà trouvée par la première expérience	Les élèves sont convaincues par le résultat des expériences La conclusion est formulée par le prof.
			E20	P récupère les valeurs de T ; les élèves donnent les valeurs de la vitesse		
		<u>Scènes 12</u>	E21	P demande de les comparer à la valeur de la première activité. Les élèves répondent que ce sont les mêmes. P répond bien sûr que oui et dicte la conclusion « la vitesse de propagation ne dépend pas de l'amplitude de l'ébranlement » et il pose la question suivante : « est ce qu'il y a une différence entre la vitesse de propagation de l'ébranlement et celle de l'onde » ? Les élèves disent en même temps que ce sont les mêmes. P ajoute « pour un milieu donné »		
0:51:38.		<u>Scènes 13</u>	E22	P demande à ses élèves de critiquer leurs réponses à la première question « pourquoi vous avez choisi une réponse qui n'est pas correcte ? »		
Fin de la deuxième phase						

3.2 *Narration didactique*

Le professeur passe à la deuxième tâche. Cette dernière porte aussi sur la vitesse de propagation de l'onde. Il demande à ses élèves d'utiliser le mode continu pour déterminer λ et T . L'enseignant pose à ses élèves quelques questions sur les sinusoides des espaces et celle du temps et sur la distinction entre les deux. Il pose la question suivante à ses élèves : « par quelle sinusoides doit-on procéder pour déterminer convenablement chaque grandeurs T et λ ? » Les élèves trouvent la bonne valeur de la longueur d'onde mais, par contre, ils rencontrent des difficultés pour déterminer la période T . Le professeur intervient pour faire une analogie entre le mouvement rectiligne sinusoidal d'un solide d'un pendule élastique vertical. Il explique à ses élèves que chaque point a un mouvement sinusoidal, et qu'il suffit donc de déterminer la période du mouvement d'un point. Pour cela, on doit suivre le mouvement d'un point quelconque de la corde. Les élèves s'aperçoivent alors que le mouvement d'un point de la corde ressemble à celui d'un pendule élastique vertical. Ils déterminent la valeur de T . L'enseignant récupère les valeurs trouvées par les élèves et leur demande de faire des comparaisons de différentes vitesses trouvées qui s'avèrent pratiquement les mêmes. Ils forment ensemble la conclusion du travail. Enfin, l'enseignant encourage les élèves à critiquer leur choix de réponse sur la question de prévision.

3.3 *Analyse en jeux d'apprentissage.*

Le synopsis présenté précédemment nous permet d'organiser notre tableau d'analyse de la deuxième phase de la séance, en adoptant la même catégorisation en termes de jeux d'apprentissage (jeu d'investigation, jeu de préparation ou jeu de transition). Nous présentons le tableau d'analyse de la deuxième phase de la séance.

Quatrième partie : analyse a posteriori
Chapitre 10 : analyse des activités au cours de la séance par PCDR

Temps	Phases	Scènes	Episode	Déroulement		Evènements remarquables
				Rôle joué par le professeur	Rôle joué par l'élève	
Fin de la première phase						
0:32:24	Phase 2 Célérité de l'onde 2 ^{ème} méthode	<u>Scène 8 :</u> Jeu 1 Jeu de Préparation	E14	Le prof passe à la deuxième activité portant sur la vitesse il rappelle la formule $V=d/t$ il demande ses élèves d'utiliser le mode continue il suffit alors de déterminer λ et T il demande aussi de différencier entre la sinusoïde de temps et celle d'espace. Un élève répond correctement, pose de nouveau la question suivante par quelle sinusoïde doit-on procéder. Quelques élèves répondent par la sinusoïde des espaces. Il écrit l'expression au tableau mais il se trompe du mode il affirme qu'on doit utiliser le mode continu. Il refait l'expérience en mode continu il l'arrête à un instant t arbitrairement choisi		La plupart des élèves savent que λ doit être déterminé de la sinusoïde des espaces mais ne savent pas la déterminer expérimentalement, il n'y avait pas de lien entre la théorie et l'expérimentation
0:36:38		<u>Scène 9 :</u> Jeu 2 Jeu d'investigation J.I.1	E15	Il demande à ses élèves de faire la même expérience pour mesurer la longueur d'onde entre deux maximums. La valeur trouvée par les élèves est 10cm		Le prof se trouve obligé de guider ses élèves à tracer la sinusoïde de temps
0:37:56		Moment de confrontation	E16	Le prof demande comment peut-on mesurer la période temporelle pas de réponse.		Les élèves trouvent des difficultés pour déterminer T et c'est pour la première fois qu'ils s'en aperçoivent que le mouvement d'un point ressemble que celui d'un pendule élastique verticale
0:38:42		<u>Scène 10</u> Jeu 3 Jeu de transition J.1.2-J.I.3 Préparation du moment de discussion	E17	Le prof rappelle le cours il explique que chaque point a un mouvement sinusoïdal donc il suffit de déterminer la période de mouvement d'un point qu'on doit se fixer sur un point par exemple bleu. Les élèves disent que ce point oscille avec une période temporelle le prof schématise un pendule élastique vertical pour monter de faire la même chose pour déterminer T et de mesurer la durée de 10 oscillations	Les élèves n'ont pas une idée sur la nature du mouvement d'un point de la corde atteint par l'onde	

Quatrième partie : analyse a posteriori
Chapitre 10 : analyse des activités au cours de la séance par PCDR

0:43:06.			E18	Il explique au tableau les limites d'une oscillation. Le prof aide ses élèves pour réaliser l'expérience il passe entre les groupes leurs dit d'arrêter le chronomètre dit même s'ils ont déterminé la durée de 5 oscillations divisé alors par 5	Les élèves déterminent la période T Les élèves calculent la vitesse de propagation de l'onde et le compare avec la vitesse déjà trouvée par la première expérience	
0:44:03		<u>Scène 11 :</u> Jeu 4 Jeu d'investigation J.I.2 Moment discussion	E19		Des discussions au sein de chaque groupe d'élève, sur la période T du mouvement d'un point de la corde et sur la célérité qui s'est avérée constante	
0:47:53		<u>Scène 12 :</u> Jeu 5 Jeu d'investigation J.I.3 Moment de résolution	E20	Le professeur récupère les valeurs de T, les élèves donnent les valeurs des vitesses		Les élèves sont convaincues par le résultat des expériences La conclusion est formulée par le prof
			E21	Le professeur demande de les comparer à la valeur de la première activité Ils répondent que oui, le prof répond bien sure et dicte la conclusion "la vitesse de propagation ne dépend pas de l'amplitude de l'ébranlement" et pose la question sur la différence entre la vitesse de propagation de l'ébranlement et celle de l'onde les élèves parlent en même temps que ce sont les mêmes, le prof ajoute pour un milieu donne		
0:51:38.		<u>Scène 13 :</u> Jeu 6	E22	Le professeur demande à ses élèves de critiquer leurs réponses de la première question " pourquoi vous avez choisi une réponse qui n'est pas correcte ?		
Fin de la deuxième phase						

Les six scènes de cette deuxième phase correspondent tous aux six jeux d'apprentissage, dont un jeu de préparation au début de la phase, trois jeux d'investigation qui sont prévu et qui coïncident avec trois moments (confrontation, discussion et résolution) parmi les quatre moments de l'enseignement par PCDR, et un seul jeu de transition. Sachant que le premier moment de prévision est fait au début de la séance. Notre analyse en jeux d'apprentissage est résumée dans le schéma suivant qui présente leur enchaînement chronologique au cours de cette deuxième phase.

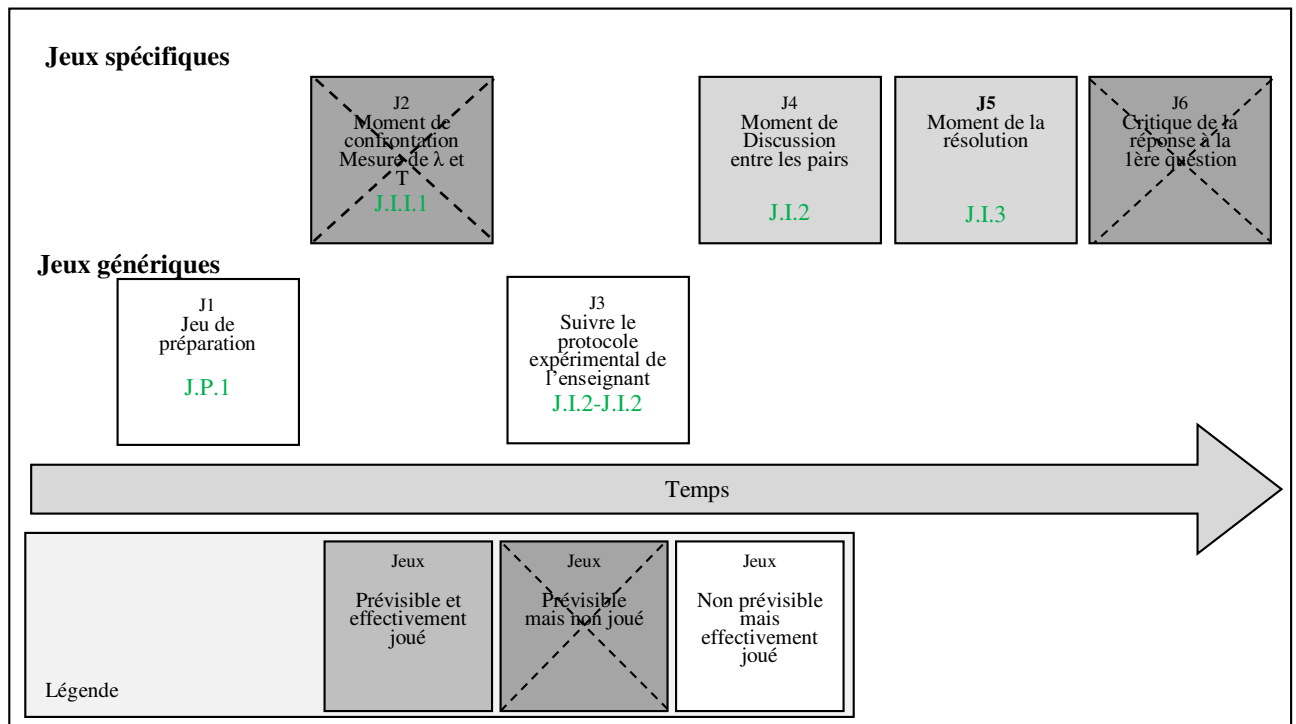


Figure 10. 4: Déroulement des jeux d'apprentissage en fonction du temps 2^{ème} phase

3.3.1 Jeu 1 : jeu de préparation J.P.1

Ce jeu est constitué d'un seul épisode E14 qui a une durée de 4 minutes 14 secondes. L'enseignant opte pour un court rappel sur les sinusoides d'espace et du temps en faisant une correspondance entre la période temporelle de la sinusoïde de temps et celle spatiale pour la sinusoïde des espaces. Ce jeu n'était pas prévu au cours de la préparation du scénario de la séance.

3.3.2 Jeu 2 : jeu d'investigation J.I.1

Rappelons que cette première partie de la séance est constituée de deux phases qui portent sur la célérité de l'onde et que les élèves ont déjà répondu à la question de prévision.

Le premier moment de l'approche par PCDR est donc déjà fait. Ce premier jeu d'investigation correspond au deuxième moment de la PCDR. Il s'agit du moment de la confrontation des conceptions par la simulation. Ce jeu est composé de deux scènes d'une durée de 2 minutes 4 secondes. En se référant à l'analyse initiale, nous avons prévu trois jeux, le premier (J1) pour la détermination de la période T , le deuxième (J2) pour la détermination de la longueur d'onde λ et le troisième (J3) pour le calcul de la célérité. Mais l'enseignant les fusionne dans la séance réelle en un seul jeu 2. Le problème inattendu, c'est que les élèves n'ont aucune idée sur la manière de déterminer la période temporelle T . Alors ce jeu envisagé n'est pas joué comme le montre la question de l'enseignant « comment peut-on mesurer la période T ? » qui demeure sans réponse. L'enseignant s'aperçoit que ses élèves sont incapables de déterminer expérimentalement la période de l'onde bien que la simulation donne cette possibilité par deux méthodes décrites dans le jeu 2 prévu. Le professeur s'aperçoit alors qu'il se trouve dans une situation de blocage, aussi il lance la question de nouveau. Nous présentons ici un extrait du discours entre l'enseignant et les élèves.

<i>Temps : 37 min 56s</i>		
<i>Tdp</i>	<i>Locuteur</i>	<i>Production verbale</i>
1	P	<i>c'est quoi la période temporelle ? + comment on doit mesurer la période temporelle ? + commencer de mesurer la période temporelle ihh. "أيا نعملوا كيفاش" (en arabe)</i>
2	E1	<i>quelle est la méthode monsieur ?</i>
3	P	<i>vous devez choisir une méthode.</i>
4	E1	<i>c'est la distance qui sépare deux maximums.</i>
5	P	<i>mais c'est la longueur d'onde spatiale. J'ai besoin de calculer eh mesurer la période temporelle, aller.+++ c'est quoi la période temporelle,</i>
6	E2	<i>La durée.</i>
7	P	<i>la durée de quoi ? la durée de quoi ? qu'est ce qu'on a vu en cours ? +++</i>

3.3.3 Jeu 3 : jeu de transition J.I.1-J.I.2

Les conditions précédentes amènent l'enseignant à créer un nouveau jeu d'ordre générique, un jeu constitué de deux scènes d'une durée globale de cinq minutes 21 secondes. Dans ce jeu, le professeur rappelle le cours, il explique que chaque point de la corde est muni d'un mouvement sinusoïdal, et que donc, il suffit de déterminer la période du mouvement d'un de ces points. L'enseignant annonce le protocole expérimental suivant qui consiste à se fixer sur un point de la corde affecté par l'onde, par exemple le point bleu sur l'écran. Les élèves

déclarent alors que ce point oscille sinusoïdalement avec une période temporelle. Le professeur schématise sur l'écran un pendule élastique vertical. Il rappelle à ses élèves des travaux pratiques déjà réalisés sur l'étude du mouvement des oscillations d'un pendule élastique au cours de l'enseignement des oscillateurs mécaniques. Il montre alors qu'il suffit de faire la même chose pour déterminer la période T et de mesurer la durée Δt relative à 10 oscillations, la période est alors $\frac{\Delta t}{10}$. Pour la première fois, les élèves s'aperçoivent que le mouvement d'un point de la corde ressemble à celui d'un pendule élastique vertical.

Temps : 38 min 42s		
<i>Tdp</i>	<i>Locuteur</i>	<i>Production verbale</i>
1	P	Pour créer une onde le long de la corde il suffit de relier à une source d'onde. heh si la source est de mouvement rectiligne sinusoïdale +++ son élongation elle varie comment au cours du temps ? « صحيح وإلا لا » (shih walla lee) »?
2	E3	c'est périodique.
3	P	Périodique sinusoo!
4	E3	périodique sinusoïdalement.
5	P	périodique c'est quoi la période ? période tempo !
6	E1	période temporelle.
7	P	il suffit de prendre n'importe quel point de la corde. Prendre le point essayez de se concentrer sur ce point هانذا وإلا لا située à cinq centimètres point vous « allez voir comment il va se mettre en mouvement allez, en mode ralenti ou bien se concentrez un point coloré par exemple le point :
8	E4	à 6 centimètres par exemple.
9	P	le point::: bleu par exemple le point bleu euhh..euh.. « choufou » comment il se met en mouvement « chnoua yaamel » ce point allez.
10	E4	se déplace verticalement
11	P	c'est comme ça « wella lee » c'est un segment de droite ? euh il// oscille entre deux points extrêmes il oscille++ son mouvement est dit perio::
12	EX	périodique
13	P	de période tempo::
14	EX	temporelle.
15	P	période temporelle. Comment je mesure la période T++ imaginez que vous avez un ressort avec un solide qui va osciller ++ son mouvement est dit sinusoïdale.
16	E1	la période entre X_{max} moins X_{max}
17	P	la période entre X_{max} moins X_{max} c'est la distance !
	E1	on calcule la période des oscillations.
	P	eh ce n'est pas la période des oscillations mais la durée des 10 oscillations++ finalement T est la durée d'une oscillation pour chercher T , il suffit de diviser cette durée par 10 puisqu'il est rapide. Donc « tahdhou intom » le mode ralenti le mode ralenti « nahdhou » vous allez fixer le point d'abscisse x 7 centimètres, le bleu par exemple. Et on détermine la durée de 7 oscillations allez « nahdhou » le mode

		<i>très ralenti, très ralenti, quand est ce que je considère une oscillation +++ « fi il minimale » je reviens au minimal ou bien élongation nulle et je reviens du maximal je reviens au maximal du minimal, je reviens au minimal lors alors « tkoun fi ilminimal » une oscillation deux oscillation jusqu'à 7 oscillations, mais le problème il faut déclencher le chronomètre « aya.. »</i>
<i>Temps : 43 min 06 s</i>		

Le professeur récupère alors les valeurs des périodes T mesurées par les élèves, sans oublier que des approximations doivent être prises en considération comme celui du jeu d'approximation réalisé au cours de la première tâche. Ensuite, les élèves donnent les valeurs de la vitesse et le professeur leur demande de les comparer à la valeur déjà trouvée dans la deuxième tâche.

3.3.4 Jeu 4 : jeu d'investigation J.I.2

Ce quatrième jeu d'investigation prévu est constitué d'une seule scène formée d'un épisode qui a une durée de 3 minutes 50 secondes. C'est le moment de discussion entre les pairs. Les bandes audios de chaque groupe montrent que les discussions au sein de chaque groupe d'élèves portent essentiellement sur la période temporelle du mouvement d'un point de la corde et sur la célérité qui s'avère constante.

3.3.5 Jeu 5 : jeu d'investigation J.I.3

Ce jeu comporte une seule scène, d'une durée de 3 minutes 45 secondes, constituée de deux épisodes. Dans le premier, l'enseignant récupère les valeurs de T mesurées par les élèves et les valeurs de célérité de l'onde. Les valeurs sont pratiquement les mêmes en tenant compte des arrondissements des valeurs faites par les élèves. Le professeur leur demande de comparer la valeur de la célérité trouvée avec celle trouvée dans la première tâche. Les élèves répondent que ce sont les mêmes. L'enseignant remarque qu'une partie des élèves a utilisé le mode impulsion au cours de la tâche précédente. Ils ont calculé la célérité de l'ébranlement et non pas de l'onde qui se propage le long de la corde. A une réponse collective des élèves « ils sont les mêmes », l'enseignant « ajoute pour un milieu donné ». Il semble que les élèves savent que les célérités sont les mêmes et que la célérité d'une onde est celle de l'ébranlement qui la constitue. Cela aide l'enseignant à mettre en relief le milieu de propagation, et la dépendance de la célérité d'une onde aux propriétés du milieu et non pas aux caractéristiques de l'onde. Enfin, l'enseignant dicte la conclusion : « la vitesse de propagation ne dépend pas de l'amplitude de l'ébranlement ». Il pose alors la question : « est ce qu'il y a différence entre la vitesse de

propagation de l'ébranlement et celle de l'onde ? » Les élèves s'expriment en même temps pour dire que ce sont les mêmes mais le professeur ajoute « pour un milieu donné ».

3.3.6 Jeu 6

Ce jeu envisagé initialement ne fait pas partie du scénario pédagogique, ni de l'enseignement par PCDR. Il s'agit d'un jeu supplémentaire proposé par le chercheur pour prendre en considération les origines présumées des conceptions. Finalement, ce jeu n'est pas joué. En effet, seuls quelques élèves fournissent des critiques qui ne sont pratiquement pas fertiles. Nous présentons dans la suite quelques réponses.

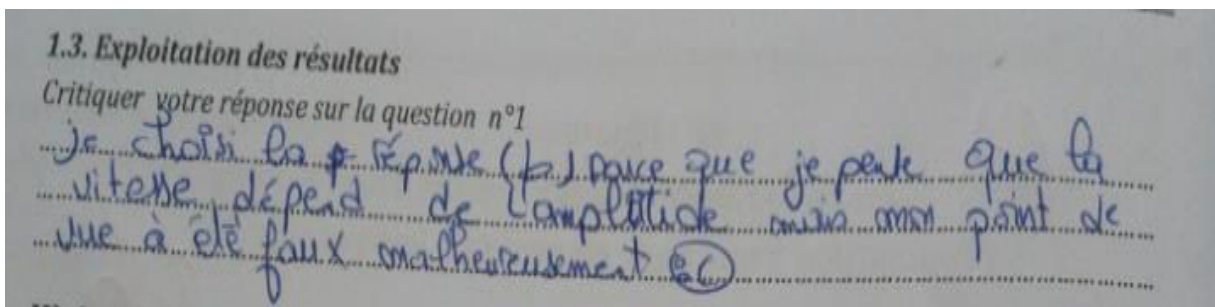


Figure 10. 5: Critique de l'élève E6

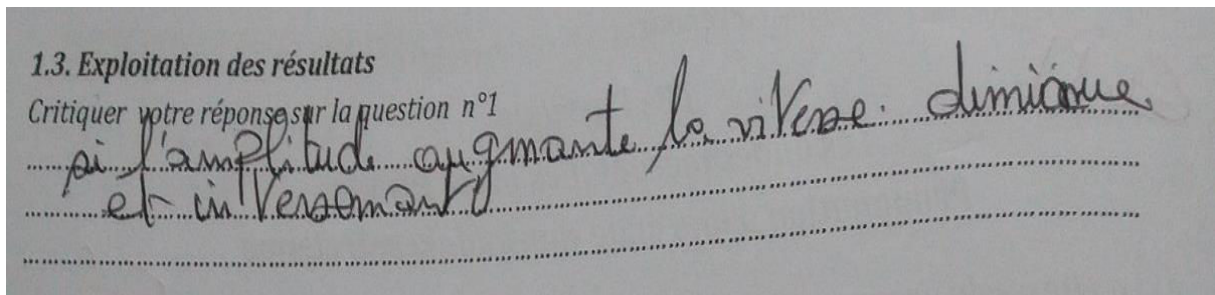


Figure 10. 6: Critique de l'élève E8

3.4 Jeux d'apprentissage/jeux épistémiques

Cette activité est analysée en six jeux d'apprentissage, le premier et le deuxième jeu font appel à des savoirs déjà acquis au cours de l'enseignement des ondes juste avant cette séance. Dans ce cas, l'intrication des jeux d'apprentissage et des jeux épistémiques est forte de sorte que les élèves ne rencontrent pas de difficultés au niveau du premier jeu. Le problème s'installe au niveau du deuxième jeu, à cause de la densité épistémique et de la spécificité du jeu épistémique émergent. Cette action didactique montre qu'il y a une distance entre le jeu d'apprentissage et le jeu épistémique émergent et ceci entre la définition d'une période temporelle d'une onde et sa détermination expérimentale. Pour gagner ce jeu, l'enseignant crée alors un nouveau jeu qui mobilise des savoir-faire acquis lors de l'enseignement des oscillateurs

mécaniques. Cela permet aux élèves de rendre compte de l'aspect oscillatoire du mouvement d'un point de la corde. Nous constatons, à l'instar de Santini (2012), « *qu'un même jeu épistémique peut émerger d'une succession réglée de jeu d'apprentissage* ». De même, nous pensons que ce jeu peut être qualifié de jeu de transition entre deux jeux d'investigation. Ce jeu permet en effet de guider les élèves à partir de connaissances susceptibles d'être mobilisées dans la séance (Cross et Grangeat, 2014). Notons ici que le jeu 4 ne pourra être joué qu'après la création du jeu 3. Par contre, les jeux 4 et 5 sont des jeux spécifiques à une séance de type PCDR. Enfin, le jeu 6 n'est pas joué par la plupart des élèves.

3.5 *Dialectique contrat-milieu*

Du point de vue de la dialectique contrat-milieu, cette troisième activité montre qu'à travers la deuxième activité les changements partiels du contrat et du milieu sont bien installés. Les élèves se sont approprié ces changements. Nous pouvons citer à titre d'exemple, l'arrondissement des valeurs expérimentales trouvées par simulation et les approximations qui sont prises en compte lors de la troisième activité. Nous constatons que ce changement ne présente, a priori, aucun obstacle d'enseignement. Un deuxième constat est que l'approche par PCDR semble acquise par l'enseignant et par les élèves. Le nouveau contrat didactique possède des dimensions spécifiques à la démarche d'investigation. Néanmoins, cette démarche est rompue par le jeu générique J3. C'est un jeu qui consiste à dire aux élèves ce qu'ils doivent faire, afin de mobiliser d'autres connaissances déjà acquises et non spécifiques à la séance en cours, donc non spécifique au jeu d'apprentissage numéro 2, cette démarche d'investigation est reprise par le jeu 4.

Pour conclure, l'usage de connaissances disponibles chez les élèves (similitude avec le pendule vertical) est bien une modification du milieu puisque des connaissances sont introduites dans le milieu. Le fait que ce soit l'enseignant est également à évoqué cette similitude, dans ce cas, on voit que l'expression est nécessaire et que la réticence n'est pas efficace. Cette expression permet la clause proprio motu puisqu'on voit les élèves comprendre la similitude des phénomènes.

3.6 *Conclusion*

En se référant à la définition proposée par Sensevy, « *le contrat didactique propre à une situation didactique peut alors se concevoir comme un système d'habitudes engendrant lui-même un système d'attentes, système actualisé par cette situation particulière* ». (Sensevy,

2007, p. 19), nous pouvons tirer la conclusion que la première phase effectuée au début de la séance a introduit des changements au niveau du contrat didactique par rapport à une séance d'enseignement ordinaire, les élèves travaillant sur une simulation comme dans le cas d'une expérimentation réelle sur paillasse où le calcul d'incertitude est présent. La flexibilité de l'enchaînement des jeux d'apprentissage a donné à l'enseignant la possibilité d'introduire un jeu générique, jeu qui a permis de guider les élèves pour mobiliser d'autres connaissances non spécifiques au concept en jeu, ce qui a permis aussi de gagner le jeu suivant en gardant en même temps l'esprit d'une démarche d'investigation adoptée par l'approche d'enseignement par PCDR.

4 Analyse *a posteriori* de la troisième phase

L'encadré en rouge marque la troisième phase de la séance, dernière phase dans cette séance du TP.

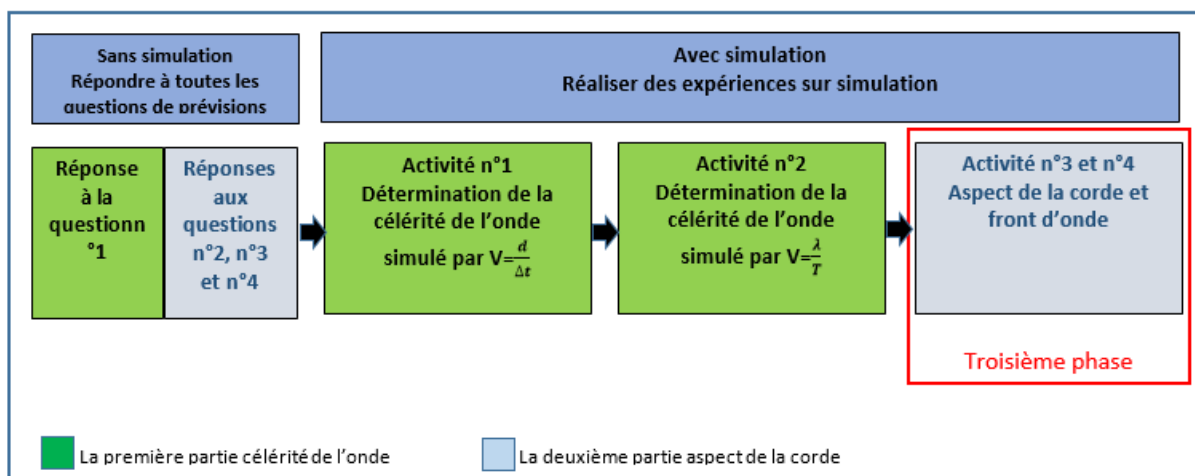
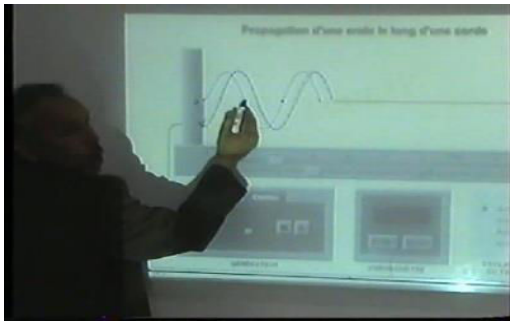


Figure 10. 7: Emplacement de la troisième phase dans la séance du TP

4.1 Le synopsis de la troisième phase de la séance

La troisième phase, la dernière phase de cette séance, dure 38 minutes 15 secondes. Le synopsis renferme six scènes et seize épisodes, dont deux mettent en avant des événements remarquables.

Quatrième partie : analyse a posteriori
Chapitre 10 : analyse des activités au cours de la séance par PCDR

Temps	Phases	Scènes	Episodes	Déroulement		Evènements remarquables
				Action du professeur	Action de l'élève	
Début de la troisième phase						
0:52:52	Phase 3 Sinusoïde des espaces	<u>Scène 14 :</u>	E23	P passe à l'activité suivante, il lit et explique en même temps la tâche à faire		
0:54:05		<u>Scène 15 :</u>	E24	Par projection de la simulation sur le tableau, le professeur fait une démonstration aux élèves, et il dit : « arrêtez la simulation lorsqu'elle attend 15 cm ». Il se déplace entre les rangs pour contrôler le travail des élèves.	Les élèves sont en train de manipuler la simulation et de tracer les courbes	
0:55:47			E25	P trace au tableau la partie de la sinusoïde pour un temps légèrement supérieur à t. On arrête de nouveau la simulation et il trace au tableau en même temps que ses élèves la nouvelle sinusoïde "		
0:57:48		Scène 16	E26	« Essayez de voir comment se déplace la source et le front d'onde ». P trace au tableau et sur le schéma le sens de déplacement de la source et celui du front d'onde 		Les élèves éprouvent des difficultés pour identifier le sens de déplacement de la source à un instant donnée et celui du front d'onde. Même avec la simulation, ils constatent que cela est étrange
0:58:48.		<u>Scène 17 :</u>	E27	P choisit une réponse déjà donnée par une élève : source se déplace verticalement. Mais comme cette réponse est fausse pour le front d'onde le professeur demande « s'il y a d'autres choses étranges ». Il revient au tableau et il insiste sur les explications qu'il a déjà fournies. Il le dicte alors la conclusion « la source se déplace verticalement et le front d'onde se déplace horizontalement »		

Quatrième partie : analyse a posteriori

Chapitre 10 : analyse des activités au cours de la séance par PCDR

1:03:10			E28	P demande de tracer les deux courbes sur leurs feuilles. Un silence s'installe, les élèves tracent les courbes soigneusement		
1:07:05			E29	P passe à l'activité suivante, il montre sur le tableau le sens de déplacement d'un point M. Il demande de la comparer avec le mouvement de la source		P refait devant les élèves l'expérience au tableau (data show projeté sur le tableau, ce qui permet à l'enseignant de retracer les sinusoides sur le tableau blanc)
1:09:17		<u>Scène 18 :</u>	E30	P simule l'onde au tableau en traçant sur le tableau blanc les traces de la corde simulée. Les élèves répondent en même temps qu'elles sont en phase. P demande pourquoi, est ce que cela est attendu ? Une élève répond que la distance qui les sépare c'est λ et que ce résultat a déjà été rencontré dans le cours		
1:11:48			E31	P demande ensuite de trouver tous les points qui sont en phase avec la source. P et élèves trouvent ensemble qu'ils sont au nombre de 4.		
1:12:57			E32	P demande de trouver le nombre de points qui sont en opposition avec la source. Il rappelle le résultat trouvé dans le cours.		
1:14:01			E33	P efface ensuite le tableau et il trace de nouveau la sinusoïde calquée de la simulation. Il laisse l'onde avancer et il l'arrête et retrace sur le tableau la nouvelle courbe. Il efface le tableau car le schéma n'est pas clair et refait le même.		
1:18:27			E34	P explique au tableau que cette méthode permet de voir le déphasage entre la source et un point quelconque		
1:19:29			E35	P dicte "S et M en phase" et il demande aux élèves de formuler une conclusion. Avec l'aide d'un élève, il dicte « les points d'abscisse $k.\lambda$ sont en phase avec la source et si la distance est $k.\lambda + \lambda/2$, ils sont en opposition de phase avec la source.		
1:21:48			E36	P dit que son objectif est de tracer l'aspect de la corde à l'instant $t' > t$ à partir de la courbe à l'instant		

Quatrième partie : analyse a posteriori

Chapitre 10 : analyse des activités au cours de la séance par PCDR

				t. Il écrit au tableau que la nouvelle abscisse du front d'onde est $x' = x_f + dx$. Il fixe ce point x' sur l'axe et trace la nouvelle courbe en disant qu'on doit revenir en arrière et cela jusqu'à attendre la source. Cette méthode repose sur le mouvement horizontal du front d'onde. Il trace sur les courbes un segment perpendiculaire à l'axe des x et il montre qu'à partir de ce segment, on observe le sens de déplacement d'un point. Il montre également que cette méthode peut être utilisée pour n'importe quel point de la corde		
1:26:57		<u>Scène 19 :</u>	E37	P demande à ses élèves de critiquer leurs réponses sur la question de prévision et il leur accorde le temps nécessaire. Il encourage ses élèves à écrire leur critique sans aucun souci		
1:31:07			E38	La séance est terminée. P ramasse les copies des élèves qui rangent leurs affaires. P les remercie pour leurs efforts		
Fin de la troisième phase						

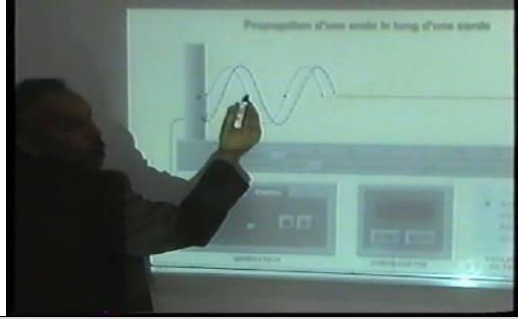
4.2 *Narration didactique*

Le professeur donne l'ordre de passer à l'activité suivante. Il explique en simulant au tableau les étapes à faire, puis il se déplace entre les rangs pour contrôler le travail. Sans interrompre le travail des apprenants, l'enseignant trace au tableau deux sinusoïdes des espaces qui sont légèrement décalées. Lorsqu'il a terminé, il s'adresse aux élèves : « essayez de voir comment se déplace la source et le front d'onde ». Il se contente d'une seule réponse d'élève qui est correcte pour la source mais fausse pour le cas du front d'onde. Il passe ensuite à la conclusion : « la source se déplace verticalement et le front d'onde se déplace horizontalement ». Par la suite, l'enseignant demande à ses élèves de tracer les deux courbes sur leurs feuilles, un silence s'installe dans la salle. À la tâche suivante, le professeur demande de comparer le mouvement d'un point M choisi avec le mouvement de la source. L'enseignant reprend la simulation, il trace sur le tableau blanc la corde simulée. Lorsqu'il a terminé de tracer, les élèves répondent en même temps qu'ils sont en phase. Le professeur demande alors de trouver tous les points qui sont en phase avec la source. Professeur et élèves trouvent ensemble qu'ils sont au nombre de quatre. Le professeur demande ensuite de trouver le nombre de points qui sont en opposition avec la source. Il rappelle le résultat déjà trouvé dans le cours. Il fait une démonstration déjà faite en cours des positions des points en phase avec la source et celles des points en opposition de phase. Le professeur explique au tableau que cette méthode permet de voir le déphasage entre la source et un point quelconque de la corde. Il demande à ses élèves de critiquer leurs réponses sur la question de prévision et il leur accorde le temps nécessaire pour cela. Il les encourage à écrire leurs critiques sans aucun souci. La séance est terminée, le professeur ramasse les copies des élèves. Enfin, il les remercie pour leurs efforts.

4.3 *Analyse en jeux d'apprentissage*

Comme pour les phases précédentes, nous développons notre tableau d'analyse où nous localisons les différentes catégories de jeux effectifs, en termes de jeu d'investigation, jeu de préparation ou jeu de transition.

Quatrième partie : analyse a posteriori
Chapitre 10 : analyse des activités au cours de la séance par PCDR

Temps	Phases	Scènes	Episodes	Déroulement		Evènements remarquables
				Action du professeur	Action de l'élève	
0:52:52	Phase 3 Sinusoïde des espaces	<u>Scène 14 :</u> Jeu 1 Jeu de Préparation	E23	P passe à l'activité suivante il lit et explique en même temps la tâche à faire		
0:54:05		<u>Scène 15 :</u> Jeu 2	E24	Il simule le tableau " arrêtez la simulation, lorsqu'elle attend 15 cm" il se déplace entre les rangs pour contrôler le travail des élèves.	Les élèves sont entrain de manipuler la simulation et de tracer les courbes	
0:55:47		Jeu d'investigation J.I.1 Moment de confrontation	E25	P trace au tableau la partie de la sinusoïde, et pour un instant légèrement supérieur à l'instant t, on arrête de nouveau la simulation et il trace au tableau en même temps que ces élèves la nouvelle sinusoïde "		
0:57:48		<u>Scène 16</u> Jeu 3 Jeu de transition J2-3 Préparation du moment de la confrontation	E26	Essayez de voir comment se déplace la source et le front d'onde" il trace au tableau et sur le schéma le sens de déplacement de la source et celui du front d'onde 		Les élèves trouvent des difficultés pour identifier le sens de déplacement de la source à instant donnée et celui du front d'onde même avec la simulation ils constatent que cela est étrange
0:58:48.		<u>Scène 17 :</u> Jeu 4 Jeu d'investigation J.I.2	E27	Il choisit une réponse déjà donnée par une élève, la réponse est que la source se déplace verticalement, le prof la considère comme correcte mais sa réponse est fausse pour le front d'onde " il dit s'il y a d'autre chose étrange. Le prof revient au tableau et il insiste sur les		

Quatrième partie : analyse a posteriori
Chapitre 10 : analyse des activités au cours de la séance par PCDR

		Moment de confrontation		explications déjà fourni le prof dicte la conclusion" la source se déplace verticalement et le front d'onde se déplace horizontalement		
1:03:10			E28	P demande de tracer les deux courbes sur leurs feuilles, le silence s'installe les élèves tracent les courbes soigneusement		
1:07:05			E29	P passe à l'activité suivante, il montre sur le tableau le sens de déplacement de d'un point M. Le prof demande de la comparer avec le mouvement de la source		Le prof refait devant ses élèves l'expérience au tableau (data show projetée sur le tableau ce qui permet à l'enseignant de retracer les sinusoides sur le tableau blanc)
1:09:17		<u>Scène 18 :</u> Jeu 5 Jeu d'investigation J.I.3 Moment de résolution	E30	P simule l'onde au tableau en traçant sur le tableau blanc les traces de la corde simulé. Les élèves répondent en même temps qu'ils sont en phase, le prof dit : pourquoi, cela est attendu, une élève répond que la distance qui les sépare c'est λ et que ce résultat est déjà rencontré dans le cours,		
1:11:48			E31	P demande en suite de trouver tous les points qui sont en phase avec la source, ils trouvent ensemble qui sont 4 points.		
1:12:57			E32	P demande de trouver le nombre de point qui sont en opposition avec la source. Il rappelle le résultat trouvé dans le cours.		
1:14:01			E33	P efface ensuite le tableau, et il trace de nouveau la sinusoïde calquée de la simulation il laisse l'onde avancé et il l'arrête et retrace sur le tableau la nouvelle courbe le prof efface le tableau car le schéma n'est pas clair et refait la même courbe.		
1:18:27			E34	P explique au tableau que cette méthode permet de voir le déphasage entre la source et un point quelconque		

Quatrième partie : analyse a posteriori
Chapitre 10 : analyse des activités au cours de la séance par PCDR

1:19:29			E35	P dicte "S et M en phase" et il demande aux élèves de formuler une conclusion avec l'aide d'une élève il dicte "les points d'abscisse $K.\lambda$ sont en phase avec la source et si la distance et $k.\lambda + \lambda/2$ sont en opposition de phase avec la source.		
1:21:48			E36	P dit que son objectif est de tracer l'aspect de la corde à l'instant $t' > t$ à partir la courbe à l'instant t . il écrit au tableau que la nouvelle abscisse de front d'onde est $x' = x_f + dx$ fixe ce point x' sur l'axe et trace la nouvelle courbe en disant on doit revenir en arrière et jusqu'à ce qu'on atteigne la source. Cette méthode se repose sur le mouvement horizontal du front d'onde et trace sur les courbes un segment perpendiculaire à l'axe des x et montre qu'à partir de ce segment on observe le sens de déplacement d'un point et montre que cette méthode peut être utilisée pour n'importe quel point de la corde		
1:26:57		<u>Scène 19 :</u> Jeu 6	E37	P demande à ses élèves de critiquer leurs réponses sur la question de prévision et il leur accorde le temps nécessaire, il encourage ses élèves d'écrire leur critique sans aucun soucis		
1:31:07			E38	La séance est terminée, le professeur ramasse les copies des élèves qui rangent leurs affaires. Le professeur les remercie pour leurs efforts		

Fin de la troisième phase

Cette troisième phase comporte six scènes, lesquelles correspondent à six jeux d'apprentissage répartis comme suit : un jeu de préparation au début de la phase, trois jeux d'investigation dont deux jeux pour le même moment de confrontation, ces deux jeux étant séparés par un jeu de transition. On constate ici l'absence d'un jeu d'investigation qui correspond au moment de la discussion entre les pairs et qui fait partie de l'enseignement par PCDR.

Le schéma suivant résume notre analyse en jeux d'apprentissage. Ce schéma présente l'enchaînement chronologique des jeux au cours de cette troisième phase.

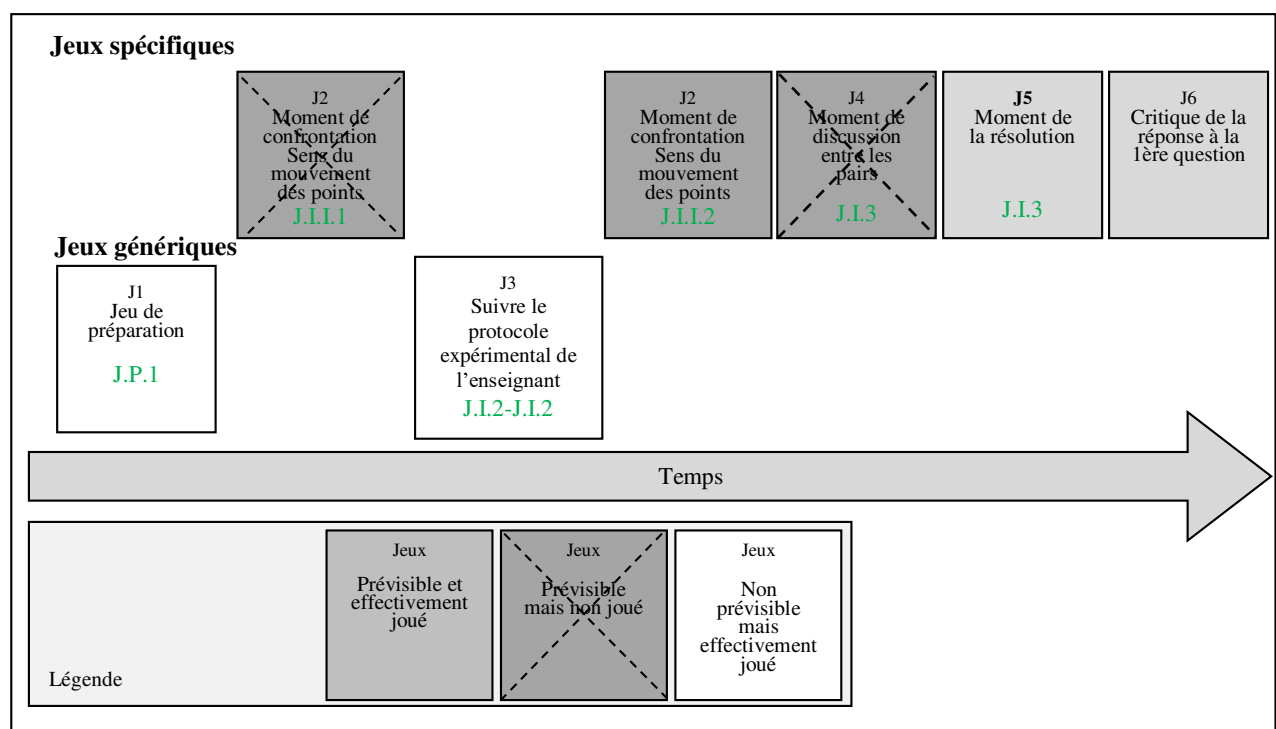


Figure 10. 8: Déroulement des jeux d'apprentissage en fonction du temps 3^{ème} phase

4.3.1 Jeu 1 : jeu de préparation J.P.1

Ce premier jeu de cette troisième et dernière phase est constitué d'un seul épisode, où l'enseignant oriente les élèves pour passer vers l'activité suivante. Il commence à lire le contenu de l'activité écrite sur la fiche de TP et explique en même temps ce que les élèves doivent faire. C'est un jeu qui précède la confrontation des réponses des élèves à la question de prévision sur l'aspect de la corde. C'est un jeu non prévu initialement que nous qualifions de jeu de préparation.

4.3.2 Jeu 2 : jeu d'investigation J.I.1

Ce jeu est constitué de deux épisodes et dure 3 minutes 43 secondes. Ce jeu consiste à reproduire deux sinusoïdes des espaces pour deux instants différents et très proches, et cela pour chaque groupe d'élèves. Au moment où les élèves se concentrent sur leur travail, l'enseignant réalise le même travail au tableau. Lorsqu'il a fini, il se déplace entre les rangs pour contrôler le travail des élèves. Il constate que les élèves n'ont pas pu tracer les courbes demandées. C'est à ce moment qu'il introduit un nouveau jeu générique non prévu que nous présentons dans le paragraphe suivant.

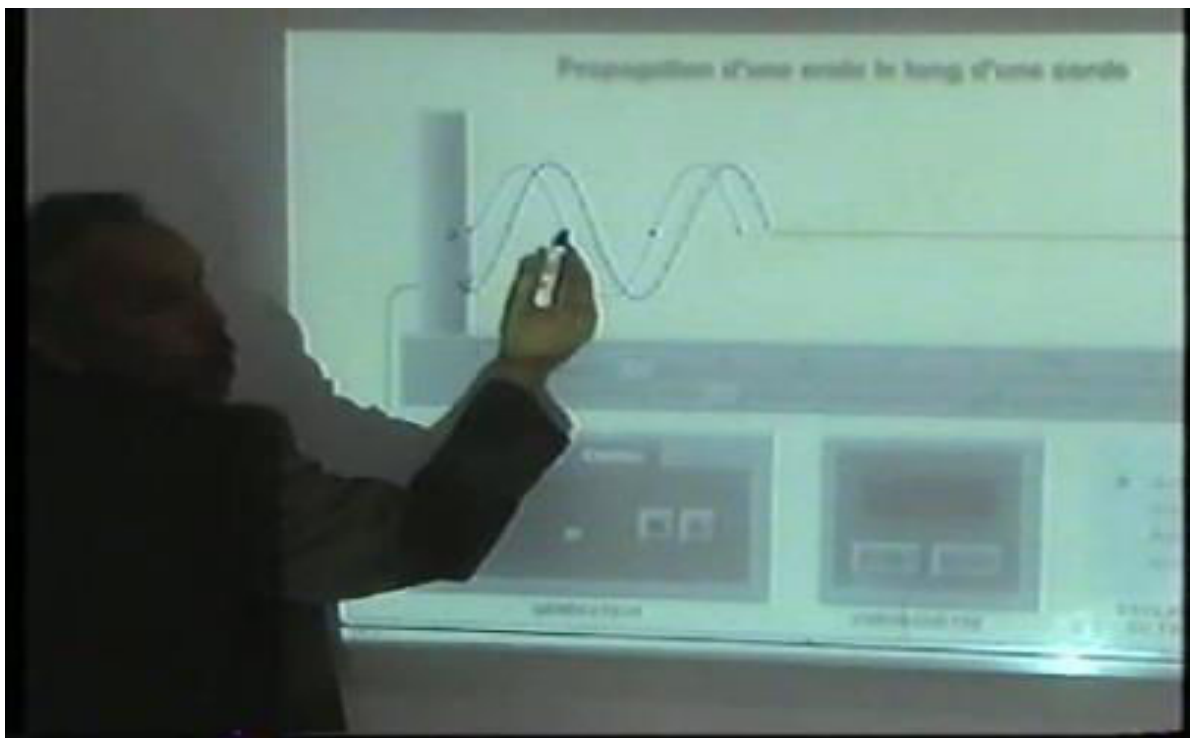


Figure 10. 9: L'enseignant entrain de tracer les deux sinusoïdes sur le tableau
(57min37s)

4.3.3 Jeu 3 : jeu de transition J2-3

Ce jeu, d'une durée d'une minute, est formé d'un seul épisode. L'enseignant choisit de faire une démonstration au tableau du travail demandé et ceci en attirant l'attention des apprenants pour se concentrer sur le mouvement de la source et celui du front d'onde entre les deux dates correspondant aux deux aspects de la corde. L'enseignant veut ici créer une stratégie gagnante pour gagner le jeu de la confrontation. C'est un jeu que nous avons qualifié de transition car ce jeu est d'une part, non prévu et d'autre part, nous constatons que l'enseignant prend la décision de ce nouveau jeu car les élèves sont éprouvent des difficultés pour réaliser

cette activité sans le soutien du professeur. Les figures suivantes illustrent les représentations de l'enseignant et celle d'un élève, ces courbes présentent le support des confrontations de la conception de l'onde serpente avec les aspects de la corde obtenus par simulation.

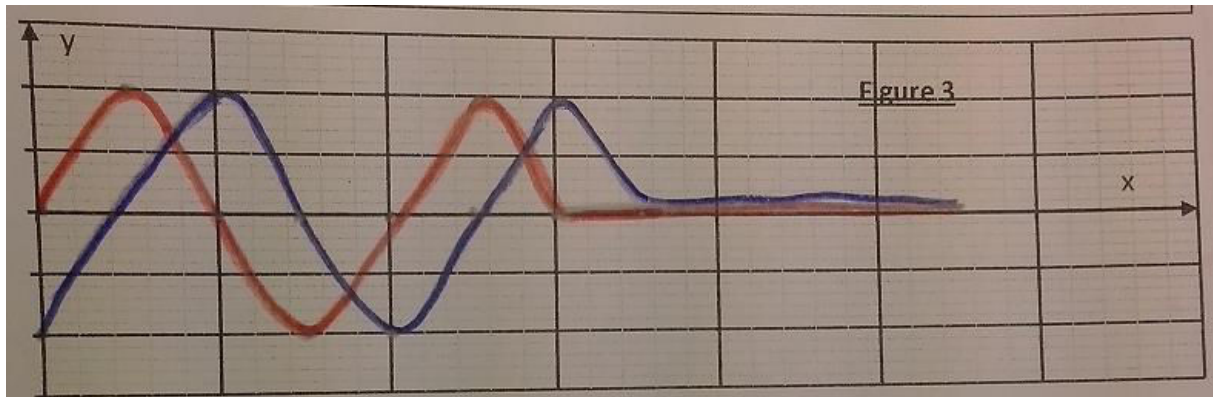


Figure 10. 10: Un extrait du travail réalisé par l'élève E8.

4.3.4 Jeu 4 : jeu d'investigation J.I.2

Ce jeu, de 10 minutes 29 secondes, renferme trois épisodes. Il est initié par l'enseignant à l'aide d'une question « essayez de voir comment se déplacent la source et le front d'onde ? ». Nous constatons ici que l'enseignant est parfaitement impliqué dans l'approche par PCDR, en insistant sur le fait que la confrontation de la conception de l'onde serpente avec la simulation ait bien lieu. Il trace sur le schéma au tableau le sens de déplacement de la source et celui du front d'onde. La figure suivante illustre les sinusôides des espaces de la corde et le sens de déplacement des deux points en emphase.

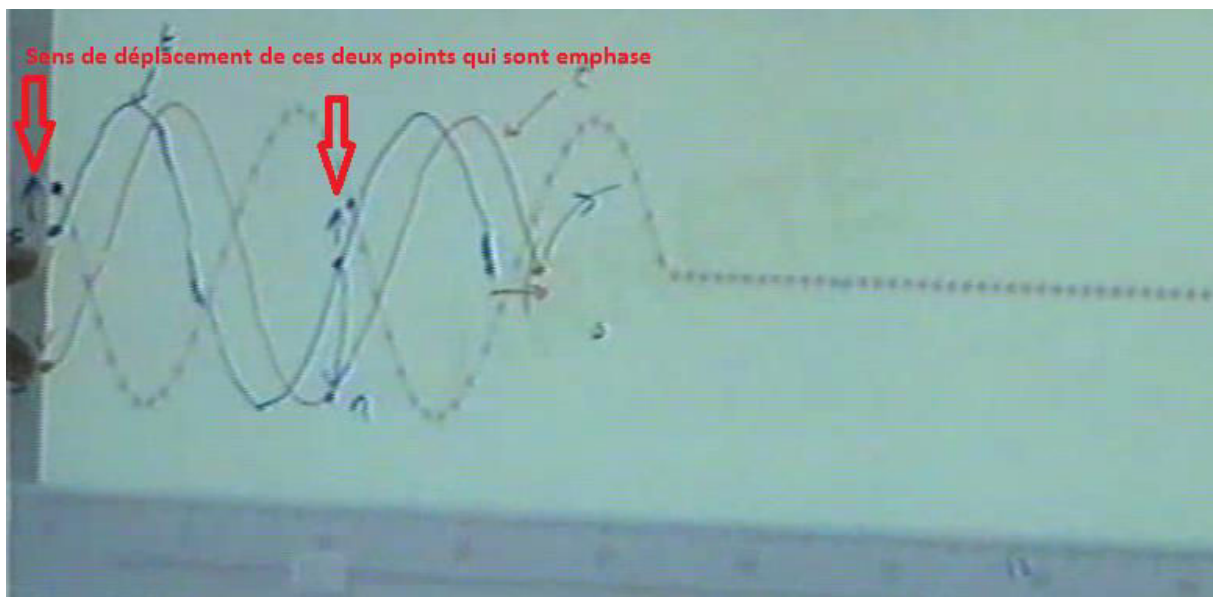


Figure 10. 11: Sens de déplacement des deux points de la corde (1h 09 min 38s)

D'après le synopsis de la séance, nous constatons que l'enseignant n'accorde pas le temps nécessaire pour les discussions entre les pairs. De plus, les enregistrements audios des groupes d'élèves montrent qu'à ce moment s'établit un silence. L'enseignant s'engage dans les discussions en posant des questions et en passant rapidement au jeu numéro 5 qui consiste à la résolution. La transcription suivante montre que la discussion sur la confrontation de la conception de l'onde serpente se fait grâce au guidage de l'enseignant. Nous constatons ici un chevauchement entre la fin du jeu 4 et le début du jeu 5.

Temps 58 min 48s		
Tdp	Locuteur	Production verbale
1	P	<i>Essayez de voir comment se déplace la source et le front d'onde ? Allez allez++</i>
2	E2	<i>Le front d'onde est en retard.</i>
3	P	<i>Non le front d'onde était ici il devient là :::+ comment elle se déplace ?</i>
4	E4	<i>Garde le même mouvement</i>
5	P	<i>Le sens le sens je peux représenter son sens comme la source</i>
6	E6	<i>En bas</i>
7	P	<i>Elle se déplace verticalement vers le bas et le front d'onde alors ?</i>
8	E6	<i>horizontalement</i>
9	P	<i>Et dans quel sens ?</i>
10	E6	<i>Le sens direct</i>
11	P	<i>Et dans quel sens ? Le sens de propa :::</i>
12	E4	<i>Propagation de l'onde</i>
13	P	<i>« chnoua jawabcon intouma » sur le sens de propagation de l'onde++ on lit la réponse de votre camarade. « La source se déplace verticale et la partie en bas et en haut » on peut la considérée comme correcte l'essentiel quelle se de déplace :</i>
14	E4	<i>verticale</i>
15	P	<i>Faites voir vos copies Question numéro eh . Comment se déplace le front d'onde « le front d'onde se déplace dans le même sens que la source » c'est faux ou bien correcte ?</i>
16	E2	<i>faux</i>
17	P	<i>C'est faux, la source descend en bas le front d'onde dans ce sens choufou l'aspect ancienne, en regardant qu'est-ce qu'a fait votre camarade « elle a continué la courbe vers le bas ! allez montrez-moi d'autre réponse.</i>
Temps 1 h 03 min 10 s		

Figure 10. 12: Transcription du début de chevauchement des jeux d'apprentissage 5 et 6

Le professeur continue à discuter avec ses élèves toutes les réponses proposées lors de la question de prévision. Ensuite, il dégage avec la participation des élèves une conclusion provisoire : la source se déplace verticalement et le front d'onde se déplace horizontalement. En attendant le résultat du jeu suivant.

4.3.5 Jeu 5 : jeu d'investigation J.I.3

Ce jeu possède la durée la plus longue de la séance, soit 17 minutes et 40 secondes. Il renferme sept épisodes, ce qui peut être la preuve de la ténacité de la conception de l'onde serpente.

En lien avec le jeu 4, l'enseignant enchaine et il montre sur le tableau qu'à partir des deux sinusoïdes on peut déterminer le sens de déplacement de n'importe quel point M de la corde. Il revient sur l'exemple des deux points déjà marqués sur le tableau et il demande alors de comparer les états vibratoires du point de la corde avec la source. Les élèves répondent en même temps qu'ils sont en phase. L'enseignant pose alors à ses élèves la question suivante : « est ce que cela est attendu ? » Une élève répond que la distance qui sépare ces deux points est λ et que ce résultat a déjà été rencontré dans le cours. Il demande ensuite de trouver tous les points qui sont en phase avec la source. Professeur et élèves trouvent ensemble 4 points. Il demande ensuite de trouver le nombre de point qui sont en opposition avec la source. A cette étape, l'enseignant demande à ses élèves de formuler une conclusion. Une seule élève a participé à la formulation de la conclusion. C'est que les points d'abscisse $x = K.\lambda$ sont en phase avec la source et si la distance est $x = K.\lambda + \frac{\lambda}{2}$ les points sont en opposition de phase avec la source. L'enseignant termine en disant que son objectif est de tracer l'aspect de la corde à l'instant $t' > t$ à partir la courbe à l'instant t . Il écrit au tableau que la nouvelle abscisse de front d'onde est :

$$x'_f = x_f + dx$$

Le professeur annonce qu'il suffit alors de fixer ce point x'_f sur l'axe et de tracer la nouvelle courbe : « on doit revenir en arrière jusqu'à atteindre la source ainsi on obtient la nouvelle sinusoïde des espaces à l'instant t' ».

4.3.6 Jeu 6

Le jeu 6 comporte un seul épisode d'une durée de 4 minutes 10 secondes. Au cours de ce jeu, l'enseignant demande à ses élèves de critiquer leurs réponses proposées à la question de prévision. Le jeu 6 est effectivement joué cette fois contrairement aux deux autres phases. Les autocritiques ne sont en général pas pertinentes. Elles sont du type « car je ne sais pas... », « car je n'ai pas compris la question... ». Une seule autocritique montre que l'élève croit que le front d'onde est un point de la corde. Nous illustrons ce jeu par les extraits des réponses suivantes :

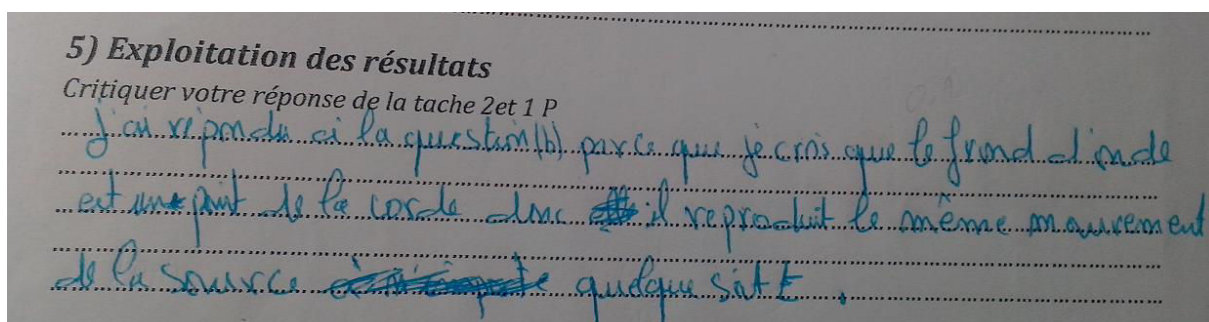


Figure 10. 13: Critique de la réponse par l'élève E1

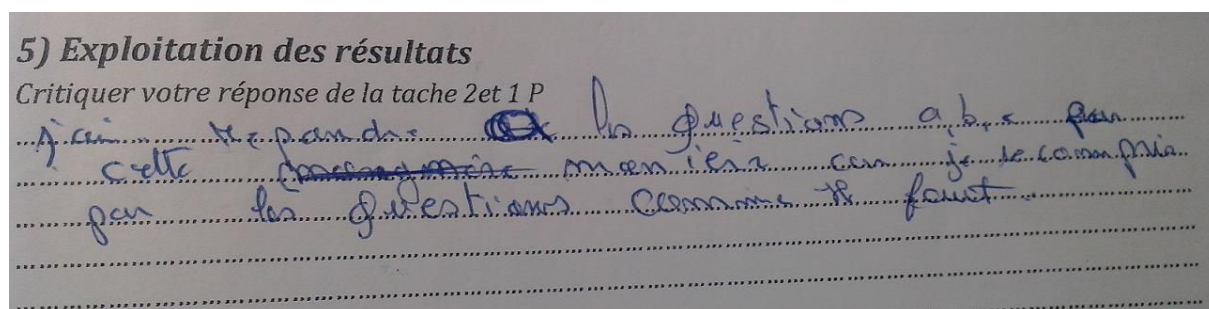


Figure 10. 14: Critique de la réponse par l'élève E8

4.4 Jeux d'apprentissage/ jeux épistémiques

Le découpage de cette phase de la séance donne six jeux d'apprentissages. Le premier jeu est qualifié de jeu préparatoire, c'est un jeu épistémique émergent puisque : « les jeux épistémiques émergent qui prennent en compte les savoir-faire acquis par l'action dans la classe » (Cross et Grangeat, 2014). Le deuxième jeu n'est pas joué par les élèves, l'enseignant prend la décision de l'arrêter après un contrôle du travail des élèves et sans aucun reproche de la part des élèves. Le jeu 3 est introduit par l'enseignant. En effet, ce jeu ne fait pas partie des jeux prévus dans notre scénario. Nous pouvons expliquer ceci par le fait que l'enseignant voulait gagner du temps ou pour obtenir des courbes identiques pour tous les élèves et ainsi

rendre la discussion plus pertinente. Ce jeu n'était pas prévu et ne fait pas partie de la séance de type PCDR. C'est un jeu qualifié de transitoire. L'enseignant reprend ensuite le jeu du moment de confrontation, jeu qualifié de jeu d'investigation qui est dense épistémiquement. La discussion n'a pas entre les pairs mais avec l'enseignant et les élèves. Elle repose sur des questions posées par l'enseignant, qui permettent d'ouvrir des débats scientifiques et spécifiques à cette activité. Nous pensons que son objectif est atteint par le fait qu'à la fin de ce jeu, l'enseignant revient sur la majorité des réponses qui sont fournies par les élèves à la question de prévision et les met en confrontation avec les résultats trouvés par la simulation. Le jeu 5 est un jeu d'investigation, mais aussi un jeu épistémique émergent qui prend en compte des connaissances déjà étudiées en classe lors de l'enseignement ordinaire des ondes mécaniques. Ce jeu permet de résoudre le conflit cognitif en se référant aux lois de la physique. Le jeu 6 est pour la première fois présent dans cette séance. Il est effectivement joué comme prévu initialement, bien que la plupart des autocritiques ne soient pas concluantes mais pourraient être exploitées pour détecter les origines des conceptions des élèves telles que l'onde serpente dans notre cas.

4.5 *Dialectique milieu-contrat*

Cette troisième tâche montre que les nouveaux ingrédients introduits dans le milieu et le contrat sont bien intégrés dans cette séquence. L'enseignant semble maîtriser l'approche par PCDR par le fait que tous les jeux prévus sont joués au cours de cette tâche sauf le moment de la discussion entre les pairs, l'enseignant orientant la discussion vers son objectif visé par cette activité. En effet, il initie le jeu 3 qui n'était pas prévu et qui ne fait pas partie de la démarche d'investigation suivie par l'approche par PCDR. Mais cela lui permet de gagner du temps car nous constatons que la séance prend fin au moment prévu.

4.6 *Conclusion*

Au cours de cette phase d'enseignement, nous pouvons conclure que les élèves et l'enseignant semble engagés dans l'approche d'enseignement par PCDR. En effet, tous les jeux prévus sont joués, le changement partiel du milieu est bien installé, les élèves travaillent sur la simulation comme si c'était un travail pratique ordinaire. Néanmoins, la logique de la démarche d'investigation adoptée est interrompue par le jeu 3, jeu qui consiste en un guidage de l'action des élèves. Cela dit, ce guidage ne semble pas avoir d'impact négatif sur le déroulement de la séance par PCDR. La densité du jeu épistémique 4 entraîne l'enseignant à participer dans la

discussion. Ceci montre que l'approche par PCDR permet une souplesse de fonctionnement et laisse la possibilité de régulations au cours de l'enseignement.

5 Conclusion

Cross et Grangeat (2014) ont montré que la mise en œuvre des démarches d'investigation est un processus complexe. « *Cette complexité génère une large disparité dans la conception et la mise en œuvre pratique de ces démarches. Pour comparer l'efficacité de ce type d'enseignement, il faut donc disposer de descripteurs des situations et de leurs mises en œuvre afin de pouvoir comparer ce qui est fait avec une plus grande validité* » (Cross et Grangeat, 2014, p. 177). Cela nous a permis d'utiliser des descripteurs que nous avons développés pour catégoriser les jeux en jeu de préparation, jeu de transition et des jeux d'investigation. Ceci nous a permis également de délimiter et de distinguer un jeu d'investigation d'un autre, c'est-à-dire de localiser dans chaque phase de la séance les différents moments de l'enseignement par PCDR. Cela nous a aussi permis de distinguer les jeux prévus qui sont effectivement joués, des jeux qui sont abandonnés et des jeux qui sont créés au cours de l'enseignement. Ces descripteurs nous ont donné l'occasion d'évaluer notre approche d'enseignement donc de juger l'ingénierie adaptée pour la préparation de scénario pédagogique. Mais ils nous ont permis également de porter un jugement sur le processus de l'acquisition de savoir chez l'élève au cours d'une phase d'investigation et enfin de porter un jugement sur l'appropriation de l'approche d'enseignement par PCDR.

Les trois phases de la séance, avec chacun des quatre moments d'investigation de l'enseignement par PCDR, montrent que cette approche d'enseignement étudiée présente une souplesse d'exécution par l'enseignant laissant l'élève intervenir et/ou introduisant un nouveau jeu d'ordre épistémique. De même, l'enseignant peut créer des régulations pour continuer l'enchaînement des autres jeux. Les jeux d'investigation sont parfois séparés par des jeux de transition. Nous avons constaté que ces jeux sont introduits par l'enseignant afin de donner une chance au gain du jeu qui suit. En général, nous pouvons conclure que tous les jeux sont gagnés. Ce constat reste provisoire, la conclusion finale pourra être envisagée après l'analyse des productions des élèves lors de l'examen dans la partie suivante de cette recherche.

Bien que l'enseignant soit novice dans les démarches d'investigation, la formation rapide (deux séances de deux heures chacune) qu'il a reçue sur l'approche d'enseignement par PCDR apparaît satisfaisante pour qu'il se l'approprie. Nous pouvons conclure que les élèves et

l'enseignant nous semblent engagés dans l'approche d'enseignement par PCDR du fait que tous les jeux prévus sont joués, le changement partiel du milieu étant installé à partir de la deuxième phase de la séance. Les élèves travaillent sur la simulation comme si c'était un travail pratique ordinaire. La logique de la démarche d'investigation adoptée est interrompue par le jeu de transition (J3) au cours de la troisième phase, qui consiste en un guidage de l'action des élèves. Nous constatons que cela n'a pas d'impact négatif sur le déroulement prévu de cette phase de la séance par PCDR. Au cours de la même phase, la densité du jeu épistémique 4 (J4) amène l'enseignant à participer à la discussion. Ceci montre que l'approche par PCDR donne une souplesse de régulation au cours de l'enseignement. La flexibilité de l'enchaînement des jeux d'apprentissage donne à l'enseignant la possibilité d'introduire des jeux génériques, des jeux qui permettent de guider les élèves pour mobiliser d'autres connaissances non spécifiques au concept en jeu. Ceci permet aussi de gagner aux jeux suivants en gardant en même temps l'esprit d'une démarche d'investigation adoptée par l'approche d'enseignement par PCDR.

En se référant au point de vue de Sensevy (2007, p. 19) selon lequel « *le contrat didactique propre à une situation didactique peut alors se concevoir comme un système d'habitudes engendrant lui-même un système d'attentes, système actualisé par cette situation particulière* », nous pouvons tirer la conclusion suivante. A partir de la première phase de la séance, des changements sont introduits au niveau du contrat didactique par rapport à une séance d'enseignement ordinaire. Ces changements n'ont pas empêché les élèves de travailler sur une simulation comme dans le cas d'une expérimentation réelle sur paillasse. La simulation comme support didactique peut dans notre situation apparaître semblable à un support d'expérimentation sur paillasse. Les différentes phases de la séance montrent que les élèves se comportent comme si l'expérience était réelle. Les élèves considèrent alors que les valeurs trouvées de la célérité de l'onde, par exemple au cours de la première phase, doivent être soumises à des approximations, qui apparaissent nécessaires. Ce constat nous permet de conclure qu'il n'y a pas de changement global du contrat didactique même s'il y a un changement fondamental du milieu.

CHAPITRE 11

ANALYSE ET RESULTATS DU POST-TEST

1 Introduction

Pour évaluer les retombées de ce scénario sur le raisonnement des élèves, nous avons proposé à l'enseignant d'insérer un exercice sur les ondes mécaniques, dans un devoir de contrôle continu qui suit cette séquence d'enseignement. L'analyse présentée dans ce chapitre s'appuie sur le recueil des réponses des élèves à cet exercice et sur les résultats déjà obtenus au cours du pré-test déjà analysé (chapitre 3). On s'attend à ce que le professeur corrige les sujets et attribue les notes pour récupérer toutes les copies des élèves que nous avons alors analysées. Une partie de ce travail a déjà été publiée par Ben Jemaa et Boilevin (2016a).

2 Contexte de l'étude

Le schéma suivant montre le moment de passation du post-test au cours de cette recherche.

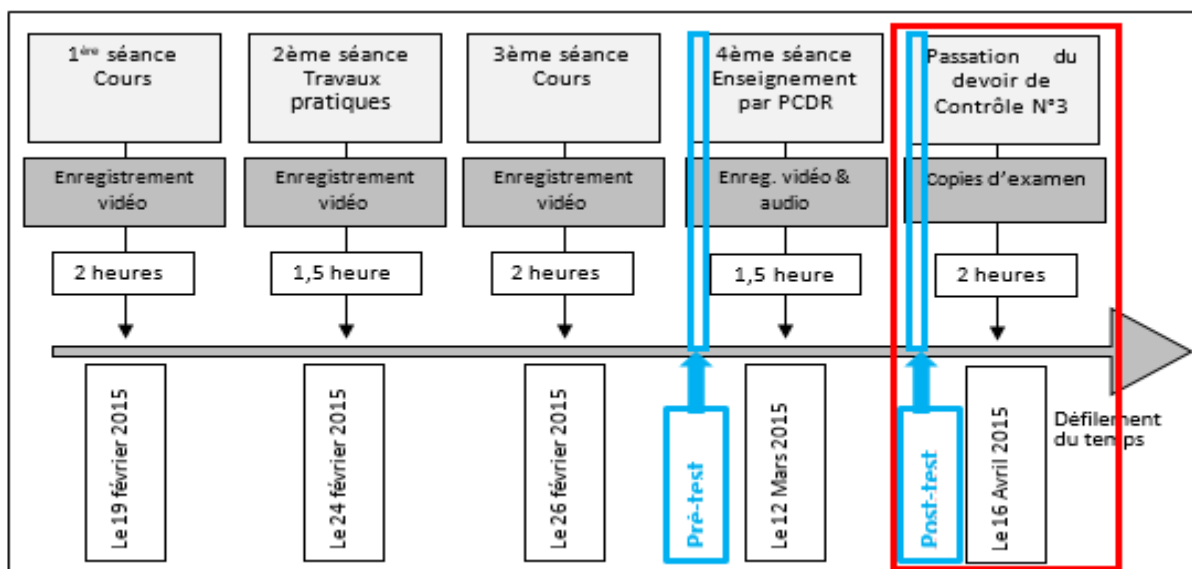


Figure 11. 1 : moment de passation du post-test

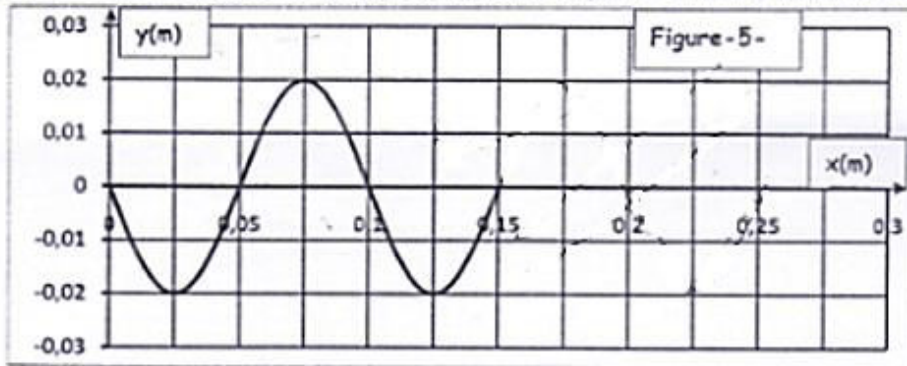
Nous rappelons que cette étude est faite sur une classe de 19 élèves en terminale scientifique. Nous avons choisi d'utiliser des pourcentages pour faciliter la présentation et l'analyse des résultats mais nous avons bien à l'esprit que l'effectif de l'étude est faible et qu'un élève représente environ 5% dans les représentations suivantes.

3 Contenu de l'exercice

Figure-4-

Exercice 2 (5points)

On considère une corde élastique le long de laquelle se propage une onde progressive sinusoïdale de période T . On éclaire la corde par une lumière stroboscopique. En partant d'une fréquence élevée qu'on diminue progressivement, on constate que la plus grande valeur de la fréquence des éclairs permettant d'observer l'immobilité apparente de la corde est $N_0 = 50$ Hz. La courbe de la figure-3- représente l'aspect de la corde à instant de date t_1



- 1) a- S'agit-il d'une onde longitudinale ou transversale? Justifier la réponse.
b- Montrer que la période temporelle est $T = 0,02s$.
- 2) En utilisant la courbe de la figure-3-
a- Déterminer la valeur de la longueur d'onde λ . En déduire la valeur de la célérité V de propagation de l'onde.
b- Déterminer la distance x_0 parcourue par le front d'onde. En déduire l'instant de date t_1 .
- 3) a- Déterminer à partir de la courbe de la figure-5-, les abscisses des points de la corde vibrant en opposition de phase avec la source S.
b- Représenter sur le même graphique de la figure-5-, l'aspect de la corde à l'instant $t_2 = t_1 + \frac{T}{2}$.
- 4) Sachant que l'onde issue d'un point source S d'abscisse $x = 0$ et de loi horaire : $y_s(t) = 2 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(100 \cdot \pi \cdot t + \pi)$ (y en m et t en s)
a- Ecrire l'équation horaire du mouvement d'un point M_0 de la corde, situé à la distance $x_0 = \frac{3}{2} \lambda$ de S.
b- Représenter sur le même graphique $y_{M_0}(t)$ et $y_s(t)$ dans l'intervalle du temps $[0, 3T]$

Les questions qui sont soulignées en rouge sont celles qui nous intéressent le plus car elles permettent une étude comparative des réponses des élèves avant et après l'enseignement par PCDR.

4 Résultats statistiques et analyse des réponses des élèves aux questions du pré-test et du post-test

4.1 Célérité de l'onde

Le tableau n°1 permet de comparer les résultats statistiques obtenus à partir des réponses des élèves aux questions du pré-test et du post-test. Les comparaisons portent sur des réponses autour d'un même concept. Nous constatons une évolution des réponses correctes de 21,1% à 73,7%.

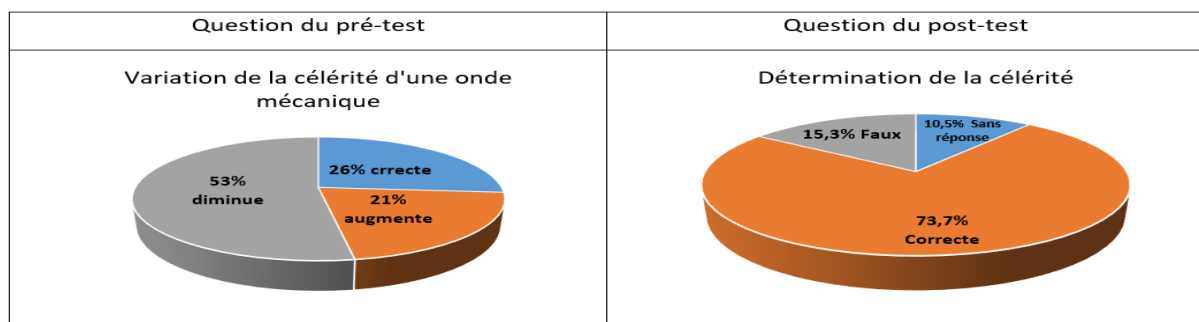


Figure 11. 2: Tableau n°1 résultat concernant la célérité de l'onde

4.2 Le front d'onde

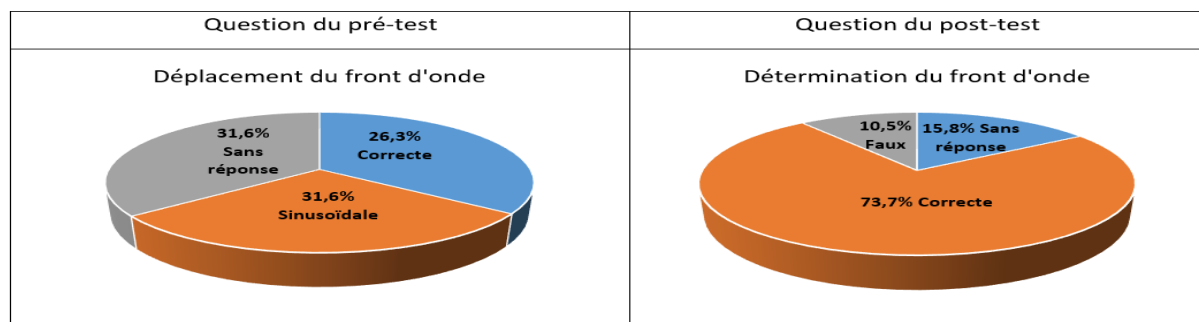


Figure 11. 3: Tableau n°2 résultat des statistiques sur le front d'onde

D'après le tableau n°2, nous constatons une évolution des réponses correctes de 26,3% à 73,7%.

4.3 L'aspect de la corde

Il s'agit ici d'une question délicate qui consiste à représenter l'aspect de la corde à partir de son aspect ultérieur. Au niveau de cette conception, nous ne constatons pas d'évolution des réponses correctes avant et après la séance du TP. Néanmoins, nous percevons une diminution du taux de non réponse. La conception d'onde serpente persiste donc après la séance de TP. Cela pourrait remettre en question l'efficacité de la simulation pour cette conception car

cette dernière ne permet pas d'avoir deux représentations de l'aspect de la corde sur le même écran de l'ordinateur.

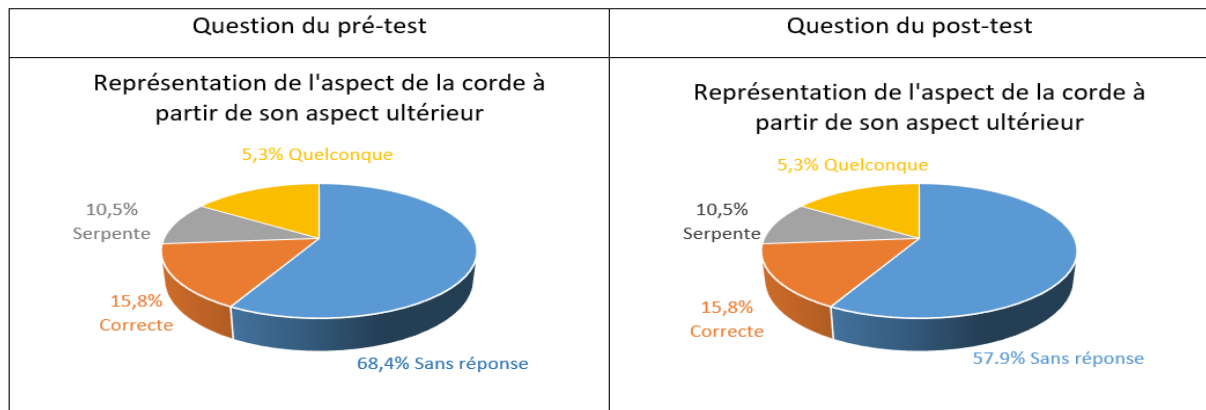


Figure 11. 4: Tableau n° 3 résultat des statistiques sur l'aspect de la corde

A titre d'exemple, voici la question 3) sur l'aspect de la corde avec un exemple de réponse d'élève.

« On donne ci-dessous l'aspect de la corde à un instant de date t . Représenter sans aucun développement théorique l'aspect de la corde à un instant t' légèrement supérieur à t (on peut prendre t' lorsque l'onde avance de $\frac{\lambda}{4}$). »

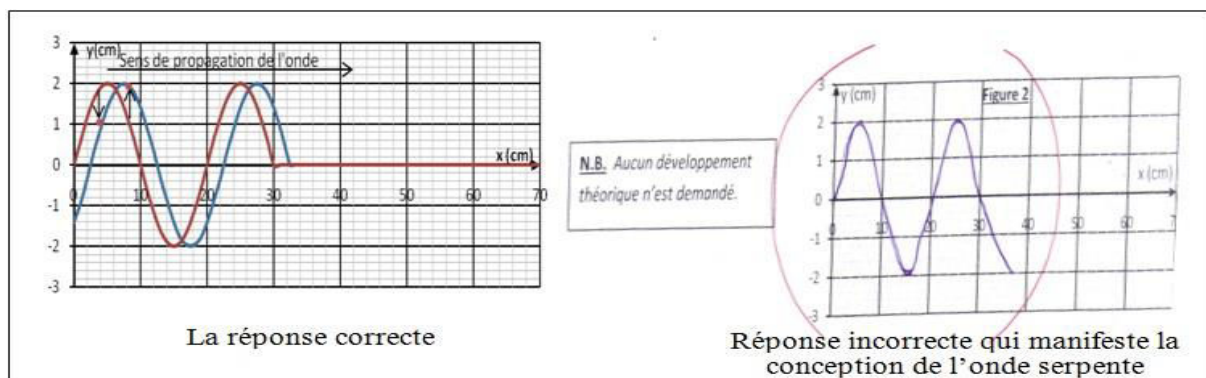


Figure 11. 5: exemple de réponse des élèves à la question 3)

4.4 Évolution du nombre de réponses correctes par élève

Le tableau n°4 suivant montre une évolution appréciable de la fréquence de réponses correctes par élève. Avant la séance de TP, le meilleur résultat est de 2 sur 4 réponses correctes, ce résultat est atteint par 15,8% des élèves. Après la séance de TP, 5,3% des élèves ont répondu

correctement à 9 questions sur 10 ; 73,8% des élèves ont répondu correctement à un nombre de questions supérieures ou égales à 5 sur 10 questions.

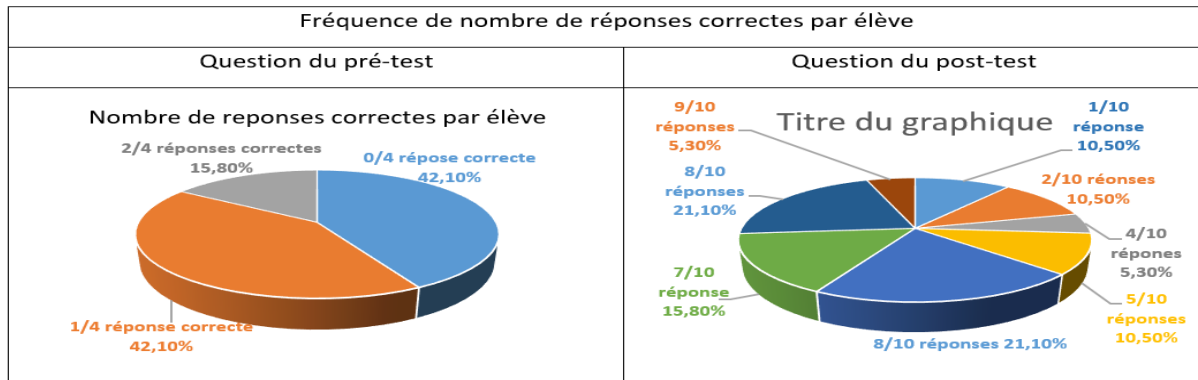


Figure 11. 6: Tableau n°4 Evolution de nombre de réponses correctes

4.5 *Etude croisée de fréquence de réponse correctes par élève*

Nous nous intéressons ici aux réponses des élèves sur deux questions portant sur des concepts clés qui sont traités lors de la séance des travaux pratiques (PCDR). Dans cette partie, nous allons étudier les fréquences de réponses des élèves sur deux concepts clés de l'onde et les comparer avec les résultats obtenus dans le pré-test.

4.5.1 *La célérité d'une onde mécanique et le front d'onde*

Le nombre d'élèves qui ont répondu correctement à ces deux questions aux mêmes temps a grimpé de 1 à 14 élèves sur un nombre total de 19 élèves. Les résultats sont présentés par ces deux diagrammes :

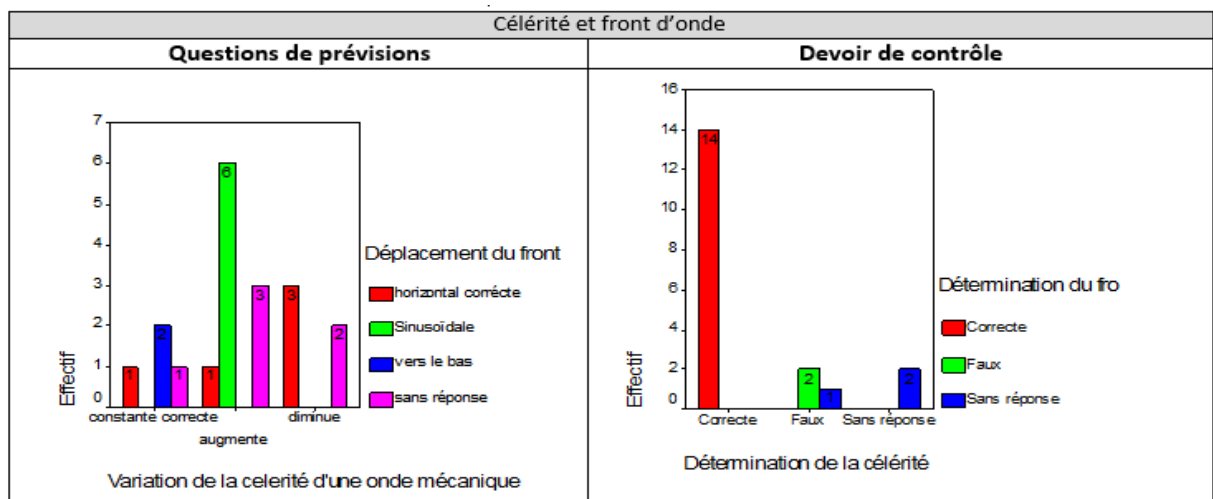


Figure 11.7 : Regard croisé sur les réponses sur la célérité et sur le front d'onde par élèves

4.5.2 Le front d'onde et la representation de l'aspect de la corde

Les réponses au cours du devoir sont moins variées par rapport aux réponses sur les questions de prévision. On constate qu'au devoir, les élèves qui n'ont pas répondu correctement à la question sur le front d'onde sont ceux qui n'ont pas répondu positivement ou négativement à la question. Celle-ci porte sur la représentation de l'aspect de la corde à un instant légèrement supérieur à celui de la courbe donnée.

Le nombre des élèves qui ont répondu correctement aux deux questions en même temps a évolué d'un à trois élèves. Ce qui est illustré par les histogrammes suivants.

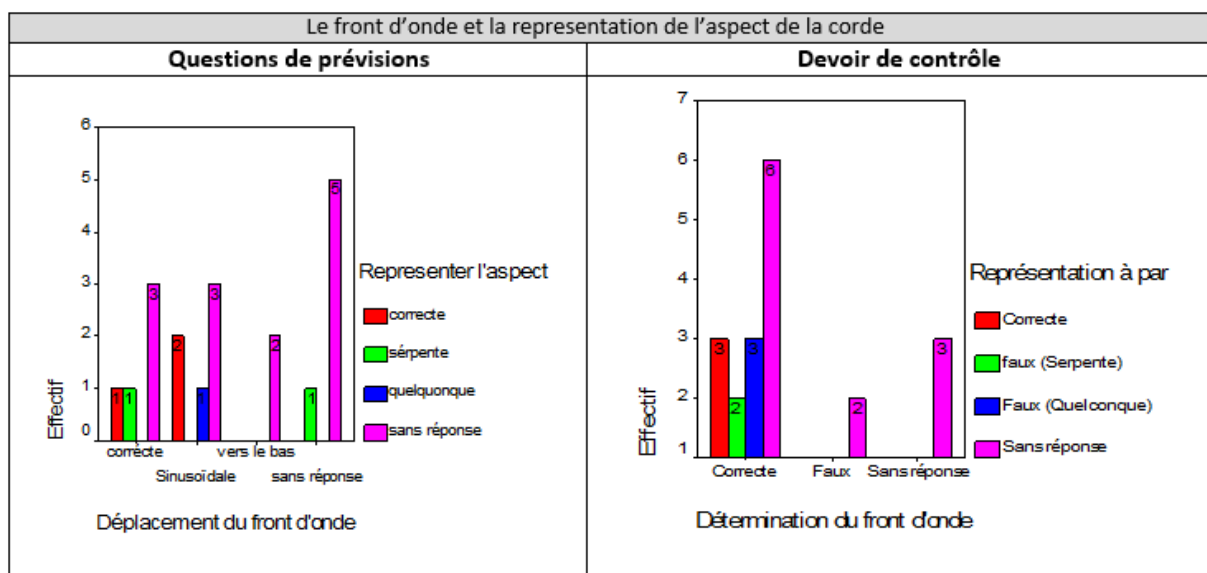


Figure 11. 7: regard croisé sur les réponses sur le front d'onde et sur l'aspect de la corde par élèves

4.5.3 Sens de déplacement de la source et sens de déplacement du front d'onde

On constate qu'au cours du pré-test, aucun des élèves n'a répondu à ces deux types de questions en même temps. Par contre, au post-test, nous trouvons trois élèves parmi 19 qui ont répondu correctement, le progrès existe mais il est peu signifiant. Bien que les réponses ne soient pas plus variées au cours du devoir, les élèves donnent pratiquement des réponses correctes ou ne répondent pas. Nous pouvons alors penser que c'est une évolution dans un sens positif.

5 Conclusion

Les résultats de l'analyse montrent que la démarche d'investigation suivie lors de la séance de TP montre son efficacité au moins à moyen terme, à propos de la compréhension des deux concepts suivants : la célérité de l'onde et le front d'onde. Par contre, les résultats obtenus à la question sur la représentation de l'aspect de la corde à partir d'une représentation ultérieure ne sont pas satisfaisants. Cela nécessite probablement un travail supplémentaire pour améliorer la simulation ou bien pour revoir le scénario pédagogique. Néanmoins, la fréquence des réponses correctes pour un seul concept ou pour deux concepts, au même temps, a nettement augmenté après enseignement par démarche d'investigation. Nous pouvons tirer alors la conclusion suivante qu'une séance d'enseignement avec simulation basée sur la démarche d'investigation est capable d'aider les élèves à surmonter leurs difficultés d'apprentissage des ondes mécaniques et de résoudre en partie un problème de conceptions erronées très répandu.

CONCLUSION GENERALE
ET
PERSPECTIVES

Conclusion générale et perspectives

Rappelons que ce travail de recherche part d'un constat fondé sur une revue de la littérature scientifique mais aussi sur le travail mené dans notre mémoire de master. Tous ces travaux montrent l'existence de difficultés d'apprentissage liées au concept d'onde. En effet, ces difficultés sont aussi répandues dans le monde francophone que dans le monde anglo-saxon. Ces difficultés sont en apparence indépendantes du contexte d'enseignement. L'idée fortement partagée par beaucoup de chercheurs est que la majorité des élèves de lycée développent des conceptions erronées au cours de l'enseignement du concept d'onde. Ces conceptions sont les suivantes :

- La conception de type « hybride capital », où la vitesse de propagation d'un signal dépend de la force exercée qui l'a créé. L'onde, d'après ces élèves, est un mélange de force et d'énergie ;
- La conception de « l'onde serpente », où l'onde avance par ajout de bosses.

Par ailleurs, la situation devient plus compliquée pour les étudiants à l'université lors de l'apprentissage d'autres concepts plus approfondis en jeu dans la mécanique quantique, par exemple. Cette situation a sollicité notre curiosité et nous a amené à entreprendre ce travail d'ingénierie didactique. Pour expliciter les résultats de cette étude, nous avons choisi de donner à notre conclusion l'ordre des étapes des analyses de l'ingénierie didactique telles qu'elles apparaissent dans l'introduction générale.

1 Analyse préalable

1.1 *Analyse épistémologique et historique*

Cette première étape du travail nous a permis de rendre compte des difficultés épistémologiques rencontrées lors de la naissance du concept d'onde. En effet, l'existence de l'éther comme milieu de propagation de la lumière crée une polémique. Ce concept d'éther prend naissance dès l'apparition du concept d'onde et se perpétue jusqu'au début du XX^e siècle, jusqu'à l'apparition de la théorie corpusculaire de la lumière, où l'onde lumineuse peut se déplacer dans le vide. C'est l'époque de la dématérialisation de l'onde. Cette analyse épistémologique nous a donné l'occasion de nous rendre compte de l'obstacle substantialiste qui existait chez les savants de l'époque pendant plusieurs siècles. Alors, nous pouvons nous attendre à la reproduction de ce phénomène au cours de la construction du savoir onde chez les

élèves. Par ailleurs, le texte de savoir, déjà présenté, montre que le concept d'onde est un concept physico-mathématique et que son niveau de formulation destiné aux classes de terminale l'est aussi.

1.2 *Nature de l'enseignement ordinaire*

Cette étape consiste à l'analyse des cinq heures trente minutes d'un enseignement ordinaire des ondes mécaniques. Cet enseignement est dédié aux classes de terminale scientifique. Notre analyse, dans le cadre théorique de l'action conjointe en didactique, s'appuie sur l'étude des jeux didactiques et de leurs relations avec l'avancée du savoir. Notons que celle-ci est décrite par deux descripteurs : la topogénèse et la densité épistémique du contenu d'un tel savoir mis en jeu dans un jeu didactique.

Les résultats obtenus montrent que l'enseignant prend la grande majorité du temps une position topogénétique haute (84% de la totalité des épisodes contenu dans trois séances du cours). Ceci correspond généralement à un contenu du savoir de densité épistémiquement classé soit élevé soit très élevé (68% des épisodes). En effet, lorsque nous nous concentrons sur le quadruplet « définir, dévoluer, réguler et institutionnaliser », nous concluons que l'enseignant crée parfois des conditions de gain du jeu. Mais nous constatons en même temps que les conditions qu'il propose ne donnent pas de résultat. C'est le cas par exemple des expériences qui n'ont pas donné de résultats à cause du matériel défectueux. La régulation est présente le long de ces trois séances du cours, mais dans la plupart des cas, elle est éteinte par l'effet Topaze. Quant à la dévolution, elle est pratiquement absente et l'institutionnalisation est gérée par le professeur en l'absence de toute interaction avec les élèves.

Nous pouvons finalement qualifier l'enseignement ordinaire, suivi par cette recherche, d'enseignement transmissif. Nous devons très probablement nous attendre à des difficultés de compréhension des élèves ce qui donne la possibilité aux élèves de développer des conceptions erronées.

1.3 *Analyse cognitive sur les concepts clés de l'onde.*

Un test des connaissances des élèves après l'enseignement ordinaire (post-test pour l'enseignement ordinaire mais pré-test pour l'étape suivante de la recherche) a montré que la majorité des réponses des élèves présentent des conceptions erronées d'ordre hybride capital et onde serpente. Le tableau suivant donne les principaux résultats.

Question	Pourcentage des réponses correctes	Conception suspecte origine des erreurs
Sur la célérité de l'onde	21.1%	Hybride capital
Sur le déplacement de la source	10.5%	Non catégorisé
Sur le déplacement du front d'onde	26.3%	Onde serpente
Sur la représentation de la sinusoïde des espaces	15.8%	Onde serpente

Figure 1 : Correspondance des erreurs des élèves avec les conceptions suspectes

En effet, ces résultats sont en accord avec les travaux menés dans notre mémoire de mastère dans le contexte tunisien, mais aussi en accord avec les travaux rencontrés dans notre revue de littérature. L'intérêt de notre présente recherche provient du fait que nous sommes bien assurés que les élèves ont suivi un enseignement sur les ondes mécaniques, et que cet enseignement est en accord avec les objectifs visés par l'institution. Notons que ces deux conceptions sont d'origine épistémologique. Elles sont issues d'une substantialisation du phénomène d'onde. C'est un problème déjà apparu pendant deux siècles avec les savants du dix-huitième et du dix-neuvième siècle. Nous pensons donc que la reproduction de ce problème de substantialisation est possible avec des élèves qui rencontrent pour la première fois le concept d'onde. Alors peut-on franchir cet obstacle épistémologique par l'ingénierie didactique proposée par notre recherche ?

2 Conception et analyse *a priori* de la séquence d'enseignement par PCDR

L'idée principale de notre ingénierie didactique est de construire un scénario pédagogique d'enseignement capable de placer l'élève dans une situation de recherche où il doit tester ses connaissances acquises au cours de l'enseignement ordinaire des ondes. C'est pourquoi l'élève doit se positionner par rapport aux résultats obtenus par une simulation informatique. En effet, ce positionnement doit lui permettre un déclenchement critique, qui permettra à son tour de créer les conditions des changements au niveau de ses idées par rapport à la célérité de l'onde et la sinusoïde des espaces. Nous pensons que ce scénario pourrait participer au développement de leur esprit critique.

Notre objectif est de concevoir une séance d'enseignement fondée sur l'investigation en s'appuyant sur une simulation informatique des ondes au cours de laquelle l'élève : réalise

des tâches qui ne se limitent pas à l'aspect expérimental, participe à la validation des propositions des autres élèves, participe au choix argumenté entre plusieurs méthodes, plusieurs hypothèses, résout les éventuels conflits cognitifs en convoquant les lois de la physique relative aux ondes mécaniques. En adoptant un point de vue constructiviste sur l'apprentissage, la séance est alors organisée systématiquement comme suit :

Moment de prévision : c'est un moment qui consiste à demander aux élèves de répondre à des questions portant sur un concept particulier.

Moment de confrontation : les élèves vont ensuite confronter leurs hypothèses (la réponse à la question de prévision) à une simulation informatique.

Moment de discussion : suite à cette confrontation s'installe entre les élèves, qui travaillent en groupe de deux par ordinateur, une discussion sur le résultat.

Moment de résolution : l'action de l'enseignant vise à encadrer un nouveau débat en aidant les élèves à résoudre les conflits cognitifs par les lois de la physique déjà étudiées pendant les séances du cours sur les ondes.

Nous avons donné le nom d'approche d'enseignement par PCDR au scénario ainsi construit sur quatre moments : Prévision, Confrontation, Discussion et Résolution.

3 Analyse de l'enjeu

Nous avons installé au cours de cette étape notre méthodologie d'analyse de la séance d'enseignement par PCDR. Cette méthodologie s'articule autour de trois grains d'analyse. Le premier grain « macro » aboutit à un synopsis qui est lui-même découpé en phases. Chaque phase renferme une activité sur simulation qui cible un des concepts clés de l'onde mécanique. Les scènes qui correspondent à des jeux potentiellement jouables pour l'analyse préalable de la séance ou des jeux effectivement jouables pour l'analyse a posteriori. Le deuxième grain d'analyse, le grain « méso », correspond au découpage de chaque phase en jeux didactiques. Le troisième grain, grain « micro », vise à analyser les bandes audios afin de localiser les discussions plénières qui nécessitent des transcriptions intégrales. Nous avons enfin réalisé une analyse a priori de la séance d'enseignement par PCDR, et identifié ainsi les jeux potentiellement jouables des différentes phases de la séance de TP sur simulation prévue.

4 *Analyse a posteriori*

Nous disposons de deux catégories de données à analyser :

- Celles qui appartiennent à la séance d'enseignement par PCDR. Ces données sont les enregistrements vidéo de la classe et audio des petits groupes d'élèves et leurs fiches de TP données par l'enseignant au début de la séance ;
- L'autre catégorie correspond aux productions des élèves au cours du devoir de contrôle qui suit la séquence d'enseignement des ondes mécaniques.

4.1 *Analyse a posteriori de la séance d'enseignement par PCDR*

Les descripteurs des jeux didactiques (jeu de préparation, jeu de transition et jeux d'investigations) que nous avons développés nous ont permis de délimiter et de distinguer le jeu d'investigation des autres jeux, c'est-à-dire de localiser dans chaque phase de la séance les différents moments de l'enseignement par PCDR. En effet, chaque moment renferme un jeu d'investigation. Ces descripteurs nous ont donné l'occasion de juger notre approche d'enseignement.

D'ailleurs, nous avons constaté que tous les jeux d'investigation prévus sont joués. Néanmoins, d'autres jeux sont introduits par l'enseignant à la suite des décisions de régulation afin de gagner les jeux prévus. Il faut ajouter que les confrontations des réponses des élèves aux questions de prévisions avec les résultats trouvés par simulation ont abouti à des débats scientifiques qui montrent qu'il y a eu déstabilisation et qui affectent les conceptions hybride capital et d'onde serpente.

En se référant au quadruplet « définir, dévoluer, réguler et institutionnaliser », nous pouvons prendre position pour chaque élément de celui-ci. Pour la définition, nous avons bien constaté que les conditions de gain sont présentes dans le scénario ou parfois l'enseignant introduit de nouveaux jeux pour gagner à d'autres. Donc l'enseignant prend des décisions de régulation. La preuve en est que tous les élèves ont pu réaliser toutes les activités prévues et que toutes ces activités ont abouti aux conclusions adéquates. Notons que ce résultat ne pourrait pas être obtenu si les élèves n'étaient pas engagés dans la réalisation de ces activités. A ce stade nous pouvons conclure qu'une dévolution a eu lieu, ce qui a enrichi les discussions entre pairs ou celle plénière. La résolution, qui est le quatrième moment de l'enseignement par PCDR, renferme l'institutionnalisation des connaissances acquises dans la séance. Par rapport à nos attentes, le niveau élevé atteint par les discussions des élèves traduit une motivation réelle à

résoudre certaines situations d'investigations proposées. Cela nous paraît satisfaisant au vu de notre scénario pédagogique.

4.2 *Analyse et résultats du post-test*

Pour saisir l'impact de notre scénario pédagogique sur les réponses des élèves par rapport à la célérité de l'onde et à la sinusoïde des espaces, nous présentons le tableau suivant

Concepts	Pourcentage des réponses correctes		Conception suspecte origine des erreurs
	Pré-test	Post-test	
Célérité de l'onde	21.1%	73.7%	Hybride capital
Front d'onde	26.3%	73.7%	Onde serpente
Aspect de la corde	15.8%	15.8%	Onde serpente

Figure 2 : Tableau comparatif des réponses correctes avant et après enseignement par PCDR.

Nous constatons que pour la célérité de l'onde et le front d'onde, l'amélioration des réponses correctes est nettement appréciable. Nous pensons que ces questions touchent les deux conceptions déjà évoquées : l'hybride capitale et l'onde serpente. Néanmoins, cette dernière est présente dans le raisonnement des élèves qui se manifeste par la réponse sur l'aspect de la corde. Nous pensons que la conception d'onde serpente persiste à cause de la limite de la simulation. En effet, la simulation utilisée ne permet pas d'avoir deux représentations de l'aspect de la corde pour deux instants différents sur un même écran. Pourtant, le nombre des questions sans réponses tend à diminuer après la séance de TP, et cela pour toutes ces questions. Par ailleurs, une étude croisée de la fréquence de réponse correcte par élève montre qu'il y a une amélioration telle que le pourcentage des élèves qui ont répondu correctement à deux questions (sur la célérité et sur le front d'onde) a évolué de 5% des élèves à 74% des élèves. Nous constatons, de ce qui précède, que la séance d'enseignement par PCDR a contribué à l'amélioration du niveau de réponses correctes par les élèves, donc du raisonnement des élèves.

5 *Pertinence de l'ingénierie didactique*

Bien que l'enseignant soit novice dans la pratique des démarches d'investigation, la formation rapide (deux séances de deux heures chacune) qu'il a reçue sur l'approche d'enseignement par PCDR paraît satisfaisante pour qu'il se l'approprie. Nous pouvons conclure

aussi que les élèves et l'enseignant nous semblent engagés dans l'approche d'enseignement par PCDR. Les élèves travaillent sur la simulation comme si c'était un travail pratique habituel. Ceci montre que cette approche donne une souplesse de régulation au cours de l'enseignement. La flexibilité de l'enchaînement des jeux d'apprentissage donne à l'enseignant la possibilité d'introduire des régulations, lesquelles permettent de guider les élèves dans la mobilisation d'autres connaissances, non spécifiques au concept d'onde mis en jeu, et ceci en gardant en même temps l'esprit d'une démarche d'investigation choisi.

En tenant compte des différentes analyses réalisées, nous pouvons affirmer que l'ingénierie didactique est au niveau du contenu, conforme à l'objectif d'enseignement visé par l'institution, que ce soit au contenu à enseigner, ou bien, en approche d'enseignement qui soit de type constructiviste.

6 Limites de la recherche et perspectives futures

A la fin de ce travail, il y a lieu de garder à l'esprit que, telle que nous l'avons proposée, l'ingénierie a un vrai potentiel. Cependant, elle n'a pas été totalement exploitée. Cela est dû à des facteurs externes à notre scénario pédagogique. Nous choisissons certains de ces facteurs que nous jugeons intéressants à discuter tout en tenant compte de l'enseignement de type PCDR.

6.1 *Les limites liées à l'organisation de la séance et le choix de la simulation*

Le premier facteur concerne le temps alloué à une phase de quatre moments de la PCDR qui, de préférence, doit couvrir une séance de travaux pratiques d'une heure trente minutes et non pas comme nous l'avons effectué dans cette recherche, de trois phases dans une séance, ce qui a entraîné un rythme rapide de la séance.

Le deuxième facteur concerne la limite de la simulation qui ne permet pas d'avoir sur l'écran de l'ordinateur, et en même temps, deux sinusoïdes des espaces pour deux instants très proches, ce qui permettrait aux élèves de visualiser la forme du front d'onde pour deux positions différentes.

6.2 *Les limites liées à la méthodologie*

Il est aussi intéressant d'éclaircir quelques zones d'ombre au niveau du choix méthodologique. Du point de vue des recueils de données, nous disposons d'un nombre considérable de pistes qui ne sont pas vraiment exploitées. En effet, notre analyse s'appuie

essentiellement sur les synopsis de la séance par PCDR et sur les trois grains d'analyse. La production verbale des élèves au cours des moments de discussions mériterait plus d'intérêt. De même, les séances de formation avec l'enseignant n'ont pas été transcrites et analysées. De plus, nous sommes passés brièvement sur les liens faits par l'enseignant entre la ressource informatique et la ressource tableau et son utilisation auprès des élèves.

Par ailleurs, pour être plus performant au niveau des conclusions, au niveau de l'impact de la séance par PCDR et de son effet sur le raisonnement des élèves, nous aurions dû faire la passation du post-test juste après la séance de TP et avec des questions qualitatives du même type que celles données lors du pré-test. L'idée de réaliser un second post-test environ un mois après nous semble cependant pertinente car cela permet de repérer des apprentissages stabilisés. Par contre, mélanger évaluation institutionnelle des élèves et post-test ne semble pas rigoureux puisque les élèves ne sont pas placés dans les mêmes conditions

6.3 *Les limites liées au cadre théorique*

Il nous semble également intéressant de discuter notre choix du cadre théorique de la TACD. Les travaux d'ingénierie didactique que nous avons rencontrés sont généralement analysés dans le cadre de la théorie anthropologique du didactique (Chevallard) tel que le travail de Haddad (2014) ou dans le cadre de la théorie des situations didactique (Brousseau) tels que les études de Laguerre (2005) ou Tempier (2013). Nous avons essayé dans notre propre travail de faire une exception et de fonder notre analyse préliminaire, l'étude de l'enseignement ordinaire, et notre analyse a posteriori, l'étude de l'enseignement par PCDR, sur la théorie de l'action conjointe en didactique (Sensevy). Ce choix est né de notre conviction que la TACD est capable de faire des analyses très fines des situations de classe. Cependant, cette théorie permet aux chercheurs de choisir seulement un nombre limité parmi un grand nombre de descripteurs possibles. Ce choix stratégique peut alors laisser des zones d'ombre dans le travail d'analyse. A titre d'exemple, au cours des deux analyses, préalables et a posteriori, nous n'avons décrit ni la chronogénèse, ni la topogénèse.

6.4 *Perspectives de recherche*

Cette recherche s'intéresse en partie à l'exécution de l'approche d'enseignement par PCDR avec simulation dans l'enseignement des ondes, et nous avons argumenté notre choix d'une simulation informatique à cause de la rapidité du phénomène qui ne permet pas une étude expérimentale classique. Mais en réalité plusieurs phénomènes en physique ne permettent pas

une étude expérimentale classique. Prenons, par exemple, le cas du phénomène de la charge et de la décharge d'un condensateur. Ce phénomène demeure une boîte noire pour les élèves après enseignement (Saddouki, 2011). Un autre exemple de phénomène non observable est celui du phénomène d'électrisation où le déplacement des électrons ne peut pas être visualisé. Citons également un exemple de phénomène observable mais qui nécessite beaucoup de moyens et d'espace comme l'étude du mouvement d'un boulet de canon (Beaufils et Richoux, 2003). Tous ces phénomènes peuvent être étudiés par l'approche de type PCDR à l'aide d'une simulation informatique dont l'objectif est d'améliorer l'enseignement/apprentissage de la physique au lycée. Tous les concepts physiques cités précédemment pourraient être l'objet de recherches ultérieures. Et partant des résultats de notre recherche, on pourrait apporter des améliorations au scénario pédagogique mais également à la méthodologie d'analyse.

Nous avons déjà évoqué qu'au cours de l'enseignement par PCDR avec une simulation, a lieu un changement au niveau du contrat et au niveau du milieu didactique. Néanmoins, les élèves ont travaillé sur simulation d'une façon semblable à un travail expérimental habituel. Il serait intéressant de tester également cette approche d'enseignement par PCDR avec des expériences sur paillasse et voir de près ce qu'il se passe.

Par ailleurs, rappelons que nous avons soumis l'enseignant à deux séances de formation qui méritent d'être analysées dans un autre travail de recherche et dans un autre cadre théorique comme celui de la didactique professionnelle par exemple. Il serait particulièrement intéressant d'étudier les régulations qui sont opérées par l'enseignant lors de l'exécution de l'approche par PCDR. Et pour approfondir, nous pourrions réaliser des entretiens d'autoconfrontation simple, car il y a souvent des modifications sauvages opérées par l'enseignant qui se réapproprie le scénario selon ses connaissances et sa propre compréhension. L'autoconfrontation pourrait apporter des explications afin d'améliorer notre scénario pédagogique et participer ainsi à l'amélioration de la formation des enseignants.

Bibliographie

- Artigue, M. (1990). Ingénierie didactique. *Recherches en didactique des mathématiques*, 281-307.
- Astolfi, J.-P., & Peterfaivi, B. (1993). Obstacles et construction de situations didactiques en sciences expérimentales. *Aster*, 103-141.
- Bächtold, M. (2012). Les fondements constructivistes de l'enseignement des sciences basé sur l'investigation. *Tréma*, 7-39.
- Balabane, M., & Balibar, F. (2002). Ondes, physique. Dans *Encyclopaedia universalis*. (vol. 16, p.751-760). Paris.
- Ballini, P., Robardet, G., & Rolando, J.-M. (1997). L'intuition, obstacle à l'acquisition de concepts scientifiques. *Aster*, 81-112.
- Beaufils, D. (1998). Vingt années de thèse en didactique de la physique et de la chimie. *Aster*, n°27, 23-43.
- Beaufils, D., & Richoux, B. (2003). Un schéma théorique pour situer les activités avec des logiciels de simulation dans l'enseignement de la physique. *Didaskalia*, n°23, 9-38.
- Beaufils, D., Beney, M., & Ramage, M.-J. (2003). Environnements sémiotiques manipulables pour des activités sur modèle dans l'enseignement de la physique. *Actes EIAH*, 519-522.
- Beaufils, D., Ramage, M.-J., & Beney, M. (2004). *Objets graphiques manipulables et enseignement de la physique : analyse d'appliquettes*. Acte Technologie de l'Information et de la Connaissance dans l'Enseignement Supérieur et l'Industrie, Compiègne, France.
- Ben Jemaa, A. (2013). *Un scénario dynamique pour le suivi et l'analyse de l'activité sur simulation en onde mécanique*. (Mémoire de maîtrise). Université virtuelle de Tunis.
- Ben Jemaa, A., & Boilevin, J.-M. (2016a). *Impact de la démarche d'investigation par simulation des ondes mécaniques sur le raisonnement des élèves*. Actes des 9èmes rencontres de l'ARDIST, Lens, France.
- Ben Jemaa, A., & Boilevin, J.-M. (2016b). Enseigner les ondes mécaniques comme jeux d'apprentissage sur simulation. *Education Journal of the Universty of Patras UNESCO Chair*, 3(2),p. 229-237.
- Ben Jemaa, A., & Saadi, J. (2011). *Scénario pédagogique fondé sur une simulation, essai de remédiation aux difficultés liées à l'enseignement des concepts abstraits. Application sur l'enseignement des ondes mécaniques aux élèves des classes de terminale scientifique*. Dixième colloque national de recherche en physique STP, Sousse, Tunisie.
- Benhassoun, S. (2004). *Enseignement apprentissage des ondes dans les lycées tunisiens: un essai de remédiation*. (Thèse de doctorat). Université Claude Bernard Lyon.

- Blezunski, M. (1993). *Histoire de la physique moderne*. Paris: La découverte.
- Boilevin, J.-M. (2013). *Analyser les interactions didactiques en classe de physique : Quels cadres théoriques ?*. Dans Actes du Congrès d'Actualité de la Recherche en Éducation et en Formation, Université de Montpellier 2, France.
- Boilevin, J.-M. (2013). *Rénovation de l'enseignement des sciences physiques et formation des enseignants. Regards didactiques*. Bruxelles: De Boeck.
- Boilevin, J.-M., & Brandt-Pomares, P. (2011). Démarches d'investigation en sciences et technologie au collège : les conditions d'évolution des pratiques. Dans M. Grangeat, *Les démarches d'investigation dans l'enseignement scientifique. Pratiques de classe, travail collectif enseignant, acquisitions des élèves* (pp. 51-62). Lyon: ENSL.
- Boilevin, J.-M., Ravanis, K., & Ben Kilani, C. (2012). *Dispositifs, démarches, apprentissage dans l'enseignement des sciences et des technologies*. Marseille: IUFM Aix-Marseille.
- Brousseau, G. (1998). Les obstacles épistémologiques, problèmes et ingénierie didactique. Dans G. Brousseau, *Théorie des situations didactiques* (pp. 115-160). Grenoble : La Pensée Sauvage.
- Brousseau, G. (1998). *Théorie des situations didactiques*. Grenoble: La Pensée Sauvage.
- Buty, C. (2000). *Étude d'un apprentissage dans une séquence d'enseignement en optique géométrique à l'aide d'une modélisation informatique*. (Thèse doctorat). Université Lyon 2.
- Calmettes. (2009). Milieu didactique et démarche d'investigation. *Acte du premier colloque international de l'ARCD*. Genève.
- Chaiguerova, L. (2011). Note sur les traductions. Dans F. Yvon, & Y. Zinchenko, *Vygotski, une théorie de développement et de l'éducation, recueil de textes et commentaires* (pp. 59-61). Moscou: MGU.
- Chauvet, F., & Duprez, C. (2003). *Environnement d'apprentissage fondé sur une simulation : appropriation par les enseignants stagiaires d'IUFM*. Communication 3ème rencontre de l'ARDIST, Toulouse.
- Chevallard, Y. (1982). *Sur l'ingénierie didactique*. Texte préparé pour la deuxième Ecole d'Été de Didactique des Mathématiques, Orléans.
- Cross, D., & Grangeat, M. (2014). Démarche d'investigation : Analyse des relations entre contrat et milieu didactiques. *RDST 10*, 155-182.
- De Hosson, C. (2011). *L'histoire des sciences, un laboratoire pour la recherche en didactique et l'enseignement de la physique*. (Note de synthèse pour l'habilitation à diriger des recherches). Université Paris Diderot-Paris 7.
- De Hosson, C., Mathé, S., & Méheut, M. (2010). *La « démarche d'investigation » dans les collèges français*. Actes des journées scientifiques DIES, Lyon, France.
- Dubey, G. (2001). La simulation à l'épreuve du lien social. *Le travail humain*, 3-28.

- Gaston, B. (1999 (1ère édition 1938)). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris: Librairie philosophique Vrin.
- Giordan, A. (2002). *Une autre école pour nos enfants*, Delagrave. Paris: Delagrave.
- Grusson, B., Forest, D., & Loquet, M. (2012). *Jeux de savoir études de l'action conjointe en didactique*. Rennes: Presses universitaires de Rennes .
- Guillon, A. (1995). Démarches scientifiques en travaux pratiques de physique de DEUG à l'université de Cergy-Pontoise . *Didaskalia*, 113-127.
- Haddad, S. (2012). *L'enseignement de l'intégrale en classe terminale de l'enseignement tunisien*. (Thèse de doctorat). Université de Paris 7 et Université virtuelle de Tunis.
- Jameau, A. (2012). *Les connaissances mobilisées par les enseignants dans l'enseignement des sciences, analyse de l'organisation de l'activité et de ses évolutions*. (Thèse de doctorat). Université de Bretagne Occidentale.
- Johsua, S., & Dupin, J. (1993). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. Paris: Presses universitaire de France.
- Kaya Şengören, S., Tanel, R., & Kavcar, N. (2009). Students' difficulties about the wave pulses propagating on a rope. *Journal of Turkish science education*, 50-59.
- Laguerre, E. (2005). *une ingenierie didactique pour l'apprentissage du théorème de Thales au college*. (Thèse de doctorat). Université de Paris 7.
- Le Henaff, C. (2013). *L'anglais à l'école élémentaire : analyse didactique de l'articulation entre la langue et la culture*. (Thèse de doctorat). Université Rennes 2.
- Legros, D., & Crinon, J. (2002). *Psychologie des apprentissages et multimédia*. Paris: Armond Colin.
- Marlot, C. (2007). Analyse de l'action du professeur en classe ordinaire : formes méthodologiques de réduction du corpus et gestion de la disparité des unités de découpage de l'action. Dans D. Lahanier-Reuter, & E. Roditi, *Questions de temporalité, les méthodes de recherche en didactique*. (pp. 153-172). Villeneuve d'Ascq: Presses Universitaires du Septentrion.
- Martinand, J.-L. (1986). *Connaître et transformer la matière ; des objectifs pour l'initiation aux sciences et techniques*. Bern: Peter Lang.
- Mathé, S., & De Housson, C. (2008). Démarche d'investigation au collège : quels enjeux ? *Didaskalia*, 41-76.
- Maurines, L. (1999). Les étudiants et les ondes en dimension trois : analyse des difficultés des étudiants quant au modèle-géométrico-ondulatoire. *Didaskalia*, 87-122.
- Maurines, L. (2001). *La pluridisciplinarité dans les enseignements scientifiques*. Acte de l'université d'été, Poitiers.
- Maurines, L. (2002). Le raisonnement des étudiants dans la physique des ondes. *Bulletin de la société française de physique*, 30-46.

- Maurines, L. (2003). Analyse des difficultés des étudiants à propos des concepts de phase et de surface d'onde, du principe de Huygens. *Didaskalia*, 9-39.
- Maurines, L., & Mayrargue, A. (2001). *Regards croisés de l'histoire des sciences et de la didactique de la physique sur le concept d'onde*. Acte de l'université d'été, Poitiers.
- Maurines, L., & Mayrargue, A. (2007). *Utiliser l'histoire de l'optique dans l'enseignement : pourquoi ? comment ?*. Journées nationales de l'UDPPC, Paris.
- Maurines, L., & Saltiel, E. (1988). Mécanique spontanée du signal. *Bulletin de l'union des physiciens*, 1023-1041.
- Michelet, S., Luengo, V., & Adam, J.-M. (2006). *Un questionnaire dynamique pour le suivi et l'analyse de l'activité et des productions d'élèves en électricité*. Premières journées communication et apprentissages instrumentés en réseau, Amiens, France.
- Michelet, S., Luengo, V., & Adam, J.-M. (2006). *Un questionnaire dynamique pour le suivi et l'analyse de l'activité et des productions d'élèves en électricité*. JOCAIR, Amiens, France.
- Mihas, P., & Gemousakakis, T. (2007). Difficulties that students face with two-dimensional motion. *Physics education*, 163-169.
- Monod-Ansaldi, R., & Prieu, M. (2011). *Démarches d'investigation dans l'enseignement secondaire : représentations des enseignants de mathématiques, SPC, SVT et technologie*. Lyon: institut Français de l'éducation.
- Morge, L., & Boilevin, J.-M. (2007). *Séquences d'investigation en physique-chimie, recueil et analyse de séquences issues de la recherche en didactique des sciences*. Clermont-Ferrand: SCEREN - CRDP d'Auvergne.
- Mouhouche, A., & El Hajjami, A. (2009, Décembre 15). *La résonance en physique des ondes : Aspects historique et didactique*. Récupéré sur Revue africaine de didactique des sciences et des mathématiques: <http://www.radisma.info/document.php?id=746>
- Nouiri, A. (2016). *Analyse de l'action didactique, de sa continuité et de ses déterminants. Cas de l'enseignement de titrage acide-base en classes de terminales tunisiennes*. (Thèse de doctorat). Institut Supérieur de l'Education et de la Formation Continue et Université de Toulouse Jean Jaurès.
- Resnick, L. (1989). Convictions ontologiques dans l'apprentissage de la physique. Dans N. Bednarz, & C. Garnier, *Construction des savoir, Obstacles et conflits* (pp. 103-119). Ottawa: Agence d'ARC.
- Richard, J.-F. (1998). Le modèle en psychologie. Dans *Encyclopaedia Universalis T15*. Paris: Encyclopaedia Universalis.
- Richoux, H., & Beaufils, D. (2005). *Simulation en mécanique au lycée : conception et analyse d'activités sur modèle*. Acte de la quatrième rencontre de l'ardist.

- Robbes, B. (2009, Janvier). *La pédagogie différenciée : historique, problématique, cadre conceptuel et méthodologie de mise en œuvre*. Récupéré sur site web Site de Philippe Meirieu: http://www.meirieu.com/ECHANGES/bruno_robbes_pedagogie_differenciee.pdf
- Saadi, J. (2003). *Les Conceptions et les Difficultés des Étudiants Concernant L'électrocinétique en Courant Alternatif essai de Remédiation en utilisant la Simulation Modélisante*. (thèse doctorat). Université de Lyon 1.
- Saddouki, S. (2011). *Contribution à l'étude du concept Condensateur : Cas des élèves de quatrième année secondaire*. (Mémoire de mastère). ISEFC Tunis.
- Santini, J. (2012). Densité, spécificité et distance dans la dialectique jeu d'apprentissage/jeu épistémique et efficacité des pratiques professorales une étude de cas en géologie à l'école primaire. Dans B. Grusson, D. Forest, & M. Loquet, *Jeux de savoir étude de l'action conjointe en didactique* (pp. 19-45). Rennes: Presses universitaires de Rennes.
- Seck, M. (2015). Stratégies d'enseignement-apprentissage mises en jeu lors d'une séance de travaux pratiques en classe de première. *Liens*, 223-243.
- Sensevy, G. (2011). *Le sens du savoir. Eléments pour une théorie de l'action conjointe en didactique*. Bruxelles: De Boeck.
- Sensevy, G. M., & Schubauer-Leoni, M.-L. (2000). Vers un modèle de l'action didactique du professeur : à propos de la Course à 20. *Recherches en Didactique des mathématiques*, 20 (3), 263-304.
- Sensevy, G., & Quilio, S. (2002). Les discours du professeur. Vers une pragmatique didactique. *Revue française de pédagogie*, 141, 47-56.
- Sensevy, G., & Mercier, A. (2007). *Agir ensemble: l'action didactique conjointe du professeur et des élèves*. Rennes: Presses universitaires de Renne.
- Serap Kaya, Ş., Rabia, T., & Nevzat, K. (2009). student difficulties about the wave pulses propagation on rope. *journal of Turkish science education*, 50-59.
- Stocker, H., Jundt, F., & Guillaume, G. (2007). *Toute la physique*. Paris: Dunod.
- Tempier, F. (2013). *La numération décimale de position à l'école primaire. Une ingénierie didactique pour le développement d'une ressource*. (thèse doctorat). Université de Paris 7.
- Tiberghien, A., & Vince, J. (2005). Etude de l'activité des élèves de lycée en situation d'enseignement de la physique. *Cahiers du Français Contemporain*, 153-176.
- Tiberghien, A., & Vince, J. (2005). Étude de l'activité des élèves de lycée en situation d'enseignement de la physique. *Cahiers de Français contemporain*, 153-176.
- Tongchai, A., Devi Sharma, M., Johnston, I. D., Arayathanitkul, K., & Soankwan, C. (2011). Consistency of students' conceptions of wave propagation: Findings from a conceptual survey in mechanical waves. *Physics education research*, 1-11.
- Tonnelat, M.-A. (1999). Dans *Encyclopaedia universalis*.

- Varenne, F. (2008). *Epistémologie des modèles et des simulations : tour d'horizon et tendances, société française du physique*. colloque Société Française de Physique, Paris.
- Viennot, L. (1996). *Raisonnement en physique*. Paris: De Boeck.
- Vygotsky, I. (2011). Analyse psychologique du processus pédagogique (1933). Dans F. Yvon, & Y. Zinchenko, *Vygotsky, une théorie de développement et de l'éducation, recueil de textes et commentaires* (pp. 139-169). Moscou: MGU.
- Willm, A. (2009, Octobre). *Ostralo*. Récupéré sur www.ostralo.net: http://www.ostralo.net/3_animations/swf/onde_corde.swf

ANNEXES

Annexe 1

FICHE DE TP PAR PCDR

Nom : Prénom : Classe : 4Sc.....

TP : Physique
Les ondes mécaniques progressives
Propagation d'une onde sinusoïdale entretenue

1) La vitesse de propagation d'une onde

1. Question n°1 : Choisir la bonne réponse

Si on excite une corde élastique avec deux amplitudes différentes $a_1 < a_2$ Les vitesses de propagation de l'ébranlement seront :

- a) $V_1 > V_2$ ☐
 b) $V_1 < V_2$ ☐
 c) $V_1 = V_2$ ☐

2. Mesure de la vitesse de propagation

a). Mode opératoire

Se placer en mode impulsion.

Il suffit alors de choisir (et de mesurer) une distance à l'aide des deux barres de visualisation. On mesure ensuite le temps que met l'impulsion pour aller de la première à la deuxième barre de visualisation à l'aide de l'outil chronomètre (la mesure est facilitée si l'on utilise le mode ralenti).

Le calcul du rapport de la distance sur le temps permet alors d'obtenir la valeur de la vitesse de propagation : $V = \frac{d}{t}$

b) Activité n° 1

Utiliser la simulation et déterminer pour deux amplitudes différentes les vitesses de propagation V_1 et V_2

	Amplitude a_1	Amplitude a_2
Distance en m	$d_1 = \dots\dots\dots$	$d_2 = \dots\dots\dots$
Temps t en s	$t_1 = \dots\dots\dots$	$t_2 = \dots\dots\dots$
Vitesse $V = \frac{d}{t}$ en ms^{-1}	$V_1 = \dots\dots\dots$	$V_2 = \dots\dots\dots$

c) Activité n° 2

Utiliser le mode continue et déterminer la vitesse de propagation de l'onde pour une amplitude quelconque à partir de la mesure de la longueur d'onde λ et de la période T avec $V = \frac{\lambda}{T}$

$\lambda = \dots\dots\dots \text{m}$ $T = \dots\dots\dots \text{s}$ $V = \frac{\dots\dots\dots}{\dots\dots\dots} = \dots\dots\dots \text{ms}^{-1}$ $V = \dots\dots\dots \text{ms}^{-1}$

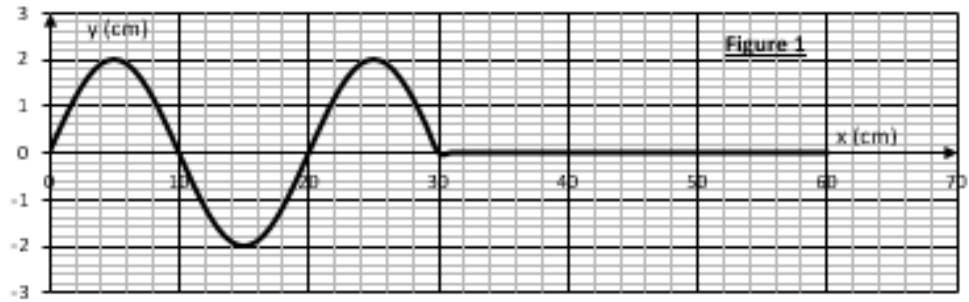
d) Conclusion.....

1.3. Exploitation des résultats

Critiquer votre réponse sur la question n°1

II) Aspect de la corde

On donne ci-dessous l'aspect de la corde à un instant de date t .



1) Questions

a) Question n°2 :

Peut-on prévoir à partir de la courbe le sens de déplacement de la source d'onde S ($x_s=0m$), si oui dans quel sens ?

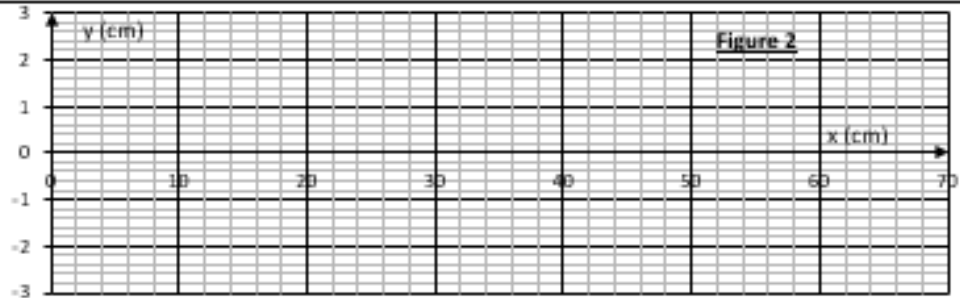
b) Question n°3 :

Comment se déplace le front d'onde ?

c) Question n°4

Représenter sur la figure 2 l'aspect de la corde à l'instant de date t' légèrement supérieur à t (on peut prendre l'instant t' lorsque x_f avance de $\frac{\lambda}{4}$)

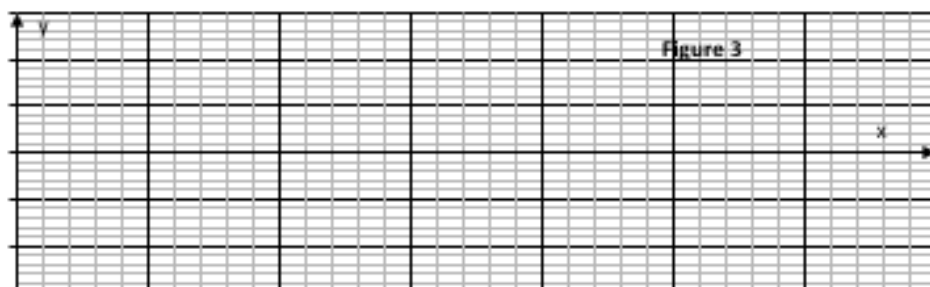
N.B. Aucun développement théorique n'est demandé.



3) Activité n° 3

Choisir le défilement du temps très ralenti, actionner le mode continue, arrêter la simulation lorsque le front d'onde $x_f = \frac{3}{2} \lambda$ environ, tracer soigneusement sur le figure 3 la courbe décrite sur l'écran. Actionner le chronomètre Démarrer la simulation et l'arrêter après environ 1s reproduire la courbe sur le même repère d'axe de la figure 3.

N.B : On peut fixer l'amplitude et la fréquence et refaire la tâche plusieurs fois pour avoir les deux situations voulues.

**4) Activité n° 4**

a) Reprendre les questions 1 et 2

- Question n°1 : Sens de déplacement de la source :
- Question n°2 : Sens de déplacement du front d'onde :

b) Reprendre la tâche n°1 et tracer la courbe demandée sur la figure 1.

c) Considérons le point M d'abscisse $x=10\text{cm}$. Déduire le sens du mouvement du point M à l'instant t et son déphasage par rapport à la source.

Sens du mouvement Déphasages.....

4) Conclusion :

.....

.....

.....

.....

.....

5) Exploitation des résultats

Critiquer votre réponse de la tâche 2 et 1 P

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Annexe 2

EXTRAIT DU PROGRAMME OFFICIEL MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION ET DE LA FORMATION SEPTEMBRE 2009

RÉPUBLIQUE TUNISIENNE
MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION & DE LA FORMATION
DIRECTION GÉNÉRALE DES PROGRAMMES
& DE LA FORMATION CONTINUE
Direction des Programmes & des Manuels Scolaires

**PROGRAMMES
DE SCIENCES PHYSIQUES
3^{ème} année & 4^{ème} année
de l'enseignement secondaire**

Septembre 2009

STATUT DE LA DISCIPLINE

Comme étant des sciences qui traitent de l'univers matériel, la physique et la chimie (Sciences physiques) jouent un rôle déterminant dans le développement et l'amélioration du niveau de vie des sociétés. Si les citoyens n'arrivent pas à suivre l'évolution rapide et perpétuelle de ces sciences, ils vont se trouver dépassés pour se situer dans le monde. D'où la place importante qu'elles occupent dans notre système de l'éducation.

1. Présentation de la discipline

L'enseignement des sciences physiques s'inscrit en droite ligne de la logique de la réforme du système éducatif et, ce, conformément aux articles 56 et 52 de la loi d'orientation de l'éducation et de l'enseignement scolaire (Loi du 23 juillet 2002), qui stipulent respectivement qu'à l'école incombe la double mission primordiale d'assurer en général «la formation cognitive des apprenants et celle de leur faire acquérir les méthodologies de travail et de résolution de problèmes.» et qu'en particulier, la finalité de l'enseignement des mathématiques et des sciences est de permettre aux apprenants de «maîtriser les diverses formes de la réflexion scientifique et de s'habituer à la pratique de la démonstration et de l'argumentation ainsi que de leur faire acquérir des compétences de résolution de problèmes et d'interprétation des phénomènes naturels et humains ».

Avec l'enseignement des sciences physiques au collège, les élèves ont appréhendé l'univers matériel tant naturel que construit dans lequel ils vivent. Par l'observation et l'investigation (Manipulations ; recherches documentaires ou sur terrain...), ils ont reconnu des interactions de tous les jours entre la matière et des phénomènes physiques courants (essentiellement ceux qui sous-tendent la nature) ; ils ont construit qualitativement des concepts et "dégagé" des lois qui régissent les phénomènes étudiés. En mettant à profit leurs acquis, ils se

sont entraînés à proposer une explication ou une solution à des problèmes d'une complexité de degré moyen, à réaliser de petits projets et à s'approprier des manières de communiquer.

Dans une perspective de continuité et de complémentarité avec l'enseignement de base, l'enseignement au secondaire vise chez les élèves à :

- développer des éléments de culture scientifique qui les aideront à se faire une représentation rationnelle des phénomènes naturels environnants et à se situer dans le monde contemporain ;
- acquérir une certaine autonomie, et ce, par la prise de conscience de la responsabilité d'agir pour apprendre et par le développement de l'esprit de créativité ;
- systématiser la pratique de la démarche scientifique par la mise en pratique fréquente de son protocole de base (indiquer les éléments du problème posé, construire des hypothèses, recourir à l'expérience, à la recherche documentaire ou sur le terrain pour confirmer ou mettre en doute les hypothèses avancées, conclure ou déduire...) ;
- perfectionner les habiletés méthodologiques telles que l'utilisation des TIC (Technologies de l'information et de la communication) et l'exploitation des données (Recherche des informations, leur tri critérié, leur analyse...).

Simultanément, on doit apprendre aux élèves à transférer ces savoirs, savoir faire et savoir être d'une manière intégrative dans des situations problèmes authentiques déclenchées par des phénomènes physico-chimiques.

C'est dans cette perspective que les programmes de sciences physiques sont conçus et élaborés en s'appuyant sur les idées directrices suivantes :

- Centrer les contenus de l'enseignement sur l'essentiel et dégager un socle fondamental de connaissances déclaratives et procédurales ;
- Renforcer la corrélation de l'enseignement de la physique chimie avec celui des autres disciplines ;
- mettre l'accent sur l'unité profonde des phénomènes physico-chimiques qui structurent le monde naturel et qui permettent notamment une vision rationnelle et globale de l'environnement ;
- contribuer à renforcer la maîtrise des technologies de l'information et de la communication et à enrichir la culture scientifique indispensable dans le monde contemporain ;
- former l'esprit à la rigueur, à la méthode scientifique, à la critique constructive et à l'honnêteté intellectuelle.

2. Liens avec les autres disciplines

Toute discipline scolaire a sa raison d'être essentiellement par sa manière de concevoir le réel et d'y intervenir, voire par son regard particulier qu'elle porte sur le monde. Pour son fonctionnement, elle a besoin d'éclairages complémentaires qui peuvent être apportés par d'autres disciplines. Toutefois, elle peut à son tour éclairer ces dernières.

Donc, il n'est pas question de dissocier les apprentissages à réaliser en sciences physiques de ceux effectués ailleurs, non seulement dans les disciplines du domaine des sciences mais plutôt dans toutes les disciplines scolaires.

Les "Sciences Physiques", les "Sciences de la vie et de la Terre" et la "technologie" sont complémentaires par les nombreux concepts qu'elles ont en commun. Pour comprendre la matière animée et l'univers vivant auxquels s'intéressent les SVT, il faut avoir un socle minimum de connaissances sur la matière inanimée et l'univers matériel qui sont de l'ordre des sciences physiques et inversement. Pour comprendre le monde qui nous entoure, les sciences physiques s'appuient souvent sur les progrès en technologie, progrès qui sont eux mêmes le fruit d'une exploitation efficace et efficiente de concepts, de lois et de théories de l'ordre de la physique et de la chimie.

Pour l'étude des sciences physiques, on a besoin d'outils mathématiques (calculs; notions de géométrie; analyse; modélisation; représentations graphiques...). D'autre part, on a besoin de connaissances langagières, connaissances qu'apporte l'étude des langues véhiculaires.

En physique, les connaissances liées à l'air, à l'eau et aux changements d'états par exemple peuvent servir à l'étude des climats en géographie.

Afin d'investir les savoirs et savoir faire en physique et en chimie pour le bien être collectif, pour la préservation des ressources naturelles et pour la protection de l'environnement, on compte beaucoup sur les acquis d'ordre éthique et sur l'esprit de citoyenneté apportés par les éducations civique et religieuse, voire la philosophie.

Pour l'étude de quelques thèmes philosophiques comme le déterminisme, l'épistémologie des sciences et la vision du monde, on a recours à des concepts, des lois et des théories de physique ou de chimie. Quant à la pensée philosophique, elle peut favoriser le développement de l'esprit critique en physique et en chimie...

DÉMARCHES PÉDAGOGIQUES

Les sciences physiques restent essentiellement une discipline expérimentale et doivent être donc enseignées en tant que telles. Dans un autre ordre d'idée, la nouvelle orientation de l'enseignement scolaire dans tous ses niveaux replace l'apprenant à sa vraie place, c'est-à-dire au centre de l'action éducative ; deux raisons majeures qui imposent une réflexion approfondie sur les moyens et méthodes à mettre en œuvre pour appliquer ces nouveaux programmes avec une garantie minimale d'efficacité.

Dans le but de favoriser les visées assignées à l'enseignement de cette matière scientifique, il faut opter pour une méthodologie et une évaluation garantes de la réussite de tous, sans oublier d'accorder à son caractère expérimental l'importance qu'il mérite.

1. Méthodologie d'enseignement de la discipline

Pour mettre en œuvre les principes constructivistes et d'intégration des connaissances, assignés à l'enseignement de la matière (principes énoncés précédemment), il faut conduire les activités de formation par des méthodes actives, des méthodes selon lesquelles les apprenants doivent être rendus capables de construire eux mêmes des connaissances, de s'approprier des habiletés et de les intégrer dans des situations significatives ; la large part des horaires consacrés aux séances de travaux pratiques où l'élève assume une grande part d'initiative et de responsabilité dans la construction de son savoir et dans l'acquisition de savoir faire est en soi un signe qui ne trompe pas sur l'orientation qui place l'élève au centre des préoccupations de l'institution éducative. En fait, au travers des activités expérimentales, en amenant les élèves à formuler les hypothèses et à les confronter aux faits, le professeur de la matière contribue au développement de la pensée logique chez les élèves. Il est à peine utile ici de rappeler que l'enseignement traditionnel des sciences physiques formel, abstrait et hautement mathématisé est voué à l'échec.

En d'autres termes, le professeur de physique chimie doit centrer son enseignement sur les élèves. Il ne doit pas hésiter à leur accorder l'initiative, et ce, en les impliquant régulièrement dans des activités d'investigation, de structuration et d'intégration, dans toutes les situations d'apprentissage, aussi bien en cours qu'en travaux pratiques.

Pour stimuler la motivation des élèves et favoriser chez eux la rétention ainsi que la compréhension, il est recommandé de recourir autant que possible à l'enseignement par le problème ou par le projet, un enseignement qui vise un apprentissage dont le point de départ est une situation problème (Situation problème didactique à ne pas confondre avec la situation problème d'intégration), c'est-à-dire une situation qui fait initialement problème aux élèves parce qu'ils n'ont pas les connaissances scientifiques indispensables pour s'en acquitter.

Dans ce cadre là, et pour faciliter la tâche du professeur, les contenus des programmes officiels de physique chimie sont accompagnés d'une liste non limitative et non obligatoire de questionnements et d'activités qui peuvent être exploités en classe comme exemples de stimuli ou de supports didactiques au service des objectifs visés.

Les activités de recherche documentaire ou de recherche sur terrain proposées aux élèves doivent susciter la curiosité chez ces derniers et les aider à appréhender le(s) concept(s) physico-chimique(s) en construction.

Dans les différentes activités d'apprentissage, les élèves doivent être amenés à utiliser au mieux les moyens contemporains et essentiellement les TIC (Technologies de l'Information et de la Communication). L'ordinateur, avec les accessoires appropriés, doit être utilisé non seulement comme outil de laboratoire, mais comme un outil privilégié pour l'acquisition et le traitement des données, pour la simulation, pour l'évaluation formative...

Ce privilège à accorder à l'ordinateur ne doit en aucun cas laisser sous-entendre que cet outil peut remplacer l'expérience réelle de physique ou de chimie, mais il doit être à son service.

Enfin, dans les limites de l'horaire imparti à l'enseignement de la matière et sans sortir du cadre de ces démarches décrites, le professeur de physique-chimie a toute latitude de prendre les initiatives et d'organiser les activités de classe dans l'ordre qu'il juge le mieux adapté à l'atteinte des objectifs visés.

Les activités de formation à caractère expérimental :

Les activités expérimentales en physique-chimie peuvent se ramener à deux groupes complémentaires :

▪ les expériences de travaux pratiques :

Il s'agit d'activités expérimentales à réaliser par les élèves (généralement par binômes), en groupe réduit (classe dédoublée) lors des séances de travaux pratiques.

Ces activités peuvent se regrouper en deux catégories selon les finalités pédagogiques recherchées :

- ✓ Les activités expérimentales destinées à exploiter un modèle ou à vérifier, pour les situations étudiées, la validité d'un modèle ou d'une loi

La loi ou le modèle sont censés avoir été présentés par le professeur ou dégagés par les élèves eux-mêmes, expérimentalement en cours. En TP, les élèves doivent continuer à approfondir et affiner les concepts par un travail expérimental de consolidation.

- ✓ Les activités expérimentales permettant de répondre à une situation problème

La situation problème proposée permet aux élèves la "redécouverte" d'un phénomène et / ou la construction et la structuration d'un modèle modeste ; ils peuvent ainsi mettre en œuvre la démarche scientifique aussi bien pour une reconstruction du savoir que pour répondre à des questions susceptibles de les intéresser directement.

▪ L'expérience de cours

C'est une expérience à réaliser par le professeur avec la classe entière dans une séance de cours. Elle permet soit d'introduire une notion qui sera approfondie et enrichie ultérieurement en TP, soit de reprendre une expérience faite par les élèves en TP pour un complément de cours. Cependant, elle s'impose lorsqu'elle est dangereuse ou difficile.

D'une manière générale, et dans toutes les situations d'apprentissage, les activités expérimentales de physique chimie doivent avoir pour objet d'apprendre aux élèves à observer, à se poser des questions et à confronter leurs représentations avec la réalité ; elles doivent les aider à acquérir des connaissances, des savoir faire et surtout une méthode d'analyse et de raisonnement leur permettant de formuler avec pertinence des jugements critiques.

A ce propos, il est utile de rappeler que rares sont les activités expérimentales dans l'enseignement secondaire qui n'amènent pas les élèves à se confronter directement aux mesures des grandeurs physiques et surtout aux incertitudes affectant leurs résultats. La puissance des moyens de calcul (calculatrice et ordinateur) mis entre les mains du professeur et ses élèves permettent actuellement d'aborder efficacement le phénomène des erreurs de mesure par le biais de la statistique, de donner du sens à la moyenne d'une série de mesures et surtout d'évaluer un intervalle de confiance raisonnable encadrant un résultat de mesure. L'apprentissage de l'objectivité, de la rigueur et de l'honnêteté scientifique que l'on souhaite inculquer aux apprenants ne saurait ignorer ces éléments qui, quoique non mentionnés explicitement dans les libellés des programmes, sont implicitement présents dans tous les cursus scientifiques d'ordre expérimental. Il n'y a pas lieu évidemment de développer ces notions sous forme de cours à un niveau ou à un autre, mais de les étaler sur les quatre ans de l'enseignement secondaire en procédant à leur enrichissement progressif et en les utilisant à chaque fois que l'occasion se présente.

2. Évaluation du travail de l'élève

Il n'est pas superflu de rappeler à ce niveau que l'évaluation est un processus (ou démarche) qui permet de porter un jugement sur les acquis de l'apprenant en vue de prendre une décision.

L'évaluation doit avoir la fonction d'aide à l'apprentissage et celle de reconnaissance des acquis de l'élève.

a) Évaluation des apprentissages :

Loin de toute sanction, l'évaluation des apprentissages est une occasion de régulation dans le seul but de favoriser le progrès des apprenants. Donc, toute activité (ou tâche) qui aboutit à une régulation peut faire l'objet d'évaluation. La régulation à réaliser par l'enseignant peut viser une rétroaction immédiate (Régulation interactive) ou un ajustement des actions pédagogiques (Régulations rétroactive et proactive). Quant à l'autorégulation, régulation à faire par les élèves eux-mêmes, elle amène ces derniers à revoir et améliorer leurs manières d'apprendre. Toutefois, l'autorégulation n'est possible que lorsque les acteurs sont conscients de leur processus d'apprentissage, c'est-à-dire lorsque toutes les connaissances déclaratives, procédurales et conditionnelles sont construites par eux-mêmes.

b) Évaluation des acquis :

Comme celle des apprentissages, l'évaluation des acquis peut être ramenée à une auto évaluation. Pour l'enseignant, elle vise à rendre compte du niveau de développement des différentes capacités chez l'apprenant. Lorsqu'elle est faite par ce dernier, elle lui permet de reconnaître son degré d'atteinte des objectifs visés.

Bien qu'elle soit continue, l'évaluation des acquis ne peut se faire qu'au terme d'études qui constituent pour chacune d'entre elles une unité complète et cohérente (Construction d'un concept ; "redécouverte d'une loi"...). Pour ce faire, il faut placer les élèves dans des situations qui demandent la mobilisation de ressources (Connaissances déclaratives, procédurales et conditionnelles) dans des contextes variés.

Remarque:

L'utilisation du portfolio par l'élève est un autre outil (ou moyen) d'évaluation efficace pour l'enseignant et l'élève lui-même.

ONDES (7,5 – 9 heures)

Objectifs	Exemples de questionnements et d'activités	contenu	Horaire
■ Distinguer entre une onde transversale et une onde longitudinale. ■ Reconnaître que la propagation d'une onde est due à une propagation d'énergie sans transport de matière. ■ Réaliser une expérience illustrant la propagation d'une onde sinusoïdale dans un milieu homogène et isotrope. ■ Identifier, dans un milieu de propagation donné, les propriétés dont dépend la célérité d'une onde. ■ Etablir l'équation horaire du mouvement d'un point donné du milieu de propagation connaissant celle de la source d'onde progressive et représenter graphiquement le diagramme du mouvement de ce point. ■ Représenter graphiquement l'aspect, à un instant donné, du milieu (ou d'une coupe du milieu) de propagation d'une onde progressive. ■ Reconnaître la double périodicité d'une onde sinusoïdale.	► Nos oreilles perçoivent des sons. Qu'est ce qui fait qu'ils nous parviennent et pourquoi les sons émis et ceux qu'on perçoit sont les mêmes ? ► La différence de salinité entre les eaux de l'Atlantique et de la Méditerranée est à l'origine d'ondes progressives au niveau du détroit de Gibraltar. Quelles sont les propriétés de ce type d'ondes ? ► Faire propager un ébranlement : - le long d'une corde élastique tendue, - le long d'un ressort, - le long d'une échelle de perroquet, - à la surface d'une nappe d'eau dans une cuve à ondes. Observer dans chaque cas l'ébranlement et comparer la direction de sa propagation avec la direction de la déformation locale du milieu de propagation. ► Mesurer la célérité : - d'un ébranlement se propageant le long d'une échelle de perroquet à l'aide de deux photos capteurs placés devant deux barreaux de l'échelle, - du son à l'aide de deux microphones reliés chacun à une entrée d'un oscilloscope.  ► Faire propager une onde progressive sinusoïdale le long d'une corde élastique, mettre en évidence sa périodicité temporelle avec la méthode optique et sa périodicité spatiale avec un éclairage stroboscopique.	I. Ondes mécaniques progressives I-1. Notion d'onde : - Onde transversale et onde longitudinale. - Célérité d'une onde. I-2. Onde progressive sinusoïdale : - Double périodicité : périodicité temporelle (T) et périodicité spatiale (longueur d'onde λ).	4,5-5,5 h

Annexes

Objectifs	Exemples de questionnements et d'activités	contenu	Horaire
■ Justifier le caractère ondulatoire de la lumière à partir des expériences de diffraction d'ondes mécaniques et d'ondes lumineuses. ■ Préciser l'influence, sur le phénomène de diffraction, du quotient $\frac{\lambda}{a}$ (λ étant la longueur d'onde et a la largeur de la fente). ■ Réaliser des expériences de réflexion, de réfraction et de dispersion d'ondes mécaniques. ■ Montrer qu'une lumière blanche est constituée d'une infinité de radiations monochromatiques. ■ Distinguer un milieu dispersif d'un milieu non dispersif.	► Observer la diffraction d'une onde progressive rectiligne à la surface de la nappe d'eau d'une cuve à ondes, à travers une fente droite de largeur réglable et fixée à 1,3 cm par exemple et celle de la lumière émise par une source laser à travers une fente droite de largeur réglable et fixée à 0,2 mm par exemple ; faire varier dans chaque cas la largeur de la fente et suivre l'évolution de la netteté du phénomène de diffraction. ► Observer la réflexion d'un ébranlement sur une extrémité fixe ou libre d'une corde élastique ou d'une échelle de perroquet. ► Faire propager à la surface d'une nappe d'eau dans une cuve à ondes, une onde progressive sinusoïdale de forme rectiligne et lui faire subir respectivement une réflexion et une réfraction. ► Visualiser à l'oscilloscope le signal représentant un son réfléchi sur un écran et détecté par un microphone.	II. Interactions onde-matière II-1. Diffraction mécanique et lumineuse (caractère ondulatoire de la lumière). II-2. Réflexion II-3. Réfraction II-4. Dispersion	3 - 3,5 h

Commentaires

On introduira la notion d'onde par la réalisation des expériences permettant de générer un ébranlement dans un milieu élastique unidimensionnel (corde élastique et ressort) et bidimensionnel (surface libre d'un liquide) et on définira l'onde comme étant le phénomène résultant de la propagation d'une succession d'ébranlements dans un milieu donné.

Des mesures de la célérité v d'une onde se propageant dans un milieu donné permettront de vérifier que la valeur de cette célérité est indépendante de la forme de l'onde et de son amplitude tant que celle-ci est faible. Des mesures de la célérité v d'une onde se propageant dans des milieux de natures différentes (masses volumique, surfacique et linéique différentes ; atomicités différentes de gaz...) ou dans des états différents (tension ou torsion différentes ; températures différentes...) conduiront à montrer que la célérité v dépend des propriétés du milieu de propagation. Cependant, aucune expression de célérité en fonction de ces propriétés n'est au programme.

On insistera sur le fait qu'au cours de la propagation d'une onde mécanique sinusoïdale, les points du milieu de propagation effectuent chacun un mouvement sur place autour de sa position de repos alors que l'énergie est transmise d'un point à un autre pour affecter tout le milieu de propagation.

On montrera expérimentalement puis théoriquement la double périodicité d'une onde sinusoïdale dans le cas d'une onde transversale unidimensionnelle et on généralisera les résultats après une étude qualitative de cas variés (onde longitudinale, onde bidimensionnelle et onde tridimensionnelle : le son).

* * *

La réalisation d'une expérience de diffraction d'une onde mécanique bidimensionnelle et d'une expérience de diffraction de la lumière conduira à déduire le caractère ondulatoire de la lumière. On examinera expérimentalement l'effet du quotient $\frac{\lambda}{a}$ sur le phénomène de diffraction. Aucun développement théorique n'est au programme.

* * *

On rappellera la dispersion de la lumière blanche par un prisme et on conclura que cette dernière est constituée de plusieurs radiations monochromatiques, chacune est caractérisée par sa fréquence ν .

La différence de déviations subies par deux radiations de couleurs différentes tombant sous une même incidence sur une surface de séparation de deux milieux transparents donnés, permettra de montrer que l'indice de réfraction d'un matériau réfringent dépend de la couleur de la radiation qui le traverse.

On montrera expérimentalement que, comme l'onde lumineuse, l'onde mécanique peut subir la réflexion, la réfraction et la dispersion.

Aucun développement théorique n'est au programme.

Annexe 3

Synopsis primaires des séances d'enseignement ordinaire

1 Synopsis 1^{ère} séance du cours du 19-02-2015

Thème : Les ondes

Chapitre : Ondes mécaniques progressives

Objectifs :

- Distinguer entre un ébranlement transversal et un ébranlement longitudinal.
- Reconnaître que la propagation d'un ébranlement est due à une propagation d'énergie sans transport de matière.
- Identifier, dans un milieu de propagation donné, les propriétés dont dépend la célérité d'un ébranlement.

Temps	Phase s	Scènes	Déroulement		Observations
			Rôle du professeur	Activité des élèves	
0 :00.0		S1 Entrée en classe	P fait entrer les élèves en classe. P demande aux élèves de s'installer dans leurs places	Les E. rentrent en classe et s'installent à leur place habituelle et sortent leurs affaires	
0 :11.4					Le chercheur intervient pour donner une introduction brève l'objet de l'enregistrement vidéo lui donne des conseils de type ne pas s'intéresser au cameraman de se comporter comme d'habitude.
(0:01:03.9)		S2 : présentation	P : prend la parole et présente son cours P : le professeur présente le matériel		

			qu'il va utiliser pour introduire la notion d'ébranlement À l'aide d'une corde élastique, ressort et de l'eau le professeur introduit la notion du milieu élastique Le prof dicte la définition d'un milieu élastique Une élève lit la définition d'un ébranlement		
(0:06:48.2)		S3 : expérimentation	P : Le prof, avec un élève, tient une corde élastique le prof excite de son extrémité une perturbation Le prof demande de ce qui propage lors de déplacement d'un ébranlement une élève répond que ce n'est pas la matière le prof enchaine avec sa réponse est dit que sauf l'énergie qui se propage	Une élève tient l'extrémité de corde avec le professeur	Durée : 2 min 12s
(0:09:08.4)		S4	P : dicte la définition d'un ébranlement P : fait un schéma explicatif au tableau et montre le sens de déplacement des points de la corde Le prof continue à dicter donne au même temps que tous les points effectuent le même mouvement que la source avec un retard puisque l'ébranlement ne reste pas fixe à la source. P : énonce de nouveau une définition de l'ébranlement qui se propage le long de la corde. Le prof attire l'attention des élèves pour comparer le dé		

			placement de l'ébranlement et le déplacement le long de la corde : aucune réaction de ces élèves. P : continu alors d'expliquer la formulation de la définition et avec ces élèves avec son aide pour choisir les mots convenables P : le prof énonce la définition en suite s'aide par un schéma déjà donné		
(0:17:53.2)		S5 expérimentation	P : réalise une expérience une élève tient le ressort d'une extrémité il comprime quelque spires et il les relâche il répète l'expérience une deuxième fois et pose la question qu'est-ce que ce déplace ? il obtient une réponse collectif "la compression qui se déplace" le prof explique alors que la matière ne se déplace pas pour annoncer à la suite que sauf de l'énergie qui se déplace dans la même direction de propagation il répète presque la même explication pour dire à la suite que c'est un déplacement longitudinal et que milieu est unidimensionnel. L'élève regagne sa place		Durée : 6 min 5s
(0:23:00.9)		S6	P : le prof dicte l'interprétation de mouvement des spires suivi par la définition		

			d'un ébranlement longitudinal		
(0:27:26.3)		S7 expérimentation	P : réalise une expérience qui illustre un ébranlement dans un milieu bidimensionnel les élèves sont réparties en deux groupe l'espace ne permet à toute la classe pour suivre l'expérience du mouvement d'un morceau de liège sur la surface de l'eau il pose la question qu'est-ce que se passe au morceau de liège suite à une goutte d'eau. Les élèves ne répondent pas il explique alors que le morceau de liège fait un mouvement de haut vers le bas et que l'ébranlement se propage dans toute les directions le prof fait un schéma au tableau explicatif du mouvement du bouchon pour montrer que l'ébranlement est transversal P : répète au reste de la classe la même l'expérience, cette partie et plus accéléré les élèves regagnent en fin leurs places		
(0:36:54.2)		S8	P : le prof dicte l'interprétation de l'expérience le prof schématise l'expérience en trois schémas avant au milieu et après le passage de l'ébranlement et donne		

			le temps aux élèves pour reproduire sur leur copies		
(0:41:10.7)		S8	Une récréation est permise aux élèves (entre les heures du cours)		Le cameraman a arrêté l'enregistrement ce qui m'a fallait ajouter au synopsis 10 min déterminer avec ma propre camera J'ai gardé cet intervalle pour garder la notification du Transana
(0:42:25.5) +10 min		S9	P reprend l'énoncé de la définition est généralisé le phénomène		
(0:48:44.8) +10 min		S10 expérimentation	P débute une deuxième expérience, le prof actionne un son de haut-parleur lié à un GBF, il met sous une cloche et montre que le son est encore entendu en suite il aspire l'air sous la cloche avec une pompe à vide. Il constate que l'intensité du son a diminué le prof avoue que cette le résultat de cette expérience n'est pas tranchant puisque des élèves disent que le son a diminué les autres a augmenté et d'autre qu'il est toujours le même, le prof donne alors le résultat qu'on doit		Durée : 3 min 45 Le résultat de cette expérience n'est pas tranchant

			attendre par cette expérience		
(0:52:29.3) + 10 min		S11	P lit ce qui est déjà écrit sur leur copie et dicte la suite de l'interprétation		
(0:56:02.8) + 10 min		S12	P écrit sur le tableau sous-titre, célérité d'un ébranlement, il commence par faire au tableau un schéma d'une déformation en deux instant différentes et il introduit que l'ébranlement se déplace avec une célérité distance sur temps (sans indiquer que c'est vitesse constante). Les élèves reproduisent sur leurs copies le schéma du tableau et la formule de la célérité. Le prof dicte et exilique le retard du temps mis par l'ébranlement pour parcourir la distance SA et donne aussi l'unité en SI		
(1:04:02.5) + 10 min		S13	Le prof déclare qui va déterminer les facteurs dont dépend la célérité d'un ébranlement pour cela il utilise une échelle de perroquet, il provoque une perturbation les élèves visualise l'ébranlement qui se déplace, le prof dit qu'on peut déterminer cette vitesse avec un mesureur de vitesse et il passe à la quatrième page du document il explique de nouveau l'expérience et comment peut-on		

			mesurer la durée du parcours avec un chronomètre,		
(1:06:48.6) + 10 min		S14 expérimentation	P prend un rapporteur pour mesurer l'angle que fait le premier pas de l'échelle de perroquet, il prend un angle de 60° et il la libère, le chronomètre affiche 8.38s. Le prof note les valeurs au tableau il montre qu'il y a deux capteurs talque on doit mesurer la distance qui les sépare c'est 0.45m il change alors cette distance en déplaçant le chronomètre après plusieurs tentatives le prof s'aide d'un chronomètre d'un téléphone portable mais sans résultat car le mouvement est relativement rapide en fin il abandonne l'expérience.et déclare que les valeurs des vitesses doivent être égale ou très proches		Durée : 15 min 18 L'expérience n'a pas donné de résultat à cause du matériel : les fixations des chronomètres et un mauvais contact des deux capteurs
(1:22:06.6) + 10 min		S15 expérimentation	P montre qu'on pourra déplacer les masselottes de l'échelle au milieu pour changer le milieu, et essaye de faire des mesures nouvelles. Le prof fait des réglages du matériel en suite il prend un chronomètre d'un téléphone portable la première valeur est de 3.08s il la compare avec la deuxième valeur de la première expérience puisque c'est la même distance entre les deux		Durée : 5 min 46 C'est évident qui va trouver des valeurs différentes puisque le chronomètre (téléphone portable) avec marche arrêt manuelle ne donnera aucun

			capteurs $v=0.36\text{m/s}$ il annonce que les valeurs sont changées complètement lorsqu'on a changé les caractéristiques du milieu et que la célérité d'un ébranlement varie avec le milieu et que ceci est général		résultats adéquate et le prof le sache en déclarant qu'on doit avancer dans le cours.
(1:27:52.6) + 10 min			P : dicte alors ce résultat aux élèves, et conclut que la célérité d'un ébranlement dans un milieu homogène est constante elle ne dépend de l'amplitude de la déformation mais dépend des propriétés physiques du milieu matériel et il finit ainsi la séance		
(1:31:19.2) + 10 min				Les élèves rangent leurs affaires et quittent la salle	

La durée du temps accordée à l'expérimentation :

33 min 6s dont 21 min 4s du temps perdu à cause du défaut du matériel ce sont des expériences qui n'ont pas données de résultats significatifs exploitables.

2 Synopsis 2ème séance du cours

Thème : Les ondes

Chapitre : Ondes mécaniques progressives

Objectifs :

- Etablir l'équation horaire du mouvement d'un point donné du milieu de
- Propagation connaissant celle de la source d'onde progressive et représenter graphiquement le diagramme du mouvement de ce point.
- Représenter graphiquement l'aspect, à un instant donné, du milieu (ou d'une coupe du milieu) de propagation d'une onde progressive.
- Reconnaître la double périodicité d'une

Temps	Phases	Scènes	Déroulement		Observations
			Rôle du professeur	Activité des élèves	
0 :00.0		S1 Entrée en classe	P : fait rentrer les élèves en classe. P. demande aux élèves de s'installer dans leurs places	Les élèves entrent en classe s'installent dans leurs place	
(0:01:23.4)			Le prof propose de continuer la leçon. Il commencée par un résumé de ce qu'ils l'ont déjà vue		
(0:03:08.7)			Le prof débute cette leçon par l'étude d'une onde sinusoïdale entretenu, Le prof explique que pour les mouvements rapides on utilise la stroboscopie. Le prof montre un disque tournant et montre que si le mouvement est lent on peut déterminer la période et la fréquence par contre si le disque tourne à l'aide d'un moteur électrique le mouvement est rapide et on ne peut pas suivre le mouvement de la tâche d'où la		

			nécessité du stroboscope et explique son fonctionnement à travers les éclaires,		
(0:08:49.0)			Le prof distribue des fiches à compléter aux élèves il dicte alors à ces élèves, le prof fait un schéma au tableau d'un disque muni d'une tache noir le stroboscope est en panne le prof alterne entre dicté et expliqué. Le prof présente deux cas de visualisation immobilité apparente et le mouvement ralenti. Il donne les conditions de ces deux cas, puis il pose la question : quels sont les fréquences capables d'obtenir l'immobilité apparente aucune réponse des élèves le prof répond lui-même et dit que cela n'est pas important		Le stroboscope est en panne le prof décrit ce qu'on doit visualiser
(0:26:50.3)			Le prof passe à la partie suivante, il fait un schéma au tableau un repère (x,y) tel que l'axe des x est la corde au-dessous, il schématise un deuxième repère puis un troisième et pointe le point M qui se déplace ces trois repères. Devant chaque repère le temps correspondant et dégage le retard t _{éta} effectué par l'ébranlement pour atteindre le point M à partir de la source enfin il dégage avec ces		

			élèves le principe de propagation		
(0:34:06.0)			Le prof accorde un temps pour que les élèves prennent note du tableau le prof ajoute au même temps la relation qui traduit le principe de propagation	Les élèves prennent note du tableau	
(0:39:59.5)			Le prof introduit le concept onde il prend l'exemple de la corde dans le cas où les excitations seront répétitives		Seulement 1 min 21 s pour introduire la notion d'onde
(0:41:20.9)			Il dicte ensuite la définition et il rajoute si le mouvement est sinusoïdale l'onde est dite sinusoïdale.		Introduire le type d'onde
(0:42:35.1)			Le prof aborde le problème de l'extrémité de la corde et pour éviter la réflexion on utilise un corps qui absorbe l'onde donc l'onde est progressive et il continue à dicter		Introduire la notion d'onde progressive
(0:47:36.0)			Le prof déclare qu'il va s'intéresser à une onde se propageant le long de la corde ; il décrit le schéma à représenter sur les fiches qu'il a distribué. Il demande aux élèves de se déplacer au laboratoire à côté de la salle qui est équipé et obscur		
(0:50:49.0)			L'expérience est installée. Un miroir tournant source de vibration source lumineuse et un écran sur l'écran les élèves observe une sinusoïde le prof explique que c'est le mouvement	Les élèves regardent sur l'écran et interprètent ce qu'ils observent	L'expérience est claire et illustrant mis à part il manque le stroboscope

			d'un seul point de la corde le prof demande à un élève d'observer la corde en mouvement l'élève dit qu'il voit une bande floue ce qui est correcte il explique que la sinusoïde des espaces qu'on réalité on peut l'observer par un stroboscope qui est en panne		
(1:03:33.1)				Les élèves retournent à la salle du cours et occupent leurs places	
(1:06:25.1)			Le prof dicte l'interprétation de la première expérience déjà observées il écrit au tableau l'équation de mouvement de la source ainsi que celle du point M il signale qu'il on la même fréquence et la même amplitude et qu'ils diffèrent par les phases initiales il dicte en suite l'aspect de la corde en lumière ordinaire il initialise en suite la notion du période spatial et		
(1:12:40.8)			Le prof demande aux élèves de formuler une définition. Après la réponse de l'élève, le prof intervient pour annoncer la définition correcte, il continu à dicter en s'aidant d'un schéma au tableau. Le prof ajoute qu'en réalité le mouvement de la source décrit un arc de cercle mais on peut le considérer comme	Une élève répond « c'est la distance qui sépare deux périodes »	Objet d'une question de la provision c'est de tracer une sinusoïde de temps à partir d'une sinusoïde à un instant ultérieur très proche

			segment, car la trajectoire est très petite alors quand la source décrit une période T l'onde parcourt période spatial λ et donne ainsi la formule $\lambda=C*T$ il passe à l'interprétation de l'aspect de la corde en lumière stroboscopique en mouvement ralenti en schématisant deux sinusoïdes spatiales successives à deux instants très proche		
(1:22:10.5)			Le prof conclut que l'onde est caractérisée par deux périodes λ et T et il dicte la conclusion à ces élèves il achève la leçon en leurs disant qu'il reste que l'étude théorique et un TP assisté par ordinateur et		
(1:24:18.9)				Les élèves quittent la salle de classe.	

La durée du temps accordée à l'expérimentation :

3 Synopsis 3ème séance du cours

Thème : Les ondes

Chapitre : Ondes mécaniques progressives

Objectifs :

- Introduire la notion d'onde mécanique progressive.
- Dégrader la double périodicité d'une onde.
- Réaliser une expérience illustrant la propagation d'une onde sinusoïdale dans un milieu homogène et isotrope.

Temps	Phases	Scènes	Déroulement		Observations
			Rôle du professeur	Activité des élèves	
0 :00			Le prof fait entrer ses élèves ; ils s'assoient, ils sortent leurs affaires		
(0:00:24.4)			Le prof commence à écrire le titre de la leçon au tableau "propagation d'une onde sinusoïdale le long d'une corde élastique: étude théorique" il débute par l'équation du mouvement d'un point M, le prof représente sur le tableau un repère orthonormé tel que l'axe des x représente la corde, le prof pose la question, par la suite de quoi est caractérisée une onde? aucune réponse des élèves mais lorsqu'il commence par dire une période une élève continue temporelle et spécial le prof se contente par cette réponse.		Le prof pose une question sans réponse
(0:06:21.1)			Le prof passe au principe de propagation il écrit le principe pour un point M et donne l'équation horaire de la source et se lance dans l'étude théorique pour déterminer l'équation $y(t,x)$ le prof explique que cette équation est à double périodicité il pose des questions et il répond au même temps vu qu'il n'y a pas de réponse des élèves.		

(0:12:35.8)			le prof se lance à l'étude de la sinusoïde de temps en fixant un point M d'abscisse x le prof pose la question est ce que l'équation obtenue en fixant x est valable quel que soit t ? aucune réponse il répète la même question un silence règne dans la salle, pour une troisième fois mais d'une autre manière est ce que le mouvement du point M débute au même instant que la source? une élève répond par non le prof explique alors le mouvement du point M Le prof prend une corde pour montrer qu'avant le retard θ le pont M est repos.		Le prof pose une question sans réponse
(0:19:14.2)			Le prof prend un exemple d'équation horaire d'une source de phase initial nulle et trace la sinusoïde de temps correspondante et sur la même courbe trace une sinusoïde de temps d'un point M d'abscisse x avec $\theta = T + (1/4)T$ cette sinusoïde est tracée par le fait que le point M reproduit le même mouvement de la source après un retard θ c'est la même sinusoïde de la source mais décalée		Fait l'objet d'une question de prévision
(0:26:02.3)			Le prof passe à l'étude théorique de la sinusoïde des espaces il fixe alors le temps et se lance dans la démonstration parfois avec l'aide de ses élèves pour développer l'équation en parlant au même temps. Le prof pose la question quand est ce que la corde est au repos aucune réponse il explique que la corde est déformée partiellement il pose de nouveau la même question mais sans réponse	Les élèves sont occupés par l'écriture de ce qui est au tableau sans réagir et cela depuis le début de la séance.	Le prof pose une question sans réponse

(0:34:44.5)			Le prof prend un exemple au tableau sans équation théorique est trace une sinusoïde des espaces il trace λ sur la sinusoïde des espaces		Fait l'objet d'une question de prévision
(0:39:45.5)			Le prof passe à une autre partie du cours, déphasage entre la source et un point de la corde il prend la corde pour expliquer la notion de déphase, et les cas particuliers en phase en opposition de phase en quadrature de phase ou quelconque. Il passe à développer théoriquement l'expression du déphasage et il développe les différents cas particuliers déjà cités, en dégageant à chaque fois la relation entre x et λ en fonction de K entier positif au cours de ce développement. Le prof explique, pose des questions, répond lui-même à ces questions ; il essaye d'animer mais les élèves sont en train d'écrire ou parfois il parle plusieurs élèves pour dire la même chose en répétant les réponses du prof (effet Pygmalion), le prof traite aussi le cas de la quadrature avance et quadrature retard à chaque expression x le prof développe un paragraphe traduisant cette expression le cours est terminé.		Les élèves ne réagissaient pas avec l'enseignant qui essaye d'animer son cours par des questions
(1:01:37.4)			Le prof distribue une feuille qui comporte l'énoncé d'un exercice il donne ensuite un temps de réflexion à ses élèves il se déplace dans la salle et entre les rangs pour voir les productions	Les élèves essayent de résoudre un exercice, c'est un travail individuel.	Exercice d'application pour finaliser ce chapitre
(1:07:35.4)			Le prof lit l'énoncé, il note les données au tableau et il résout en même temps l'exercice. Il explique avec une aide		Les élèves ne différencient pas entre sinusoïde de

		minime aux élèves. Pratiquement le prof fait tout seul la réponse correcte complète par une élève : c'est que à l'immobilité apparente la corde parait immobile sous la forme d'une sinusoïde. Les élèves ne différencient pas entre sinusoïde de temps et sinusoïde des espaces tous répondent au même temps que la photographie d'une corde à un instant donné représente une sinusoïde de temps suite à une question du prof ce dernier corrige cela sans aucune explication mais en disant c'est une sinusoïde des es..... après avoir calculer deux longueurs d'onde de deux sinusoïdes des espaces de deux cordes différents entretenus par la même source d'onde et à la même fréquence le lit la question suivante à quoi est due la différence de ces deux longueur d'onde aucune réponse des élèves le silence absolu , le prof écrit alors les formules au tableau $\lambda_1 = T \cdot V_1$ et $\lambda_2 = T \cdot V_2$ et il pose de nouveau la question quelques élèves répondent au même temps par la célérité V le prof pose alors la question de quoi dépend la célérité V un silence coupe par une réponse du fond de la classe par λ le prof ne l'a pas entendu ou il fait semblant. Le prof demande à nouveau de quoi dépend la célérité et il répond lui-même qu'elle dépend des propriétés du milieu de propagation. Il note ensuite la réponse, que les cordes ne sont pas tendues de la même manière. A la question préciser la nature de l'onde	Aucune réponse vis-à-vis les différences entre les longueurs d'onde. Après un avoir rappelé de l'expression de λ un élève	temps et sinusoïde des espaces. Les élèves ne savaient pas que la différence des longueurs d'ondes est due à la différence entre des célérités des ondes puisque le milieu est changé alors la célérité aussi
--	--	---	--	---

			transversale ou longitudinale, une seule réponse est proposée par une élève mais elle est incorrecte. Le prof explique et écrit au tableau la nature de l'onde en écrivant la définition d'une onde transversale. le prof dispose d'une corde élastique pour illustrer la variation du milieu et montre que si la corde est tendu on a changé la milieu élastique et montre par expérience qualitative que si la corde est tendu on constate que la célérité de l'ébranlement augmente pour répondre à la question suivante est d'établir l'équation horaire d'un point M de la corde on donnant l'équation horaire de la source le prof utilise le principe de propagation et développe mathématiquement le raisonnement en fin remplace les valeurs numérique. Il demande ensuite de représenter sur le même repère d'axe $y_M(t)$ et $y_s(t)$. Il choisit de tracer ces courbes en s'aidant du déphasage. Comme elles sont en opposition de phase, il montre qu'il suffit de tracer la courbe de la source en précisant le point de départ et le sens de déplacement de la source. L'autre est alors en opposition de phase en précisant l'instant ou le mouvement de la source débute. Il reste deux questions de l'exercice ; le prof propose aux élèves de les compléter chez eux puisque la séance est terminée	répond que la différence des célérités est due au λ. Une seule réponse incorrecte sur la nature de l'onde	Après avoir senti que ses élèves ne sont pas convaincus que la célérité vari avec le milieu le prof réalise une expérience qualitative pour illustrer
--	--	--	---	--	--

					cette propriété Le prof trace une autre fois deux courbes sur le même repère axe $y_M(t)$ et $y_S(t)$ Fait l'objet d'une question de prévision
(1:38:51.9			Les élèves rangent leurs affaires et quitte la sale.		

La durée du temps accordée à l'expérimentation :

La durée du temps accordée à l'application : 31 min 16 s

Manque les scènes

Annexe 4

ETUDE STATISTIQUE

*Statistique des réponses élèves qui ont passé leurs
devoirs de contrôle N°3*

Nature de l'onde

		Fréquence	Pourcentage	Pourcentage valide	Pourcentage cumulé
Valide	Correcte (transversale)	17	89,5	89,5	89,5
	Longitudinale	1	5,3	5,3	94,7
	Transversale et longitudinale	1	5,3	5,3	100,0
	Total	19	100,0	100,0	

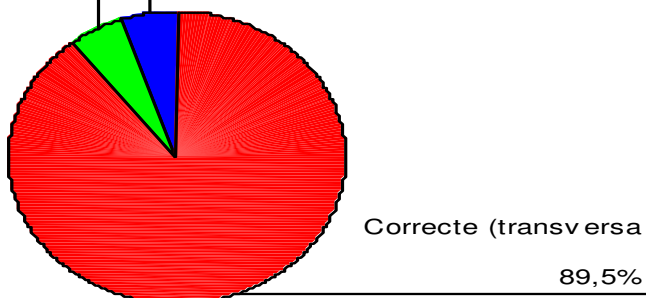
Nature de l'onde

Transversale et long

5,3%

Longitudinale

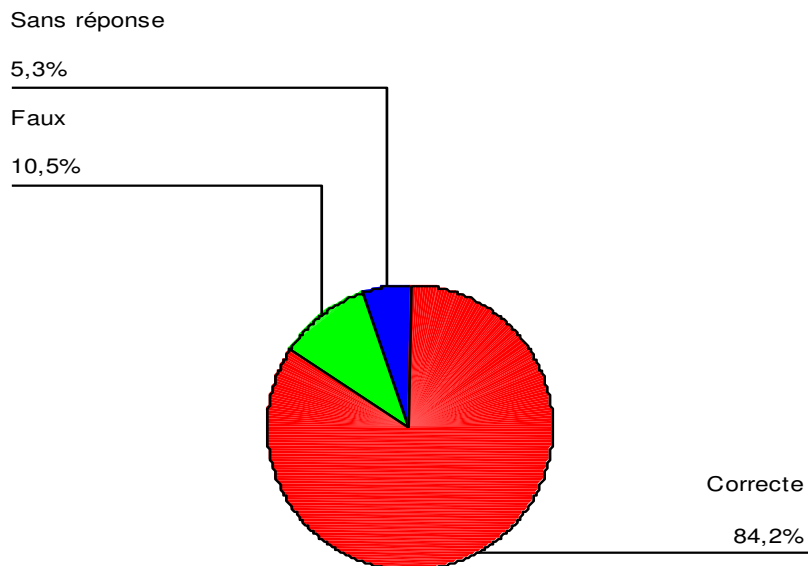
5,3%



Détermination de la période

		Fréquence	Pourcentage	Pourcentage valide	Pourcentage cumulé
Valide	Correct	16	84,2	84,2	84,2
	Faux	2	10,5	10,5	94,7
	Sans réponse	1	5,3	5,3	100,0
	Total	19	100,0	100,0	

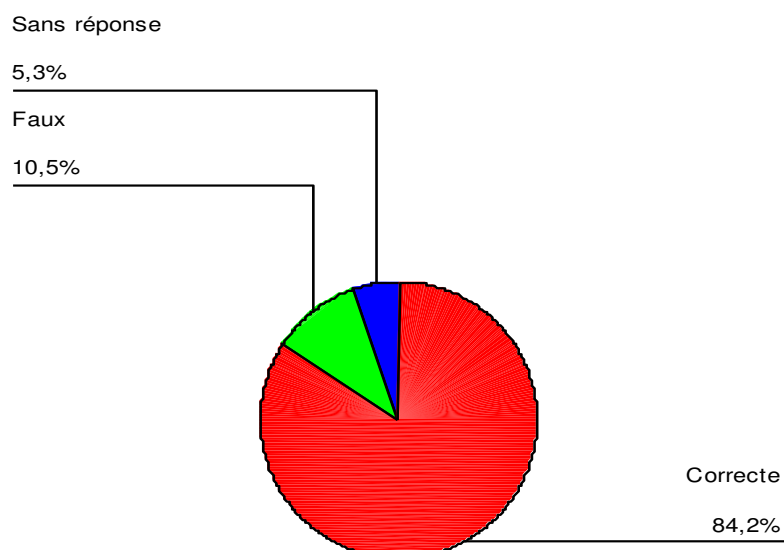
Détermination de la période



Détermination de longueur d'onde

		Fréquence	Pour cent	Pourcentage valide	Pourcentage cumulé
Valide	Correct	16	84,2	84,2	84,2
	Faux	2	10,5	10,5	94,7
	Sans réponse	1	5,3	5,3	100,0
	Total	19	100,0	100,0	

Détermination de longueur d'onde

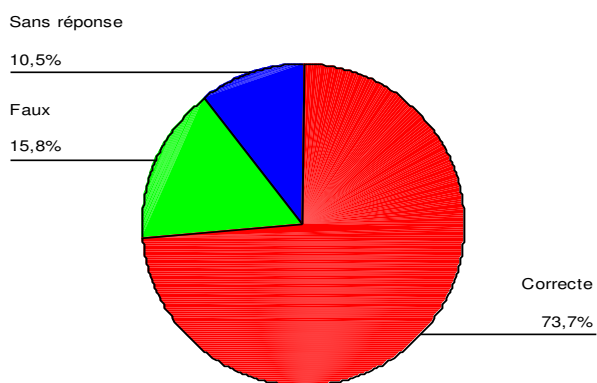


Annexes

Détermination de la célérité

		Fréquence	Pourcentage	Pourcentage valide	Pourcentage cumulé
Valide	Correct	14	73,7	73,7	73,7
	Faux	3	15,8	15,8	89,5
	Sans réponse	2	10,5	10,5	100,0
	Total	19	100,0	100,0	

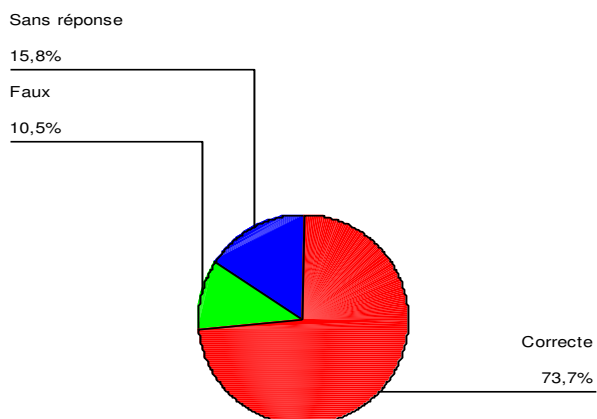
Détermination de la célérité



Détermination du front d'onde

		Fréquence	Pourcentage	Pourcentage valide	Pourcentage cumulé
Valide	Correct	14	73,7	73,7	73,7
	Faux	2	10,5	10,5	84,2
	Sans réponse	3	15,8	15,8	100,0
	Total	19	100,0	100,0	

Détermination du front d'onde

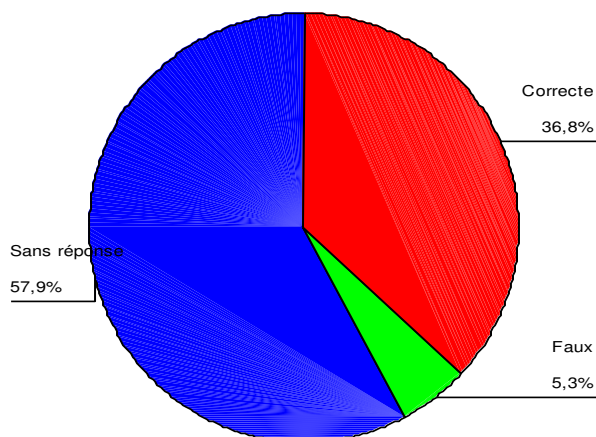


Annexes

Détermination de l'instant de l'aspect de la corde

		Fréquence	Pourcentage	Pourcentage valide	Pourcentage cumulé
Valide	Correct	7	36,8	36,8	36,8
	Faux	1	5,3	5,3	42,1
	Sans réponse	11	57,9	57,9	100,0
	Total	19	100,0	100,0	

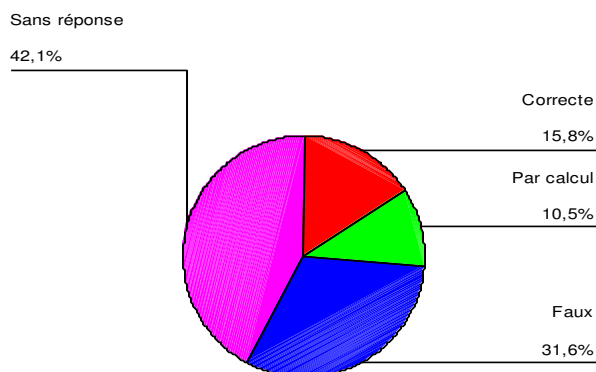
Détermination de l'instant de l'aspect de la corde



Détermination des points en opposition avec la source

		Fréquence	Pourcentage	Pourcentage valide	Pourcentage cumulé
Valide	Correct	3	15,8	15,8	15,8
	Par calcul	2	10,5	10,5	26,3
	Faux	6	31,6	31,6	57,9
	Sans réponse	8	42,1	42,1	100,0
	Total	19	100,0	100,0	

Détermination des points en opposition avec la source



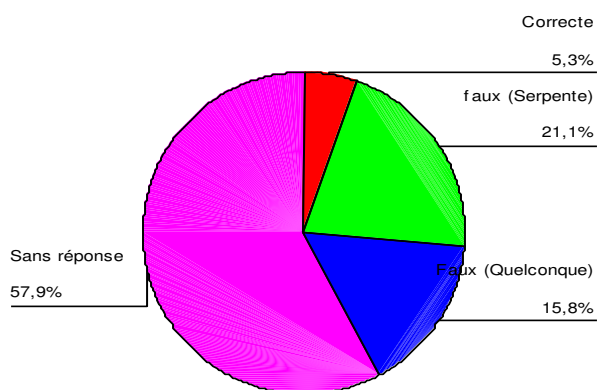
Annexes

Représentation à partir du graphique l'aspect de la corde à une date t

Représentation à partir du graphique l'aspect de la corde à une date t

		Fréquence	Pourcentage	Pourcentage valide	Pourcentage cumulé
Valide	Correct	3	15,8	15,8	15,8
	faux (Serpente)	2	10,5	10,5	26,3
	Faux (Quelconque)	3	15,8	15,8	42,1
	Sans réponse	11	57,9	57,9	100,0
	Total	19	100,0	100,0	

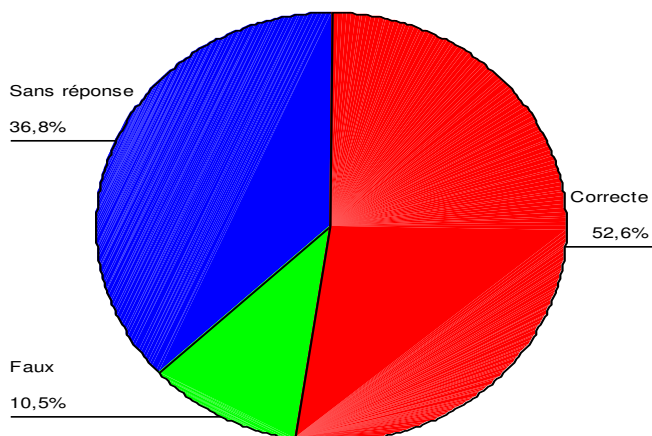
tion à partir du graphique l'aspect de la corde :



Détermination de l'équation horaire de la source

		Fréquence	Pourcentage	Pourcentage valide	Pourcentage cumulé
Valide	Correct	10	52,6	52,6	52,6
	Faux	2	10,5	10,5	63,2
	Sans réponse	7	36,8	36,8	100,0
	Total	19	100,0	100,0	

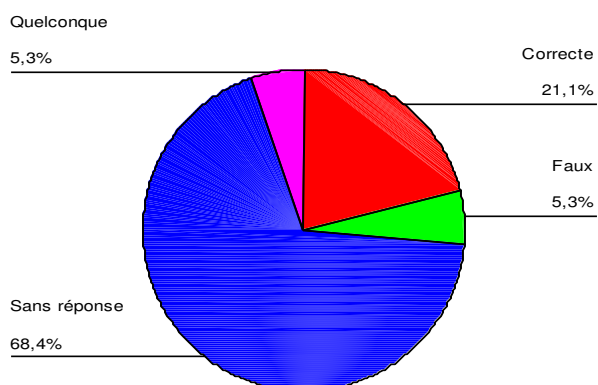
Détermination de l'équation horaire de la source



Représentation de la sinusoïde de temps

		Fréquence	Pourcentage	Pourcentage valide	Pourcentage cumulé
Valide	Correct	4	21,1	21,1	21,1
	Faux	1	5,3	5,3	26,3
	Sans réponse	13	68,4	68,4	94,7
	Quelconque	1	5,3	5,3	100,0
	Total	19	100,0	100,0	

Représentation de la sinusoïde de temps



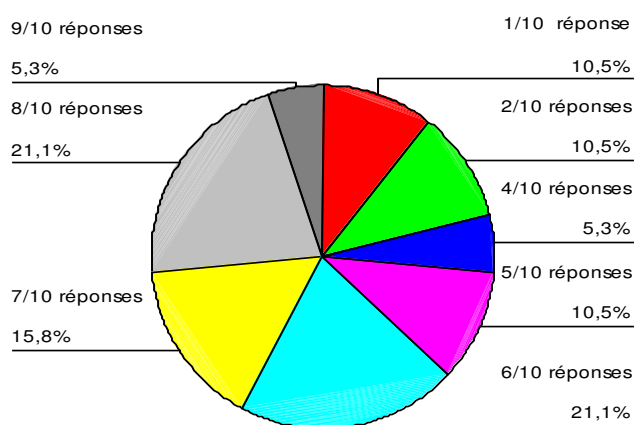
Annexes

Nombre de réponses correctes par élève

Nombre de réponses correctes par élève

		Fréquence	Pourcentage	Pourcentage valide	Pourcentage cumulé
Valide	1/10 réponse	2	10,5	10,5	10,5
	2/10 réponses	2	10,5	10,5	21,1
	4/10 réponses	1	5,3	5,3	26,3
	5/10 réponses	2	10,5	10,5	36,8
	6/10 réponses	4	21,1	21,1	57,9
	7/10 réponses	3	15,8	15,8	73,7
	8/10 réponses	4	21,1	21,1	94,7
	9/10 réponses	1	5,3	5,3	100,0
	Total	19	100,0	100,0	

Nombre de réponses correctes par élève

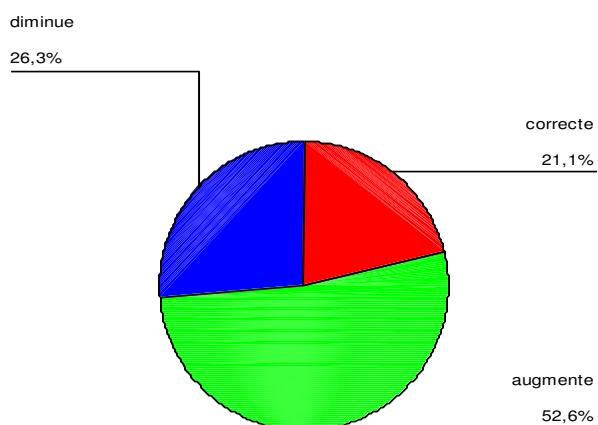


Statistique des résultats des réponses des élèves sur les questions des prévisions

1. Variation de la célérité d'une onde mécanique

		Fréquence	Pourcentage	Pourcentage valide	Pourcentage cumulé
Valide	correct	4	21,1	21,1	21,1
	augmente	10	52,6	52,6	73,7
	diminue	5	26,3	26,3	100,0
	Total	19	100,0	100,0	

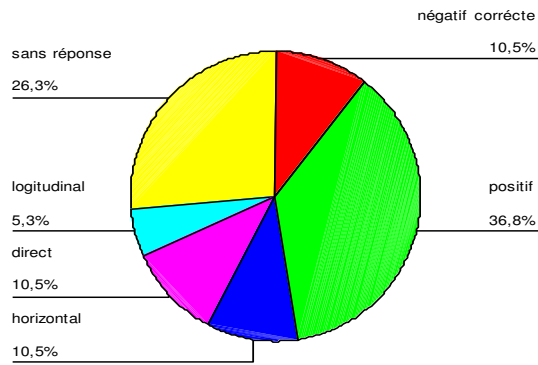
Variation de la célérité d'une onde mécanique



2. Prévoir le sens de déplacement de la source

		Fréquence	Pourcentage	Pourcentage valide	Pourcentage cumulé
Valide	négatif correct	2	10,5	10,5	10,5
	positif	7	36,8	36,8	47,4
	horizontal	2	10,5	10,5	57,9
	direct	2	10,5	10,5	68,4
	longitudinal	1	5,3	5,3	73,7
	sans réponse	5	26,3	26,3	100,0
	Total	19	100,0	100,0	

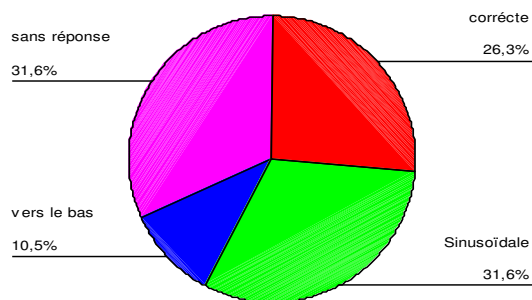
Prévoir le sens de déplacement de la source



3. Déplacement du front d'onde

		Fréquence	Pourcentage	Pourcentage valide	Pourcentage cumulé
Valide	correct	5	26,3	26,3	26,3
	Sinusoïdale	6	31,6	31,6	57,9
	vers le bas	2	10,5	10,5	68,4
	sans réponse	6	31,6	31,6	100,0
	Total	19	100,0	100,0	

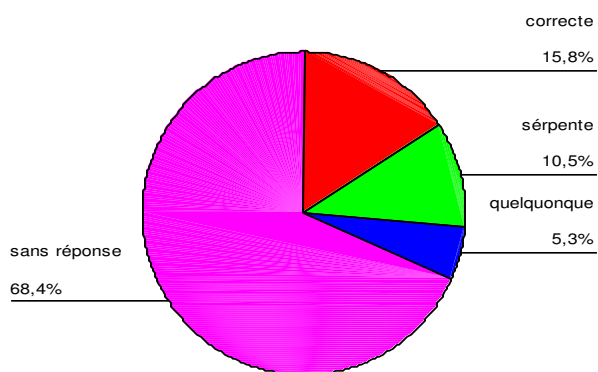
Déplacement du front d'onde



4. Représenter l'aspect de la corde à partir de son aspect ultérieur

		Fréquence	Pourcentage	Pourcentage valide	Pourcentage cumulé
Valide	correct	3	15,8	15,8	15,8
	serpente	2	10,5	10,5	26,3
	quelconque	1	5,3	5,3	31,6
	sans réponse	13	68,4	68,4	100,0
	Total	19	100,0	100,0	

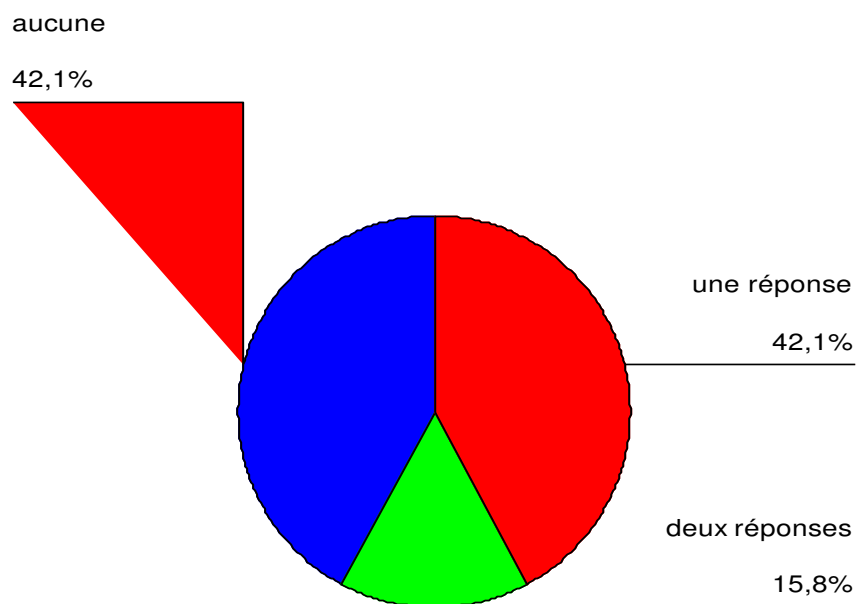
nter l'aspect de la corde à partir de son aspect



5. Nombre de réponse correcte par élève

			Fréquence	Pourcentage	Pourcentage valide	Pourcentage cumulé
Valide		une réponse	8	42,1	42,1	42,1
		deux réponses	3	15,8	15,8	57,9
		aucune	8	42,1	42,1	100,0
		Total	19	100,0	100,0	

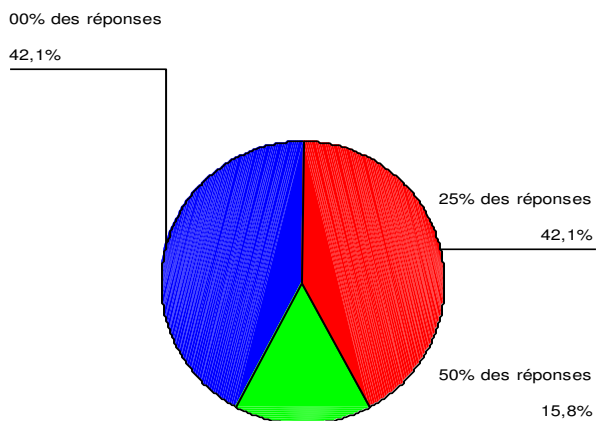
Nombre de réponse correcte par élève



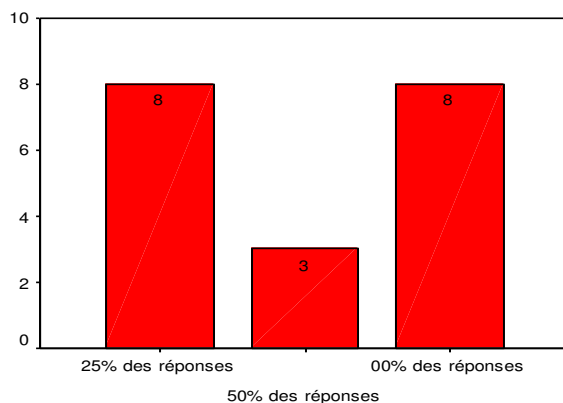
6. Nombre de réponse correcte par élève

		Fréquence	Pourcentage	Pourcentage valide	Pourcentage cumulé
Valide	25% des réponses correctes	8	42,1	42,1	42,1
	50% des réponses correctes	3	15,8	15,8	57,9
	00% des réponses correctes	8	42,1	42,1	100,0
	Total	19	100,0	100,0	

Pourcentage des réponses correcte par élève



Pourcentage des réponses correcte par élève

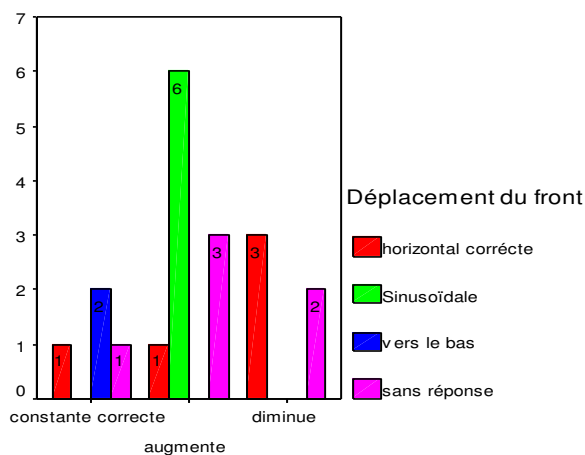


Pourcentage des réponses correcte par élève

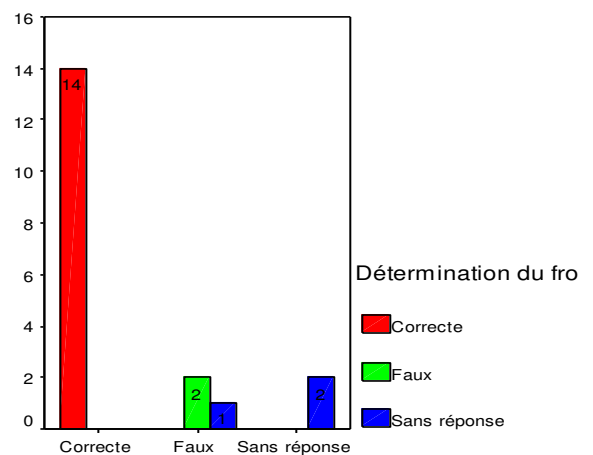
Fréquence tableaux croisés

Célérité et front d'onde

Etude comparative, entre les prévisions des élèves et leurs repenses lors du devoir de contrôle. Nous s'intéressons dans cette étape aux repenses des élèves sur deux concepts clés qui sont traités lors de la séance des travaux pratiques dans laquelle l'enseignant a adopté la nouvelle méthode enseignement par PCDR. Les concepts sont celle de la célérité d'une onde mécanique et le front d'onde sa position et la nature de son mouvement, les résultats sont présentés par ces deux diagrammes



Variation de la celerité d'une onde mécanique



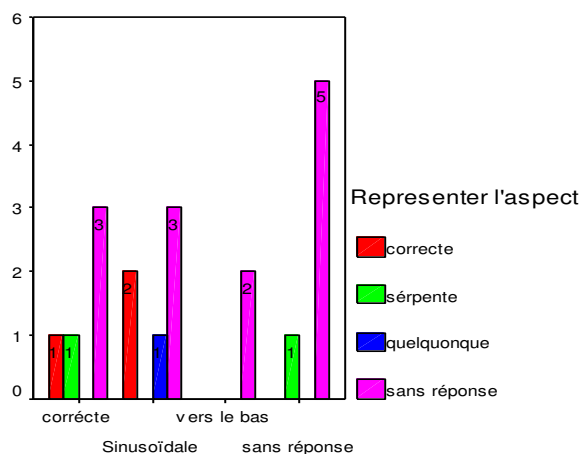
Détermination de la célérité

2. Front d'onde et représentation de l'aspect de la corde

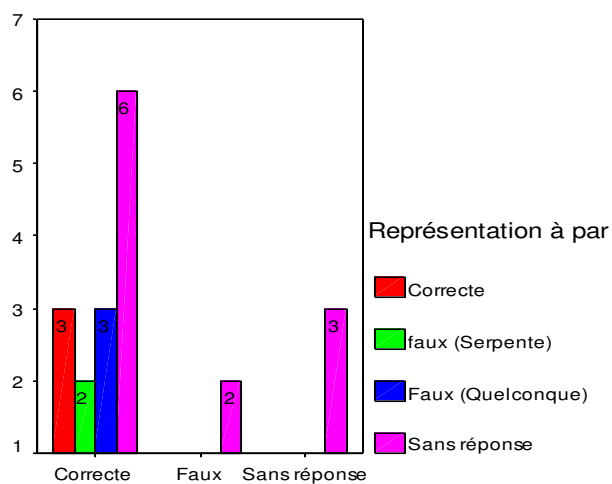
Les réponses au cours du devoir sont moins variées par rapport aux réponses sur les questions de prévisions.

Les élèves qui n'ont pas répondu correctement à la question sur le front d'onde, ils n'ont pas répondu positivement ou négativement à la question sur la représentation de l'aspect de la corde à un instant légèrement supérieur à celui de la courbe donnée

Annexes

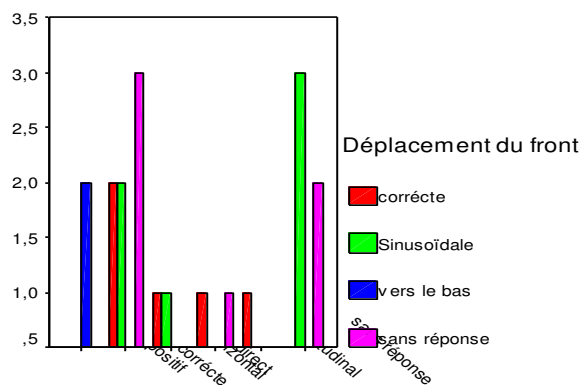


Déplacement du front d'onde

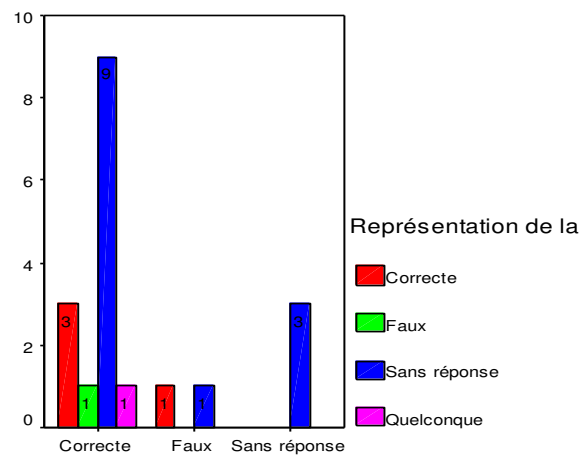


Détermination du front d'onde

3. Sens de déplacement de la source et sens de déplacement du front d'onde



Prévoir le sens de déplacement de la source



Détermination du front d'onde

Annexes

Prévisions :

- aucun n'a répondu correctement à ces deux questions
- Les réponses sont variées

Devoirs :

- 3 élèves ont répondu correctement à ces deux questions
- Les réponses ne sont plus variées

Annexe 5

Autorisation d'utilisation de la simulation dans le cadre de la recherche en didactique

Re: www.ostralo.net

Sam 17 Octobre 2009, 19 h 17 min 07 sDe : WILLM Adrien
<contact@ostralo.net>Ajouter dans les contacts

À : Ahmed BEN JEMAA <abj.2007@yahoo.fr>

Bonsoir Mr Ben Jemaa

Vous avez mon autorisation pour utiliser les simulations du site
www.ostralo.net dans le cadre de vos recherches en didactique.

Cordialement

Adrien Willm

Ahmed BEN JEMAA a écrit :

> Bonjour M. Adrien

> Je suis Ahmed BEN JEMAA enseignant des sciences physiques en Tunisie, je suis un chercheur en didactique des sciences physiques. Je me suis intéressé par vos travaux, et sur tout sur les simulations, précisément sur les ondes. Mon objet de recherche de mémoire de mastère, pour cela M. Adrien, je demande votre accord (par écrit pour les droits de propriétaire) pour utiliser quelques simulations et surtout celle de propagation d'une onde le long d'une corde à des fins de recherche en didactique et si vous avez d'autre simulations que vous voyez intéressantes notamment sur les ondes je serais très reconnaissant de votre aide, enfin M. Adrien si vous l'acceptez on pourra garder contact. Et je vous mettrai en contact de mes résultats de recherche, ainsi en pourra collaborer.

> Cordialement.

> Ahmed BEN JEMAA

Une ingénierie didactique fondée sur une démarche d'investigation avec simulation pour enseigner les ondes mécaniques au lycée

La thèse part d'un constat, fondé sur une revue de littérature, à propos des difficultés des élèves et des étudiants en rapport avec le concept onde. Ce constat est renforcé par notre étude empirique en master. L'objectif de notre travail est de construire, et de tester, une ingénierie didactique fondée sur une investigation proposant ainsi un enseignement diffère de la coutume en s'appuyant sur une simulation informatique. Après une introduction des principes et de l'intérêt de l'ingénierie didactique, notre travail est organisé en quatre parties. La première comporte une analyse épistémologique et historique du concept d'onde, où nos résultats montrent l'émergence et la persévérance de l'obstacle substantialiste. Ensuite, une analyse des séances d'enseignement ordinaire du concept d'onde est réalisée dans le cadre de la théorie de l'action conjointe en didactique. Cette analyse met en exergue la nature des pratiques dans cette classe de terminale tunisienne et montre les limites d'un tel enseignement, que nous considérons transmissif. L'analyse cognitive des concepts clés (célérité et front d'onde) permet d'étayer notre constat sur les difficultés rencontrées par les élèves. Une analyse du champ de contraintes clôt cette première partie. La deuxième partie consiste à justifier les choix effectués afin d'élaborer un scénario pédagogique basé sur une situation d'investigation de type PCDR, constituée de quatre moments : Prévission, Confrontation, Résolution et Discussion. La troisième partie est réservée d'une part, à la description détaillée de la méthodologie de recherche et de ses différents niveaux d'analyse et, d'autre part, à une analyse a priori de la séance de travaux pratiques de type PCDR. Pour finir, la quatrième partie propose une analyse des activités menées au cours de la séance de travaux pratiques sur les ondes dans un lycée de banlieue de Tunis et une évaluation du scénario pédagogique. Les résultats obtenus sont satisfaisants par rapport à nos attentes. En effet, les discussions des élèves traduisent un réel intérêt pour résoudre certaines situations d'investigations proposées. De plus, l'analyse des résultats du post-test montre que la séance d'enseignement par PCDR a contribué à l'amélioration du nombre des réponses correctes des élèves et de leurs modes de raisonnements.

Mots-clés : *ondes, enseignement ordinaire, simulation, démarche d'investigation, TACD, ingénierie didactique*

A didactic engineering based on an investigation approach with simulation to teach the mechanical waves to the high school

The thesis begin with a report, Based on a review of the literature, about the difficulties of the pupils and the students in relation to the concept wave. This report is strengthened by our empirical study in master's degree. The objective of our work is to build, and to make out to test, a didactic engineering based on an investigation so proposing an education differ from the custom resting on an IT simulation. After an introduction of the principles and the interest of the didactic engineering, our work is organized in four parts. The first one contains an epistemological analysis and a historic of the concept of wave, where our results show the emergence and the perseverance of the obstacle substantialist. Then, an analysis of the sessions of ordinary education of the concept of wave is realized within the framework of the theory of the joint action in didactics. This analysis highlights the nature of the practices in this Tunisian terminal classes of high school and shows the limits of such an teaching, as we consider transmissif. The cognitive analysis of the key concepts (vibration velocity and wave front) allows to support our report on the difficulties met by pupils . An analysis of the field of constraints closes this first part. The second part consists in justifying choices made to develop an educational scenario based on a situation of type PCDR's inquiry, constituted of four moments: forecast, Confrontation, Resolution and discussion. The third part is reserved on one hand, in the detailed description of the methodology of search and its various levels of analysis and, on the other hand, in an analysis a priori of the practical session of teaching of type PCDR. To finish, the fourth part proposes an analysis of the activities led during the session on the waves in a suburban high school of Tunis and an evaluation of the educational scenario. The obtained results are satisfactory with regard to compared with our waits. Indeed, the discussions of the pupils translate a real interest to solve certain situations of proposed inquiry. Furthermore, the analysis of the results of the post-test shows that the session of teaching with approach by PCDR contributed to the improvement of the number of the correct answers of the pupils and their ways of reasoning.

Keywords: *waves, ordinary teaching, simulation, investigation approach, TACD, didactic engineering.*

Thèse de Doctorat en Sciences de l'Éducation
CREAD - (EA3875) IUFM-UBO
153, rue de Saint Malo 35043 Rennes Cedex
Université de Bretagne occidentale

Thèse de Doctorat en Didactique des Sciences Physiques
ECOTIDI, DISEMEF-ISEFC
42 Avenue de la Liberté, Tunis 2000
Université virtuelle de Tunis